

P. SANCHEZ

SUELOS DEL TROPICO

IICA

Pedro A. Sánchez

suelos del trópico

CARACTERÍSTICAS Y MANEJO



1881
JAN 30
1881

**SUELOS
DEL TROPICO**
CARACTERISTICAS Y MANEJO

SUELOS DEL TROPICO

CARACTERISTICAS Y MANEJO

Pedro A. Sánchez

Coordinador del Programa de Suelos Tropicales
Departamento de la Ciencia del Suelo
Universidad Estatal de Carolina del Norte
Raleigh, (EUA)

Traductor:

Edilberto Camacho

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA
San José, Costa Rica
1981

This One



UDJZ-YX9-2TZU

© Pedro A. Sánchez.

© John Wiley Sons, Inc., para PROPERTIES AND MANAGEMENT OF SOILS IN THE TROPICS, 1976.

© para esta primera edición en español, IICA, 1981.

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin permiso del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Diseño de la cubierta: Guillermo Marín.

Levantado de texto: Zaida Sequeira.

Índice de materias: Albert Bornemisza.

Editora de la obra: Matilde de la Cruz.

Editor de la Serie: Julio Escoto B.

IICA

LME-48 Sánchez, Pedro

Suelos del Trópico : características y manejo / Traducido del inglés por Edilberto Camacho. -- [1. ed.]. -- San José, Costa Rica : IICA, 1981.

660 p. -- (IICA : Serie de libros y materiales educativos ; 48).

Título de la edición en inglés: Properties and management of soils in the Tropics.

ISBN 92-9039-017-4

1. Suelos tropicales -- Manejo. I. Título. II. Serie.

AGRIS F26



DEWEY 631.4913

Serie de Libros y Materiales Educativos No. 48

Este libro fue publicado por la Dirección de Información Pública y Comunicaciones del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura -IICA-. La Serie de Libros y Materiales Educativos tiene como fin contribuir al desarrollo agrícola del continente americano.

San José, Costa Rica, 1981.

CONTENIDO

	Pág. No.
PREFACIO	ix
CAPITULO 1. EL AMBIENTE TROPICAL (1-53)	
Temperatura y radiación solar	2
Precipitación pluvial	8
Vegetación	18
Geología	25
Agricultura	31
Resumen y conclusiones	49
Referencias	51
CAPITULO 2. SUELOS DE LOS TROPICOS (54-98)	
Sistemas de clasificación de suelos usados en los trópicos	56
Distribución geográfica	72
Asociaciones de suelos en el paisaje	76
Resumen y conclusiones	88
Referencias	90
CAPITULO 3. PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO (99-139)	
Profundidad de enraizamiento	99
Estructura del suelo	100
Retención del agua del suelo	111
Movimiento del agua del suelo	114
Adaptación de cultivos a un suministro variable de agua	117
Pérdidas por lixiviación	121
Escorrentía	122
Erosión	124
Temperatura del suelo	126
Resumen y conclusiones	130
Referencias	132

CAPITULO 4. MINERALOGIA DE LA ARCILLA Y PROCESOS DE INTERCAMBIO IONICO (140-166)

Sistemas de silicatos laminares	144
Sistemas de óxidos	145
Sistemas de silicatos laminares con revestimientos de óxidos	152
Niveles de intercambio catiónico y aniónico	153
Manejo de la capacidad de intercambio catiónico	159
Resumen y conclusiones	161
Referencias	162

CAPITULO 5. MATERIA ORGANICA DEL SUELO (167-186)

Contenido	167
Adiciones y descomposiciones	172
Efectos de la labranza	174
Efectos provechosos	178
Aplicaciones de abonos orgánicos	179
Resumen y conclusiones	182
Referencias	184

CAPITULO 6. NITROGENO (187-225)

Nitrógeno orgánico del suelo	187
Fluctuaciones estacionales del nitrógeno inorgánico	192
Reacciones entre fertilizantes nitrogenados y el suelo	197
Requisitos de nitrógeno de cultivos tropicales	201
Manejo de los fertilizantes nitrogenados	207
Efectos residuales de la fertilización nitrogenada	215
Resumen y conclusiones	218
Referencias	219

CAPITULO 7. ACIDEZ DEL SUELO Y ENCALAMIENTO (226-258)

Naturaleza de la acidez del suelo	226
Causas de infertilidad de suelos ácidos	233
Diferencias entre cultivos y variedades	236
Encalado	243
Sobreencalamiento	250
Resumen y conclusiones	252
Referencias	254

CAPITULO 8. FOSFORO, SILICIO Y AZUFRE (259-300)

Contenido y formas de fósforo	259
Fijación y liberación de fósforo	263
Necesidades de fósforo de los cultivos tropicales	268

Manejo de fertilizantes fosfatados	275
El silicio como nutrimento	284
Deficiencia de azufre	286
Contenidos y formas de azufre	286
Adsorción y liberación de azufre	289
Necesidades de azufre de los cultivos tropicales	291
Fertilización con azufre	291
Resumen y conclusiones	292
Referencias	295

CAPITULO 9. EVALUACION DE LA FERTILIDAD DEL SUELO (301-353)

Sistemas de evaluación de la fertilidad basados en análisis de suelo	301
Sistemas de evaluación de la fertilidad basados en análisis de plantas	328
Sistemas de evaluación de la fertilidad basados en técnicas del elemento faltante	333
Ensayos simples de fertilización en campos de agricultores	334
Relaciones entre fertilidad del suelo y clasificación de suelos	337
Resumen y conclusiones	341
Referencias	343

CAPITULO 10. MANEJO DEL SUELO EN AREAS DE AGRICULTURA NOMADA (354-421)

Sistemas de agricultura nómada	354
Ciclos de los nutrimentos en suelos de bosque	357
Cambios en las propiedades físicas del suelo bajo agricultura nómada	366
Cambios en el nivel nutritivo del suelo bajo agricultura nómada	371
Descensos de rendimiento de cultivos en agricultura nómada	382
Mejoramiento de la producción en la agricultura nómada	389
Cambio de agricultura nómada a agricultura continua	397
Resumen y conclusiones	412
Referencias	415

CAPITULO 11. MANEJO DEL SUELO EN SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ (422-490)

Efectos de la inundación en las propiedades físicas del suelo	422
Fanguero	425
Consecuencias químicas de la inundación	430
Sistemas de cultivo de arroz	447
Manejo del agua	451
Manejo del nitrógeno	460
Manejo del fósforo	471
Manejo de otros nutrimentos	473
Resumen y conclusiones	480
Referencias	482

CAPITULO 12. MANEJO DEL SUELO EN SISTEMAS DE CULTIVOS MULTIPLES (491-559)

Sistemas de cultivos múltiples de pequeña agricultura	492
Relaciones planta-suelo en sistemas intercalados	511
Sistemas secuenciales de cultivos	540
Resumen y conclusiones	540
Referencias	542

CAPITULO 13. MANEJO DEL SUELO PARA PRODUCCION DE PASTURAS TROPICALES (550-624)

Pasturas naturales	552
Pasturas mejoradas con base en mezclas de gramíneas y leguminosas	559
Producción de pastura y forraje basada en fertilización intensiva de gramíneas	590
Alternativas para producir pastos durante la estación seca	606
Resumen y conclusiones	607
Referencias	610
INDICE DE MATERIAS	625

PREFACIO

El propósito de este libro es aplicar los principios de la ciencia del suelo a las condiciones tropicales, con énfasis en las maneras de aumentar la producción de alimentos en los países en desarrollo. Aun cuando estos principios son universales, su aplicación es específica para el sitio. El manejo apropiado de los suelos tropicales se considera como uno de los componentes críticos en la disputa mundial entre producción de alimentos y crecimiento de la población. Mucho trabajo valioso se ha llevado a cabo en los trópicos. Este libro compila la información disponible sobre las propiedades y el manejo de los suelos tropicales recolectada de la literatura y del trabajo que llevan a cabo varias instituciones.

La necesidad de esta síntesis la sentí primero mientras daba un curso de pregrado sobre fertilidad del suelo en la Universidad de Filipinas, hace once años. Los estudiantes tuvieron dificultades para encontrar ejemplos relativos a los principios de la ciencia del suelo en los libros de texto, los que se referían casi exclusivamente a agricultura de la región templada. Se preparó un esquema general, pero al quedar involucrado en un proyecto de investigación en arroz en Perú me impidió realizar más trabajos hasta que fui transferido a Raleigh con funciones de enseñanza e investigación en suelos tropicales, en 1971.

Este libro está basado en un curso con el mismo título dictado en la Universidad de Carolina del Norte y durante los cuatro años anteriores para estudiantes avanzados de pregrado y para estudiantes graduados. El nivel de presentación supone el conocimiento de la ciencia elemental del suelo. La primera sección (Capítulos 1 y 2) define el ambiente tropical en términos físicos y humanos y la distribución y clasificación geográfica de los suelos de los trópicos. La segunda sección (Capítulos 3 a 9) enfoca las relaciones específicas entre suelo y planta, en referencia con las propiedades físicas y químicas del suelo, la materia orgánica, los nutrimentos de las plantas y los métodos de evaluación de la fertilidad del suelo. La tercera sección (Capítulos 10 a 13) integra los conceptos previos en términos de los cuatro principales sistemas de manejo del suelo que se encuentran en los trópicos:

agricultura nómada, cultivo de arroz, cultivos múltiples y producción de pasturas. El haberse limitado al tratamiento de estos tópicos no significa que ellos sean los únicos de importancia, sino más bien refleja las limitaciones de tiempo.

Este libro sirve como texto en cursos sobre suelos tropicales y como referencia para científicos en agricultura y funcionarios de desarrollo interesados en los trópicos. La lista de referencia al final de cada capítulo, incluye las que se citan en el texto y otras adicionales de importancia, para un mayor estudio de los lectores interesados.

Deseo agradecer la ayuda de varias personas que contribuyeron a la preparación de este libro; mi gratitud para mis estudiantes del Curso 501 de Ciencia del Suelo, por sus interesantes preguntas y la crítica de los conceptos y ejemplos presentados. Por la revisión de varios capítulos estoy en deuda con mis colegas E. J. Kamprath, R. B. Cate, Jr., S. W. Buol, W. L. Johnson y C. K. Hiebsch, de la Universidad de Carolina del Norte; G. Uehara, de la Universidad de Hawaii; S. K. DeDatta, del International Rice Research Institute; y José Toledo, del Instituto Veterinario de investigación del Trópico y Altura, Perú. Por el trabajo de mecanografía y revisión del manuscrito, mi agradecimiento para Miss Bertha Monar, Mrs. Dawn Silsbee y Mrs. Patrice Hill. Para R. J. McCracken y C. B. McCants, Jefes anteriores y actual, del Departamento de Ciencia del Suelo, mi agradecimiento por alentarme para que escribiera este libro.

Por el permiso para el uso de materiales de propiedad literaria deseo expresar mi agradecimiento a Academic Press, American Association for the Advancement of Science, American Society of Agronomy, Armand Colin Publishers, Australian Journal of Agricultural Research, Biometeorology, Cambridge University Press, Centre for Agricultural Publications and Documentation of Wageningen, CSIRO Australia, Experimental Agriculture, Journal of Agricultural Science, Journal of Soil Science, IRI Research Institute, Mouton and Company, Plant and Soil, Soil Science, Soil Science Society of America, y University of Queensland Press.

A mi esposa Wendy y mis hijos Jennifer y Evan, mi gratitud por su paciencia y comprensión y a ellos dedico este trabajo.

Pedro A. Sánchez

*Raleigh, Carolina del Norte
Junio, 1976*

CAPITULO 1

EL AMBIENTE TROPICAL

El propósito de este capítulo es proporcionar un marco del ambiente físico y social de los trópicos. En la opinión del autor no hay nada especial o único acerca de los suelos tropicales que no pueda comprenderse mediante análisis. Lo que resulta especial y único es la forma en que los suelos se comportan y se manejan dentro del ambiente tropical. Por tal razón se justifica un vistazo general del ambiente tropical.

Según la definición geográfica los trópicos son “la parte del mundo situada entre los 23,5 grados norte y sur del Ecuador”. Debido a la inclinación del eje terrestre, esta latitud constituye el límite de la migración aparente del sol al norte y al sur del Cenit. Por lo tanto, los trópicos constituyen la única parte del mundo en donde el sol pasa directamente sobre nuestras cabezas.

Los trópicos comprenden el 38% de la superficie terrestre (aproximadamente 5 billones de hectáreas) y el 45% de la población del mundo (alrededor de 1.800 mil millones de habitantes en 1975). Alrededor de 72 países y territorios yacen totalmente o en su mayor parte antes de los trópicos, incluyendo la mayoría de los países en desarrollo, excepto China, Paquistán, Afganistán, Irán, el Oriente Medio, Africa del Norte, Argentina, Chile y Uruguay. Solamente Australia tropical y los estados de Hawaii (Estados Unidos) y de São Paulo (Brasil) se consideran como “áreas desarrolladas” en los trópicos. En consecuencia, desde el punto de vista económico, las áreas tropicales equivalen esencialmente a “áreas en desarrollo” aún cuando lo contrario no es cierto.

La literatura está llena de intentos de cuantificar con precisión las partes tropicales del mundo en comparación con las extratropicales. Este libro usa el concepto estrictamente geográfico, el cual incluye tanto las tierras altas y frías de los trópicos, como las tierras bajas y calientes. Al igual que cualquier definición cuantitativa, ésta pierde parte de su significado a medida que se acerca a los límites porque estos cambios son graduales. Los datos tabulares que se presentan siguen la definición latitudinal pero se basan en países completos. Se incluyen partes del norte de India, norte de Bangladesh, norte de

México, y sur del Brasil que quedan fuera de los trópicos, y se excluyen partes del sur de China que están dentro de los trópicos.

TEMPERATURA Y RADIACION SOLAR

TEMPERATURA

La razón para escoger la definición latitudinal es la facilidad de cuantificación en términos de temperaturas del aire. Los trópicos pueden definirse como la parte del mundo en donde la variación de la temperatura media mensual es de 5°C (9°F) o menos entre el promedio de los tres meses más calientes y los tres más fríos. El Cuadro 1.1 presenta las temperaturas mensuales promedio de enero y julio. La variación diaria está también dentro de este ámbito.

CUADRO No. 1.1. Temperaturas medias mensuales del aire en latitudes tropicales al nivel del mar (°C).

Latitud	Enero	Julio	Media anual
20° N	22	28	26
15° N	24	28	26
10° N	26	27	26
5° N	26	24	26
0	26	25	26
5° S	26	25	26
10° S	26	24	25
15° S	26	23	24
20° S	25	20	23

Esta definición incluye las tierras altas tropicales, estando su diferencia en sus temperaturas generalmente más bajas. Las temperaturas medias anuales generalmente bajan 0,6°C por cada 100 m de aumento de elevación en los trópicos. Si por ejemplo, a nivel del mar la temperatura media anual es de 26°C, a 1000 m será de 20°C y a 2000 m de 14°C. Las variaciones locales en topografía, precipitación pluvial y otros factores, frecuentemente afectan estos parámetros.

Las temperaturas bajas pero constantes de las tierras altas de los trópicos constituyen una de las razones por las cuales ciertos cultivos

de clima templado como duraznos y manzanas, que necesitan fuertes heladas en invierno para dar rendimientos altos, se comportan deficientemente en las tierras frías del trópico. Las temperaturas son más altas en las regiones templadas durante la época de crecimiento que en las tierras altas tropicales. En Carolina del Norte, Estados Unidos, se necesita alrededor de 5 meses para una cosecha de maíz y más o menos el mismo tiempo en las tierras bajas de Colombia. Sin embargo, en Bogotá, Colombia, con una altura de 2.800 m, el maíz requiere 11 meses para su cosecha.

La variación mínima de temperatura tiene lugar a menos de 6 grados de latitud; conforme aumenta la latitud, también aumenta la variación en temperatura alcanzando los valores máximos en las áreas desérticas cercanas al trópico de Cáncer. La mayor variación en temperatura ocurre en las áreas de menor precipitación pluvial y en aquellas con una precipitación pluvial pronunciada pero distribuida irregularmente.

Las temperaturas del suelo en los trópicos, tal como las define el Sistema de Taxonomía de Suelos de Estados Unidos, caen en las categorías de regímenes de "isotemperatura", es decir, "menos de 5°C de diferencia entre la temperatura media del verano y la temperatura media del invierno a 50 cm de profundidad, o a un contacto lítico si la profundidad es menor (Soil Survey Staff, 1970). Según Smith et al (1964), la temperatura media anual del aire se aproxima mucho a la temperatura media anual del suelo en los trópicos. Los siguientes regímenes de temperatura del suelo se pueden estimar con base en la temperatura media anual y los datos de elevación:

Régimen de temperatura	Temperatura media anual (°C)	Elevación (m)
Isohipertérmico	>22	0-600
Isotérmico	15-22	600-1800
Isoméxico	8-15	1800-3000
Isofrígido	<8	>3000

La definición anterior no incluye la variación de temperaturas del suelo en su capa arable. Esto se ilustra en el Cuadro 1.2 en que se muestran las variaciones mensuales y diarias de las temperaturas del aire y del suelo de un suelo de Indonesia. En la superficie de suelos sin cubierta vegetal se han registrado temperaturas muy altas durante períodos de sequía. Mohr et al (1972) informan de un valor de 86°C en la superficie de un suelo sin vegetación en Zaire. A una profundidad de 10 cm, el mismo suelo tenía una temperatura casi normal de

30°C. En el mismo sitio la temperatura de la superficie del suelo era de 34°C bajo pasto y de 25°C bajo bosque. A menos que el suelo esté expuesto, sus temperaturas, aún en la superficie, no exceden notoriamente la temperatura del aire.

CUADRO No. 1.2. Variaciones mensuales y diarias de temperatura del suelo en Djakarta, Indonesia (°C). (Fuente: Mohr et al, 1972).

Profundidad del suelo (cm)	Máximo mensual	Mínima mensual	Variación diaria
aire	26,6	22,5	6,9
3	29,9	28,3	5,2
5	29,9	28,7	5,0
10	29,9	28,9	3,1
15	30,0	28,7	1,5
30	30,0	28,5	0,3
60	30,8	28,5	0,05
90	29,8	28,7	0,04
110	29,7	28,8	0,04

Esto se debe en parte a que la capacidad calórica de los suelos, alrededor de 0,2 g-cal/cc, es una quinta parte de la capacidad calórica del agua. Cualquier exceso de calor es radiado hacia la atmósfera. Por esta razón no se puede freír un huevo ni aún en el suelo más caliente, mientras que sí es posible hacerlo sobre asfalto.

La gente no familiarizada con la región tropical por lo general la considera opresivamente caliente y húmeda. Aunque tal condición existe, es una generalización tan amplia como considerar la región templada opresivamente fría y seca. En Washington, D.C. hay condiciones más opresivas de calor y humedad durante el verano que en el corazón de la selva amazónica, en donde se puede contar siempre con brisas nocturnas frescas. Con respecto a temperaturas —del suelo o del aire— en los trópicos, lo que debe recordarse principalmente es su constancia más que cualquier valor absoluto.

RADIACION SOLAR

Los trópicos reciben más radiación solar anual aprovechable para fotosíntesis que la región templada debido a tres factores: 1) la inclinación del eje terrestre expone los trópicos a mayor radiación solar anual en la atmósfera externa que a la región templada; 2) el paso de los rayos solares a través de una atmósfera más delgada (por razón de

un ángulo más perpendicular) en los trópicos, disminuye la cantidad de radiación absorbida por la atmósfera. Del 56 al 59% de la radiación solar en el borde de la atmósfera llega a la superficie de la tierra en los trópicos. En la región templada el 46% de la radiación llega a la superficie a 40° de latitud. Mayor cantidad de rayos ultravioleta y azul-violeta llegan a la superficie del suelo en los trópicos que en la región templada; 3) la época de crecimiento, limitada por la temperatura, es más larga en los trópicos (excepto en las elevaciones muy altas).

La Fig. 1.1 presenta un mapa global de la radiación solar anual que llega a la superficie de la tierra. El promedio diario en los trópicos es alrededor de 400 langleys* por día. La variación estacional depende principalmente de los patrones de distribución de las lluvias. En áreas con distribución uniforme, tales como bosques pluviales o desiertos hay poca estacionalidad en la radiación solar. Por otra parte, en áreas con diferentes estaciones lluviosa y seca, la nubosidad es causa de considerable estacionalidad. Por ejemplo, en los Baños, Filipinas, el promedio de radiación solar en la estación seca es de 417 langleys por día, en comparación con 341 en la estación lluviosa. Estas diferencias tienen un gran impacto en los rendimientos de varios cultivos y sus respuestas a fertilizantes.

En la zona templada el promedio diario de radiación solar es la mitad de lo que es en los trópicos (200 langleys por día), pero con una gran variabilidad estacional entre el verano y el invierno (cerca de 500 en el verano y 150 en el invierno según Landsberg, 1961). El Cuadro 1.3 presenta los promedios mensuales de tres lugares tropicales con diferentes patrones de precipitación pluvial, en comparación con los valores de un sitio en la zona templada.

Los valores más altos de radiación solar corresponden a los bordes de los trópicos en ambientes áridos. En un sitio del Sudán se han registrado 600 langleys por día mientras que en algunas localidades en el Sahara, en la Península de Arabia, en el norte de India, en el norte de Venezuela y en el desierto de Kalahari han habido registros de más de 500, según Landsberg (1961). Las cifras más bajas de radiación solar corresponden a partes de bosques pluviales del Amazonas y del Congo.

Con base en la radiación solar y en la duración de la época de crecimiento vegetal, DeWitt (1967) estimó los rendimientos potenciales de cultivos alimenticios en varias fajas latitudinales. Los cálculos basados en sus datos indican que las áreas tropicales tienen aproximadamente el doble de potencial de producción por hectárea por año que las áreas templadas, suponiendo que no hay otros factores limitantes. De acuerdo con estos cálculos el rendimiento potencial anual para las latitudes tropicales es de 60 ton/ha de materia seca total, considerándose que aproximadamente la mitad de dicha cantidad

(*) 1 Langleys = 1 caloría por cm².

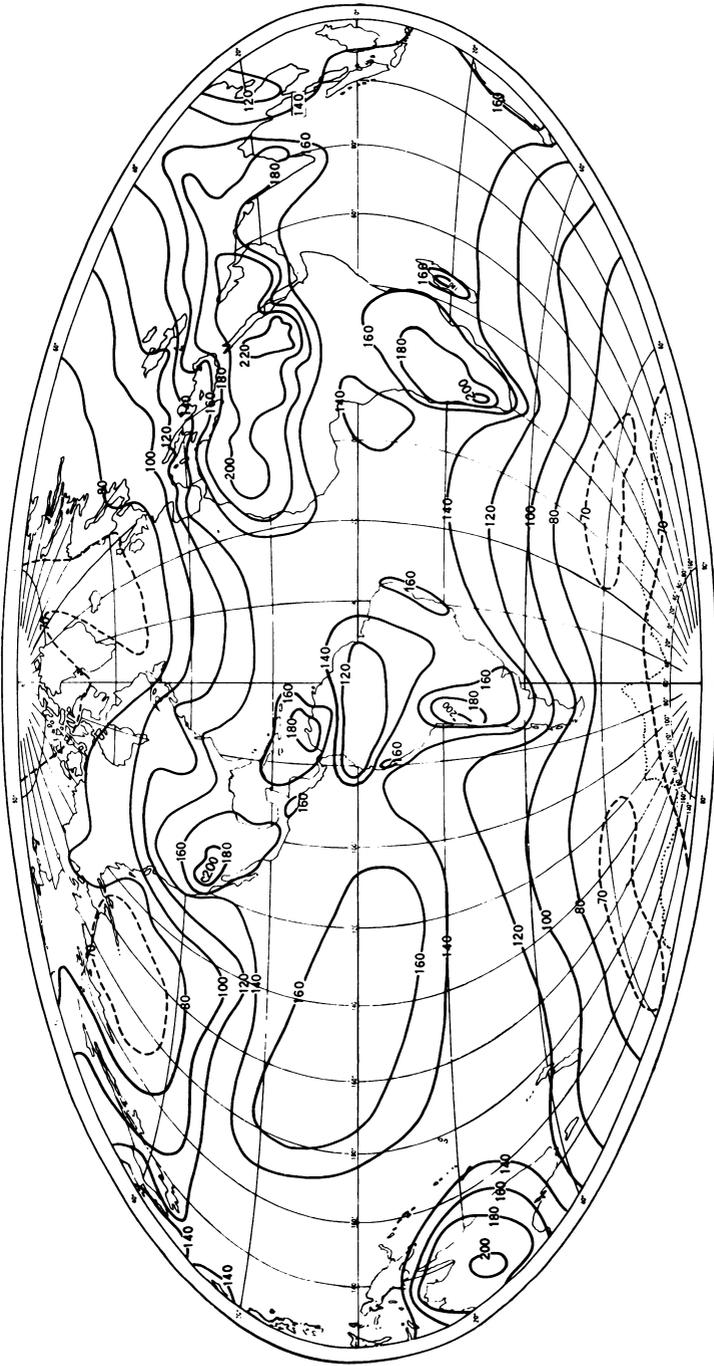


Fig. 1.1. Iso líneas generalizadas de radiación solar que llegan a la superficie de la tierra en 100 días langley/año. Fuente: Landsberg (1961).

CUADRO No. 1.3. Radiación solar en tres estaciones tropicales y una en la zona templada (en promedios mensuales de langleys/día).

Meses	Yurimaguas Perú 2087 mm de lluvia (sin estación seca)	Los Baños Filipinas 1847 mm de lluvia (4 meses estación seca)	Lambayeque Perú 19 mm de lluvia (desierto)	Ithaca, N. Y. E. U. A. 766 mm de lluvia (templado)
Enero	308	295	487	136
Febrero	309	361*	498	214
Marzo	237	379*	482	273
Abril	287	492*	456	359
Mayo	249	439*	405	470
Junio	263	377	355	515
Julio	342	383	321	492
Agosto	324	405	378	412
Setiembre	345	333	435	348
Octubre	379	355	481	242
Noviembre	326	317	484	107
Diciembre	309	263	503	106
Total	111.872	142.593	160.679	111.751
Media diaria	306	366	440	306

(*) Estación seca en Los Baños.

corresponde a rendimiento económico, tal como granos, tubérculos, etc. Rendimientos de esa magnitud o aproximados se han obtenido ya en los trópicos. Vicente-Chandler et al., (1964) han informado producciones anuales de 60 toneladas por hectárea de forraje seco en Puerto Rico. En el Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz de Filipinas, se obtuvieron 24 toneladas de arroz en cáscara por hectárea en un campo durante un año (IRRI, 1969). Estas cifras sobrepasan en mucho los registros de producción anual de la región templada y subrayan la importancia de la radiación solar durante todo el año como una gran ventaja de la agricultura tropical. Los agrónomos tropicales debieran tener como meta rendimientos máximos por año en lugar de rendimiento máximo por cultivo. El reto a los científicos agrícolas es la eliminación de los muchos factores limitantes que impiden el uso completo de la radiación solar durante todo el año.

FOTOPERIODO

En general en los trópicos los días son más cortos durante todo el año que los días durante la época de crecimiento en la zona templada. La duración del día cambia durante el año, con diferencias que van desde 0 en el Ecuador, a 2 horas y 50 minutos a 23,5° de latitud,

tal como se aprecia en el Cuadro 1.4. En la zona templada la variación en la longitud del día es mayor. Los cultivos tropicales se consideran como plantas de días cortos, pero muchos de ellos son muy sensibles al fotoperíodo. Algunas variedades de arroz, por ejemplo, son tan sensibles que un cambio de 10 minutos en la longitud del día impide su floración.

CUADRO No. 1.4. Duración máxima y mínima del día (salida y puesta del sol) en diferentes latitudes (horas y minutos). (Fuente: Blumenstock, 1958).

Latitud	Máxima	Mínima
0°	12:10	12:10
5°	12:30	11:50
10°	12:40	11:30
15°	13:00	11:10
23,5°	13:30	10:40
40°	15:00	9:20
50°	16:20	8:00
65°	22:00	3:30

A diferencia de la zona templada, en los trópicos la longitud del día y la radiación solar no están bien correlacionados. Por esa razón en los trópicos se presentan regímenes de iluminación-radiación con un ámbito más amplio.

PRECIPITACION PLUVIAL

La precipitación pluvial es el parámetro climático más importante para la agricultura tropical, en términos tanto de exceso como de déficit. Dada la relativa uniformidad en temperatura, la distribución de las lluvias constituye el criterio principal para clasificar climas tropicales. En los trópicos las estaciones son lluviosas o secas, y no calientes o frías. Por influencia de la terminología de la zona templada, en muchos países tropicales se usa el término "verano" como sinónimo de estación seca y el de "invierno" como sinónimo de estación lluviosa.

El Comité Científico Asesor del Presidente, (President's Science Advisory Committee, 1967) calculó la extensión de la tierra arable del mundo en donde la humedad limita el crecimiento de cultivos. En el Cuadro 1.5 aparece una versión resumida de los datos correspon-

dientes a los trópicos. En promedio, el 28% de los trópicos no presenta limitaciones de lluvia durante todo el año. La falta de lluvia limita el crecimiento durante 4 a 6 meses en el 42% del trópico y de 8 a 12 meses en el 30% restante. Por lo tanto, la humedad constituye un factor limitante en unas tres cuartas partes de las tierras arables de los trópicos.

CUADRO No. 1.5. Distribución de la tierra potencialmente cultivable en los trópicos sin limitaciones de temperatura, de acuerdo con la magnitud de la limitación por humedad del suelo (millones de hectáreas). (Fuente: calculado del President's Science Advisory Committee, 1967).

Limitación del crecimiento por la humedad (meses)	América Tropical	Africa Tropical	Asia Tropical y Pacífico	Total	Porcentaje
0	315	109	81	505	28
4	82	0	56	138	8
6	260	223	130	613	34
8	32	206	89	327	18
10	16	114	72	202	11
12	1	16	12	29	1
Total	706	668	440	1814	100

La precipitación pluvial anual varía de cero a 10.000 mm en los trópicos. En general la lluvia disminuye al aumentar la latitud, pero el relieve y otras condiciones locales afectan severamente esa relación. La duración de la estación seca también aumenta con la latitud, comenzando con cero en la cercanía del Ecuador. Los períodos de mayor lluvia ocurren cuando el sol está directamente sobre nuestras cabezas.

En la Fig. 1.2 aparece un diagrama idealizado. Aunque tal generalización es de un valor específico limitado se correlaciona bastante bien con la época y la duración de las estaciones secas, incluyendo la presencia de dos estaciones secas y dos estaciones lluviosas en algunas áreas dentro de los 5 grados del Ecuador.

La distribución de lluvias, más que la cantidad total, es el parámetro más importante de la precipitación pluvial. En los trópicos se reconocen cinco patrones principales, con base en la duración de la estación seca (President's Science Advisory Committee, 1967). Arbitrariamente se define como mes seco aquel con menos de 100 mm de lluvia. La distribución de tales patrones de precipitación pluvial se resumen en el Cuadro 1.6. Estos patrones son esencialmente una clasificación climática. La Fig. 1.3 presenta su distribución geográfica.

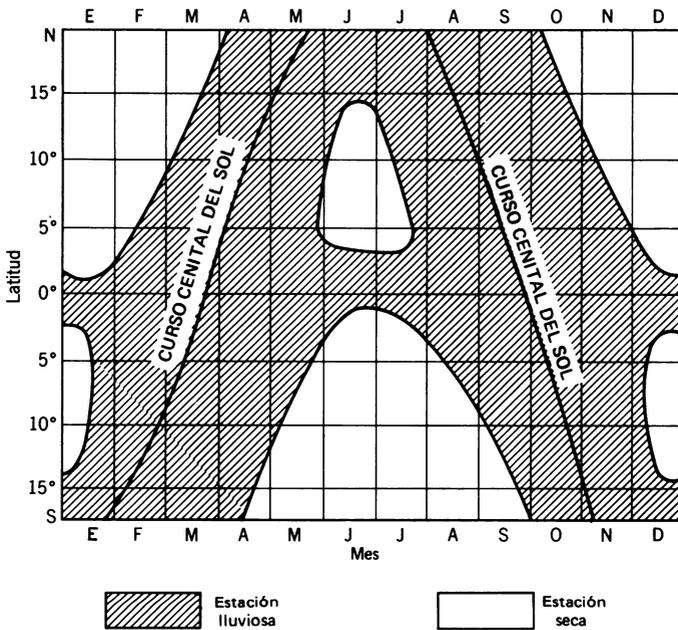


Fig. 1.2. Diagrama de la marcha de las estaciones en las regiones intertropicales. Fuente: De Martonne (1958).

CUADRO No. 1.6. Distribución de las principales regiones climáticas de los trópicos, con base en la clasificación de Landsberg-Troll (millones de hectáreas). (Adaptado de President's Science Advisory Committee, 1967).

Clima	Meses húmedos	Vegetación predominante	América Tropical	África Tropical	Asia Tropical	Total	Porcentaje
Lluvioso	9,5-12	Bosque pluvial y bosque	646	197	348	1191	24
Estacional	4,5-9,5	Sabana o bosque decíduo	802	1144	484	2430	49
Seco	2-4,5	Arbustos y árboles espinosos	84	486	201	771	16
Desierto	0-2	Matorral desértico y semidesértico	<u>25</u>	<u>304</u>	<u>229</u>	<u>558</u>	<u>11</u>
Total			1557	2131	1262	4950	100

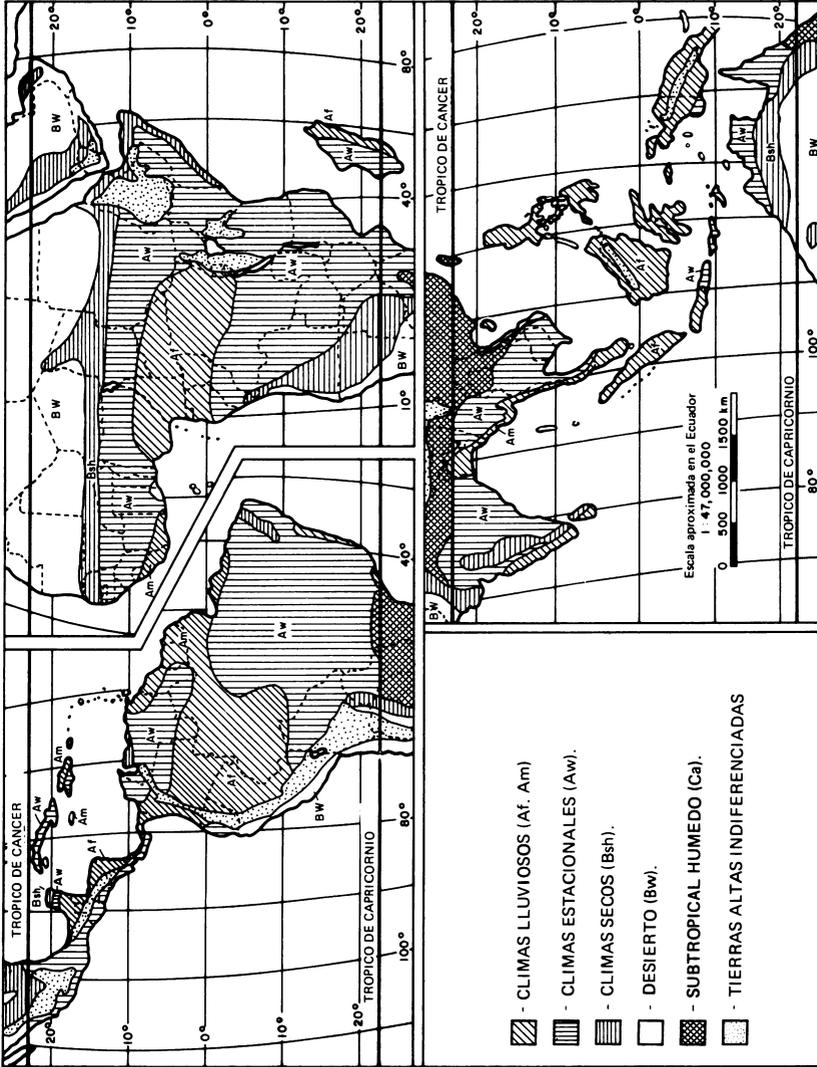


Fig. 1.3. Climas tropicales. Fuente: adaptado de Landsberg et al., (1963).

CLIMAS LLUVIOSOS

Los climas lluviosos ocupan aproximadamente una cuarta parte de los trópicos, en su mayor parte en la vecindades del Ecuador. Las áreas mayores son la cuenca superior del Amazonas, la cuenca del Congo, la mayor parte de Indonesia, Malasia y parte de las Filipinas. Las áreas más pequeñas comprenden la costa Atlántica de América Central, la costa del Pacífico de Colombia, África Occidental costanera, y muchas islas del Pacífico. La vegetación climax consiste de bosques pluviales perennifolios, aún cuando tales bosques han sido reemplazados por cultivos en muchas áreas, particularmente en Asia. En la Fig. 1.4 se muestran tres ejemplos de este régimen de pluviosidad, una de cada continente de la región tropical. En todos los meses, o en la mayoría de ellos, la lluvia excede la evapotranspiración potencial. Los cultivos alimenticios predominantes son arroz, yuca y ñames. Para exportación se cultiva cacao, bananos, hule, cocos y otros cultivos de plantación.

CLIMAS ESTACIONALES

Los climas estacionales cubren cerca de la mitad de los trópicos, incluyendo extensas áreas del Cerrado en Brasil, los Llanos de Colombia y Venezuela, la costa del Pacífico de América Central y México, Veracruz, la Península de Yucatán y Cuba, en América tropical. En África incluyen la mayor parte del continente entre los desiertos de Sahara y Kalahari, excepto una parte de la cuenca del Congo. En Asia los climas estacionales cubren la mayor parte de India, Indochina continental y una faja del norte de Australia.

La vegetación climax consiste en bosque semideciduo, deciduo o de sabana. Las estaciones lluviosa y seca están bien definidas. Temperatura y radiación solar altas caracterizan la estación seca, mientras que temperaturas y radiación solar más bajas caracterizan la estación húmeda. Esta clasificación incluye los climas monzónicos de Asia. A pesar de las variaciones estacionales, la precipitación anual es igual o más baja que la evapotranspiración potencial anual. En esta región están la mayor parte de los cultivos tropicales, aunque cultivos de raíces y perennes que predominan en los climas lluviosos son menos importantes en los climas estacionales. En la Fig. 1.4 se presentan tres ejemplos de localidades con este régimen de pluviosidad.

CLIMAS SECOS

Los climas secos cubren alrededor del 16% de los trópicos. Las áreas más grandes son el Sahel, situado entre la faja de sabana y el desierto de Sahara en el África ecuatorial, el desierto de Kalahari en el sur de África, una gran parte de Australia, partes de India central,

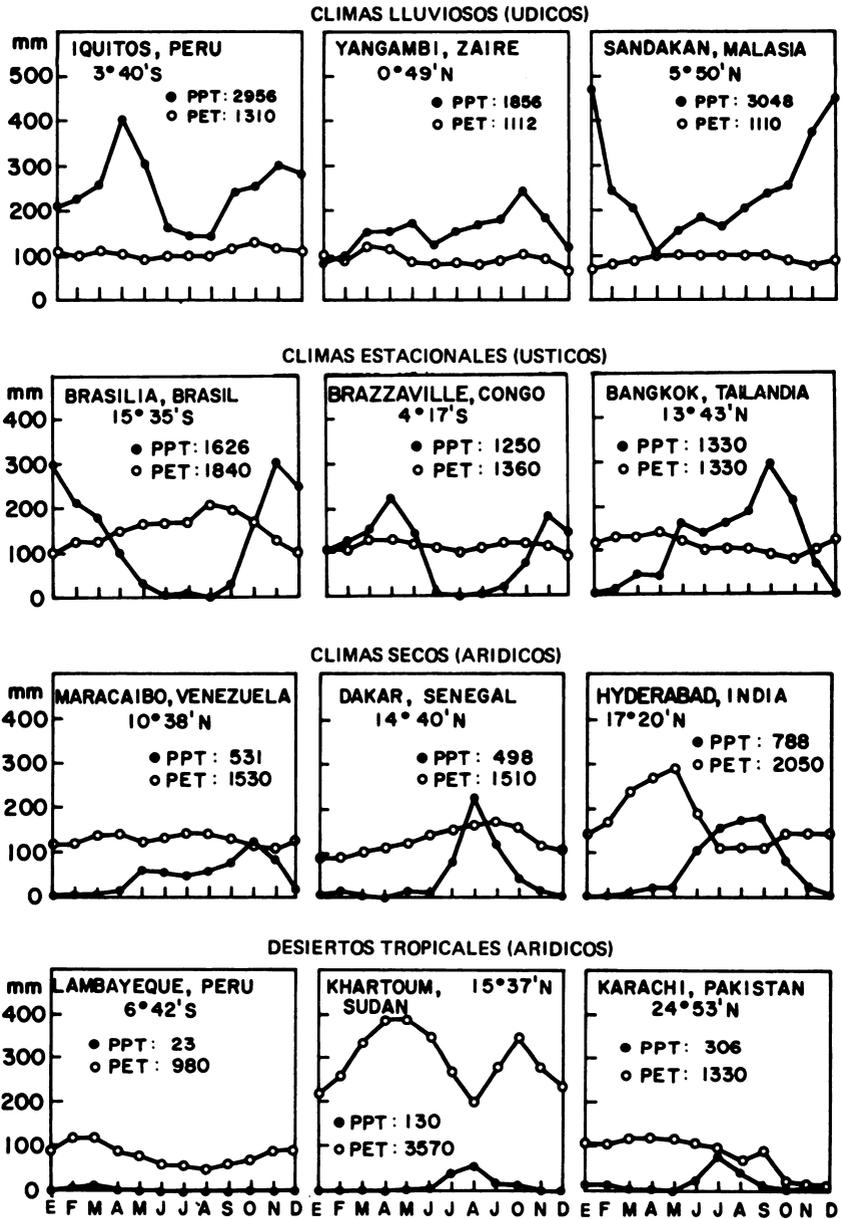


Fig. 1.4. Balances mensuales de pluviosidad-evapotranspiración en algunas localidades tropicales seleccionadas. PPT = precipitación. PET = evapotranspiración potencial. Los totales anuales en números.

noreste de Brasil, norte de Venezuela y norte de México. La vegetación climax consiste en arbustos y árboles espinosos esparcidos. La corta estación lluviosa tiene una alta pluviosidad mensual que permite cultivar sin riego, una cosecha de maíz, sorgo, mijo o arroz. La evapotranspiración potencial excede a la precipitación en la mayoría de los meses, así como en el total anual. La Fig. 1.4 presenta tres ejemplos.

DESIERTOS TROPICALES

Los desiertos tropicales, definidos como áreas con 2 meses o menos de lluvias, cubren cerca del 11% de los trópicos. Los desiertos de Sahara, el de Arabia, el de Somalia y el de Australia comprenden la mayor parte de esta área. Angostas franjas desérticas costaneras se encuentran en Perú, Chile y el suroeste de Africa. Generalmente sólo pastoreo nómado es posible sin irrigación. Cuando se riegan, muchos de los mejores suelos de estos desiertos son extremadamente productivos. En Sudán, Gezira se obtienen altos rendimientos en algodón, y en la costa del Perú rendimientos muy altos en caña de azúcar y arroz. En los desiertos tropicales, a diferencia de otros climas tropicales, la evapotranspiración potencial puede variar bastante de mes a mes. La Fig. 1.4 presenta tres ejemplos.

MONTAÑAS TROPICALES

Las tierras altas tropicales, definidas como las áreas con una elevación mayor de 900 m cubren aproximadamente el 23% de los trópicos. Tal como se mencionó anteriormente, las temperaturas son bajas pero constantes. Se encuentra una gran variedad de patrones de pluviosidad, inclusive grandes cambios en distancias cortas debido a efectos de "sombra de lluvias". Las tierras altas son importantes en México, Guatemala, Costa Rica, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Kenia y Etiopía, por encontrarse allí una gran parte de la población y de la agricultura de estos países tropicales. Las áreas tropicales de mayor precipitación se encuentran en donde el aire húmedo se mueve ladera arriba y descarga la mayor parte de la precipitación entre los 300 y los 1000 m. Algunas áreas montañosas son secas y desérticas, tal como el flanco occidental de los Andes en Perú y el norte de Chile. Para una discusión más detallada sobre el clima de las tierras altas tropicales pueden revisarse los artículos de Blumenstock (1958) y Budowski (1966).

VARIABILIDAD DE LA PLUVIOSIDAD

Hasta este punto, este capítulo se ha limitado a discutir valores promedio. Los promedios de pluviosidad son útiles para describir la

situación en forma general, pero carecen de valor para predecir si las condiciones de humedad son adecuadas para un cultivo específico. En los trópicos la variabilidad de la pluviosidad es muy grande e importante de año a año. En los últimos 10 años en algunos lugares los registros de lluvia han sobrepasado los límites históricos. Mohr et al. (1972) informan que la pluviosidad total en las Antillas Holandesas varía de 0,2 a 2,5 veces las medias anuales. La variación mensual es mucho mayor.

La información que se presenta en los Cuadros 1.5 y 1.6 y en la Fig. 1.4 puede dar a entender que en los climas lluviosos o durante los meses lluviosos de otros tipos de climas, es probable que no ocurran faltas de humedad para los cultivos. Pero esto no es cierto. Con frecuencia se presentan en la estación lluviosa períodos de sequía severa, que en ocasiones duran varias semanas, los cuales afectan los rendimientos de los cultivos. En algunas áreas ciertos patrones de vientos permiten que esas sequías sean más o menos predecibles, pero en la mayoría de las áreas esto no es posible. Por otra parte durante la estación seca ocurren fuertes lluvias. En algunos años no hay estación seca o estación lluviosa.

La mejor herramienta de predicción para el agrónomo tropical es una estimación de las probabilidades de lluvia semanal. Esto puede lograrse bien con datos de lluvia de 15 a 20 años mediante procedimientos estadísticos simples. Un ejemplo de un estudio de esta clase es el llevado a cabo en Filipinas, por Yñiguez y Sandoval (1966). Los resultados pueden presentarse gráficamente en una forma simple, como aparecen en la Fig. 1.5, para Muguga, Kenia.

La confianza en valores promedio ha conducido a resultados desastrosos. El más notable es el "Plan Británico de Maní", en lo que actualmente es Tanzania, durante los últimos años de la década de 1940 (Wood, 1950). El área tenía una precipitación promedio de unos 700 mm durante la estación lluviosa, suficiente en cantidad y duración para el cultivo de maní. Con base en ello se sembraron varios miles de hectáreas. Durante el primer año las lluvias fueron de 250 mm, y en el segundo de 300 mm, dando por resultado un fracaso masivo con un costo aproximado de 100 millones de dólares.

La intensidad de la lluvia también es variable. Las lluvias de advección producidas por masas de aire que se mueven tierra adentro desde el mar o hacia arriba en una cordillera montañosa dan lugar a lloviznas, neblina o humedad alta por varios días. Las lluvias de convección a menudo se convierten en aguaceros o tempestades locales que dan lugar a lluvias de gran intensidad durante períodos cortos. Estas lluvias intensas pueden dañar directamente los cultivos y causar escorrentía aún en áreas planas. En Surinám se ha estimado que el 80% de una lluvia de 10 mm por hora es retenido por el suelo, mientras que la retención es solamente del 32% cuando la lluvia es de 50 mm por hora (Mohr et al., 1972).

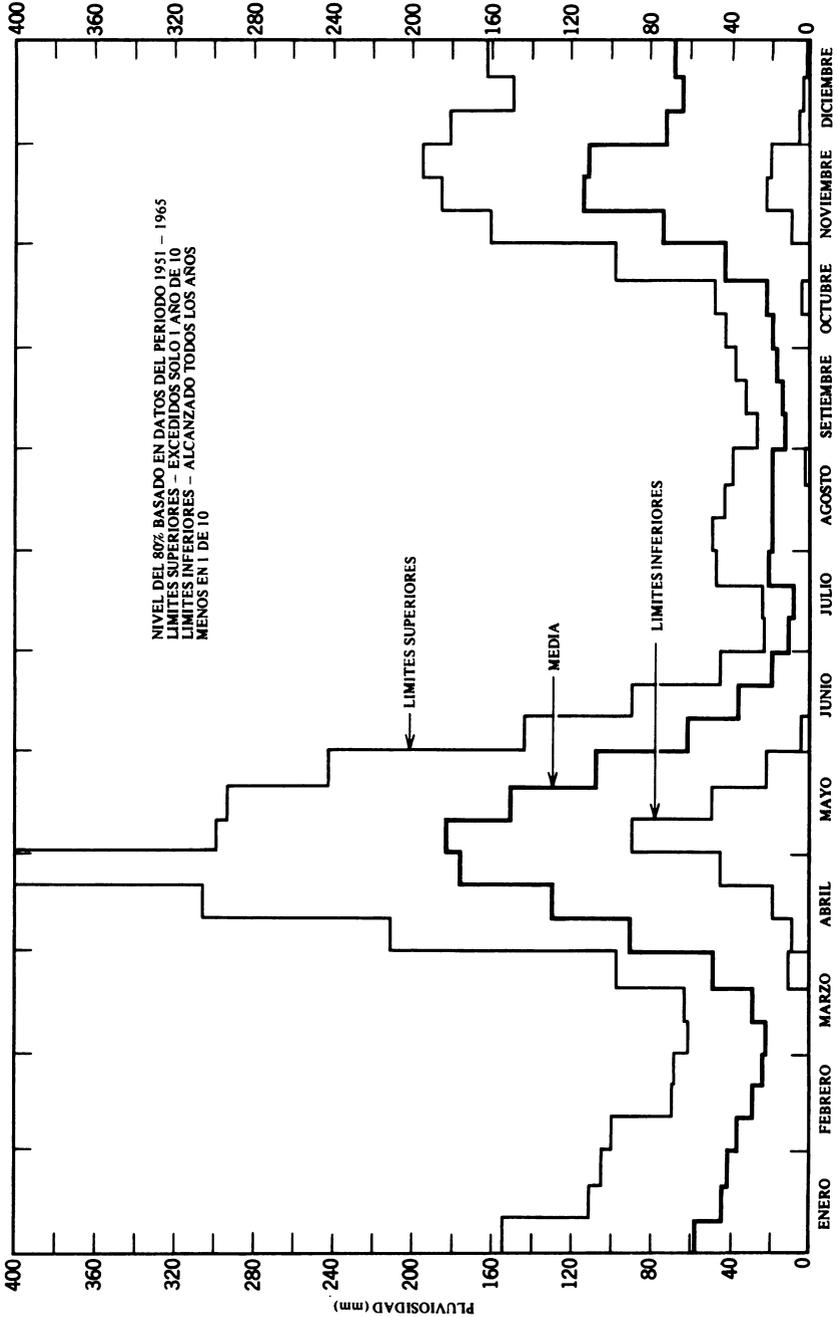


Fig. 1.5. Límites de confianza de la lluvia esperada en Muguga, Kenya. Fuente: Lawes (1969).

La contribución de la neblina y el rocío a la humedad del suelo no ha sido bien estudiada en las áreas tropicales. Una revisión de este tema por Blumenstock (1958) sugiere que estas fuentes pueden contribuir con cantidades de humedad mayores que en la zona templada.

RELACIONES PLUVIOSIDAD-HUMEDAD DEL SUELO

Se han hecho muchos intentos por clasificar cuantitativamente la pluviosidad en los climas tropicales. Los trabajos de Lee (1957), Landsberg et al., (1963) y Williams y Joseph (1970), son ejemplos de tales esfuerzos. Como todos están basados en suposiciones bastante arbitrarias y como el interés descansa en las lluvias como fuente de humedad del suelo para cultivos, en este texto se usa los regímenes de humedad del suelo del Sistema de Taxonomía de Suelos de Estados Unidos (U. S. Soil Taxonomy System). Cuatro regímenes de humedad son comunes en los trópicos, los cuales se definen en la forma siguiente:

- a. **Udico:** la sección de control del suelo está seca por menos de 90 días acumulativos durante el año.
- b. **Ustico:** la sección de control del suelo está seca por más de 90 días acumulativos, pero menos de 180 días acumulativos o 90 días consecutivos durante el año.
- c. **Árido:** la sección de control del suelo está por más de 180 días acumulativos o húmeda por menos de 90 días consecutivos por año.
- d. **Aquico:** el suelo está saturado con agua por el tiempo necesario para causar condiciones de reducción del suelo.

La sección de control se define como la parte del suelo comprendida entre las dos profundidades siguientes: bajo la profundidad alcanzada por 2,5 cm de agua en 24 horas y sobre la alcanzada por 7,5 cm de agua en 48 horas (Soil Survey Staff, 1970). Esto corresponde aproximadamente a profundidades de 10 a 30 cm en suelos arcillosos, 20 a 60 cm en suelos francos, y 30 a 90 cm en suelos arenosos. El término "seco" se refiere a una tensión de humedad de 15 bares o más, es decir, igual o superior al punto del coeficiente de marchitamiento de plantas.

Estos criterios un poco complicados se desarrollaron debido a la importancia del suministro de humedad para los cultivos comunes. El régimen údico de humedad del suelo significa que durante la mayor parte del año no hay falta de humedad (en promedio). En términos generales equivale a los climas lluviosos de la mayoría de los suelos.

El régimen ústico da a entender una fuerte estación seca de 3 a 6 meses y está bien correlacionado con los climas estacionales. El régimen arídico denota una estación seca más larga, y está bien correlacionado con los climas secos y desérticos.

Las variaciones en las propiedades del suelo y en la topografía permiten la existencia de diferentes regímenes de humedad del suelo bajo un mismo régimen de pluviosidad. Un suelo arenoso profundo puede ser ústico en un clima lluvioso debido al drenaje rápido. El régimen áquico es típico de sitios con drenaje deficiente y se presenta aún en desiertos.

Con base en el mapa provisional de Aubert y Tavernier (1972) se hizo una estimación aproximada del alcance de estos regímenes de humedad del suelo. Excluyendo las áreas de tierras altas no diferenciadas, la distribución de las áreas tropicales es la siguiente: ústicas 29%; ústicas 34%; arídicas 29%; y áquicas 8%. Estos porcentajes se correlacionan bastante bien con la distribución de climas: lluvioso 24%; estacional 49%; y seco y desértico 27%. Sin embargo estas estimaciones son demasiado toscas por cuanto sólo se han considerado los subórdenes de suelo dominantes.

VEGETACION

La vegetación natural de los trópicos está estrechamente correlacionada con el clima. Los dos principales sistemas de clasificación de climas tropicales actualmente en uso, el de Koppen y Geiger (1936) y el de Holdridge (1967), emplean nombres de la vegetación para las diferentes regiones climáticas. La vegetación tropical puede agruparse en las cinco categorías principales que aparecen en la Fig. 1.6: sabanas y otras praderas, que cubren el 43% del área; bosques pluviales perennifolios de hoja ancha, que cubren el 30%; bosques semidecíduos y decíduos, que cubren el 15%; arbustos de desierto y matorrales diseminados, que cubren el 7%; y sin vegetación, situación que se presenta en el 5% de los trópicos. La Fig. 1.6 muestra que la mayor parte de los trópicos no están cubiertos por bosques pluviales como generalmente se cree. Por ejemplo la mayor parte de Africa tropical está formada por sabanas.

SABANAS TROPICALES

El término sabana probablemente se originó en América Central, en donde los caribes lo usaban para designar cualquier área no cubierta por bosques. Según Eyre (1962) ahora se usa en toda la zona tropical para designar comunidades de plantas en que las gramíneas tienen importancia, y van desde poblaciones de pura pradera a sabanas arbóreas en que hay dos estratos (árboles y gramíneas) casi continuos.

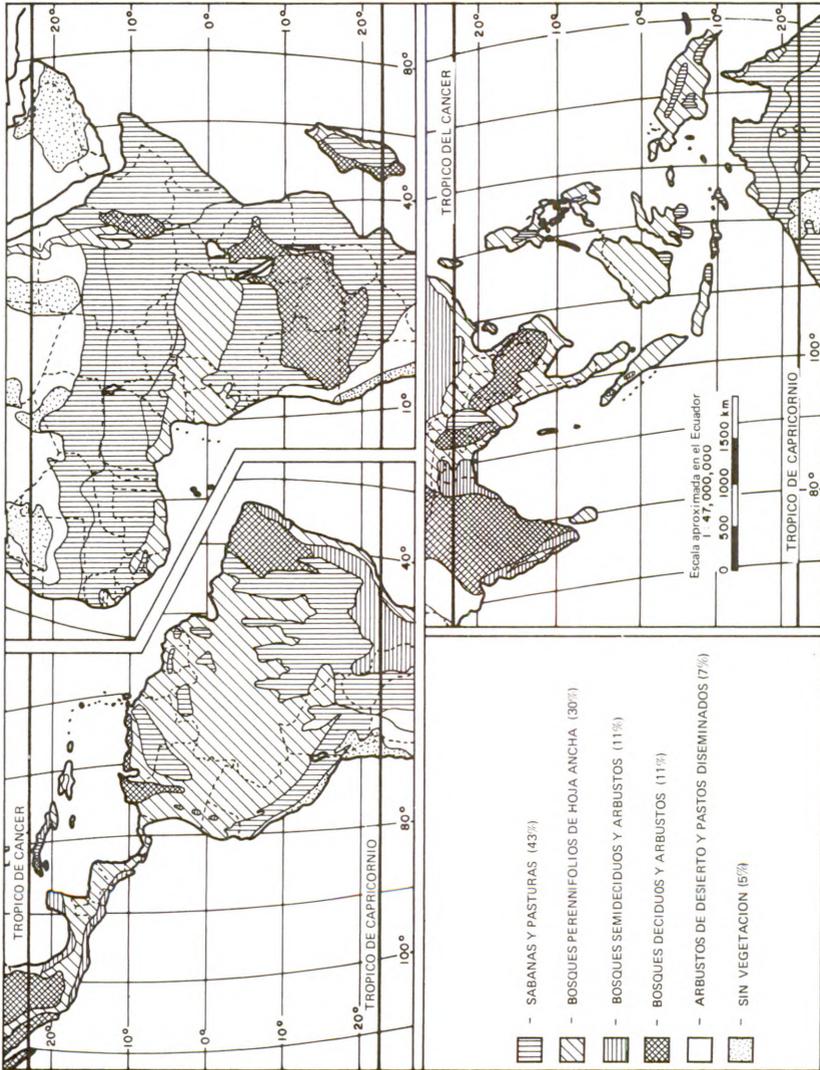


Fig. 1.6. Los trópicos: vegetación natural. Fuente: adaptado de Köppen y Geiger (1936).

Las sabanas comprenden aproximadamente el 28% de los trópicos americanos. La extensión mayor es el Cerrado de Brasil, con más de 200 millones de hectáreas, seguido por los llanos de Colombia y Venezuela, la mayor parte de Cuba, y partes de las costas del pacífico de México y América Central. Areas altas de praderas sobre el límite de la vegetación arbórea ocupan gran parte de las tierras altas andinas conocidas localmente como “punas” y “páramos”. Alrededor del 57% de Africa tropical consiste de vegetación de sabana, incluyendo la mayor parte de Africa del subsahara, con excepción de la cuenca del Congo, el desierto de Kalahari, y una porción boscosa del Africa central del sur. El tamaño de los árboles disminuye hacia los desiertos. Alrededor del 34% de Asia tropical y el Pacífico está cubierto por sabanas, principalmente en Australia, con pequeñas pero importantes áreas en la tierra continental asiática y Oceanía.

Generalmente se reconocen tres tipos de sabanas, que han sido resumidos por Eyre (1962). El tipo “pasto alto – árbol bajo” se encuentra extensivamente en Africa. Las principales gramíneas pertenecen a los géneros *Pennisetum*, *Andropogon*, *Imperata* e *Hyparrhenia* y forman un estrato denso de 2 a 4 m de altura durante la estación lluviosa. Entremezclados con las gramíneas hay árboles deciduos relativamente bajos (10 a 15 m de alto). Estas sabanas bordean los bosques pluviales de Africa y en ciertas localidades se les llama “yerba elefante” o “sabana de guinea”. El segundo tipo son las sabanas “Acacia-pasto alto”, en las cuales gramíneas macolladoras forman una cobertura continua hasta 1 ó 2 m de altura durante la



Fig. 1.7. Vegetación del Cerrado cerca de Brasilia, Brasil. Una forma de sabana de zacate bajo.

estación lluviosa, y diseminados en ella hay altos árboles deciduos o perennifolios. En Africa este tipo se encuentra en áreas con una pluviosidad más baja que la del primer tipo, y se le llama "sabana de Sudán". En América del Sur este patrón es típico de los Llanos y del Cerrado (Eiten, 1972). El tercer tipo es la sabana "Acacia-pasto de desierto", que ocupa áreas en los bordes de los desiertos africanos y del norte de Australia.

Los ecólogos han tratado de correlacionar clima, fuego, y las condiciones del suelo con la génesis de las sabanas. Aún se esgrimen fuertes argumentos en pro de cada uno de estos factores. La mayoría de las áreas de sabana tienen regímenes de humedad ústico o arídicos, pero también aparecen en áreas de alta pluviosidad después de que el bosque pluvial es destruido. Las quemadas anuales que hacen la mayoría de las prácticas de cultivos o pastoreo contribuyen a mantener el equilibrio de las especies. También se encuentran sabanas en los llanos estacionalmente inundables tales como en el norte de los Llanos de Colombia, en donde aparentemente los árboles no toleran medio año de anegamiento y medio año de sequía casi completa. Se ha considerado que una baja fertilidad del suelo y una formación de lateritas son factores que favorecen la vegetación de las sabanas. El origen de la vegetación del Cerrado en la parte central de Brasil se ha atribuido recientemente a los altos niveles de aluminio intercambiable que tiene el suelo (Goodland 1971), y a la poca disponibilidad de nutrimentos (Lopes, 1975). Para mayor información sobre esta controversia pueden revisarse las publicaciones de Budowski (1956), Barlett (1957), Arens (1963), Eyre (1962), y Bouliere y Hardy (1970).

A pesar de las teorías conflictivas, hay una amplia evidencia de que sabanas hechas por el hombre están reemplazando rápidamente los bosques cuando el sistema de agricultura nómada se interrumpe debido a la presión demográfica. La parte desafortunada de esta práctica tan generalizada, es que pastos de baja palatabilidad y digestibilidad del género *Imperata* dominan estas nuevas sabanas, volviéndolas prácticamente inservibles para el pastoreo.

BOSQUES PLUVIALES

El bosque pluvial tropical es el tipo de vegetación natural que se encuentra en áreas caracterizadas por ambientes údicos con una pluviosidad anual alta. El término es prácticamente sinónimo de "bosques ecuatoriales", "bosques perennifolios de hoja ancha" y "bosques tropicales húmedos". La característica principal de estos bosques es la baja proporción de árboles deciduos. Tal como se mencionó anteriormente, este tipo de vegetación cubre alrededor del 30% de los trópicos. Bosques pluviales ocupan el 52% de América tropical, principalmente en la cuenca amazónica, así como las costas del Pací-



Fig. 1.8. Bosque pluvial virgen cerca de Yurimaguas, Perú.

fico de Colombia y algunas partes de América Central. Solamente el 12% de Africa tiene bosques pluviales, principalmente en la parte baja de la cuenca del Congo y algunas partes de la costa de Africa Occidental. Un área mayor a lo largo de la costa de Africa Occidental estaba cubierta anteriormente por bosques pluviales que han sido destruidos por el hombre. Cerca de un 38% de Asia tropical y del Pacífico tiene bosques pluviales, principalmente en la Península Malaya, en Sumatra, Borneo, Nueva Guinea, partes de las Filipinas y las muchas islas pequeñas. A pesar de la amplia distribución de los bosques pluviales, la estructura es esencialmente la misma en todas partes. Generalmente hay un dosel de tres capas, consistente en árboles altos de unos 30 m de altura sobre dos capas más bajas de aproximadamente 22 y 14 m respectivamente. En el suelo no hay hierbas, y está cubierto casi exclusivamente por arbolitos pequeños. Hay mucha diversidad en los bosques pluviales; en Malasia y en las selvas del Amazonas se encuentran unas 2500 especies de árboles y arbustos en comparación con 12 especies en los bosques templados. Esta es una de las razones por las cuales la producción de madera ha estado limitada en estas regiones. En muchas áreas hay menos de 5 árboles comercializables por hectárea, haciendo antieconómico la producción de madera fina.

Los bosques pluviales tienen varias estructuras únicas adaptadas a este ambiente particular. Muchas hojas tienen “puntas goteantes” que aceleran el secamiento y reducen la infestación de mohos. Lianas y bejucos estranguladores suben por los árboles y atan a muchos

juntos. En las ramas superiores aparecen epífitas o plantas sin raíces en tierra que atrapan hojas en sus raíces aéreas y forman un "suelo" del que extraen elementos nutritivos.

Aunque los bosques pluviales tropicales pueden parecer impenetrables, es fácil caminar por ellos con la ayuda de un machete, ya que casi no hay vegetación enmarañable en la superficie del suelo. Alrededor del 15% de la radiación solar llega hasta la superficie del suelo. Las temperaturas del aire son considerablemente más bajas, pero la humedad es más alta que en las áreas vecinas desmontadas. Richards (1952) y Odum (1972) han hecho estudios detallados de los bosques pluviales.

El ciclo de nutrimentos entre el bosque y el suelo es esencialmente cerrado. La caída constante de hojarazca y la descomposición durante todo el año, y la virtual ausencia de lixiviación, permiten el desarrollo de bosques exuberantes sin síntomas de deficiencias nutritivas en suelos de baja fertilidad natural. La única diferencia marcada de la vegetación, con excepción de los pantanos, que pueden correlacionarse con los suelos, es el tamaño reducido de bosques pluviales que crecen en espodosoles muy arenosos.

BOSQUES DECIDUOS Y SEMIDECIDUOS

Esta clasificación general comprende los bosques de ambientes ústicos en donde la estación seca es suficientemente fuerte para excluir los bosques pluviales, pero con ausencia de una capa herbácea. Aproximadamente el 15% de los trópicos está cubierto por bosques semidecuidos, deciduos y espinosos. Los bosques semidecuidos son una transición entre el bosque pluvial y los completamente deciduos. En el extremo más húmedo puede observarse la estructura de tres pisos, pero solamente existen unos pocos órganos especializados, tales como epífitas. El ciclo de los nutrimentos es completamente diferente al del bosque pluvial. Con una considerable defoliación durante la estación seca, la radiación solar que llega a la superficie del suelo aumenta drásticamente, y la capa de hojarazca no se descompone durante la estación seca. El bosque tiene una apariencia similar a la de bosques mixtos de la zona templada durante el invierno. Este tipo de vegetación se llama también "bosque semiperennifolio estacional", "bosque monzónico" y "bosque perennifolio seco". En algunas partes de Asia, la teca, valiosa especie maderable, puede constituir el 10% de los árboles. Grandes extensiones de bosques de esta clase se han convertido en sabanas debido a la agricultura migratoria.

Los bosques deciduos estacionales aparecen en áreas con estaciones secas más fuertes, y están diseminados en particular en el sur de Africa, India, Indochina y por toda la América tropical. Un dosel de dos pisos está todavía presente, excepto en donde los suelos tienen una capa que impide la penetración de las raíces, en cuyo caso no

hay piso inferior. Durante la larga estación seca el bosque está desnudo. En Africa este tipo es llamado "bosque miombo" o "estepa arbórea". Conforme el dosel de los árboles se vuelve discontinuo y las gramíneas comienzan a estar presentes en forma conspicua, el bosque se convierte gradualmente en sabana. Es difícil establecer el límite entre estos dos por cuanto está afectado por los fuegos provocados por el hombre.

Los bosques espinosos ocupan la parte más seca de los ambientes ústicos y parte de los arídicos. Están diseminados por toda la América tropical, principalmente en el nordeste de Brasil en donde se le conoce con el nombre de "caatingas". También los hay en el extremo norte de Colombia y en Venezuela, grandes partes del Caribe, la Península de Yucatán, y oeste de México. En Asia cubren extensas partes de India, Burma, Tailandia y Queensland (Australia). En Africa están intermezclados con las sabanas más secas. Aún cuando no hay un dosel cerrado, por lo general hay ausencia de gramíneas. A menudo hay árboles con figura de botella. Estos bosques también existen en suelos poco profundos o extremadamente permeables, en donde la sequía es común a pesar de la alta precipitación.

MATORRAL DESERTICO Y SEMIDESERTICO

El matorral desértico y semidesértico cubre cerca del 7% de los trópicos en las regiones arídicas extremas. Existen estepas con cactus y otras especies suculentas en grandes áreas del Sahara y los bordes de los desiertos tropicales. En la mayoría de los desiertos tropicales puede verse vegetación espinosa capaz de extraer humedad del suelo a grandes profundidades. Gran parte de la vegetación está latente pero crece en forma exuberante durante las lluvias esporádicas.

Áreas esencialmente desprovistas de vegetación constituyen alrededor del 5% de los trópicos.

PRODUCTIVIDAD DE LA VEGETACION NATURAL

El énfasis reciente en ecología cuantitativa ha dado lugar a varias estimaciones de la producción anual de materia seca de diferentes tipos de vegetación. Estas cifras son de interés cuando se les compara con producción anual de cultivos y con la productividad de la vegetación de zonas templadas. Golley y Leith (1972) han desarrollado un "mapa de productividad primaria neta" del mundo que presenta estimaciones de aumento anual de biomasa más la producción de hojarasca. En el Cuadro 1.7 aparece un resumen de este trabajo. Las cifras muestran que los bosques tropicales crecen mucho más rápido que sus contrapartes en la zona templada, y que por otra parte no existen grandes diferencias entre las sabanas tropicales, las praderas templadas y las tierras cultivadas.

CUADRO No. 1.7. Aumentos anuales en la producción de materia seca de tipos seleccionados de vegetación (ton/ha). (Fuente: Golley y Leith, 1972).

Tipo de vegetación	Media	Ambito
Bosque pluvial tropical	20	10–35
Bosque tropical deciduo	15	6–35
Bosque templado deciduo	10	4–25
Bosque mixto templado	10	6–25
Sabana tropical	7	2–20
Pradera templada	5	1–18
Tierra cultivada	6,5	1–40

CLASIFICACION DE LA VEGETACION

Además de la terminología actualmente en uso y muchas similares, hay un sistema de clasificación que define las zonas ecológicas de acuerdo con la vegetación dominante y de parámetros climáticos: “zonas de vida natural” (Holdridge 1947, 1967). El sistema se ilustra en la Fig. 1.9 en la cual la temperatura media anual, la precipitación y la evapotranspiración se marcan con puntos en forma de triángulos que proporcionan los límites para cada “zona de vida”. Este sistema se ha usado ampliamente en los trópicos americanos y se ha aplicado a otras regiones del mundo. La desventaja principal es que ignora la distribución de las lluvias, que es probablemente el parámetro climático supremo. Por ejemplo, las sabanas de los llanos orientales de Colombia aparecen como “bosque tropical húmedo” debido a su alta pluviosidad anual, y por lo tanto en la misma categoría que las selvas amazónicas.

GEOLOGIA

Las tierras tropicales son muy complejas geológica y geomorfológicamente. Más o menos el 77% puede clasificarse como “tierras bajas”, con elevaciones menores de 900 m (Fig. 1.10). En el 20% de los trópicos las elevaciones oscilan entre 900 y 1800 m. Esta categoría comprende cerca de la mitad de las tierras montañosas de América Central y de los Andes de América del Sur, partes de Venezuela y Brasil, y las regiones montañosas del Caribe. También caen en esta categoría la mayor parte de Africa Oriental, los Camerunes y ciertas áreas de los desiertos del Sahara y de Arabia. En Asia, la Meseta Decca de India, además del espinazo central de las islas de Asia suroriental y el Pacífico se clasifican como tierras altas.

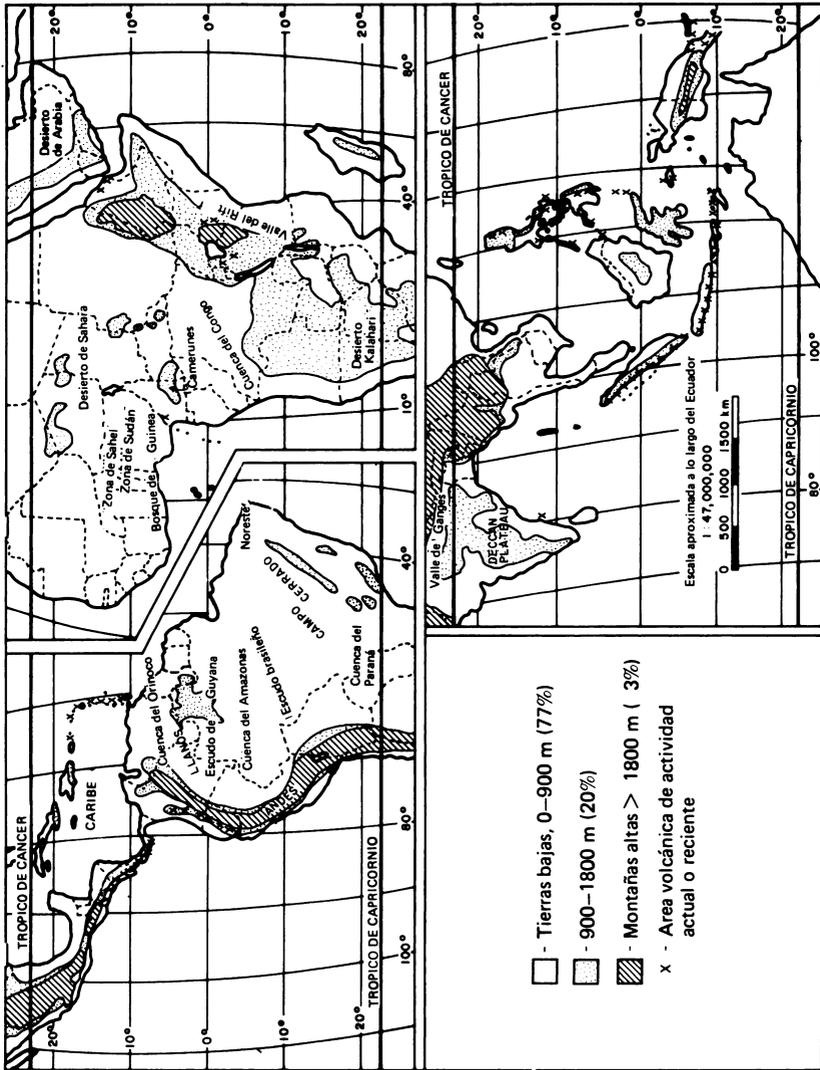


Fig. 1.10. Los trópicos: arreglo físico.

En cerca del 3% de los trópicos las elevaciones son mayores de 1800 m. Estas regiones son los altos Andes de América Central y América del Sur, las tierras altas de Etiopía y Kenia en Africa, el norte de Burma y partes de Indochina y Nueva Guinea Central. Los Himalayas están situados fuera de los trópicos.

El 20% de los trópicos con alturas entre 900 y 1800 m tienen uno de los climas más agradables del mundo, con temperatura benigna y constante durante todo el año. Esta situación pocas veces es reconocida por los habitantes de las regiones templadas. Un visitante de Kenia que estaba en Inglaterra en julio dejaba atónitos a sus amigos británicos cuando les decía que deseaba retornar a Africa para refrescarse.

Seguidamente se presenta un resumen de la geología y geomorfología de los tres continentes tropicales. Para una información más detallada en geomorfología tropical, puede verse el libro de Thomas (1974).

AMERICA TROPICAL

Los principales rasgos superficiales de América Tropical son la Cordillera de los Andes, y sus continuaciones en América Central y en México; los escudos de Guyana y de Brasil, las cuencas del Orinoco, del Amazonas y del Paraná, y las islas del Caribe.

Los Andes y sus contrapartes en América Central y México se extienden como una unidad por todo el margen occidental de América tropical. Los Andes surgieron del mar durante el período terciario con gran actividad volcánica. Actualmente hay volcanes activos o recientemente activos, en México, toda la América Central, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. Sin embargo, extensas porciones de los Andes, tales como la parte central de Perú, no han sido afectadas por actividad volcánica reciente. Hay glaciares en las elevaciones más altas, con la línea de nieve a unos 4800 m. Aunque relativamente angostos, los Andes tienen valles intermontanos importantes y relativamente planos con una alta densidad de población. Como ejemplos pueden citarse el valle de la ciudad de México, el altiplano guatemalteco, la meseta central de Costa Rica, la "sabana" de Bogotá, el valle del Cauca en Colombia y los valles de Mantaro y Cajamarca en Perú. Mesetas de gran altitud (punas) dominan el sur de Perú y el norte de Bolivia.

Los escudos de Guyana y de Brasil son superficies terrestres mucho más antiguas pero con elevaciones más bajas. Se originaron durante los períodos arqueano y paleozoico, y consisten principalmente de granito y gneis cubierto parcialmente por rocas estratificadas, especialmente roca arenisca. Extensas áreas de la meseta central de Brasil tienen una topografía en donde pueden apreciarse dos o tres superficies de erosión. El escudo de Guyana, y el escudo brasileño son las superficies terrestres más antiguas de América tropical.

La cuenca del Amazonas está limitada por los Andes y los dos escudos. La porción superior al oeste de Manaus es bastante ancha; la cuenca se angosta considerablemente al este de la ciudad. Muchos de los sedimentos actuales se originan en la erosión de los levantamientos andinos, pero algunos se derivan de las áreas de los escudos. La cuenca del Orinoco está separada del Amazonas por las tierras altas de Guyana. Ambas áreas están cubiertas por depósitos del período terciario, con bandas de aluvión reciente. La cuenca del Paraná, al sur, es rica en depósitos de basalto.

Las islas del Caribe están formadas principalmente de depósitos de piedra caliza o volcánicos. La actividad volcánica actual está limitada a las Antillas menores.

AFRICA TROPICAL*

Comparado con otros, geológica y topográficamente, Africa es el continente más uniforme. Solamente hay dos áreas intensamente plegadas: las montañas de Atlas en el norte y las cordilleras de la provincia del Cabo en el extremo sur, ambas fuera de los trópicos. El resto del continente es un vasto y rígido bloque de roca antigua, dos tercios del cual está cubierto por sedimentos. La antigua roca cristalina es principalmente granito, pero también contiene mucho esquisto metamórfico y gneis. Debido a la falta de plegamiento y a la continua meteorización, la mayor parte del continente tiene la apariencia de una meseta desgastada. La meseta está modificada por erupciones volcánicas que van desde el período precámbrico al reciente, y líneas de fallas conexas como el "Rift Valley", el cual parte la meseta continental desde el Mar Muerto en el norte, al río Zambezi en el sur. Parte de esta falla está ocupada por algunos extensos lagos.

Las más antiguas rocas se encuentran en el oriente y el occidente, paralelas a la costa. Este material data desde el período precámbrico. Algunas de ellas fueron plegadas antes o durante el período mezozoico. El granito, el gneis y el esquisto de la meseta continental son más que todo de la era arqueana. Durante los períodos Cámbrico, Ordovícico y Silúrico gran parte del continente estuvo cubierto por el mar, y algunas de las piedras areniscas y la dolomita de Africa del Sur se considera que son de esta época. Con posterioridad a la elevación del continente durante el final del período Carbonífero, cuando Africa e India estaban unidas como Gondwanaland, el interior de Africa estaba ocupado por grandes lagos, que dieron por resultado la formación de enormes capas de piedra arenisca y marga. A esto se denomina el "sistema Karroo" de Sur Africa, pero la misma situación aparece en la cuenca del Congo y en áreas de Africa oriental. Durante

(*) Adaptado de un resumen preparado por M. Drosdoff, de la Universidad de Cornell.

el siguiente período durásico una gran actividad volcánica dio origen a los flujos de basalto de Africa occidental. Fue en esta época cuando Gondwanaland se partió y los continentes se separaron. Después el mar volvió a cubrir otra vez ciertas áreas, tales como el Sahara y la costa occidental. Estas son las únicas áreas con depósitos marinos de la época precámbrica. Por otra parte, los sedimentos continentales son muy extensos y van del período cámbrico al Pleistoceno, acumulados en las cuencas del medio Níger, en Chad, Congo, Sudán y el desierto de Kalahari.

ASIA TROPICAL

El subcontinente indio, que chocó con Asia continental durante el período eoceno, es una masa de tierra muy antigua y no ha estado bajo agua desde el período carbonífero. La meseta Deccan, con elevaciones menores de 1800 m, permanece como la parte más alta de la península. Durante el período Cretácico los volcanes eran muy activos y cubrieron la parte central de India con basalto.

Asia sureste continental es una combinación de cordilleras montañosas y extensos valles en que se cultiva arroz, tales como el Ganges, Brahmaputra, Irrawaddy, Chao Phya, y Mekong. Estos son las "cazuelas de arroz" de Asia tropical y están expuestas a inundaciones periódicas. La mayor parte de la actividad volcánica actual está restringida a las regiones isleñas, en particular Indonesia y Filipinas, así como a las numerosas islas del Pacífico, incluyendo Hawaii.

D'Hoore (1956) hace una comparación interesante entre la geología de América tropical y la de Africa. Señala que la mayor parte de Africa tropical es una gigantesca meseta cristalina, dos tercios de la cual está cubierta por sedimentos. Sedimentos continentales llenaron las grandes depresiones o cuencas. Sin embargo, en América tropical las mesetas cristalinas equivalentes están limitadas a los escudos de Guyana y de Brasil. Estas están también parcialmente cubiertas por sedimentos de origen más reciente producto del levantamiento andino. Los levantamientos montañosos y la actividad volcánica son menos extensos en Africa que en América. Los depósitos basálticos en Paraná son contemporáneos con los de Basutoland, en Africa, y la meseta Deccan, en India. En conclusión, D'Hoore considera la historia geológica de América tropical más favorable que la de Africa tropical por cuanto los Andes proporcionan una fuente constante de nuevos materiales. Esta situación es similar a la de los llanos del Ganges en el norte de India que recibe los sedimentos de los Himalayas. Sin embargo, en términos generales América tropical tiene una proporción mayor de suelos ácidos que Africa tropical. Esto se debe aparentemente a los depósitos eólicos del Sahara, los cuales afectan una gran parte de Africa tropical.

AGRICULTURA

La economía de la mayoría de los países tropicales está basada en la agricultura. Los rendimientos de los cultivos y la producción de alimentos pueden aumentarse drásticamente mediante la aplicación de la tecnología conocida actualmente. La necesidad de obtener esos incrementos crecen geoméricamente debido a las altas tasas de crecimiento de población. Esta sección delinea brevemente los aspectos humano y agrícola del ambiente tropical. La Fig. 1.11 muestra la división política de los trópicos, incluyendo las principales lenguas escritas.

EL PROBLEMA ALIMENTICIO DEL MUNDO: PRODUCCION VERSUS POBLACION

La capacidad del mundo para alimentar a su población humana ha sido una gran preocupación durante los últimos 200 años. En 1798 Malthus predijo que la población del mundo alcanzaría un máximo de 1.5 mil millones y que sobrevendría el hambre en todo el mundo. Esta predicción sólo se ha hecho realidad en algunas áreas específicas. Recientemente, en 1967 los hermanos Paddock predijeron muerte por inanición en todo el mundo para el año 1975 (Paddock y Paddock, 1967).

Estas profecías no se han cumplido, ni es probable que se cumplan en un futuro cercano. Sin embargo, una mirada a los aumentos de población mundial, tal como se aprecia en la Fig. 1.12 es suficiente para asustar aún al más optimista de los lectores. Las tasas de crecimiento de la población mundial permanecieron estables a razón del 1% anual hasta 1930, cuando la población mundial llegó a 2 mil millones de habitantes. El tercer mil millón se alcanzó en 1960, el cuarto en 1975 y el sexto se espera para antes del año 2000, suponiendo resultados moderadamente favorables en los programas de control de nacimientos (President's Science Advisory Committee, 1967). En el año 2000 será necesario alimentar el doble de la gente que se alimentara en 1960.

El grueso de esta explosión de población está ocurriendo en los trópicos, principalmente en Asia. Esto puede apreciarse en la Fig. 1.12 que presenta el aumento de población de 1920 a 1970, y las mejores proyecciones para el resto de este siglo. Según Cochrane (1969) la "explosión demográfica" que comenzó en los años 1950 se debe en primer lugar a las tasas decrecientes de muerte por razón del mejoramiento de los servicios de salud y a la disminución de las guerras en muchas partes. Las tasas de nacimiento han permanecido casi constantes en los países en desarrollo, pero han bajado en las áreas desarrolladas, especialmente en Estados Unidos, Europa y Japón. Consecuentemente las tasas de crecimiento de población

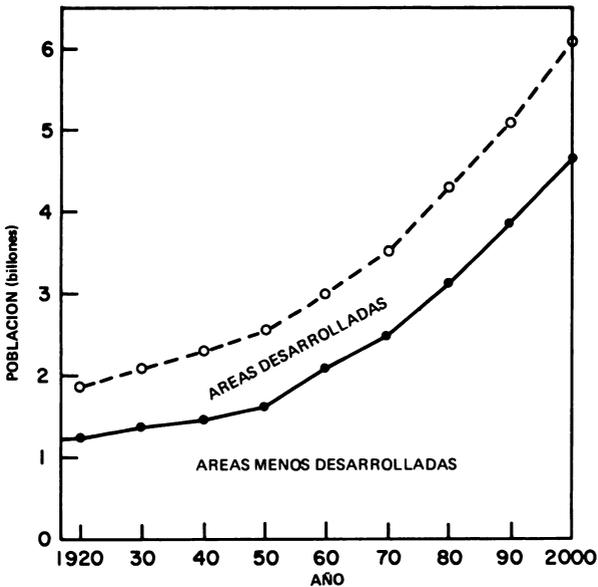


Fig. 1.12. Patrón de crecimiento de la población mundial (línea de puntos) y crecimiento en los países en desarrollo, incluyendo proyecciones para el resto del siglo. (Fuente: basado en datos de FAO, 1972).

aumentaron de 1,2% en la década de 1940-50 a 2,2% en 1950-60, y a 2,4% en 1960-70. Se estima que no será sino hasta 1980 que los programas actuales de control de nacimiento tengan un impacto mundial en los países en desarrollo. Hay poca duda de que este planeta tendrá 6 mil millones de habitantes antes del año 2000.

Aunque la producción mundial de alimentos generalmente ha aumentado parejo con el aumento de población, el considerable salto de población ocurrido desde la segunda guerra mundial, ha producido de pronto una estrecha carrera entre población y producción de alimentos. Esto puede estimarse mejor observando la relación entre ambos parámetros tal como se muestra en la Fig. 1.13. Un cuidadoso análisis de las tendencias históricas hicieron que Cochrane llegara a la conclusión de que la carrera fue esencialmente pareja en el decenio 1950-60. Desde entonces un progreso firme y algunas veces dramático ha tenido lugar en los países desarrollados, en los que la aplicación de tecnología ha hecho que la producción supere fácilmente el crecimiento de población. Sin embargo, en muchas áreas en desarrollo la población comenzó a aventajar a los suministros de alimentos, especialmente en India, en donde dos sequías consecutivas en los años 1965 y 1966 crearon una situación de crisis. Esto produjo una preocupación general y dio lugar a la predicción de los Paddock de una catástrofe mundial en 1975.

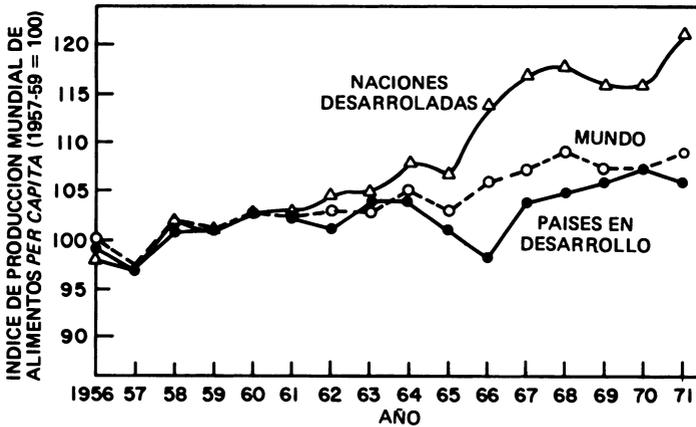


Fig. 1.13. Cambios en la producción mundial de alimentos *per capita* durante el período 1956-1971. Calculado de datos de FAO, 1972.

Esa situación ha mejorado desde 1967, especialmente en Asia, gracias al uso generalizado de variedades de arroz y trigo de alto rendimiento. En 1971 alrededor del 33% de la superficie sembrada de trigo en Asia del sur, y 13% de la extensión cultivada de arroz en Asia tropical, con un total de unos 20 millones de hectáreas fueron sembrados con las nuevas variedades (Barker, 1972). Tasas similares de adopción de variedades mejoradas han tenido lugar también en América Latina. La “revolución verde” dio por resultado una reversión drástica de la tendencia decreciente en la producción de alimentos *per capita* que se observa en la Fig. 1.13; de esa manera la década 1960-70 terminó con una producción de alimentos ligeramente superior al crecimiento de población en los países en desarrollo. Lo anterior se aprecia en el Cuadro 1.8*.

El aumento estimado en el uso de tecnología mejorada, incluyendo fertilizantes, durante el resto de esta década, indicaba que la producción de alimentos se mantendría ligeramente adelante de la población. Sin embargo, la crisis mundial de energía en 1973, hizo pedazos esa predicción al crear una escasez seria de combustibles y fertilizantes. Nuevamente el suministro mundial de alimentos se ha vuelto crítico. No se sabe lo que sucederá en la década de los ochentas.

Si no se hacen mayores esfuerzos en desarrollo agrícola, el aumento demográfico superará pronto la producción de alimentos. Aunque paquetes tecnológicos de variedades-prácticas de cultivo sirvieron

(*) Un examen de datos más recientes disponibles en 1975 no mostraron cambios significativos en las tendencias de los datos incluidos en los Cuadros 1.8 a 1.15.

CUADRO No. 1.8. Estados verdaderos de la carrera entre alimentos y población, de 1961 a 1970: promedio de las tasas anuales (%). (Fuente: calculado de FAO Production Year Book, 1971).

Región	Crecimiento de población	Producción de alimentos	Producción de alimentos <i>per capita</i>
América Latina	2,8	3,1	0,4
Asia*	2,6	2,7	0,3
Africa	2,4	2,3	0,0
Todos los países en desarrollo*	2,4	2,7	0,4
Mundo	2,0	2,5	0,4

(*) Incluye el Oriente Medio.

para lanzar la “revolución verde”, no debe olvidarse que estos paquetes tienen que suplementarse con créditos, precios atractivos, insumos disponibles e infraestructura a nivel de finca si se desea éxito.

En otros cultivos, además de arroz y trigo, hacen falta avances similares en rendimientos y prácticas de manejo necesarias para el completo aprovechamiento del potencial de las nuevas variedades o especies.

Esta exposición se ha limitado al amplio cuadro cuantitativo. Sin embargo, la escasez localizada de alimentos que conduce a niveles de muerte por hambre, tiene lugar particularmente durante las guerras, tal como sucedió en Nigeria Oriental y en Bangladesh, y en los países del Sahel, debido a la sequía. Aunque el requerimiento en promedio de la cantidad diaria de calorías* se alcanza en países que cubren el 97% del mundo, se estima que alrededor del 20% de la población mundial, principalmente en Asia padece de deficiencia de calorías. La malnutrición, particularmente deficiencia proteica, está muy generalizada en todos los trópicos, afectando probablemente a las dos terceras partes de la población. Los estómagos hinchados y los matices rojizos en el cabello de muchos niños son síntomas claros de deficiencia de proteína, los cuales están presentes en muchas áreas rurales del trópico.

(*) Esta cantidad es de 2440 calorías para la persona “promedio”, con actividad y salud normales, tomando en cuenta temperatura, peso corporal, sexo y edad (Cochrane, 1969).

La demanda por más y mejores alimentos está aumentando rápidamente en los países en desarrollo como parte del proceso mismo de desarrollo que crea más expectativas. Esto resulta en un aumento adicional de la demanda, conjuntamente con el crecimiento de población. Satisfacer tales demandas es justo desde el punto de vista nutricional y político. El hecho de que la demanda total de alimentos esté creciendo más rápidamente que la producción de alimentos (FAO, 1972) puede conducir a escasez de productos alimenticios, precios más altos y a seria inestabilidad social. Aunque el espectro de las muertes por hambre está conjurado en la actualidad, la probabilidad de una seria escasez de alimentos es muy real en los países en desarrollo. El President's Science Advisory Committee; (1967) estima que cuando se toman en cuenta tanto la población como la mayor demanda *per capita*, se necesita una tasa compuesta anual de crecimiento en la producción de alimentos del 4% anual. Esto está muy por encima del promedio de aproximadamente 2,7% que muestra el Cuadro 1.8. El mismo informe también indica que la demanda total de alimentos en los países en desarrollo podría duplicarse entre 1965 y 1985.

USO DE LA TIERRA

Aunque la agricultura constituye la principal actividad económica en las regiones tropicales, la proporción de tierra cultivada es la misma que en la zona templada: alrededor del 10%. Las pasturas y las praderas naturales constituyen un 20% adicional, pero muchas de estas áreas no se usan en escala considerable. Los Cuadros 1.9 y 1.10 muestran el grado de uso de la tierra por regiones o países. El President's Science Advisory Committee (1967) ha estimado que hay cerca de 1.7 mil millones de hectáreas de tierra potencialmente arable en los trópicos, de las cuales solamente 500 millones están en uso actualmente. También estima un área potencial de pastoreo de 1.6 mil millones de hectáreas, de las cuales de 1 mil millón están usándose para pastoreo en la actualidad. Los criterios para determinar lo que es potencialmente arable o pastoreable se basan en el nivel medio de tecnología agrícola en los Estados Unidos, lo cual probablemente subestima la realidad. Todos los suelos arables pueden usarse para pastoreo. Las cifras anteriores ponen de manifiesto que hay un gran potencial para expandir la producción de los trópicos, incorporando nuevas tierras a la producción agrícola, con un grado razonable de éxito posible.

Un análisis del tema por Kellogg y Orvedal (1969) indica que la mayor parte de los suelos potencialmente arables del mundo, pero actualmente no usados, están en los trópicos. Con excepción de Asia, la mayor parte de la población tropical está concentrada en las áreas

CUADRO No. 1.9. Uso de la tierra (millones de hectáreas) y población en las áreas tropicales. (Fuente: calculado con base en datos de FAO, 1970, Production Yearbook).

Total	Area terrestre total	Area cultivada*	Pasturas y Praderas	Bosques	% Area cultivada	Población 1969 (millones)	Area cultivada per capita (ha)
América tropical	1.683	83	282	914	5	239	0,35
Africa tropical	2.212	166	652	571	8	275	0,60
Asia tropical y Pacífico**	931	256	21	412	27	956	0,26
Trópicos	4.826	503	955	1897	10	1470	0,34
Mundo	13.392	1424	3001	4091	11	3647	0,41
Porcentaje de los trópicos	36	35	32	46	—	40	—

(*) Cultivos anuales y perennes.

(**) Excepto Australia.

costaneras, planicies aluviales con suelos altos de bases o valles intermontanos, todos con medios de transporte razonables. Tal como lo indica el Cuadro 1.9, a pesar de las grandes diferencias en densidad de población el área cultivada *per capita* en América tropical no es diferente a la de Asia tropical. Las diferencias en densidad de población se reflejan en el porcentaje del área total en producción, la cual oscila del 27% en Asia, al 8% en Africa y al 5% en América Latina.

Kellogg y Orvedal reconocieron que uno de los factores que actualmente limita la utilización de las áreas tropicales aptas para la producción de cultivos es la falta de conocimientos adecuados sobre cómo manejar los Oxisoles y Ultisoles altamente meteorizados que en la actualidad están ocupados por bosques pluviales o vegetación de sabana. Este tema cubrirá una gran parte de este libro, pero aquí basta señalar que en tales áreas se han obtenido rendimientos muy altos cuando se ha aplicado la tecnología apropiada.

Otra manera de aumentar la producción de alimentos es intensificar los rendimientos anuales por hectárea en el 10% del área tropical actualmente bajo cultivo. Los programas del tipo “revolución verde” han demostrado que los rendimientos pueden duplicarse y triplicarse con la adopción rápida de paquetes tecnológicos que incluyen nuevas variedades y prácticas de cultivo apropiadas a las pequeñas fincas.

CUADRO No. 1.10. Uso de la tierra (millones de hectáreas) y patrones de población de países que están totalmente o en su mayor parte, en los trópicos. Arreglado por tamaño decreciente. (Fuente: calculado con base en datos de FAO, 1970, Production Yearbook).

País o Región	Area terrestre total	Cultivada actual- mente	Pasturas y Praderas	% Area cultivada	Población 1969 (millones)	Area cultivada per capita (ha)
AMERICA TROPICAL						
Brasil	851	30	107	1	90,8	0,3
México	197	24	79	12	48,9	0,5
Perú	128	3	27	2	13,1	0,2
Colombia	114	5	15	4	20,4	0,2
Bolivia	110	3	11	3	4,8	0,6
Venezuela	91	5	14	6	10,6	0,5
América Central	52	5	8	10	16,1	0,3
Guyanas	47	0,2	3	0,5	1,2	0,2
Paraguay	41	1	10	2	2,3	0,4
Ecuador	28	3	2	9	5,9	0,5
Caribe	24	4	6	18	24,9	0,2
TOTAL	1683	83	282	5	239	0,3
ASIA TROPICAL Y PACIFICO						
India	327	163	14	50	537	0,3
Indonesia	190	13	—	7	117	0,1
Pakistán*	95	28	—	30	128	0,2
Indochina	75	6	5	8	48	0,1
Burma	68	16	—	24	27	0,6
Islas del Pacífico	55	2	1	4	4	0,5
Tailandia	51	11	—	22	35	0,3
Malasia	33	4	—	10	11	0,4
Filipinas	30	9	1	29	37	0,2
Sri Lanka	6	2	—	30	12	0,1
TOTAL	931	256	21	27	956	0,3
AFRICA TROPICAL						
Sudán	250	7	24	3	15	0,4
Zaire	234	7	66	3	17	0,4
Chad	128	7	45	6	3	2,3
Niger	127	11	3	9	4	2,7
Angola	125	1	29	1	5	0,2
Etiopía	122	13	69	10	25	0,5
Mauritania	103	0,3	39	0,3	11	0,0
Tanzania	94	12	45	13	13	0,9
Nigeria	92	22	26	24	66	0,3
Mozambique	78	3	44	3	7	0,4
Zambia	75	5	34	6	4	1,2
Madagascar	59	3	34	5	7	0,4
Kenia	58	2	4	3	11	0,1
Camerún	47	4	8	9	6	0,6
Rhodesia	38	2	5	5	5	0,4
Costa de Marfil	32	9	8	27	5	1,8
Alto Volta	27	10	14	35	5	1,9
Ghana	24	3	—	12	9	0,3
Uganda	23	5	5	21	8	0,6
Senegal	19	6	6	29	4	1,5
Otros	237	34	85	10	29	0,8
TOTAL	1992	166	593	8	257	0,6

(*) Incluye Bangladesh.

SISTEMAS DE PRODUCCION AGROPECUARIA

La agricultura tropical no es homogénea. Aún dentro de distancias muy cortas se pueden observar grandes plantaciones de caña de azúcar cuya cosecha se hace por medio de enormes máquinas, diminutos campos de arroz atendidos manualmente en forma cuidadosa, y una gran variedad de cultivos que crecen juntos en laderas muy escarpadas de colinas desmontadas con machete y quemas.

En la misma forma en que se señalan las principales diferencias en clima y vegetación, debe subrayarse la importancia relativa y la distribución de los principales sistemas agropecuarios, aún a expensas de grandes generalizaciones. Se reconocen cinco sistemas principales de producción al nivel más amplio de generalización:

- a. Agricultura migratoria, en el 45% del área tropical.
- b. Agricultura de subsistencia establecida, en el 17% del área tropical.
- c. Ganadería nómada, en el 14% del área tropical.
- d. Ganadería extensiva, en el 11% del área tropical.
- e. Plantaciones, en el 4% del área tropical.

En la Fig. 1.14 se presenta la distribución de estos sistemas agrícolas, desdoblado el sistema de subsistencia en dos tipos: a base de arroz o de otros cultivos. Operaciones de tipo familiar comercial análogas a las predominantes en Estados Unidos sólo existen en muy pequeña escala.

La agricultura migratoria predomina en casi la mitad del mundo tropical tanto en áreas de bosque como de sabana. Por lo general éstas son las áreas menos desarrolladas, en donde los agricultores cortan y queman una pequeña área, siembran varios cultivos en el mismo campo, y abandonan cuando los rendimientos bajan por razón de la fertilidad natural del suelo, por las malas hierbas o por otros factores. Aunque poco de la producción llega a los mercados establecidos, millones de gentes de los trópicos dependen de la agricultura migratoria como su medio de subsistencia. La agricultura migratoria está más generalizada en Africa Occidental y central en regímenes údicos y ústicos. También es muy común en la cuenca del Amazonas, en América Central, en las colinas de Asia suroriental y en el Pacífico.

La ganadería nómada cubre aproximadamente el 14% de los trópicos, principalmente en las áreas áridas de Africa y la península arábiga. Prácticamente no existen en América tropical ni en Asia tropical.

Los sistemas tradicionales de colonización cubren las áreas restantes. En alrededor del 11% predomina la ganadería extensiva esencialmente en América tropical y en Australia. Los sistemas permanentes

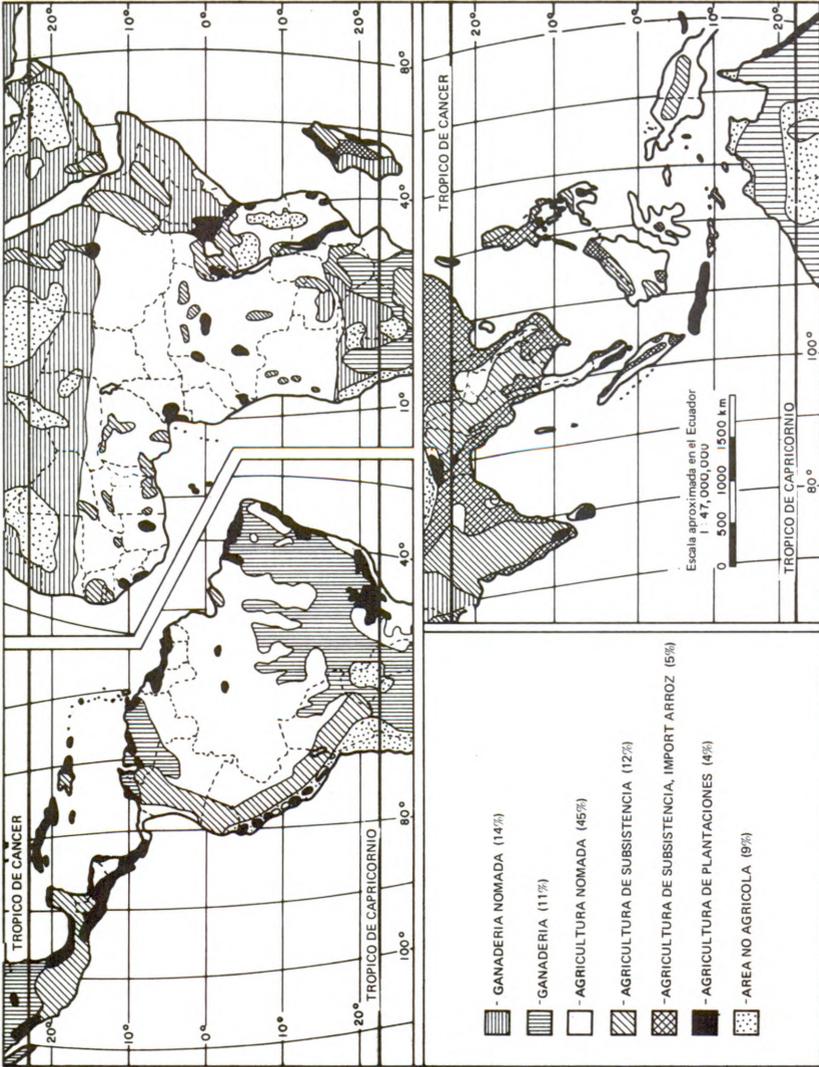


Fig. 1.14. Los trópicos: sistemas de manejo. Fuente: adaptado de Whittesley (1936).

de cultivo en pequeñas fincas pueden subdividirse en sistema de arroz inundado que ocupan cerca del 5% de los trópicos (más que todo en Asia) y los sistemas basados en otros cultivos, tales como maíz, frijol, sorgo, etc. Los últimos cubren alrededor del 10% de los trópicos abarcando los Andes, la mayor parte de India, las colinas de Asia suroriental y algunas áreas diseminadas de Africa.

Los sistemas de manejo más refinados en términos del uso de maquinaria y fertilizantes son las plantaciones modernas de cultivos de exportación, tales como caña de azúcar, café, cacao, caucho, banana, y piña. Estos existen en pequeñas áreas en todos los trópicos, pero son más predominantes en América Central, El Caribe, el sur de Brasil, Malasia e Indonesia.

La importancia relativa y la extensión de estos sistemas agrícolas deben reconocerlas los agrónomos de las zonas templada y tropical igualmente. La empresa "finca familiar americana" casi no existe en los trópicos, excepto en el norte de Australia y sur del Brasil. El equivalente tropical es el sistema de arroz en parcelas inundadas en Asia sureste, en el que una familia generalmente trabaja sólo de 1 a 3 hectáreas. Los sociólogos opinan que es muy difícil cambiar estos sistemas tradicionales, aún con revoluciones políticas. Estos sistemas deben reconocerse y deben hacerse intentos por mejorarlos, en vez de tratar de transplantar prácticas europeas o norteamericanas. Por otra parte, en las áreas de América del Sur despobladas, tales como partes del Cerrado de Brasil, cualquier cosa es posible por cuanto no existen sistemas agrícolas tradicionales.

CULTIVOS ALIMENTICIOS TROPICALES

Cuando se usa el término "cultivo tropical" la mayor parte de la gente piensa en mangos, café, papayas, caña de azúcar, o frutas exóticas. Debido al rápido desarrollo de las plantaciones agrícolas con propósitos de exportación, existe una cantidad considerable de conocimientos acerca de cultivos tales como: caña de azúcar, piñas, bananos, café, cacao, y té. Desafortunadamente estos cultivos contribuyen poco a la nutrición de las gentes de los trópicos, porque aún los que poseen valor nutritivo son exportados en gran parte a la zona templada.

Como el interés yace en la producción de alimentos es conveniente examinar la importancia relativa de los principales cultivos alimenticios. Los Cuadros 1.11 y 1.12 muestran la producción, área sembrada y rendimiento promedio de los 12 cultivos alimenticios más importantes en los trópicos como un todo y por regiones. Mientras se examinan estas cifras no debe olvidarse los 1000 millones de hectáreas dedicadas a pasturas y praderas para producción animal. El área total ocupada por estos 12 cultivos es de aproximadamente 300 millones de hectáreas. El resto del área total cultivada (500 millones de

CUADRO No. 1.11. Producción, área y rendimiento de los principales cultivos alimenticios de los trópicos. (Fuente: cálculos de FAO, 1970, Production Yearbook).

Cultivo	Producción (millones de toneladas métricas)	Área (millones ha)	Rendimiento ton/ha	Producción mundial en los trópicos %
1. Arroz	169,4	94,0	1,80	55
2. Yuca	90,5	9,6	9,42	99
3. Maíz	63,8	53,0	1,20	24
4. Camotes y ñames	35,4	4,7	7,53	26
5. Trigo	34,6	28,9	1,20	11
6. Sorgo	20,3	29,2	0,70	46
7. Mijo	15,4	29,9	0,52	81
8. Maní	13,8	16,1	0,86	76
9. Papa	13,7	1,7	8,06	5
10. Frijol	10,3	16,5	0,62	88
11. Otras leguminosas de grano	7,3	11,2	0,65	33
12. Soya	2,7	2,6	1,03	6

hectáreas) está dedicado a plantaciones o a cultivos menores. Es difícil ser más específico debido a la frecuencia de cultivos intercalados o asociados.

El arroz (*Oryza sativa*) es el cultivo alimenticio que se produce en mayores cantidades en el mundo, y ocupa la mayor área en los trópicos. El arroz no está restringido a los trópicos; la producción de la zona templada, en particular en China y Japón, responde al 45% del total mundial. Alrededor del 90% del arroz del mundo se produce en Asia bajo una variedad de sistemas de manejo. Sin embargo, el arroz es un cultivo alimenticio muy importante en América y en África tropicales, ocupando el tercer y el sexto lugar respectivamente en esas áreas. La mayor parte del arroz producido en estas dos regiones es cultivado en condiciones de secano (sin irrigación). Publicaciones del Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz (International Rice Research Institute) proporcionan excelente información sobre este cultivo.

La yuca (*Manihot esculenta*) es el cultivo alimenticio producido en mayor cantidad, después del arroz, en los trópicos. Este cultivo está esencialmente limitado a los trópicos, en donde también recibe los nombres de "tapioca", "manioc", y "mandioca". Ocupa el primer lugar en producción total en América y en África tropicales, y el tercer lugar en Asia, después del arroz y el trigo. A pesar de su

CUADRO No. 1.12. Importancia relativa de los doce cultivos alimenticios tropicales más importantes por continentes. (Fuente: cómputos de FAO, 1970, Production Yearbook).

Cultivo	Producción (millones toneladas métricas)	Area (millones de ha)	Rendimiento (ton/ha)
AMERICA TROPICAL			
1. Yuca	34,5	2,5	13,80
2. Maíz	30,9	23,8	1,30
3. Arroz	11,4	6,2	1,84
4. Papa	6,6	0,8	8,25
5. Trigo	4,3	3,0	1,44
6. Frijol	4,1	6,8	0,60
7. Camotes y ñames	3,7	0,4	8,50
8. Sorgo	2,8	1,3	2,17
9. Soya	1,9	1,4	1,35
10. Maní	1,1	0,8	1,49
11. Otras leguminosas de grano	0,5	0,6	0,83
12. Mijo	0,2	0,2	0,81
AFRICA TROPICAL			
1. Yuca	36,0	4,9	7,39
2. Camotes y ñames	21,6	3,0	7,09
3. Maíz	16,6	15,1	1,10
4. Sorgo	7,1	8,5	0,83
5. Mijo	5,4	8,1	0,66
6. Arroz	4,8	3,4	1,43
7. Maní	4,7	5,8	0,81
8. Trigo	2,7	2,8	0,94
9. Papa	1,8	0,2	7,39
10. Frijol	0,9	1,4	0,65
11. Otras leguminosas de grano	0,6	0,8	0,77
12. Soya	0,03	0,04	0,67
ASIA TROPICAL			
1. Arroz	153,2	84,4	1,81
2. Trigo	27,6	23,1	1,19
3. Yuca	20,0	2,2	8,82
4. Maíz	16,3	14,1	1,16
5. Sorgo	10,4	19,4	0,54
6. Camotes y ñames	10,1	1,3	7,93
7. Mijo	9,8	21,6	0,45
8. Maní	8,0	9,5	0,84
9. Garbanzos	6,2	8,8	0,71
10. Papa	5,3	0,7	8,14
11. Frijol y otras leguminosas	3,6	9,3	0,39
12. Soya	0,8	1,2	0,67

importancia como fuente de energía (y debido a las grandes cantidades que se consumen, una fuente importante de proteína) la yuca ha recibido poca atención en cuanto a investigación y mejoramiento. Un programa dinámico está en marcha en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en Colombia. Para mayor información pueden revisarse los artículos de Cours (1951), Jennings (1970) y Hendershoot et al., (1972).

El maíz (*Zea mays*) ocupa el tercer lugar en producción total en los trópicos, después del arroz y la yuca, pero ocupa el segundo lugar en área total sembrada. La mayor parte del maíz tropical se usa como alimento, ya sea directamente o como harina. En las áreas más desarrolladas el maíz sirve como alimento para ganado y para aves de corral, pero todavía su mayor consumo es hecho directamente por el hombre. A diferencia de la situación con la yuca, el mejoramiento del maíz ha recibido gran atención en los trópicos. Un informe de CIMMYT (1971b) resume gran parte de los conocimientos actuales.

Dos cultivos de raíces feculentas, camote (*Ipomoea batatas*) y ñames (*Dioscorea* spp.) juntos ocupan el cuarto lugar en importancia. Los ñames constituyen una porción importante de la dieta en África tropical, y también son de importancia en el resto de los trópicos. Los camotes están más generalizados en América tropical, Asia suroriental y las islas del Pacífico. Varios otros cultivos de raíces, tales como *Xanthosoma maffafa* (malanga, yautía tanier) y *Colocasia esculenta* (tiquizque, taro, cocoyam) son importantes donde se cultivan camotes y ñames. Con la excepción del camote, estos cultivos han recibido una atención muy limitada por parte de los investigadores. Gran parte de los conocimientos actuales están resumidos en los simposios de cultivos tropicales de raíces celebrados en la Universidad de las Indias Occidentales (Tai et al., 1967) y en Hawaii (Plucknett, 1970).

El trigo (*Triticum aestivum*) está restringido a las tierras altas tropicales o a los bordes de los trópicos donde las temperaturas son suficientemente bajas para permitir el crecimiento de este cultivo básicamente de zona templada. Es importante en las partes del norte del subcontinente indio, el norte de México, los Andes y el sur de Brasil. Los esfuerzos en investigación, que se originaron en México y ahora se han esparcido por todo el mundo, han dado por resultado los más dramáticos aumentos en rendimiento en este cultivo que en cualquier otro. Un informe de CIMMYT (1971a) resume el estado actual del mejoramiento del trigo.

El sorgo (*Sorghum* spp.) y los mijos (*Pennisetum* spp.) ocupan el sexto y el séptimo lugar, respectivamente, en importancia. En la actualidad los consumen como alimento millones de africanos y asiáticos, sobre todo en los ambientes ústico y arídico. En áreas con empresas ganaderas intensivas se les está comenzando a usar como alimento para ganado.

El maní o cacahuete (*Arachis hipogaea*) también es importante en las áreas ústicas y arídicas de África y Asia, suministrando una porción considerable de las necesidades de proteína. Este cultivo es de menor importancia en los trópicos húmedos. El libro de Irvine (1969), sobre los cultivos de África Occidental describe detalladamente el sorgo, el mijo y el maní.

La papa (*Solanum tuberosum*) es una de las principales fuentes de alimentación en las tierras altas tropicales, particularmente en los Andes, de donde es originaria. Aunque en las tierras bajas sólo se le cultiva en escala limitada, parece que en las tierras bajas tropicales hay algunas posibilidades de mejorar su adaptación. En los trópicos, especialmente en Perú, recientemente se ha incrementado la investigación; una recopilación del Centro Internacional de la Papa (CIP, 1972) resume los conocimientos actuales.

El frijol (*Phaseolus vulgaris*) constituye una fuente proteínica muy importante en los trópicos, especialmente en América Latina, en donde se le cultiva casi en todas las fincas, intercalado por lo general, con maíz. El mayor esfuerzo en investigación se ha concentrado en América Central, pero ha habido poco éxito en el aumento de rendimientos. Otras leguminosas de grano, tales como caupí (*Vigna sinensis*), frijol lima (*Phaseolus lunatus*), lentejas (*Lens esculentax*), haba (*Vicia faba*), arveja (*Pisum sativum*), garbanzo (*Cicer arietum*), y gandul (*Cajanus cajan*) son de importancia en algunas áreas específicas. La soya (*Glycine max*) ha sido una fuente tradicional de alimentación en Asia, y actualmente se le está introduciendo a América Latina para uso industrial. La demanda universal por este cultivo y su versatilidad lo elevarán a un papel más importante en los trópicos. Un simposio en CIAT (1973) constituye una buena fuente de referencia para leguminosas de grano de América Latina.

Aunque por falta de datos estadísticos no se incluyen el banano y los plátanos en los Cuadros 1.10 y 1.11, éstos son cultivos muy importantes, consumidos tanto como fruta cruda (*Musa sapientum*), como cocinado (*Musa paradisiaca*). En 1970 se produjo en América tropical un total de 16.3 millones de toneladas, pero no es posible determinar qué parte de ese total fue exportado. Desde el punto de vista cualitativo, es probable que los plátanos y los bananos sean tan importantes como los camotes y los ñames como fuentes de carbohidratos en los trópicos. El libro de Simmonds (1967) es la fuente más al día sobre este cultivo.

El Cuadro 1.13 presenta el valor nutritivo de los principales cultivos alimenticios tropicales. De especial interés es la gran diferencia en contenido de carbohidratos entre los cereales, las raíces y las frutas, debido al contenido de humedad. El contenido de proteína de los

CUADRO No. 1.13. Valor nutritivo de los principales cultivos alimenticios de los trópicos. (Fuente: cálculo de datos de Wu Leung y Flores, 1961).

Cultivo	Alimento	Energía (cal/100 g)	Carbohi- dratos (%)	Proteína (%)	H ₂ O (%)	Fe (mg/100 g)	Vitaminas				
							A (mg)	B ₁	B ₂	Nia- cina C	
CEREALES											
Arroz, procesado	Grano	364	79	7,2	12	1,3	0	0,08	0,03	1,6	0
Maíz, entero	Grano	361	74	9,4	11	2,5	70	0,43	0,10	1,9	Tr.
Trigo, entero	Grano	330	69	14,0	13	3,1	0	0,57	0,12	4,3	0
Sorgo, entero	Grano	342	76	8,8	10	3,7	10	0,41	0,12	3,2	0
RAICES											
Yuca, pelada	Tubérculo	132	32	1,0	65	1,4	Tr.	0,05	0,04	0,6	19
Camote, pelado	Tubérculo	116	28	1,3	69	1,0	181,5*	0,11	0,04	0,8	31
Ñame, pelado	Tubérculo	100	24	2,0	73	1,3	Tr.	0,13	0,02	0,4	3
Papa, sin pelar	Tubérculo	79	18	2,8	78	1,0	Tr.	0,11	0,04	1,5	20
FRUTAS FECULENTAS											
Banano, pelado	Fruta	110	29	1,2	69	0,5	65	0,04	0,04	0,7	15
Plátano, pelado	Fruta	122	32	1,0	66	0,8	175	0,06	0,04	0,6	20
LEGUMINOSAS DE GRANO											
Frijoles, ctes.	Grano	337	60	22,0	12	7,6	5	0,54	0,19	2,1	3
Maní, con cáscara	Grano	543	21	25,5	7	3,0	10	0,91	0,21	17,6	1
Soya	Grano	398	35	33,4	9	11,5	Tr.	0,88	0,27	0,22	0
Gandul	Grano	337	63	19,2	12	5,0	20	0,72	0,17	2,6	0
Caupí	Grano	341	60	24,1	11	7,2	10	0,87	0,23	1,9	3
Garbanzo	Grano	364	61	18,2	12	7,3	15	0,46	0,16	1,7	1

(*) Variedades amarillas; variedades blancas promedio 30.

alimentos feculentos es de gran importancia por cuanto estos cultivos suministran el grueso del consumo proteínico en las dietas de los trópicos. Esta situación puede afectarse notoriamente con nuevas variedades y prácticas de cultivo. Por ejemplo, una combinación de una variedad de arroz alta en proteína y la aplicación tardía de nitrógeno aumentó el contenido proteínico del arroz del 7 al 9% (DeDatta et al., 1972). Aunque los tubérculos de yuca son muy bajos en proteína, un estudio del CIAT (1969) mostró un ámbito de 0,5 a 7,2% de proteína en su colección de germoplasma. Tanto los programas de mejoramiento como de manejo tienen un futuro brillante para el incremento de proteína, pero la situación actual es la que presenta el Cuadro 1.13.

También puede hacerse una comparación de estos cultivos en términos de su producción de energía, carbohidratos y proteína por hectárea. Tales datos aparecen en el Cuadro 1.14, basados en los rendimientos promedio de 1970 en los trópicos. Se puede notar que los cultivos de raíces, especialmente la yuca, así como el plátano, superan ampliamente a los cereales en cantidad de energía por hectárea. El plátano, el banano y la yuca producen más de 2,5 ton/ha de carbohidratos por cosecha. En términos de producción de proteína, la soya está muy por encima de los otros cultivos de la lista. La papa ocupa el segundo lugar como productor de proteína, superando ampliamente las otras leguminosas de grano, y duplicando o triplicando la capacidad de producción de proteína de la yuca, banano, arroz y maíz.

CUADRO No. 1.14. Capacidad de producción de carbohidratos y proteína de los principales cultivos tropicales a niveles promedio de rendimiento.

Cultivo	Rendimiento promedio del cultivo (ton/ha)	Porción comestible (%)	Energía por cosecha (Mcal/ha)	Producción de carbohidratos (ton/ha)	Producción de proteína por cosecha (kg/ha)
Arroz	1,80	70	4,6	1,00	91
Maíz	1,20	100	4,3	0,89	113
Trigo	1,20	100	3,9	0,83	168
Sorgo	0,70	100	2,4	0,53	62
Yuca	9,42	83	10,3	2,56	78
Camote	6,50	88	6,6	1,63	74
Ñame	8,00	85	6,8	1,65	136
Papa	8,06	100	6,4	1,47	226
Banano	15,20	65	10,9	2,86	118
Plátano	15,20	69	12,8	3,38	104
Frijol	0,62	100	2,1	0,38	136
Maní	0,86	71	3,3	0,13	156
Soya	1,03	100	4,1	0,36	344
Caupí	0,36	100	1,2	0,22	87

Un mayor refinamiento de este análisis incluye el cálculo de la producción por hectárea por día, a fin de tomar en cuenta las grandes diferencias en la duración del ciclo de crecimiento de estos cultivos. El Cuadro 1.15 presenta el promedio de capacidad de producción diaria de energía, carbohidratos, y proteína. El camote y la soya producen más de 45 kcal/ha por día, seguidos por arroz, papa, plátano, maíz, trigo y yuca. La soya, papa, frijol y trigo son los más altos productores de proteína por día.

Aunque no todos estos cultivos pueden hacerse en la misma área, tal análisis señala las ventajas nutritivas y las limitaciones cuando hay posibilidad de selección. Pueden diseñarse sistemas de cultivos múltiples, o esquemas de rotación de cultivos que produzcan las cantidades deseadas de energía o proteína. Cálculos similares pueden hacerse para la obtención de hierro y vitaminas con base en los datos del Cuadro 1.13. Debe recordarse, sin embargo, que las variedades mejoradas y las nuevas prácticas culturales a menudo duplican o triplican los rendimientos promedio que sirven como base a estos cálculos.

CUADRO No. 1.15. Producción comparativa por día de carbohidratos y proteína de los principales cultivos tropicales a niveles promedio de rendimiento.

Cultivo	Duración promedio de crecimiento (días)	Energía (kcal/ha)	Carbohidratos (kg/ha)	Proteína (kg/ha)
Arroz	120	38,2	8,3	0,76
Maíz	125	34,6	7,0	0,90
Trigo	120	33,0	6,9	1,40
Sorgo	135	17,6	3,9	0,46
Yuca	330	31,2	7,8	0,23
Camote	135	49,1	12,4	0,55
Ñame	280	24,3	5,8	0,49
Papa	180	35,5	9,7	1,50
Banano	365	29,8	9,4	0,32
Plátano	365	35,0	9,3	0,28
Frijol	90	23,3	4,2	1,51
Maní	120	27,5	1,0	1,30
Soya	90	45,5	4,0	3,82
Caupí	90	13,3	2,4	0,96

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. Los trópicos no son uniformes. Existe una gran variabilidad en los regímenes de temperatura y pluviosidad. La única propiedad que unifica los climas tropicales es sus regímenes relativamente uniformes de temperatura a través del año. Los climas tropicales no siempre son desagradables para las personas. En las tierras bajas y lluviosas la temperatura es a menudo alta, pero pocas veces tan alta como la de la zona templada durante el verano. Es difícil encontrar un clima más agradable que el de las tierras altas tropicales, como por ejemplo, San José, de Costa Rica, o Nairobi, en Kenia.
2. Temperaturas altas y constantes durante todo el año caracterizan las tierras bajas tropicales, que constituyen el 87% del área. La ausencia de limitaciones de temperatura da a los trópicos un potencial agrícola mucho más alto para una producción durante todo el año que el que existe en la zona templada.
3. La distribución de las lluvias es el principal parámetro para propósitos agrícolas. Aproximadamente la mitad de los trópicos tiene estaciones lluviosa y seca pronunciadas (régimen ústico de humedad del suelo); una cuarta parte tiene una pluviosidad alta distribuida a través de todo el año (régimen údico de humedad del suelo); y una cuarta parte tiene clima semiárido o desértico (régimen arídico de humedad del suelo).
4. Las estaciones lluviosa y seca ejercen una influencia en el crecimiento de las plantas similar a la del invierno y el verano en la región templada. Gran parte del crecimiento vegetal y la producción animal se detiene durante la estación seca. El comienzo de las lluvias produce un estallido de actividad parecido al que marca la llegada de la primavera en la zona templada.
5. La mayor parte de los trópicos no está cubierta por selvas. El más extensivo tipo de vegetación es la sabana, con un 43% del trópico. El bosque pluvial tropical cubre el 30%; bosques semi-decíduos o decíduos cubren el 15% y el resto corresponde a arbustos y matorrales desérticos o a ausencia de vegetación.
6. La superficie terrestre de los trópicos va desde lo más antiguo de la tierra (antiguas rocas cristalinas en América del Sur y África) a los más recientes depósitos volcánicos.
7. La carrera entre el crecimiento de la población mundial y el suministro de alimentos continúa peligrosamente pareja en la

década de los 70s. El resultado final lo decidirán las regiones tropicales. Las tasas de crecimiento de la población en los trópicos son dos veces más altas que en la zona templada. En general la producción de alimentos se ha mantenido a la altura de los aumentos de población.

8. La demanda por más y mejores alimentos en los trópicos, junto con la reciente escasez de combustibles y fertilizantes ha roto este equilibrio colocándolo en un punto peligroso. La situación es más grave cuando se toma en cuenta la inadecuación de la dieta. Aunque solamente el 20% de la población mundial padece de desnutrición (en términos de consumo diario de calorías), más de las dos terceras partes de la población está mal nutrida (deficiencias proteínica y otras). El grueso de la población desnutrida y mal nutrida está en los trópicos.
9. Sólo una décima parte de la tierra potencialmente arable de los trópicos está cultivada. La mayor parte de la tierra potencialmente arable del mundo, pero sin aprovechar todavía, queda en los trópicos. Probablemente la solución a largo plazo del problema mundial de alimentos consiste en poner esa tierra a producir, bajar el porcentaje de crecimiento de población, e intensificar la producción de la tierra actualmente bajo cultivo.
10. La agricultura tropical dista mucho de ser homogénea, excepto en términos de rendimientos promedio bajos. Los sistemas agrícolas más importantes en términos de porcentajes de área son los siguientes: agricultura migratoria (45%); subsistencia establecida (17%); ganadería nómada (14%); ganadería extensiva (11%); y plantaciones, principalmente para exportación (4%).
11. El orden probable de importancia de los cultivos alimenticios de los trópicos es el siguiente: arroz, yuca, maíz, camotes y ñames, trigo, sorgo y mijo, bananos y plátanos, maní, papas y leguminosas de grano. Los valores nutritivos de estos cultivos varían considerablemente. Con los rendimientos promedio actuales, los cultivos de raíces y los plátanos sobrepasan en mucho a los cereales en producción total de energía por cosecha. La soya y la papa son los más altos productores de proteína por cosecha. En base diaria los cultivos más productivos en términos tanto de energía como de proteína por día son el camote y la soya. Otras diferencias en lo referente a vitaminas, minerales y calidad proteínica también son de importancia. Recientes avances en rendimientos han tenido lugar en arroz y trigo, dando por resultado dramáticos aumentos en producción. Se espera que en la próxima década haya otros avances similares en otros cultivos tropicales, particularmente en cultivos de raíces.

REFERENCIAS

- ARENS, K. The dwarfed plants of the "cerrado" fields as flora adapted to mineral deficiencies in the soil. In M. G. Ferri (coord.), *Simpósio sobre o Cerrado*. Edgar Blücher, São Paulo, 1963. pp. 285-303.
- AUBERT, G. y TAVERNIER, R. Soil survey. In: *Soils of the humid tropics*. U.S. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 17-44.
- AUBREVILLE, A. *Principes de une systematique des formations vegetales tropicaux*. *Adansonia* 5:153-196. 1965.
- BARKER, R. The economic consequences of the green revolution in Asia. In *Rice, science and man*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 115-126.
- BARTLETT, H. H. Fire, primitive agriculture and grazing in the tropics. In W.L. Thomas (ed). *Man's role in changing the face of the earth*. University of Chicago Press, Chicago, 1957. pp. 692-720.
- BLUMENSTOCK, D. I. Distribution and characteristics of tropical climates. *Proc. Ninth Pacific Sci. Congr. (Bangkok)* 20:3-23. 1958.
- BOULIERE, F. y HARDY, M. The ecology of tropical savannas. *Ann. Rev. Ecol. Systematics* 1:125-152. 1970.
- BUDOWSKI, G. Tropical savannas, a sequence of forest feelings and repeated burnings. *Turrialba* 6(1-2):23-33. 1956.
- _____. Some ecological characteristics of higher tropical mountains. *Turrialba* 16(2):159-163. 1966a.
- _____. Los bosques de los trópicos húmedos de América. *Turrialba* 16:278-285. 1966b.
- CIAT. Cassava production systems. Annual Report. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1966. p. 42.
- _____. Potential of grain legumes in Latin America. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1973. 388 p.
- CIMMYT. Proceedings of the first wheat workshop. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, El Batán, México, 1971a. 88 p.
- _____. Proceedings of the first maize workshop. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, El Batán, México, 1971b. 107 p.
- CIP. Prospects of the potato in the development world. Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú, 1972.
- COCHRANE, W. W. The world food problem. A guardedly optimistic view. Crowell, New York, 1969.
- COURS, G. Le manioc a Madagascar. *Mem. Inst. Sci. Madagascar, Ser B* 3(2):203-399. 1951.
- DeDATTA, S. K., OBCEMEA, W. N., y JANA, R. K. Protein content of rice grain as affected by nitrogen fertilization and some triazines and substituted ureas. *Agron. J.* 64:785-788. 1972.
- D'HOORE, J. D. Pedological comparisons between tropical South America and tropical Africa. *Afr. Soils* 4:5-18. 1956.
- DeMARTONNE, E. *Traité de Géographie Physique*. Armand Colin, Paris, 1957.
- DeVRIES, C. A., FERWERDA, J. A., y FLACH, M. Choice of food crops in relation to annual and potential production in the tropics. *Netherl. J. Agr. Sci.* 15:241-248. 1967.
- DeWITT, C. T. Photosynthesis: Its relationship to overpopulation. In F. A. San Pietro et al, (eds). *Harvesting the sun*. Academic Press, New York, 1967. pp. 315-320.

- EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. *Bot. Rev.* 38(2):201-341. 1972.
- EYRE, S. R. Vegetation and soils. A world picture. Aldine, Chicago, 1962.
- FAO. Production Yearbook. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1970, 1971.
- . The state of food and agriculture. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Rome, 1972.
- FRANCIS, C. A. Natural daylength for photoperiod-sensitive plants. *CIAT Tech. Bull.* 2. 1972.
- GOLLEY, F. B., y LEITH, H. Bases of organic production in the tropics. In *Tropical Ecology*. University of Georgia, Athens, 1972. pp. 1-26.
- GOODLAND, R. Oligotrofismo e alumínio no Cerrado. In M. G. Ferri (coord.), III Simpósio sobre o Cerrado. University of São Paulo, Brasil, 1971. pp. 45-60.
- HARRIS, D. R. The origins of agriculture in the tropics. *Amer. Scientist* 60:180-193. 1972.
- HENDERSHOTT, CH. H. et al. A literature review and research recommendations on cassava. University of Georgia, Athens, 1972. 326 p.
- HOLDRIDGE, L. R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105:367-368. 1947.
- . *Life Zone Ecology*. rev. ed. Tropical Science Center, San José, Costa Rica, 1967.
- IRRI. Annual Report. Agronomy Section, International Rice Research Institute, Manila, Philippines, 1969. pp. 109-111.
- . Rice breeding. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1971. 798 p.
- IRVINE, F. R. West African crops. Oxford, London, 1969.
- JENNINGS, D. L. Cassava in Africa. *Field Crops Abs.* 23(3):267, 271, 278, 1970.
- KELLOGG, C. E., y ORVEDAL, A. C. Potentially arable soils of the world and critical measures for their use. *Adv. Agron.* 21:109-170. 1969.
- KOPPEN, W., y GEIGER, R. *Hanbuch der Klimatologie*. Berlin, Borntraeger, 1936. v.1.
- LANDSBERG, H. E. Solar radiation at the earth's surface. *Solar Energy* 5:95-98. 1961.
- , LIPPMAN, H., PATTEN, K. H., y TROLL, C. In E. Rodenwalt y A. Justaz (eds.). *Die Jahreszeitenklimate der Erde*. Heidelberg Akademie der Wissenschaften, Springer Verlag, Heidelberg, 1963.
- LAWES, E. F. Confidence limits for expected rainfall at Muguga, Kenya. *East Afri. Meteorol. Dept. Tech. Mem.* 1969. 15 p.
- LEE, D. H. K. Climate and economic development in the tropics. Harper, New York, 1957.
- LOPEZ, A. A. A survey of the fertility status of soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, 1975. 138 p.
- MOHR, E. C. J., VAN BAREN, F. H., y SCHUYLERBORGH, J. VON. Tropical soils: A comprehensive study of their genesis. 3rd rev., enlarged ed. Mouton-Ichtlar Baru-Van Hoeve, The Hague, 1972.
- MYERS, W. M. World food supplies and population growth. In D. G. Aldrich (ed.). *Research for the world food crisis*. Amer. Assoc. Adv. Sci. Publ. 92. 1970. pp. 3-30.
- ODUM, H. T. (ed.). *A tropical rainforest*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1972.

- PADDOCK, P., y PADDOCK, W. 1967. *Famine. America's Decision-Who will Survive?* Little Brown, Boston, 1975.
- PLUCKNETT, D. L. (ed.). *Tropical root and tuber crops tomorrow*. College of Tropical Agriculture, University of Hawaii, 1970. v.1.
- PRESIDENT'S SCIENCE ADVISORY COMMITTEE. *The world food problem*. The White House, Washington, 1967. v.2.
- RICHARDS, P. W. *The tropical rainforest*. Cambridge University Press, London, 1952.
- SIMMONDS, N. W. *Bananas*. Longmans, London, 1967.
- SMITH, G., NEWHALL, D. F., ROBINSON, L. H., y SWANSON, D. *Soil temperature regimes-their characteristics and predictability*. U.S. Dept. Agr. Soil Conserv. Service Tech. Paper 144. 1964. 14 p.
- SOIL SURVEY STAFF. *Soil Taxonomy (draft)*. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, 1970.
- _____. *Soil Taxonomy USDA Agriculture Handbook 436*. Soil Conservation Service, Washington D.C. 1975. 754 p.
- TAI, E. A. et al. (eds.). *Proceedings of the international symposium on tropical root crops*. University of West Indies, Trinidad, 1967. v. 1 y 2.
- THOMAS, M. F. *Tropical geomorphology*. Wiley, New York, 1974. 332 p.
- VICENTE-CHANDLER, J., CARO-COSTAS, R., PEARSON, R. W., et al. *The intensive management of tropical forages in Puerto Rico*. Univ. of Puerto Rico, Bull. 202. 1964.
- WHITTLESEY, D. *Major agricultural regions of the earth*. Ann. Assoc. Amer. Geogr. 26:199-242. 1936.
- WILLIAMS, C. N., y JOSEPH, K. T. *Climate, soil and crop production in the humid tropics*. Oxford University Press, Singapore, 1970.
- WOOD, A. *The groundnut affair*. Bodley Head, London, 1950. 264 p.
- WU LEUNG, W. T., FLORES, M. *Tablas de composición de elementos para uso en América Latina*. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, Guatemala, 1961.
- YÑIGUEZ, A. D., y SANDOVAL, A. R. *Rainfall probabilities at the U.P.* College of Agriculture. Philipp. Agr. 49(8):681-695. 1966.

CAPITULO 2

SUELOS DE LOS TROPICOS

Uno de los principales obstáculos para entender la ciencia de los suelos tropicales es la terminología sumamente confusa e imprecisa que se encuentra en toda la literatura. Los términos “suelos tropicales”, “Latosol”, “laterita” y “suelos lateríticos”, significan cosas muy diferentes para distintas personas. El uso generalizado de por lo menos cinco principales sistemas de clasificación de suelos aumenta la confusión e impide la comparación y extrapolación de datos de un lugar a otro. Es oportuno en este momento comentar los acontecimientos que conducen a esta confusión y sugerir medios de clarificación.

La ciencia del suelo se desarrolló primero en la zona templada, particularmente en la Unión Soviética, Europa y Estados Unidos. Las visitas de científicos de suelo a los trópicos en el Siglo XIX dieron por resultado un panorama equivocado de la uniformidad de los suelos tropicales y una exageración de la presencia e importancia de capas endurecidas ricas en óxidos de hierro llamadas “lateritas”. Al retornar a sus países, estos científicos tenían la tendencia a enfatizar en su enseñanza y en sus publicaciones lo que ellos creyeron más interesante: la presencia de lateritas. Como resultado de estos informes vastas áreas de los trópicos con suelos similares a los existentes en la zona templada fueron prácticamente pasados por alto. De esa manera el término “suelo tropical” surgió en la literatura significando suelos altos en hierro que se endurecen irreversiblemente al estar expuestos. A los suelos en proceso de transformarse en laterita se les designó “latosoles” y “suelos lateríticos”. La “laterización” se convirtió en un proceso aceptado de formación de suelo. Tales informes están bien resumidos en revisiones de Alexander y Cady (1962) y Sivarajasingham et al (1962).

En 1933 Frederick Hardy publicó un artículo enfatizando que las lateritas tienen una extensión muy limitada en los trópicos. En un estudio exploratorio del Distrito Federal de Brasil, en donde las lateritas se mencionan corrientemente, Feuer (1956) encontró que éstas podrían cubrir apenas el 5% de esa área. En Africa Occidental un mapa generalizado de Segalen (1970), indica que el área total con

afloraciones de laterita o capas de laterita, cerca de la superficie es alrededor del 15%. Aún en el sur de India, donde se hicieron los estudios originales de lateritas, suelos que antes se conocían como "suelos de laterita" se clasifican ahora como Alfisoles, Inceptisoles o Ultisoles (Gowaikar, 1973). En una revisión sobre suelos de América Latina, Buol (1973) subrayaba que la definición actual de "laterita" o "plintita" se refiere a un material y no a una clase de suelo, también subrayó la limitada extensión superficial de las lateritas y el hecho de que se presentan en determinadas posiciones geomórficas, no sólo en los trópicos sino también en los Estados Unidos.

Poca atención se ha puesto al artículo de Hardy y a las publicaciones subsiguientes. Esta creencia general ha conducido a muchos artículos populares y publicaciones científicas, como las de McNeil (1964) y Kamarck (1972) al llegar a la conclusión de que la mayor parte de los suelos tropicales, una vez limpios de vegetación, en pocos años se convierten en pavimento inservible de ladrillo. Aunque esta situación realmente existe, las lateritas se encuentran en menos del 7% de los trópicos, más a menudo en el subsuelo (Sánchez y Buol, 1975). Sin embargo en las localidades en que existen, las lateritas constituyen un serio problema de manejo.

De la información presentada en el Capítulo 1 resulta obvio que los suelos tropicales no pueden ser uniformes debido a la gran variedad de clima, vegetación, material originario, geomorfología y edad. La única propiedad común en todos los suelos tropicales es la falta de variación estacional en la temperatura del suelo (Buol, 1973).

Todas las otras generalizaciones son incorrectas. Expresar que todos los suelos tropicales son muy lixiviados e infértiles equivale a decir que todos los suelos templados son recientes y fértiles. El significado vago y variado de los términos "latosol", "laterita" y "suelo laterítico" merecen un cuidadoso examen por parte de los investigadores modernos. La única excepción válida a esta regla es la cuantificada definición de "latosoles" en el sistema brasileño de clasificación de suelos (Benema y Camargo, 1964; Beinroth, 1975).

A pesar de la voluminosa literatura el conocimiento comprensivo de las características de los suelos de los trópicos es bastante limitado. Además de las exageraciones acerca de la importancia de las lateritas, hay otras razones que explican la falta de un conocimiento integrado. Los científicos en suelos que trabajan a tiempo completo solamente en una área o país específico, adquieren fuertes sesgos locales. Cuando se reúnen con colegas en conferencias internacionales la falta de una terminología común de clasificación de suelos crea una torre de Babel. La mayoría de ellos desisten en su afán por relacionar sus resultados con los de otras áreas y regresan a casa a seguir trabajando en sus propios problemas. De esa manera la falta de un lenguaje común ha impedido la transferencia de muchos resultados importantes de manejo de una área a otra. Esta necesidad ha sido reconocida por especialistas en fertilidad del suelo, tales como

Crowther (1949) y Mukherjee (1963). Crowther llegó hasta expresar que los problemas de fertilidad del suelo en los trópicos son esencialmente problemas de clasificación de suelos.

Este capítulo tiene como propósito intentar aclarar este problema de comunicación mediante la descripción de las diversas terminologías que se usan, y la distribución geográfica de los suelos en los trópicos, de acuerdo con la información más reciente. Así como es importante describir el ambiente tropical, deben conocerse las características principales de los suelos tropicales. La génesis de los suelos tropicales no se tratará con profundidad porque esto está fuera de los objetivos de este libro. A los lectores interesados en la génesis, pueden ver los libros de Mohr et al (1972) y Buol et al (1973).

SISTEMAS DE CLASIFICACION DE SUELOS USADOS EN LOS TROPICOS

El prejuicio genético de los primeros pedólogos rusos y americanos condujo al concepto de "zonalidad". Suelos zonales son los que tienen propiedades de acuerdo con lo que las teorías genéticas dictaminan que deben tener en términos de clima, vegetación, topografía, material originario y edad. El concepto simplista de clima cálido y húmedo, vegetación exuberante, material originario antiguo y paisajes antiguos, dio por resultado un concepto de suelo tropical zonal análogo al de suelo laterítico que persiste en algunos sistemas modernos. El sistema actual que se usa en la Unión Soviética, por ejemplo, tiene solamente tres categorías para los trópicos: "suelos de sabana húmeda tropical y de bosque"; "suelo de bosque seco tropical y de sabana"; y "suelos desérticos tropicales" (Ivanova, 1956). Se han propuesto algunas subdivisiones de estas categorías (Gerasimov, 1973).

Tres sistemas principales de clasificación, con fuerte sesgo genético han estado y están todavía en uso en regiones tropicales: el sistema USDA de 1938, principalmente en América Tropical y en Asia; y los sistemas francés (ORSTOM) y el belga (INFAC), principalmente en Africa.

EL SISTEMA USDA: 1938 a 1960

El sistema de 1938, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (EUA), presentado por Baldwin et al (1938), y modificado por Thorp y Smith (1949) considera solamente un suborden dentro del orden de "suelos zonales" para los trópicos: "suelos lateríticos de regiones boscosa templado-calientes y tropicales". Dentro de este suborden se reconocen cinco grandes grupos de suelos para los trópicos: suelos laterítico, laterítico pardo rojizo, laterítico pardo amarillento, podsólico rojo, y podsólico amarillo. Este suborden reúne en

forma significativa, suelos de los trópicos y del sureste de Estados Unidos, separados posteriormente con la modificación de 1949. Dentro del orden "intrazonal" el sistema del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) reconoce los subórdenes "rendzina" y "laterita hidromorfa" como existentes en los trópicos. Este sistema indica que suelos "azonales", tales como los aluviales, litosoles y regosoles existen en todas partes del mundo. Thorp y Smith expresan su deseo de conformar más datos tropicales dentro del sistema pero fueron incapaces de lograrlo.

Una segunda modificación de este sistema fue la Kellogg (1949, 1950) y la de Cline et al (1955), la última en el informe del reconocimiento de suelos de Hawaii. El suborden "suelos lateríticos" fue sustituido por "latosoles". Los latosoles se definieron como los suelos predominantes de los trópicos húmedos y subhúmedos, a elevaciones de 0 a 2000 m, con una pluviosidad anual de 250 a 10.000 mm, cubiertos por una gran variedad de vegetación. La laterización se consideró aún el principal proceso de formación del suelo quizás bajo un clima anterior. Estos suelos son de color rojo o pardo rojizo sin un horizonte de fuerte textura iluvial. Aunque son arcillas, su alto grado de agregación hace que se les sienta más arenosos. Tienen una razón sílice-sesquióxido baja (1:5 a 1:15), ya sea por agotamiento del sílice o por la composición básica de los materiales originarios volcánicos de Hawaii.

Cline et al. (1955) reconocieron cuatro subgrupos. Los "Latosoles húmicos bajos" se encuentran en áreas ústicas con pluviosidad anual moderada. Su característica principal es una alta saturación de bases. Los "Latosoles húmicos" se encuentran en áreas boscosas con regímenes údicos de humedad del suelo. Tienen contenidos más altos de materia orgánica y una saturación de bases más baja que los Latosoles húmicos bajos. También la arcilla aumenta de acuerdo con la profundidad en los Latosoles húmicos. Ninguno de estos dos subgrupos se endurecen irreversiblemente al secarse. El "Latosol Hidrol húmico" es un suelo continuamente mojado con minerales arcillosos amorfos, que se endurecen irreversiblemente al secarse. Estos suelos no son extensos. Los "Latosoles ferruginosos húmicos" son los más antiguos y supuestamente representan el producto final de la laterización con una concentración de hierro y aluminio en el subsuelo. En algunos lugares se encuentran costras masivas. Un quinto subgrupo "Latosoles ferruginosos aluminicos", se agregó posteriormente de parte de los científicos hawaianos para categorizar suelos altos en ambos, aluminio y hierro.

Cline y sus colegas reconocieron la presencia de los siguientes suelos intrazonales en los trópicos: suelo pardo forestal latosólico, hidromórfico gris y arcillas oscuras magnesianas (Vertisoles).

Esta nomenclatura es de particular importancia por su uso en otras áreas tropicales y el excelente trabajo en fertilidad llevado a cabo en Hawaii cuando este sistema estaba en uso. Los latosoles húmicos

bajos pertenecen ahora a los subórdenes ustox y torrox de los Oxisoles. La mayor parte de los latosoles húmicos son humoxes. Aunque la modificación hawaiana no se intentaba usar en ninguna otra parte, recibió una atención extensa (Kellogg, 1950). Sus limitaciones estaban en el estrecho ámbito de los materiales originarios que se encuentran en esas islas.

El Cuadro 2.1 muestra la terminología equivalente entre el sistema del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) y los órdenes del sistema taxonómico de suelos (Soil Taxonomy System).

CUADRO No. 2.1. Ordenes del sistema taxonómico de suelos en relación con los grandes grupos de suelos de los esquemas anteriores del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) y otros sistemas de clasificación. (Fuente: adaptado de Soil Survey Staff (1960), Throp y Smith (1949) y Cline et al., 1955).

Entisoles	Suelos azonales; algunos Gley poco Húmicos, Litosoles, Regosoles.
Vertisoles	Grumosoles, arcillas oscuras tropicales, regur, suelos negros de algodón, arcillas oscuras magnesianas.
Inceptisoles	Andosoles, Latosol Hidrol Húmico, "sol brun acide", algunos pardos forestales, Gley poco Húmico, Gley Humico.
Aridisoles	Desértico, desértico rojizo, Sierozem, Solonchak, algunos pardo y pardo rojizo y Solonetz asociados.
Molisoles	Suelo castaño, Chernozem, Brunizem, Rendsina, algunos pardo forestal, pardo, gley húmico asociado y Solonetz.
Espodosoles	Podsoles, tierra parda podsolizada, podsol hidromorfo.
Alfisolos	Tierra parda fuertemente podsolizada, suelo podsólico de bosque, suelo pardo subárido no calizo, Chernozem degradado, planosoles asociados y "half-bog", algunos terra rossa estructurada y suelos éutricos podsólicos rojo amarillentos, algunos latosoles y suelos lateríticos.
Ultisoles	Podsólico amarillo rojo, laterítico pardo rojizo, latosol húmico, planosoles asociados y algunos "half-bog", latosoles, suelos lateríticos, terra rossa y lateritas hidromorfos.
Oxisoles	Latosol húmico bajo, latosoles ferruginosos húmicos, latosoles ferruginoso aluminico, algunos latosoles, suelos lateríticos, terra rossa legítima, lateritas hidromorfos.
Histosoles	Suelos orgánicos, turba y cieno.

SISTEMA FRANCES (ORSTOM)

El sistema desarrollado por la Oficina de Investigación Científica y Técnica de Ultramar (Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer) es ampliamente usado en Africa de habla francesa (Aubert, 1968). Su comprensión es esencial para evaluar la voluminosa literatura publicada en francés, la que desafortunadamente es ignorada por los trabajadores de habla inglesa y española. Este sistema también tiene un fuerte prejuicio genético muy semejante al concepto de zonalidad de los investigadores trabajadores americanos y rusos. Los suelos se separan por medio de cambios climáticos y criterios definidos vagamente, tales como "suelos ligeramente meteorizados" (Sols péu évolués).

En los trópicos se reconoce un ámbito mucho más amplio de suelos en este sistema que en el sistema del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). Aubert y Tavernier (1972) indican que 7 de su lista de 11 categorías más altas existen en los trópicos. Las Clases I (Sols Minéraux Bruts) y II (Sols Péu Evolués) incluyen la mayor parte de lo que ahora se llaman "Entisoles". La Clase IV (Andosoles) y la Clase VI (Sols Brunifiés des Pays Tropicaux) se traducen fácilmente a otros sistemas.

La Clase IX (Sols Ferrugineux Tropicaux: suelos ferruginosos tropicales), y la Clase X (Sols Ferralitiques: suelos ferralíticos), merecen especial atención. Los suelos ferruginosos son suelos rojizos con un alto nivel de bases y probablemente pertenecen a los órdenes Inceptisoles y Alfisoles en el sistema taxonómico de suelos. Los suelos ferralíticos tienen un color similar pero una saturación de bases más baja. Incluyen la mayor parte de los Ultisoles y Oxisoles, así como también muchos Alfisoles. La distinción del grado de saturación de bases en el más alto nivel categórico resulta muy práctica.

La Clase XI (Sols Hydromorfes) comprende todos los suelos con drenaje deficiente en el más alto nivel categórico.

Aubert y Tavernier (1972) han desarrollado un cuadro de correlación para el sistema francés y el sistema económico de suelos de EUA (Cuadro 2.2); sin embargo, estas relaciones son aproximadas por cuanto el sistema francés no usa criterios cuantitativos para sus límites.

EL SISTEMA BELGA (INEAC)

El "Institut National pur L'Etude Agronomique du Congo" desarrolló su propio sistema de clasificación en el curso de sus trabajos en Africa (Sys et al., 1961). Aunque también tiene un fuerte sesgo genético, hay un grado más alto de criterios cuantificables que en los sistemas mencionados anteriormente. Se reconocen siete órdenes: suelos recientes tropicales; suelos pardos tropicales; suelos recientes texturales, podsoles y kaolisoles. Los cinco primeros se correlacionan fácilmente con otros sistemas. Los kaolisoles son suelos que tienen

CUADRO No. 2.2. Correlación aproximada entre el sistema francés de clasificación de suelos y el sistema taxonómico de suelos de EUA, con referencia especial a los trópicos. (Fuente: Aubert y Tavernier, 1972).

CLASIFICACION FRANCESA	TAXONOMIA EUA Ordenes, subordenes o grandes grupos
I. Sols Minéraux bruts (hasta donde se reconocen como suelo)	Orthents, Psamments, Fluvents
II. Sols Peu Evolués Humifères A allophanes Non-climatiques	Orthents, Humitropepts Andepts, Eutrandopts, Vitrandepts Orthents, Fluvents, Psamments, Tropepts
IV. Andosols Saturés Désaturés	Andepts Eutrandopts Hydrandopts, Dystrandopts
VII. Sols Brunifiés des pays Tropicaux	Eutropepts, Tropudalfs
IX. Sols Ferrugineux Tropicaux Peu Lessivés Lessivés Appauvris à pseudogley	Ustropepts Haplustalfs, Paleustalfs, Plinthustalfs Tropaqualfs
X. Sols Ferralitiques Faiblement désaturés Typiques Appauvris, remaniés Rajeunis Moyennement désaturés Typiques Humifères Appauvris Remaniés Rajeunis Fortement désaturés Typiques Humifères Appauvris Remaniés Rajeunis Lessivés	Eutrorthox, Eustrustox Eustrustox álfico Ustropepts, Eutropepts Haplorthox, Haplustox Haplohumox, Sombrihumox Haplorthox últicos y álficos Subgrupos óxicos de udults Haplorthox, Haplustox Dystropepts típicos y óxicos
XI. Sols Hydromorphes (excepto Sols Hydromorphes Organiques et Moyennement organiques) Minéraux ou peu humifères A gley Lessivés A pseudogley A accumulation de fer en carapace ou cuirasse	Tropaquents, Tropaquepts Tropaqualfs, Tropaquults Subgrupos ácuicos de Tropudalfs y Tropudults Subgrupos petroféricos de Aquox, Aquults y Aquepts

una mineralogía de arcilla caolinítica sin un horizonte iluvial. Se subdividen en tres grandes grupos de suelos: ferrisoles, los que tienen indicios de horizontes argílicos y la presencia de minerales meteorizables en fracciones de arena; ferralsoles, sin horizontes argílicos y

CUADRO No. 2.3. Correlación del sistema belga de clasificación de suelos que se usa en el Congo, con el sistema francés y el sistema de taxonomía de suelos de EUA "U.S. Soil Taxonomy". (Fuente: adaptado de Jurion y Henry (1969), Sys et al., (1961), Aubert, 1968).

Sistema belga (INEAC)	Sistema francés (ORSTOM)	Sistema de taxonomía de suelos, de EUA
Suelos recientes tropicales	Sols Peu Evoulés	Ferrisoles
No hidromórficos	D'aport modal	Fluvents
Hidromórficos	D'aport hidromorphique	Aquepts
Suelos pardos tropicales	Sols Bruns Eutrophes	Eutropepts
	Tropicaux	
Arcillas oscuras tropicales	Vertisoles	Vertisoles
Suelos recientes texturales	Sols Halomorphes	Natrustalfs
Solonetz	A alcali lessivés	
Podsoles	Podzols a Alios	Aquods
Kaolisoles	Sols Ferralitiques and	Oxisoles, Ultisoles
Ferrisoles	Sols Ferrugineaux	Alfisoles, Entisoles
Hydroferrisoles	Sols hydromorphes	Aquepts, Aquults
	mineraux a gley de	
	surface	
Hygroferrisoles	Sols fiablement	Dystropepts
	ferralitique	Tropodults
Con tendencia a suelos		
pardos y recientes tropicales	Sols ferralitiques	Orthox: subgrupos
Típicos y con tendencia a	typiques	óxicos de adults
higroferasoles		
Hygro-xero ferrisoles		
Con tendencia a suelos	Sols fiablement ferrali-	Ustropepts,
pardos y recientes tropicales	tiques	Tropustults
Típicos y tendencia	Sols ferralitiques	Ustox: subgrupos
a ferrasoles	typiques rouges et	óxicos
	jauns	de Ustults
Ferrisoles húmíferos	Sols ferralitiques	Humox, Humults
	humifères d'altitude	
Xeroferrisoles	Sols ferrugineaux tropi-	Ustalfs
	caux lessivés	
Ferralsoles		
Hygroferralsoles	Sols ferralitiques lessivés	Orthox, Tropodults
Típicos con plintita	en argille	
Hygroxeroferralsoles	Sols ferralitiques lessivés	Ustox
	modal	
-con plintita	En argille	Tropustults
Arenoferralsoles	Sols ferralitique lessivés	Quartzipsaments
	podzoliques	óxicos

apenas con trazas de minerales meteorizables; y Arenoferrales, con menos del 20% de arcilla. En el Cuadro 2.3 se presenta una correlación aproximada entre este sistema y otros. La correlación exacta es difícil por los criterios conflictivos en cuanto al concepto del horizonte argílico.

SISTEMA BRASILEÑO

Los pedólogos brasileños han subdividido más allá los Latosoles bien drenados del sistema del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), en grupos cuantitativos y han conservado las otras unidades del sistema del Departamento de Agricultura (USDA) que se encuentran en los trópicos (Bennema y Camargo, 1964; Costa de Lemos, 1968). En el concepto que tienen de un horizonte B latosólico y del horizonte B textural son prácticamente idénticos a los horizontes óxicos y argílicos de la taxonomía de suelos. Por lo tanto, los Latosoles brasileños corresponden a los Oxisoles. Las 10 divisiones en el orden más alto de categoría están estrechamente asociados con la terminología de la taxonomía de suelos. A niveles de categoría más bajos, los brasileños ponen especial énfasis en color, saturación de bases y vegetación. En el Cuadro 2.4 se presenta una correlación aproximada entre el sistema brasileño y otros.

TAXONOMIA DE SUELOS DE ESTADOS UNIDOS

La acumulante evidencia contra la utilidad de las teorías genéticas para una clasificación práctica gradualmente erosionó la confianza de los científicos de Estados Unidos en el sistema (USDA), de 1938, y sus modificaciones. Suelos que se consideraban "zonales" en el norte de Estados Unidos, tales como los Podsoles y Chernozems fueron encontrados en los trópicos, en donde de acuerdo con las teorías establecidas, no debían existir. De la misma manera, en los Estados Unidos se encontraron suelos lateríticos. Muchos otros ejemplos similares obligaron a colocar suelos semejantes en diferentes órdenes (zonal vs intrazonal). Esto condujo al desarrollo de un sistema de clasificación de suelos completamente nuevo, basado en propiedades morfológicas que pueden cuantificarse mediante técnicas uniformes. Este nuevo sistema terminó la práctica de agrupar los suelos de acuerdo con "lo que ellos deberían ser" y empezó a clasificarlos de acuerdo con "lo que ellos son".

Después de unos 10 años de desarrollo la primera versión publicada, llamada la Séptima Aproximación (Soil Survey Staff, 1960) se presentó ante el Congreso Internacional de Ciencia del Suelo, en Madison, Wisconsin. Desde entonces han habido varias revisiones, pero sin una distribución extensa, excepto en Estados Unidos. En cada una de las revisiones, mayor atención se ha dado a los suelos de

CUADRO No. 2.4. Correlación aproximada del sistema brasileño de clasificación de suelos con el sistema de taxonomía de suelos de EUA y la leyenda de FAO. (Fuente: adaptado de Van Wambeke (1971); Beinroth (1975); Costa de Lemos (1968); Aubert (1968); y M.N. Camargo, comunicación personal).

Sistema brasileño	Taxonomía de suelos EUA	Sistema francés	Leyenda de FAO
Latossolos (suelos con horizonte B latosólico, con 6,5 meq/100 g de arcilla)	Oxisoles	Sols ferralitiques fortement desatures, typiques ou humifères	Ferralsoles
Latossolo Vermelho Escuro (Latosol rojo oscuro)	Ustox o Orthox	Sols ferralitiques fortement desatures typiques ou humifères	Ferralsoles órticos o ácricos
Latossolo Vermelho Amarelo (Latosol rojo-amarillo)	Ustox o Orthox	Sols ferralitiques fortement desatures typiques ou humifères	Ferralsoles órticos o ácricos
Latossolo Amarelo (Latosol amarillo)	Ustox o Orthox	Sols ferralitiques fortement desatures typiques ou humifères	Ferralsoles xánticos
Latosol Roxo or Terra Roxa Legítima (Latosol marrón)	Eustrustox o Eutrorthox	Sols ferralitiques fortement desatures typiques ou humifères derivés de basalte	Ferralsoles ródicos
Podsólico Vermelho Amarelo (Podsólico rojo-amarillo)	Ultisoles	Sols ferralitiques moyennement désaturés eluvies	Acrisoles, Nitosoles dístricos
Podsólico Vermelho Amarelo equivalente eutrófico (Podsólico rojo-amarillo eutrófico)	Alfisoles	Sols ferrugineux tropicaux lessivés	Luisoles, Nitrososoles eútricos
Terra Roxa Estruturada	Alfisol	Sols ferrugineux tropicaux lessivés	Luisoles Nitosoles éútricos
Arenas rojas y amarillas	Psamments	Sols ferralitiques moyennement on fortement desaturés de texture sableuse	Arenosoles, ferrálicos
Podsoles	Espodosoles	Podzols	Podsoles
Grumosoles	Vertisoles	Vertisols	Vertisoles
Suelos con horizonte B incipiente	Inceptisoles	(varios)	Cambisoles
Suelos con horizonte B nátrico	Aridisoles	Sols halomorphes	Solonchaks
Regosoles	Entisoles	Regosols	Regosoles
Suelos con capa dura	Varios	Planosols	Planosoles
Otros suelos hidromórficos	Varios	Sols hydromorphes	Gleysoles

las regiones tropicales. Muchos científicos que trabajan en el trópico han cooperado en su desarrollo. Una buena descripción de este sistema, bastante complejo pero más objetivo que los anteriores aparece en Buol et al (1973)*.

Aunque ha estado en uso durante menos de 15 años, la taxonomía de suelos de Estados Unidos ha hecho una contribución significativa a la comprensión de los suelos tropicales, al eliminar esencialmente el sesgo genético. Los suelos tropicales y templados se separan en el tercer o quinto nivel de categoría, principalmente con base en los regímenes de temperatura. Por ejemplo, muchos suelos de la cuenca amazónica de América del Sur y de Carolina del Norte, se agrupan en las mismas categorías hasta el nivel de familia, en donde se les separa por sus regímenes de temperatura.

Todos los diez órdenes se encuentran en los trópicos. Treinta y nueve subórdenes y 136 grandes grupos de suelos pueden existir en los trópicos de acuerdo con cálculos de Cline (1972) basados en las definiciones de temperatura y humedad de estas categorías. El Cuadro 2.5 proporciona una definición simplificada de los principales subórdenes y los grandes grupos que se encuentran en los trópicos. Este cuadro es una interpretación para los propósitos de este libro y no incluye todos los criterios de clasificación. Las definiciones completas aparecen en "U.S. Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1975).

En este libro se usará la terminología de "U.S. Soil Taxonomy" por cuanto sus criterios cuantitativos hacen que este sea el sistema de clasificación más apropiado para interpretaciones de manejo.

LA LEYENDA DEL MAPA MUNDIAL DE LA FAO

Un mapa mundial de suelos está en proceso de ser publicado por un esfuerzo conjunto de dos agencias de las Naciones Unidas, FAO y UNESCO.

Dudal (1968, 1970) desarrolló una leyenda de mapa para correlacionar todas las unidades de distintos mapas de suelos en el mundo y obtener un inventario mundial de recursos de suelos bajo una terminología común. Las unidades de suelo se agrupan en dos niveles categóricos aproximadamente equivalentes a los niveles de suborden y gran grupo de suelo de taxonomía de suelos. Las definiciones se basan en horizontes de diagnóstico y criterios cuantificables semejantes a los de la taxonomía de suelos, pero la nomenclatura se ha sacado de varios sistemas nacionales en un ejercicio de diplomacia internacional. En el Cuadro 2.6 aparece una correlación aproximada entre la leyenda de FAO, la taxonomía de suelos y el sistema francés.

(*) La versión definitiva fue publicada en 1977, con fecha 1975 (Soil Survey Staff, 1975).

CUADRO No. 2.5. Definiciones simplificadas de taxonomía de suelos para los órdenes, subórdenes y grandes grupos que se encuentran en los trópicos para propósitos de manejo.

Para una clasificación precisa se necesitan las definiciones completas tal como aparecen en taxonomía de suelos, de Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1970, 1975).

Orden	Suborden	Gran grupo
		Oxisoles: suelos con horizontes óxicos (< 16 meq/100 g arcilla) compuestos en mezclas de Caolinita, óxidos de hierro y cuarzo; bajos en minerales meteorizables. Suelos generalmente profundos, bien drenados, rojos o amarillos; excelente estructura granular, muy bajos en fertilidad, propiedades uniformes en toda su profundidad.
	Orthox:	Oxisoles: con régimen údico de humedad Haploorthox: simple Eutrorthox: alta saturación de bases Acrorthox: muy baja saturación de bases Gibbsiorthox: gibbsita dominante
	Ustox:	Oxisoles: con régimen ústico de humedad Haplustox: simple Eustrtox: alta saturación de bases Acrustox: muy baja saturación de bases
	Torrox:	Oxisoles: con régimen arídicos de humedad
	Humox:	Oxisoles: con alto contenido de materia orgánica (generalmente en tierras altas) Haplohumox: simples Acrohumox: muy baja saturación de bases Gibbsihumox: gibbsita dominante
	Aquox:	Oxisoles: con régimen áquico de humedad Ochraquox: horizonte A de coloración clara Umbraquox: horizonte A de coloración oscura Plinthaquox: con plintita Gibbsiaquox: gibbsita dominante

Ultisoles: suelos con un horizonte argílico (20% de aumento en el contenido de arcilla en la sección de control), con menos del 35% de

Continúa en la página siguiente

CUADRO No. 2.5. Cont.

Orden	Suborden	Gran grupo
		<p> saturación de bases en la sección de control. Suelos generalmente profundos, bien drenados, rojos o amarillos, más altos en minerales meteorizables que los Oxisoles, con propiedades físicas menos deseables, y relativamente bajos en fertilidad natural. Los Ultisoles pueden tener horizontes óxicos por encima o por debajo de los argílicos.</p>
	Udults:	<p> Ultisoles: con régimen údico de humedad Tropudults: simples Paleudults: horizonte argílico muy profundo Rhodudults: rojos oscuros, altos en óxidos Plinthudults: con plintita Fragiudults: con fragipanes</p>
	Ustults:	<p> Ultisoles: con régimen ústico de humedad Haplustults: simples Paleustults: horizonte argílico profundo Rhodustults: rojos oscuros, altos en óxidos Plinthustults: con plintita</p>
	Humults:	<p> Ultisoles altos en materia orgánica (generalmente en tierras altas) Tropohumults: simples Palehumults: horizonte argílico profundo Plinthohumults: con piintita</p>
	Aquults:	<p> Ultisoles: con régimen áquico de humedad Tropaquults: simples Paleaquults: horizonte argílico profundo Plinthaquults: con plintita Fragaquults: con fragipan Albaquults: horizonte A de coloración clara</p>

Alfisoles: suelos con un horizonte argílico pero con más del 35% de saturación de bases. Similares a Ultisoles, excepto que tienen una fertilidad natural considerablemente más alta.

Udalfs: Alfisoles: con régimen údico de humedad
Tropudalfs: simples

Continúa en la página siguiente

CUADRO No. 2.5. Cont.

Orden	Suborden	Gran grupo
-------	----------	------------

Alfisoles, Cont.

Ustalfs:	Alfisoles: con régimen ústico de humedad Haplustalfs: simples Paleustalfs: horizonte argílico profundo Rhodustalfs: rojo-parduzcos, altos en óxidos de Fe y Al Plinthustalfs: con plintita Natrustalfs: con horizonte sódico Durustalfs: con duripán
Aqualfs:	Alfisoles: con régimen áquico de humedad Tropaqualfs: simples Plinthaqualfs: con plintita Natraqualfs: con horizonte sódico Duraqualfs: con duripán

Aridisoles: suelos con régimen arídico de humedad del suelo con diferenciación de horizontes.

Argids:	Aridisoles: con horizontes argílicos Haplargids: simples Paleargids: con horizonte argílico profundo Natrargids: con horizonte sódico Durargids: con duripán
Orthids:	Aridisoles: sin horizontes argílico Salorthids: con horizonte sálico Calciorthids: con horizonte calcáreo Gypsiorthids: con horizonte gipsico Camborthids: con horizonte cámbico Durorthids: con duripán

Inceptisoles: suelos jóvenes con horizonte cámbico pero sin otros horizontes de diagnóstico.

Andepts:	Inceptisoles derivados de materiales volcánicos Cryandepts: andepts fríos Vitrandepts: altos en vidrio volcánico Dystrandepts: baja saturación de bases
----------	--

Continúa en la página siguiente

CUADRO No. 2.5. Cont.

Orden	Suborden	Gran grupo
Inceptisoles, Cont.		
	Andepts:	Eutrandepts: alta saturación de bases Hydrandepts: bien drenados, con alto contenido de agua Durandepts: con duripán
	Aquepts:	Inceptisoles: con régimen áquico de humedad Tropaquepts: simples Andaquepts: con ceniza volcánica Halaquepts: salinos Sulfaquepts: suelos ácidos sulfatados o "cat clays" Plinthaquepts: con plintita
	Tropepts:	otros Inceptisoles tropicales Dystropepts: nivel bajo de bases Eutropepts: nivel alto de bases Ustropepts: con régimen ústico de humedad Humitropepts: altos en materia orgánica (tierras altas)

Entisoles: suelos poco desarrollados tan recientes que solamente tienen un epipedón ócrico (amarillento), o un horizonte simple formado por el hombre.

Aquepts:	Entisoles: con régimen áquico de humedad del suelo Tropaquepts: simples Fluvaquepts: aluviales Hydraquepts: alto contenido de humedad, tixotrópicos Sulfaquepts: suelos ácidos sulfatados o "cat clays"
Fluents:	Entisoles de origen aluvial reciente Tropofluents: simples Ustifluents: con régimen ústico de humedad Torrifluents: con régimen arídico de humedad

Continúa en la página siguiente

CUADRO No. 2.5. Cont.

Orden	Suborden	Gran grupo
Entisoles, Cont.		
	Psaments:	Entisoles arenosos Tropopsamments: simples Ustipsamments: con régimen ústico de humedad Torripsamments: con régimen arídico de humedad Quartzipsamments: principalmente arena de cuarzo
	Orthents:	otros Entisoles tropicales Troporthents: simples Ustorthents: con régimen ústico de humedad Torriorthents: con régimen arídico de humedad
Vertisoles: suelos arcillosos pesados que se agrietan, con más del 35% de arcilla y > 50% de minerales 2:1 en fracciones de arcilla. Generalmente se hinchan y se contraen con los cambios en el contenido de humedad. Presentan microrelieve de gilgai y superficies de deslizamiento.		
	Usterts:	Vertisoles: con régimen ústico de humedad Chromusterts: de coloración clara Pellusterts: de coloración oscura
	Uderts:	Vertisoles: con régimen ústico de humedad
	Torrerts:	Vertisoles: con régimen arídico de humedad
Mollisoles: suelos con un epipedón mólico (esto es, alto en materia orgánica, suaves cuando están secos, y > 50% de saturación de bases).		
	Rendolls:	Mollisoles sobre roca caliza, anteriormente llamados rendzinas
	Ustolls:	Mollisoles: con régimen ústico de humedad Haplustolls: típicos Argiustolls: horizonte argílico Paleustolls: horizonte argílico profundo Calcistolls: horizonte calcítico Durustolls: con duripán Natrustolls: horizonte sódico

Continúa en la página siguiente

CUADRO No. 2.5. Cont.

Orden	Suborden	Gran grupo
	Aquolls:	Molisoles: con régimen ácuico de humedad Haplaquolls: típicos Argiaquolls: horizonte argílico Calciaquolls: horizonte cálcico Duraquolls: con duripán Natraquolls: horizonte sódico
	Esodosoles:	suelos con un horizonte espódico (de acumulación de hierro y materia orgánica) desarrollado generalmente sobre materiales arenosos. Equivalentes a Podsoles en otros sistemas de clasificación.
	Aquods:	Esodosoles: con régimen ácuico de humedad Tropaquods: típicos Duraquods: con capa dura
	Humods:	Esodosoles: altos en materia orgánica Tropohumods: típicos
	Orthods:	otros Esodosoles tropicales Troporthods: típicos
	Histosoles:	suelos orgánicos con un epipedón hístico (> 20% de materia orgánica). Todos tienen un gran grupo "tropo".
	Fibrists:	más de dos terceras partes de fibras;
	Folists:	no saturado con agua (parte superior brumosa);
	Hemists:	entre uno y dos tercios de fibras;
	Saprists:	menos de un tercio de fibras.

El personal de FAO considera que este no es un sistema de clasificación, sino una leyenda de unidades del mapa a dos niveles. La leyenda de FAO se correlaciona bastante bien con la nomenclatura de taxonomía de suelos al nivel de gran grupo (Buol, 1973; Buol et al., 1973). Cuando el mapa mundial completo de FAO-UNESCO se publique, es probable que su terminología se convierta en el estándar internacional para comparaciones generales de propiedades del suelo. Como solamente contiene 104 subunidades, un mayor número de detalles sobre propiedades de suelo necesarias para propósitos de manejo, pueden hacerse usando la taxonomía de suelos.

CUADRO No. 2.6. Correlación aproximada entre la taxonomía de FAO, taxonomía de suelos de E. U. A. y el sistema francés de clasificación de suelos, con referencia especial a los trópicos. (Fuente: Aubert y Tavernier, 1972).

Leyenda de FAO	Taxonomía de Suelos de E. U. A.	Clasificación francesa
Fluvisoles	Fluents	Sols minéraux bruts et sols peu évolués d'apport alluvial et colluvial
Regosoles	Psammments	Sols minéraux bruts et sols peu évolués d'apport éolien
Arenosoles Ferrálicos	Quartzipsammments Oxicos	Sols ferralitiques moyennement or fortement désaturés, à texture sableuse
Gleysols Eutricos y Dústricos	Tropaquepts	Sols hydromorphes humifères à gley
Húmico Plintico	Humaquepts Plinthaquepts	Sols humiques à gley Sols hydromorphes à accumulation de fer en carapace or cuirasse
Andosoles Planosoles	Andepts Paleudalfs y Paleustalfs	Andosols Sols ferrugineux tropicaux lessivés (pro parte)
Cambisoles Dystrico	Dystropepts	Sols ferralitiques fortement et moyennement désaturés, rajeunis (pro parte)
Eutricos	Eutropepts	Sols ferrugineux tropicaux (non lessivés) Sols ferralitiques faiblement désaturés, rajeunis
Húmicos	Humitropepts	Sols ferralitiques fortement et moyennement désaturés, humifères, rajeunis
Luvisoles	Alfisols	Sols ferrugineux tropicaux lessivés
Acrisoles	Ultisols	Sols ferralitiques fortement désaturés
Ferrasoles Litosoles	Oxisols Subgrupos Líticos	Sols ferralitiques Lithosols et sols lithiques

DISTRIBUCION GEOGRAFICA

Desde 1967 la Unidad de Geografía de Suelos del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, ha correlacionado los suelos del mundo en una forma muy generalizada. En 1967 el Comité Científico Asesor del Presidente publicó una estimación de la distribución de los suelos en los trópicos, usando la nomenclatura de USDA, de 1938, la cual se presenta en el Cuadro 2.7 por regiones climáticas tropicales. Suelos altamente meteorizados, lixiviados, anteriormente llamados "Latosoles" ocupan el 51% de los trópicos, mientras que suelos arenosos, poco profundos, con alto nivel de bases, aluviales y moderadamente lixiviados cubren el resto.

CUADRO No. 2.7. Distribución de suelos en los trópicos por regiones climáticas (millones hectáreas). (Fuente: adaptado de President's Science Advisory Committee, 1967).

Grupos de suelos (equivalentes taxonómicos)	Lluvioso (9,5-12)*	Estacional (4,5-9,5)*	Seco y desértico (0-4,5)*	Total	Porcentaje de los trópicos
1. Suelos altamente meteorizados y lixiviados, (Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles)	920	1540	51	2511	51
2. Arenas secas y suelos superficiales (Psamments y grupos líticos)	80	272	428	834	17
3. Suelos color claro, ricos en bases (Aridisoles y grupos arídicos)	0	103	582	685	14
4. Suelos aluviales (Aquepts, Fluvents, y otros)	146	192	28	366	8
5. Suelos oscuros, ricos en bases (Vertisoles, Mollisoles)	24	174	93	291	6
6. Suelos moderadamente meteorizados y lixiviados (Andepts, Tropepts y otros)	5	122	70	207	4
Area total	1175	2403	1316	4896	100
%de trópicos	24	49	27	100	

(*) Los números en paréntesis se refieren al número de meses con una pluviosidad promedio mayor de 100 mm.

Un mapa tentativo de los suelos tropicales publicado por Aubert y Tavernier en 1972 muestra la distribución de ellos al nivel de suborden del sistema taxonómico de EUA. "Soil Taxonomy" (Fig. 2.1). Aunque se trata de un mapa muy generalizado y sujeto a considerables modificaciones, representa el primer intento de cuantificar la distribución de los suelos tropicales. Cálculos basados en este mapa (Cuadro 2.8) muestran que los Oxisoles ocupan el 22% de los trópicos, principalmente en el Amazonas y en el Cerrado en América del Sur y África Central. No se anotan áreas de Oxisoles en Asia tropical a este nivel de generalización.

CUADRO No. 2.8. Extensión aproximada de los subórdenes mayores de suelos en los trópicos (millones hectáreas). (Fuente: calculado por M. Drosdoff, Universidad de Cornell, con base en el mapa de Aubert y Tavernier, 1972).

Orden	Suborden	Africa	América	Asia	Area Total	Porcentaje
Oxisoles	Orthox	370	380	0	750	15,0
	Ustox	<u>180</u>	<u>170</u>	<u>0</u>	<u>350</u>	<u>7,5</u>
		550	550	0	1100	22,5
Aridisoles	Todos	840	50	10	900	18,4
	Ustalfs	525	135	100	760	15,4
	Udalfs	<u>25</u>	<u>15</u>	<u>0</u>	<u>40</u>	<u>0,8</u>
	550	150	100	800	16,2	
Ultisoles	Aquults	0	40	0	40	1,0
	Ustults	15	35	50	100	2,2
	Udults	<u>85</u>	<u>125</u>	<u>200</u>	<u>410</u>	<u>8,2</u>
	100	200	250	550	11,2	
Inceptisoles	Aquepts	70	145	70	285	6,0
	Tropepts	<u>0</u>	<u>75</u>	<u>40</u>	<u>115</u>	<u>2,3</u>
		70	225	110	400	8,3
Entisoles	Psamments	300	90	0	390	8,0
	Aquepts	<u>0</u>	<u>10</u>	<u>0</u>	<u>10</u>	<u>0,2</u>
		300	100	0	400	8,2
Vertisoles	Usterts	40	0	60	100	2,0
Molisolos	Todos	0	50	0	50	1,0
Areas montañosas		<u>0</u>	<u>350</u>	<u>250</u>	<u>600</u>	<u>12,2</u>
Total		2450	1670	780	4900	100,0

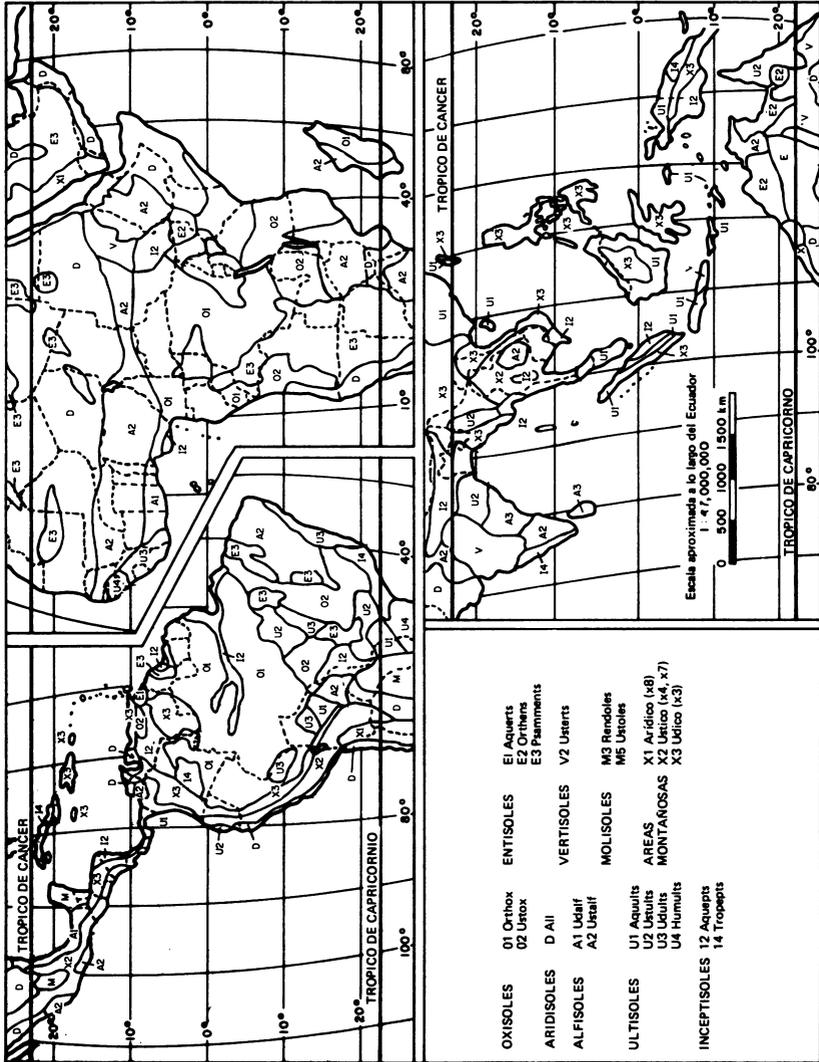


Fig. 2.1. Suelos de los trópicos. Fuente: después de Aubert y Tavernier (1972).

Después de los Oxisoles, los Aridisoles (suelos de desierto) ocupan el segundo lugar, cubriendo el 18% de los trópicos. Los Aridisoles se encuentran principalmente en los desiertos africanos y en áreas diseminadas en América tropical, Asia y Australia.

Los Alfisoles son el tercer orden más común, ocupando el 16% de los trópicos. La mayor parte de los Alfisoles tropicales están en áreas anteriormente cartografiadas como Latosoles, tales como la mayor parte de Africa Occidental, India y Sri Lanka, en donde se origina la mayor parte de la literatura sobre lateritas. La presencia de plintita (versión cuantitativa de "laterita") en muchos subsuelos de Africa Occidental, coloca a muchos de estos suelos en el gran grupo plinthustalf (es decir, Alfisoles con regímenes ústicos de humedad del suelo y plintita a cierta profundidad). Las propiedades de manejo son completamente diferentes de las de otros Alfisoles debido a que la erosión de la capa superior de textura bastante gruesa puede dejar expuestas capas de plintita o plintita y grava. En otras partes de Africa, así como en Asia y América tropical, se encuentran extensas áreas de Alfisoles con una fertilidad natural alta y sin mayores limitaciones de manejo.

Los Ultisoles constituyen el cuarto orden más común, cubriendo el 11% de los trópicos. Abundan en muchas áreas de América tropical y Africa y también parecen ser los suelos dominantes de tierras montañosas del sureste de Asia. La mayoría de estos suelos fueron anteriormente marcados en los mapas como Latosoles.

Los Inceptisoles y los Entisoles cubren cada uno cerca del 8% de los trópicos. Su extensión superficial es indudablemente mayor por cuanto ellos aparecen en las superficies geomórficas más jóvenes de la mayoría de las otras unidades amplias del mapa. Muchos suelos anteriormente considerados como Latosoles se marcan ahora en los mapas como Tropepts, particularmente en Cuba, Colombia, Brasil e India. Grandes áreas de suelos arenosos (Psamments) se encuentran en muchas áreas tropicales. Cuando son de color rojo o amarillento, tales suelos fueron denominados anteriormente "Latosoles arenosos".

Los Vertisoles y los Molisoles cubren el 2 y el 1% respectivamente de los trópicos en dicho mapa. Grandes áreas de Vertisoles se encuentran en Australia, Sudán, Etiopía, India y Java. Los Molisoles son extensos en México, Paraguay y el norte de India. Ambos órdenes se encuentran también dentro de las otras unidades del mapa.

Los dos órdenes restantes, Espodosoles e Histosoles, no ocupan áreas tropicales suficientemente grandes como para incluirlos como unidades de mapeo a escala de 1:50 millones. Sin embargo, están presentes y son localmente importantes en áreas pequeñas. Algunas referencias al final de este capítulo describen las propiedades de estos suelos.

El mapa de los “suelos de los trópicos” no distingue los suelos de las áreas montañosas, excluyendo de esa manera el 12% de los trópicos en la generalización anterior. De este modo se excluyen grupos importantes tales como los Andepts (suelos de ceniza volcánica).

A pesar de sus limitaciones este mapa muestra claramente que, aún a un alto nivel de generalización, los suelos tropicales no son uniformes. También pone de manifiesto que solamente una quinta parte de los trópicos está cubierta por Oxisoles. Suelos anteriormente llamados “Latosoles” están ahora marcados como Oxisoles, Ultisoles, y en menor grado Inceptisoles y Entisoles.

Un mayor refinamiento de estas relaciones pueden hacerse ahora con los datos presentados en la primera publicación del mapa mundial de suelos de FAO y UNESCO para América del Sur (1971). El Cuadro 2.9 presenta la distribución tropical de este continente con cálculos basados en esta publicación. Los Oxisoles (Ferralsoles) cubren el 45% del área de América del Sur tropical, seguidos por los Ultisoles con el 19%, Alfisoles con el 12%, Entisoles e Inceptisoles con el 8%, Molisoles con el 4%, Aridisoles con el 2%, y el resto con menos del 1%. Los suelos dominantes en la región amazónica están clasificados como Oxisoles amarillos (Ferralsoles Xanticos) en este mapa. Sin embargo, informaciones recientes sugieren que los Ultisoles, más que los Oxisoles, son el orden de suelo dominante en las áreas de la cuenca amazónica fuera de la influencia de los escudos de Guyana y Brasil (Benavides, 1973; Sánchez y Buol, 1974). Esto quiere decir que el porcentaje de Oxisoles será menor y el de los Ultisoles mayor.

ASOCIACIONES DE SUELO EN EL PAISAJE

Las declaraciones precedentes se han hecho al más alto nivel de generalización. Debería ser obvio que una variación considerable ocurra dentro de tales unidades de mapeo. El propósito de esta sección es definir algunas de las asociaciones de suelos más frecuentemente observadas en ciertos paisajes típicos. Aunque se presentan muchas otras, las escogidas se consideran representativas de grandes áreas. La relación entre superficie geomorfológica y suelos es de gran valor para predecir donde se presentarán suelos similares. Las asociaciones suelo-paisaje han sido reconocidas y estudiadas por mucho tiempo en los trópicos. Por ejemplo el concepto de una catena de drenaje lo desarrolló Milne (1935) en Africa Oriental.

ASOCIACIONES DE SUELO EN AMBIENTES UDICOS

Los procesos de formación de suelo marcan a mayor velocidad en climas tropicales lluviosos que en otros climas debido al movimiento descendente casi continuo del agua, las grandes cantidades de biomasa que se agregan al suelo, y las temperaturas constantemente altas.

CUADRO No. 2.9. Distribución aproximada de los suelos tropicales de América del Sur. (Fuente: calculado del mapa mundial de suelos de FAO-UNESCO: América del Sur y convertido a los equivalentes de Taxonomía de Suelos).

Orden	Suborden	Area (millones ha)	Porcentaje
Oxisoles	Todos	636	45,3
Ultisoles	Aquults	48	
	Udults, Ustults, y Humults	<u>220</u>	
		268	19,1
Alfisoles	Aqualfs	7	
	Udalfs y Ustalfs	<u>164</u>	
		171	12,2
Entisoles	Fluvents	19	
	Quartzipsamments	79	
	Orthents y otros	<u>21</u>	
		121	8,6
Inceptisoles	Aquepts	1	
	Andepts	32	
	Tropets	<u>81</u>	
		115	8,2
Molisoles	Todos	54	3,8
Aridisoles	Todos	26	1,9
Vertisoles	Todos	9	0,7
Histosoles	Todos	<u>1</u>	<u>0,1</u>
Total		1404	100,0

En los regímenes údicos los suelos predominantes son Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles e Inceptisoles.

Los Oxisoles están asociados con superficies terrestres muy viejas y estables. Ejemplos de estas superficies se encuentran tanto en ambientes údicos como ústicos. La peneplanicie de "Saint John", en Puerto Rico, es un excelente ejemplo de un paisaje con Oxisoles (Beinroth, 1972). En superficies geométricas más jóvenes son otros

los suelos predominantes. Las bien conocidas series "Nipe" (Acrothox típico), que muchos consideran como producto final de la formación de suelo, solamente se encuentran en los remanentes de estas peneplanicies en Puerto Rico y Cuba (Bennet y Allison, 1928). Otros suelos, tales como Ultisoles e Inceptisoles ocupan las superficies geomórficas más jóvenes.

En ambientes údicos hay Oxisoles, Ultisoles e Inceptisoles frecuentemente intermezclados. Recientes estudios de Lepsch y Buol (1974) en São Pablo, Brasil, por Daniels et al. (1973) en Barranquitas, Puerto Rico, y por Beinroth et al. (1974) en Kauai, Hawaii, indican que estos órdenes se presentan en posiciones predecibles en el paisaje. Los Oxisoles ocupan las superficies geomórficas más viejas, las que pueden ser remanentes de una peneplanicie anterior o parte de escarpados y retropendientes en otras. Los Ultisoles ocupan las pendientes inferiores a los lugares en que se encuentran los Oxisoles. Sus horizontes argílicos aparentemente se formaron después de que la peneplanicie original fue truncada por la erosión. Los Inceptisoles ocupan las laderas más escarpadas, desarrollándose en rocas recientemente expuestas. En la Fig. 2.2 aparece un diagrama al respecto. Daniels et al., también observaron Oxisoles al pie de laderas colocadas en posiciones que les permitían recibir material del Horizonte A provenientes de la erosión de los Oxisoles más altos. Por lo tanto los Oxisoles pueden ser de origen reciente y aluvial si el material fue premeteorizado antes de su deposición.

En áreas en que los sedimentos son probablemente demasiado jóvenes para que se formen Oxisoles como en la de la cuenca amazónica de Perú y Colombia, ajena a la influencia de los escudos más antiguos, se encuentra que los Ultisoles están asociados con Alfisoles, Inceptisoles y Entisoles. Estudios de Sánchez y Buol (1974) y de Tyler (1975) sugieren las siguientes relaciones en el paisaje (Fig. 2.3): en las posiciones topográficas más altas los suelos bien drenados que predominan son Udufts, los cuales son muy ácidos y presentan un horizonte argélico. En las superficies planas más antiguas el Horizonte A es arenoso, formando Peleudults típicos. Ladera abajo se encuentra primariamente una catena de drenaje y un Horizonte Gley moteado que es una mezcla de Caolinita y Montmorilonita. Los Tropaquults se encuentran en posiciones intermedias, y los Tropaqualfs en las posiciones más bajas. La primera terraza y las llanuras de inundación a lo largo de los ríos consisten de Entisoles.

La capa moteada gris y rojizo, fue llamada "laterita hidromorfa" por investigadores anteriores. Sánchez y Buol (1974) han mostrado que su mineralogía es primariamente de minerales de arcilla tipo 2:1 y 1:1. Aunque tiene el patrón de coloración de la plintita, este material no se endurece al ser expuesto y obviamente no es plintita. Algunos informes indican que las "lateritas hidromorfas pueden ser bastante extensas en los trópicos (Marbut y Manifold, 1926; Benavides, 1973). La presencia de estos rasgos tienden a despertar temores

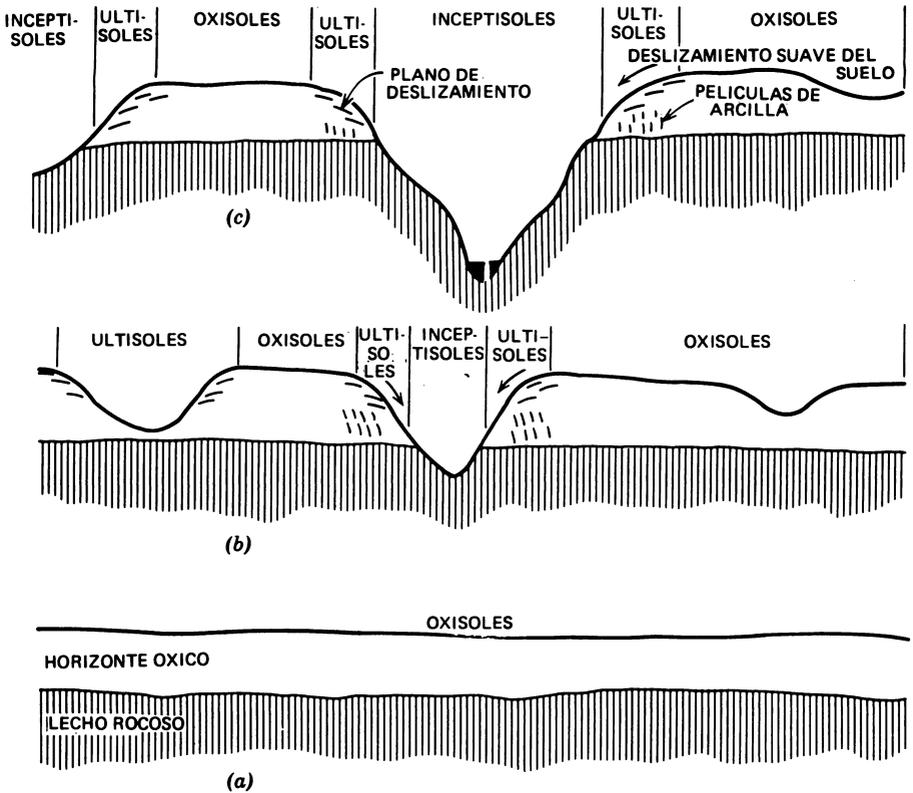


Fig. 2.2. Ilustración de la formación de un paisaje Oxisol-Ultisol-Inceptisol de una antigua superficie por medio de disección en Hawaii. (a): superficie no disecada (b): superficie moderadamente disecada; (c): superficie fuertemente disecada. (Fuente: Beinroth et al, 1974).

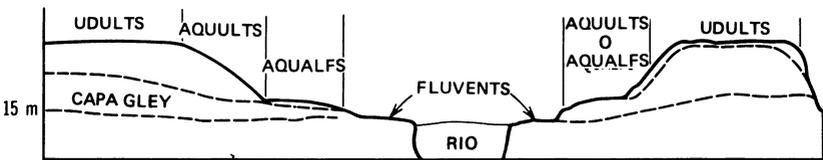


Fig. 2.3. Toposecuencia Ultisol-Alfisol-Entisol encontrada en la jungla del alto Amazonas. En la superficie plana aparecen Udults ácidos altamente meteorizados, seguidos por humedad creciente asociada a la presencia de una capa impermeable de gley. (Fuente: adaptado de Tyler, 1975).

de que al cultivar el suelo se convierta en ladrillo. Conviene señalar que el cultivo se hace ahora y se ha hecho durante los últimos 200 años exactamente en el mismo tipo de suelos (Ultisoles) en el sureste de Estados Unidos.

ASOCIACIONES DE SUELOS EN AMBIENTES USTICOS

El arreglo de esta sección en paisajes údicos y ústicos es simplemente con el propósito de describir paisajes comunes que se encuentran en cada ambiente. No se tiene en mente dejar implícito que estas relaciones del paisaje estén restringidas a estos regímenes de humedad. Es posible que muchas de las áreas ústicas de Africa tuvieran ambientes údicos en una era geológica anterior. En muchos paisajes antiguos el paleoclima puede haber tenido influencia en los suelos actuales (D'Hoore, 1956; Ollier, 1959; Mulcahy, 1960).

Los ambientes ústicos se caracterizan por fluctuaciones de humedad en el subsuelo durante el año. Es razonable suponer que muchos procesos de meteorización ocurren a una velocidad considerablemente más baja durante la estación seca que durante la estación lluviosa. Por lo tanto algunas consecuencias de estas fluctuaciones pueden apreciarse en muchos paisajes.

Paisajes de Oxisoles. Partes de los escudos brasileño y africano tienen paisajes multiciclos con dos o más superficies de erosión (Ruthe, 1954; Feuer, 1956). La Fig. 2.4 presenta un diagrama generalizado de una parte del cerrado de Brasil, cercana a la capital Brasilia. Este paisaje consiste de tres superficies de erosión descritas por Feuer (1956) y Cline y Buol (1973). Una primera superficie de erosión, que se cree que sea producto de una antigua peneplanicie marca el horizonte a alturas de unos 1.000 a 1.200 m. Conocidas localmente como "chapadas", estas superficies tienen declives de 0 a 3%. Los suelos son predominantemente Ustoxes profundos caracterizados por una estructura granular ultrafina, alta permeabilidad, y fertilidad extremadamente baja. Esta superficie termina abruptamente en un acantilado de 100 a 150 m de profundidad, seguida por una segunda superficie de erosión de declive suave. Los acantilados tienen poco desarrollo de suelo en el material rocoso meteorizado, y algunos tienen afloramientos de plintita. La segunda superficie de erosión tiene a menudo varios kilómetros de longitud con un declive de 2 a 8%. Los Ustoxes son también los suelos predominantes, con inclusiones de Histosoles y Aquoxes en áreas de mal drenaje. La tercera superficie de erosión de pendientes con 8 a 10% de declive paralelas a llanuras angostas de inundación. Estos suelos tienen un nivel de bases más alto y probablemente son Ustalfs. Las dos primeras superficies tienen como vegetación de sabana, indicativa de baja fertilidad del suelo. La tercera superficie consiste de bosque semideciduo que reflejan un nivel alto de bases.

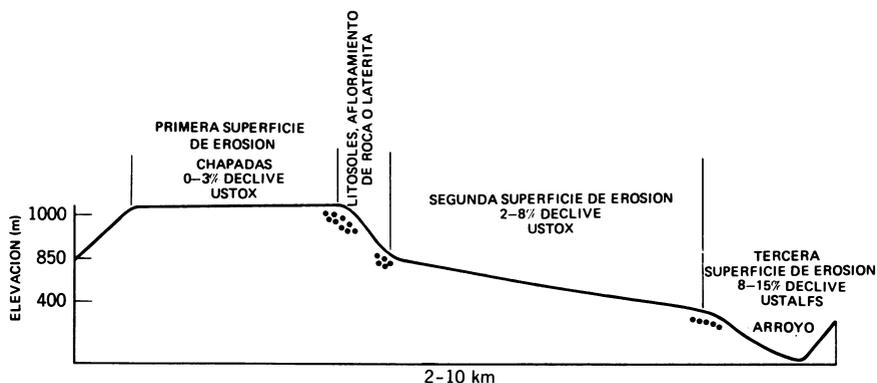


Fig. 2.4. Relaciones geomorfológicas de suelo en la Meseta Central de Brasil, cerca de Brasilia. Los puntos representan afloraciones de roca o plintita. (Fuente: adaptado de Feuer (1956; Cline y Buol, 1973); y observaciones personales).

Paisajes muy similares han sido descritos por Ruhe (1954) en el este de Zaire y oeste de Uganda. La formación de costra de plintita en los bordes de la primera superficie de erosión también se menciona en el informe de Ruhe así como en otros. Sivarajasingham et al., (1962) consideraban que estas costras se forman de la manera siguiente: durante la estación lluviosa el hierro se reduce y se mueve lateralmente a lo largo del paisaje; iones ferrosos se oxidan y luego se precipitan como óxidos e hidróxidos férricos en los bordes de la superficie de erosión cuando entran en contacto con el aire. La erosión puede bajar el nivel del suelo lo suficiente para formar una costra o casquete. Conforme la peneplanicie se erosiona más, las gravas de laterita y los fragmentos de la costra ruedan hacia abajo a la nueva superficie de erosión que se está formando. Líneas de piedras o un grueso depósito estratificado se forma. Esta capa puede quedar cubierta por nuevos sedimentos dando lugar a las "líneas de piedras" que se observan en Africa. En zonas planas de elevación más baja, plintita suave puede estar formándose sobre una napa freática.

Paisajes de Alfisoles. Grandes partes de Africa Occidental consisten de Ustalfs con capas de plintita por encima o por debajo de horizontes argílicos. Catenas clásicas de drenaje se han descrito en donde aumenta la cantidad de plintita y se vuelve más superficial conforme el drenaje se torna progresivamente peor. Nye (1954) cita un ejemplo cerca de Ibadán, Nigeria, en un paisaje en una pendiente con un 5% de declive asentado sobre materiales de granito y gneis. Los suelos que se presentan en la Fig. 2.5 tienen un Horizonte A franco arenoso, seguido por un horizonte argílico arcilloso que tiene pocos nódulos de hierro en las partes superiores de la pendiente. Las concreciones de hierro aumentan en abundancia conforme el drenaje se torna progresivamente deficiente. En los sitios más húmedos se encuentra una masa de nódulos parcialmente cementada a profundidades menores

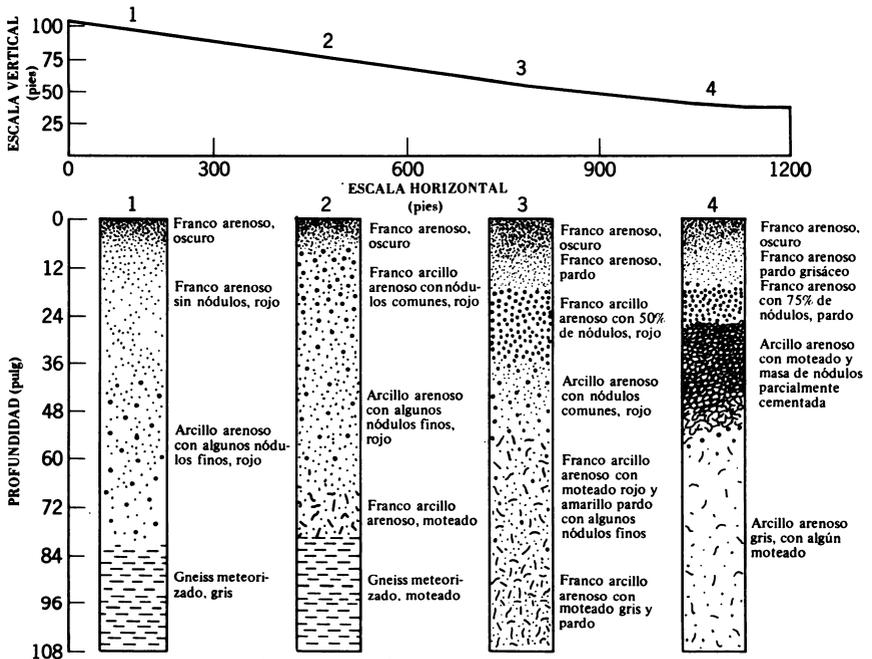


Fig. 2.5. Catena de Alfisol en Ibadán, Nigeria, con aumento de concreciones de plintita en el subsuelo conforme el drenaje es peor. Los miembros bien drenados son Ustalfs; los de drenaje deficiente, Plinthaqualfs. (Fuente: Nye, 1954).

de 1 m. El Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IIAT) está ubicado en este tipo general de asociación de suelos. El peligro de erosión de tales suelos es considerable, aun en pendientes suaves, debido al cambio textural. La erosión del Horizonte A arenoso torna el suelo prácticamente inservible, ya que resulta muy difícil trabajar el Horizonte B, que es cascajoso y arcilloso.

Paisajes Alfisol-Vertisol. Un aspecto común en los trópicos ústicos son las catenas rojas y negras. Suelos rojos (principalmente Ustalfs) ocupan los sitios mejor drenados, y arcillas oscuras que se agrietan (Vertisoles), las partes inferiores; una transición gradual de rojo a negro ocurre en las posiciones intermedias. Los suelos rojos son predominantemente Caoliníticos, y los negros Montmoriloníticos. Tales relaciones son comunes en Africa Oriental y en el Sudán (Milne, 1935; Green, 1947; Radwanski y Ollier, 1959). Como el material originario muchas veces es uniforme, se cree que el movimiento de sílice soluble y de las bases hacia la parte baja de la pendiente, y la subsecuente síntesis de la Montmorilonita en los niveles inferiores constituyen el principal proceso de formación de suelos Vertisoles. El hecho de que la Montmorilonita pueda sintetizarse en el laboratorio en forma parecida, confirma esta hipótesis. En la Fig. 2.6 se presenta un ejemplo de esta relación.

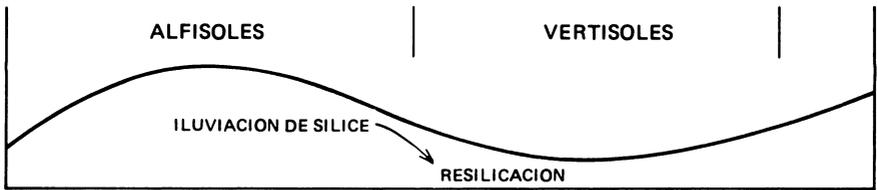


Fig. 2.6. Catena típica de Alfisoles (rojos) y Vertisoles (negros) en áreas ústicas de Kenia. La flecha indica la dirección del movimiento de sílice. En el Sudán existen catenas similares de Oxisoles-Vertisoles.

ASOCIACIONES DE SUELOS EN LAS TIERRAS MONTAÑOSAS

En las áreas de tierras altas afectadas por ceniza volcánica, la distribución de suelos en el paisaje depende principalmente de la edad de la ceniza y del clima. En regiones húmedas la ceniza volcánica se meteoriza rápidamente convirtiéndose en Alófana, mezcla amorfa de aluminio y silicato, que forma complejos con materia orgánica. Tales suelos forman un tipo especial de suelo llamado Andepts (Andosoles). Con una meteorización adicional la Alófana se convierte en Caolinita o Haloisita en condiciones de buen drenaje, y en Montmorilonita en condiciones de mal drenaje. Mohr et al., (1972) se refieren a estos procesos en forma muy detallada. Aunque los Andepts pueden estar localizados en cualquier posición topográfica, cuando la ceniza es joven, en regiones volcánicas del sureste de Asia es común la asociación de suelos negros (Andepts) en las elevaciones más altas, cambiando gradualmente a suelos rojos (probablemente Ultisoles) al disminuir la elevación. Esto se ha observado en Indonesia a través de cordilleras montañosas donde se cree que la ceniza volcánica sea de la misma edad y donde ha transcurrido tiempo suficiente para la meteorización. Dudal y Soepraptohardjo (1960) describieron la situación trazada en la Fig. 2.7. A elevaciones superiores a 700 m dominan los Andepts por razón del régimen de lluvias constantes (Udico) porque el régimen de temperatura baja (Isoméxico) favorece la acumulación de materia orgánica e impide la cristalización de la Alófana. A elevaciones entre 350 y 700 m los suelos predominantes son los llamados "suelos pardos forestales latosólicos" (probablemente Tropepts). El cambio en color de negro a pardo está asociado con una cantidad menor de materia orgánica, mayor contenido de arcilla, y la presencia de Caolinita. Esto indica una cristalización de Alófana a Caolinita a través de numerosas formas intermedias. A elevaciones más bajas (100-350 m) el suelo se torna rojo con aumentos correspondientes en el contenido de arcilla y disminuciones en la capacidad de intercambio de cationes. Estos suelos se han clasificado como "Latosoles Húmicos" y probablemente son Humults. En las áreas de tierras bajas el régimen de humedad cambia a Ustico, y los suelos predominantes cambian a Ustults. En áreas de depresiones se pueden formar Vertiso-

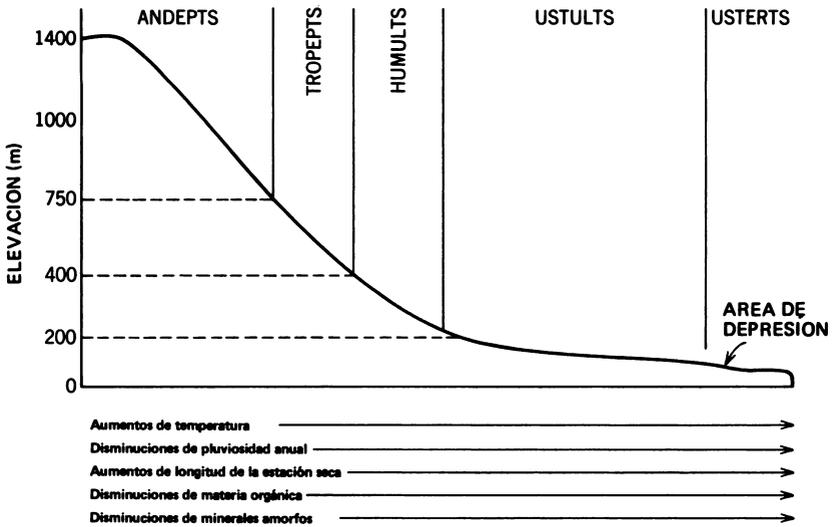


Fig. 2.7. Asociaciones de suelo a lo largo de la ladera y la base de un volcán en Indonesia. Los suelos se formaron de ceniza volcánica de edad uniforme. (Fuente: adaptado de Dudal y Soeprahardjo, 1960).

les ya sea por transformación directa de la Alófana en Montmorilonita o por el proceso de resiliación que se mencionó con respecto a la catena de Africa Oriental. Amplias toposecuencias similares se han observado en las Filipinas.

El ejemplo anterior se limita a áreas donde la elevación y el clima dominan los procesos de formación de suelo. Aún en áreas con materiales originarios relativamente uniformes las relaciones son más complicadas. Tamura et al (1953) ilustraron la distribución de los suelos de Hawaii de acuerdo con la topografía, la pluviosidad, el material originario, y la edad. La Fig. 2.8, dibujada con base en ese informe, ilustra una relación similar a la anteriormente descrita, con Andepts convirtiéndose gradualmente en Humults en el lado de Barlovento de la isla en donde hay un régimen de humedad Udico. En el lado de Sotavento el régimen de humedad es Ustico o Arídico. Las diferencias en la edad del material originario y la pluviosidad producen suelos que van de Oxisoles a Aridisoles dentro de distancias cortas.

Varias asociaciones típicas de suelos en montañas no volcánicas han sido descritas por Zamora (1972) para partes de los Andes peruanos. En la Fig. 2.9 se presenta una secuencia de oeste a este. Las cordilleras más al oeste tienen regímenes de humedad arídicos, con suelos poco profundos o del todo sin suelo. En las principales mesetas intramontanas, tales como el Valle del Mantaro, un sistema de terrazas sobre material originario calcáreo produce la siguiente asociación de suelos: en los bordes de los valles predominan suelos muy

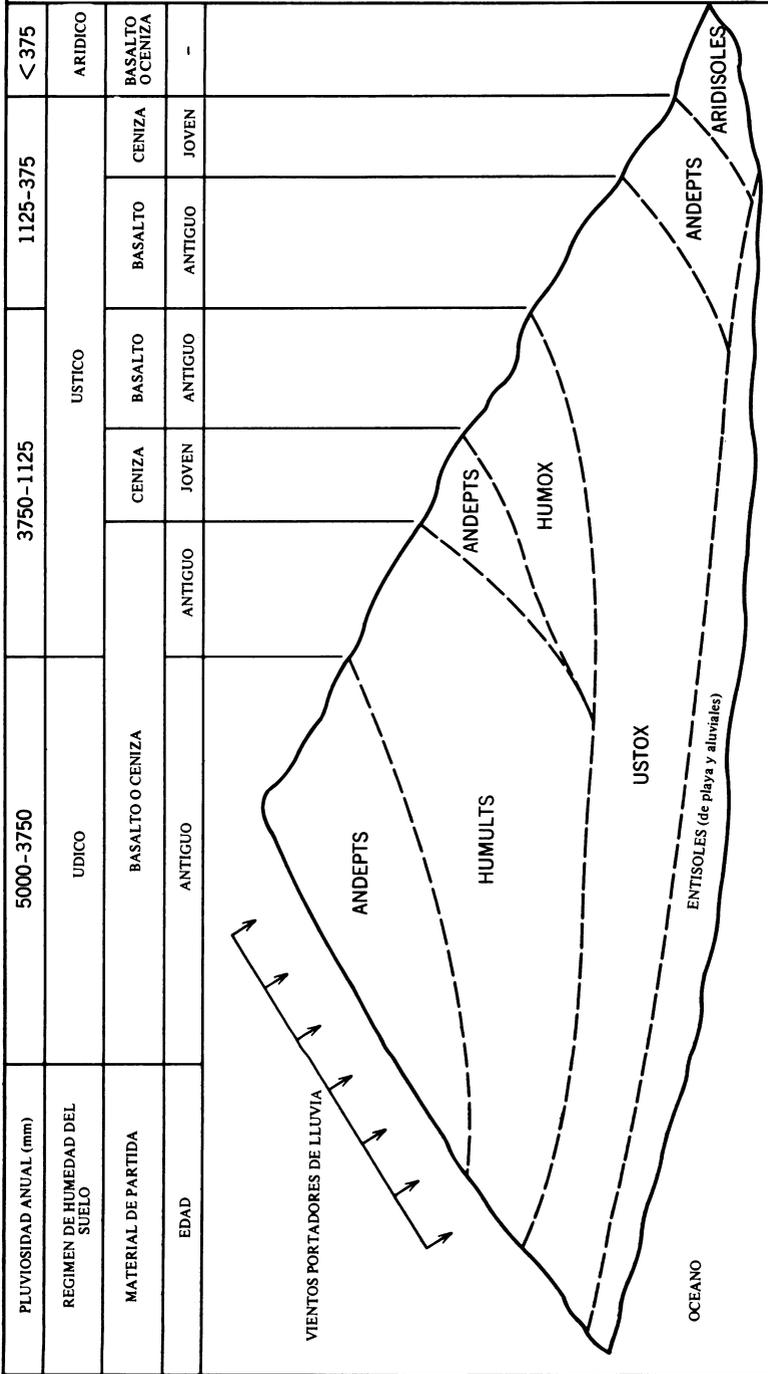


Fig. 2.8. Asociaciones de suelo en una isla volcánica, afectadas por pluviosidad, topografía, material original y edad. (Fuente: adaptada de Tamura et al, 1953).

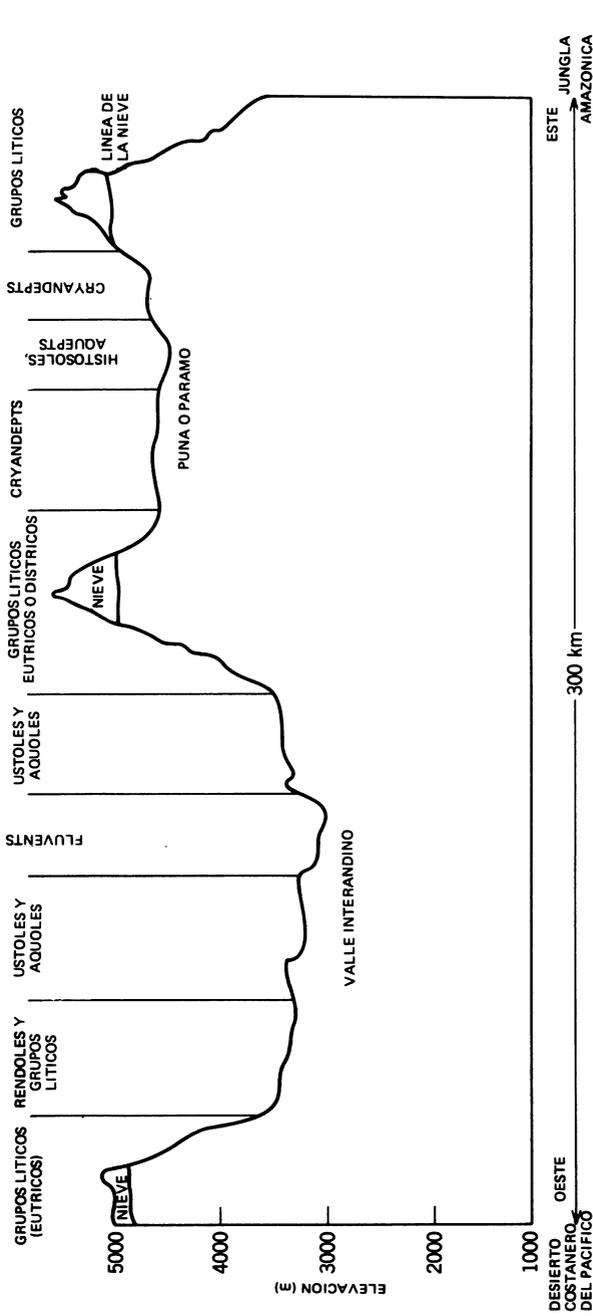


Fig. 2.9. Asociaciones principales de suelo en un corte transversal en los Andes Peruanos. (Fuente: adaptado de Zamora (1972) y sus datos sin publicar).

poco profundos, particularmente rendolls o rendsinas cuando el material originario es roca caliza. En las terrazas más altas los suelos más comunes son los Molisoles (Ustolls y Aquolls), cambiando gradualmente a "fluvents" en las llanuras de inundación del valle. A alturas mayores de 4.000 m el altiplano (o "punas"), relativamente plano, los "Cryandeps" (Andeps fríos) dominan en los sitios bien drenados, y los Histosoles en las áreas de drenaje deficiente. En el flanco oriental de los Andes, (selva alta) con regímenes údicos de humedad se encuentran Entisoles superficiales cerca de los picos altos. Más abajo hay Tropopets dístricos o éutricos, según el material originario. A elevaciones más bajas hay Ultisoles junto con Vertisoles en áreas de depresión con regímenes de humedad de suelo ústico, y "fluvents" cerca de los ríos.

ASOCIACIONES DE SUELO EN DESIERTOS TROPICALES

Menos conocimientos se tienen acerca de los desiertos tropicales. En la costa del Perú pueden encontrarse las siguientes relaciones: las montañas desnudas son carentes de suelo o tienen subgrupos líticos de Entisoles o Inceptisoles. En los valles se encuentran dunas de arena movediza (Psamments) en asociación con varios Aridisoles, incluyendo "Salorthids" y "Camborthids". En las llanuras de inundación de los ríos se encuentran "fluvents", formando la base de una agricultura de riego muy productiva. Las partes más bajas de estas áreas irrigadas reciben progresivamente depósitos de sal de las partes más altas, convirtiendo algunos "fluvents" en "Salorthids" y en suelos salinos con drenaje deficiente. Conforme aumenta la pluviosidad los Alfisoles tienden a rodear a los Aridisoles.

SUELOS DE PLANICIES Y DELTAS ALUVIALES TROPICALES

Las relaciones geomórficas de los valles son bastante similares en todo el mundo. Los sistemas de llanuras de inundación, diques, terrazas y terrenos elevados adyacentes de valles costaneros y de deltas de los trópicos, básicamente no presentan diferencias con los del resto del mundo. La principal diferencia consiste en las propiedades de los suelos. En áreas templadas glaciales el aluvión es generalmente rico en bases y minerales meteorizables, siendo la ilita el mineral de arcilla predominante. En los trópicos esos ricos depósitos aluviales se encuentran en vertientes con sedimentos recientemente expuestos, como los que se originan en los Andes y en los Himalayas o en áreas donde existen depósitos de ceniza volcánica fresca. Los ríos que se originan en áreas de paisajes antiguos que han sufrido varios ciclos de erosión formarán depósitos aluviales ricos en cuarzo, Caolinita y óxidos de hierro. Muchos de ellos son bastante infértiles (Edelman y Van der Voorde, 1963). Por lo tanto, no puede darse por seguro que los suelos aluviales recientes de los trópicos son siempre muy fértiles.

En muchas áreas las terrazas aluviales más antiguas tienen suelos altamente meteorizados. Dentro de las regiones del valle se encuentran Oxisoles, Ultisoles y otros suelos muy meteorizados.

La mayor abundancia de depósitos marinos ricos en piritita, en las planicies y áreas costaneras tropicales, da por resultado una mayor extensión de suelos ácidos sulfatados (Sulfaquepts) que en la zona templada. Los "Sulfaquepts" cubren grandes porciones del delta del Mekong, la planicie de Bangok, la Gambia y partes de las áreas costaneras de las Guayanas en América del Sur. Solamente en Vietnam ocupan más de 2 millones de hectáreas. Estos suelos tienen tales propiedades químicas extremas que merecen especial atención.

Según Moormann (1963) los suelos ácidos sulfatados se encuentran donde los iones de sulfato arrastrados por las aguas marinas inundantes, son reducidos a H_2S bajo condiciones anaeróbicas en sedimentos con alto contenido de materia orgánica. El sulfuro de hidrógeno luego reacciona con los compuestos de hierro presentes en el suelo, formando piritita (FeS_2). Cuando estos depósitos son expuestos al aire y el suelo es bajo en carbonato de calcio, el FeS_2 se oxida a sulfato férrico y ácido sulfúrico libre dando por resultado valores de pH en el orden de 2 ó 3. Los sulfatos férricos son nuevamente hidrolizados produciendo jarosita, material básico de sulfato férrico de color paja y se acumula en el suelo, dándoles las características manchas de color amarillo brillante.

Los suelos ácidos sulfatados son sumamente infértiles. La concentración del sulfato y la profundidad a que se encuentra determinan que puedan hacerse cultivos o no. El ácido sulfúrico libre disuelve los minerales de arcilla y produce mucho aluminio intercambiable, en cantidades tóxicas para la mayoría de los cultivos. La toxicidad de hierro y de manganeso, y la deficiencia de fósforo son comunes; las propiedades físicas son muy deficientes. A menudo se siembra arroz inundado, ya que bajo condiciones constantes de reducción el pH sube lo suficiente para eliminar la toxicidad de aluminio. Pocos cultivos aeróbicos toleran arcillas ácidas sulfúricas pero algunos pueden crecer si hay suficiente lixiviación que permita una disminución de la toxicidad de aluminio. En el delta del Mekong se cultivan piñas en tal clase de suelos. La recuperación de estos suelos es posible en muchas áreas por medio de prácticas de encalado, fertilización y drenaje. Un simposio sobre suelos ácidos sulfatados (Post, 1973) ha resultado en el tratado más comprensivo de este tema.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El fuerte sesgo genético de los primeros pedólogos tropicales dio por resultado serios conceptos errados, dando a entender que los suelos tropicales son uniformes, altamente meteorizados, y expuestos a transformarse en laterita semejante a ladrillo cuando se les desmonta para cultivarlos. Estudios recientes

ponen de manifiesto que los suelos tropicales presentan un ámbito tan amplio de propiedades como los de la zona templada. La única propiedad común a todos los suelos tropicales es su régimen uniforme de temperatura.

2. El uso de por lo menos seis principales sistemas de clasificación de suelos de los trópicos, han impedido una correlación significativa y la extrapolación de datos de una parte a otra. El fuerte sesgo genético de los primeros sistemas de clasificación dio por resultado el que se agruparan los suelos de acuerdo con conceptos estereotipados de un ambiente tropical uniforme. El advenimiento del sistema cuantitativo de Taxonomía de Suelos de Estados Unidos y la leyenda cartográfica de FAO-UNESCO permite ahora la agrupación de los suelos tropicales de acuerdo con sus propiedades, y no según lo dictado por las teorías genéticas. La antigua terminología (“suelos lateríticos”, “Latosoles”, “suelos tropicales”) puede descartarse y sustituirse por los términos definidos cuantitativamente.
3. A escala de 1 a 50 millones, los Oxisoles constituyen el orden de suelos más abundantes en las tierras bajas de los trópicos, cubriendo alrededor del 22% del área. La distribución superficial de los otros órdenes es la siguiente: Aridisoles 18%; Alfisoles 16%; Ultisoles 11%; Inceptisoles 8%; Entisoles 8%; Vertisoles 2%; y Mollisoles 1%. También se encuentran Espodosoles e Histosoles.
4. A nivel del paisaje, en las áreas tropicales se encuentran varias relaciones de suelo bien definidas. En ambientes údicos son comunes las secuencias Oxisol – Ultisol – Inceptisol en áreas con materiales originarios muy antiguos. En materiales originarios más recientes se encuentran secuencias Ultisol – Alfisol – Inceptisol. En ambientes ústicos con materiales originarios muy antiguos se presentan paisajes de Oxisol con afloramientos de plintita en los quiebres de las pendientes que separan superficies de erosión. En materiales más jóvenes son comunes las catenas de Alfisol con plintita, y paisajes de Alfisol – Vertisol.
5. En las tierras altas tropicales la influencia de los materiales volcánicos corrientemente da por resultado secuencias de paisaje Andept – Tropept – Ultisol – Vertisol, según la edad de los depósitos de ceniza volcánica, la pluviosidad y la elevación. En tierras altas no volcánicas se encuentra una gran diversidad de relaciones de suelo y paisaje. Los suelos de ceniza volcánica o Andepts tienen una mayor extensión en los trópicos que en la zona templada y tienen una mayor importancia económica en las tierras altas tropicales de Asia, Africa y América Latina.

6. Aunque la geomorfología de las planicies y deltas aluviales de los trópicos no presentan diferencia con los de la zona templada, en los trópicos no siempre se encuentran las propiedades de alta fertilidad del aluvión. En vertientes que se originan en materiales jóvenes, como las de los Andes y los Himalayas, el aluvión es rico. En vertientes que se originan de superficies altamente meteorizadas, los materiales aluviales generalmente son de baja fertilidad.
7. Muchas áreas tropicales costaneras y deltaicas tienen grandes extensiones de suelos ácidos sulfatados. Cuando se les drena, estos suelos son sumamente ácidos, con un pH inferior a 3 y es difícil ponerlos en producción.

REFERENCIAS

- ABROL, I. P., y BHUMBLA, D. R. Saline and alkali soils in India, their occurrence and management. FAO World Soil Resources Rept. 41. 1973. pp. 42-51.
- ADAMS, M. E. The rewa peat bog and related clay horizons. Fiji Agr. 32:3-8. 1970.
- AGUILERA, N. Los recursos naturales del sudeste de México y su explotación: Suelos. Chapingo Rev. Esc. Nac. Agr. 3:1-54. 1963.
- AHMAD, N., JONES, R. L., y BEAVERS, A. H. Some mineralogical and chemical properties of the principal inorganic coastal soils of British Guiana. Soil Sci. 96:162-174. 1962.
- _____, y JONES, R. L. A plinthaquilt of the Aripo savannas, North Trinidad. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33(5):762-765. 1969.
- ALEXANDER, L. T., y CADY, J. G. Genesis and hardening of laterites in soils. U.S. Dept. Agr. Tech. Bull, 1282. 1962.
- ALVARADO, A., y LOPEZ, C. Química y física de algunos Ultisoles de Costa Rica, América Central. Turrialba 21(3):304-311. 1971.
- AUBERT, G. Soil with ferruginous and ferralitic crusts of tropical regions. Soil Sci. 95(4):235-242. 1963.
- _____. Classification des sols utilisee par les pedologues francais. FAO World Soil Resources Rept. 32. 1968. pp. 78-94.
- _____, y TAVERNIER, R. Soil survey. In Soils of the humid tropics. U.S. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 17-44.
- AUGUSTINUS, P. G. E. F., y SLAGER, S. Soil formation in swamp soils of the coastal fringe of Surinam. Geoderma 6:203-211. 1971.
- BALDWIN, M., KELLOGG, C. E., y THORP, J. Soil classification. In Soils and men, the yearbook of agriculture. U.S. Government Printing Office. Washington, 1938. pp. 979-1001.
- BEAUDOU, A. G. Rouge et beige sols: Etude d'une sequence sur quartzite dans la zone forestière de la République Centrafricaine. Cah. ORSTOM, Ser. Pedol. 9(2):147-187. 1971.

- BEINROTH, F. H. The general pattern of the soils of Puerto Rico. *Trans. Fifth Caribbean Geol. Conf. Geol. Bull.* 5. 1972. pp. 225-229.
- _____. Relationships between the U.S. Soil Taxonomy, the Brazilian soil classification system and the FAO/UNESCO soil units. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 92-108.
- _____, UEHARA, G., y IKAWA, H. Geomorphic relations of Oxisols and Ultisols of Kauai, Hawaii. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:128-131. 1974.
- BENAVIDES, S. T. Mineralogical and chemical characteristics of some soils of the Amazonia of Colombia. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, 1973. 216 p.
- BENNEMA, J. The red and yellow soils of the tropical and subtropical uplands. *Soil Sci.* 95(4):250-257. 1963.
- _____, CAMARGO, M. N., y WRIGHT, A. C. S. Regional contrast in South American soil formation in relation to soil fertility. *Trans. Comm. IV and V, Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*:453-506. 1962.
- _____, CAMARGO, M. N. Segundo esboço parcial de classificação de solos brasileiros. Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 1964.
- BENNET, H. H., y ALLISON, R. V. The soils of Cuba Tropical Plant Research Foundation, Washington, 1928.
- BLOOMFIELD, C. The oxidation of iron sulphides in soils in relation to the formation of acid sulfate soils and of ochre deposits in field drains. *J. Soil Sci.* 23:1-6. 1972.
- BOER, M. W. H. de. Land forms and soils in eastern Surinam (South America). PUDOC 13. Wageningen, Netherlands, 1972. 169 p.
- BONNET, J. A. Edafología de los suelos salinos y sódicos. University of Puerto Rico, Rio Piedras, 1960. 337 p.
- BORNEMISZA, E., y MORALES, J. C. Soil chemical characteristics of recent volcanic ash. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33:528-531. 1969.
- BRAMMER, H. Coatings in seasonally flooded soils. *Geoderma* 6:5-16. 1971.
- BUOL, S. W. Soil genesis, morphology, and classification. In P. A. Sanchez (ed.). *A review of soils research on tropical Latin America*. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 1-37.
- _____, HOLE, F. D., y McCracken, R. J. *Soil genesis and classification*. Iowa State University Press, Ames. 1973. 360 p.
- CALHOUN, F. G., CARLISLE, V. W., y LUNA C. Properties and genesis of selected Colombian Andosols. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:480-484. 1972.
- CAMARGO, M. N., y FALESI, I. C. Soils of the planalto and transamazonian highway of Brazil. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 25-44.
- CHATELIN, Y. Contribution à l'étude de la sequence sols ferrallitiques et ferrugineaux tropicaux beiges. Examen de profils Centrafricains. *Cah. ORSTOM, Sér. Pedol.* 7:449-453. 1969.
- CLINE, M. G. Some potential soil taxa of the tropics. Mimeographed. Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, N.Y. 1972. 6 p.
- _____. Origin of the term Latosol. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39:162. 1975.
- _____, et al. Soil survey of the territory of Hawaii. *Soil Survey Ser.* 1939. No. 25. U.S. Department of Agriculture, Washington, 1955.
- _____, BUOL, S. W. Soils of the Central Plateau of Brazil. *Agron. Mimeo* 73-17. Cornell University, Ithaca, N.Y. 1973.

- COLMET-DAAGE, F. et al. Características de algunos suelos de aluvión de la zona oriental de la provincia de Guayas. *Banano, Ecuador* 1:9-12. 1968.
- _____, et al. Características de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. *Cah. ORSTOM. Sér. Pédol.* 7:494-560. 1969.
- _____, KIMPE, C. de, DALEUNE, M., et al. Caractéristique de quelques sols dérivés de cendres volcaniques du Nicaragua. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 8:113-172. 1970.
- _____, y GAOTHEYROU, J. Soil association on volcanic materials in tropical America with special reference to Martinique and Guadeloupe. *Trop. Agr. (Trinidad)* 51:121-128. 1974.
- COMERMA, J. A. Los suelos de Venezuela y la séptima aproximación. *Agron. Tropical (Venezuela)* 21:365-377. 1971.
- CORTÉS, A., y FRANZMEIER, D. P. Climosequence of ash-derived soils in the Central Cordillera of Colombia. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:653-659. 1972.
- COSTA DE LEMOS, R. The main tropical soils of Brazil. *FAO World Soil Resources Rept.* 32. 1968. pp. 95-106.
- COUTINET, S., y DURANT, J. H. Les sols de mangrove de la côte Nord-Ouest de Madagascar, région d'Ambanja. *Agron. Tropical (France)* 21:345-360. 1966.
- CRECY, J. de. Les Vertisols sur calcaire aux Antilles: problèmes d'utilisation agricole. In *Proceeding of the seventh annual meeting. C. F. C. S., Martinique, Guadeloupe, 1970.* pp. 251-265.
- CROWTHER, E. M. Soil fertility problems in tropical agriculture. *Commonwealth Bur. Soil Sci. Tech. Commun.* 46:134-192. 1949.
- DANIELS, R. B., BEINROTH, F. H., RIVERA, L. H., y GROSSMAN, R. B. Landscape and soil in an area of East Central Puerto Rico. *Soil Survey Investigations*, 1973. (in press).
- DESPHANDE, S. B., FEHRENBACHER, J. B., et al. Mollisols of the Tarai Region of Uttar Pradesh, Northern India. 1. Morphology and Mineralogy. 2. Genesis and Classification. *Geoderma* 6:179-201. 1971.
- D'HOORE, J. L. Pedological comparisons between tropical South America and tropical Africa. *Afr. Soils* 4:5-18. 1956.
- _____. Soils map of Africa-1:5.000.000 with explanatory monograph. *Comm. Tech. Cooperation in Africa, Joint Project 11. Lagos, Nigeria, 1965.* 205 p.
- _____. The classification of tropical soils. In R. P. Moss (ed.). *The soil resources of tropical Africa.* Cambridge University Press, London, 1968. pp. 7-28.
- DIJKERMAN, J. C. Soil resources of Sierra Leone, West Africa. *Afr. Soils* 14:185-205. 1969.
- DONAHUE, R. L. Ethiopia: taxonomy, cartography, and ecology of soils. *Afr. Studies Center, Monogr.* 1. Michigan State University, East Lansing, 1972.
- DOST, H. (ed.). Acid sulphate soils. *Int. Inst. Land Reclamation and Improvement Publ.* 18. Wageningen, Netherlands, 1973. v. 1 y 2.
- DUDAL, R. Dark clay soils of tropical and subtropical regions. *Soil Sci.* 95:264-271. 1963.
- _____. Dark clay soils of tropical and subtropical regions. *FAO Agr. Dev. Paper* 83. 1965. 161 p.
- _____. Definitions of soil units for the soil map of the world. *FAO World Soil Resources Rept.* 33. 1968.
- _____. Key to soil units for the soil maps of the world. *Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1970.* 16 p.

- DUDAL, R., y SOEPRAPTHOHARDJO, M. Some considerations of the genetic relationship between Latosols and Andosols in Java, Indonesia. *Trans. Seventh Int. Congr. Soil Sci. (Madison)* 4:229-237. 1960.
- _____, y MOORMANN, F. R. Major soils of Southeast Asia, their characteristics, distribution, use and agricultural potential. *J. Trop. Geogr.* 18(2):54-80. 1964.
- EDELMAN, C. E., y VOORDE, P. K. J. van der. Important characteristics of alluvial soils in the tropics. *Soil Sci.* 95(4):258-263. 1963.
- FADL, A. E. A mineralogical characterization of some Vertisols in the Gezira and Kenana clay plains of the Sudan. *J. Soil Sci.* 22:129-135. 1971.
- FAO. Meeting on the classification and correlation of soils from volcanic ash (Tokyo). *FAO World Soil Resources Rept.* 14. 1964. 169 p.
- _____. *Production yearbook. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1971.*
- FAO-UNESCO. *Soil map of the world. Vol. IV: South America. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Paris, 1971.*
- FEUER, R. An exploratory investigation of the soils and agricultural potential of the soils of the future Federal District in the Central Plateau of Brazil. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y. University Microfilms Publ. 16.254. 1956. 432 p.
- GERASIMOV, I. P. A genetic approach to the subdivision of tropical soils, regolith and their products of redeposition. *Soviet Geogr.: Rev. and Translation* 14:165-177. 1973.
- GOEDERT, W. J., y BEATTY, M. T. Caracterização de grumussolos no sudoeste do Rio Grande de Sul. II. Mineralogía e gênese. III. Morfología e classificação. *Pesq. Agropec. Bras.* 6:183-193, 243-251. 1971.
- GOUVELA, D. G. Vertisolos do norte de Moçambique. *Agron. Moçambicana* 2:139-147. 1968.
- GOWAIKAR, A. S. Influence of moisture regime on the genesis of laterite soils in South India. III. Soil classification. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 21:343-347. 1973.
- GREENE, H. Classification and use of tropical soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 10:392-396. 1945.
- _____. Soil formation and water movement in the tropics. *Soils and Fert.* 10:253-256. 1947.
- GUERRERO, R. Suelos de Colombia y su relación con la séptima aproximación. Instituto Geográfico "Agustin Codazzi", Bogotá, Colombia, 1964.
- _____. Soils of the Eastern Region of Colombia. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 61-90.*
- HABIBULLAH, A. K. M., GREENLAND, D. J., y BRAMMER, H. Clay mineralogy of some seasonally flooded soils of East Pakistan. *J. Soil Sci.* 22:179-190. 1971.
- HARDY, F. Cultivation properties of tropical red soils. *Emp. J. Exptal. Agr.* 1:103-112. 1933.
- HARPSTEAD, M. J. The classification of some Nigerian soils. *Soil Sci.* 116:437-443. 1973.
- HART, M. G. R. Sulfur oxidation in tidal mangrove soils of Sierra Leone. *Plant and Soil* 11:215-235. 1959.
- HERATH, J. W., y GRIMSHAW, R. W. A general evaluation of the frequency distribution of clay and associated minerals in the alluvial soils of Ceylon. *Geoderma* 5:119-130. 1971.

- IICA. Panel on soils derived from volcanic ash in Latin America (English and Spanish editions). Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969.
- IIVANOVA, E. N. An attempt at a general classification of soils (translated from the Russian). *Pochvovedeniye* 6:82-102. 1956.
- JACOMINE, P. K. T. Descrição das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas de algunos perfis de solos sob vegetação de cerrado. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, Bol. Tec. 11. Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, Brasil, 1969. 126 p.
- JAHN, R. E. Los suelos orgánicos o turbas del área depresional, Buena Vista, Estado Sucre. *Agron. Tropical (Venezuela)* 20:299-309. 1970.
- JURION, F., y HENRY, J. Can primitive farming be modernized? INEAC, HORS Ser. 1969. Institut National pour L'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1969. pp. 427-457.
- KAMARCK, A. M. Climate and economic development. EDI Seminar Paper 2. Economic Development Institute, International Bank for Reconstruction and Development, Washington, 1972.
- KANAPATHY, K. Reclamation of acid swamps soils. *Malaysian Agr. J.* 48:33-46. 1971.
- KAWAGUCHI, K. y KYUMA, K. Lowland rice soils in Thailand. Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University, Japan, 1969. 270 p.
- KEIVIE, W. VAN DER. Acid sulphate soils in Central Thailand. *FAO World Soil Resources Rept.* 41. 1971. pp. 32-41.
- KELLOGG, C. E. Preliminary suggestions for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. *Commonwealth Bur. Soils Tech. Commun.* 46:76-85. 1949.
- _____. Tropical soils. *Trans. Fourth Int. Congr. Soil Sci. (Amsterdam)* 1:266-276. 1950.
- _____, y DAVOL, F. D. An exploratory study of soil groups in the Belgian Congo. INEAC, Sér. Sci. 46. Institut National pour L'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1949. 76 p.
- KESSEBA, A., PITBLADO, J. R., y URIYO, A. P. Trends in soil classification in Tanzania. I. The experimental use of the Seventh Approximation. *J. Soil Sci.* 23:235-247. 1972.
- KLINGE, H. Podzol soils in the Amazon Basin. *J. Soil Sci.* 16:95-103. 1965.
- _____. Podzol soils: A source of blackwater rivers in Amazonia. *Atas do Simpósio sobre a Biota Amazônica* 3:117-125. 1967.
- KU WING LEUNG. A synthesis study of the genesis of reddish brown latosols, yellowish brown latosols and red-yellow podzolic soils of Taiwan. *J. Agr. Assoc. China* 76:63-77. 1971.
- KYUMA, K., y KAWAGUCHI, K. Major soils of Southeast Asia and the classification of soils under rice cultivation. *Kyoto Univ. Southeast Asian Studies* 4(2):290-312. 1966.
- LAGANATHAN, P., y SWINDALE, L. D. The properties and genesis of four middle altitude Dystrandept volcanic ash soils from Mauna Kea, Hawaii. *Pacific Sci.* 23:161-171. 1969.
- LEPSCH, I. F., y BUOL, S. W. Investigations in an Oxisol-Ultisol toposequence in São Paulo State, Brazil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:491-497. 1974.
- MARBUT, C. F., y MANIFOLD, C. B. The soils of the Amazon Basin in relation to agricultural possibilities. *Geogr. Rev.* 15:239-244. 1926.

- MARTINI, J. A., y MOSQUERA, L. Properties of five tropests in a toposequence of the humid tropics in Costa Rica. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:473-477. 1972.
- _____, y MACIAS, M. A study of six "Latosols" from Costa Rica to elucidate the problems of classification, productivity and management of tropical soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:644-652. 1974.
- McNEIL, M. Lateritic soils. *Sci. Amer.* 211(5):96-102. 1964.
- MEIGS, P. Geography of coastal deserts. *UNESCO Arid Zone Res. Publ.* 28. 1966. 140 p.
- MILNE, G. Composite units for the mapping of complex soil association. *Trans. Third Int. Congr. Soil Sci.* 1:345-347. 1935a.
- _____. Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African soils. *Soil Res.* 4:183-198. 1935b.
- MOHR, E. D. J., VAN BAREN, F. A., y VON SCHUYLERBORGH, J. Tropical soils: A comprehensive study of their genesis. 3rd rev., enlarged ed. Mouton-Ichtiar Baru-Van Hoeve, The Hague, 1972.
- MOORMANN, F. R. Acid sulfate soils (cat-clays) of the tropics. *Soil Sci.* 95(4):271-275. 1963.
- MOSS, R. P. Soils, slopes and surfaces in Tropical Africa. In R. P. Moss (ed.). *The soil resources of tropical Africa.* Cambridge University Press, London, 1968. pp. 29-60.
- MOURA-FILHO, W., y BUOL, S. W. Studies of a Latosol Roxo (Eustrtox) in Brazil. *Experientiae* 13(7):201-247. 1972.
- MUKHERJEE, H. N. Determination of nutrient needs in tropical soils. *Soil Sci.* 95:276-280. 1963.
- MULCAHY, M. J. Laterite and lateritic soils in S. W. Australia. *J. Soil Sci.* 11:206-225. 1960.
- MURTHY, R. S. Acid sulphate soils in India. *FAO World Soil Resources Rept.* 41. 1971. pp. 24-29.
- NATOHADIPRAWIRO, T. Problems and perspectives of agriculture on alluvial soils of Indonesia. *Ilmo. Pertanian (Agr. Sci.)* 1:247-257. 1972.
- NYE, P. H. Some soil forming processes in the humid tropics. I. A field study of a catena near Ibadan, J. *Soil Sci.* 5:7-21. 1954.
- _____. Some soil forming processes in the humid tropics. II. The development of the upper member of the catena. III. Laboratory studies of a typical catena over granite gneiss. *J. Soil Sci.* 6:51-62, 63-72. 1955.
- OLLIER, C. D. A two-cycle theory of tropical pedology. *J. Soil Sci.* 10:137-148. 1959.
- PAGEL, H., y INSA, I. Physikalish-chemische und chemische Eigenschaften einiger Mangrovenboden Guineas. *Beitr. Trop. Subtrop. Landwitsch* 8:93-106. 1970.
- PALENCIA, J. A., y MARTINI, J. A. Características morfológicas, químicas, y físicas de algunos suelos derivados de ceniza volcánica en Centroamerica. *Turrialba* 20:325-332. 1970.
- PANTASTICO, E. B. et al. A fertility record of the Taal volcano ejecta after the eruption of 1965. *Philipp. Agr.* 51:17-23. 1968.
- PORRENGA, D. H. Clay mineralogy and geochemistry of recent marine sediments in tropical areas as exemplified by the Niger delta, the Orinoco shelf, and the shelf off Sarawak. *Publ. Fysisch-Geogr. Bodemk. Lab. Univ. Amsterdam* 9:1-145. 1967.

- POST, J. L., y SLOANE, R. L. The nature of clay soils from the Mekong Delta, an giang province, South Vietnam. *Clays and Clay Minerals* 19:21-29. 1971. PRESIDENT'S SCIENCE ADVISORY COMMITTEE. The world food problem. The White House, Washington, 1967. v.2.
- QUANTIN, P. Les andosols: Revue bibliographique des connaissances actuelles. *Cah. ORSTOM. Sér Pédol.* 10:273-301. 1972a.
- _____. Nature and fertility of the volcanic ash soils from recent eruptions in the New Hebrides Archipelago. *Cah. ORSTOM. Sér Pédol.* 10:123-134. 1972b.
- QUINONES, H., y ALLENDE, R. Formation of the lithified carapace of calcareous nature which covers most of the Yucatan Peninsula and its relation to the soils and geomorphology of the region. *Trop. Agr. (Trinidad)* 51:94-101. 1974.
- RADWANSKI, S. A. East African catenas in relation to land use and farm planning. *World Crops* 25:265-273. 1971.
- _____, y OLLIER, C. D. A study of an East African catena. *J. Soil Sci.* 10:149-168. 1959.
- RAYCHAUDHURY, S. P., y PATEL, M. M. Comparative study of some typical saline and alkali soils occurring in certain climatic regions in India. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 17:291-299. 1969.
- _____, y GOVINDA RAJAN, S. V. Soils of India. *Indian Council Agr. Res. Tech. Bull.* 25. 1971. 45 p.
- RICHARDS, P. W. Lowland tropical podzols and their vegetation. *Nature* 148(3774):129-131. 1941.
- ROLDAN, J. Fertility status of organic soils of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 43:255-267. 1959.
- RUHE, R. V. Erosion surfaces of the Central African interior high plateaus. *INEAC, Ser. Sci.* 59. Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1954.
- _____. Landscape evolution in the high Ituri, Belgian Congo. *INEAC, Ser. Sci.* 66. Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1956.
- _____. Stone lines in soils. *Soil Sci.* 87:223-231. 1959.
- SANCHEZ, P. A., y BUOL, S. W. Properties of some soils of the Amazon Basin of Peru. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:117-121. 1974.
- _____. Soils of the tropics and the world food crisis. *Science* 188:598-603. 1975.
- SEHGAL, J. L., y SYŚ, C. The soils of Punjab (India). I. Geographical conditions: II. Application of the Seventh Approximation to the classification of the soils of Punjab. Some problems, considerations and criteria. *Pédologie* 20:178-203, 244-267. 1970.
- SEGALEN, P. *Pédologie et développement: Techniques Rurales en Afrique* 10. Secretariat d'Etat aux Affaires Etrangères, Paris, 1970.
- SHERMAN, G. D., FOSTER, Z. C., y FUJIMOTO, C. K. Some of the properties of the ferruginous humid Latosols of the Hawaiian Islands. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 13:471-456. 1949.
- _____, y ALEXANDER, L. T. Characteristics and genesis of low humic Latosols. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 23(2):168-170. 1959.
- SIVARAJASINGHAM, S., ALEXANDER, L. T., CADY, J. G., y CLINE, M. G. Laterite. *Adv. Agron.* 14:1-60. 1962.

- SLAGER, S., y VAN SCHUYLENBORGH, J. Morphology and geochemistry of three clay soils of a tropical coastal plain in Surinam. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, Netherlands, 1970.
- SOIL SURVEY STAFF. Soil classification-A comprehensive system: Seventh approximation. U.S. Department of Agriculture, Washington, 1960.
- _____. Soil taxonomy (draft). Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, 1970.
- _____. Soil taxonomy. U.S.D.A. Agriculture Handbook 436, Soil Conservation Service, Washington D.C. 1975, 754 p.
- SOMBROEK, W. G. Amazon soils. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, Netherlands, 1966. 292 p.
- _____. Ancient levels of plinthisation in Northwest Nigeria. In D. H. Yaalon (ed.). Paleopedology: origin, nature, and dating of paleosols. Israel University Press. 1971. pp. 329-337.
- SRINIVASAN, T. R. et al. Placement of black soils of India in the comprehensive soil classification system-Sevenh Aproximation. J. Indian Soc. Soil Sci. 17:323-331. 1969.
- SYS, C. Caractérisation morphologique et physico-chimique de profils types de l'Afrique centrale. INEAC, HORS Ser. 1972. Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1972. 497 p.
- _____, VAN WAMBEKE, A., FRANKART, R. et al. La cartographie des sols au Congo, ses principes et ses methodes. INEAC, Ser. Tech. 66. Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1961.
- TAMURA, T., JACKSON, M. L., y SHERMAN, G. D. Mineral content of low humid, humic, and hydrol humic Latosols of Hawaii. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 17:343. 1953.
- TAY, T. H. Crop production on West Malaysian peat. Proc. Int. Peat Congr. (Helsinki) 4:75-88. 1972.
- THORP, J., y SMITH, G. D. Higher categories of soil classification: order, suborder, and great soil groups. Soil Sci. 67:117-126. 1949.
- TURENNE, J. F. Molecular weights of humid acids in podzols and ferralitic soils of the savannas of French Guyana and their evolution related to moisture. Trop. Agr. (Trinidad) 51:133-144. 1974.
- TYLER, E. J. Genesis of the soils with a detailed soil survey in the Upper Amazon Basin, Yurimaguas, Peru. Ph.D. Thesis, Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1975. 171 p.
- UNESCO. Soils and tropical weathering. UNESCO Natural Resources. Res. 11.1969.
- Van der Voorder, P. K. J. 1956. Podzolen in Suriname. Surinamse Landbouw 4:45-51. 1969.
- _____. Soil taxonomy. U.S.D.A. Agriculture Handbook 436, Soil Conservation Service, Washington D.C. 1975, 754 p.
- VAN WAMBEKE, A. Recent developments in the classification of soils of the tropics. Soil Sci. 104:309-313. 1967.
- _____. Recherches sur la mise en valeur agricole des sols acides des savanes arborees du Brazil. Pédologie 21:211-255. 1971.
- VEEN, A. W. L., SLAGER, S., y JONGMANS, A. G. A micromorphological study of four pleistocene alluvial soils of Surinam. Geoderma 6:81-100. 1971.
- VELAZQUEZ, A., y ORTEGA, E. Características físicas y químicas de algunos suelos del valle del Río Fuerte. Agr. Técnica (México) 2:400-406. 1968.

- VINE, H. Tropical soils. In C. C. Webster and P. N. Wilson (eds.). *Agriculture in the tropics*. Longmans, London, 1966. pp. 28-67.
- _____. Toposequences in soils of central Trinidad. *Trop. Agr. (Trinidad)* 51:109-120. 1974.
- WATSON, J. P. A soil catena on granite in southern Rhodesia. I. Field observations. II. Analytical data. *J. Soil Sci.* 15:238-257. 1964.
- _____. A soil catena on granite in southern Rhodesia. III. Clay minerals. IV. Heavy minerals. V. Soil evolution. *J. Soil Sci.* 16(1):158-169. 1965a.
- _____. Soil catenas. *Soils and Fert.* 28(4):307-310. 1965b.
- ZAMORA, C. Esquema de los Podzoles de la región selvática del Perú. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Lima, 1972a.
- _____. Regiones edáficas del Perú. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Lima, 1972b. 15 p.
- _____. Los suelos, uso y problemas de las tierras áridas del Perú. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Lima, 1974. 18 p.
- _____. Soils of the lowlands of Peru. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 46-60.
- ZEIN, A., y ROBINSON, G. H. A study of cracking in some Vertisols of the Sudan. *Geoderma* 5:229-241. 1971.

CAPITULO 3

PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

Las propiedades físicas del suelo tienen la responsabilidad del transporte del aire, del calor, del agua y de las sustancias solubles a través del suelo. Son ampliamente variables en los suelos tropicales, incluyendo algunas que se desconocen en la zona templada. Generalmente se considera que en su estado natural los Oxisoles y los Andepts tienen excelentes propiedades físicas. Muchos Ultisoles y Alfisoles son susceptibles a la erosión debidos a rápidos cambios de textura. Algunas propiedades físicas pueden cambiar y cambian, con prácticas de manejo. En los trópicos resecamientos severos y altas temperaturas en la superficie del suelo pueden estar seguidos por cambios abruptos debidos a tormentas de gran intensidad. Muchas de las propiedades físicas del suelo se deterioran con la labranza, haciendo al suelo menos permeable y más susceptible a pérdidas por escorrentía y erosión. La capacidad del suelo para retener agua y suministrarla a las plantas es uno de los principales factores limitantes en la agricultura tropical. El propósito de este capítulo es describir las diferencias en propiedades físicas entre los diferentes suelos tropicales y el manejo de estos parámetros.

PROFUNDIDAD DE ENRAIZAMIENTO

A menudo se ignora que la limitación física más obvia, es la insuficiente profundidad del suelo para un adecuado desarrollo de las raíces. Probablemente las barreras físicas para el desarrollo de las raíces son menos comunes en los trópicos que en la zona templada, debido a que los subsuelos por lo general son más profundos en las áreas altamente meteorizadas, en particular en Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles y algunos Inceptisoles. Por ejemplo en América del Sur cerca del 10% de los suelos están clasificados en el mapa de la FAO con contacto lítico o perilitico a 50 cm de profundidad o menos. Estos Litosoles cubren 140 millones de hectáreas, tal como lo muestra el Cuadro 2.9. Estudios del Instituto Internacional del Arroz (IRRI, 1964) mostraron que los rendimientos de arroz aumentaban linealmente conforme la profundidad efectiva del enraizamiento aumentaba de 10 a 40 cm.

Los subsuelos con poca capacidad de retener agua o con toxicidad de aluminio son a menudo barreras más comunes al desarrollo de las raíces que rocas superficiales o capas duras. En el Cuadro 7.10 se presenta una buena ilustración de un subsuelo con toxicidad de aluminio. Maíz cultivado en Oxisoles brasileños respondió notablemente a aplicaciones profundas de cal. Los rendimientos estuvieron correlacionados con el aumento en la profundidad de enraizamiento, lo cual estaba asociada al encalado.

Aunque poco puede hacerse para aumentar la profundidad de enraizamiento de Litosoles, la remoción de algunas barreras químicas a la profundidad de enraizamiento puede lograrse mediante manejo apropiado.

ESTRUCTURA DEL SUELO

La estructura del suelo es un concepto pobremente definido y cuantificado. El autor prefiere la definición de Brewer y Sleeman (1960): "el tamaño, la forma y el arreglo de las partículas primarias que forman partículas compuestas, y el tamaño, forma y arreglo de las partículas compuestas". Lo que se considera como buena estructura depende de la velocidad deseada con que el aire y el agua se mueven a través del suelo. Buena estructura para el cultivo de arroz anegado es la que se obtiene mediante el encharcamiento al destruir los agregados, para eliminar el movimiento descendente del agua. Para otros cultivos tropicales buena estructura es la que mantiene la estabilidad de los agregados después de cambios bruscos de humedad y bajo lluvia intensa (Pereira, 1956).

EL PROBLEMA DE LA MEDICION DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

No hay un parámetro individual que mida adecuadamente la estructura del suelo. Aunque la estabilidad de los agregados se usa a menudo como medida de la estructura del suelo, ésta es una medida empírica. Pereira (1955, 1956) cuando trabajaba en Africa Oriental, comparó varias técnicas de tamizado en seco y tamizado en húmedo para medir la estabilidad de agregados, con las determinaciones de porosidad, tasas de infiltración y una prueba de aceptación de la lluvia, en un intento por separar estructuras "buenas" y "malas" tal como las había observado visualmente en el campo. Todos los parámetros, excepto el último mencionado resultaron insatisfactorios. La principal causa del pobre comportamiento de las tasas de percolación fue la influencia de los canales hechos por raíces o por insectos. La prueba de aceptación de la lluvia de Pereira consistió en someter una muestra de volumen conocido a lluvias fuertes simuladas y medir la percolación así como la escorrentía. Sin embargo esta técnica no se ha usado en ninguna otra parte. Los investigadores de habla francesa

en Africa también tienen su propio sistema basado en el contenido de limo más arcilla, dividido entre la media de tres determinaciones de estabilidad de los agregados. La aplicación de esta técnica la discute Bayer (1972) en su revisión. Sin embargo, solamente se usa en países africanos de habla francesa.

Pruebas de campo usando infiltrómetros de doble anillo, con un número de repeticiones adecuadas, son quizás el modo más práctico de evaluar la estructura del suelo. Las mediciones de infiltración en el campo integran muchas de las variables físicas y proporcionan un volumen suficientemente grande de suelo para reducir la excesiva variabilidad causada por canales de insectos y raíces. Lugo López et al, (1968), aplicaron esta técnica a 740 suelos de Puerto Rico, y encontraron que las tasas de infiltración durante las 3 primeras horas dependía del contenido inicial de humedad del suelo. Después de 4 horas de infiltración las tasas se mantuvieron constantes y se aproximaron a la conductividad hidráulica del suelo saturado. En el Cuadro 3.1 aparece un resumen de sus resultados por orden de suelo. Las altas tasas de infiltración en Oxisoles, Ultisoles y Molisoles reflejan su buena estructura; el bajo ámbito de los Vertisoles indican su mayor contenido de arcillas 2:1 expandibles.

CUADRO No. 3.1. Ambitos de tasas de infiltración en suelos portorriqueños agrupados por órdenes de suelos (ámbitos de 57 tipos de suelo y 740 pruebas). (Fuente: Lugo López et al, 1968).

Orden	Tasa de infiltración (cm/hora)	
	Mínima	Máxima
Oxisoles	8,4	15,4
Ultisoles	7,4	23,6
Molisoles	8,2	19,5
Alfisoles	2,7	11,5
Inceptisoles	2,7	13,2
Entisoles	2,3	27,5
Vertisoles	0,1	9,5

ESTRUCTURA DE PRINCIPALES GRUPOS DE SUELOS

En general los Oxisoles y las familias oxídicas de Ultisoles, Alfisoles e Inceptisoles poseen excelente estructura en términos del concepto de Pereira. Ciertos Oxisoles pueden ararse con maquinaria pesada un día después de un aguacero fuerte con poca destrucción de agregados

estructurales. Oxisoles con más del 80% de arcilla se sienten como suelos francos o franco limosos cuando se trata de estimar la textura al tacto. Sin embargo si se continúa trabajando el suelo húmedo con los dedos, gradualmente se siente más arcilloso conforme los agregados se destruyen progresivamente.

La excelente estructura de estos suelos se debe a que las partículas primarias están muy unidas en gránulos del tamaño de granos de arena muy estables. Su alta estabilidad se debe al alto contenido de arcilla y a su cementación o revestimiento con óxidos amorfos de hierro y aluminio. Briones y Veración (1965), trabajando con suelos "rojos" en Filipinas encontraron que la estabilidad de agregados de estos suelos aumentaba linealmente con el contenido de arcilla hasta el 50%, lo cual se aprecia en la Fig. 3.1. Aunque es obvio, a menudo se olvida que se necesitan contenidos altos de arcilla para lograr estas propiedades estructurales deseables. Muchos Ultisoles y Oxisoles arenosos sufren fácilmente de compactación y erosión, debido a que no tienen suficiente arcilla para formar buenos gránulos estables.

La materia orgánica también está correlacionada con la estabilidad de los agregados de Oxisoles, ya que juega un papel aglutinador entre las partículas minerales primarias (Lugo-López y Juárez, 1959, Briones y Veración, 1965). Otros suelos altos en arcilla y materia orgánica no tienen esas excelentes propiedades físicas. Cuando los Oxisoles se someten a análisis de tamaño de partículas sin pretratamiento con ditionato de sodio para remover los óxidos de hierro libres, los contenidos de arena y limo son considerablemente más altos que cuando se remueven los óxidos de hierro. En un ejemplo que ofrecen Moura y Buol (1972) el contenido de arcilla de un Eustruox de Brasil aumentó de 40 a 83% cuando se removieron los óxidos de hierro. Aún en el subsuelo de este Eustruox que tiene alrededor del 0,6% de carbono orgánico, el contenido de arcilla aumentó del 49 al 65%. En general el verdadero contenido de arcilla de suelos como

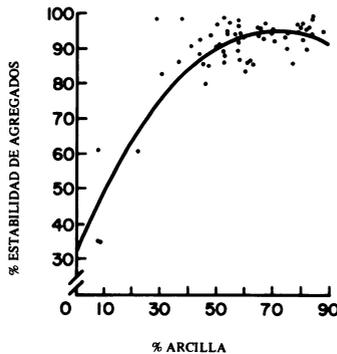


Fig. 3.1. Relación entre estabilidad de los agregados y contenido de arcilla en suelos "rojos" de Luzón. (Fuente: Briones y Veración, 1965).



Fig. 3.2. La excelente estructura granular de Oxisoles como este de Brasilia, Brasil, permite operaciones de labranza poco después de una lluvia fuerte.

éste puede estimarse multiplicando el contenido de agua a 15 bares por un factor de 2,5 (Soil Survey Staff, 1970).

Las generalizaciones anteriores no se mantienen en todo el orden de Oxisoles. Uehara et al., (1962) observaron diferentes características estructurales en Oxisoles hawaianos con contenidos similares de arcilla, materia orgánica y composición mineralógica (primariamente Caolinita y óxidos de hierro amorfos). Las diferencias en estabilidad de los agregados no podría correlacionarse con el contenido de Fe_2O_3 libre más allá del nivel del 5% de Fe_2O_3 . Cagauan y Uehara (1965) determinaron entonces que estas diferencias estaban asociadas con el grado de anisotropía (orientación de partículas de arcilla) en los agregados. Esta relación está ilustrada en la Fig. 3.3. Un sistema más orientado de partículas de caolinita cementada o revestida con óxidos de hierro proporcionan agregados más fuertes que con una menor orientación. El más alto grado de anisotropía ha sido encontrado en regímenes ústicos de humedad de suelo, con pluviosidad anual alta; los regímenes údicos presentan menos orientación de arcillas. Aparentemente los Oxisoles en climas constantemente húmedos no retienen una estructura tan fuerte como los climas que sufren marcadas fluctuaciones estacionales de humedad. Muchos Oxisoles en ambientes údicos pertenecen a los subgrupos tropéuticos porque la estructura tiende hacia el tipo blocoso. Por lo tanto, el contenido de arcilla, de materia orgánica, de óxidos de hierro libres, y la orienta-

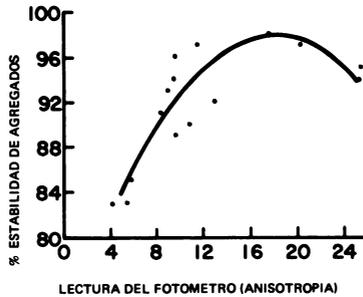


Fig. 3.3. Dependencia de la estabilidad de los agregados de la anisotropía del suelo en Oxisoles de Hawaii. (Fuente: Cagauan y Uehara, 1965).

ción de las partículas dentro de los agregados, son los principales factores asociados con la excelente estructura de los Oxisoles, pero existe variación en el grado de manifestación de esta estructura.

Los Ultisoles y Alfisoles en general tienen propiedades estructurales menos deseables por sus más bajos contenidos de arcilla en el Horizonte A y la ausencia de orientación de la arcilla dentro de los agregados blocosos. Sin embargo, las películas de arcilla que revisten a estos agregados son anisotrópicas y proporcionan una estabilidad agregada acrecentada, aunque pocas veces tan fuerte como en los Oxisoles. Las capas arables de textura más gruesa de los Ultisoles y Alfisoles presentan serios peligros de erosión y de compactación.

Los Andepts también tienen estructura extremadamente estable. El alto contenido de materia orgánica de estos suelos está íntimamente asociado con la alófana, mezcla amorfa de óxidos de sílice y aluminio. En los agregados son algo más grandes que los de los Oxisoles, pero su estabilidad es muy similar. Un estudio de 18 suelos de ceniza volcánica de Pasto, Colombia, mostró que el 81% de los agregados estables eran mayores de 2 mm de diámetro (Escobar et al., 1972).

Los Andepts generalmente tienen una densidad aparente baja (0,4 a 0,8 g/cc) debido a su alto contenido de materia orgánica y a su porosidad. La ausencia, o casi ausencia de minerales de silicatos laminares en muchos de estos suelos hacen que el análisis del tamaño de las partículas carezca de significado. Además estos suelos son muy difíciles de dispersar debido a una íntima asociación entre alófana y materia orgánica. Los intentos por estimar el contenido de arcilla multiplicando el contenido de agua a 15 bares por 2,5 fallaron con estos suelos (Alvarado y Buol, 1975).

Unos pocos suelos de ceniza volcánica esencialmente desprovistas de materiales cristalinos, tales como los Hydrandepts de Hawaii tienen propiedades tixotrópicas. Sobre un cierto nivel de compactación, el suelo repentinamente se convierte de sólido a líquido



Fig. 3.4. Superficie de un Alfisol arenoso en Ile-Ife, Nigeria, compactado por labranza y exposición, lo cual causó erosión laminar en una área plana.



Fig. 3.5. Las propiedades físicas deficientes de los Vertisoles, tales como éste en Kavado, Kenia, dificultan las operaciones de labranza.

(Swindale, 1964). Sin embargo, tal situación no ocurre en otros Andepts.

Las propiedades estructurales de otros suelos tropicales denominados por mineralogía de silicatos laminares, tales como los Vertisoles, Molisoles y Aridisoles, no son diferentes de lo conocido en la zona templada. En estos suelos, aumento de anisotropía significa menor estabilidad de agregados, ya que hay poco o nada de revestimientos de hierro que cementen estas partículas. La deficiente estabilidad agregada de los Vertisoles y suelos similares se debe a sus contenidos bajos de materia orgánica y niveles altos de sodio soluble (Lugo-López y Juárez, 1959; Lugo-López y Pérez, 1969). Los Vertisoles pueden labrarse adecuadamente sólo en ámbitos de humedad mucho más estrechos que otros suelos. Cuando están secos la contracción y el agrietamiento los quiebra en enormes terrones masivos de tal fuerza como que imposibilitan la mayoría de las prácticas de labranza. Cuando están mojados son suaves y pegajosos.

CAMBIOS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO CON EL CULTIVO

Generalmente se cree que en los trópicos la estructura del suelo se deteriora con la labranza. Aparte de la importancia localizada de la formación de plintita, una regular cantidad de evidencia indica que el grado de cambio estructural varía de acuerdo con las propiedades del suelo y las prácticas de manejo.

Grohmann (1960) estudió los efectos del cultivo intensivo en la distribución del tamaño de los agregados estables en agua, en un Oxisol y un Ultisol de Brasil. Los resultados, ilustrados en el Cuadro 3.2, indican que la labranza redujo el porcentaje de agregados mayores de 2 mm a más o menos la mitad en ambos suelos. Esto se reflejó

CUADRO No. 3.2. Efecto de cultivo intenso en un Oxisol y un Ultisol Brasileños, sobre la distribución por tamaño de los agregados tamizados en húmedo sin pretratamiento. (Porcentaje de distribución de agregados estables en agua). (Fuente: Grohmann, 1960).

Tamaño de agregados (mm)	Terra Rosa legítima (Oxisol)		Suelo Massapé (Ultisol)	
	Bosque	Cultivo	Pastura	Cultivo
> 2	84,2	48,2	80,8	36,0
2-1	1,1	13,2	7,2	11,1
1-0,5	0,5	13,0	3,9	6,6
0,5-0,21	0,5	15,1	4,2	12,5
< 0,21	13,7	10,5	3,9	33,8

en un aumento uniforme en los tamaños de otros agregados en el Oxisol, y en un drástico incremento en los agregados más pequeños pueden obstruir los poros grandes entre los agregados mayores y disminuir la infiltración.

Moura y Buol (1972) compararon los efectos de 15 años de siembra de cultivos anuales en un Eutrústrox brasileño, y observaron que las tasas de infiltración bajaron de 82 a 12 cm/hr con cultivo intensivo (Cuadro 3.3). La disminución de la infiltración estaba asociada con una marcada disminución en macroporos mayores de 0,05 mm de diámetro tanto en el Horizonte A como en el B, mientras que el número de microporos permanecía estable. Se consideró que la compactación producida por maquinaria pesada era la causa de la disminución de la macroporosidad. Moura y Buol también observaron que los contenidos de arcilla dispersable en agua disminuían en algunas partes del Horizonte B. Aparentemente algún movimiento de arcilla puede también haber reducido la porosidad. Una caída en la tasa de infiltración, de 82 a 15 cm/hr podría considerarse provechosa por cuanto reduciría las pérdidas por percolación y lixiviación.

Cunningham (1963) evaluó los efectos del desmonte de un suelo franco-arenoso de Ghana, probablemente un Alfisol. Parcelas sin cultivar fueron estudiadas por tres años bajo exposición total, parcial y no exposición por medio del uso de sombra artificial. Los resultados que se presentan en el Cuadro 3.4 indican una disminución violenta en porosidad no capilar del 15% al 10%, y una pequeña pero significativa disminución en porosidad total en el suelo descubierto. El porcentaje de agregados estables en agua mayores de 3 mm también disminuyó. Los efectos perjudiciales de la exposición también estuvieron asociados con una disminución en el contenido de limo y arcilla del 3% en el Horizonte A y un aumento del 6% en el Horizonte B. Los estudios de Cunningham sugieren que el movimiento de la

CUADRO No. 3.3. Efectos de la labranza en las propiedades físicas de un Eutrústrox de Minas Gerais, Brasil. (Fuente: adaptado de Moura Filho y Buol, 1972).

Propiedad del suelo	Desmontado recientemente	Con cultivos anuales por 15 años
Tasa de infiltración (cm/hr)	82	12
Poros > 0,05 mm en horizonte A (%)	25	11
Poros > 0,05 mm en horizonte B (%)	34	13
Poros > 0,05 mm en horizonte A (%)	33	32
Poros > 0,05 mm en horizonte B (%)	30	33
Arcilla dispensable en H ₂ O, Horizonte A (%)	13	77
Arcilla dispensable en H ₂ O, Horizonte B (%)	1	7

CUADRO No. 3.4. Cambios físicos observados en los 7,5 cm superiores después del desmonte de un Alfisol en la zona boscosa de Ghana. (Fuente: Cunningham, 1963).

Tratamiento	Porosidad capilar (%)	Porosidad no capilar (%)	Agregados estables en agua > 3 mm (%)
Sombra	37	14,7	55,3
50% exposición	35	16,4	50,2
100% exposición	32	10,1	48,7

arcilla redujo la porosidad al obstruir los macroporos y atribuyen esto a una caída marcada en el contenido de carbono orgánico por la exposición. Este tipo de evidencia no incluye los efectos de la labranza o la siembra de cultivos después de la exposición pero sugiere, conjuntamente con otros estudios, que en las capas arables de estos suelos arenosos pueden ocurrir cambios en porosidad con bastante rapidez.

Por lo tanto, los cambios en las propiedades estructurales después del desmonte dependen de las propiedades, tal como puede observarse al comparar la experiencia con Oxisoles y Alfisoles arenosos.

CONTROL Y CORRECCION DEL DETERIORO ESTRUCTURAL

La magnitud de los efectos posteriores del desmonte de Alfisoles y Ultisoles con texturas arenosas en la capa arable es un problema muy importante de manejo, el cual ha recibido considerable atención en Africa Occidental. La pluviosidad intensiva acompañada de un descenso rápido en el contenido de materia orgánica se consideran las causas de este problema.

La mejor práctica de manejo es evitar la compactación protegiendo la superficie del suelo con una cubierta protectora (mulch) o con estratos de plantas que disminuyan la energía de las gotas de lluvia así como la tasa de descomposición de la materia orgánica. Lal (1975) ha mostrado que las cubiertas protectoras también evitan las temperaturas excesivamente altas del suelo, aumentan el almacenamiento de agua en el suelo, disminuyen la infestación de malas hierbas, y evitan la escorrentía y la erosión en Alfisoles de textura arenosa de Nigeria. Se está acumulando evidencia de otras áreas tropicales con suelos similares con capa superficial de textura arenosa que sustentan los descubrimientos de Lal. En los sistemas tradicionales de

agricultura migratoria el suelo nunca se ara y está protegido con una cubierta de ceniza y posteriormente con una cubierta vegetal constante de cultivos intercalados. La aplicación de cubiertas protectoras (juntamente con labranza mínima o sin ella) puede evitar los efectos dañinos de la compactación.

En áreas donde no se practica la aplicación de cubiertas protectoras y de cultivos intercalados debido a que las operaciones agrícolas son en gran escala, se han hecho intentos por corregir la compactación del suelo por medio de una aradura profunda. En Senegal, con una labranza superficial con azadón, la densidad aparente de los primeros centímetros de suelo disminuyó de 1,6 a 1,4 g/cc, mientras que arando con tractor esos mismos valores se obtuvieron a una profundidad de 10 a 30 cm (Charreau y Nicou, 1971; Charreau, 1972). Charreau y sus colegas han obtenido aumentos significativos de rendimiento de parcelas sin labranza, sobre el cultivo superficial a mano, o con labranza profunda con tractor; los resultados se presentan en el Cuadro 3.5. En estos suelos las disminuciones de 0,1 g/cc en densidad aparente tienen un efecto benéfico en el desarrollo radicular y en el rendimiento de cultivos tales como sorgo y maní, tal como se aprecia en la Fig. 3.6.

CUADRO No. 3.5. Efectos de labranza superficial y aradura profunda en los rendimientos de varios cultivos en Alfisoles arenosos de Africa Occidental (ton/ha). (Fuente: Nicou, 1972).

Cultivos	Labranza manual (< 5 cm)		Aradura mecánica profunda (15–25 cm)	
	Sin labranza	Sin labranza	Sin labranza	Sin labranza
Mijo	1,40	1,74	1,31	1,60
Sorgo	1,93	2,42	1,52	1,88
Maíz	2,59	3,49	1,86	3,21
Arroz	1,16	2,36	1,62	2,80
Algodón	1,34	1,67	1,30	1,80
Maní	1,45	1,77	1,62	1,76

La densidad radicular en los 20-30 cm superiores estuvo estrechamente correlacionada con los rendimientos de granos en estos suelos (Nicou, 1972). En la Fig. 3.7 se aprecia una representación esquemática de este efecto en dos variedades de arroz cultivadas en condiciones de secano.

Estudios en suelos completamente diferentes sustentan las observaciones de Nicou de que cambios relativamente pequeños en densidad aparente tienen un marcado efecto en el desarrollo radicular. En un

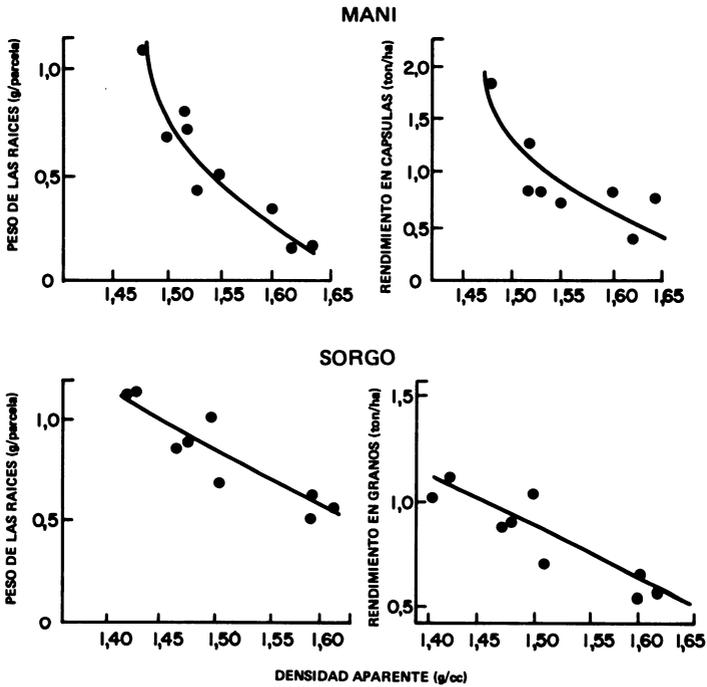


Fig. 3.6. Relación entre densidad aparente, desarrollo radical y rendimiento de maní y sorgo en Alfisoles arenosos de Bambey, Senegal. (Fuente: Charreau y Nicou, 1971).

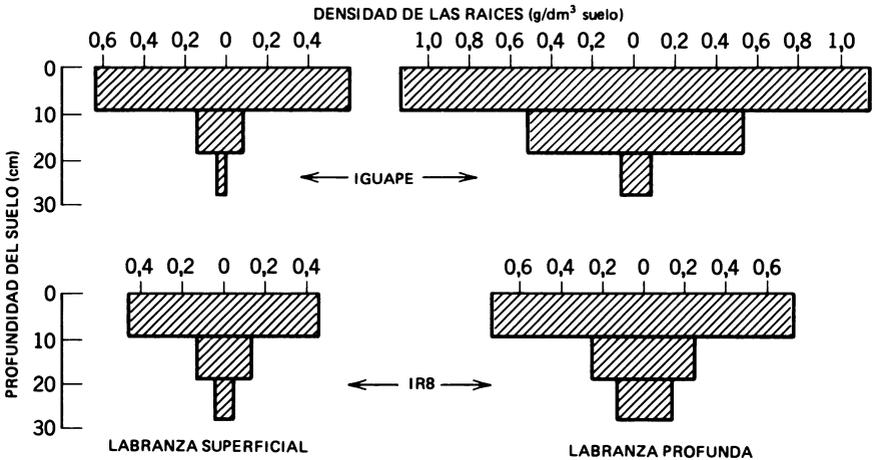


Fig. 3.7. Influencia de la profundidad de la aradura en la densidad de raíces de dos variedades de arroz en condiciones de secano en Senegal Sur. (Fuente: adaptado de Nicou et al, 1970).

estudio sobre el efecto de la compactación causada por tractor en el desarrollo radicular de caña de azúcar en Hawaii, Trowse y Humbert (1961) mostraron que pequeños cambios en densidad aparente hicieron que las raíces resultaran aplastadas, mientras que una compactación fuerte produjo verdadera restricción de raíces (Cuadro 3.6). Otro aspecto interesante del Cuadro 3.6 son los valores de densidad aparente ampliamente diferentes con los cuales se afectan las raíces de la caña de azúcar; estos valores van de 0,7 g/cc en un Andept a 1,3 en un Aquept.

CUADRO No. 3.6. Densidad aparente de diferentes suelos de Hawaii y el desarrollo de raíces de caña de azúcar. (Fuente: Trowse y Humbert, 1961).

Suelo	Densidad aparente (g/cc) con raicillas		
	de crecimiento normal	que se aplanaron	que estuvieron restringidas
Latosol húmico bajo (Ustox)	1,02	1,12	1,52
Hydrandept (Andept)	0,58	0,70	1,08
Hidromórfico gris (Aquept)	1,17	1,32	1,76

Además de las propiedades del suelo, el problema de la degeneración de la estructura del suelo es también una función del manejo.

RETENCION DEL AGUA EN EL SUELO

PATRONES DE RETENCION DE HUMEDAD

Las diferencias de estructura entre diferentes capas de suelos tropicales producen diferencias dramáticas en su capacidad de retención de agua. La Fig. 3.8 presenta las curvas clásicas de retención de humedad de suelos convencionales compuestos de arcilla de silicatos laminares con textura arenosa y arcillosos, un Oxisol arcilloso y un Andept. El suelo arenoso vacía sus poros de agua gravitacional a tensiones cercanas a 0,1 bares, mientras que el Vertisol arcilloso lo hace a 0,5 bares. El patrón de retención de humedad de un Oxisol arcilloso bien agregado es un híbrido de esos dos; retiene tanta agua como un suelo de arcilla de silicato laminar hasta aproximadamente 0,1 bares, pero drena sus macroporos a más o menos esa tensión, alcanzando de esa manera una "capacidad de campo" como las arenas. A tensiones más altas los Oxisoles arcillosos bien agregados retienen una mayor cantidad de agua que las arenas pero menos que las

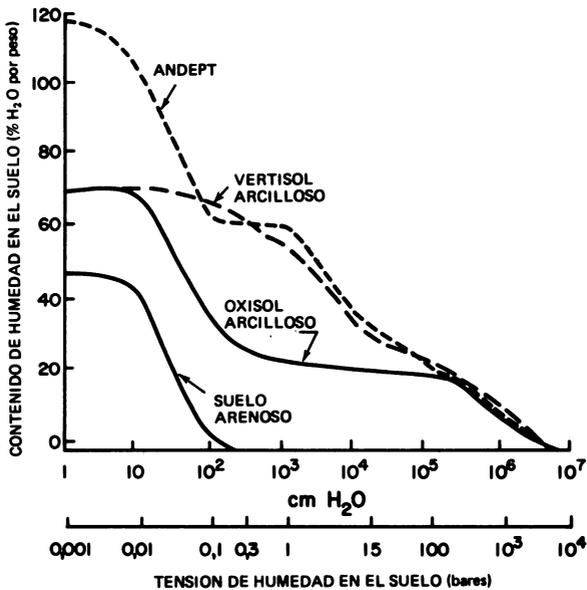


Fig. 3.8. Curvas de retención de humedad en un suelo arenoso, un Oxisol arcilloso, un Vertisol arcilloso y un Andept. (Fuente: compilado de datos sin publicar de Uehara y de Yamanaka, 1964).

arcillas de silicatos laminares de semejante contenido de arcilla. Estas familias oxídicas bien agregadas, por lo tanto, actúan como arenas en cuanto a movimiento del agua a tensiones bajas, pero retienen agua como arcillas a tensiones más altas. Por lo tanto tienen un ámbito más estrecho de agua disponible que otras arcillas. Mucho de estos suelos bien agregados tienen problemas de sequía completamente fuera de proporción a sus contenidos de arcilla y de agua. Los agregados pueden estar próximos a saturación, mientras que los poros entre los agregados están totalmente carentes de humedad disponible para los cultivos. Estas propiedades únicas son consecuencia de la distribución de tamaños de los agregados. La Fig. 3.9 muestra que el drenaje rápido a tensiones de humedad del suelo entre 0,01 y 0,1 bares se debe al predominio de agregados estables en agua del tamaño de arena en estos suelos. A tensiones de humedad mayores de 0,2 bares, el tamaño de los agregados no tiene importancia, ya que son los microporos dentro de los agregados los que se están drenando.

Los Andepts también poseen características únicas de retención de humedad. Retienen considerablemente más agua a tensiones bajas que otros suelos debido a su mayor porosidad y al mayor tamaño de los agregados estables en agua. Si el contenido de agua se calcula con base en el peso, las cifras pueden oscilar del 100 al 300% H₂O. Si se calcula con base en el volumen, su contenido de humedad a 0,3 bares

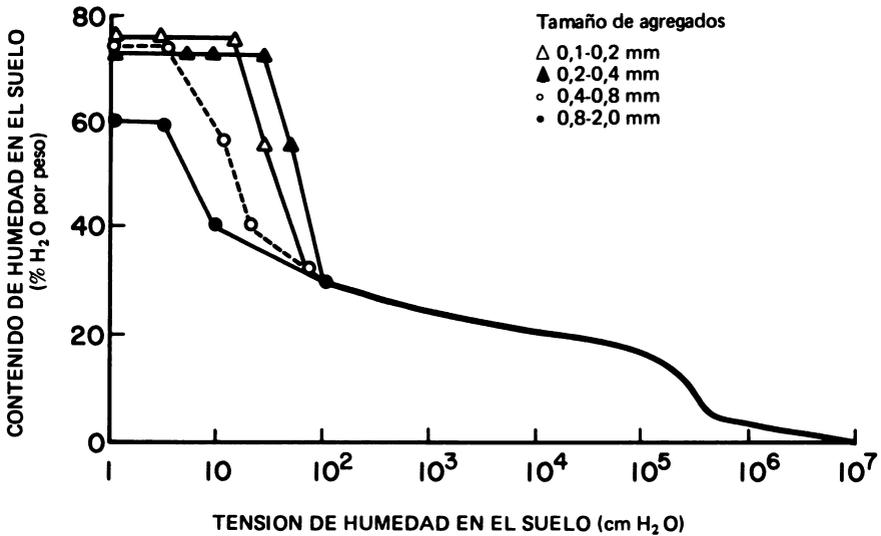


Fig. 3.9. Curvas de retención de humedad de diferentes fracciones de agregados de un Oxisol de Hawaii. (Fuente: Sharma y Uehara, 1965).

puede llegar a niveles tan altos como el 84%, y a 15 bares al 45% debido a su baja densidad aparente. Sin embargo los Andepts retienen más agua a una tensión dada que la mayoría de los otros suelos, tal como se aprecia en la Fig. 3.8. Aunque la obtención rápida de la “capacidad de campo” se debe al drenaje de los poros grandes entre los agregados grandes y muy estables, la alta macroporosidad entre los agregados hace que ellos retengan más agua (Forsythe et al, 1969; Swindale, 1969). Los Andepts generalmente tienen más agua aprovechable por las plantas que los Oxisoles debido a que los agregados de materia orgánica y alófana son más porosos que los agregados de Caolinita y óxido de hierro.

Los Ultisoles y los Alfisoles con revestimientos de sesquióxido parecen tener mejores propiedades de retención de humedad que los Oxisoles en general. Las grandes áreas de suelos tropicales con mineralogía convencional de silicatos laminares tienen curvas de retención de humedad bastante semejantes a las que presentan otros libros de texto basados en suelos de zona templada.

AGUA DISPONIBLE

La definición de agua disponible como diferencia entre el agua retenida a la capacidad de campo (0,3 bares) y el punto de marchitamiento permanente (15 bares) todavía se sigue usando por científicos de suelos de todas partes. El trabajo original de Briggs y Shantz

(1914) usando una planta (girasol) y un suelo franco, se ha convertido en un principio general. Sin embargo, hay muchas limitaciones importantes de este principio. El agua disponible no es aprovechable uniformemente en los suelos; las raíces no la extraen uniformemente, y el reabastecimiento del agua en las áreas agotadas puede ser lo bastante lento para causar marchitamiento ante la presencia de abundante agua. Por ejemplo, en ocasiones pueden verse plantas de arroz con hojas marchitas a pesar de estar en un terreno inundado. También hay diferencias bastante grandes en la capacidad para extraer agua a diferentes tensiones del suelo entre variedades de un mismo cultivo.

Un estudio de Maclean y Yager (1972) con varios Oxisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Entisoles, de Zambia, mostró que las tensiones de humedad del suelo entre 0,1 y 0,2 bares se aproximan a la verdadera capacidad de campo mejor que el valor clásico de 0,3 bares. Cuando el agua disponible se calculó como la diferencia entre 0,3 y 15 bares, el resultado fue una subestimación del ámbito del agua disponible del 35% en comparación con las verdaderas mediciones de campo en estos suelos.

La prueba original del girasol que estableció 15 bares como el punto de marchitez permanente es excepcionalmente precisa. Sharma y Uehara (1968) en Hawaii, y Wolf (1975) en Puerto Rico, también han mostrado muy poca diferencia en el contenido de agua entre 1 y 15 bares. Es posible que el ámbito del agua disponible esté entre 0,1 a 1 bares en estos suelos altamente agregados de los trópicos. Una serie de estudios *in situ* con Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico y Brasil llevaron a Wolf (1975) a recomendar que el ámbito del agua disponible de estos suelos se estimara como la diferencia entre 0,1 y 15 bares. El contenido de agua a 0,1 bares tiene que estimarse en muestras no perturbadas o directamente en el campo, mientras que el contenido de agua a 15 bares puede determinarse por medio de las técnicas convencionales de membranas de presión en el laboratorio. Wolf notó que el agua retenida entre 1 y 15 bares es menos aprovechable por los cultivos que la retenida entre 0,1 y 1 bares. La cantidad de agua disponible resultó igual en tres Oxisoles de texturas ampliamente diferentes.

El Cuadro 3.7 muestra algunos ámbitos representativos de agua disponible. Indiferentemente de su textura verdadera el ámbito del agua disponible en los Oxisoles es por lo general alrededor del 10%. Los Ultisoles generalmente tienen más agua disponible; los Andepts mucho más, y otros suelos se aproximan a las cantidades de la zona templada en función de su textura.

MOVIMIENTO DEL AGUA DEL SUELO

Existe muy poca información de campo acerca de los patrones del movimiento de agua en el suelo en los trópicos. Sin embargo, un

CUADRO No. 3.7. Ambitos de agua disponible en algunos suelos tropicales.

Suelo	Horizonte (cm)	Arcilla (%)	% H ₂ O (peso)		
			0,3 bares	1,5 bares	Diferencia
Haplustox (São Paulo, Brasil)	0-23	13	10,4	4,6	5,8
	23-62	14	10,0	4,7	5,3
	62-120	15	10,8	4,9	5,9
Haplustox (São Paulo, Brasil)	0-14	47	27,6	17,7	9,9
	14-41	54	26,4	19,2	7,2
	41-80	56	28,4	20,0	8,4
	80-120	54	29,0	20,8	8,2
Haplorthox (Puerto Rico)	0-15	77	41,8	31,9	9,9
	15-33	77	40,3	33,6	6,7
	33-51	84	43,7	35,7	8,0
	51-86	83	42,1	34,2	7,9
	86-117	70	35,1	30,0	5,1
Eustrtox (Minas Gerais, Brasil)	5-15	71	27,7	23,5	4,2
	20-30	72	27,9	24,8	3,1
	40-50	68	26,3	24,7	1,6
	60-70	70	26,6	24,7	1,9
	70-80	60	28,1	25,0	3,1
Tropohumult (Puerto Rico)	0-10	64	47,5	32,1	15,4
	10-23	69	39,8	31,4	8,4
	23-38	63	39,0	31,4	7,6
	38-64	48	36,7	30,1	6,6
	64-81	39	40,7	28,6	12,1
	81-114	33	39,6	28,0	11,6
Eutrandept (Hawaii)	0-5	—	47,1	29,9	17,2
	5-12	—	41,5	29,1	12,4
	12-20	—	46,1	32,8	13,3
	20-90	—	61,4	48,3	13,1
	90-100	—	77,4	59,2	18,2
Aquept (Filipinas)	0-20	61	48,5	29,9	18,3
	20-37	57	58,9	34,2	24,6
	37-58	50	47,0	36,3	20,7
Ustert (Puerto Rico)	0-18	52	32,4	20,4	12,0
	18-36	55	40,6	23,5	17,1
	36-58	62	40,8	27,1	13,7
	58-86	63	38,6	26,2	12,4

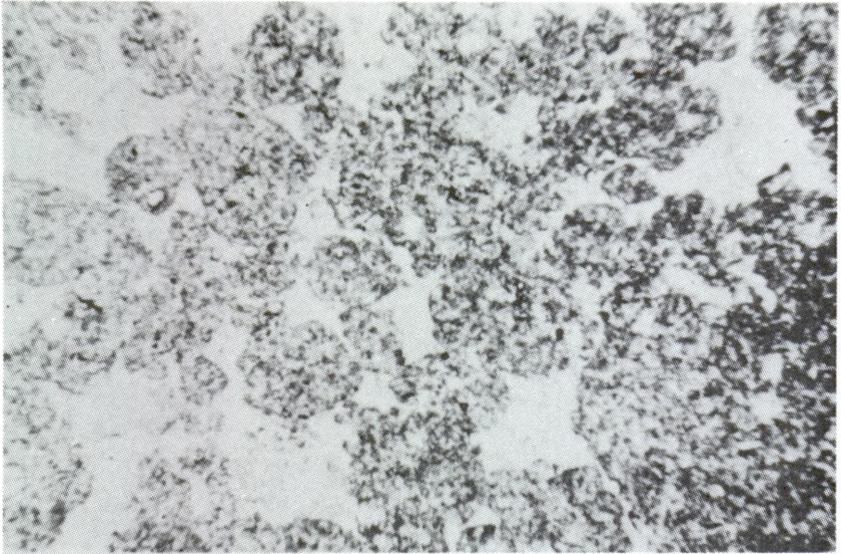


Fig. 3.10. Sección delgada de un horizonte Oxico en Sao Paulo, Brasil, mostrando la agregación de partículas de arcilla en granos fuertes del tamaño de un grano de arena. (Cortesía del Dr. Stanley Boul, North Carolina State University).

estudio de Wolf y Drosdoff (1974) en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico, han proporcionado información valiosa. Las tasas iniciales de infiltración de agua dependían del contenido de humedad en el suelo, por ejemplo, cuando los 30 cm superiores de un Ultisol contenían 40% de H_2O (0,08 bares) la tasa de infiltración era de 38 cm/hr. La tasa descendió a la mitad cuando el contenido de humedad subió al 44% (0,04 bares) y a 3 cm/hr cuando el suelo estaba esencialmente saturado con 50% de H_2O (0,000 bares). En general la tasa inicial de infiltración tuvo un promedio alrededor de 20 cm/hr en Ultisoles arcillosos, Oxisoles arenosos y Oxisoles arcillosos. Es fascinante darse cuenta que suelos con tal ámbito de textura tenían propiedades tan parecidas en movimiento del agua. Comparativamente, la tasa de infiltración de un suelo arcilloso Montmorilonítico promedia 10 cm/hr. La tasa más alta de los Ultisoles se atribuye al movimiento lateral del agua, principalmente a través de grietas existentes debido a una mineralogía mixta 1:1 y 2:1 y al pesado horizonte argílico inferior. La importancia de tales grietas en el movimiento del agua es grande. Posteriormente durante la estación lluviosa muchas de estas grietas se cierran y reducen el movimiento lateral del agua, lo cual es menos importante en Oxisoles, aunque esto puede ocurrir en capas más profundas.

ADAPTACION DE CULTIVOS A UN SUMINISTRO VARIABLE DE AGUA

Durante la mayoría de las estaciones lluviosas se presentan esporádicamente períodos sin lluvia de hasta varias semanas, causando severa escasez de agua en muchos cultivos. Estos períodos de sequía pueden ser causa de serias reducciones de rendimiento cuando ocurren durante etapas críticas del crecimiento. Con frecuencia solamente el horizonte A resulta afectado; los cultivos con raíces superficiales sufren mucho mientras que el subsuelo permanece relativamente bien provisto de agua. El desarrollo de las raíces en el subsuelo puede ser restringido debido a que altos niveles de aluminio intercambiable o bajos niveles de calcio pueden impedir que las raíces lleguen al lugar en donde hay abundancia de agua aprovechable.

Los resultados publicados en la tesis de Wolf (1975) en Oxisoles de Brasilia, muestran que en más de la mitad de los 30 años de los cuales existían datos de lluvia, habían ocurrido períodos de sequía severa de una semana o más durante la estación lluviosa. Debido al bajo ámbito de agua disponible de estos suelos y a su subsuelo con toxicidad de aluminio, el maíz comienza a marchitarse después de seis días sin lluvia. En la Fig. 3.11 se muestra un ejemplo del efecto de las sequías de corta duración en el almacenamiento de agua. Prácticas de manejo diseñadas para estimular un enraizamiento más profundo, tales como incorporación profunda de cal en suelos ácidos, disminuyen en forma práctica la escasez de agua.

La fecha de siembra y la duración del crecimiento del cultivo deberían manipularse de manera que las necesidades del cultivo coin-

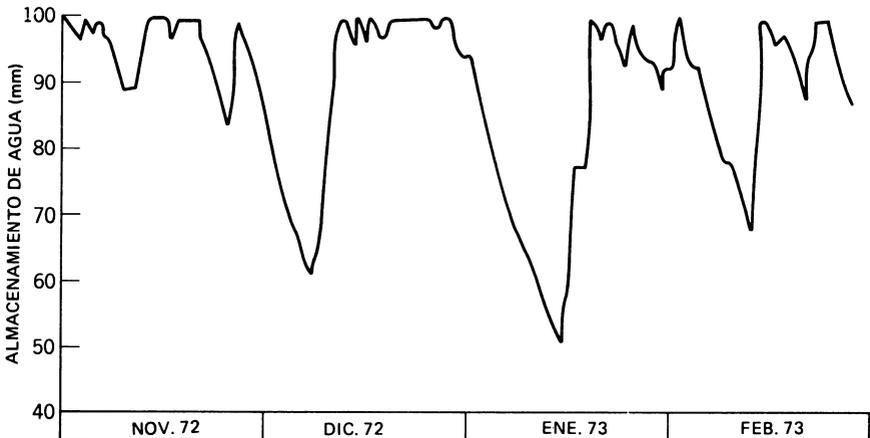


Fig. 3.11. Almacenamiento de humedad en el suelo computado durante los cuatro primeros meses de la estación lluviosa en un Oxisol arcilloso de Brasil. (Fuente: North Carolina State University, 1973).

cidan con el suministro probable de agua que se espera de la estación lluviosa. En ambientes ústicos el comienzo de la estación lluviosa está marcado con aguaceros intensos y esporádicos. Generalmente los agricultores esperan que las lluvias estén firmemente establecidas y los suelos suficientemente húmedos antes de iniciar sus operaciones de siembra. Un estudio de Kowal y Andrews (1973) en un Alfisol del norte de Nigeria ilustra un acoplamiento bastante preciso de prácticas de cultivo para una variedad de sorgo sembrada localmente, la cual consume alrededor de 700 mm de agua durante los 6 meses de su período de crecimiento, con una pluviosidad total de alrededor de 1.100 mm de la estación lluviosa que dura 5 meses, seguida de tiempo prácticamente sin lluvias durante el resto del año.

Kowal y Andrews reconocen 5 períodos diferentes, ilustrados en el Cuadro 3.8. El período I comprende las tres primeras semanas de lluvia, que son demasiado esporádicas para sembrar, pero suficientes para humedecer la capa arable para una preparación adecuada del suelo. Un exceso de 35 mm de agua del suelo se acumula durante este período. El período II comprende los dos primeros meses después de la siembra del sorgo. Una pluviosidad abundante (350 mm) recarga el perfil del suelo, ya que la evaporación del cultivo es apenas de 214 mm. El período III de 70 días de duración recarga aún más el perfil con un excedente acumulado de 309 mm. El cultivo comienza su fase reproductiva hacia mediados de este período, con poco peligro de escasez de agua. La napa fértica del valle también sube durante este período. El exceso de humedad se pierde en forma de escorrentía y hay erosión. El período IV comprende los últimos 60 días del crecimiento del cultivo, desde la floración a la cosecha. La estación seca definitivamente ha comenzado pero el cultivo no sufre falta de agua

CUADRO No. 3.8. Suministro de agua y uso por una variedad local de sorgo bajo condiciones de pluviosidad de Samaru, Nigeria (mm H₂O). (Fuente: adaptado de Kowal y Andrews, 1973).

Período	Lluvia	Evapo- transpiración	Exceso o déficit de agua del suelo	
			Período	Acumulativo
I. (Mayo 1–20)	76	41*	+ 35	+ 35
II. (Mayo 21–Julio 21)	350	214	+ 136	+ 171
III. (Julio 21–Setiembre 30)	607	298	+ 309	+ 480
IV. (Octubre 1–Noviembre 30)	36	155	– 119	+ 361
V. (Diciembre 1–Abril 30)	38	823**	– 785	– 424
TOTAL	1107	1531	– 424	

(*) Humedecimiento de la capa arable para la labranza.

(**) Solamente evaporación.

porque usa la cantidad almacenada. La alta radiación solar durante este período también contribuye al incremento del rendimiento y a facilitar la maduración. En este caso el período de crecimiento de 6 meses está sincronizado con los 4 meses de estación lluviosa. El período V consiste en el resto de la estación seca en que los excedentes de humedad se agotan por evaporación.

Se puede esperar que variedades de alto rendimiento y maduración precoz tengan problemas para adaptarse a este régimen de pluviosidad. Si se siembran al mismo tiempo madurarán durante el pico de la estación lluviosa, dificultando su recolección y produciendo granos enmohecidos de mala calidad. Si se siembran tardíamente para que su cosecha coincida con la de variedades locales, el suelo está muy mojado para la buena preparación de la tierra.

La variedad local de 6 meses tiene un potencial de rendimiento de aproximadamente 2,2 ton/ha de granos con fertilidad óptima y de 0,7 ton/ha sin fertilización. Los híbridos americanos de 100 días pueden producir de 3 a 5 ton/ha en Samaru cuando se les fertiliza. Si tales híbridos pudieran adaptarse al régimen de humedad, la producción podría incrementarse considerablemente. ¿Será posible? Los híbridos pueden sembrarse al mismo tiempo (20 de mayo) y cosecharse a mediados de agosto en el pico de la estación lluviosa. Probablemente producirían cerca de 2 a 3 ton/ha de grano de mala calidad no apto para consumo humano pero bueno para alimento de animales. Cortando los tallos a mano y haciendo una aplicación adicional de nitrógeno, podría hacerse un cultivo de retoños sin preparación de la tierra. Este cultivo de retoños (o soca) probablemente maduraría en 60 días y tendría el beneficio completo de la alta radiación solar y el amplio suministro de humedad en el suelo del período IV. Se podría cosechar un total de 8 a 9 ton/ha de grano de sorgo por año, o sea 10 veces el rendimiento promedio, con el cambio de variedad y fertilización, siempre que las fechas de las operaciones se adapten al régimen de humedad. Este ejemplo pone de manifiesto la forma en que puede lograrse una adaptación racional de nuevas variedades aparejadas con las realidades ambientales.

En los regímenes údicos de humedad del suelo, la variabilidad de la pluviosidad también es considerable y afecta el rendimiento de cultivos que dependen de las lluvias. Siembras mensuales de dos variedades de arroz de secano, una tradicional y una mejorada en Yurimaguas, Perú, durante un período de 18 meses, demostraron que los rendimientos altos estaban correlacionados con valores mensuales de lluvia de 150 mm o más durante los cuatro meses de crecimiento (Fig. 3.12). Cuando la distribución de las lluvias fue de ese orden, la variedad tradicional produjo de 2 a 3 ton/ha, mientras que la variedad mejorada duplicó esa cantidad. Bajo condiciones deficientes de distribución de la lluvia, la variedad tradicional tuvo un promedio de 0,5 a 0,8 ton/ha, y la variedad mejorada de 1,0 a 1,2 ton/ha. Este ejemplo pone de manifiesto la estrecha asociación entre el suministro

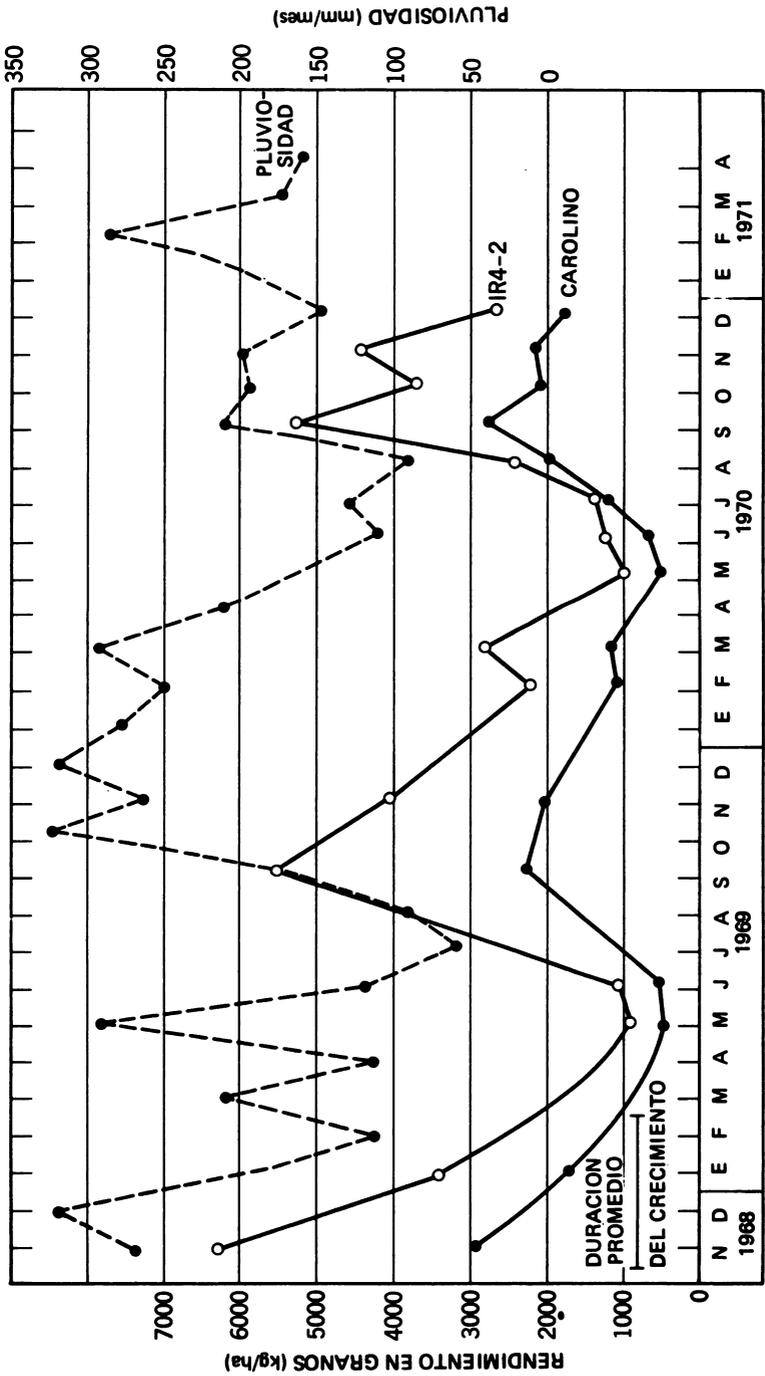


Fig. 3.12. Comportamiento de IR4-2, variedad de arroz de porte bajo, y Carolino, variedad local, como una función de la fecha de siembra bajo condiciones de secano y disponibilidad de lluvia en un Tropaquialf del Amazonas, en Perú. (Fuente: Sánchez, 1972).

de humedad del suelo y el rendimiento en regímenes údicos, cuando los otros factores se mantienen constantes, y la ventaja de usar una variedad mejorada, de porte bajo, adaptada a las condiciones locales. Varios estudios que se citan en las referencias proporcionan ejemplos adicionales del efecto de las fechas de siembra.

PERDIDAS POR LIXIVIACION

La lluvia en exceso de la capacidad de retención del suelo causa una serie de pérdidas de suelo y nutrientes por lixiviación, escorrentía y erosión. En el Cuadro 3.9 se resumen las estimaciones de pérdidas por lixiviación de unas pocas localidades tropicales en las cuales hay disponibilidad de datos. Las pérdidas varían considerablemente de acuerdo con el volumen anual de lixiviación, las propiedades del suelo y los cultivos plantados. Los tres ejemplos de Africa Occidental se obtuvieron con lisímetros *in situ* (Charreau, 1972). Estos muestran pérdidas progresivamente más altas de nutrientes de acuerdo con el aumento de pluviosidad anual. Las altas pérdidas por lixiviación de nitrógeno y potasio en la Costa de Marfil se deben probablemente al programa de fertilización en las plantaciones de banano, en comparación con las plantaciones de caucho que no se fertilizaban.

Los datos de las Filipinas se obtuvieron de un suelo mucho más joven cultivado con arroz inundado (Reyes et al., 1961). Los valores bajos de nitrógeno reflejan la ausencia de nitratos, fácilmente lixiviados, bajo condiciones de reducción. Las diferencias entre las dos tasas controladas de lixiviación sugieren una composición similar del lixiviado.

CUADRO No. 3.9. Pérdidas anuales promedio de lixiviación en varias áreas tropicales y localidades templadas. (Fuente: adaptado de Charreau (1972); Reyes et al., (1961); Suárez de Castro y Rodríguez (1958), y Buckman y Brady (1969).

Localidad	Suelo	Cobertura	Pluviosidad anual (mm)	Lixiviación anual (mm)	Elementos lixiviados (kg/ha)					
					N	P	K	Ca	Mg	S
Senegal	Ustalf	Cultivado	660	118	6	0,13	8	31	12	7
Costa de Marfil	Ultisol	Caucho	1569	845	79	2,90	63	31	40	—
Costa de Marfil	Ultisol	Banano	2040	828	235	1,20	24	256	113	—
Filipinas	Alfisol	Arroz inundado	2000	312	2	0,03	16	78	91	8
Filipinas	Alfisol	Arroz inundado	2000	1248	11	0,13	60	391	313	89
Colombia	Andept	Descubierto	2530	1771	249	0,23	202	776	232	—
Colombia	Andept	Pastura	2530	1450	204	0,21	163	878	251	—
Nueva York, EUA	Ochrept	Descubierto	810	623	62	Tr.	65	358	57	48
Nueva York	Ochrept	Cultivado	810	467	7	Tr.	51	207	40	39

El estudio de Colombia se llevó a cabo en un Andept altamente poroso con una precipitación anual muy alta, en donde se obtuvieron fuertes pérdidas de nitratos, calcio y magnesio (Suárez de Castro y Rodríguez, 1955, 1958). Para efectos de comparación, se incluyen datos de la zona templada sobre grandes pérdidas de calcio en un suelo joven. Cuando se comparan suelos descubiertos y cultivados, las pérdidas por lixiviación generalmente disminuyen debido a la absorción de nutrimentos por el cultivo. En general los principales elementos nutritivos que se pierden por lixiviación son calcio, magnesio, potasio y nitrógeno. Las pérdidas de fósforo son insignificantes, excepto en suelos sumamente arenosos. Las pérdidas de microelementos por lixiviación sólo se midieron en el estudio de Filipinas el cual dio los siguientes ámbitos: 19 a 144 g Fe/ha por año y 4 a 30 kg Mn/ha por año. Las condiciones de reducción probablemente favorecieron el movimiento del hierro y el manganeso en este suelo inundado.

Las altas pérdidas de calcio por lixiviación de que se informa en un Ultisol bien agregado de Costa de Marfil y en el Andept de Colombia, sugieren que el calcio aplicado como cal a la superficie del suelo puede moverse descendientemente y aumentar el nivel de bases del subsuelo. Morelli et al., (1971) estudiaron este fenómeno en un Andept de Costa Rica y mostraron que cuando se incorporó cal en la capa arable, el contenido de calcio del subsuelo aumentó al medirlo 3 1/2 años después. Dosis relativamente bajas de 2,8 ton/ha de cal aumentaron el pH de 4 a más de 5,5 en la capa de 20 a 60 cm con un aumento correspondiente de calcio intercambiable. Este movimiento descendente del calcio puede disminuir la saturación de aluminio y consecuentemente aumentar la profundidad efectiva de enraizamiento y absorción de agua en algunos suelos. Estos efectos tienen importancia práctica y se les debería dar cuidadosa atención en áreas de subsuelos ácidos y de suelos bien agregados.

ESCORRENTIA

Cuando el suelo se satura rápidamente, las lluvias muy intensas pueden ocasionar considerable escorrentía aun en pendientes suaves. Los valores dependerán de la porosidad del suelo, su contenido de humedad, la intensidad de la lluvia y la cobertura del suelo. El Cuadro 3.10 presenta los valores promedio de escorrentía en cuatro localidades de Africa Occidental en suelos de bosque, cultivado y descubierta. Los datos muestran que la cobertura del suelo es el factor predominante que afecta la erosión, a pesar de las diferencias en declive y pluviosidad. Los valores más bajos de la escorrentía en suelos cultivados que en los descubiertos, subrayan la necesidad de mantener una cobertura constante en estos Alfisoles arenosos o Ultisoles con estructura bastante deficiente.

CUADRO No. 3.10. Magnitud de escorrentía del suelo en cuatro localidades de Africa Occidental. (Fuente: Charreau, 1972).

Localidad	Declive (%)	Pluviosidad anual (mm)	Escorrentía (% de lluvias anuales)		
			Terreno en bosque	Terreno cultivado	Suelo descubierto
Ouagadougou, Alto Volta	0,5	850	2	2-32	40-60
Sefa, Senegal	1,2	1300	1	21	40
Bouaké, Senegal	4,0	1200	0,3	0,1-26	15-30
Abidjan, Costa de Marfil	7,0	2100	0,1	0,5-20	38

En un Andept bien agregado de Chinchiná, Colombia, Suárez de Castro y Rodríguez (1955, 1958) midieron una considerable escorrentía que alcanzaba al 62% de la lluvia anual en terrenos descubiertos con 22% de declive. El Cuadro 3.11 muestra que grandes cantidades de calcio y magnesio fueron arrastradas en el proceso. Cuando se establecieron pasturas o cafetales, la escorrentía, la erosión y las pérdidas por lixiviación disminuyeron drásticamente.

Barnett et al., (1972) evaluaron las pérdidas por escorrentía a causa de tempestades artificiales muy fuertes en Ultisoles e Inceptisoles escarpados de Puerto Rico. Se observó que en los Ultisoles por tener un mejor grado de agregación, la escorrentía y la remoción de

CUADRO No. 3.11. Efecto de sistemas de cultivo y prácticas de conservación en la erosión anual del suelo y elementos en la escorrentía en un Dystrandept de Chinchiná, Colombia: promedio 6 años de pluviosidad; 2775 mm. (Fuente: Suárez de Castro y Rodríguez, 1955, 1958 .)

Tratamiento	Declive (%)	Erosión (ton/ha)	Escorrentía (mm)	Nutrientos lixiviados (kg/ha)				
				N	P	K	Ca	Mg
Suelo descubierto								
labranza mensual	22	225,4	1730	25	0,98	24	238	152
Pastura	22	7,1	513	7	0,15	6	25	26
Cafetal joven	45	1,8	190	8	0,04	2	6	7
Cafetal joven con terrazas	45	0,2	410	4	0,14	4	8	9
Cafetal viejo sin prácticas de conservación de suelos	55	0,6	59	1	0,08	1	2	2

elementos nutritivos fueron considerablemente menores. Los arrastres de la escorrentía a menudo quedan depositados en los mismos campos lo que da por resultado que no hay pérdida neta para la finca, aunque se crean importantes efectos locales.

EROSION

A pesar de la más alta estabilidad de agregación de muchos suelos tropicales, el grado de erosión en los trópicos está alcanzando proporciones alarmantes. Por ejemplo, el valor promedio de la erosión del suelo en Africa y en América del Sur es alrededor de 7 ton/ha anuales mientras que en Europa es de 0,8 ton/ha. (Dudal, datos sin publicar). Las principales causas de la erosión son la deforestación, sobrepastoreo, y mal uso de prácticas de agricultura migratoria. La deforestación se debe en primer lugar a operaciones madereras y en menor grado a prácticas agrícolas. La erosión debido al descubrimiento del suelo en sistemas de agricultura migratoria solamente ocurre cuando la presión demográfica reduce el período de barbecho, o cuando los habitantes urbanos desplazados y no familiarizados con el sistema se ven forzados a practicar la agricultura migratoria, sin conocer como hacerlo. Tradicionalmente los sistemas de agricultura migratoria causan una mínima erosión del suelo, aún en pendientes fuertes y en áreas de muchas lluvias, debido al corto tiempo en que el suelo está realmente expuesto. Las pasturas sobrepastoreadas dan lugar a sitios descubiertos y a senderos compactados en los que eventualmente se forman cárcavas. Esta puede ser la forma primaria de erosión en áreas de sabana.

En muchas áreas montañosas donde la tierra arable es escasa, se han desarrollado y practicado por siglos, sistemas de conservación de suelo sumamente sofisticados. Las terrazas en los Andes del Perú, Luzón central, y otros lugares, son excelentes ejemplos de prácticas de conservación de suelo con sistemas tradicionales. Se puede generalizar con bastante seguridad que los sistemas tradicionales de manejo están bien acoplados para la conservación del suelo. Los problemas surgen cuando nuevas prácticas o nuevos colonos llegan al área o cuando los sistemas antiguos se destruyen por motivo de exceso de población.

En el Cuadro 3.12 se presentan estimaciones generales de la magnitud de las pérdidas por erosión en Africa Occidental. También se subraya la importancia de una cobertura continua del suelo. La magnitud de la erosión en Africa es probablemente la mayor de todas las regiones tropicales por los cambios de agricultura migratoria a cultivos permanentes en suelos fácilmente erosionables. Los investigadores están al tanto de este problema y lo manifiestan en los 78 trabajos sobre erosión presentados en dos conferencias interafricanas de suelos celebradas en Leopoldville, en 1954, y en Dalaba, en 1959.

CUADRO No. 3.12. Magnitud de pérdidas anuales por erosión del suelo en cuatro localidades de Africa Occidental (ton/Ha). Fuente: Charreau, 1972).

Localidad	Tierra en bosque	Tierra cultivada	Suelo descubierto
Ouagadougou, Alto Volta	0,1	0,6–8,0	10–20
Sefa, Senegal	0,2	7,3	21
Bouaké, Senegal	0,1	0,1–26	18–30
Abidjan, Costa de Marfil	0,03	0,1–90	108–170

Las prácticas de aradura profunda recomendadas para suelos arenosos de Senegal, conforme se ilustra en el Cuadro 3.5, bajó la erosión de 10 ton/ha por año con aradura superficial, a 3,7 ton/ha por año con aradura profunda, debido a un incremento en la porosidad del suelo y un mejor desarrollo de los cultivos (Charreau, 1972).

En Oxisoles del Estado de São Paulo, Brasil, Marques y Bertoni (1961) determinaron que las pérdidas anuales por erosión aumentaron de 8 a 16 ton/ha con aradura profunda en campos de algodón. La aparente contradicción entre estos dos informes se debe a las propiedades físicas drásticamente diferentes de los suelos: Oxisoles altamente agregados en el último caso, y Alfisoles arenosos deficientemente agregados en el anterior.

Los principios de conservación de suelos en los trópicos no son distintos a los que se han desarrollado en la zona templada. Sin embargo, la alta intensidad de algunos aguaceros y la menor disponibilidad de capital, hacen necesario algunas adaptaciones especiales. La siembra a contorno, en lugar de abajo a arriba de la pendiente, generalmente es una práctica factible y sana, pero difícil de transmitir a agricultores acostumbrados a arar de arriba a abajo en las pendientes. Otro principio bueno es mantener el suelo cubierto con residuos de cultivos o bajo cultivo, cuando se esperan fuertes lluvias. Los mayores problemas los constituyen el sobrepastoreo y la agricultura migratoria más allá de sus límites. Sin embargo, el establecimiento de cultivos arbóreos o de pasturas en pendientes escarpadas pocas veces necesitan de prácticas adicionales de conservación, tales como construcción de terrazas, en suelos bien agregados. La compactación por tractores pesados, particularmente en plantaciones de caña de azúcar, ha sido causa de serios problemas y es necesario desarrollar alternativas adecuadas. En áreas en donde recientemente se han introducido tractores, es común el excesivo uso de maquinaria para la preparación de la tierra. Estudios de Marques et al., (1961) y Primavesi (1964) en Brasil, Roose (1967, 1970) y Pereira et al., (1967) en Africa, Smith y Abruña (1955) en Puerto Rico, y Alles (1958) en Sri Lanka, proporcionan buena evidencia de los principios antes expresados.

Una práctica antigua en los trópicos es la no labranza o el mínimo de ella. En muchos sistemas de agricultura migratoria la única herramienta que se introduce en el suelo es un palo puntiagudo, llamado tacarpo macana, espeque coa. Sin embargo, las prácticas de fertilización generalmente necesitan cierto grado de labranza. Vicente-Chandler et al, (1966) compararon ciertas prácticas de labranza y no labranza con varios cultivos en tres suelos montañosos y escarpados de Puerto Rico. Las malas hierbas se controlaron con yerbicidas y se aplicaron fertilizantes y cal en las superficies de estos suelos porosos. Los resultados que se presentan en el Cuadro 3.13 no indican diferencia en rendimientos entre labranza y no labranza en cultivos de maíz, plátanos, camote, ñame, yautía, tabaco y caña de azúcar. Sin embargo la cosecha de las tuberosas obligan a serios disturbios del suelo.

CUADRO No. 3.13. Efectos de labranza en el rendimiento de cultivos de suelos muy inclinados de Puerto Rico central (ton/MS/ha). (Fuente: adaptado de Vicente Chandler et al, 1966).

Cultivo	Arcilla Catalina (Orthox)		Arcilla Múcura (Tropept)	
	Labrado	Sin labrar	Labrado	Sin labrar
Caña de azúcar	111	109	66*	80*
Maíz	3,92	4,14	6,72	8,16
Plátano	19,6	17,0	19,2	18,9
Camotes	10,1	9,5	—	—
Ñames	15,9	15,1	14,9	13,5
Yautía (taniers)	7,5	8,3	13,3	15,2
Tabaco, hojas curadas	1,74*	1,55*	1,92	1,85

(*) Diferencias estadísticamente significativas.

TEMPERATURA DEL SUELO

La temperatura del suelo pocas veces se considera como factor limitante en los trópicos. Tal como se menciona en el Capítulo 1, las temperaturas del suelo se aproximan a las temperaturas del aire a unos 50 cm de profundidad; éstas generalmente son adecuadas para la mayoría de los cultivos tropicales. Sin embargo, hay dos casos en que las temperaturas del suelo pueden ser limitantes: la temperatura excesivamente caliente en la capa arable de ciertos suelos arenosos y las temperaturas frías en las tierras altas tropicales.

CONTROL DE TEMPERATURAS EXCESIVAMENTE ALTAS

Grandes áreas de Africa Occidental están cubiertas por Alfisoles que tienen un alto contenido de arena y grava en la capa arable. La difusividad térmica de estos horizontes es mucho más baja que la de capas arables francas o arcillosas. Por lo tanto los suelos arenosos pueden retener grandes cantidades de calor, especialmente cuando están secos. Estudios en Ibadán, Nigeria, han mostrado que las temperaturas del suelo pueden llegar a 42°C a 5 cm de profundidad, y 38°C a 10 cm de profundidad en suelos arenosos cuando están descubiertos o recién sembrados (IITA, 1972; Lal, 1974; Lal et al, 1975). Se encontró que estas temperaturas inhiben la emergencia de los brotes de ñame y virtualmente detienen el crecimiento de plántulas de maíz y soya cuando las temperaturas de la capa arable fueron de 35 a 38°C. Además, Lal y sus colegas observaron que la absorción de nutrimentos, el traslado de ellos y la absorción de agua disminuyeron severamente por esas altas temperaturas. La temperatura de la capa arable disminuye conforme los cultivos crecen y se forma el follaje. La solución a este problema consiste en cubrir el suelo con paja o residuos de un cultivo anterior. La colocación de una cubierta protectora (mulch) baja rápidamente la temperatura del suelo hasta una profundidad de 20 cm, tal como indica la Fig. 3.13. Las parcelas sin cubierta protectora tenían temperaturas altas supraóptimas hasta una profundidad de 20 cm durante las primeras etapas del crecimiento. Conforme los cultivos desarrollan su follaje, la temperatura del suelo disminuye; pero si ocurre una sequía severa en la parte final del cultivo, la cubierta protectora puede evitar temperaturas excesivamente altas (Lal, 1974). La cubierta protectora también aumenta el almacenamiento de humedad del suelo durante toda la estación lluviosa, tal como indica la Fig. 3.13. Estos aumentos fueron equivalentes a alrededor del 8 al 12% de las lluvias recibidas. En este experimento el efecto general de la cubierta protectora fue el aumento del rendimiento de maíz de 3,6 a 5,4 ton/ha y disminuyó el desarrollo de las malezas a una tercera parte del que se observó en las parcelas sin cubierta protectora (Lal, 1974).

Hay evidencia que sugiere que estos resultados con cubiertas protectoras debieran aplicarse a un ámbito más amplio de suelos. Cuando un bosque se desmonta, la temperatura de la capa arable del suelo sube unos 7 a 11°C (Sánchez, 1973), debido a la mayor radiación solar que llega a la superficie del suelo al quedar expuesto. Estas temperaturas más altas indudablemente aceleran las tasas de descomposición de la materia orgánica, y en algunos casos afectan adversamente la estructura del suelo (Cunningham, 1963). Nada se gana y mucho se puede perder manteniendo la superficie del suelo descubierta. Por lo tanto, el control de la temperatura del suelo debiera

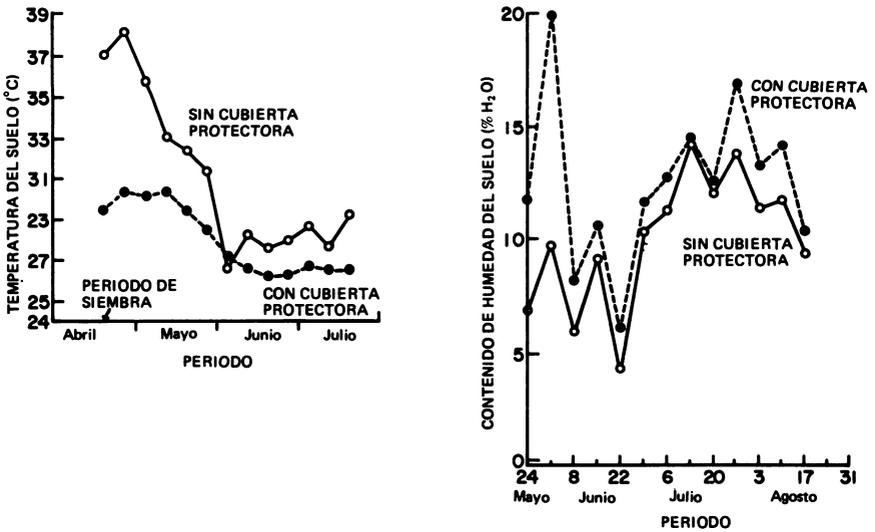


Fig. 3.13. Efecto de cubierta protectora (mulch) en la temperatura del suelo a las 15 hrs a 5 cm de profundidad (izquierda) y en el almacenamiento de humedad del suelo (derecha) en los 10 cm superiores de un Alfisol arenoso de Ibadán, Nigeria. (Fuente: IITA, 1972).

constituir un componente importante de los sistemas de manejo de suelos. Esto puede lograrse mediante el mantenimiento de una capa vegetal sobre el suelo durante todo el año, y colocando cubiertas protectoras durante los períodos de exposición. Las ventajas de cubiertas protectoras utilizando residuos de cultivos son muchas: temperaturas de suelo más bajas; mayor almacenamiento de agua en el suelo; menos problemas de malas hierbas; menor deterioro estructural a consecuencia del impacto de las lluvias; disminución en las tasas de descomposición de la materia orgánica; y hasta aumentos uniformes de elementos nutritivos causados por la descomposición de materiales orgánicos.

CONTROL DE TEMPERATURAS FRIAS DEL SUELO

En las tierras altas tropicales con regímenes isotérmicos o isoméricos de temperatura del suelo, muchos cultivos aunque adaptados al clima sufren de limitaciones a causa de bajas temperaturas del suelo particularmente durante los períodos lluviosos. Un suelo mojado también tiene una baja difusividad térmica. Cuando ciertos cultivos se siembran con temperaturas cercanas a su límite inferior, la temperatura del suelo se torna factor limitante. Tal es el caso con algunas



Fig. 3.14.



Fig. 3.14 y 3.15. Efecto beneficioso de poner una cubierta protectora durante el crecimiento inicial de maíz en un Ultisol arenoso de Yurimaguas, Perú. La Fig. 3.14 presenta un campo desnudo, y la Fig. 13.15 el efecto de la cubierta protectora en una parcela adyacente.

plantaciones de piña en Oxisoles en las tierras de Hawaii. Las temperaturas bajas de suelo ejercen una influencia negativa sobre la absorción de nutrimentos y en consecuencia un período de crecimiento más largo y rendimientos más bajos (Ravoo et al, 1973).

La solución a este problema es también la colocación de cubiertas protectoras, pero en esta ocasión de material plástico transparente. A diferencia del caso de temperaturas excesivamente altas una cubierta de plástico transparente es una barrera al vapor que aumenta notoriamente la temperatura del suelo con un efecto de invernadero. Aunque costosas, ciertas técnicas desarrolladas en Hawaii permiten que la cubierta dure por un tiempo suficientemente largo para hacerla rentable. Las cubiertas transparentes de polietileno también han aumentado las temperaturas medias y disminuido las necesidades de riego de papas en el norte de India, donde temperaturas bajas a finales del otoño limitan el crecimiento de este cultivo. Grewal y Singh (1974) observaron que el rendimiento de papas aumentó de 14 a 20 ton/ha cuando se usó una cubierta de esa clase. Este aumento estaba correlacionado positivamente con el ascenso de las temperaturas mínimas debido a la cubierta de polietileno. Respuestas más bajas de rendimiento y aumento de la temperatura del suelo se obtuvieron con una cubierta protectora de paja, la cual puede usarse en caso de que no se disponga de plástico transparente.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El manejo de las propiedades físicas del suelo en los trópicos es altamente específico. Debería apartarse la atención de la exagerada preocupación relativa al endurecimiento de plintita en la superficie del suelo, y enfocarla a las peculiaridades físicas y específicas de tres grupos de suelos tropicales.
2. Los suelos altamente agregados (Oxisoles, Andepts, y familias oxídicas de otros órdenes) presentan grandes ventajas y serias desventajas. Las ventajas estriban que los agregados muy estables revestidos con óxidos y materia orgánica, extienden el período de las operaciones de labranza por cuanto drenan el agua gravitacional en forma muy parecida a las arenas. La fuerte agregación también disminuye los problemas de compactación y de erosión del suelo. Las desventajas estriban en el bajo ámbito de humedad disponible de estos suelos a pesar de su capacidad para retener grandes cantidades de agua a altas tensiones dentro de los agregados. Muchos Oxisoles son en realidad suelos secos y su lixiviación es considerable. Sus propiedades únicas requieren que el ámbito de humedad disponible se redefina como 0,1 bar para la "capacidad de campo" hasta aproximadamente 1 bar como límite superior.

3. Las grandes áreas de Ultisoles y Alfisoles con textura arenosa en la capa arable y suelos similares, presentan una serie completamente distinta de problemas de manejo. La exposición y el cultivo pueden conducir fácilmente a una seria compactación del suelo, escorrentía y erosión. El ámbito de humedad apropiado para la labranza es más estrecho que en el caso del primer grupo. En el lado positivo, muchos de estos suelos retienen más agua disponible en sus perfiles que los Oxisoles arcillosos, particularmente cuando el horizonte argílico es de textura arcillosa. La protección de la superficie del suelo con cubiertas protectoras y/o un follaje continuo de un cultivo constituye la mejor alternativa de manejo. En áreas escarpadas es casi esencial no hacer labranza, o un mínimo de ella. En ciertas áreas expuestas y compactas, se necesita una aradura profunda para aumentar la porosidad, estimular el desarrollo de las raíces, y por ende, aumentar los rendimientos de los cultivos.
4. El tercer gran grupo de suelos tropicales para los propósitos de este capítulo consiste de suelos francos a arcillosos con mineralogía de silicatos laminares y otras propiedades similares a las de suelos de la zona templada. Estos incluyen otros Alfisoles, Ultisoles e Inceptisoles, así como suelos de los otros órdenes. Entre ellos los Vertisoles presentan limitaciones físicas especiales debidas a severa contracción e hinchamiento, y el más estrecho ámbito de humedad apropiado para operaciones de labranza. Las prácticas de manejo desarrolladas en la región templada para tales suelos deberían aplicarse con un mínimo de ajuste a los suelos tropicales con mineralogía de silicatos laminares.
5. La tensión de agua durante la estación lluviosa o durante todo el año en ambientes údicos es común debido a los períodos cortos de sequía. Cuando los subsuelos ácidos impiden un desarrollo profundo de las raíces, la disminución de la acidez del subsuelo puede permitir a las raíces sacar la humedad almacenada en el subsuelo.
6. Muchos sistemas tradicionales de cultivo presentan una excelente sincronización entre los requisitos de humedad y el suministro de humedad disponible del suelo. Cuando se intenta incrementar los rendimientos por medio de la introducción de variedades de alto rendimiento con diferente duración del crecimiento, el éxito dependerá del grado en que las nuevas prácticas culturales engranen con el régimen de humedad.
7. La temperatura del suelo, ya sea muy alta o muy baja, es un factor limitante en ciertas áreas de los trópicos. La solución consiste generalmente en colocar cubiertas de protección

(mulch) de varios materiales, según se deba disminuir o aumentar la temperatura. En suelos recientemente desmontados para cultivarlos, el manejo de la temperatura del suelo por medio de cubiertas de paja o manteniendo el follaje de un cultivo tanto tiempo como sea posible, es muy importante para neutralizar los aumentos de temperatura en la capa arable debido a la exposición y las correspondientes tasas más rápidas de descomposición de la materia orgánica, lo cual puede reducir las tasas de infiltración en suelos con bajo contenido de óxidos de hierro y aluminio. Además, las cubiertas protectoras (mulch) reducen el consumo de agua y la necesidad de controlar malas hierbas y a menudo aumentan los rendimientos. Esta práctica merece seria consideración en la mayoría de los sistemas de manejo de suelos tropicales.

8. El manejo de las propiedades físicas del suelo es por lo general de una prioridad más baja que el manejo de las propiedades químicas en los sistemas agrícolas tradicionales. Casi todos los agricultores prefieren suelos de más alta fertilidad natural porque los problemas físicos les preocupan poco cuando solamente usan un palo para sembrar y la cosecha de los cultivos de raíces son los que disturbán el suelo. Conforme los sistemas de manejo se vuelven más intensivos y mecanizados, y los problemas de fertilidad se solucionan económicamente por medio de fertilización y encalado, las propiedades físicas del suelo que limitan el uso eficiente de la maquinaria se convierten más importantes.

REFERENCIAS

- ABRUÑA, F., y LOZANO, J. Effect of season of the year on yields of 13 varieties of rice growing in the humid region of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 58:11-18. 1974.
- AKEHURST, B. C. y SREEDHARAN, A. Time of planting—a brief review of experimental work in Tanganyika, 1956-1962. *East Afr. Agr. For. J.* 30:189-201. 1965.
- ALLES, W. S. Some studies on runoff and infiltration. *Trop. Agriculturalist (Ceylon)* 114:197-206. 1958.
- ALVARADO, A., y BUOL, S. W. Toposequence relationships of Dystrandepts in Costa Rica. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39:932-937. 1975.
- BALLICO, P. Considerazioni sull andamento delle temperature del terreno in regioni temperate e tropicale. *Rev. Agr. Subtrop. e Trop. (Italy)* 65:315-329. 1971.
- BARNETT, A. P., CARRECKER, J. R., ABRUÑA, F. et al. Soil and nutrient losses in runoff with selected cropping treatments in tropical soils. *Agron. J.* 64:391-395. 1972.
- BAVER, L. D. Physical properties of soils. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 50-62.

- BERTONI, J., y PASTANA, F. I. Relação chuvas perdas por erosão em diferentes tipos de solo. *Bragantia* 23:3-11. 1964.
- BERTRAND, R. Response de l'enracinement du riz de plateau aux caractères physique et chimique du sol. *Agron. Tropicale (France)* 26:376-386. 1971.
- BHUSHAN, C. S., y GHILDYAL, B. P. Influence of shape of implements on soil structure. *Indian J. Agr. Sci.* 41(9):744-751. 1971.
- BISWAS, T. D., JAIN, B. L., y BAINS, S. S. Response of wheat and potato to physical properties of the soils obtained under different crop rotations. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:475-485. 1971.
- BRAMS, E., y WEIKEL, R. Maize as a second crop for the uplands of Sierra Leone, West Africa. *Prairie View A & M Coll. Bull.* 1. *Prairie View, Tex.* 1971.
- BREWER, R., y SLEEMAN, J. R. Soil structure and fabric: their definition and description. *J. Soil Sci.* 11:172-185. 1960.
- BRIGGS, L. J., y SHANTZ, H. L. Relative water requirements of plants. *J. Agr. Res.* 3:1-63. 1914.
- BRIONES, A. A., y CAGAUAN, B. G. Jr. Moisture retention of some paddy soils in Laguna. *Philipp. Agr.* 48:61-81. 1964.
- _____, y VERACION, J. G. Aggregate stability of some red soils of Luzon. *Philipp. Agr.* 49:153-167. 1965.
- BUCKMAN, H. O., y BRADY, N. C. *The nature and properties of soils.* Macmillan, New York, 1969.
- CAGAUAN, B. y UEHARA, G. Soil anistropy in relation to aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29:198-200. 1965.
- CHAN, P. Y., y ARLIDGE, E. Z. Moisture relations in some Mauritius soils. *Annual Report.* 1970. Mauritius Sugar Industry Research Institute, 1971. pp. 74-78.
- CHARREAU, C. Problemes poses par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *Agron. Tropicale (France)* 27:905-929. 1972.
- _____, y NICOU, R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale seche Ouest-Africane et sis incidence agronomiques. *Agron. Tropicale (France)* 26:209-255, 903-978, 1183-1247. 1971.
- CRAUFURD, R. Q. The relationship between sowing date, latitude, yield and duration of rice. *Trop. Agr. (Trinidad)* 41:213-224. 1964.
- CUNNINGHAM, R. K. The effect of clearing a tropical forest soil. *J. Soil Sci.* 14:334-345. 1963.
- DeDATTA, S. K., y ZARATE, P. M. Environmental conditions affecting growth characteristics, nitrogen response, and grain yield of tropical rice. *Biometeorology* 4:71-89. 1970.
- DESPANDE, T. L., GREENLAND, D. J., y QUICK, J. P. Changes in soil properties associated with the removal of iron and aluminum oxides. *J. Soil Sci.* 19:108-122. 1968.
- DOWKAR, B. D. A note on the reduction of yield of Taboran maize by late planting. *East Afr. Agr. For. J.* 30:33-34. 1964.
- DRINKOW, R. Some net-radiation and soil thermal diffusivity measurements for the Port Moresby area. *Papua New Guinea Agr. J.* 21:112-117. 1970.
- EL-SWAFY, S. A. Structural changes in tropical soils due to anions in irrigation water. *Soil Sci.* 115:64-72. 1973.
- ESCOBAR, G., JURADO, R., y GUERRERO, R. Propiedades físicas de algunos suelos derivados de ceniza volcánica del Altiplano de Pasto. Nariño, Colombia. *Turrialba* 22:338-346. 1972.

- FARBROTHER, H. G. Field behavior of Gezira clay under irrigation. *Cotton Growing Rev.* 49:1-27. 1972.
- FERNANDES, B. E., y SYKES, J. D. Capacidade de campo e retenção de agua em tres solos de Minas Gerais. *Ceres* 15:1-39. 1968.
- FORSYTHE, W. y DIAZ-ROMEY, R. La densidad aparente del suelo y la interpretación del análisis de laboratorio para el campo. *Turrialba* 19:128-131. 1969.
- _____, GAVANDE, S. A., y GONZALEZ M. Physical properties of soils derived from volcanic ash. In Panel on soils derived from volcanic ash in Latin America. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969.
- _____, y VAZQUEZ, O. Effect of air drying on the water retention curves of disturbed samples of three Costa Rican soils derived from volcanic ash. *Turrialba* 23:200-207. 1973.
- GAVANDE, S. A. Water retention characteristics of some Costa Rican soils. *Turrialba* 18:34-38. 1968.
- GLOVER, J. The relationship between total seasonal rainfall and maize yields in the Kenya highlands. *J. Agr. Sci.* 49:285. 1967.
- GODEFROY, J., MULLER, M., y ROOSE, E. Estimation des partes par lixiviation des elements fertilisants dans un sol bananerie de basse Cote D'Ivoire. *Fruits* 25(6):403-420. 1970.
- GODOY, O. P. Influencia de epoca de sementeira na produção das variedades de arroz. *Rev. Agr. (Brazil)* 36:171-177. 1961.
- GOEDERT, W. y BEATTY, M. T. Caracterização de grummosolos no sudoeste do Rio Grande do Sul. I. Propiedades físicas adversas ao uso. *Pesq. Agropec. Bras.* 6:91-102. 1971.
- GROHMANN, F. Distribuição de tamanho de poros em tres tipos de solos do Estado de São Paulo. *Bragantia* 19:319-328. 1960.
- GOLDSON, J. R. The effect of time of planting on maize yields. *East Afr. Agr. For. J.* 29:160-163. 1963.
- GRAY, R. W. The effect of yield of the time of planting of maize in southwest Kenya. *East Afr. Agr. For. J.* 35:291-298. 1970.
- GREEN, R. E., FOX, R. L., y WILLIAMS, D. D. F. Soil properties determine water availability to crops. *Hawaii Farm Sci.* 14:6-9. 1965.
- GREWAL, S. S., y SINGH, N. T. Effect of organic mulches on the hydrothermal regime of soil and growth of potato crop in northern India. *Plant and Soil* 40:33-47. 1974.
- HANNA, L. W. The effect of water availability on tea yields in Uganda. *J. Appl. Ecol.* 8:791-813. 1971.
- HARDY, F. Cultivation properties of tropical red soils. *Emp. J. Exptal. Agr.* 1:103-112. 1933.
- _____. Soil crumb. *Trop. Agr. (Trinidad)* 13:143-145. 1936.
- _____, y DERRAUGH, L. F. The water and air relations of some Trinidad sugarcane soils. *Trop. Agr. (Trinidad)* 24:76-87, 111-121. 1947.
- HARIDASAN, M. y CHIBBER, R. K. Effect of physical and chemical properties on the erodibility of some soils of the Malwa Plateau. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 19:293-298. 1971.
- HAZRA, C. R., RAY, S. B., y BISWAS, R. D. Effect of stored soil moisture reserves through conservation practices and supplemental irrigation on wheat yields under dryland farming conditions. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 21:9-22. 1973.

- HOLFORD, I. C. R. Effect of rainfall on the yield of groundnuts in Fiji. *Trop. Agr. (Trinidad)* 48:171-175. 1971.
- IITA. Farming systems program. Annual Report. International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, 1972.
- IRRI. Annual Report. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1964. p. 190.
- JAQUOT, M. Quelques observations sur l'influence du milieu dans des cultures de riz pluvial. *Agron. Tropicale (France)* 27:1007-1002. 1972.
- JOSHI, S. N., y KABARIA, M. M. Effect of rainfall distribution on the yield of groundnuts. *Indian J. Agr. Sci.* 42:681-685. 1972.
- KALMA, J. D. The annual course of air temperatures and near surface soil temperature in a tropical savanna environment. *Agr. Meteorol.* 8:293-303. 1971.
- KOLARKAR, A. S., y SINGH, N. Moisture storage capacities in relation to textural composition of western Rajasthan soil. *Ann. Arid Zone* 10:29-32. 1971.
- KOWAL, J. Some physical properties of soils at Samaru, Zaria, Nigeria. I. Physical status of the soil. II. Storage of water and crop use. *Nigerian Agr. J.* 5:13-20, 6:18-29. 1968-1969.
- _____. The hydrology of a small catchment basin at Samaru, Nigeria. III. Assessment of surface runoff under varied land management and vegetation cover. IV. Assessment of soil erosion under varied land management and vegetation cover. *Nigerian Agr. J.* 7:120-147. 1970.
- _____. Effect of an exceptional storm on soil conservation at Samaru. *Samaru Res. Bull.* 141. 1972.
- _____, y ANDREWS, D. F. Pattern of water availability and water requirement for grain sorghum production at Samaru, Nigeria. *Trop. Agr. (Trinidad)* 50:89-100. 1973.
- KRISHMAN, A. y KUSHWAHA, R. S. Analyses of soil temperature in the arid zone of India. *Agr. Meteorol.* 10:55-64. 1972.
- LAL, R. Effects of seedbed preparation and time of planting maize in Western Nigeria. *Exptal. Agr.* 9:303-314. 1973.
- _____. Soil temperature, soil moisture, and maize yields from mulched and unmulched tropical soils. *Plant and Soil* 40:129-143. 1974.
- _____. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. *IITA Tech. Bull.* 1. 1975.
- _____, KANG, B. T., MOORMAN, F. R., JUO, A. S. R., y MOOMAW, J. C. Soil management problems and possible solution in western Nigeria. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 372-408.
- LUGO LOPEZ, M. A. Pore size and bulk density as mechanical soil factors impeding root development. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 44:40-44. 1950.
- _____. Functional relationships between moisture at several equilibrium points and the clay contents of tropical soils. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 35:66-70. 1951.
- _____. Moisture relationships of Puerto Rican soils. *Univ. Puerto Rico Agr. Exp. Sta. Tech. Paper* 9. 1953.
- _____, y ACEVEDO, G. Effects of tractor traffic compaction on the physical properties of an irrigated soil in southwestern Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 40:235-244. 1956.

- LUGO LOPEZ, M. A., y JUAREZ, Jr., J. Evaluation of the effects of organic matter and other soil characteristics upon the aggregate stability of some tropical soils. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 43:268-272. 1959.
- _____, JUAREZ, Jr., J., y BONNET, J. A. Relative infiltration rates of Puerto Rico soils. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 52:233-240. 1968.
- _____, y PEREZ-ESCOLAR, R. Functional relationships between the contents of particles smaller than 0.5 mm and 0.002 mm in size and the plasticity index of soils. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 52:343-350. 1968.
- _____, y PEREZ-ESCOLAR, R. A mathematical approach to evaluating the influence of various factors on the stability of aggregates in Vertisols. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 53:57-60. 1969.
- _____, y CAPIEL, M. Seasonal changes in soil and air temperatures at three locations in Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:307-317. 1972.
- MacLEAN, A. H., y YAGER, T. V. Available water capacities in Zambian soils in relation to pressure plate measurements and particle size and analysis. *Soil Sci.* 133:23-29. 1972.
- MARQUES, J. Q. A. et al. Perdas por erosão no Estado de São Paulo. *Bragantia* 20:1144-1181. 1961.
- _____, y BERTONI, J. Sistemas de preparo do solo em relação a produção e à erosão. *Bragantia* 20:403-459. 1961.
- McCOWN, R. L. Available water storage in a range of soils in northeastern Queensland. *Austr. J. Exptl. Agr. Anim. Husb.* 11:343-348. 1971.
- _____. An evaluation of the influence of available water storage capacity on growth season length and yield of tropical pastures using simple water balance models. *Agr. Meteorol.* 11:53-64. 1973.
- MOHR, E. C. J., VAN BAREN, F. A., y VAN SCHUYLERBORGH, J. *Tropical Soils*. 3rd ed. Van Hoeve, The Hague, 1972. pp. 5-13.
- MORELLI, M., IGUE, K., y FUENTES, R. Effect of liming on the exchange complex and on the movement of calcium and magnesium. *Turrialba* 21:317-322. 1971.
- MOURA FILHO, W., y BUOL, S. W. Studies of a Latosol Roxo (Eustrustox) in Brazil. *Experientiae* 13:201-234. 1972.
- MUKHTAR, O. M. A., SWOBODA, A. R., y GODFREY, C. L. The effects of sodium and calcium chlorides on the structural stability of two Vertisols: Gezira clay from Sudan, Africa, and Houston Black Clay from Texas, USA. *Soil Sci.* 118:109-120. 1974.
- NICOU, R. Sythese des etudes de physique du sol réalisés par l'IRAT en Afrique tropicale seche. Seminar on tropical soils research. International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, 1972. 19 p.
- _____, SEGUY, M., y HADAD, G. Comparison d'enracinement de quatre varietes de riz pluvial en presence on absence de travail du sol. *Agr. Tropicale (France)* 25:639-659. 1970.
- NYANDAT, N. N. Gypsum as improved of the permeability of grumosol (Typic Pellustert) in the Kano Plains of Kenya. *East Afr. Agr. For. J.* 38:1-7. 1972.
- PEREIRA, H. C. The assessment of structure in tropical soils. *J. Agr. Sci.* 45:401-410. 1955.
- _____. A rainfall test for structure of the tropical soils. *J. Soil Sci.* 7:68-74. 1956.
- _____, CHENERY, E. M., y MILLS, W. R. The transient effects of grasses on the structure of tropical soils. *Emp. J. Exptl. Agr.* 22:148-160. 1954.
- _____, HOSEGOOD, P. H., y DAGG, M. Effects of tied ridges, terraces and grass leys on a lateritic soil in Kenya. *Exptl. Agr.* 3:89-98. 1967.

- PEREZ-ESCOLAR, R., y LUGO-LOPEZ, M. A. The nature of aggregation in tropical soils of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 52:227-233. 1968.
- _____, y _____. Availability of moisture in aggregates of various sizes in a typical Ultisol and a typical Oxisol of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 53:113-117. 1969.
- PIDGEON, J. D. The measurement and prediction of available water capacity of ferralitic soils in Uganda. *J. Soil Sci.* 23:431-441. 1972.
- PLA, I., y CAMPERO, G. Algunas propiedades de la estructura de suelos de los Llanos Occidentales de Venezuela y su relación con características del suelo. *Agron. Trop. (Venezuela)* 21:433-437. 1971.
- PRIHAR, S. S., CHOWDHARY, M. R., y VARGHESE, T. M. Effect of post-planting loosening of unstable soil on the anatomy of corn roots. *Plant and Soil* 35:57-63. 1971.
- PRIMAVESI, A. Factors responsible for low yields of sugarcane in old cultivated "Terra Roxa Estruturada" soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:579-580. 1964.
- RAVOOF, A. A., SANFORD, W. G., y YOUNG, H. Y., y SILVA, J. A. Effects of root temperature and nitrogen carriers on total nitrogen uptake by pineapple. *Agron. Abs.* 1973:194. 1973.
- REYES, E. D., GALVEZ, N. C., y NAZARENO, N. B. Lysimeter studies of Lipa clay loam grown to paddy rice. I. Leaching losses of some soil constituents. *Philipp. Agr.* 45:246-257. 1961.
- ROBERTS, R. C. Structural relationships in a lateritic profile. *Amer. Soil Survey Assoc. Bull.* 14. 1933. pp. 88-90.
- ROOSE, E. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agron. Tropicale (France)* 21:123-152. 1967a.
- _____. Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures. In *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux (Tanarive)*, 1967b. pp. 1385-1404.
- _____. The relative importance of erosion, latent and vertical drainage on present pedogenesis of ferralitic soil of central Ivory Coast, *Cah. ORSTOM, Sér. Pedol.* 8:469-482. 1970.
- _____, y GODEFROY, J. Lessivage des éléments fertilisants en banane. *Fruits* 23:580-584. 1968.
- _____, y BERTRAND, R. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. *Agron. Tropicale (France)* 26:1270-1283. 1971.
- SAMUELS, G. The influence of time of planting on food production in Puerto Rico. *Proc. Caribbean Food Crops Soc.* 5:128-133. 1967.
- _____. Influence of water excess or deficiency on leaf nutrient content and plant growth of sugarcane and other crops. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:81-84. 1972.
- SANCHEZ, P. A. Técnicas agronómicas para optimizar el potencial productivo de las nuevas variedades de arroz en América Latina. In *Políticas arroceras en América Latina*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1972. pp. 27-43.
- _____. Soil management under shifting cultivation. In P. A. Sánchez (ed.). *A review of soils research in tropical Latin America*. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 46-48.
- SEMB, G. y GARBERG, P. K. Some effects of planting date and nitrogen fertilizer in maize. *East Afr. Agr. For. J.* 34:371-379. 1969.
- SHARMA, M. L., y UEHARA, G. Influence of soil structure on water relations in Low Humic Latosols. I. Water retention. II. Water movement. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32:765-774. 1968.

- SHARMA, L. R., VERMA, G. P., y RUSSELL, M. B. Effect of vaying bulk density of surface and subsurface soil on wheat growth under field conditions. *Int. Symp. Soil Fert. Eval. Proc. (New Delhi)* 1:519-527. 1971.
- SILVA, S., VICENTE-CHANDLER, J., ABRUNA, F., y RODRIGUEZ, J. A. Effect of season and yields of intensively managed soybeans under tropical conditions. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:365-370. 1972.
- SINGH, N. T., y DHALIWAL, G. S. Effect of soil temperature on seedling emergence of different crops. *Plant and Soil* 37:441-444. 1972.
- SINGH, Y. P., y GUPTA, R. N. Fertilizer response to physical effects of soil compaction. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 19:345-352. 1971.
- SMITH, G. D., NEWHALL, F., ROBINSON, L. H., y SWANSON, D. Soil temperature regimes-their characteristics and predictability. U.S. Dept. Agr. Soil Conserv. Service Tech. Paper 144. 1964. 14 p.
- SMITH, R. M., y CERNUDA, C. F. Some characteristics of the macrostructure of tropical soils in Puerto Rico. *Soil Sci.* 73:183-192. 1952.
- _____, y ABRUÑA, F. Soil and water conservation research in Puerto Rico, 1938-1947. *Univ. Puerto Rico Agr. Exp. Sta. Bull.* 124. 1953.
- SOIL SURVEY STAFF. Soil taxonomy (Draft). U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1970.
- SUAREZ DE CASTRO, F., y RODRIGUEZ, A. Pérdidas por erosión de elementos nutritivos bajo diferentes cubiertas vegetales y con varias prácticas de conservación de suelos. *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bol. Tec.* 14. 1955.
- _____, y _____. Movimiento del agua en el suelo. Estudios con lisímetros monolíticos. *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bol. Tec.* 2(19):1-19. 1-19. 1958.
- SURI, J. B., y SINGH, H. Effect of dates of sowing and nitrogen levels on the growth and yield of wheat variety Sonora 64. *Indian J. Agron.* 15:106-111. 1970.
- SWINDALE, L. D. The properties of soil derived from volcanic ash. *FAO World Soil Resources Rept.* 14. 1964. pp. 82-87.
- _____. Properties of soils derived from volcanic ash. In *Panel on soils derived from volcanic ash in Latin America. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969.* pp. B10.1-B10.8.
- TOMAR, V. S., y GHILDYAL, B. P. Short note on the wilting phenomenon in crop plants. *Agron. J.* 65:514-515. 1973.
- TROUSE, A. C., Jr., y HUMBERT, R. P. Some effects of soil compaction on the development of sugarcane roots. *Soil Sci.* 91:208-217. 1961.
- TURNER, D. J. An investigation into the causes of low yields in late planted maize. *East Afr. Agr. For. J.* 31:249-260. 1966.
- UEHARA, G., FLACH, K. W., y SHERMAN, G. D. Genesis and micromorphology of certain structural soil types in Hawaiian Latosols and their significance to agricultural practices. In *Trans. Comm. IV and V. Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*, 1962. pp. 264-270.
- VAN WAMBEKE, A. Soil studies in tropical Latin America. III. Soil physics. National Research Council, Committee on Tropical Soils, Washington, 1970. 65 p.
- VICENTE-CHANDLER, J. et al. High crop yields produced with or without tillage on three typical soils of the humid mountains of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 50:146-150. 1966.
- VIZIER, J. F. Changes in the apparent specific volume of hydromorphic soils of Chad. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.* 9:133-145. 1971.

- WANG, C. D., LEE, K. Y., YANG, C. C. et al. The effect of asphalt barriers on the moisture and nutrient retention in rice and sugarcane fields in sand soils. Taiwan Sugar Exp. Sta. Res. Rept. 5. 1969.
- WILD, A. Nitrate leaching under bare fallow at a site in northern Nigeria. *J. Soil Sci.* 23:315-324. 1972.
- WILKINSON, G. E. The infiltration of water into Samaru soils. Samaru Agr. Newsletter 12:81-83. 1970.
- WINKLER, E. I. G., y GOEDERT, W. J. Características hídricas de dois solos de Pelotas. *Río Grande do Sul. Pesq. Agropec. Bras.* 7:1-14. 1972.
- WOLF, J. M. Soil-water relations in Oxisols of Puerto Rico and Brazil. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical Latin America.* North Carolina State University, Raleigh, 1975a. pp. 145-153.
- _____. Water constraints to soil productivity in Central Brazil. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y. 1975b. 199 p.
- _____, y DROSDOFF, M. Soil water studies on Oxisols and Ultisols of Puerto Rico. *Agron. Mimeo* 74-22. Cornell University, Ithaca, N.Y. 1974. 58 p.
- WOOD, H. B. Land use effects on the hydrologic characteristics of some Hawaiian soils. *J. Soil Water Conserv.* 26:158-160. 1971.
- YAMANAKA, K. Physical properties. In *Volcanic ash soils in Japan.* Ministry of Agriculture and Forestry, Tokyo, 1964. pp. 69-91.
- ZEIN, A. y ROBINSON, G. H. A study in cracking in some Vertisols of the Sudan. *Geoderma* 5:229-241. 1971.

CAPITULO 4

MINERALOGIA DE ARCILLA Y PROCESOS DE INTERCAMBIO IONICO

La naturaleza y las propiedades de los minerales de arcilla son más variadas en los trópicos que en la zona templada. Asimismo, están menos definidas y comprendidas que en la parte norte de la zona templada donde se ha desarrollado la mayor parte de los conceptos de intercambio iónico. Los estudios de mineralogía e intercambio de iones se han limitado mayormente a suelos con altos contenidos de silicatos laminares como Caolinita, Montmorilonita e Illita. Tales conceptos son aplicables directamente a los suelos tropicales altos en estos minerales, pero no a muchos otros.

Hasta el año 1940 las arcillas del suelo se consideraban amorfas (Mattson y Wicklander, 1940). Con la llegada de la espectrometría de rayos-X esa idea fue descartada rápidamente y los mineralogistas se concentraron en el estudio de las diversas formas cristalinas. Para este propósito las arcillas del suelo tenían que tratarse con una serie de reactivos para eliminar el material inorgánico no cristalino. Estos materiales eran literalmente arrojados en las pilas de los laboratorios e ignorados. Sin embargo, científicos que trabajaban con suelos altos en sesquióxidos se dieron cuenta de que estos materiales amorfos juegan un papel muy importante en las propiedades de intercambio iónico de suelos actualmente clasificados como Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles y Andepts (Tanada, 1952; Sherman et al., 1964).

A fines de la década de los 50s, Coleman y sus colegas demostraron la presencia de minerales amorfos o semicristalinos entre los látices de los silicatos laminares en los Ultisoles del sur de Estados Unidos. Este hallazgo condujo a cambios fundamentales en el conocimiento de la química de suelos ácidos (Coleman y Thomas, 1967). También fuera de los trópicos, científicos neozelandeses y japoneses llevaron a cabo estudios intensivos sobre la naturaleza de la alófana, un mineral amorfo de silicato de aluminio, dominante en los Andepts. Científicos hawaianos con el uso de microscopios electrónicos de alta resolución han demostrado la existencia de revestimientos de óxidos amorfos sobre muchas arcillas de silicatos laminares (Jones y Uehara, 1973). Una serie casi completamente nueva de relaciones químicas

del suelo se ha aplicado a suelos que presentan tales revestimientos (Uehara et al., 1972; Uehara y Keng, 1975).

El propósito de este capítulo es resumir las reacciones predominantes de intercambio iónico que tienen lugar en los suelos tropicales, relacionados con grupos de suelos específicos, y describir algunas prácticas de manejo que mejoran su capacidad de intercambio catiónico.

Los principales minerales de arcilla que se encuentran en los trópicos pueden dividirse en dos grupos principales: los que tienen carga permanente (una capacidad de intercambio de cationes constante), y los que tienen carga variable.

Los minerales con carga permanente son los silicatos laminares 2:1 (Montmorilonita, Vermiculita, Illita), los silicatos laminares 2:2 (cloritas), y en menor grado los silicatos laminares 1:1 (Caolinita, Halosita). Los últimos conocimientos han sido resumidos en una revisión de Zelazny y Calhoun (1971). Los minerales de carga variable son los interlaminares (mezclas de minerales 2:1 en hidróxidos de hierro y aluminio), varias clases de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, tanto cristalinos como amorfos y alófanos. En el Cuadro 4.1 aparecen las clases de óxidos que se encuentran extensivamente en los trópicos.

CUADRO No. 4.1. Especies iónica, amorfa y cristalina de minerales de óxidos en suelos tropicales húmedos. (Fuente: Sherman et al, 1964).

Iónica	Amorfa		Cristalina	
	Gel	Criptocristalina	Primaria	Envejecida o deshidratada
Al^{3+} OH^-	$Al(OH)_3$?	$Al(OH)_3$	$AlOOH$
Fe^{3+} OH^-	$Fe(OH)_3$	$Fe(OH)_3$	gibbsita $FeOOH$	boemita Fe_2O_3
Fe^{2+} OH^-	$Fe(OH)_2$	$Fe(OH)_2$	goetita $FeOOH$	hematita Fe_2O_3
Si^{4+} OH^-	SiO_2 silica gel	Opal silcrete	lepidocrocita SiO_2 cuarzo	magnetita

En el Cuadro 4.2 se ilustran, por medio de ejemplos, las características de carga de minerales puros del suelo. La capacidad total de intercambio catiónico (CIC) se refiere al valor determinado mediante la extracción con $BaCl_2$ -trietanolamina tamponada a pH 8,2. La CIC permanente es la suma de cationes extraídos por sales no tamponadas, tales como KCl normal con el verdadero pH del suelo. Normalmente se le cita como "CIC efectiva". La CIC efectiva no es una

CUADRO No. 4.2. Características de carga de algunos minerales de arcilla separados de suelos de Kenia (meq/100 g arcilla). (Fuente: Mehlich y Theisen (sin publicar).

Material	Capacidad de intercambio de cationes			Capacidad de intercambio de aniones
	Permanente	Variable	Total	
Montmorilonita	112	6	118	1
Vermiculita	85	0	85	0
Ilita	11	8	19	3
Haloisita	6	12	18	15
Caolinita	1	3	4	2
Gibbsita	0	5	5	5
Goetita	0	4	4	4
Coloide alofánico	10	41	51	17
Turba	38	98	136	6

medida precisa de carga permanente, pero posiblemente la más realista porque los suelos están en su pH de campo. La diferencia entre la CIC estimada a pH 8,2 y la CIC efectiva se considera como la carga variable o dependiente del pH. El Cuadro 4.2 muestra que la mayoría de las CICs de minerales de silicatos laminares 2:1 es "permanente". Los minerales 1:1 presentan ambas cargas, la permanente debida a sustitución isomórfica y carga variable debida a efectos de borde y láctices rotos. Sin embargo, los hidróxidos de hierro y aluminio, alófana y la materia orgánica tienen carga variable predominantemente.

La mayoría de los minerales también tienen algún grado de capacidad de intercambio aniónico (CIA). En los silicatos laminares ésta surge de cargas positivas netas debidas a bordes rotos o a la sustitución de OH⁻ por otros aniones. En los óxidos se debe al último mecanismo. Es oportuno señalar que algunos óxidos tienen tanta capacidad de intercambio aniónico como capacidad de intercambio catiónico.

Los minerales de arcilla no se encuentran puros en el suelo. Ellos se mezclan con otros y con la materia orgánica. El sistema de taxonomía de suelos ha establecido varias clases de mineralogía al nivel de familia. En el Cuadro 4.3 se presenta una definición simplificada de estas clases.

Los Vertisoles, Molisoles, Aridisoles y algunos Alfisoles, Inceptisoles y Entisoles tienen familias mineralógicas montmoriloníticas, vermiculíticas, cloríticas, ílíticas, carbonáticas, silíceas o mezcladas. Tales familias tienen en primer lugar carga permanente con un pequeño grado de carga variable derivada de su contenido de materia orgánica.

CUADRO No. 4.3. Definiciones simplificadas de clases de mineralogía en la taxonomía de suelos que se encuentran en suelos del trópico. (Fuente: Soil Survey Staff, 1970).

Clase	Definición simplificada	Ordenes más comúnmente encontrados
Haloisítica (1:1)	> 50% haloisita no tabular en la fracción arcilla por peso.	Oxisol, Ultisol, Inceptisol
Montmorilonítica (2:1)	> 50% montmorilonita o nontronita en la fracción arcilla por peso, o una mezcla con más montmorilonita que cualquier otro mineral individual.	Vertisol, Molisol, Alfisol, Aridisol, Inceptisol, Entisol
Ilítica (2:1)	> 50% illita (mica hidratada) en la arcilla por peso o > 4% K ₂ O	Molisol, Alfisol, Aridisol, Inceptisol, Entisol
Vermiculítica (2:1)	> 50% vermiculita en la arcilla por peso, o más vermiculita que ningún otro mineral de arcilla.	Molisol, Ultisol, Alfisol, Aridisol, Inceptisol, Entisol
Clorítica (2:2)	> 50% clorita en la arcilla por peso, o más clorita que ningún otro mineral	Molisol, Alfisol, Aridisol, Inceptisol, Entisol
Caolinítica (1:1)	> 50% caolinita o haloisita tabular en la fracción arcilla por peso.	Oxisol, Ultisol, Alfisol, Inceptisol
Oxidica	> 20% Fe ₂ O ₃ libre + Al ₂ O ₃ en la fracción arcilla.	Oxisol, Ultisol, Alfisol
Gibbsítica	> 40% gibbsita y boemita del suelo por peso.	Oxisol, Ultisol
Ferrítica	> 40% Fe ₂ O ₃ libre del suelo por peso	Oxisol, Ultisol
Cenizosa	> 60% de ceniza volcánica, escorias y pumita en el suelo.	Andept
Escoriácea	> 35% escorias mayores de 2 mm por volumen	Andept
Silícea	> 90% por peso de cuarzo, calcedonia u ópalo de fracción de 0,02-2 mm por peso.	Ultisol, Alfisol, Espodosol, Inceptisol, Entisol
Carbonática	> 40% CaCO ₃ por peso.	Molisol, Aridisol
Mixta	Suelos con menos de 40% de cualquier mineral en la fracción de 0,02-2 mm y menos de 50% de un mineral de lámina de silicato en la fracción arcilla.	Ultisol, Alfisol, Aridisol, Espodosol, Inceptisol, Entisol

Sus propiedades químicas son similares a las de la mayoría de los suelos de la zona templada, y por lo tanto los conceptos sobre intercambio iónico desarrollados en esta zona son completamente aplicables a estas familias.

Los Oxisoles, Ultisoles, y algunos Alfisoles e Inceptisoles tienen familias mineralógicas caolinítica, haloisítica, oxidica, gibbsítica, ferrítica, silícea y mixta. Estos suelos rojos poseen ambos tipos de cargas, permanente y variable, debido a la presencia de minerales dependientes del pH, tales como hidróxidos de hierro y aluminio así como materia orgánica. Los Andepts pertenecen a las familias cenizosa y escoriácea cuando son de textura gruesa. En el sistema de taxonomía

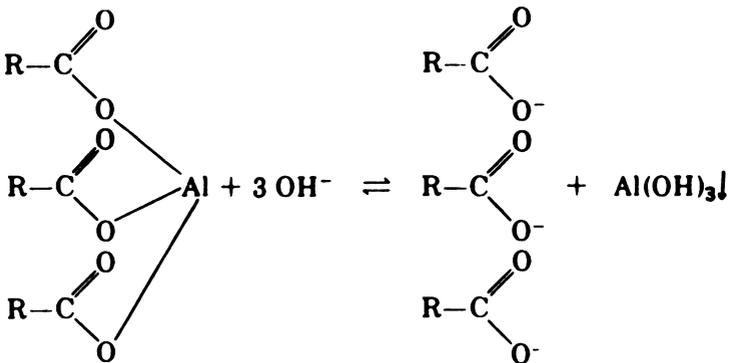
no hay una definición de familia alofánica. Esto constituye un serio descuido por cuanto los Andepts presentan una cantidad muy alta de carga dependiente del pH debido a la alofana, y alto contenido de materia orgánica. Otra omisión de importancia es la falta de familia interlamina para separar los suelos altos en una mezcla íntima de silicatos laminares 2:1 y óxidos, ya que muchos Ultisoles, Alfisoles y Oxisoles tienen tales propiedades.

Para el propósito de este libro, los suelos de los trópicos pueden agruparse en tres sistemas de intercambio iónico: sistemas de silicatos laminares, sistemas de óxidos, y sistemas de silicatos laminares con revestimientos de óxidos.

SISTEMAS DE SILICATOS LAMINARES

Estos sistemas se presentan en Entisoles, Vertisoles, Aridisoles, Molisoles y otros suelos que tienen poco o nada de óxidos de hierro y aluminio, o de alofana. Los conceptos clásicos desarrollados en el norte de Estados Unidos son del todo aplicables a estos suelos. En estos sistemas la arcilla solamente tiene carga negativa debido a la sustitución isomorfa de los iones de sílice o aluminio por otros iones de menor valencia. Estos suelos tienen muy poca carga variable producto del contenido de materia orgánica y bordes rotos de láminas de caolinita.

Las propiedades dependientes del pH de la materia orgánica, se deben a las reacciones que ocurren cuando la materia orgánica y los complejos de aluminio se someten a un aumento de pH. La reacción siguiente, adaptada de Coleman y Thomas (1967) ilustra los aumentos en carga negativa netas de los radicales carboxilo cuando los iones complejos de aluminio se precipitan:



El alcance de esta reacción es limitado. Coleman y Thomas (1967) informaron que la CIC permanente de suelos ácidos con silicatos laminares 2:1 de Carolina del Norte corresponde al 80% de la CIC total del suelo.

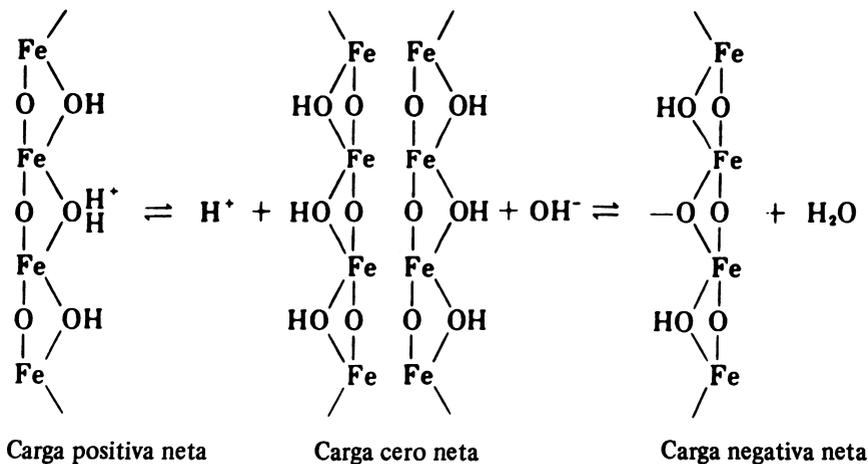
Sistemas de silicatos laminares tales como éstos son extensos en los trópicos y ocupan grandes áreas cubiertas por Aridisoles, Vertisoles, Molisoles, y suelos de planicies y deltas aluviales.

SISTEMAS DE OXIDOS

Los sistemas de óxidos son aquellos en que las partículas completas de arcilla consisten de óxidos de hierro y aluminio o alófana, o aquellos en que los silicatos laminares están cubiertos por revestimientos gruesos y estables de tales óxidos. Se presentan en familias oxidicas, gibbsíticas y ferríticas de Oxisoles, Ultisoles, y Alfisoles así como en familias "alofánicas" de Andepts. La presencia de este sistema de intercambio iónico está bien correlacionado con la excelente estructura granular de suelos tropicales bien agregados. Aunque muchas de las reacciones de intercambio características de este sistema fueron desarrolladas por Mattson desde hace varias décadas (Mattson, 1926; Mattson y Pugh, 1934; Mattson y Wicklander, 1940), ellas han sido revividas a la luz de conceptos más recientes, por Uehara y sus colegas (Mekaru y Uehara, 1972; Jones y Uehara, 1973; Keng y Uehara, 1974; Uehara y Keng, 1975). La exposición que sigue se basa en gran parte en estas publicaciones.

En los sistemas de óxidos la carga es completamente dependiente del pH. En los suelos estos sistemas pueden presentar carga negativa neta (CIC), carga positiva neta (CIA) o completa ausencia de carga neta. La química de superficie de estos óxidos es similar. En el ejemplo siguiente se usa un hidróxido de hierro, pero una clase aluminica podría servir igualmente.

Según Keng y Uehara (1974), los siguientes cambios ocurren en la superficie de un óxido sin carga cuando su pH cambia al agregarle iones de H^+ o OH^- .

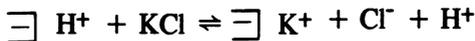
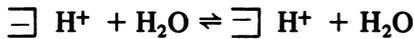


Por lo tanto cuando el pH disminuye se crean cargas positivas, y cuando el pH aumenta al agregar OH^- , se forman cargas negativas.

ΔpH Y PUNTO CERO DE CARGA

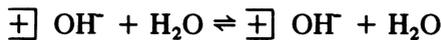
El estado de carga de un sistema de óxidos puede determinarse fácilmente midiendo su pH en agua y en una sal neutral tal como KCl normal. Mekaru y Uehara (1972) definieron el ΔpH como la diferencia entre el pH en KCl y el pH en agua. Si el ΔpH es positivo, hay carga positiva neta (capacidad de intercambio aniónico). Si el ΔpH es negativo, hay carga negativa neta (capacidad de intercambio catiónico). Por lo tanto el signo del ΔpH corresponde al signo de la carga coloidal.

En sistemas de silicatos laminares el ΔpH es siempre negativo, y el motivo de ello se ilustra en las siguientes reacciones simplificadas:



Por lo tanto, en este sistema, el pH es más alto en el agua que en el KCl.

En sistemas de óxidos el ΔpH puede ser positivo o negativo, según el pH verdadero del suelo, tal como se ilustró anteriormente. Si el sistema de óxido tiene carga positiva neta, ocurren las siguientes reacciones cuando se mide el pH:



Cuando la carga total del suelo se determina sobre un ámbito amplio de pH estas relaciones pueden ilustrarse gráficamente. La Fig. 4.1 presenta un ejemplo de estas relaciones carga-pH en un Andept y Ultisol de Chile, y un Oxisol y un Alfisol de Brasil. Todos los suelos presentan grados notorios de carga variable. El pH verdadero de campo de cada suelo en el momento del muestreo se marca como "I". Todas las capas arables y los subsuelos presentan CIC neta a su pH de campo, excepto el subsuelo de Oxisol, que tiene CIA neta. Esto indica el predominio de la capacidad de intercambio catiónico en las cuatro capas arables y los otros tres subsuelos.

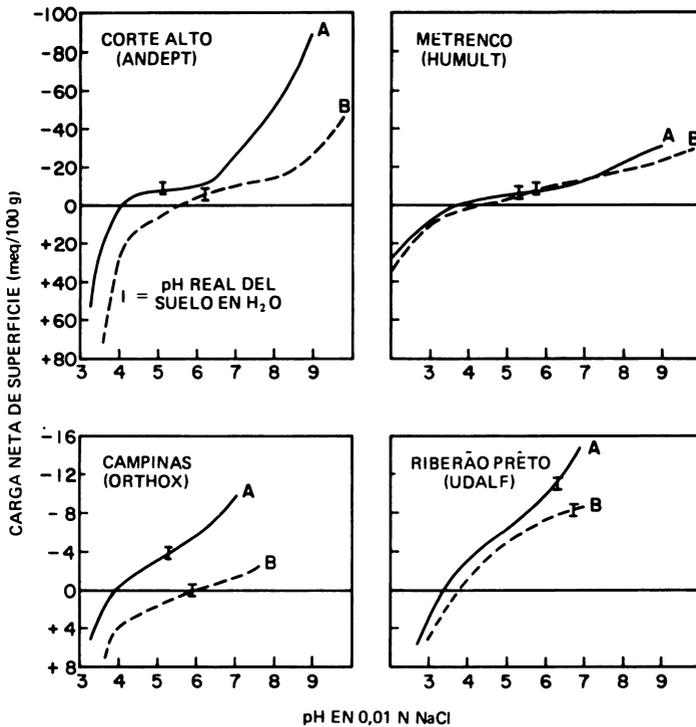


Fig. 4.1. Cambios en la carga neta de la superficie según el pH en los horizontes A y B de cuatro suelos altos en alófanos u óxidos. (Fuente: adaptado de Carrasco, 1972; y Van Raij y Peech, 1972).

La gran mayoría de datos de ΔpH revisados por el autor indican que no hay cargas positivas en el horizonte A de suelos tropicales, excepto en Hydrandepts de Hawaii, y unos pocos casos de cargas positivas netas en subsuelos de suelos altos en óxidos o alófanos. El Cuadro 4.4 presenta algunos valores de pH de suelos representativos. Aún en la mayor área de Oxisoles del mundo, la meseta central de Brasil, la gran mayoría de suelos tienen ΔpH s negativos (Camargo y Falesi, 1975).

El tener un ΔpH negativo no implica una ausencia total de cargas positivas en las superficies de las arcillas. Un pequeño número de cargas positivas tienen lugar tal vez en áreas aisladas de las cargas negativas. Para los suelos que se ilustran en la Fig. 4.1, Carrasco (1972) y Van Raij y Peech (1972) midieron menos de 1 meq/100 g de CIA en el Ultisol, Oxisol y Alfisol, y 6.8 meq/100 g en el Andept, con los pHs de campo de dichos suelos.

CUADRO No. 4.4. Cargas netas positivas o negativas de algunos suelos tropicales.

Nombre del suelo y país	Gran grupo	Familia	Horizonte (cm)	pH		
				1:1 H ₂ O	1 N KCl	ΔpH
Oxisoles						
Molokai (Hawaii)	Haplustox=	Haloistítica	0-20 41-76	6,2 5,8	5,4 5,6	- -
Latosol (Brasil)	Acrohumox=	Caolinitica	0-20 200-230	4,9 4,9	4,1 4,3	- -
Latosol rojo-oscuro (Brasil)	Haplustox=	Caolinitica	0-35 35-70	4,8 4,9	4,2 4,2	- -
Latosol amarillo-rojo (Brasil)	Acrustox=	Caolinitica	0-20 40-60	4,9 5,6	4,4 4,7	- -
Hali (Hawaii)	Gibbsihumox=	Gibbsítica	0-32 75-110	5,0 5,0	4,5 5,2	- +
Ultisoles						
Paaloa (Hawaii)	Tropohumult=	Oxidica	0-20 76-122	4,3 4,8	3,9 4,1	- -
Humatas (Puerto Rico)	Tropohumult=	Mixta	0-10 180-240	4,6 4,7	3,9 3,7	- -
Polovorin (Colombia)	Paleudult=	Mixta	0-17 157-210	4,6 4,7	3,8 3,5	- -

CUADRO No. 4.4. Cont.

Nombre del suelo y país	Gran grupo	Familia	Horizonte (cm)	pH	
				1:1 H ₂ O	1 N KCl ΔpH
Yurimaguas (Perú)	Paleudult=	Mixta	0-12 35-85	4,2 4,0	3,8 3,8
Alfisoles					
Terra Roxa Estructurada (Brasil)	Tropudalf=	Caolinitica	0-20 37-71	6,3 6,7	5,4 5,9
Egbeda (Nigeria)	Paleustalf=	Mixta	0-5 45-65	6,5 6,4	5,9 5,1
Inceptisoles					
Birrisito (Costa Rica)	Dystrandept=	Cenizosa	A B	5,3 5,2	5,0 5,3
Waimea (Hawaii)	Eutrandedpt=	Cenizosa	0-18 76-102	5,7 5,8	5,4 5,4
Hilo (Hawaii)	Hydrandedpt=	Tixotropica	0-25 25-51	4,5 5,4	4,7 5,4
Ekiti (Nigeria)	Ustropept=	Mixta	0-16 46-66	6,9 6,2	6,1 4,9
Vertisoles					
Laulualei (Hawaii)	Chromustert=	Montmorilonítica	0-15 122-152	7,4 7,9	6,6 7,1

FACTORES QUE AFECTAN LAS RELACIONES pH-CARGA

Las relaciones pH-carga de los sistemas de óxidos pueden ilustrarse con la siguiente ecuación, según Keng y Uehara (1974):

$$\sigma = \frac{kDRT}{4\pi F} \frac{\text{pH}_0}{\text{pH}}$$

en que:

- σ = carga de la superficie (meq/100 g)
- k = recíproco del espesor de la doble capa
- D = la constante dieléctrica
- R = la constante de gas
- T = la temperatura absoluta
- F = la constante de Faraday
- pH = el pH del suelo
- pH_0 = el pH del suelo en el punto isoelectrico, es decir, el pH en el punto de carga cero (PCC).

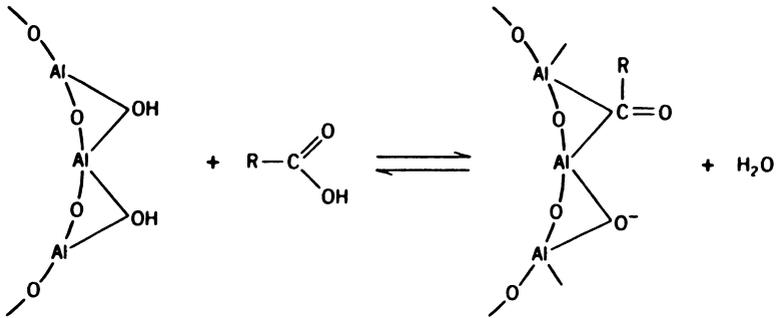
Las magnitudes de D , R , T , F y 4π son constantes en los sistemas de suelos; por lo tanto se les puede combinar en una sola constante, Q . La ecuación se simplifica de la manera siguiente:

$$\sigma = \frac{k\text{pH}_0Q}{\text{pH}}$$

Los tres parámetros restantes varían de acuerdo con las propiedades del suelo. El recíproco del espesor de la doble capa " k " depende de la concentración de electrólitos en la solución del suelo. Su valor aumenta con la aplicación de fertilizantes solubles y con secamiento del suelo. Un ejemplo de esto es el uso de agua y KCl normal en la determinación del pH. El pH del suelo puede subirse mediante el encalamiento, o bajarse por medio del efecto residual de ciertos fertilizantes nitrogenados. En sistemas de óxidos por lo tanto los cambios de pH y de contenido de sales alterarán las propiedades de intercambio iónico.

ALTERACION DEL PUNTO CERO DE CARGA

El tercer parámetro, el pH al punto cero de carga (pH_0) también puede alterarse. Cuando ciertos aniones inorgánicos son absorbidos por las superficies de los óxidos el pH_0 cambia a valores más bajos. La reacción entre la materia orgánica y las superficies de los óxidos responsable de este cambio es la siguiente:



La carga negativa neta producida por esta reacción aumenta la CIC del suelo sin cambiar su pH. Por lo tanto la curva de pH-carga se desvía hacia la izquierda y el pH en el punto cero de carga es más bajo. En la Fig. 4.1 puede apreciarse evidencia indirecta de este fenómeno cuando el pH de la capa arable del suelo en el punto cero de carga se compara con el pH_0 del subsuelo. Todos los suelos de esta figura no presentaron diferencias en textura o mineralogía de la arcilla entre los horizontes A y B. La principal diferencia entre esos horizontes estriba en su contenido de materia orgánica. La diferencia entre el 2,5% de materia orgánica en el horizonte A del Oxisol, y 0,7% en el horizonte B fue la responsable de una CIC neta de la capa arable y de una CIA neta del subsuelo, a aproximadamente el mismo pH en el campo. En el Alfisol de la Fig. 4.1 había diferencias similares en los contenidos de materia orgánica, pero ambos horizontes estaban muy por encima del punto cero de carga al Ph del campo. Este suelo es probablemente una combinación de óxidos y minerales de silicatos laminares, lo cual se tratará en la próxima sección. El Orthox y el Andept de la Fig. 4.1 son verdaderos sistemas de óxidos.

Estas relaciones tienen algunas inferencias prácticas. El contenido de materia orgánica de tales suelos puede aumentarse por medio del manejo, elevando así significativamente la CIC sin alterar el pH. Hay poca evidencia disponible de que tal cambio en el punto cero de carga pueda lograrse a través de prácticas agronómicas. Esta es una área digna de investigación.

Mekaru y Uehara (1972) y Schalscha et al., (1972, 1974) han mostrado que en varios Andepts, la adición de 310 ppm de P aumenta la capacidad de intercambio catiónico en aproximadamente 0,7 meq/100 g. Sin embargo, estos aumentos son de poca importancia práctica por cuanto los Andepts tienen alta CIC, y el costo de agregar 310 ppm de P (1410 g P_2O_5 /ha) es probablemente demasiado alto para que sea económicamente recomendable. Hace falta información similar para la capa arable de Oxisoles con CIC muy baja. Es posible que el efecto residual de aplicaciones prolongadas de fósforo en tales suelos, pueda incrementar la CIC durante varios años.

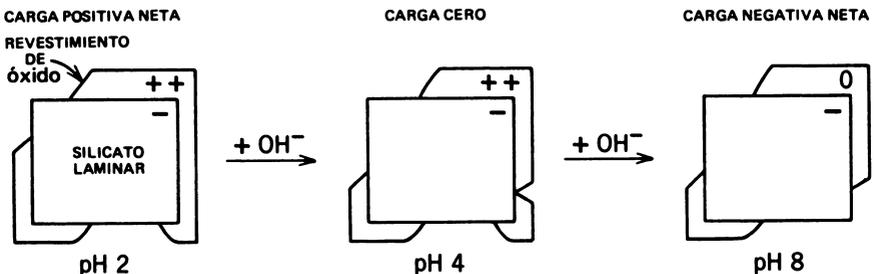
SISTEMAS DE SILICATOS LAMINARES CON REVESTIMIENTOS DE OXIDO

Un sistema de intercambio iónico intermedio entre los sistemas de silicatos laminares puros y de óxidos puros probablemente describe más adecuadamente que ninguno de estos dos, la mayor parte de los suelos tropicales, los cuales contienen cantidades moderadas de óxidos pero no tienen su área superficial completamente cubierta por ellos. Este sistema probablemente representa ahora el grueso de los suelos "rojos" tropicales, Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles y algunos Inceptisoles que tienen mineralogía caolinítica, haloisítica o mixta.

Los silicatos laminares están parcialmente revestidos por finas capas, algunas veces monomoleculares, de óxidos de hierro y aluminio. Micrografías electrónicas muestran que en ciertos suelos los óxidos forman "islas" o partículas definidas adheridas a la superficie de la caolinita (Greenland et al., 1968). En otros casos óxidos de aluminio están prensados entre dos láminas de silicatos laminares (Coleman y Thomas, 1967). Micrografías electrónicas de alta resolución obtenidas por Jones y Uehara (1973) sugieren que los geles de óxido son bastante dinámicos, respondiendo a cambios de humedad y hasta dilatándose y rompiéndose como goma de mascar. La naturaleza dinámica de estos delgados revestimientos significa que en cierto momento ellos pueden cubrir completamente las superficies de los silicatos laminares, mientras que en otras áreas o en diferentes momentos esas superficies pueden estar expuestas.

Las propiedades de intercambio de este sistema son intermedias entre las de los otros dos sistemas. Su CIC es considerablemente más baja que la de los silicatos laminares puros debido a que algunas cargas negativas que surgen de una sustitución isomorfa están balanceadas por cargas positivas netas de los óxidos. Los revestimientos de óxidos o las partículas también evitan la expansión y la contracción de minerales 2:1, cambiando de esa manera sus propiedades físicas drásticamente.

Coleman y Thomas (1967) propusieron el siguiente modelo basado en una voluminosa investigación llevada a cabo en Ultisoles y Alfisoles de Carolina del Norte y Virginia:



Aunque el componente de silicato laminar tiene carga negativa permanente, los revestimientos de óxidos tienen cargas positivas netas hasta un pH de 7 u 8, donde alcanzan su carga de punto cero. Por consiguiente con pHs menores de 4 el sistema puede tener carga positiva neta; puede alcanzar su punto cero de carga a pH_4 , y tener carga negativa a pHs mayores. En el campo presentará un ΔpH negativo.

Observaciones del comportamiento de la mayoría de los suelos "rojos" que no tienen mineralogía oxidica, gibbsítica o ferrítica, sugieren que este sistema mixto describe su intercambio iónico más adecuadamente que el del silicato laminar puro o del sistema, de óxidos puros. El último sistema está probablemente restringido a Andepts y las familias oxidicas, gibbsíticas y ferríticas de Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles.

NIVELES DE INTERCAMBIO CATIONICO Y ANIONICO

La descripción de los tres sistemas de intercambio iónico sugiere un amplio ámbito en capacidad de intercambio catiónico y aniónico en suelos tropicales. Mehlich y Theisen (1973) estudiaron 44 suelos de Kenya y relacionaron su carga con el contenido de minerales amorfos o cristalinos. El Cuadro 4.5, extraído de ese estudio, presenta valores representativos para las principales agrupaciones mineralógicas. La CIC permanente se determinó usando sales neutrales sin

CUADRO No. 4.5. Características de carga de suelos de Kenia seleccionados en relación a componentes de suelo cristalinos y amorfos (meq/100 g). (Fuente: Mehlich y Theisen (sin publicar).

Suelo	Capacidad de intercambio				CIC de la arcilla
	Permanente	Variable	catiónico		
Total			aniónico		
Predominantemente montmorilonítico (Songhor, 60% arcilla)	44	3	47	3	75
Minerales cristalinos mixtos (Mogutato, 67% arcilla)	17	12	29	10	43
Predominant. caolinítico-haloisítico Ishiara, 64% arcilla	7	10	17	4	26
Amorfo y cristalino mixto (Eldoret, 56% arcilla)	4	17	21	11	39
Predominantemente amorfo (Chinga, 62% arcilla)	6	32	38	20	61
Predominantemente orgánico (Gathaithe, 12% arcilla)	8	30	38	7	100

tamponar al pH de campo del suelo. La CIC total es el valor obtenido por medio de extracción con BaCl_2 —trietanolamina a pH 8,2. La carga variable o dependiente del pH, se calculó como diferencia entre las dos. La capacidad de intercambio aniónico se determinó con $0,05 \text{ N NH}_4 \text{VO}_3$.

Los datos de Mehlich y Theisen sugieren que estos parámetros, más que estimaciones semicuantitativas de componentes minerales, deberían usarse para definir criterios de familias minerales. Las familias montmoriloníticas tienen más de 50 meq CIC/100 g de arcilla, con más del 70% de la CIC como carga permanente, y poca CIA. Familias mixtas de silicatos laminares 2:1 y 1:1 tienen de 30 a 50 meq CIC/100 g de arcilla de la cual del 30 al 70% es carga permanente. La capacidad de intercambio aniónico es menor que la carga variable.

Suelos con mineralogía caolinítica o haloisítica tienen CIC menor de 30 meq/100 g de arcilla, de la cual del 30 al 50% es permanente. La capacidad de intercambio aniónico es mayor del 50% de la CIC total en familias caoliníticas y menor en familias haloisíticas. El intercambio aniónico en estos suelos se atribuye a bordes rotos lo que produce cargas positivas.

Suelos con materiales cristalinos y amorfos mixtos tienen CIC con 30 a 50 meq/100 g de arcilla, cuya mayoría corresponde a carga variable.

Suelos predominantemente volcánicos amorfos, que deberían pertenecer a una familia "alofánica", tienen CIC mayor de 50 meq/100 g de arcilla, pero más del 70% es carga variable. La capacidad de intercambio aniónico es más de la mitad de la CIC total. Los suelos orgánicos tienen más del 70% de su CIC como carga variable, pero la CIA pocas veces llega al 20% de la CIC total.

PROBLEMAS DE MEDICION

La capacidad de intercambio catiónico se determina más corrientemente como la cantidad de cationes absorbidos de soluciones de sales tamponada a pH 7 con $\text{NH}_4 \text{OAc}$ o a pH 8,2 con BaCl_2 —trietanolamina (Ba-TEA). En suelos con valores de pH de campo de 7 a 8,2, estas mediciones reflejan adecuadamente la CIC del suelo. También son adecuadas si el suelo tiene poca o nada de carga variable. En suelos ácidos estos métodos son adecuados para algunos sistemas de silicatos laminares que no tienen carga dependiente del pH, tales como suelos montmoriloníticos bajos en materia orgánica. Sin embargo otros suelos con pH menores de 7 u 8,2, estos métodos sobrestiman enormemente la capacidad de intercambio catiónico. Esto es muy importante en los trópicos, en donde la mayor parte de los suelos presentan una cantidad significativa de carga variable. El Cuadro 4.6 ilustra la magnitud de esta discrepancia en varios suelos colombianos.

CUADRO No. 4.6. Comparación de diferentes métodos de extracción en la capacidad de intercambio catiónico y el porcentaje de saturación de bases de varios suelos colombianos. (Fuente: adaptado de León, 1967).

Suelo	Mineralogía	pH	Materia orgánica (%)	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)			Saturación de bases (%)	
				N KCl (CIC efectiva)	CaOAc pH 7	Ba-TEA pH 8,2	N KCl (CIC efectiva)	Ba-TEA pH 8,2
Andept	Alofánica	6,0	6	3	19	23	88	16
Andept	Caolinita-integrada	5,2	36	8	65	110	4	1
Tropept	Caolinita-integrada	4,4	4	5	13	18	6	2
Aquept	Caolinita-integrada	4,5	18	22	42	62	81	29
Humult	Caolinita-integrada	4,5	15	6	15	21	50	16
Ustox	Caolinita-integrada	4,9	2	1	6	7	23	14
Orthox	Goetita	5,1	10	3	17	24	74	10

La medición que determina con mayor precisión la carga total con el verdadero pH del suelo consiste en una lixiviación con una sal neutral sin tamponar, tal como KCl o CaCl₂, haciendo la determinación al pH de campo de dicho suelo. Coleman y Thomas (1967) lo han llamado "CIC efectiva". Las estimaciones de la CIC efectiva presentan valores mucho menores que los que se obtienen con otros métodos, conforme lo indica el Cuadro 4.6. A menos que se indique lo contrario, en este libro se usará la CIC efectiva. En general los valores de CIC efectiva mayores de 4 meq/100 g sugieren suficiente capacidad de intercambio catiónico para evitar pérdidas serias por lixiviación.

El método que se usa afecta seriamente la interpretación no sólo de los valores de CIC, sino también el porcentaje de saturación de bases. La saturación de bases se calcula como la suma de bases intercambiables dividida por la CIC del suelo. Cuando en la extracción se usa Ba-TEA tamponada a pH 8,2 para estimar la CIC, toda la carga variable se considera esencialmente como acidez extraíble. La saturación de bases calculada de esta manera se subestima toscamente, haciendo que un suelo parezca más ácido de lo que realmente es. Una situación similar ocurre en suelos ácidos cuando la extracción se hace con acetato tamponado a pH 7. Con estas dos soluciones extractoras un suelo está 100% saturado de bases a un pH de 7 ó de 8,2. Cuando se usa la CIC efectiva, la saturación de bases se calcula como la suma de las bases dividida entre la suma de las bases más H⁺ y Al³⁺. Este

método refleja con mayor precisión lo que está ocurriendo en el suelo, y el hecho de que un suelo tenga un 100% saturación de bases a un pH de 5,5 a 6,0 indica que todo el aluminio ha sido precipitado como ocurre en la realidad.

El Cuadro 4.6 compara los valores de saturación de bases obtenidos cuando el CIC fue determinado con pH 8,2 y con una sal no tamponada. El Andept con pH 6 se considera con 16% de saturación de bases cuando se usó Ba-TEA y con 88% de saturación de bases cuando se usó la CIC efectiva. Con ese pH un suelo tiene pocos problemas de acidez, si es que del todo los tiene.

Los métodos de saturación de bases fundamentados en la CIC determinada a un pH de 7 u 8,2 son satisfactorios para la mayoría de los suelos del medio oeste y oeste de Estados Unidos, Europa la Unión Soviética y Argentina. Todavía se les usa como criterios de clasificación en la taxonomía de suelos de Estados Unidos a pesar de las objeciones de científicos de suelos del sureste de Estados Unidos y del trópico. Por ejemplo, el criterio para separar Ultisoles de Alfisoles es el 35% de saturación de bases, calculado por el método Ba-TEA a pH de 8,2. Correlaciones entre éste, y la saturación de bases calculada de las determinaciones de la CIC efectiva en 88 suelos del medio oeste y sureste de Estados Unidos y de Puerto Rico, indicaron que el 35% de saturación de bases a pH 8,2 es equivalente a un 55% de saturación de bases obtenida mediante la CIC efectiva (Buol, 1973). Esta relación, ilustrada en la Fig. 4.2 es aplicable a suelos francos y arcillosos bajos en materia orgánica. En suelos arenosos o con más del 1% de materia orgánica la relación es distinta.

Con base en cálculos similares, el límite de separación de Mollisoles y Alfisoles, 50% de saturación de bases con pH 7, corresponde al 90% de saturación de bases cuando se usa la CIC efectiva, tal como lo muestra la Fig. 4.3.

Por lo tanto la interpretación de los valores de la CIC y de saturación de bases, depende en gran parte de los métodos que se usan para obtenerlos.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO ANIONICO

Es significativo anotar que muchos suelos tropicales poseen algún grado de capacidad de intercambio aniónico. Un pequeño número de cargas positivas netas se encuentran aún en suelos con una CIC neta debido a que algunas cargas positivas están físicamente muy distantes de cargas negativas para que sean neutralizadas. Por lo tanto, suelos que tienen un ΔpH negativo pueden presentar un grado significativo de CIA, en particular con niveles bajos de pH. Aniones tales como sulfato, cloruros y nitratos pueden ser intercambiados por estas cargas positivas, de la misma manera que cationes son intercambiados por cargas negativas. En subsuelos oxidicos con ΔpH positivo, los

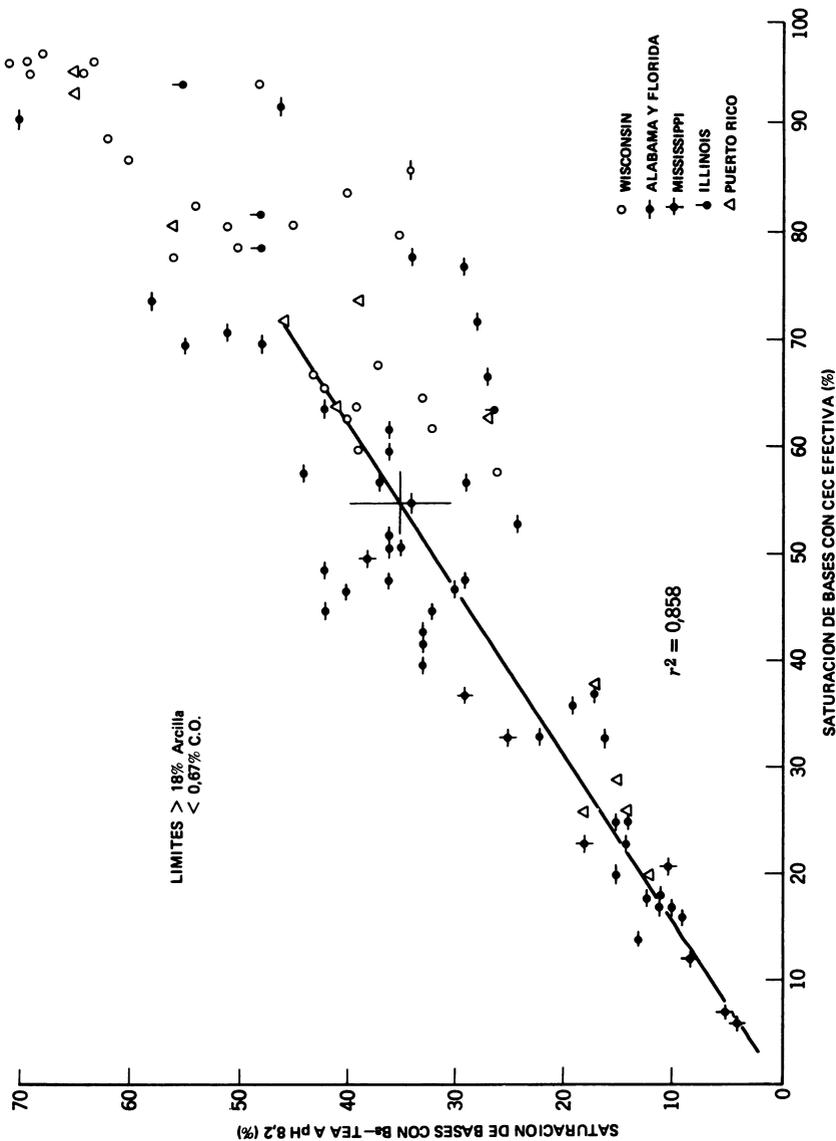


Fig. 4.2. Correlación entre saturación de bases con Ba-TEA a pH 8,2 y extracción con 1 N KCl. (Fuente: Buol, 1973).

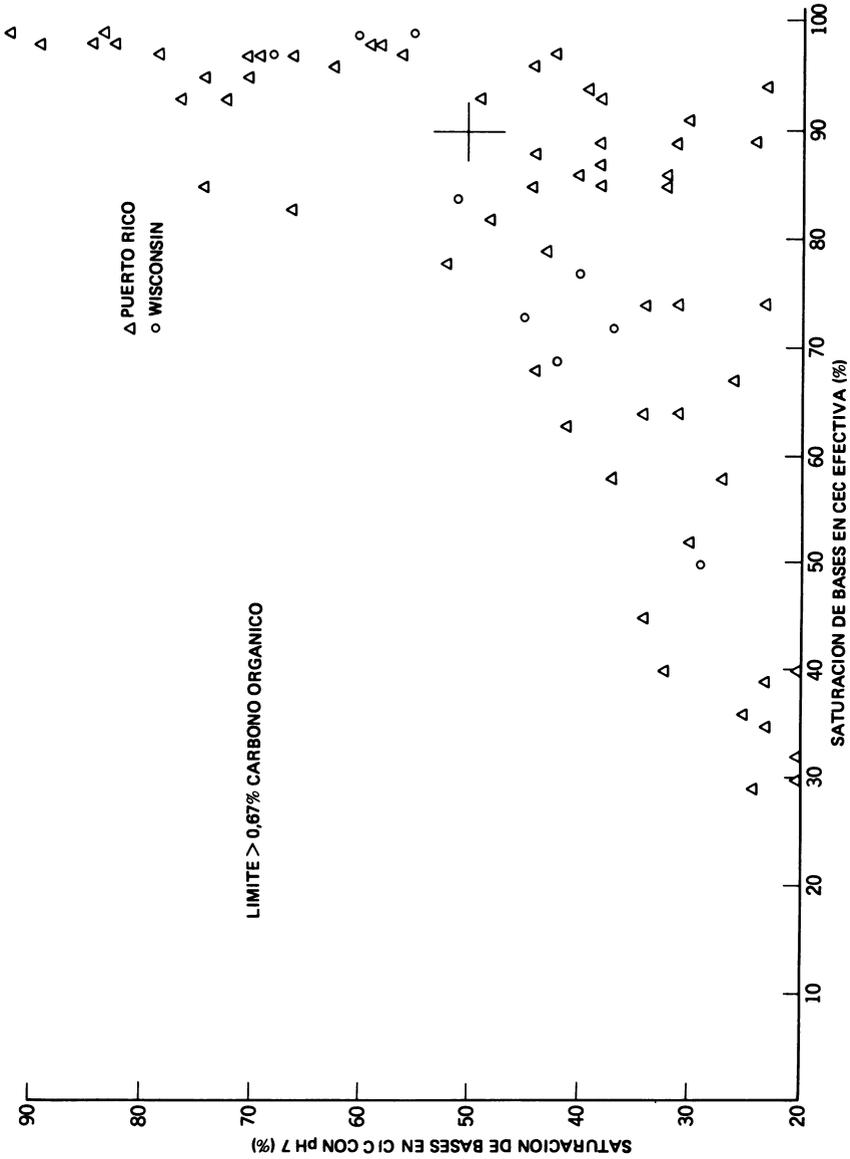


Fig. 4.3. Correlación entre saturación de bases calculada con Na₄OAc tamponada a pH 7 y con extracción de 1N KCl. (Fuente: Buol, 1973).

caciones se lixivian libremente, mientras que los aniones sufren reacciones de intercambio. En consecuencia algunos Oxisoles y Andepts pueden retener apreciables cantidades de nitratos y sulfatos en forma intercambiable (León y Coleman, 1972; Kinjo y Pratt, 1971).

Aniones de sulfato, fosfato y silicato se adsorben mucho más fuertemente a superficies de óxidos cargados positivamente lo que impide el intercambio convencional de aniones. Las implicaciones de manejo de estos procesos de adsorción o fijación se discutirán en otros capítulos.

MANEJO DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Se necesita una capacidad efectiva de intercambio catiónico de por lo menos 4 meq/100 g para retener la mayoría de los cationes contra la lixiviación. Valores mayores de CIC son aún mejores, especialmente si los cationes intercambiables presentes son divalentes. Debido a la presencia de minerales altamente meteorizados o a texturas arenosas, muchos suelos tropicales corrientemente tienen valores de CIC efectiva menores de 4. En esos suelos el incremento de la CIC es un objetivo importante de manejo. Ello puede lograrse mediante dos procesos: encalando suelos ácidos con sistemas de óxidos o de silicatos laminares con revestimiento de óxido, y aumentando el contenido de materia orgánica del suelo.

La CIC de suelos muy ácidos con sistemas de óxidos o revestimientos de óxidos, en particular Oxisoles, Ultisoles y Andepts puede incrementarse por medio del encalamiento, debido al predominio de la carga dependiente del pH. El Cuadro 4.6 muestra la magnitud de estos aumentos si los suelos se encalan hasta alcanzar un pH de 7. El encalado hasta un pH de 7 no es una práctica recomendable en tales suelos por cuanto puede haber otros efectos nocivos. El encalamiento hasta un pH de 5,5 ó 6,0 parece ser el nivel más apropiado, tal como se comentará más adelante. Tal como se aprecia en la Fig. 4.1 el encalamiento de suelos con pHs del orden de 4,0 a 5,0 puede producir en ocasiones un gran aumento en CIC. En algunos casos han cambiado las relaciones de carga positiva neta a negativa neta, pero la presencia de capas arables cargadas positivamente parece estar limitada a hydrandeps de Hawaii.

En muchos suelos con sistemas de óxidos o con revestimientos de óxidos, la materia orgánica contribuye al grueso de las cargas negativas netas. Por ejemplo, Martini (1970) mostró que la materia orgánica contribuyó del 45 al 85% de la CIC total de suelos derivados de ceniza volcánica de Panamá, mientras que en suelos aluviales con sistemas de silicatos laminares la contribución de la materia orgánica osciló entre el 10 y el 28% de la CIC total.

En muchos suelos tropicales altamente meteorizados, particularmente Oxisoles, el mantenimiento de la materia orgánica es casi sinónimo del mantenimiento de la CIC. Brams (1971) estudió el proceso de disminución de la materia orgánica en Oxisoles de Sierra Leona después de desmontar el bosque. Los contenidos de materia orgánica disminuyeron en un 50% en un período de 5 años, mientras que la CIC efectiva disminuyó en un 30%. En la Fig. 4.4 se ilustra la correlación estrecha entre el contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico en el Oxisol de Sierra Leona y un Alfisol de Nigeria.

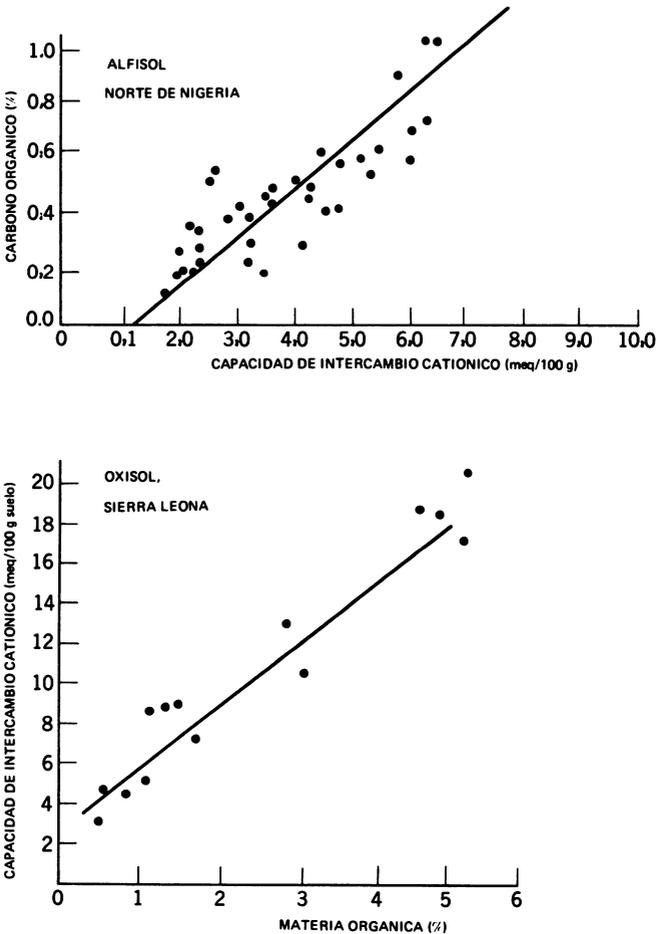


Fig. 4.4. Relación entre capacidad de intercambio catiónico y contenido de materia orgánica en capas arables de un Alfisol del norte de Nigeria y un Oxisol de Sierra Leona. (Fuente: Brams, 1971, y datos no publicados de Brams).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. Los tipos y propiedades de los minerales de arcilla son mucho más variados en los trópicos que en las zonas templadas frías, donde se desarrollaron la mayoría de los conceptos sobre intercambio iónico. Las clases mineralógicas al nivel de familia del sistema de taxonomía de suelos permite el agrupamiento de los suelos tropicales en tres principales sistemas de intercambio iónico: sistemas de silicatos laminares, sistemas de óxidos y sistemas de silicatos laminares con revestimiento de óxido.
2. Los sistemas de silicatos laminares incluyen Entisoles, Vertisoles, Aridisoles, Mollisoles y otros suelos tropicales con poco o nada de óxidos de hierro y aluminio o alófana. Estos presentan cargas negativas permanentes que varían poco con el pH del suelo. Los conceptos desarrollados en la zona templada son del todo aplicables a tales suelos.
3. Los sistemas de óxidos incluyen suelos cuyas partículas de arcilla consisten de óxidos de hierro y aluminio o alófana, o minerales de silicatos laminares cubiertos con revestimientos gruesos y estables de tales óxidos. Estos sistemas son típicos de Andepts, y de familias oxídicas, ferríticas y gibbsíticas de Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles. Presentan una relación fuerte entre carga y pH. En algunos casos estos suelos pueden presentar carga positiva neta con un pH bajo, carga negativa neta con un pH alto, o no tener carga alguna. La carga actual depende del pH del suelo, la concentración de electrólitos y del pH en el punto cero de carga. Las adiciones de materia orgánica y aniones de sulfato fuertemente adsorbidos pueden incrementar la carga negativa neta sin alterar el pH del suelo. Estas relaciones son completamente diferentes a las de sistemas de silicatos laminares, que predominan en la zona templada.
4. Se cree que un sistema intermedio de intercambio iónico que consiste de una mezcla de los otros dos, llamado sistema de silicatos laminares con revestimiento de óxido, predomina en la mayoría de los suelos "rojos" de los trópicos, es decir, Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles y algunos Inceptisoles de mineralogía caolinítica, haloisítica o mixta, con una cantidad significativa de óxidos de hierro y aluminio. Los silicatos laminares están parcialmente revestidos con minerales de óxidos o tienen partículas definidas de óxidos adheridas a sus superficies o prensadas entre dos cristales de silicatos laminares. Las propiedades de intercambio son intermedias entre las de los otros dos sistemas, tanto con carga permanente como con carga dependiente del pH.

5. En la literatura tropical existe gran confusión debido a los diferentes métodos que se usan para estimar la capacidad de intercambio catiónico. Los métodos "oficiales" recomendados por la taxonomía de suelos de Estados Unidos incluye la extracción de cationes con soluciones tamponadas a pH de 7 u 8,2. Esas extracciones reflejan adecuadamente el estado de carga de un sistema de silicatos laminares o de cualquier suelo con pH de 7 u 8,2. Desafortunadamente sobrestiman considerablemente la CIC de suelos ácidos, con sistemas de óxidos o con revestimientos de óxidos, debido a la fuerte dependencia de su carga del pH. La CIC estimada con una sal no tamponada o a un pH cercano al verdadero pH de campo, llamada "CIC efectiva", es un parámetro mucho más realístico. Los cálculos de saturación de base fundamentados en las soluciones extractoras no tamponadas, tienden a subestimar considerablemente el nivel de bases de suelos ácidos. Se presentan correlaciones tentativas entre las soluciones extractoras.
6. Muchos suelos tropicales presentan una capacidad significativa de intercambio aniónico, particularmente en subsuelos de sistemas de óxidos. En estos subsuelos se pueden disminuir las pérdidas de nitratos por lixiviación.
7. El manejo de la capacidad de intercambio catiónico es crucial en muchos suelos tropicales que tienen valores bajos de CIC efectiva debido a su mineralogía o a textura gruesa. El encalado de suelos ácidos hasta niveles de 5,5 ó 6,0 pueden incrementar la CIC sin causar efectos adversos. La materia orgánica contribuye con la mayor parte de los sitios de intercambio en muchos Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles altamente meteorizados. El mantenimiento de la materia orgánica en tales suelos es la mejor manera de conservar los valores de CIC dentro de niveles razonables.

REFERENCIAS

- ASKENASY, P. E., DIXON, S. E., y McKEE, T. R. Spheroidal halloysite in a Guatemalan soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:799-803. 1973.
- BARBER, R. G., y ROWELL, D. L. Charge distribution and the cation exchange capacity of iron-rich kaolinitic soil. *J. Soil Sci.* 23:135-146. 1972.
- BESOAIN, E. Clay mineralogy of volcanic ash soils. In *Panel on Soils derived from volcanic ash in Latin America*. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969. pp. B1.1-B1.17.
- BLASCO, M. et al. Mineralogy of the soils of the Cauca Valley, Colombia. *Turrialba* 19:332-339. 1969.
- BLEEKER, P. The mineralogy of eight latosolic and related soils from Papua New Guinea. *Geoderma* 8:191-205. 1972.

- BORNEMISZA, E. y IGUE, K. Oxidos de hierro y aluminio libre en suelos tropicales. *Turrialba* 17:23-30. 1967.
- _____, LAROCHE, A., y FASSBENDER, H. W. Effects of liming on some chemical characteristics of a Costa Rican Latosol. *Proc. Crop. Soil Sci. Soc. Fla.* 27:219-226. 1968.
- _____. *Minerales de arcilla en suelos centroamericanos y de Panamá. Turrialba* 19:97-102. 1969.
- BRAMS, E. Continuous cultivation of West African soils: organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and Soil* 35:401-414. 1971.
- BUOL, S. W. Soil laboratory needs in tropical research. *Agron. Abst.* 1973: 111. 1973.
- CAMARGO, M. N., y FALESI, I. C. Soils of the Central Plateau and transamazonian highway of Brazil. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 25-44.
- CARRASCO, A. Distribution of electric charges in Chilean soils derived from volcanic ash. M.S. Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y. 1972. 101 p.
- CHATTERJEE, R. K., y GUPTA, D. S. Clay minerals in some western Uttar Pradesh soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 18:391-396. 1970.
- COLEMAN, N. T., y THOMAS, G. W. The basic chemistry of soil acidity. *Agron. Monogr.* 12:1-41. 1967.
- DAVIS, C. E., AHMAD, N., y JONES, R. L. Effects on exchangeable cations on the surface area of clays. *Clay Min.* 9:258-261. 1971.
- DeVILLIERS, J. M. The problem of quantitative determination of allophane in soils. *Soil Sci.* 112:2-7. 1971.
- D'HOORE, J. L., FRIPIAT, J. J., y GASTUCHE, M. C. Tropical clays and their iron oxide coverings. *Proc. Second Inter-Afr. Soil Conf.* 1:257-260. 1954.
- DOBROROLSKI, V. V. Mineralogical and geochemical properties of Kenya, Uganda, and Tanzania black soils. *Pochvovedenie* 1973(8):14-25. 1973.
- ESWARAN, H., y SYS, C. An evaluation of the free iron in tropical basaltic soils. *Pedologie* 20:62-85. 1970.
- _____, y CONINCK, F. de. Clay mineral formations and transformation in basaltic soils in tropical environments. *Pedologie* 21:181-210. 1971.
- FIELDER, M., SWINDALE, L. D., y RICHARDSON, J. P. Relations of colloidal hydrous oxides to the high cation exchange capacities of some tropical soils of the Cook Islands. *Soil Sci.* 74:197-205. 1952.
- FOX, R. L. Examples of anion and cation adsorption by soils of tropical America. *Trop. Agr. (Trinidad)* 51:200-210. 1974a.
- _____. Chemistry and management of soils dominated by amorphous colloids. *Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla.* 33:112-119. 1974b.
- GAIKAWAD, S. T., y GOVINDA RAJAN, S. V. Nature and distribution of silicon, aluminium and iron oxides in the lateritic soils from Durg district, Madhya Pradesh. *Indian J. Agr. Sci.* 14:1079-1084. 1971.
- GEBHARDT, H., y COLEMAN, N. T. Anion adsorption by allophanic tropical soils. I. Chloride adsorption. II. Sulphate adsorption. III. Phosphate adsorption. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:255-265. 1974.
- GREENLAND, D. J., OADES, J. M., y SHERWIN, T. W. Electron-microscope observations of iron oxides in red soils. *J. Soil Sci.* 19:123-126. 1968.
- HARADA, Y., y WADA, K. Release and uptake of protons by allophanic soils in relation to their cation exchange capacity and anion exchange capacity. *Soil Sci. Plant Nutr. (Tokyo)* 19:73-82. 1973.

- HINGSTON, F. J., POSHER, A. M., y QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. *J. Soil Sci.* 23:177-192. 1972.
- JONES, R. C., y UEHARA, G. Amorphous coatings on mineral surfaces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:792-798. 1973.
- KALOGA, B., y THOMANN, C. La physico-chimie du complexe absorbent dans les sols bruns eutrophes. *Cah. ORSTOM, Sér. Pedol.* 9:461-507. 1971.
- KANEHIRO, J., y SHERMAN, G. D. Effect of dehydration-rehydration on cation exchange capacity of Hawaiian soils. *Soil Sci. Amer. Proc.* 26:341-344. 1956.
- KENG, J. C. W., y UEHARA, G. Chemistry, mineralogy and taxonomy of Oxisols and Ultisols. *Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla.* 33:119-126. 1974.
- KINJO, T., y PRATT, P. F. Nutrate adsorption. I. In some acid soils of Mexico and South America. II. In Competition with chloride, sulfate and phosphate. III. Desorption, movement and distribution in Andepts. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:722-732. 1971.
- KITAGAWA, Y. The unit particle of allophane. *Amer. Mineralogist* 56:465-478. 1971.
- LEON, L. A. Chemistry of some acid tropical soils from Colombia. Ph.D. Thesis, University of California at Riverside, 1967. 191 p.
- _____, y COLEMAN, N. T. Adsorción aniónica en suelos ácidos de Colombia. *Fitotecnia Lat.* 8(3):70-77. 1972.
- MARTINI, J. A. Allocation of cation exchange capacity to soil fractions in seven surface soils of Panama and the application of the cation exchange factor as a weathering index. *Soil Sci.* 109:324-331. 1970.
- MATSUSAKA, Y., y SHERMAN, G. D. Titration curves and buffering capacities of Hawaiian soils. *Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 11. 1950.
- MATTSON, S. The relations between the electrokinetic behavior and the base exchange capacity of soil colloids. *J. Amer. Soc. Agron.* 18:458-512. 1926.
- _____, y PUGH, A. J. The laws of colloidal behavior. XIV. The electrokinetics of hydrous oxides and their ionic exchange. *Soil Sci.* 38:229-313. 1934.
- _____, y WICKLANDER, L. The pH and amphoteric behavior of soils in relation to the Donnan equilibrium. *Ann. Agr. Coll. Sweden* 8:1-54. 1940.
- MEHLICH, A., y THEISEN, A. A. Charge characteristics in relation to crystalline and amorphous soil constituents. Unpublished manuscript, North Carolina Department of Agriculture, Soil Testing Division, Raleigh, 1973.
- MEKARU, T. y UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:296-300. 1972.
- MILLER, E. V., y COLEMAN, N. T. Colloidal properties of soils from western Equatorial South America. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 16:239-244. 1952.
- MITCHELL, B. D., FARMER, V. C., y MACHARDY, W. J. Amorphous inorganic materials in soils. *Adv. Agron.* 16:327-383. 1964.
- PARFITT, R. L. Amorphous minerals in some Papua and New Guinea soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:683-686. 1972.
- PEREZ-ESCOLAR, R., y LUGO-LOPEZ, M. A. Influence of the degree of clay mineral crystallization and free oxides on the cation exchange capacity of Catalina and Cialitos soils. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 52:148-154. 1968.
- PRATT, P. F., y ALVAHYDO, R. Cation exchange characteristics of soils of São Paulo, Brazil. *IRI Res. Inst. Bull.* 31. 1966.

- PRATT, P. F., PETERSON, F. F., y HOLZLEY, C. S. Qualitative mineralogy and chemical properties of a few soils from São Paulo, Brazil. *Turrialba* 19:491-496. 1969.
- REEVE, N. G., y SUMMER, M. E. Cation exchange capacity and exchangeable aluminum in Natal Oxisols. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:38-42. 1971.
- RENAU, R. B., Jr., y FISKELL, J. G. A. Mineralogical properties of clays from Panama soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:501-505. 1972.
- RUSSELL, J. R. M. Cation exchange capacity measurements of some noncalcareous Rhodesian subsoils. *Rhodesian J. Agr. Res.* 11:77-82. 1973.
- SAWHNEY, B. L., FRINK, C. R., y HILL, D. E. Components of pH-dependent cation exchange capacity. *Soil Sci.* 109:272-278. 1970.
- _____, y NORRISH, K. pH-dependent cation exchange capacity: minerals and soils of tropical regions. *Soil Sci.* 112:213-215. 1971.
- SCHALSCHA, E. B., GONZALEZ, C., VERGARA, I. et al. Effects of drying on volcanic ash soils of Chile. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29:481-482. 1965.
- _____, PRATT, P. F., KINJO, T., y AMARN, J. Effect of phosphate salts as saturating solutions in cation exchange capacity determinations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:912-914. 1972.
- _____, PRATT, P. F., y SOTO, D. Effect of phosphate adsorption on the cation exchange capacity of volcanic ash soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:539-540. 1974.
- SHERMAN, G. D., MATSUSAKA, Y., IKAWA, H., y UEHARA, G. The role of the amorphous fraction in the properties of tropical soils. *Agrochimica* 8:146-163. 1964.
- SOIL SURVEY STAFF. Soil taxonomy (draft). Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, 1970.
- TAN, K. H. et al. The nature and composition of amorphous materials and free oxides in some temperate regions and tropical soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1:225-238. 1970.
- TANADA, T. Certain properties of the inorganic colloidal fraction of Hawaiian soils. *J. Soil Sci.* 2:83-96. 1952.
- UEHARA, G., SWINDALE, L. D., y JONES, R. C. Mineralogy and behavior of tropical soils. Seminar on Tropical Soils Research, International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria (mimeo), 1972.
- _____, y KENG, J. Management implications of soil mineralogy in Latin America. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 351-362.
- VAN RAIJ, B. Capacidade de troca de fracciones organicas e minerais do solos. *Bragantia* 28:85-112. 1969.
- _____, y PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:587-593. 1972.
- WADA, K. A structural scheme of soil allophane. *Amer. Mineralogist* 52:670-708. 1967.
- _____, y HARADA, Y. Effects of temperature on the measured cation exchange capacities of ando soils. *J. Soil Sci.* 22:109-117. 1971.
- _____, y TOKASHIKI, Y. Selective dissolution and difference infrared spectroscopy in qualitative mineralogical analysis of volcanic ash soil clays. *Goedermia* 7:199-213. 1972.
- WEAVER, R. M. Chemical and clay mineral properties of highly weathered soils from the Colombian Llanos Orientales. *Agron. Mimeo* 72-19. Cornell University, Ithaca, N.Y. 1972.

- WEAVER, R. M. Soils of the Central Plateau of Brazil: chemical and mineralogical properties. Agron. Mimeo 74-8. Cornell University, Ithaca, N.Y. 1974.
- WRIGHT, E. H. M., y FAWTY, M. N. Physical and physicochemical characteristics of some Sierra Leone soils. Sols Afr. 16:5-30. 1971.
- YUAN, T. L. Chemistry and mineralogy of Andepts. Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla. 33:101-108. 1974.
- ZELAZNY, L. W., y CALHOUN, F. G. Mineralogy and associated properties of tropical and temperate soils in the Western Hemisphere. Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla. 31:179-189. 1971.

CAPITULO 5

MATERIA ORGANICA DEL SUELO

Quando se menciona el tema de la materia orgánica en suelos tropicales inmediatamente surge un punto de vista muy común: los suelos tropicales tienen contenidos bajos de materia orgánica debido a las altas temperaturas y rápidas tasas de descomposición. Por lo tanto, hay que hacer el esfuerzo que sea necesario para conservar la poca materia orgánica existente y por consiguiente la conservación de la materia orgánica es esencial para la productividad de los suelos tropicales. Cuando esa declaración fue puesta en tela de duda por los científicos británicos en una reunión en Ibadán, Nigeria, en 1972, muchos funcionarios de Africa protestaron y pidieron que las observaciones herejes que se habían hecho no aparecieran en el informe. Cada lado tiene, por supuesto, evidencias para fundamentar su manera de pensar. Este capítulo examina los contenidos y los cambios de la materia orgánica en suelos tropicales e intenta especificar su relevancia en las prácticas de manejo.

CONTENIDO

Contrariamente al punto de vista ya mencionado, el contenido de materia orgánica en los suelos tropicales no ofrece mucha diferencia con los suelos de la zona templada. En 1930, Dean encontró que el contenido promedio de materia orgánica (M.O.) en los 30 cm superiores de 223 suelos hawaianos era de 3,75%. El contenido medio de varios cientos de capas arables de áreas údicas de Puerto Rico era de 3,54% de M.O. y 0,19% de N; y de áreas ústicas 1,84% M.O. y 0,20% de N (Smith et al., 1951). El contenido medio de 570 capas arables (0-30 cm) recolectados en Africa por Birch y Friend (1956) era de 3,36% M.O.; aproximadamente la mitad de ellos tenían más del 4% de M.O. en los 15 cm superiores. Todas estas cifras se comparan muy favorablemente con las de sus contrapartes en la zona templada.

Estudios extensivos de Jenny en los años cuarentas y cincuentas relacionaron el contenido de materia orgánica inversamente con la

temperatura media anual en suelos de los Estados Unidos. Sin embargo estas relaciones se derrumbaron cuando Jenny incluyó suelos de Costa Rica y de Colombia. Estos suelos eran más altos en materia orgánica de lo que predecían sus temperaturas medias anuales (Jenny et al., 1948).

En el Cuadro 5.1 se comparan los valores de carbono orgánico de Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles de Brasil y Zaire escogidos al azar, con los de Molisoles, Ultisoles y Alfisoles de Estados Unidos. Este cuadro indica que el contenido de carbono orgánico del metro superior de los Oxisoles no es significativamente diferente del de Molisoles de la región templada, y que no hay diferencia en este respecto entre Ultisoles y Alfisoles tropicales y de zonas templadas. Buol (1973) encontró una falta similar de diferencias en contenido de carbono orgánico entre los principales suelos de zonas templadas y tropicales.

CUADRO No. 5.1. Comparación de contenidos promedio de carbono orgánico (%C) de varios órdenes de suelos en Estados Unidos, Brasil y Zaire: cada cifra representa el promedio de 16 perfiles escogidos al azar. (Fuente: Wade y Sánchez (datos sin publicar).

Orden de suelo	Estados Unidos	Brasil	Zaire	Medias
0-15 cm profundidad				
Molisoles	2,44	—	—	2,44
Oxisoles	—	2,01	2,13	2,07
Ultisoles	1,58	1,61	0,98	1,39
Alfisoles	1,55	1,06	1,30	1,30
	DMS _{0,05} = 0,38			
0-100 cm profundidad				
Molisoles	1,11	—	—	1,11
Oxisoles	—	1,07	1,03	1,05
Ultisoles	0,49	0,88	0,45	0,61
Alfisoles	0,52	0,53	0,55	0,53
	DMS _{0,05} = 0,19			

Hay varias explicaciones de por qué los suelos tropicales son más altos en materia orgánica de lo que generalmente se cree. La más obvia es la ausencia de una relación directa entre el color y el contenido de carbono orgánico. El Cuadro 5.2 muestra que muchos Oxisoles y Ultisoles rojos tienen un contenido mayor de carbono orgánico

CUADRO No. 5.2. Contenidos de carbón orgánico de algunos perfiles de suelos tropicales representativos.

Suelo	Localización y Referencia	Horizonte (cm)	Carbono Orgánico (%)	N Total (%)	Razón C:N
OXISOLES					
Latosol rojo- amarillo	Brasil (FAO-UNESCO, 1971)	0-4	7,8	0,69	11
		4-12	2,7	0,20	13
		12-25	1,7	0,15	11
		25-80	1,0	0,08	12
		80-200	0,6	0,06	10
		200-270	0,3	0,06	5
Eustrustox	Brasil (Moura y Buol, 1972)	0-10	2,8	0,25	11
		20-30	1,3	0,15	9
		40-50	1,0	0,11	9
		80-90	0,6	0,07	8
		100-110	0,6	0,05	12
		120-130	0,6	0,05	12
Suelo ferralítico (arenoso)	Zaire (D'Hoore, 1964)	0-8	1,3	0,10	13
		8-23	0,8	0,05	16
		23-38	0,3	0,02	15
		38-85	0,1	0,01	10
		85-200	0,1	0,01	10
Haplorthox (Coto arcilla)	Puerto Rico (Beinroth, 1972)	0-13	2,4	0,25	10
		13-26	1,7	0,20	9
		26-43	1,0	0,14	7
		43-63	0,6	0,12	5
		63-91	0,5	0,11	4
ULTISOLES					
Tropohumult (arcilla)	Puerto Rico (Beinroth, 1972)	0-10	4,9	0,43	11
		10-23	2,0	0,21	9
		23-38	1,2	0,12	10
		38-63	0,6	0,07	9
		63-82	0,3	0,05	7
Podsol rojo- amarillo	Brasil (Sombroek, 1967)	0-2	3,0	0,26	12
		2-40	0,9	0,09	10
		40-100	0,5	0,05	10
		100-180	0,3	0,04	9
		180-230	0,2	0,02	9
Acrisol órtico (perfil 13)	Brasil (FAO, UNESCO, 1971)	0-10	1,3	0,13	10
		10-30	0,7	0,10	7
		30-45	0,5	0,07	7
		45-75	0,5	0,08	6
		75-155	0,2	0,06	3
		155-195	0,1	0,04	2

Continúa en página siguiente

CUADRO No. 5.2. Cont.

Suelo	Localización y Referencia	Horizonte (cm)	Carbono Orgánico (%)	N Total (%)	Razón C:N
Nitosol dústico	Brasil (FAO-UNESCO, 1971)	0-15	3,2	0,28	11
		15-40	1,1	0,12	9
		40-70	0,7	0,10	7
		70-160	0,5	0,07	7
		160-190	0,2	0,04	5
ALFISOLES					
Ultustalf Suelo ferrugi- noso tropical)	Senegal (D'Hoore, 1964)	0-6	1,0	0,07	14
		6-13	0,7	0,05	14
		13-31	0,4	0,03	13
		31-79	0,3	0,03	10
		79-117	0,3	0,03	10
		117-150	0,2	0,03	7
Nitosol eútrico (Terra Roxa estructurada)	Brasil (FAO-UNESCO, 1971)	0-19	1,5	0,18	8
		19-80	0,6	0,07	9
		80-134	0,4	0,05	8
		134-224	0,2	0,03	6
		224-250	0,2	0,05	4
MOLLI SOLES					
Valle del Cauca (Prom. de 71 muestras)	Colombia (Gómez et al., 1969)	0-20	2,5	0,22	11
		20-40	1,6	0,16	10
		40-70	1,1	0,11	10
Kastazozem háplico (Haplustoll)	Puno, Perú (FAO-UNESCO, 1971)	0-10	5,1	0,24	21
		10-25	2,7	0,15	18
		25-60	0,7	0,07	10
		60-80	0,1	0,03	3
VERTISOLES					
Vertisol chromico	Bahía, Brasil (FAO-UNESCO, 1971)	0-20	0,4	0,06	7
		20-70	0,3	0,05	6
		70-132	0,3	0,05	6
		132-142	0,2	0,06	3
Vertisol	Gezira, Sudán (D'Hoore, 1964)	0-2	0,3	0,03	10
		2-90	0,3	0,02	15
		90-130	0,4	0,03	13
		130-165	0,4	0,02	20
		165-185	0,2	0,01	20
		185-220	0,2	0,02	10
Chromusert (arcilla fraternidad)	Puerto Rico (Beinroth, 1972)	0-13	2,4	0,25	10
		13-26	1,7	0,20	9
		26-43	1,0	0,14	7
		43-63	0,6	0,13	5
		63-91	0,5	0,11	4

Continúa en página siguiente

CUADRO No. 5.2. Cont.

Suelo	Localización y Referencia	Horizonte (cm)	Carbono Orgánico (%)	N Total (%)	Razón C:N
INCEPTISOLES					
Andept	Guatemala (Palencia y Martini, 1970)	0-100	8,2	0,68	12
		100-200	2,4	0,14	17
Eutrandept (Waimea)	Hawaii (IICA, 1969)	0-5	13,0	1,18	11
		5-13	5,0	0,61	8
		13-20	4,8	0,52	9
		20-58	4,3	0,38	11
		58-88	3,2	0,26	12
		88-118	2,9	0,26	11
Dystrandept	Antioquia, Colombia (IICA, 1969)	0-10	12,9	0,9	14
		10-30	7,1	0,5	14
		30-60	1,6	0,3	13
		60-80	3,6	0,3	12
		80-120	3,5	0,3	12
		120-125	1,3	0,1	9
		125 +	0,5	0,1	8
Eutropept	Puerto Rico (Smith et al., 1951)	0-15	1,7	0,16	11
		20-30	1,0	0,11	9
		45-61	0,3	0,04	7
		91-106	0,4	0,03	9
ENTISOLES					
Arenosol álbico (arena Tiwiwid)	Guyana (FAO-UNESCO, 1971)	0-10	2,5	0,04	62
		10-18	1,7	0,02	85
		18-60	0,1	0,01	10
		60-120	0,0	-	-
Arenosoles ferrálicos	Sao Paulo, Brasil (FAO-UNESCO, 1971)	0-15	0,5	0,04	11
		15-49	0,3	0,03	10
		49-112	0,2	0,02	10
		112-148	0,2	0,02	10
		148-600	0,1	0,01	10
Fluvisol Tionics (Arcilla Mara)	Guyana (FAO-UNESCO, 1971)	0-3	7,2	0,29	25
		3-10	2,1	0,30	7
		10-30	0,8	0,24	3
		30-84	0,5	0,05	10
		84-100	1,4	0,09	15

que los Vertisoles negros. Como grupo, los Vertisoles tienen el menor contenido de materia orgánica. Desde 1930, Vageler sugirió que el humus puede ser incoloro.

Como grupo, los Andepts tienen el contenido más alto de materia orgánica de los suelos minerales. La alófana reacciona con los radicales orgánicos para formar complejos que permanecen relativamente

resistentes a la mineralización. Por lo tanto la materia orgánica tiende a acumularse en esos suelos. Bornemisza y Pineda (1969) mostraron una relación inversa entre la mineralización de la materia orgánica y el contenido de alófana. Aunque las causas de esta relación no son completamente claras, un bloqueo físico de las partículas orgánicas por la alófana puede tornar los materiales orgánicos parcialmente inaccesibles a los microorganismos. Munévar y Wollum (1976) probaron que la deficiencia extrema de fósforo, típica de estos suelos, inhibe el crecimiento microbiano, dando por resultado una tasa más baja de mineralización. Según Bornemisza y Pineda (1969) los suelos que Jenny estudió en Colombia y Costa Rica eran altos en alófana.

El contenido relativamente alto de carbono orgánico de algunos Oxisoles no se ha explicado satisfactoriamente. Por otra parte, puede estar involucrada de la interacción entre óxidos y materiales orgánicos por un lado, y niveles bajos de nutrimentos disponibles por otro. Resultados sin publicar de la Universidad del Estado de Carolina del Norte indican que las adiciones de fósforo y calcio aumentaron la mineralización del nitrógeno en un Oxisol de Brasil que es muy bajo en estos elementos. Como grupo, los Oxisoles ocupan el tercer lugar en carbono orgánico después de los Andepts y los Molisoles en el Cuadro 5.2.

La distribución del carbono orgánico en el perfil en relación a la vegetación natural es esencialmente la misma en regiones tropicales y templadas. Areas boscosas muestran una marcada acumulación de materia orgánica en el horizonte A como resultado de la caída de hojarasca y la naturaleza superficial de las raíces de los árboles forestales. Generalmente las sabanas y las praderas producen más carbono en el subsuelo debido a la descomposición de las raíces profundas de gramíneas. Este efecto puede ser menos marcado en sabanas tropicales con problemas de toxicidad de aluminio en el subsuelo.

ADICIONES Y DESCOMPOSICIONES

El contenido de carbono orgánico de un suelo en equilibrio con la vegetación es función de las adiciones y descomposiciones anuales de carbono orgánico. Las siguientes fórmulas explican esas relaciones:

$$C = \frac{bm}{k}$$

donde:

$$a = bm$$

C = porcentaje de carbono orgánico del suelo en equilibrio (ton/ha);

- b = cantidad anual de materia orgánica fresca agregada al suelo (ton/ha);
 m = tasa de conversión de materia orgánica fresca a carbono orgánico del suelo (porcentaje);
 a = adición anual de carbono orgánico del suelo (ton/ha);
 k = tasa anual de descomposición del carbono orgánico del suelo.

En el Cuadro 5.3 se puede observar la magnitud de estos diversos parámetros. La adición anual de materia orgánica fresca como hojarasca, ramas y raíces muertas (b) es del orden de 5 ton/ha de materia seca en bosques tropicales y alrededor de 1 ton/ha en bosques templados. Los ámbitos mencionados en la literatura son de 3 a 15 ton/ha en bosques tropicales, y de 1 a 8 ton/ha en bosques templados. Las sabanas tropicales añaden de 0,5 a 1,5 ton/ha; mientras que las praderas templadas alrededor de 1,5 ton/ha.

Por lo tanto, existe una relación inversa entre la cantidad de materia fresca que suministran las clases de vegetación en las zonas tropical y templada. Los bosques tropicales údicos suministran al suelo alrededor de cinco veces la cantidad de materia orgánica fresca que proporcionan sus contrapartes en la zona templada, mayormente en forma de hojarasca en ambos casos. Esta diferencia se debe a la mayor tasa de crecimiento de los bosques tropicales. Las adiciones de materia orgánica fresca en pasturas es principalmente en forma de descomposición de raíces. Las praderas templadas desarrollan sistemas radiculares más abundantes, mientras que el crecimiento en las sabanas tropicales se encuentra frecuentemente limitado por la baja disponibilidad de nutrimentos. Las quemadas anuales en las sabanas reduce aún más las adiciones de materia orgánica fresca.

La tasa de conversión (m) de materia orgánica fresca a carbono orgánico del suelo (humus) es del orden de 30 a 50% por año. Este ámbito es constante en los distintos ambientes. Por lo tanto, las adiciones anuales de carbono orgánico del suelo o humus (a), son cerca de 4 veces mayores en los bosques tropicales que en los templados y son bastante similares en las pasturas tropicales y templadas.

Las tasas anuales de descomposición del carbono orgánico del suelo (k) varían considerablemente, con un ámbito del 2 al 5% en los bosques tropicales, con la excepción del ejemplo colombiano, que es muy bajo (0,5%) debido a la presencia de alóftana en ese suelo particular. Los valores k para los bosques templados oscilan de 0,4 a 1%, probablemente como resultado de las bajas temperaturas. La tasa de descomposición de las sabanas tropicales tiene un promedio de 1,2%, o sea tres veces la de las praderas templadas.

Las diferencias entre las regiones tropicales y templada son en primer lugar función de las fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, debe recordarse que las tasas k durante el verano en la zona templada pueden ser más altas que en las regiones tropicales debido a las mayores temperaturas, pero las tasas totales de descomposición

anual son menores a causa del invierno. Los valores más altos de k en bosques tropicales údicos que en los ústicos reflejan el efecto de la estación seca en el retardo de la velocidad de descomposición del carbono orgánico a consecuencia de la baja humedad. Los valores más bajos de k en las sabanas tropicales también reflejan el régimen ústico de la humedad del suelo.

El contenido del carbono orgánico en equilibrio en la capa arable (C) puede calcularse con la fórmula anterior. Los valores del Cuadro 5.3 ponen de manifiesto la interacción entre factores ambientales y además reflejan la mineralogía, contenido de arcilla y otros factores del suelo. En general cuanto más alto es el contenido de arcilla y mayor la proporción de óxidos y alófana, más bajos serán los valores de k . De los tres ejemplos de bosques tropicales, el suelo de Colombia tenía un alto contenido de alófana, el suelo de Ghana era de textura media y el suelo de Zaire tenía textura arenosa.

Por consiguiente, esta similitud entre suelos tropicales y templados puede entenderse en términos de regímenes de temperatura y humedad y de acuerdo con la regla empírica de que por cada aumento de 10°C de temperatura la tasa de actividad biológica se duplica. En las regiones templadas las bajas temperaturas invernales reducen considerablemente la actividad biológica. En el 78% de los trópicos que tienen un régimen de humedad del suelo, ústico o arídico la falta de humedad durante la época seca produce un efecto semejante. Durante la estación lluviosa tropical las temperaturas de la capa arable y del aire, son similares a las temperaturas correspondientes al verano en las regiones templadas, pero raras veces tan altas. Para el 22% de las áreas tropicales con régimen de humedad del suelo údico la explicación es un tanto diferente. La mayoría de estas áreas está cubierta por bosques pluviales tropicales. Ni la temperatura ni la humedad limitan la acumulación y descomposición de materia orgánica en ningún momento. Estos bosques producen aproximadamente 5 veces la biomasa y la materia orgánica por año de los bosques templados. Sin embargo la velocidad de descomposición de la materia orgánica es también 5 veces mayor que en los bosques templados. Por lo tanto los contenidos de equilibrio son similares (Sánchez y Buol, 1975).

EFFECTOS DE LA LABRANZA

Los valores de equilibrio comentados previamente cambian cuando a y k cambian a consecuencia de la labranza. Los valores anuales de k aumentan con temperaturas y humedad más altas, aeración, labranza, lixiviación y desnitrificación mayores. Las adiciones anuales de carbono orgánico se reducen drásticamente cuando los bosques se transforman en cultivos; los residuos de los cultivos apenas proporcionan una fracción de las 5 ton/ha de materia seca que anteriormente suplía la hojarasca del bosque. En las sabanas, la exposición y la aradura dan

CUADRO No. 5.3. Estimaciones de adiciones anuales, tasas de descomposición y niveles de equilibrio del carbono orgánico en la capa arable en algunas localidades tropicales y templadas. (Fuente recalculado de datos de Greenland y Nye, 1959).

Localización	<i>m</i> Tasa de descomposición de materia orgánica fresca en carbono orgánico del suelo (%)		<i>a</i> Adición de carbono orgánico del suelo (ton/ha)	<i>k</i> Tasa de descomposición de carbono orgánico del suelo (%)	<i>C</i> carbono orgánico del suelo en equilibrio (tons/ha)
	<i>b</i> Adición de materia orgánica descompuesta (ton/ha)				
Bosque tropical					
Ghana (Ustico)	5,28	50	2,64	2,5	106
Zaire (Udico)	6,05	47	2,86	5,2	55
Colombia (Udico Andept)	3,85	51	1,97	0,5	394
Bosque templado					
California (roble)	0,75	47	0,35	0,4	88
California (pino)	1,65	52	0,86	1,0	86
Sabana tropical					
Ghana (1250 mm lluvia)	1,43	50	0,71	1,3	55
Ghana (850 mm lluvia)	0,44	43	0,19	1,2	16
Pradera templada					
Minnesota (870 mm lluvia)	1,42	37	0,53	0,4	134
					3,0

por resultado un aumento cuádruple de k relativo a los valores de equilibrio. El Cuadro 5.4 presenta algunos ejemplos de tasas de descomposición con la labranza. Un suelo sin vegetación de Zaire tenía una tasa de descomposición del carbono orgánico del 13% en el mismo sitio a que se refiere el Cuadro 5.3, en que la tasa era sólo de 5,7% bajo bosque. Una rotación de maíz y yuca de 7 años también duplicó el valor de k del bosque no disturbado de Ghana, anotado en el Cuadro 5.3. Sin embargo, en Trinidad la rotación de cultivos leguminosos dio por resultado valores normales de k concordantes con la experiencia de la región templada. El Cuadro 5.4 también muestra que los valores de k en áreas de sabana oscilan entre el 1 y el 4% por año, mientras que en la región templada las tasas pocas veces suben al 3%. La Fig. 5.1 presenta los efectos generales de la labranza en el contenido de carbono orgánico en el perfil de dos suelos de Africa Occidental.

CUADRO No. 5.4. Tasas de descomposición del carbono orgánico del suelo bajo varios años de cultivo, en algunas capas arables de suelos tropicales y templados. (Fuente: Greenland y Nye, 1959).

Localidad	Tratamiento	Años bajo cultivo	Tasa k de descomposición (%/año)
Bosques tropicales			
1. Zaire	Barbecho sin vegetación	3	12,8
2. Ghana	Rotación maíz-yuca	7	4,7
3. Trinidad	Rotación de cultivos con leguminosas	6	2,6
4. Trinidad	Rotación de cultivos con leguminosas	12	1,8
Sabanas tropicales			
5. Ghana	Rotación de cultivos	7	4,0
6. Senegal	Maní continuo	6	6,6
7. Sudán	Rotación algodón-maní	6	2,5
Zona templada			
8. Missouri	Maíz continuo	25	2,8
9. Missouri	Rotación de cultivos	25	0,8
10. Francia	Rotación de cultivos	14	1,4

Sin embargo, la agricultura nómada no causa un agotamiento sustancial de la materia orgánica del suelo. Después de analizar 100 sitios de agricultura nómada tradicional en áreas boscosas de Liberia, Reed (1951) encontró que el contenido de carbono se mantenía en alrededor del 75% de los niveles de equilibrio. Cuando el exceso de población estrecha la relación años en cultivo: año en barbecho, el contenido de carbono orgánico bajó al 50% de los valores originales.

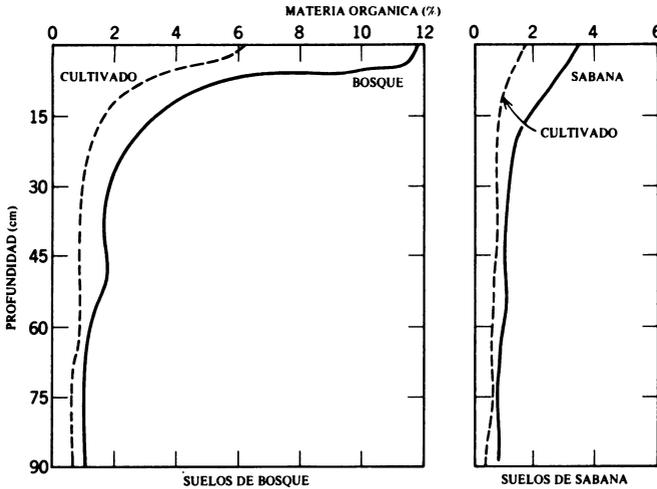


Fig. 5.1. Distribución de la materia orgánica en perfiles de suelos típicos de bosque y de sabana en África Occidental. (Fuente: Brams, 1972).

La fertilización inorgánica puede aumentar los valores de a por un margen considerable debido a su efecto al agregar al suelo más residuos de cultivos, incluyendo la descomposición de raíces de las plantas cultivadas. En sistemas bien manejados también se puede reducir la tasa de descomposición k . Un estudio a largo plazo de suelos cultivados en té en Sri Lanka e ilustrado en la Fig. 5.2 muestra que

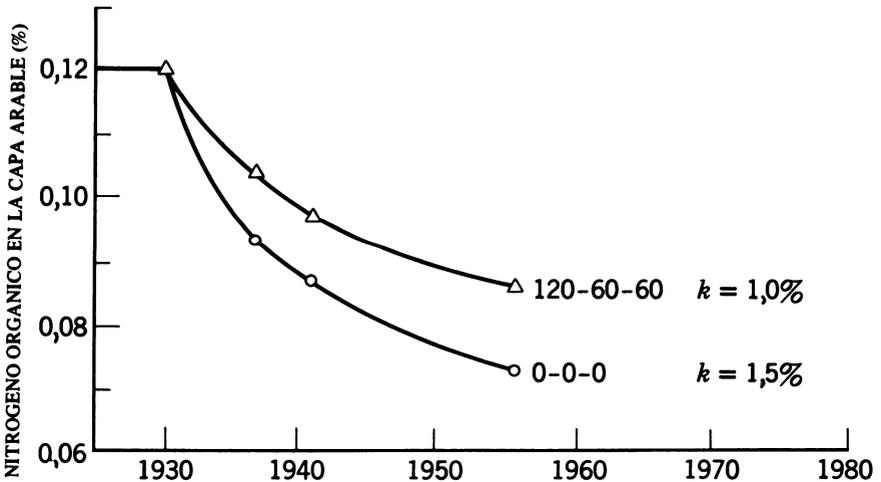


Fig. 5.2. Cambios a largo plazo en contenidos de nitrógeno orgánico en plantaciones de té, con y sin fertilización, en Assam, India. (Fuente: Gokhale, 1959).

los niveles más altos de equilibrio del nitrógeno orgánico se obtuvieron cuando el té se fertilizó anualmente con 120-60-60 kg/ha de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente. Las parcelas sin fertilizar se mantuvieron perdiendo nitrógeno orgánico a razón de 1,5%, con contenidos correspondientemente más bajos de nitrógeno total conforme se aproximaban al equilibrio (Gokhale, 1959). Las parcelas fertilizadas tenían una tasa de descomposición del 1,0%. Este ejemplo subraya el hecho de que la materia orgánica puede mantenerse a niveles altos en el trópico con buenas prácticas de manejo.

EFFECTOS PROVECHOSOS

El agotamiento rápido del carbono orgánico de la capa arable a razón del 5 al 10% anual puede producir efectos dañinos en los cultivos sin fertilización. Los investigadores que trabajan en lugares donde tal cosa ocurre, ponen énfasis en la necesidad de reducir el descenso de la materia orgánica del suelo. Greenland y Dart (1972) han señalado los siguientes beneficios de la materia orgánica para la agricultura no fertilizada:

- a. La materia orgánica suple la mayor parte del nitrógeno y del azufre y la mitad del fósforo, que absorben los cultivos no abonados. El patrón de lenta liberación del nitrógeno y del azufre ofrece una ventaja definitiva sobre los fertilizantes solubles.
- b. La materia orgánica suministra la mayor parte de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos ácidos altamente meteorizados. Los descensos rápidos en materia orgánica dan por resultado una reducción pronunciada en la CIC.
- c. Mediante la formación de complejos con materia orgánica, los óxidos amorfos no se cristalizan. La fijación de fósforo por éstos óxidos disminuyen cuando los radicales orgánicos bloquean las cargas de fijación.
- d. La materia orgánica contribuye a la agregación del suelo y de esa manera mejora las propiedades físicas y reduce la susceptibilidad a la erosión en suelos arenosos.
- e. La materia orgánica modifica las propiedades de retención del agua, particularmente en suelos arenosos. En Ghana la capacidad de retención de agua del suelo disminuyó del 57 al 37% cuando la materia orgánica del suelo bajó del 5 al 3%.
- f. La materia orgánica puede formar complejos con los micronutrientes, lo cual evita su lixiviación.

A pesar de todas estas razones válidas, la materia orgánica del suelo es de mayor importancia en sistemas de manejo que usan fertilizantes en forma efectiva y económica, como en Ultisoles arenosos del sureste de Estados Unidos. No hay duda de que la materia orgánica es algo bueno cuando está presente; pero si no hay mucha, hay que contrapesar los medios de aumentarla contra las prácticas de fertilización inorgánica y la aplicación de cubiertas protectoras (mulch). Cabe recalcar que las buenas prácticas de manejo aumentan la materia orgánica del suelo.

APLICACIONES DE ABONOS ORGANICOS

La manera tradicional de aumentar la materia orgánica del suelo es agregando materiales frescos sin descomponer como estiércol, compost o materiales vegetales incorporados como abono verde. La aplicación de estiércol es una práctica antigua en Asia tropical, principalmente en cultivos de arroz inundado. Se han hecho muchas evaluaciones de tales prácticas en relación al uso de fertilizantes inorgánicos principalmente en India y Africa.

En el Cuadro 5.5 se presenta un ejemplo típico que muestra los efectos de estiércol continuo vs. fertilización inorgánica durante 10 años en el rendimiento de arroz inundado y en las propiedades de un Vertisol. Una cantidad anual de 5,6 ton/ha de estiércol aumentó el rendimiento tanto como lo hizo la fertilización con nitrógeno o con fósforo. Tanto el tratamiento con estiércol como con fertilizante aumentaron ligeramente el carbono orgánico y el nitrógeno orgánico del suelo.

CUADRO No. 5.5. Efectos de 10 años de aplicaciones de estiércol y fertilizantes en la producción de arroz inundado y en las propiedades de un Vertisol en Ragwai, Madhya, Pradesh, India. (Fuente: adaptado de Shinde y Ghosh, 1971).

Aplicación anual	Rendimiento de arroz (ton/ha)	C orgánico (%)	N total (%)	P disponible (Olsen) (ppm)	CIC (meq/100 g)
Nada	0,88	0,07	0,063	10	31
Estiércol (5,6 ton/ha)	1,49	1,15	0,066	12	31
N (67 kg/ha)	1,55	1,12	0,066	11	31
P ₂ O ₅ (67 kg/ha)	1,57	1,09	0,066	12	32

En el otro extremo del espectro del suelo, Pichot, (1971) llevó a cabo un estudio similar en un suelo ferralítico (Oxisol) del Imperio

Central Africano, en que se cultivó una rotación de maíz y arroz de secano durante 5 años. Los resultados que aparecen en el Cuadro 5.6 indican una ligera superioridad a favor de la aplicación anual de 60 ton/ha de estiércol en comparación con la aplicación anual de 120-160-160 kg/ha de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente. La aplicación de estiércol aumentó el carbono orgánico del suelo, del nitrógeno orgánico, y del calcio intercambiable, lo cual dio por resultado un significativo incremento en el pH. Aparentemente el estiércol tenía una cantidad considerable de calcio. Pichot no pudo concluir por qué la aplicación del estiércol fue ligeramente superior, pero sus datos sugieren claramente que el contenido del calcio del estiércol fue una causa importante.

CUADRO 5.6. Efectos de fertilizantes y estiércol en la producción de cereales y en las propiedades del suelo después de 5 años de aplicaciones continuas en un suelo ferralítico (Oxisol) de Boukoko, Africa Central. (Fuente: adaptado de Pichot, 1971).

Aplicación anual	Rendimiento acumulativo de granos en 5 años (Ton/ha)		Carbono orgánico del suelo (%)	N total (%)	pH del suelo	Ca intercambiable	K intercambiable
	maíz	arroz					
Nada	5,82	5,94	0,95	0,097	5,2	1,23	0,11
60-80-80 kg N, P ₂ O ₅ K ₂ O/ha	9,06	9,07	0,87	0,091	4,8	0,98	0,16
120-160-160 kg N, P ₂ O ₅ K ₂ O/ha	11,19	11,44	0,93	0,100	4,9	1,44	0,20
Estiércol (60 ton./ha)	13,12	10,47	1,37	0,160	5,7	2,91	0,34

Los ejemplos anteriores son típicos de investigaciones con estiércol. Los niveles generales de rendimiento son bajos; no se indicó la composición nutritiva del estiércol. Cuando la aplicación de estiércol fue superior a la fertilización no se dieron razones que explicaran el por qué. Por otra parte, ambos ejemplos ponen de manifiesto que tanto el carbono como el nitrógeno orgánico pueden aumentarse con la aplicación de estiércol, pero también con la fertilización.

Algunas comparaciones de largo plazo en Africa tomaron en cuenta la composición nutritiva del estiércol o del abono verde empleados (Djokoto y Stephens, 1961; Stephens, 1969; Heathcote, 1970). Ellos

muestran que las respuestas de los cultivos al estiércol puede explicarse en términos de su composición nutritiva, particularmente sus contenidos de potasio y fósforo. Por ejemplo, Stephens (1969) encontró en 18 experimentos a largo plazo, en Uganda, que las aplicaciones de estiércol eran superiores a los fertilizantes químicos. El estiércol suministró 75 kg de K/ha por año, mientras que la mezcla de fertilizantes usada suplió solamente 25 kg de K/ha a suelos deficientes en potasio. En tales casos la elección se basa esencialmente en la fuente que proporcionan los nutrimentos necesarios, la disponibilidad de fertilizantes químicos vs. la disponibilidad de estiércol, su relativa composición nutritiva, costo de los fertilizantes, y costos de transporte. En muchas ocasiones puede resultar más económico aplicar los 50 kg/ha de K que aplicar e incorporar grandes cantidades de estiércol. Los resultados del Cuadro 5.6 sugieren que encalando hasta un pH de 5,5 puede dar el mismo resultado por varios años que la aplicación de grandes cantidades de estiércol cada año.

Otra razón común que se cita para los efectos beneficiosos del estiércol es el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo. Desafortunadamente este autor no ha encontrado datos que indiquen que los aumentos de rendimientos con la aplicación de estiércol estén directamente relacionados con el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo. Sin embargo, hay información adecuada que cuantifica los efectos beneficiosos de aplicaciones de estiércol a largo plazo sobre las propiedades físicas de varios suelos. Algunos de los resultados que aparecen en el Cuadro 5.7 indican que la aplicación de estiércol durante un tiempo largo aumentó la estabilidad de los agregados, la porosidad, la cantidad de agua disponible, y que disminuyó

CUADRO No. 5.7. Efectos de aplicaciones de estiércol durante largo tiempo en las propiedades físicas de algunos suelos de India. (Fuente: adaptado de Biswas y Khosla, 1971).

Suelo y localización	Estiércol aplicado anualmente		Carbono orgánico (%)	Agregado estable en agua (%)	Densidad aparente (g/cc)	Espacio poroso (%)	Conductividad hidráulica (cm/hr)	H ₂ O disponible (0,1 - 15 bares) (%)
	(ton/ha)	pH						
Aluvial (Saborer)	0	7,8	0,6	26	1,47	46	0,43	28
	74	7,5	2,9	56	1,29	50	0,47	37
Vertisol (Poonal)	0	8,2	0,5	22	1,26	53	0,06	29
	45	8,0	0,6	33	1,18	56	0,10	31
"Rojo" (Bihar)	0	5,8	0,6	29	1,37	49	0,33	21
	9	5,7	0,7	33	1,30	51	0,50	23
"Laterítico" (Orissa)	0	4,8	0,3	22	1,53	42	1,58	13
	9	5,5	0,5	24	1,31	50	2,16	14

la densidad aparente en algunos suelos de India. Los resultados fueron particularmente provechosos en suelos aluviales de textura media en términos de disminución de la densidad aparente, y en Vertisoles arcillosos en los que casi se duplicó la conductividad hidráulica. Los beneficios físicos en suelos "rojos" y "lateríticos" (Alfisoles, Oxisoles) también fueron considerables.

La incorporación de abonos verdes con frecuencia resulta efectiva solamente para el siguiente cultivo y no para la rotación completa. Vine (1953) consideró de valor dudoso el empleo de 3 meses en hacer crecer un cultivo para abono verde que suministra 25 kg/ha de N al cultivo siguiente, tomando en cuenta que durante ese tiempo se puede cosechar un cultivo adicional, y el costo relativamente bajo de tal dosis de nitrógeno cuando hay disponibilidad de fertilizantes. En la mayoría de los suelos la incorporación de abono verde requiere una buena cantidad de energía. También requiere que el agricultor comprenda el valor de un cultivo que no va a producirle un ingreso directo.

Quizás el procedimiento de mayor valor para conservar la materia orgánica cuando el suelo se mantiene bajo cultivo, es proporcionar una capa protectora superficial (mulch) que baje la temperatura del suelo lo suficiente para evitar aumentos altos en la tasa k de descomposición y que además le proteja contra la erosión.

Las recomendaciones anteriores tienen aplicación en sistemas agrícolas en pequeña escala y mano de obra intensiva. Cuando la mecanización es factible y hay disponibilidad de fertilizantes a precios razonables, no hay razón para considerar la conservación de la materia orgánica como uno de los objetivos principales del manejo. La experiencia con suelos bajos en materia orgánica del sureste de Estados Unidos y de la costa del Perú indica que esto es el caso. La controversia sobre la importancia de la materia orgánica es esencialmente una cuestión económica. Sin embargo, con los costos altos de los fertilizantes actualmente, el aspecto económico se está volviendo cada vez más importante en áreas tropicales.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El contenido de materia orgánica en suelos de los trópicos es similar al de la región templada. Los Oxisoles altamente meteorizados tienen contenidos mayores de materia orgánica de lo que pueden indicar sus colores rojizos.
2. Los factores que afectan el contenido de carbono orgánico de los suelos pueden analizarse en términos de adiciones anuales de carbono orgánico y de las tasas anuales de descomposición. Las adiciones anuales de carbono orgánico que reciben los suelos

son aproximadamente 5 veces mayores en los bosques tropicales que en los templados. Debido a la falta de bajas temperaturas o de limitaciones de humedad durante todo el año, la tasa de descomposición del carbono orgánico es 5 veces mayor en bosques tropicales údicos que en bosques templados. En consecuencia el equilibrio del contenido de materia orgánica es similar.

3. En ambientes ústicos la falta de humedad durante la estación seca disminuye la tasa de descomposición del carbono orgánico, como lo hacen las temperaturas bajas durante el invierno en la región templada. Las tasas anuales de descomposición en ambientes tropicales ústicos son alrededor de la mitad de las de ambientes tropicales údicos. Debido a las bajas adiciones de carbono orgánico a causa de las quemadas anuales, los suelos bajo sabanas tropicales por lo general tienen contenidos menores de carbono orgánico que suelos bajo bosques tropicales o praderas templadas.
4. El desmonte y el cultivo disminuyen las adiciones de carbono orgánico, y por lo menos duplican su tasa de descomposición. La disminución de la materia orgánica es muy rápida, a menos que se apliquen algunas prácticas de manejo. En sistemas tradicionales de agricultura nómada, la disminución de la materia orgánica es nula. Las prácticas que tienen como objetivo mantener el suelo cubierto, y la fertilización sostenida reduce la tasa de disminución de materia orgánica a un nivel que deja de ser preocupante.
5. En suelos no fertilizados los efectos beneficiosos de la materia orgánica consisten en el suministro de la mayor parte del nitrógeno y el azufre a las plantas, mantenimiento de la capacidad de intercambio catiónico, bloqueo de los sitios de fijación de fósforo, mejoramiento de la estructura en suelos deficientemente agregados, y la formación de complejos con los microelementos que impiden su lixiviación.
6. El mantenimiento de la materia orgánica es esencial en la agricultura sin fertilizantes. También es importante en suelos con CIC baja, en los que la mayoría de las cargas negativas están en los radicales orgánicos, y en suelos arenosos de agregación deficiente susceptibles a la compactación. En suelos que no presentan estos problemas, las prácticas de fertilización económicamente viables disminuyen la importancia de conservar la materia orgánica. En realidad, las prácticas adecuadas de fertilización aumentan el contenido de materia orgánica debido al aumento en la descomposición de raíces y residuos de las cosechas.

7. En los trópicos la aplicación de estiércol puede resultar efectiva. La mayoría de los datos experimentales indican que el efecto del estiércol está relacionado con su composición nutritiva. La elección entre abonos orgánicos, inorgánicos es cuestión de contenido relativo de nutrimentos de aspecto económico, incluyendo costo de transporte. Las aplicaciones de abonos orgánicos a largo plazo mejoran las propiedades físicas del suelo.
8. Los abonos verdes generalmente son efectivos para el cultivo siguiente. Esta práctica se limita a agricultura mecanizada porque las grandes necesidades de energía son generalmente demasiado grandes para operación manual y se dispone de otras alternativas más provechosas en el uso de la tierra.
9. La cubierta protectora (mulch) conserva la materia orgánica al disminuir la temperatura del suelo. El uso de cubiertas protectoras es aplicable a una área más extensa que los abonos orgánicos.

REFERENCIAS

- BARTHOLOMEW, W. V. Soil nitrogen and organic matter. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 63-81.
- BEINROTH, F. H. The general pattern of the soils of Puerto Rico. *Trans. Fifth Caribbean Geol. Conf. Geol. Bull.* 5:225-229. 1972.
- BIRCH, H. F., y FRIEND, M. T. The organic matter and nitrogen status of East African soils. *J. Soil Sci.* 7:156-167. 1956.
- BISWAS, T. D., y KHOSLA, B. K. Building up of organic matter status of the soil and its relation to the soil physical properties. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval.* (New Delhi) 1:831-842. 1971.
- BLASCO, M. Efecto de la humedad sobre la mineralización del carbono en suelos volcánicos de Costa Rica. *Turrialba* 21:7-12. 1971.
- BORNEMISZA, E. y PINEDA, R. The amorphous minerals and the mineralization of nitrogen in volcanic ash soils. In *Panel on soils derived from volcanic ash in Latin America*. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969. pp. B7.1-B7.7.
- BRAMS, E. A. Continuous cultivation of West African soils: organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and Soil* 35:401-414. 1971.
- _____. Cation exchange as related to the management of tropical soils. Mimeographed lecture presented at the Tropical Soils Institute, University of Puerto Rico, Prairie View A and M University, Texas, 1972.
- BUOL, S. W. Soil genesis, morphology, and classification. In P. A. Sanchez (ed.). *A review of soils research in tropical Latin America*. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 1-38.
- CHARREAU, C. Problèmes posés par l'utilisation agricoles des sols tropicaux par des cultures annuelles. *Agron. Tropicale (France)* 27:905-929. 1972.
- DEAN, A. L. Nitrogen and organic matter in Hawaiian pineapple soils. *Soil Sci.* 30:439-442. 1930.

- D'HOORE, J. D. Soil map of Africa-explanatory monograph. Comm. Tech. Cooperation in Africa Publ. 93. Lagos, Nigeria, 1964.
- DIAZ-ROMEU, R., BALERDI, F., y FASSBENDER, H. W. Contenido de materia orgánica y nitrógeno en suelos de América Central. Turrialba 20:185-192. 1970.
- DJOKOTO, R. K., y STEPHENS, D. Thirty long term fertilizer experiments under continuous cropping in Ghana. I. Crop yields and responses to fertilizers and manures. II. Soil studies in relation to the effects of fertilizers and manures on crop yields. Emp. J. Exptal. Agr. 29:181-196, 245-258. 1961.
- ENDREDDY, A. S. de. The organic matter content of Gold Coast soils. Trans. 5th Int. Congr. Soil Sci. 2:457-463. 1954.
- FAO-UNESCO. Soil map of the world. Vol IV: South America. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Paris, 1971.
- GOKHALE, N. G. Soil nitrogen status under continuous cropping and with manuring in the case of unshaded tea. Soil Sci. 87:331-333. 1959.
- GOMEZ, J. A., ZORRILLA, D. F., y FLOR, C. A. Algunas consideraciones sobre la materia orgánica en los suelos cultivados con maíz en el Valle del Río Cauca. Rev. ICA 4:3-10. 1969.
- GREENLAND, D. J., y NYE, P. H. Increases in carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. J. Soil Sci. 9:284-299. 1959.
- _____, y DART, P. J. Biological and organic aspect of plant nutrition in relation to needed research in tropical soils. Tropical Soils Research Seminar. International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria (mimeo), 1972.
- HEATHCOTE, R. G. Soil fertility under continuous cultivation in northern Nigeria. I. The role of organic manures. Exptal. Agric. 6:229-237. 1970.
- IICA. Panel on soils derived from volcanic ash in Latin America. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969.
- JENNY, H., BINGHAM, F. T., y PADILLA-SARAVIA, B. Nitrogen and organic matter contents of equatorial soils of Colombia, South America. Soil Sci. 66:173-186. 1948.
- _____, GESSEL, S. P., y BINGHAM, F. T. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. Soil Sci. 68:419-432. 1949.
- _____. Causes of the high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. Soil Sci. 69:63-69. 1950.
- _____. Comparison of soil nitrogen and carbon in tropical and temperature regions as observed in India and America. Missouri Agr. Exp. Sta. Bull. 765. 1961.
- JONES, M. L. The organic matter content of the savanna soils of West Africa. J. Soil Sci. 24:42-53. 1973.
- Le MARE, P. H. Long term experiment on soil fertility and cotton yields in Tanzania. Exptal. Agr. 8(4):299-310. 1972.
- MAURYA, P. A., y GHOSH, A. B. Effect of long-term manuring and rotational cropping on fertility status of alluvial calcareous soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 20(1):31-43. 1972.
- MOURA, W. y BUOL, S. W. Studies of a Latosol Roxo (Eustrustox) in Brazil. Experimentiae 13:201-247. 1972.
- MUNEVAR, F. y WOLLUM, A. G. Effects of the addition of phosphorus and inorganic nitrogen on the carbon and nitrogen mineralization of some Andepts from Colombia. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. (en prensa). 1976.

- NYE, P. H. Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and Soil* 13:333-345. 1961.
- _____, y GREENDLAND, D. J. The soil under shifting cultivation. *Commonwealth Agr. Bur. Tech. Commun.* 51. Harpenden, England, 1960. pp. 46-61.
- OKIGDO, N. Maize experiments in the Nsukka plains, Nigeria. III. The effect of kinds of mulch on the yield of maize in the humid tropics. *Agron. Tropicale (France)* 27:1036-1048. 1972.
- PALENCIA, A. J., y MARTINI, J. A. Características morfológicas, físicas y químicas de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas en Centroamérica. *Turrialba* 20:325-332. 1970.
- PICHOT, J. Etude de l'évolution du sol en présence de fumures organiques ou minérales. Cinq années d'experimentation á la Station de Bouakoko (République Centrafricaine). *Agron. Tropicale (France)* 26:736-754. 1971.
- RAHEJA, S. K., PRASAD, R., y JAIN, H. C. Long term fertilizer studies in crop rotations. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:881-903. 1971.
- REED, W. E. Reconnaissance soil survey of Liberia. *U.S. Dept. Agr. Inf. Bull.* 66. 1951.
- SANCHEZ, P. A. y BUOL, S. W. Soil of the tropics and the world food crisis. *Science* 188:598-603. 1975.
- SATYANARAYA, K. V. S., SWAMINATHAN, K., y VISWA NATH B. Carbon and nitrogen status of Indian soils and their profiles. *Indian J. Agr. Sci.* 16:316-327. 1946.
- SHINDE, D. A. y GHOSH, A. B. Effect of continuous cropping and manuring on crop yield and characteristics of a medium black soil. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:905-916. 1971.
- SINGH, C. y VERMA, S. S. Long range effect of green manuring on soil fertility and wheat yields in black cotton soils under rainfed conditions. *Indian J. Agron.* 14:159-164. 1969.
- SMITH, R. M., SAMUELS, G., CERNUDA, C. F. Organic matter and nitrogen build-ups in some Puerto Rican soil profiles. *Soil Sci.* 72:409-427. 1951.
- SOMBROEK, W. G. Amazon soil. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, Netherlands. 1967. 292 p.
- STEPHENS, D. The effects of fertilizers, manures and trace elements in continuous cropping rotations in southern and western Uganda. *East. Afr. Agr. Exp. For. J.* 34:401-417. 1969.
- TAN, K. H. y VAN SCHUYLENBORGH, J. On the organic matter in tropical soils. *Netherl. J. Agr. Sci.* 9:174-180. 1961.
- TURRENNE, J. F. Influence de la saison des pluies sur la dynamique des acides humiques dan des profils ferralitiques et podzolitiques sous savanes de Guyane Française. *Cah. ORSTOM, Ser. Pédolog.* 8:419-449. 1970.
- VAGELER, P. An introduction to tropical soils (translated from the 1930 German edition by H. Greene). Macmillan, London, 1933. 240 p.
- VINE, H. Experiments on the maintenance of soil fertility at Ibadan, Nigeria, 1922-1951. *Emp. J. Exptal, Agr.* 21:65-85. 1953.

CAPITULO 6

NITROGENO

El nitrógeno es el elemento nutritivo que con mayor frecuencia limita los rendimientos en los trópicos así como en la región templada. Con excepción de algunos terrenos recientemente desmontados, la mayoría de los suelos cultivados son deficientes en este elemento. El hecho de que los contenidos de nitrógeno de cultivos y pasturas tropicales sean en general más bajos que los valores correspondientes en la región templada (Webster y Wilson, 1966) contribuye al déficit proteico tan extendido en los trópicos. Como se vio en el Capítulo 5, grandes cantidades de carbono se descomponen en ciertas áreas tropicales. Esto necesita una tasa correspondientemente más alta de mineralización del nitrógeno. El propósito de este capítulo es describir la dinámica básica del nitrógeno en los trópicos, las reacciones de los fertilizantes nitrogenados, y el manejo de ambos en relación con los cultivos tropicales.

NITROGENO ORGANICO DEL SUELO

Las adiciones de nitrógeno al suelo se originan de la lluvia, polvo, fijación asimbiótica, fijación simbiótica y desechos animales y humanos. Las pérdidas de nitrógeno del suelo se deben a volatilización, lixiviación, denitrificación, erosión y absorción por las plantas. En el Cuadro 6.1 se presenta un resumen de la contribución relativa de cada fuente de nitrógeno bajo cuatro condiciones tropicales.

NITROGENO EN LA LLUVIA Y EN EL POLVO

Estas fuentes contribuyen con un promedio de 4 a 8 kg/ha de N anualmente. Sin embargo, los niveles más altos se han registrado en las áreas tropicales, debido tal vez a la intensa actividad eléctrica durante los aguaceros. Las tempestades de polvo del Sahara contribuyen con pequeñas cantidades de nitrógeno a los países del sub-Sahara. Un aspecto que no se ha estudiado es si el nitrógeno que se volatiliza cuando se quema la vegetación es traído de regreso por la lluvia a otro sitio en las áreas de agricultura nómada. Observaciones

CUADRO No. 6.1. Estimaciones bajas y altas de las contribuciones relativas anuales de diferentes fuentes de nitrógeno en cinco ecosistemas tropicales (kg/ha de N). Fuente: Kass y Drosdoff, 1970).

Fuente	Bosque pluvial	Sabana de gramíneas altas	Sabana de gramíneas bajas	Caña de azúcar	Arroz anegado
Lluvia y polvo	4-8	4-8	4-8	4-8	4-8
Fijación asimbiótica					
En la filosfera	12-40	0-12	0-4	0-12	0-4
Por algas verde-azules	0	0-10	0-10	0-10	14-70
En la rizosfera	0-6	0-13	0-6	0-9	0-10
En hojarasca	0-25	0-10	0-6	12-50	0-10
Fijación simbiótica	<u>34-68</u>	<u>0</u>	<u>0-10</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
Total	46-147	4-63	4-44	16-89	18-102

visuales indican que el humo es interceptado algunas veces por tormentas con chubascos localizados, pero no se dispone de información al respecto. Estudios en la región templada muestran que la mayor parte del nitrógeno se volatiliza como gas N_2 ; por lo tanto la posible repetición del ciclo está limitado a la porción de nitrógeno volatilizado que se convierte en NO , NO_2 , y otros óxidos.

FIJACION ASIMBIOTICA DE NITROGENO

Se sabe que la fijación asimbiótica del nitrógeno ocurre en la filosfera (follaje), en la hojarasca, en el suelo y en la rizosfera. El nitrógeno atmosférico es "fijado" por grandes poblaciones de *Azotobacter* y *Beijerinckia* spp. en las láminas foliares de muchas especies tropicales. La contribución anual de este proceso va de 0 a 8 kg N/ha. En bosques pluviales puede suplir hasta 40 kg/ha de N.

La fijación asimbiótica en la capa de hojarasca es del mismo orden de magnitud que indica el Cuadro 6.1.

La fijación asimbiótica del nitrógeno en el suelo por las algas verde-azules es un fenómeno bien conocido que se cree que es de especial importancia en cultivos de arroz inundado, en donde la población de esta alga es grande. Las estimaciones que se presentan en el Cuadro 6.1 indican por lo general niveles bajos para los ecosistemas.

La importancia de la fijación asimbiótica del nitrógeno en la rizosfera ha recibido cuidadosa atención de Johanna Döbereiner y sus colegas en Brasil (Döbereiner, 1968; Döbereiner et al., 1972; Döbereiner y Day, 1975), quienes identificaron bacterias de los géneros *Azotobacter*, *Beijerinckia* y *Derxia* en la rizosfera de caña de azúcar, arroz, y varias gramíneas forrajeras tropicales, particularmente

Paspalum notatum (pasto Bahía). Se encontró que varias especies de estas bacterias prosperan en Oxisoles extremadamente ácidos, en los que contenidos altos de aluminio y manganeso y niveles bajos de fósforo disminuyen la población de otra flora microbiana. Se han anticipado teorías que explican la falta que se observa de una respuesta pronunciada al nitrógeno por algunas de estas gramíneas en términos de fijación asimbiótica por estas bacterias. Los descubrimientos de Kass et al., (1971) y Döbereiner et al., (1972) muestran que la contribución anual de la fijación asimbiótica de nitrógeno por estas bacterias es del orden de menos de 10 kg/ha de N. Por lo tanto, este proceso no contribuye con grandes cantidades de nitrógeno para los cultivos.

FIJACION SIMBIOTICA

Al igual que en la región templada, la fijación simbiótica de nitrógeno es el mecanismo principal de las adiciones de nitrógeno en los trópicos. La magnitud de este fenómeno depende de la cantidad de especies de leguminosas, ciertas especies no leguminosas como *Casuarina*, tipo común de pino costanero, y algunas gramíneas tropicales. Las grandes cantidades de nitrógeno fijado en los bosques tropicales se deben probablemente a la alta proporción de árboles leguminosos que hay presentes. La fijación simbiótica de nitrógeno es de poca importancia en campos cultivados a menos que haya una leguminosa presente. Poblaciones de una sola leguminosa contribuyen de 16 a más de 500 kg/ha de N por año (Henzell y Norris, 1962). Sin embargo, en muchos casos la fijación de nitrógeno por leguminosas es sustancialmente más baja de lo esperado. Las razones de esto pueden ser los niveles bajos de fósforo o alto de aluminio de muchos suelos, lo cual inhibe la actividad de *Rhizobium*, a extremos en humedad del suelo, y a la falta de un inóculo específico para el cultivo o variedad en uso. Muy poco nitrógeno es fijado por frijol (*Phaseolus vulgaris*) en América Latina, en parte por su nodulación deficiente. Algunas leguminosas de pasturas tropicales están bien adaptadas a condiciones ácidas, y cuando se inoculan apropiadamente o naturalmente, producen cantidades considerables de nitrógeno. En el Capítulo 13 se analiza este tema detalladamente.

Actualmente se está acumulando evidencia de fijación simbiótica en gramíneas forrajeras tropicales. Ciertas especies que poseen la más eficiente vía metabólica del ácido dicarboxílico (C-4) entran en asociación simbiótica libre con bacterias. Tal simbiosis ocurre entre ciertas variedades de *Paspalum notatum* con *Azotobacter paspali*. Aunque la fijación de nitrógeno se lleva a cabo en la rizosfera, la asociación se considera como simbiosis (Döbereiner y Day, 1975). Extrapolaciones de experimentos de laboratorio e invernadero sugieren que la magnitud de este mecanismo puede ser del orden de 1 kg/ha de N por día; sin embargo no se han hecho mediciones de campo. Además, no

está clara la procedencia de la energía que se requiere para fijar esas grandes cantidades de nitrógeno.

Döbereiner y Day (1974) han identificado una nueva relación simbiótica entre ciertas variedades del pasto Pangola (*Digitaria decumbens*) y la bacteria *Spirillum lipoferum*. Este microorganismo sólo crece en sustratos de lactato, malato o citrato, y por eso no se identificó en el medio de azúcar usado normalmente por los microbiólogos. En pastos tropicales con la vía C-4 el malato es uno de los principales productos fotosintéticos. Döbereiner y Day identificaron este microorganismo en un cultivo de malato de sodio. Döbereiner y Day encontraron que *S. lipoferum* abunda en la rizosfera de muchos pastos tropicales de Brasil. Sin embargo, la fijación de nitrógeno solamente se observa dentro de ciertas raíces de variedades particulares de pasto Pangola. Los autores sugieren que la aplicación práctica de este avance puede ser la selección de variedades y especies que pueden desarrollar relaciones simbióticas con *Spirillum* y tal vez otros organismos semejantes; recomiendan que se identifiquen las condiciones de suelo favorables para la simbiosis.

Estos descubrimientos han abierto una área de investigación muy interesante en microbiología de suelos tropicales y sus aplicaciones prácticas pueden determinarse en un futuro cercano. Ensayos preliminares de campo en Florida, llevadas a cabo por Smith et al., (1975) muestran una respuesta positiva de la materia seca a inoculaciones de *Spirillum* en dos especies de pastos.

Resumiendo, las adiciones de nitrógeno atmosférico por la fijación simbiótica dentro del suelo pueden ser tan pequeñas como de 4 kg/ha de N y no mayores de 50 kg/ha de N en campos cultivados, mientras que en el bosque pluvial el ámbito anual está entre 46 y 147 kg/ha de N, tal como indica el Cuadro 6.1.

ADICIONES TOTALES DE NITROGENO

En el Cuadro 6.2 se muestran las adiciones anuales de nitrógeno orgánico al suelo en varias localidades. Al igual que en el caso de las adiciones de carbono orgánico, son mayores en bosques tropicales que en bosques o sabanas de la zona templada. Las razones son similares a las responsables de las diferencias de los contenidos de carbono orgánico en el suelo. El Cuadro 5.2 mostraba que el ámbito en nitrógeno total y en la razón carbono: nitrógeno entre los suelos tropicales es similar al que ha encontrado bajo condiciones de zona templada.

MINERALIZACION DEL NITROGENO

La descomposición del nitrógeno orgánico del suelo en compuestos inorgánicos, llamada "mineralización", consiste de tres etapas: aminización, la transformación de proteínas en aminas; amonifica-

CUADRO No. 6.2. Estimaciones de incrementos anuales de nitrógeno orgánico al suelo en varias superficies de suelos. (Fuente: Greenland y Nye, 1959).

Localidad	Incrementos anuales de N al suelo (kg/ha de N)	
	Máximo	Mínimo
Bosques tropicales de tierras bajas		
1. Ghana	55	22
2. India	60	24
3. Zaire	58	23
4. Indonesia	55	22
5. Colombia (Andept)	30	12
Bosques tropicales de tierras altas		
6. Colombia	57	23
7. Indonesia	45	18
8. Madagascar	38	15
Bosques templados		
9. California (roble)	4	2
10. California (pino)	9	4
Sabanas tropicales		
11. Ghana (1250 mm lluvia)	15	5
12. Ghana (850 mm lluvia)	4	2
Pradera templada		
13. Minnesota (870 mm lluvia)	11	5

ción, la transformación de amonios en amonio (NH_4^+); y nitrificación, la transformación de amonio en nitrato (NO_3^-) con una etapa intermedia corta de formación de nitrito (NO_2^-).

Las tasas de mineralización del nitrógeno depende de la temperatura, relación C:N, pH del suelo, mineralogía de arcillas, y de humedad. En los trópicos la temperatura pocas veces es limitante en las tierras bajas. La relación C:N opera un poco distinto en suelos ácidos que en suelos con niveles altos de bases. El hecho de que con valores bajos de pH el carbono tiende a mineralizarse más rápidamente que el nitrógeno, disminuye la relación C:N y da por resultado un incremento en la mineralización del nitrógeno. En suelos con niveles altos de bases las cantidades totales mineralizadas con frecuencia dependen del contenido total de nitrógeno, excepto en los Andepts, en donde

la mineralización del nitrógeno es inversamente proporcional al contenido de alófana (Bornemisza y Pineda, 1969).

Quizás el factor dominante que afecta las tasas de mineralización del nitrógeno en los trópicos es el contenido de humedad en el suelo. Calder (1957) y Semb y Robinson (1969) observaron que la mineralización puede suceder a tensiones de humedad del suelo mayores de 15 bares. Una posible explicación de este fenómeno es la considerable cantidad de agua presente a altas tensiones en suelos bien agregados, que aunque no es aprovechable por las plantas, parece estar disponible para los microorganismos mineralizantes.

La mineralización del nitrógeno también ocurre bajo condiciones de inundación, pero se detiene en la etapa de amonificación por cuanto solamente microorganismos aeróbicos pueden convertir NH_4^+ en NO_3^- . Aunque los procesos de mineralización son más lentos, aparentemente los microorganismos anaeróbicos pueden transformar nitrógeno orgánico en amonio a relaciones C:N más altas que los microorganismos aeróbicos (De Datta y Magnaye, 1969). El resultado neto final es una tasa de mineralización similar a la de suelos aeróbicos.

Entre estos dos extremos de contenidos de humedad, la mayoría de los suelos tropicales pasan por varios períodos alternos de humedecimiento y secamiento. La mineralización del carbono y del nitrógeno orgánicos es más rápida bajo humedecimiento y secamiento alternos que bajo condiciones "óptimas" de humedad. Además, la relación crítica de C:N para la mineralización también cambia bajo estas condiciones. Birch (1960) encontró que el secamiento provoca una mineralización más rápida del carbono que del nitrógeno, reduciendo así la relación C:N. Birch también encontró que la relación C:N crítica sobre la cual se detiene la mineralización, es más alta bajo humedecimiento y secamiento alterno. Por ejemplo, un residuo de cosecha que contenía 1,5% de N fue mineralizado bajo humedecimiento y secamiento alternos, pero inmovilizado bajo humedad constante. Este fenómeno probablemente está asociado con una población microbiana más activa después del secamiento y humedecimiento del suelo, o tal vez una mayor accesibilidad del humus a los microorganismos por la contracción e hinchamiento de los minerales de la arcilla o de los delgados revestimientos de óxidos de hierro y aluminio.

FLUCTUACIONES ESTACIONALES DEL NITROGENO INORGANICO

En la mayoría de las áreas tropicales el nitrógeno inorgánico presenta una marcada fluctuación estacional, tal como indica la Fig. 6.1. El patrón consiste de: 1) una acumulación lenta de nitrato en la capa arable del suelo durante la estación seca; 2) un aumento grande pero de poca duración al principio de la estación lluviosa; y 3) una rápida

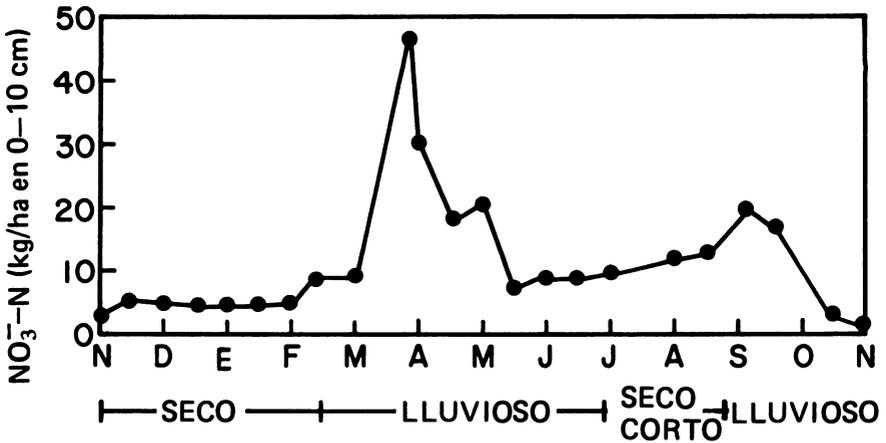


Fig. 6.1. Patrón de la fluctuación estacional de $\text{NO}_3\text{-N}$ en los 10 cm superiores de un Alfisol cultivado en Ghana. (Fuente: adaptado de Greenland, 1958).

disminución durante el resto de la estación lluviosa. Cuando ocurren sequías cortas durante la estación lluviosa, ellas están seguidas de pronunciados pero pequeños aumentos de nitrógeno inorgánico, y luego por disminuciones graduales. Estos picos de corta duración llamados incrementos repentinos fueron descritos primero por Hardy en 1946; trabajos subsiguientes de Birch y otros investigadores en Africa han confirmado su existencia en un amplio ámbito de condiciones de suelo (Birch, 1958, 1960, 1964). Los incrementos repentinos se han denominado algunas veces “efecto de Birch” debido a la popularidad de los artículos de dicho autor, aún cuando Hardy merece el crédito original.

El siguiente es un análisis de los componentes individuales del patrón estacional. Aunque este patrón es típico de regímenes ústicos de humedad del suelo también se presenta en menor escala en regímenes údicos. Aparentemente el mecanismo es muy sensible a cambios de humedad del suelo cortos pero muy pronunciados.

ACUMULACION DE NITRATO DURANTE LA ESTACION SECA

La acumulación de nitrato en la capa arable del suelo durante la estación seca se puede explicar por la existencia de la nitrificación a tensiones de humedad del suelo de 15 a 80 bares (Semb y Robinson, 1969). Aunque la capa arable puede estar más seca de lo que indican esas tensiones, el subsuelo puede tener suficiente humedad para permitir la mineralización. Como durante la estación seca la mayor parte del movimiento de agua es ascendente, los nitratos anteriormente presentes o recién mineralizados en el subsuelo pueden moverse hacia

arriba y acumularse en la capa arable del suelo. Trabajando con un Alfisol del norte de Australia, Wetselaar (1961) encontró evidencia de formaciones dramáticas de nitrato en los 5 cm superiores. Explicó que el nitrato se mineralizaba en el subsuelo, donde existía una humedad adecuada durante la estación seca y se acumulaba justamente debajo de una costra en la superficie del suelo, donde se rompe la conductividad capilar. Wild (1972b) siguió el contenido de nitrato de un perfil en el norte de Nigeria por dos años. Sus resultados, que aparecen en la Fig. 6.2, indican un movimiento ascendente del nitrato durante la estación seca. Esta figura sugiere que este nitrato fue lixiviado dentro del subsuelo durante la estación lluviosa anterior. Los datos originales de Hardy (Cuadro 6.3) muestran los niveles reales del nitrato que se observaron en Trinidad durante la estación seca.

CUADRO No. 6.3. Niveles estacionales del nitrato del suelo y el contenido de humedad de un suelo arenoso en Trinidad: media de 3 años. (Fuente: adaptado de Hardy, 1946).

Estación	Horizonte del suelo	Sistema de cultivo (kg/ha de N)		
		Barbecho	Maíz	Pasto
Lluviosa (190 mm/mes)	A	18	9	8
	B	13	10	7
Seca (38 mm/mes)	A	35	22	10
	B	17	10	9

INCREMENTOS REPENTINOS DE NITROGENO AL COMIENZO DE LA ESTACION LLUVIOSA

Pocos días después de las primeras lluvias, ocurren aumentos dramáticos de nitrógeno inorgánico. En el campo pueden ir de 23 a 121 kg/ha de N en 10 días (Semb y Robinson, 1969). La elevación de los picos es directamente proporcional a la duración e intensidad de la estación seca precedente. Estos aumentos pronunciados están acompañados por disminuciones igualmente pronunciadas ocasionadas por la rápida lixiviación en la estación lluviosa. Semb y Robinson proporcionaron evidencia clara de NO_3^- bajando al subsuelo después de tales incrementos repentinos. Birch (1950) adelantó varias razones para explicar estos incrementos. Poblaciones microbianas activas se forman rápidamente cuando hay disponibilidad de humedad y abundancia de sustrato fácilmente descomponible. La época seca disminuye la tasa de mineralización junto de C como N. El secamiento

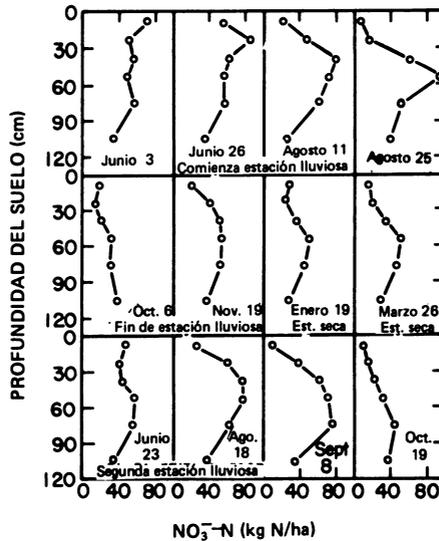


Fig. 6.2. Fluctuaciones de nitrato en el perfil de un Alfisol del norte de Nigeria. (Fuente: Wild, 1972).

intenso baja la relación C:N del humus porque el carbono se descompone con mayor velocidad que el nitrógeno en períodos de sequía. Al empezar las lluvias la mineralización del nitrógeno avanza más rápido con relaciones C:N más bajas. Además, la población microbiana muerta proporciona un sustrato adicional, lo cual estimula la mineralización aún más.

PERDIDAS DE NITROGENO DURANTE LA ESTACION LLUVIOSA

Conforme avanza la estación lluviosa el suministro de nitrógeno inorgánico se reduce debido a la absorción de las plantas, a la lixiviación y a la desnitrificación. En el Cuadro 6.3 Hardy (1946) muestra el efecto que tiene la absorción de las plantas en la disminución del contenido de NO_3^- en el perfil y el movimiento gradual de NO_3^- hacia abajo conforme avanza la estación lluviosa. La Fig. 6.2 muestra que al comienzo de la estación lluviosa (junio 3) la mayor parte de los nitratos estaba concentrada en los 15 cm superiores del suelo. Tres semanas más tarde, después del incremento repentino, comenzó la lixiviación y el pico de concentración descendió a entre 15 y 30 cm. Hacia el 11 de agosto, bien entrada la estación lluviosa, el pico de concentración estaba de 30 a 45 cm, y 2 semanas más tarde de 45 a 60 cm.

En el experimento de Wild el nitrato se movió a un ritmo aproximado de 0,5 mm/mm de lluvia. Esto es más lento que lo observado

en Ultisoles de la región templada. Por ejemplo, Terry y McCants (1970) encontraron que el nitrato se movía a razón de 1 a 5 mm/mm de lluvia en suelos arenosos de Carolina del Norte. La aparente discrepancia se debe a diferencias en la estructura de los suelos. En arcillas bien agregadas ocurre movimiento descendente del agua de lluvia a través de poros grandes, y difusión lateral lenta a través de los agregados. En suelos arenosos sólo se presenta el primero. En consecuencia, aunque muchas arcillas bien agregadas actúan como arenas en términos de retención de agua, sus pérdidas de nitrógeno mineralizado del suelo por lixiviación son más lentas que en arenas porque los nitratos mineralizados dentro de los gránulos tienen que moverse a través de microporos antes de estar expuestos a la lixiviación. Si el subsuelo tiene algún grado de capacidad de intercambio aniónico, la lixiviación de nitratos puede reducirse (Kinjo y Pratt, 1971).

Wild también encontró que el contenido total de nitratos en los 120 cm superiores del suelo no cambiaban significativamente durante el año, excepto al final de la estación lluviosa cuando ocurrían grandes pérdidas por lixiviación debido a un descenso en la napa freática del valle. Por lo tanto, en sus dos años de observaciones, la mayor parte del nitrógeno inorgánico nunca se perdió del perfil del suelo. Este ejemplo no debe mal interpretarse en el sentido de que nada de nitrato sale del suelo por lixiviación. También deben tomarse en cuenta los datos ofrecidos en el Capítulo 3.

Las pérdidas por desnitrificación no están bien documentadas (Greenland, 1958). Estas son probablemente importantes durante períodos muy activos de descomposición de materia orgánica y durante inundación temporal de suelos bien drenados. La desnitrificación es probablemente el principal mecanismo de pérdida de nitrógeno en los suelos con régimen áquico de humedad.

La magnitud de las fluctuaciones estacionales de nitrógeno inorgánico varía con la intensidad y frecuencia de las lluvias. Una distribución uniforme de las lluvias minimiza las fluctuaciones; por consiguiente ellas son más pronunciadas en regímenes ústicos de humedad de suelos que en regímenes údicos. Las fluctuaciones también son mínimas si los cultivos en crecimiento activo absorben el nitrato rápidamente. Los datos de Hardy en el Cuadro 6.3 muestran que un suelo con pasturas tenía un contenido menor de nitrato que uno con maíz debido a la absorción continua de N por los pastos durante todo el año.

Es importante darse cuenta que el patrón acabado de describir sobre la fluctuación del nitrógeno inorgánico es bastante diferente del que se presenta generalmente en la zona templada. La estación de crecimiento en las zonas templadas údicas comienzan con un suelo frío y húmedo, bajo en nitrógeno inorgánico debido a las tasas lentas de mineralización durante el otoño y el invierno. Conforme las temperaturas aumentan gradualmente durante la primavera hay un aumento correspondientemente gradual en mineralización de nitróge-

no inorgánico. El nitrógeno inorgánico aumenta lentamente sin “incrementos repentinos” debido al alto nivel de humedad del suelo. Durante el verano las tasas de mineralización pueden ser muy altas, y el contenido de nitrógeno inorgánico dependerá de la absorción de los cultivos, la lixiviación y la desnitrificación. La mayoría de las prácticas de manejo del nitrógeno que se usan en la región replada se han desarrollado para que se ajusten a esas condiciones. Las prácticas de manejo del nitrógeno en los trópicos también deberían tomar en consideración los patrones estacionales.

REACCIONES ENTRE FERTILIZANTES NITROGENADOS Y EL SUELO

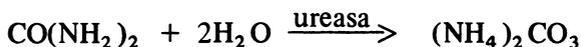
El nitrógeno es el fertilizante que se aplica en mayor cantidad en los trópicos. Sin embargo la cantidad por hectárea que se usa es mucho menor que en la región templada. Estadísticas de FAO (1971) indican que solamente el 13% de la producción total mundial de nitrógeno se consume en los trópicos. En 1971 se usaron 2.6 millones de toneladas de nitrógeno en Asia tropical, 1.3 millones en América tropical, y 0.2 millones en Africa tropical. En algunos cultivos tropicales tales como arroz inundado, caña de azúcar, otros cultivos de plantación, y algunas pasturas, las cantidades de nitrógeno que se usan por unidad de superficie se catalogan entre las más altas del mundo. En contraste, el grueso de la agricultura de subsistencia está apenas comenzando a usar fertilizantes.

Las fuentes más comunes de fertilizantes nitrogenados que se usan en los trópicos son la urea y el sulfato de amonio. Por otra parte, en zonas templadas, como Estados Unidos, tienden a predominar el nitrato de amonio, el amoniaco anhidro y los fosfatos de amonio.

Las secciones siguientes describen las reacciones que sufren estos fertilizantes en los ambientes tropicales. Se incluye una discusión de aplicaciones localizadas de nitrógeno que se observan comúnmente en la agricultura tropical, particularmente en sistemas de subsistencia.

HIDROLISIS DE LA UREA

La urea es la fuente de nitrógeno inorgánico más comúnmente usada en los trópicos. Su popularidad se debe en parte a su alto contenido de nitrógeno (46% N), bajo costo por unidad, y disponibilidad en el mercado mundial. Cuando se aplica a un suelo húmedo, la urea se hidroliza a carbonato de amonio por la enzima ureasa de la siguiente manera:



En la presencia de agua, el carbonato de amonio se disocia en iones, amonio y carbonato. Antes de su hidrólisis, la urea es tan

móvil como el nitrato y puede lixiviarse bajo la zona radicular cuando hay lluvias fuertes, si la estructura del suelo lo permite. Tamimi y Kanehiro (1962) mostraron que la hidrólisis de la urea avanza a aproximadamente a la misma velocidad en los trópicos que en la región templada y que se completa dentro de 1 a 4 días. Delaune y Patrick (1970) encontraron que en suelos inundados la tasa de la hidrólisis es semejante a la de suelos bien drenados. Por lo tanto, la primera reacción de la urea no es diferente en los trópicos que en la zona templada.

PERDIDAS DE AMONIACO POR VOLATILIZACION

Con valores de pH mayores de 7, los iones NH_4^+ pueden convertirse en NH_3 (gas amoniac) y perderse en la atmósfera si el suelo está seco. Las pérdidas de amoniac por volatilización fueron detectadas por primera vez en los trópicos (Jewitt, 1942), trabajando con Vertisoles en el Sudán. Aunque las pérdidas de amoniac por volatilización pueden ocurrir con ambas fuentes, urea o amonio, son más importantes con urea ya que su hidrólisis aumenta el pH del suelo circundante. En los trópicos son muy comunes las aplicaciones de nitrógeno al voleo en la superficie del suelo; por lo tanto las pérdidas por volatilización pueden ser de importancia práctica en suelos con pH alto, especialmente cuando se usan dosis altas de nitrógeno. Shankaracharya y Mehta (1971), trabajando con un suelo franco arenoso de pH 7,1 en Gurajat, India, midieron pérdidas de campo por volatilización del 4% cuando se había aplicado 28 kg/ha de N en forma de urea a la superficie. Cuando la dosis se aumentó a 277 kg/ha de N las pérdidas por volatilización subieron al 44%. Esas dosis de nitrógeno son corrientes en áreas donde se siembran variedades de arroz o trigo de alto rendimiento.

CUADRO No. 6.4. Pérdidas por volatilización de urea en función de la profundidad y época de aplicación en relación con irrigación en un suelo franco arenoso en Gurajat, India (dosis de N:222 kg/ha). (Fuente: adaptado de Shankara y Metha, 1971).

Profundidad de colocación (cm)	Porcentaje de pérdida del N aplicado	
	Aplicado antes del riego	Aplicado después del riego
Superficie	8,1	40,2
1,2	1,2	33,4
2,5	0,6	18,1
5,0	0,05	0,5
7,5	0,0	0,0

Las pérdidas de urea por volatilización pueden reducirse drásticamente si el material se coloca debajo de la superficie del suelo antes de la hidrólisis. Esto puede lograrse por medio de incorporación, por colocación profunda, o simplemente hundiendo la urea recién aplicada por medio de irrigación o de la lluvia. El Cuadro 6.4 muestra la reducción de pérdidas por volatilización cuando una aplicación superficial fue seguida por irrigación. El agua de irrigación simplemente hizo bajar la urea antes de que pudiera hidrolizarse. En presencia de humedad no ocurre volatilización del amoníaco. Este cuadro también indica que las pérdidas de urea por volatilización son prácticamente eliminadas incorporando el material a unos 5 cm de profundidad. La deducción práctica es que la urea debe incorporarse dentro del suelo cuando se aplica en suelos calcáreos.

NITRIFICACION DE APLICACIONES DE SULFATO DE AMONIO AL VOLEO

Cuando el sulfato de amonio se aplica al voleo sobre la superficie del suelo, no sufre pérdidas considerables por volatilización como sucede con la urea. La nitrificación de NH_4^+ a NO_3^- y la distribución de ambas especies iónicas en el perfil, varía de acuerdo con las propiedades del suelo y con las condiciones de humedad. Wetselaar (1962) siguió estos cambios en Alfisoles del norte de Australia. La nitrificación fue muy rápida en suelos franco-arcillosos con pluviosidad alta durante la estación lluviosa. La mayor parte del nitrógeno aplicado se detectó como nitratos en la sección de 60 a 120 cm del subsuelo. Mientras que cultivos con raíces profundas, como algodón, fueron capaces de utilizar este nitrógeno, un cultivo de sorgo con una profundidad efectiva de las raíces de 40 cm no lo fue. En un suelo arenoso Wetselaar encontró que los iones de NH_4^+ se acumularon a una profundidad de 15 a 30 cm 3 días después de la aplicación (Cuadro 6.5). Después siguió un período seco. A los 21 días después de la aplicación la mayor parte del nitrógeno aplicado se detectó en los 8 cm superiores, probablemente como resultado de nitrificación en el subsuelo, seguido por un movimiento ascendente durante el período seco. Cuando las fuentes de amonio se nitrifican rápidamente el nitrato puede movilizarse fácilmente hacia arriba o abajo del perfil, de acuerdo con el movimiento del agua.

NITRIFICACION DE APLICACIONES DE NITROGENO EN BANDAS

La aplicación de fertilizantes nitrogenados en bandas se usa en la agricultura mecanizada, principalmente cuando se aplican fertilizantes completos (NPK). La justificación más común de esta práctica es la reducción de la fijación del fósforo. Además, las aplicaciones de nitrógeno "al golpe" en forma manual de los sistemas tradicionales

CUADRO No. 6.5. Porcentaje de recuperación de sulfato de amonio aplicado a razón de 80 kg/ha de N en la superficie de Alfisol arenoso en el norte de Australia. (Fuente: Wetselaar, 1962).

Profundidad (cm)	Después de 3 días (%)		Después de 21 días (%)	
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
0-8	23,7	2,6	26,5	56,3
8-15	15,5	3,1	0,6	5,4
15-30	51,0	5,6	0,4	8,0
30-45	12,1	1,2	0,7	1,7
Total	102,3	12,5	28,2	71,4

localizan el nitrógeno cerca de las plantas. Wetselaar et al., (1972-1973b) encontraron que las aplicaciones de nitrógeno en bandas afectan la tasa de nitrificación de las fuentes de amonio, y que esa práctica puede dar por resultado un aumento de eficiencia del nitrógeno aplicado. Wetselaar y sus colegas encontraron que cuando una dosis de 80 kg/ha de N en forma de sulfato de amonio o urea se incorporaba en los 15 cm superiores del suelo al momento de la siembra, dando una concentración promedio de 40 ppm de N, la tasa de nitrificación en buenas condiciones de humedad fue superior al 80% en unos pocos días. El nitrato así producido puede ser lixiviado fuera de la zona radicular antes de que las plantas puedan desarrollar un sistema de raíces que lo utilice. Cuando el nitrógeno se aplicó en la misma dosis colocándolo en bandas espaciadas a 35 cm, la concentración de NH₄⁺ resultante podía subir hasta 1000 ppm de N en la banda. Wetselaar et al., (1972) no observaron nitrificación en estas bandas cuando la concentración de sulfato de amonio era superior a 80 ppm de N o la concentración de urea o agua amoniacal excedía de 400 ppm de N. Los organismos nitrificantes se enfrentan a un ambiente hostil debido a la alta succión osmótica y un pH mayor de 8 alrededor de la banda. Los iones de amonio son entonces estables en un suelo con una CIC neta.

Con el tiempo la concentración de iones de amonio alrededor de la banda disminuye; cuando el pH del suelo, cerca de la banda de urea, está entre 7 y 8 la nitrificación sigue su curso hasta la etapa del nitrito. El nitrito se acumula en las bandas y es tóxico para las plantas. Conforme el pH baja a menos de 7 debido a los incrementos de CO₂, se forman los nitratos. Sin embargo, con sulfato de amonio no ocurren acumulaciones de nitrito porque el pH de la banda no sube más de 7 en suelos ácidos. En el Cuadro 6.6 se ilustran estas reacciones. Estudios en raíces de trigo por Passioura y Wetselaar (1972) mostraron ausencia de raíces en una área de 10 cm alrededor

CUADRO No. 6.6. Formación de nitrito y nitrato después de adiciones de 1000 ppm de N como urea o sulfato de amonio en bandas a un suelo calcáreo del norte de Australia en función de tiempo. (Fuente: Wetselaar et al, 1972).

Fertilizante nitrogenado		Semanas de incubación			
		2	4	6	12
Urea	NO ₂ ⁻ -N (ppm)	170	345	125	0
	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	15	55	330	365
	pH del suelo	7,4	7,2	6,0	4,7
(NH ₄) ₂ SO ₄	NO ₂ ⁻ -N (ppm)	0	0	0	0
	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	25	85	130	140
	pH del suelo	6,2	6,4	5,6	4,8

de las bandas de urea o de sulfato de amonio durante las 4 primeras semanas. Después las raíces penetraron las bandas de sulfato de amonio y comenzaron a absorber nitrógeno. El desarrollo de las raíces alrededor de las bandas de urea se demoró 4 semanas más hasta que los nitritos se convirtieron en nitratos.

Estos estudios sugieren que el suministro de nitratos puede manejarse variando la concentración de nitrógeno en el suelo por medio de bandas a diferentes espaciamientos. El espaciamiento óptimo de las bandas dependerá de factores tales como pH, CIC y necesidad específica de nitrógeno de cada cultivo. La práctica de concentrar las aplicaciones de sulfato de amonio (urea no) en bandas o alrededor de plantas individuales por muchos agricultores de subsistencia parece tener algunas ventajas.

REQUISITOS DE NITROGENO DE CULTIVOS TROPICALES

A pesar de la gran cantidad de investigaciones sobre la fertilización nitrogenada, la información acerca de los patrones de asimilación de nitrógeno por los principales cultivos tropicales es bastante limitada. En el Cuadro 6.7 aparecen estimaciones sobre la remoción de nutrientes a la cosecha, compilados de la literatura disponible. Siempre que es posible se ofrecen datos sobre remoción de nutrientes con varios niveles de rendimiento. Bartholomew (1972b) ha compilado estimaciones de absorción de nitrógeno por maíz, trigo y arroz con varios niveles de rendimiento. En la Fig. 6.3 se reproducen sus resultados.

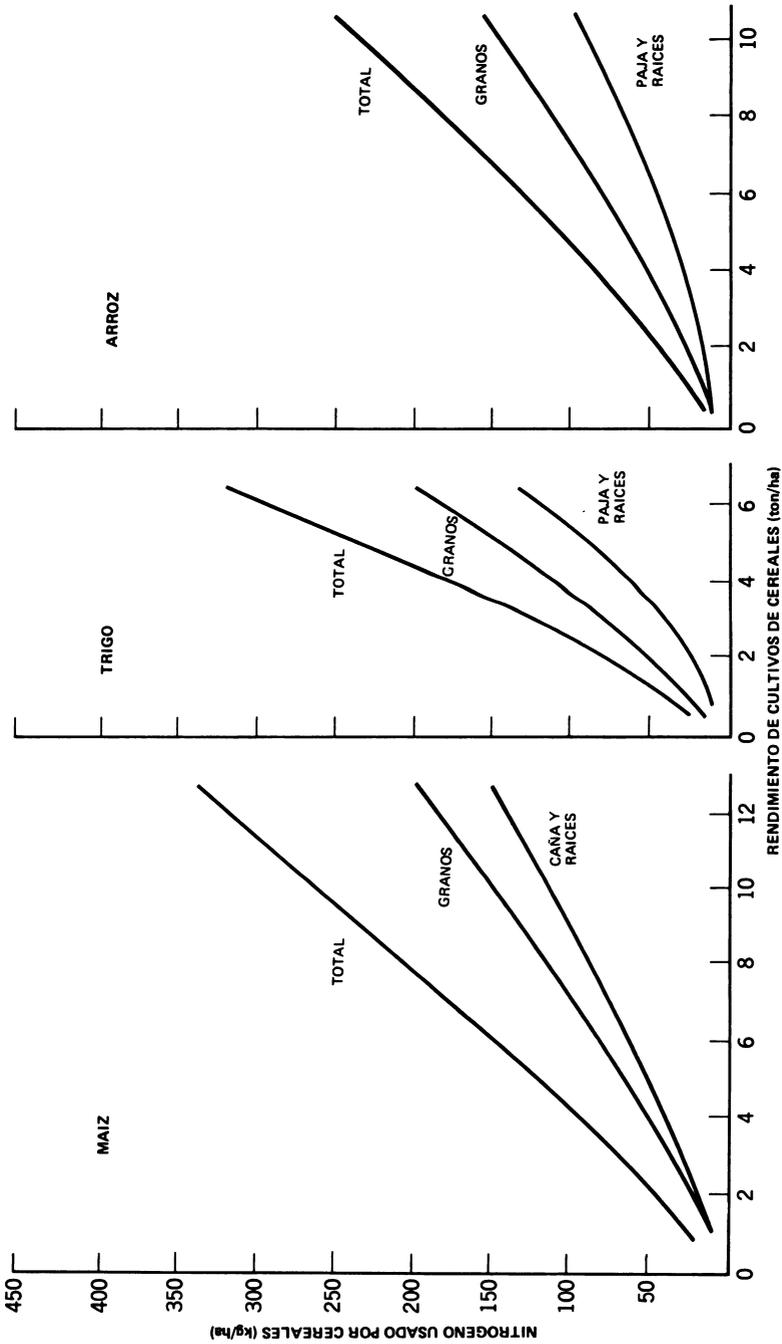


Fig. 6.3. Comparación del uso de nitrógeno por maíz, trigo, y arroz con el mismo nivel de rendimiento. (Fuente: Bartholomew, 1972b).

CUADRO No. 6.7. Remoción de nutrimentos por los principales cultivos tropicales. (Fuente: compilación sin publicar de Publio Santiago, Cornell University; Wrigley (1961); Ochse et al, 1961).

Cultivo	Parte	Rendimiento (ton/ha)*	Nutrimentos extraídos (kg/ha)				
			N	P	K	Ca	Mg
CEREALES							
Maíz	Grano	1,0	25	6	15	3,0	2,0
	Tallo	1,5	15	3	18	4,5	3,0
	Total	2,5	40	9	33	7,5	5,0
	Grano	4,0	63	12	30	8,0	6,0
	Caña	4,0	37	6	38	10,0	8,0
	Total	8,0	100	18	68	18,0	14,0
Arroz	Grano	7,0	128	20	37	14,0	11,0
	Caña	7,0	72	14	93	17,0	13,0
	Total	14,0	200	34	130	31,0	24,0
	Grano	1,5	35	7	10	1,4	0,3
	Paja	1,5	7	1	18	2,6	2,2
	Total	3,0	42	8	28	4,0	2,5
Trigo	Grano	8,0	106	32	20	4,0	1,0
	Paja	8,0	35	5	70	24,0	13,0
	Total	16,0	141	37	90	28,0	14,0
	Grano	0,6	12	2,4	3	0,3	1,0
	Paja	1,0	3	0,8	14	2,0	2,0
	Total	1,6	15	3,2	17	2,3	3,0
Sorgo	Grano	5,0	80	22	20	2,5	8,0
	Paja	5,0	38	5	60	10,0	10,0
	Total	10,0	118	27	80	12,5	18,0
	Grano	1,0	20	0,9	4	4,0	2,4
	Paja	1,2	6	0,4	2	4,6	3,2
	Total	2,2	26	1,3	6	8,6	5,6
Mijo	Grano	8,0	135	10	27	16,0	9,6
	Paja	8,0	65	4	13	18,0	12,8
	Total	16,0	200	14	40	34,0	22,4
Mijo	Grano	1,1	17	5	59	-	-

Continúa en página siguiente

Cuadro No. 6.7. Cont.

Cultivo	Parte	Rendimiento (ton/ha)*	Nutrientos extraídos (kg/ha)				
			N	P	K	Ca	Mg
RAICES ALIMENTICIAS							
Yuca	Raíces	8,0	30	10	50	20	10
	Raíces	16,0	64	21	100	41	21
	Raíces	30,0	120	40	187	77	40
	Planta entera	59,0	64	19	176	102	26
	Raíces	59,0	42	28	291	43	19
Papa	Raíces	12,0	52	10	80	22	14
	Raíces	22,0	120	20	166	40	26
	Raíces	40,0	172	34	232	70	48
	Planta entera	62,0	147	19	403	60	31
	Tubérculos de la planta anterior	44,0	77	14	224	4	9
Camote	Raíces	16,5	72	8	88	—	—
LEGUMINOSAS DE GRANO							
Frijoles	Granos	1,0	31	3,5	6	—	—
Soya	Granos	1,0	49	7,2	21	—	—
Maní	Vainas y granos	1,0	49	5,2	27	—	—
Pastos (producción anual, cortado cada 2 meses)							
Guinea	Parte aérea	10,0	107	27	180	78	49
(<i>Panicum</i>	Parte aérea	23,0	288	44	363	149	99
<i>maximum</i>)	Parte aérea	35,0	560	77	600	230	133
Pangola	Parte aérea	10,0	120	22	180	36	28
(<i>Digitaria</i>	Parte aérea	23,0	299	47	358	109	67
<i>decumbens</i>)	Parte aérea	31,0	400	53	558	130	87
Elefante	Parte aérea	10,0	144	24	180	35	30
(<i>Pennisetum</i>	Parte aérea	25,0	302	64	504	96	63
<i>purpureum</i>)	Parte aérea	46,0	800	92	900	129	87
Pará	Parte aérea	8,0	80	17	160	28	16
(<i>Brachiaria</i>	Parte aérea	24,0	307	43	383	115	79
<i>mutica</i>)	Parte aérea	30,0	600	69	660	135	66
OTROS CULTIVOS							
Caña de azúcar (cosechas de 2 años)	Parte aérea	100	75	20	125	28	10
	Parte aérea	200	149	29	316	55	58
	Parte aérea	300	254	35	400	96	80
Algodón	Semilla	0,8	30	4,4	7	—	—
Café	Granos secos	1,0	25	1,7	16	1	2
Té	Hojas secas	0,6	31	2,3	15	2	—
Tabaco	Hojas curadas	1,0	116	14	202	—	—
Caucho	Latex seco	3,0	7	1,2	4	4	—
Cacao	Almendras secas	0,5	10	2,2	5	1	1
Palma aceitera	Fruto	15,0	90	8,8	112	28	—

Cuadro No. 6.7. Cont.

Cultivo	Parte	Rendimiento (ton/ha)*	Nutrientos extraídos (kg/ha)				
			N	P	K	Ca	Mg
CULTIVOS FRUTALES							
Banano	Racimo	10,0	19	2,0	54	23	30
	Tallo y hojas	—	20	1,3	22	1	3
	Total	—	39	3,3	76	24	33
	Racimo	30,0	56	6,0	161	70	82
	Tallo y hojas	—	29	4,0	65	2	8
	Total	—	85	10,0	226	72	90
Piña	Fruto	12,5	9	2,3	29	3	—
Coco	Copra seca	1,2	60	7,2	40	—	—

(*) Rendimientos de cereales, leguminosas de grano y pastos en base a peso seco; cultivos de raíces y banano con 15-20% de materia seca.

CEREALES

A los rendimientos promedio actuales en los trópicos de aproximadamente 1 tonelada por hectárea de granos, el maíz, arroz, trigo y sorgo extraen alrededor de 30 kg/ha de N. Esto probablemente está en equilibrio con la capacidad de suministrar nitrógeno de la mayoría de los suelos tropicales. A niveles de rendimiento moderadamente altos (4 a 5 ton/ha), la extracción de nitrógeno es del orden de 100 a 150 kg/ha de N. Este nivel de rendimiento es importante por cuanto puede alcanzarse corrientemente en muchas áreas tropicales con variedades de alto rendimiento y fertilización. Con niveles de rendimiento altos, de 8 a 10 ton/ha, la cantidad de nitrógeno absorbido excede de 200 kg/ha de N.

El patrón de absorción de nitrógeno en función del tiempo tiene la característica curva sinusoidal en estos cultivos. Con arroz existen dos períodos en que los requisitos de nitrógeno son más altos: al momento del macollaje (cuando aparecen tallos secundarios), y durante la iniciación del primordio de la panícula, que marca el comienzo de la etapa reproductiva. El número de panículas por unidad de área está altamente correlacionado con el suministro de nitrógeno durante el macollaje. El número de espiguillas por panícula depende del suministro de nitrógeno durante la iniciación de las panículas (Sánchez, 1972). Los rendimientos del arroz están correlacionados positivamente con niveles adecuados de nitrógeno en la planta durante estas dos etapas críticas.

En maíz, el macollaje es una característica indeseable y el rendimiento está correlacionado con el número máximo de granos por unidad de área. Los requisitos de nitrógeno son altos durante el "gran período de crecimiento", en la fase vegetativa y al formarse los cabezillos. El patrón de absorción de nitrógeno del trigo es similar al del arroz (Srivatsava, 1969), y el patrón del sorgo al del maíz (Roy y Wright, 1973).

RAICES Y TUBERCULOS

Los cultivos de raíces también extraen grandes cantidades de nitrógeno. Con los bajos niveles actuales de rendimiento de 8 a 10 ton/ha de raíces frescas, las raíces de la yuca y los tubérculos de la papa extraen alrededor de 40 kg/ha de N. Con rendimientos más altos obtenidos con fertilización, estos cultivos pueden extraer más de 150 kg/ha de N, incluyendo la parte aérea de las plantas. El patrón de absorción de nitrógeno de la papa en Perú observado por Ezeta y McCollum (1972) muestra que la mayor parte del nitrógeno fue extraído antes de la iniciación de los tubérculos. Durante el período de crecimiento de 97 a 107 días después de la siembra, el nitrógeno se acumuló a razón de 2,5 kg/ha de N por día.

El patrón de acumulación de nitrógeno en yuca es lento durante los dos primeros meses, luego aumenta linealmente, y alcanza el máximo a los 10 meses en las variedades que maduran a los 14 meses (Hendershott et al., 1972). El ñame presenta una pronunciada subida en la necesidad de nitrógeno 3 meses después de la siembra, cuando el índice de área foliar aumenta marcadamente y comienzan a aparecer tallos secundarios (Chapman, 1965). La malanga tiene un ritmo de crecimiento rápido durante los 6 primeros meses, seguido de un descenso en el crecimiento de la parte aérea y un crecimiento estable en el peso de los bulbos desde los 3 meses hasta la maduración (De la Peña y Plucknett, 1972). La fertilización nitrogenada de los cultivos de raíces debe de tomar en cuenta estos períodos críticos de crecimiento.

LEGUMINOSAS DE GRANO

Con los actuales niveles bajos de rendimiento anual, de 0,5 a 1,0 ton/ha, los frijoles, la soya y el maní, extraen alrededor de 30 a 50 kg/ha de N. Con niveles de rendimiento más altos, Fassbender (1957) ha obtenido extracciones de 100 a 150 kg/ha de N en el caso de *Phaseolus vulgaris*.

PASTURAS

De todos los cultivos tropicales, las gramíneas forrajeras tropicales son los mayores extractores anuales de nitrógeno. A niveles bajos de

producción (10 ton/ha de materia seca) los pastos tropicales pueden extraer cerca de 100 kg/ha de N por año. Con niveles altos de producción de 30 a 50 toneladas, pueden extraer de 400 a 600 kg/ha de N por año. En estas especies perennes, los patrones de necesidad de nitrógeno varían con la época y altura de corta o de pastoreo (Vicente-Chandler et al., 1964). Cuando se mezclan gramíneas y leguminosas forrajeras, la extracción total puede acercarse más a la contribución de la leguminosa, que puede alcanzar a 200 kg/ha de N en algunos casos.

OTROS CULTIVOS

La necesidad de nitrógeno de la caña de azúcar es menor que la de los pastos tropicales. Los períodos pico coinciden con el macollaje. La extracción de nitrógeno por los cultivos arbóreos permanentes es baja, ya que la mayoría de las partes de la planta no se cosechan. La extracción de nitrógeno por el banano es baja, 50-80 kg/ha de N, en relación con la cantidad de materia seca producida.

Estas cifras presentan algunas tendencias interesantes con los niveles actuales de rendimiento en los trópicos. Los cereales, los cultivos de raíces y las leguminosas de grano extraen de 30 a 50 kg/ha de N. Los cultivos perennes tales como pasturas y banano, extraen alrededor de 60 a 100 kg/ha de N anualmente. La constancia relativa de estas cifras revela probablemente que la liberación general del nitrógeno en suelos sin fertilizar es del orden de 40 kg/ha de N con cultivos de corta duración y el doble de esta cifra para cultivo de larga duración. Debería resultar obvio que para lograr incrementos en los rendimientos se necesita una mayor cantidad de nitrógeno disponible a las plantas.

MANEJO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS

La discusión que antecede subraya la necesidad de adiciones de fertilizantes nitrogenados para obtener rendimientos altos en los trópicos. Las fuentes orgánicas probablemente son incapaces de suministrar suficiente nitrógeno para satisfacer las necesidades de los cultivos con niveles altos de rendimiento, tal como se mostró en el Capítulo 5. Por lo tanto la discusión se limitará a fertilizantes inorgánicos. Las prácticas de manejo del nitrógeno pueden tratarse en términos de dosis, fuentes, épocas de aplicación, colocación y eficiencia en la utilización.

DETERMINACION DE DOSIS DE APLICACION

Como no existen análisis de suelo prácticos para estimar los niveles de nitrógeno aprovechable en el suelo, la determinación de las dosis

óptimas tiene que hacerse con base en métodos indirectos, generalmente basado en experiencias de campo. En áreas donde se supone que el nitrógeno orgánico está en equilibrio en el suelo debido a un manejo similar por muchos años, pueden usarse tres parámetros para estimar las dosis de aplicación: 1) la cantidad que la planta necesita extraer para dar un nivel deseado de rendimiento; 2) el nitrógeno suministrado por el suelo; y 3) el porcentaje de recuperación del nitrógeno añadido.

La extracción de nitrógeno necesaria para rendimientos óptimos en el caso de arroz, maíz y trigo, puede obtenerse recurriendo a la Fig. 6.3, ó midiendo la absorción de nitrógeno en experimentos de campo, o calculando la necesidad interna de nitrógeno del cultivo bajo consideración. La necesidad interna de nitrógeno es la cantidad mínima de nitrógeno en las partes aéreas del cultivo asociadas con rendimientos máximos (Stanford, 1966). Solamente unas pocas estimaciones están disponibles: 0,2% de N para caña de azúcar; 1,3 a 2,4% para algunos pastos tropicales; 1,4% para trigo; 1,2% para maíz; y 0,8% para arroz (Stanford, 1966; Sánchez et al., 1973a). La extracción a un nivel deseado de rendimiento puede obtenerse multiplicando la necesidad interna de nitrógeno por el total de materia seca producida a los niveles de rendimiento deseados.

El nitrógeno suplido por el suelo puede estimarse del rendimiento promedio sin nitrógeno o preferiblemente, determinando la absorción de nitrógeno de las parcelas testigo en experimentos con fertilizantes nitrogenados. En condiciones de equilibrio esta es una medida confiable, pero en tierras recién desmontadas o en suelos irrigados se prefieren algunos métodos químicos (Bartholomew, 1972b). A nivel de investigación pueden usarse mediciones del nitrógeno total del suelo, materia orgánica y nitrógeno inorgánico, pero resultan muy dispendiosas y engorrosas para análisis de suelo rutinarios.

La eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados puede calcularse como la recuperación aparente del fertilizante en experimentos de campo con o sin el uso de radioisótopos N^{15} . Sabiendo la extracción de nitrógeno agregado, el porcentaje de recuperación puede calcularse de la manera siguiente:

$$\text{Porcentaje de recuperación} = \frac{\text{N absorbido con la dosis aplicada} - \text{N absorbido sin agregar N}}{\text{dosis de N}} \times 100$$

La recuperación oscila entre el 20 y el 70%. Los valores más altos son comunes en cultivos con sistemas radicales extensivos, tales como pasturas (Vicente-Chandler et al., 1964; Henzel, 1971). Las recuperaciones más bajas corresponden a áreas con humedecimiento y secamiento alternos.

Por lo tanto, la dosis óptima de nitrógeno puede determinarse por medio de la siguiente ecuación (en kg/ha):

$$\text{Dosis de N} = \frac{\text{Absorción de N a nivel de rendimiento deseado} - \text{Absorción de N sin agregar N}}{\text{Porcentaje de recuperación}}$$

RESPUESTAS DE CEREALES AL NITRÓGENO

Dosis. Las respuestas del maíz al nitrógeno son generalmente positivas, excepto en tierras recién desmontadas en las que el nitrógeno inorgánico en el perfil es muy alto, o cuando existen problemas serios de acidez o con otros elementos nutritivos. Según un resumen de Richardson (1966), muchas de las respuestas en Africa tropical, aunque positivas, sólo aumentaron el rendimiento de 1,2 a 1,4 ton/ha. Esto indica claramente que las dosis usadas fueron muy bajas o que algún otro factor, como la variedad o el espaciamiento estaban inhibiendo los rendimientos. En América tropical, donde las respuestas en rendimiento son por lo general más altas, las dosis de aplicación recomendadas van de 60 a 150 kg/ha de N (Sánchez, 1973). Además de los factores de suelo, la forma de la curva de respuestas está afectada por variedad, población de plantas y régimen de agua. Por ejemplo, las dosis de aplicación recomendadas en México para maíz han aumentado gradualmente de 40 kg/ha de N en la década de los cuarentas a 80 kg/ha de N en la década de los cincuentas y de 80 a 175 kg/ha de N en los sesentas (Sánchez, 1973). Claramente se ve que esto es resultado del mejoramiento del maíz en ese país.

La población de plantas también afecta la forma de la curva de respuesta. Con niveles bajos de aplicación de nitrógeno una población de 30.000 plantas/ha es óptima, mientras que con dosis más altas de nitrógeno, resultan mejores las poblaciones del orden de 40.000 a 50.000 plantas/ha. La Fig. 6.4 muestra la interacción entre dosis de

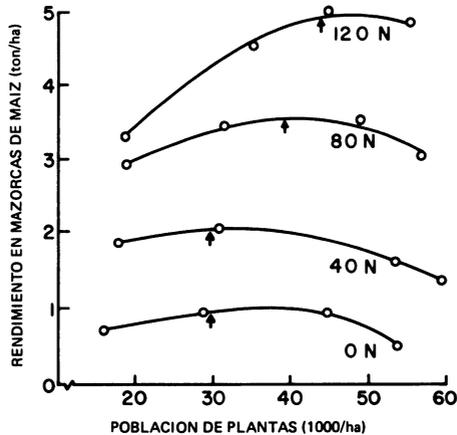


Fig. 6.4. Interacción entre respuesta al nitrógeno y población de plantas de maíz, en Guadalajara, México. La población óptima se indica con una flecha. (Fuente: Laird y Lizárraga, 1959).

nitrógeno y población en los rendimientos de maíz en Guadalajara, México. Para lograr rendimientos mayores de 4 ton/ha fueron necesarias poblaciones altas así como dosis altas de nitrógeno. El régimen de lluvias también ejerce una marcada influencia en las respuestas del maíz al nitrógeno. La Fig. 6.5 ilustra las respuestas menores que se obtuvieron en una serie de experimentos en México con maíz cuando hubo exceso de humedad o de sequía.

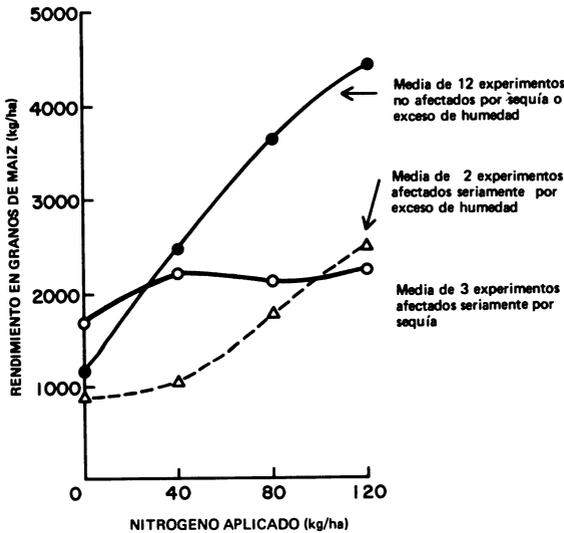


Fig. 6.5. Efectos de regímenes de humedad del suelo de maíz sin riego al nitrógeno, en el Bajío, México. (Fuente: Rockefeller Foundation, 1963-1964).

Las respuestas del arroz al nitrógeno están influenciadas por factores ajenos al suelo más que por las propiedades del suelo. El tipo de planta, la radiación solar, el espaciamiento y la duración del crecimiento determinan esencialmente la forma de la curva de respuesta al nitrógeno (Sánchez, 1972). Este tópico se discutirá en mayor detalle en el Capítulo 11.

Las respuestas del trigo al nitrógeno también están afectadas por el tipo de planta. Las variedades altas tradicionales responden positivamente a bajos niveles de nitrógeno. Cuando reciben dosis altas hay un descenso en el rendimiento debido al excesivo crecimiento vegetativo y al encame. Por otra parte, las variedades mejicanas, bajas y erectas responden positivamente a dosis altas de nitrógeno y producen rendimientos mucho más altos con las dosis óptimas de aplicación. Sus tallos erectos evitan el encame con dosis más altas de aplicación. La Fig. 6.6 ilustra el patrón de respuesta de una variedad alta (C-306) y de una variedad de porte bajo (Sonora 64) en Pantnagar, India.

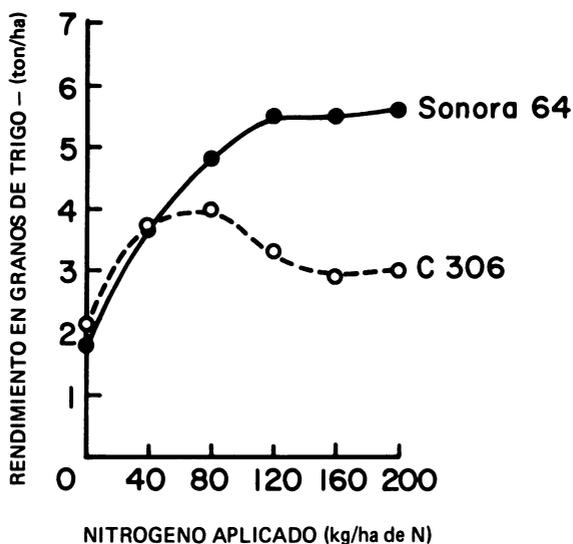


Fig. 6.6. Respuesta varietal al nitrógeno por trigo, en Pantnagar, India. (Fuente: Sharma et al, 1970).

Fuentes. Gran cantidad de investigación se ha llevado a cabo para comparar urea, sulfato de amonio y otras fuentes de nitrógeno en maíz, arroz, trigo y sorgo en los trópicos. Con todos los cultivos una evidencia abrumadora indica que no hay diferencias entre urea y sulfato de amonio u otras fuentes de amonio (DeDatta y Magnaye, 1969; International Atomic Energy Agency, 1970a; Sánchez, 1972; Khalifa, 1973). En ocasiones en que el sulfato de amonio resultó superior a la urea, el efecto se debió a deficiencia de azufre o a pérdidas por volatilización de la urea aplicada superficialmente. Cuando la urea fue superior, las diferencias se debieron al efecto acidificante del sulfato de amonio en suelos ya ácidos, o en el caso de arroz, a toxicidad por H_2S en suelos inundados muy bajos en hierro. El grueso de la evidencia indica poca diferencia en fuentes amoniaca-les cuando se aplican correctamente.

Las fuentes de nitrato generalmente son inferiores a las fuentes amoniaca-les bajo condiciones que favorecen la lixiviación o la desnitrificación. Su contenido menor de nitrógeno también significa un costo mayor por unidad de nitrógeno.

Las fuentes orgánicas son excelentes. Sin embargo la cantidad necesaria para alcanzar las dosis óptimas requieren un volumen tremendo y pueden ocasionar problemas de incorporación.

De una serie de fuentes experimentales de liberación lenta de nitrógeno inorgánico que han sido estudiadas (Prasad et al., 1971), la más promisoría hasta este momento parece ser la urea revestida con

azufre, desarrollada por Tennessee Valley Authority. Los gránulos de urea se revisten con una capa de azufre que se descompone lentamente dando por resultado una tasa de liberación del nitrógeno de 0,5 a 1% por día. La experiencia actual indica que esa liberación es muy baja para que proporcione suficiente nitrógeno para el maíz durante el período de crecimiento (Fox et al., 1974). Para el arroz, las aplicaciones de urea revestida con azufre antes de la siembra, son económicamente superiores a aplicaciones de presiembra o divididas de urea convencional bajo condiciones de lixiviación y desnitrificación rápidas (Sánchez et al., 1973b). Sin embargo la urea revestida con azufre no resulta económica bajo condiciones que no dan lugar a esas pérdidas (Diamond y Myers, 1972). Los patrones similares de absorción de nitrógeno de maíz y sorgo, y de maíz y trigo, sugieren que fuentes inorgánicas de liberación lenta pueden ser promisorias para el trigo pero menos promisorias para el sorgo. En todo caso deberían probarse bajo condiciones conducentes a grandes pérdidas de nitrógeno. Se estima que el costo por unidad de la urea revestida con azufre es un 30% mayor que el de la urea convencional.

Recientemente los inhibidores de la nitrificación han recibido mucha atención. Una revisión de Prasad et al., (1971) cita varios ejemplos de respuesta de rendimiento en todo el mundo, pero ninguna evidencia de resultados económicos bajo condiciones de campo.

Épocas de aplicación y forma de colocación. La manera más práctica de aplicar cualquier fertilizante es el voleo con incorporación al suelo antes de la siembra. En el caso del nitrógeno este procedimiento es eficiente solamente si los iones NH_4^+ y NO_3^- permanecen en la zona radicular y no son lixiviados o desnitrificados en gran escala. Como la necesidad de nitrógeno de la planta es baja en las etapas iniciales del crecimiento, la época óptima de aplicación es la que asegure un buen suministro de nitrógeno durante las etapas críticas del crecimiento de los cereales al menor costo posible.

Las aplicaciones de urea o sulfato de amonio antes de la siembra incorporados al suelo, eran tan efectivas como otras prácticas de épocas y colocación con maíz de alto rendimiento en Samaru, Nigeria, bajo condiciones de poca lixiviación (Jones, 1973). Lo mismo es cierto en arroz bajo condiciones de inundación constante donde esencialmente no hay lixiviación. Sin embargo en la mayoría de los casos, postergando la única aplicación de nitrógeno hasta la primera etapa crítica, o dividiendo la aplicación en dos, es más eficiente. El trabajo de Fox et al., (1974) en Puerto Rico, el cual se resume en la Fig. 6.7, muestra los beneficios considerables de retardar una aplicación al maíz en regiones údicas de Puerto Rico. También obtuvieron los mismos resultados con sorgo. Resultados similares se obtuvieron con arroz y trigo (Sánchez, 1972; Hamid, 1972; Khalifa, 1973). Pocas veces es provechoso hacer más de dos aplicaciones divididas.

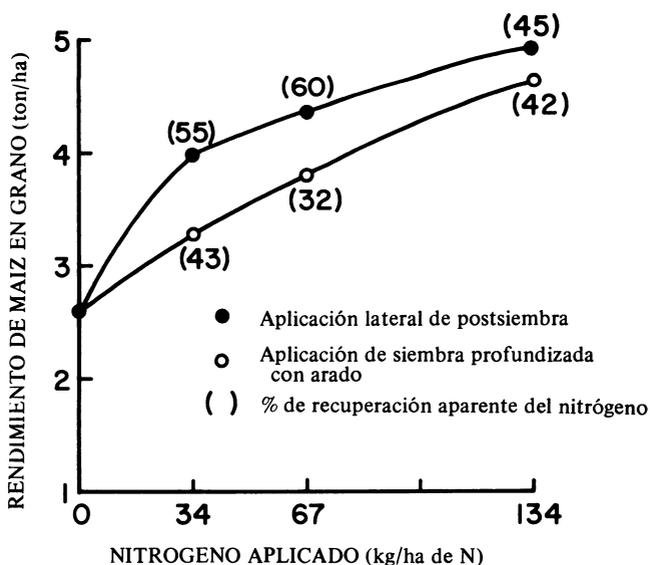


Fig. 6.7. Efecto de la programación de una aplicación de nitrógeno en la respuesta de rendimiento de maíz, en Puerto Rico. Promedio de varios Oxisoles y Ultisoles al nitrógeno. (Fuente: Fox et al, 1974).

No hay duda de que la incorporación de aplicaciones anteriores a la siembra es una buena práctica de colocación. Que el nitrógeno se aplique el voleo o en bandas depende de la manera en que se apliquen los otros nutrientes y de si la desnitrificación debe demorarse mediante dosis altas locales. Las aplicaciones de postsiembra generalmente se hacen al voleo o pueden incorporarse ligeramente al hacer la desyerba. Los estudios de International Atomic Energy Agency (1970) con maíz y arroz subrayan la importancia de la incorporación siempre que sea posible.

Eficiencia de utilización. La recuperación del nitrógeno aplicado es altamente variable. Bartholomew (1972) estima una recuperación del 50% para arroz y trigo. Estas cifras son válidas para la región templada, pero solamente para unos pocos lugares de los trópicos. Fox et al., (1974) obtuvieron recuperaciones del 51% con la aplicación lateral de postsiembra con la dosis óptima en maíz en Puerto Rico, pero sólo el 33% cuando la misma dosis se incorporó dentro de la superficie del suelo. Jones (1973) informa de una recuperación del 70% en maíz bajo condiciones de ausencia de lixiviación, aplicando el nitrógeno antes de la siembra o con colocación lateral.

La recuperación de nitrógeno por arroz oscila del 30 al 50% bajo inundación constante y de 20 al 30% con prácticas de manejo de

agua conducentes a lixiviación y desnitrificación. En el segundo caso el uso de urea revestida con azufre puede aumentar la recuperación al 30 ó 40% (Sánchez et al., 1973b). La recuperación de nitrógeno por el trigo puede ser tan alta como del 50% con las mejores dosis, épocas de aplicación y prácticas de colocación. (Hamid, 1972).

RESPUESTAS DE CULTIVOS DE RAICES AL NITROGENO

A pesar de su gran necesidad de nitrógeno, las respuestas de estos cultivos son a menudo negativas. Las aplicaciones de nitrógeno aumentan la relación parte aérea:raíz y disminuyen el rendimiento en muchos casos. En otros casos aumenta el rendimiento de tubérculos y contenido de proteína, pero no el rendimiento de almidón (Sánchez, 1973). Experimentos a largo plazo de Normanha et al., (1968) en Brasil, subrayan la importancia de una relación N:K correcta. Se obtuvieron respuestas al nitrógeno en presencia de un amplio suministro de fósforo y potasio. Las estacas de yuca son muy susceptibles a las concentraciones de sales cuando están en contacto con los fertilizantes. El nitrógeno, por lo tanto, debe aplicarse al lado del surco de siembra y el resto en aplicación lateral en etapas posteriores.

La papa responde a aplicaciones de 60 a 120 kg/ha de N en el sur de Brasil y a 160 kg/ha de N en la sierra peruana. En Perú, McCollum y Valverde (1968) notaron que la magnitud de la respuesta estaba en relación inversa con el contenido de materia orgánica del suelo. Además no observaron diferencias entre fuentes de nitrógeno, pero con guano la cantidad necesaria para la dosis óptima era demasiado voluminosa para que fuera práctica. Las mejores épocas de aplicación es la mitad al momento de siembra y la otra mitad en etapas posteriores.

El camote normalmente responde a aplicaciones de 40 a 60 kg/ha de N cantidades mayores pueden aumentar la razón parte aérea:raíz y disminuir el rendimiento. No se han observado diferencias con respecto a fuentes, épocas de aplicación o colocación. El ñame también responde a dosis moderadas de nitrógeno, pero presenta un efecto bastante dramático con respecto a épocas de aplicación. Chapman (1965) encontró en Trinidad que demorando las aplicaciones hasta 3 meses después de la siembra, coincidían con aumentos pronunciados del índice de área foliar y hubo grandes aumentos de rendimiento. Las aplicaciones en el momento de la siembra no tuvieron efecto, en gran parte debido a pérdidas por lixiviación. En Hawaii la malanga o taro responde a dosis muy altas, hasta de 560 kg/ha de N, y da rendimientos hasta de 50 ton/ha bajo condiciones de inundación. De acuerdo con De la Peña y Plucknett (1972), con dosis de 280 kg/ha de N se obtuvieron rendimientos máximos de 20 ton/ha sin inundación.

RESPUESTA DE LEGUMINOSAS DE GRANO AL NITROGENO

Aunque supuestamente las leguminosas reciben su nitrógeno de la fijación simbiótica, hay dos casos en que es necesaria la fertilización con nitrógeno inorgánico. En América Latina la fijación simbiótica por medio de *Rizobium* es insignificante en *Phaseolus vulgaris*, y se necesitan aplicaciones de nitrógeno en dosis del orden de 30 a 100 kg/ha de N de acuerdo con una revisión de Fassbender (1967). El segundo caso ocurre cuando el suelo presenta una deficiencia severa de nitrógeno. En ambos casos una pequeña aplicación en el momento de la siembra ayuda a la planta a establecerse. Esta práctica también ayuda a la soya.

EFFECTOS RESIDUALES DE LA FERTILIZACION NITROGENADA

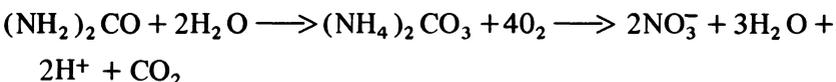
SUMINISTRO DE NITROGENO INORGANICO

Se supone que del 30 al 50% de nitrógeno agregado es recuperado por las plantas, y el resto permanece en el suelo o se pierde por lixiviación y desnitrificación. El destino del nitrógeno sobrante indudablemente varía según las condiciones de suelo y de clima. En algunos casos grandes cantidades se pierden del perfil y en otros hay una acumulación gradual. Fox et al., (1974) informan que algunos Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico contenían más de 300 kg/ha de N de nitrógeno inorgánico en sus perfiles después de muchos años de fertilización continua. En estos suelos se obtuvieron rendimientos de 5,8 ton/ha de sorgo en grano sin nitrógeno adicional.

La magnitud de estas acumulaciones de nitrógeno no se conoce bien o no se describieron. Pueden ser resultados de altas dosis que se han aplicado consistentemente por muchos años, y todo el exceso de nitrógeno no se ha perdido completamente por lixiviación o desnitrificación.

CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

El sulfato de amonio y la urea tienen una acidez residual neta debido a las siguientes reacciones:



El sulfato de amonio genera 2 moles de H^+ por mol de NH_4^+ , mientras que la urea genera 1 mol de H^+ por mol de NH_4^+ . En términos de valores de cal, se necesitan 7,1 kg de $CaCO_3$ para neutralizar 1 kg de nitrógeno en la forma de sulfato de amonio y la mitad de esa cantidad cuando la fuente es la urea. El proceso de nitrificación es la causa de la acidez residual. Si los iones de NH_4^+ se toman directamente no hay efecto acidificante. También es necesaria la presencia de oxígeno para que haya acidez residual, ya que la desnitrificación tiene el efecto contrario. El nitrato de sodio produce un aumento neto del pH por su contenido de sodio.

Los efectos residuales de los fertilizantes nitrogenados sobre las propiedades químicas del suelo son más comunes en pasturas fuertemente abonadas Villamizar y Lotero (1967) evaluaron los efectos de aplicaciones anuales de urea, sulfato de amonio y nitrato de sodio en dosis hasta de 1000 kg/ha de N por año durante 5 años en un Andept de Colombia. Los resultados, presentados en la Fig. 6.8, indican que

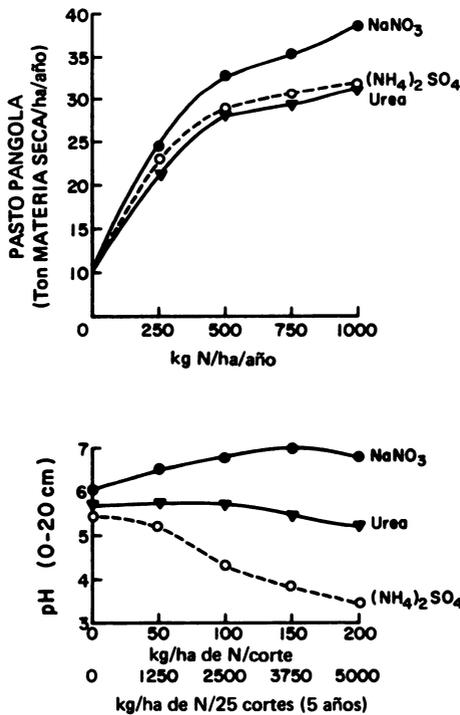


Fig. 6.8. Efectos de dosis y fuentes de nitrógeno en rendimientos de pasto pangola y cambios en el pH del suelo después de cinco años en un Andept de Colombia. (Fuente: Villamizar y Lotero, 1967).

rendimientos óptimos de 30 ton/ha por año de pasto Pangola se obtuvieron con una dosis anual de 500 kg/ha de N. Con esta dosis el pH de la capa arable bajó de 5,8 a 4,2 con sulfato de amonio, quedó igual con urea y subió alrededor de 6,8 con nitrato de sodio. En vista de la similitud en eficiencia entre urea y sulfato de amonio la urea es definitivamente la mejor fuente.

Aplicaciones anuales de 900 a 4000 kg/ha de N disminuyeron drásticamente el pH y la saturación de bases de dos subsuelos en Puerto Rico (Abruña et al., 1959), tal como se aprecia en la Fig. 6.9.

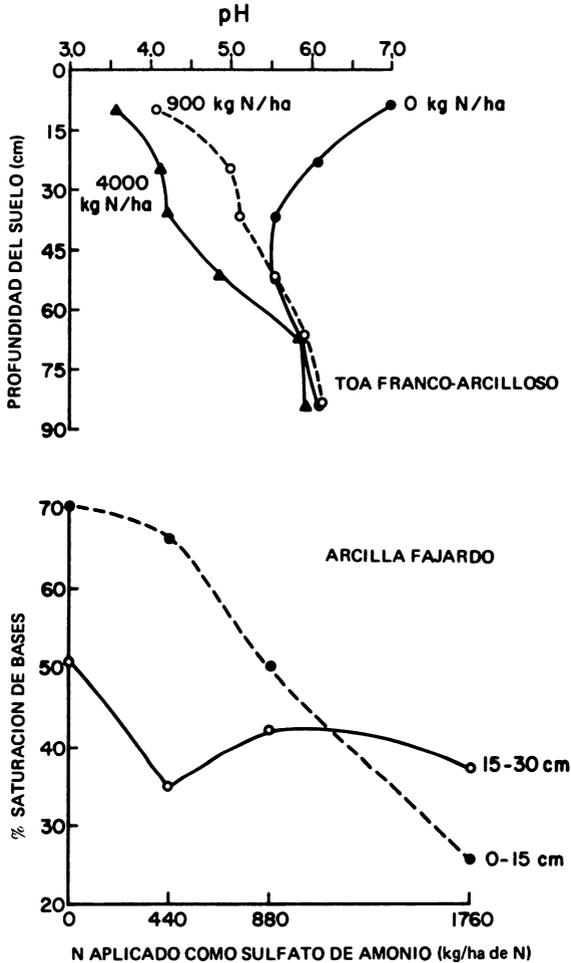


Fig. 6.9. Efectos de la lixiviación de fertilizantes nitrogenados en el pH y cambios en la saturación de bases de dos suelos de Puerto Rico. (Fuente: Abruña et al., 1968).

Cuando se aplicó cal conjuntamente con estas dosis tan altas, el nivel de bases de subsuelos ácidos aumentó dramáticamente. Pearson et al, (1962) atribuyeron este efecto al movimiento descendente del calcio y del magnesio aplicados a la superficie en forma de cal. En tales casos Vicente-Chandler et al, (1964) han recomendado la aplicación de una tonelada de cal por tonelada del fertilizante 10-14-10 cuando se usa sulfato de amonio en pasturas de Puerto Rico fuertemente fertilizadas.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. Como en el caso del carbono orgánico, el contenido total de nitrógeno en los trópicos básicamente no difiere del de la zona templada. Las fuentes principales para las adiciones de nitrógeno inorgánico al suelo son las fijaciones simbiótica y asimbiótica, la lluvia y el polvo. Las fijaciones de nitrógeno asimbiótica y simbiótica por varias especies de bacterias en asociación con ciertos pastos tropicales proporcionan cantidades de nitrógeno en ciertos suelos ácidos. En los ambientes tropicales las tasas de mineralización del nitrógeno orgánico parecen estar afectadas en mayor grado por las condiciones de humedad del suelo.
2. En condiciones tropicales ústicas se encuentra un patrón cíclico de fluctuaciones del nitrógeno inorgánico en el perfil del suelo. Este incluye movimiento ascendente del nitrato durante la estación seca, incrementos repentinos pero de corta duración de la mineralización al comienzo de la estación lluviosa, y agotamiento gradual debido a la absorción y a la lixiviación. En ciertos perfiles los contenidos de nitrógeno inorgánico son mucho más altos de lo que antes se creía.
3. El comportamiento de fertilizantes nitrogenados en los trópicos no difiere del de la región templada. La hidrólisis de la urea, la volatilización del amoniaco y las aplicaciones de sulfato de amonio al voleo confirman los conceptos aceptados. Las aplicaciones localizadas de nitrógeno alrededor de plantas individuales o en bandas, dan por resultado una disminución temporal en la disponibilidad del nitrógeno añadido.
4. Las necesidades de nitrógeno de los principales cultivos tropicales son variables y dependen de los niveles deseados de rendimiento. Algunos cultivos muestran una necesidad interna definida de nitrógeno. Las dosis de aplicación de nitrógeno pueden determinarse mejor por medio de experimentos de campo o de cálculos basados en la absorción de nitrógeno y la recuperación esperada del nitrógeno agregado, que por análisis de suelo.

5. Las prácticas de manejo de los fertilizantes nitrogenados dependen de la necesidad del cultivo, propiedades del suelo, fuentes, colocación y épocas de aplicación. En los trópicos hay poca diferencia en la efectividad de la urea y el sulfato de amonio. Los abonos orgánicos son demasiado bajos en nitrógeno para suministrar suficiente cantidad para rendimientos altos. Los fertilizantes inorgánicos de liberación lenta, como la urea revestida con azufre, parecen promisorios para cultivos de crecimiento lento bajo condiciones favorables de lixiviación. Aunque las aplicaciones de nitrógeno incorporadas en presembrado son las más fáciles, generalmente resultan en significativas pérdidas debido a lixiviación o desnitrificación. Las épocas de aplicación del nitrógeno deben programarse de manera que suministren suficiente nitrógeno a las plantas en sus etapas críticas de crecimiento. Esas etapas han sido identificadas para la mayoría de los cereales, ciertos cultivos de raíces y ciertas especies de pasturas.
6. Una fertilización intensiva por varios años puede generar efectos residuales marcados, que incluyen alto contenido de nitrógeno inorgánico en algunos perfiles y cuando se usa sulfato de amonio, una drástica disminución del pH y de la saturación de bases en el perfil.

REFERENCIAS

- ABRUÑA, F., PEARSON, R. W., y ELKINS, C. B. Quantitative evaluation of soil reaction and base status changes resulting from field applications of residually acid forming nitrogen fertilizers. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 22:539-542. 1958.
- ACQUAYE, D. K., y CUNNINGHAM, R. K. Losses of nitrogen by ammonia volatilization on surface-fertilized tropical forest soils. *Trop. Agr. (Trinidad)* 42:281-292. 1965.
- AGARWAL, A. S., SINGH, B. R., y KANEHIRO, Y. Soil nitrogen and carbon mineralization as affected by drying-rewetting cycles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:96-100. 1971.
- _____, _____, _____, Differential effects of carbon sources on nitrogen transformations in Hawaiian soils. *Plant and Soil* 36:529-537. 1972.
- AGBOOLA, A. A. Increasing the efficiency of applied fertilizer on maize. I. Timing of application of nitrogenous fertilizer. *Nigerian Agr. J.* 5:45-48. 1968.
- BARTHOLOMEW, W. V. Soil nitrogen and organic matter. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, D.C. 1972a. pp. 63-81.
- _____. Soil nitrogen: supply processes and crop requirements. *Int. Soil Fert. Eval. Improvement Program Tech. Bull.* 6. North Carolina State University, Raleigh, 1972b.

- BIRCH, H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil* 10:9-31. 1958.
- _____. Nitrification of soils after different periods of dryness. *Plant and Soil* 12:81-96. 1960a.
- _____. Soil drying and soil fertility. *Trop. Agr. (Trinidad)* 37:3-10. 1960b.
- _____. Mineralization of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions. *Plant and Soil* 20:43-49. 1964.
- BIRONDEL, D. Contribution à l'étude de la croissance-matière sèche et de l'alimentation azotée des céréales de culture sèche au Sénégal. *Agron. Tropicale (France)* 26:707-720. 1971a.
- _____. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (Dior) au Sénégal. *Agron. Tropicale (France)* 26:1303-1333. 1971b.
- _____. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à Séfa (Sénégal). *Agron. Tropicale (France)* 26:1334-1353. 1971c.
- _____. Contribution à la connaissance de l'azote en sol ferrugineux tropical à Niéro-du-Rip (Sénégal). *Agron. Tropicale (France)* 26:1354-1361. 1971d.
- _____. Rôle de la plante dans l'orientation de la dynamique de l'azote en sol sableux. *Agron. Tropicale (France)* 26:1362-1371. 1971e.
- _____. Rôle de la matière organique libre dans la minéralisation en sol sableux; relation avec l'alimentation azotée du mil. *Agron. Tropicale (France)* 26:1372-1377. 1971f.
- BORNEMISZA, E. y PINEDA, R. Amorphous minerals and nitrogen mineralization in volcanic ash derived soils. In Panel on soils derived from volcanic ash in Latin America. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969. pp. B7.1-B7.7.
- BRUCE, R. C. y TYNER, E. H. Timing nitrogen applications for maize in tropical regions characterized by wet and dry seasons. *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. (Madison, Wisc.)* 3:504-509. 1960.
- CALDER, E. A. Features of nitrate accumulation in Uganda. *J. Soil Sci.* 8:60-72. 1957.
- CHAPMAN, R. Some investigations into factors limiting yields of White Lisbon yams (*Dioscorea alata*) under Trinidad conditions. *Trop. Agr. (Trinidad)* 42:145-151. 1965.
- COMMONWEALTH AGRICULTURAL BUREAU. A Review of nitrogen in the tropics with particular reference to pastures. Commonwealth. Bur. Pastures Field Crops Bull. 46. Harpenden, England, 1962.
- CORNORTH, I. S. Seasonal changes in mineralizable nitrogen in Trinidad soils. *Trop. Agr. (Trinidad)* 2:157-162. 1971a.
- _____. Nitrogen mineralization in West Indian soils. *Exptal. Agr.* 7:345-349. 1971b.
- _____, y DAVIES, J. B. Nitrogen transformations in tropical soils. I. Mineralization of nitrogen rich organic materials added to the soil. *Trop. Agr. (Trinidad)* 45:211-221. 1968.
- CUNNINGHAM, R. K. Mineral nitrogen in tropical forest soils. *J. Agr. Sci.* 59:257-262. 1962.
- DeDATTA, S. K. y MAGNAYE, C. P. A survey of forms and sources of fertilizer nitrogen for flooded rice. *Soils and Fert.* 32:103-109. 1969.
- De la PEÑA, R. y PLUCKNETT, D. L. Effect of nitrogen fertilization on the growth, composition and yield of upland and lowland taro (*Colocasia esculenta*). *Exptal. Agr.* 8:187-194. 1972.

- DELAUNE, R. D., y PATRICK, W. H. Urea conversion to ammonia in water-logged soils. *Soils Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:603-607. 1970.
- DIAMOND, R. B., y MYERS, F. J. Crop responses and related benefits from sulfur-coated urea. *Sulphur Inst. J.* 8:9-11. 1972.
- DIAMOND, W. E. Fluctuation in nitrogen contents of some Nigerian soils. *Emp. J. Exptal. Agr.* 5:264-280. 1937.
- DOBEREINER, J. Nitrogen fixing bacteria in the rhizosphere of sugar cane. *Plant and Soil* 14:211-217. 1961.
- _____. Non symbiotic fixation in tropical soils. *Pesq. Agropec. Bras.* 3:1-6. 1968.
- _____, DAY, J. M., y DART, P. J. Nitrogenase activity in the rhizosphere of sugar cane and some other tropical grasses. *Plant and Soil* 37:191-196. 1972.
- _____. Associative symbiosis in tropical grasses: characterization of microorganisms and dinitrogen fixing sites. Paper presented at the International Symposium on N₂ Fixation, June 3-7, Washington State University, 1974. 27 p.
- _____. Potential significance of nitrogen fixation in rhizosphere association of tropical grasses. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds). *Soil management in Tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 197-210.
- DOMMERMUES, Y. Nitrogen mineralization at low moisture contents. *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. (Madison, Wisc.)* 2:672-678. 1960.
- ENYI, B. A. C. The efficiency of urea as fertilizers under tropical conditions. *Plant and Soil* 23:385-396. 1965.
- EZETA, F. N. y McCOLLUM, R. E. Dry matter production, nutrient uptake and removal by *Solanum andigena* in the Peruvian Andes. *Amer. Potato J.* 49:151-163. 1972.
- FAO. The State of food and agriculture. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1971.
- FASSBENDER, W. H. La fertilización del frijol (*Phaseolus* spp.). *Turrialba* 17:46-52. 1967.
- FERNANDEZ, R. y LAIRD, R. J. Efectos de la sequía durante el espigamiento del maíz fertilizado con diferentes cantidades de nitrógeno. *Secretaría de Agricultura y Ganadería (México) Folleto Tec.* 30. 1958.
- FOX, R. H., TALLEYRAND, H., y BOULDIN, D. R. Nitrogen fertilization of corn and sorghum grown in Oxisols and Ultisols in Puerto Rico. *Agron. J.* 66:534-540. 1974.
- FREIRE, J. R. S., GEOPFERT, C. P., y VIDOR, C. Inoculation of legumes in Brazil. In biology and ecology of nitrogen. National Academy of Sciences, Washington, 1969. pp. 101-113.
- GREENLAND, D. J. Nitrate fluctuations in tropical soils. *J. Agr. Sci.* 50:82-91. 1958.
- _____, y NYE, P. H. Increases in carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *J. Soil Sci.* 9:284-299. 1959.
- HAMID, A. Efficiency of N uptake by wheat as affected by time and rate of application, using N¹⁵ labelled ammonium sulfate and sodium nitrate. *Plant and Soil* 37:389-394. 1972.
- HARDY, F. Seasonal fluctuations of soil moisture and nitrate in a humid tropical climate. *Trop. Agr. (Trinidad)* 23:40-49. 1946a.
- _____. The significance of carbon nitrogen ratios in soils growing cotton. III. Nitrate fluctuations in relation to planting date and soil manurial requirements in the British West Indies. *Trop. Agr. (Trinidad)* 23:201-210. 1946b.

- HENDERSHOTT, C. H. et al. (eds.). A literature review and research recommendation on cassava. University of Georgia, Athens, 1972.
- HENZELL, E. F. y NORRIS, D. O. Processes by which nitrogen is added to the soil-plant system. In A review of nitrogen in the tropics with particular reference to pastures. Commonwealth Bur. Pastures Field Crops. Bull. 46. 1962. pp. 1-18.
- _____. Recovery of nitrogen from four fertilizers applied to Rhodes grass in small plots. Austr. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 11:420-430. 1971.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Rice fertilization. Tech. Repr. Ser. 108, Vienna, 1970a.
- _____. Fertilizer management practices for maize: results of experiments with radioisotopes. Tech. Repts. Ser. 121, Vienna, 1970b.
- ISHAQUE, M. y CORNFIELD, A. H. Effect of level of soil moisture on nitrogen mineralization and nitrification during incubation on East Pakistan tea soil. Bangladesh J. Biol. Agr. Sci. 1:52-58. 1972.
- JAIN, N. K., MAURYA, D. P., y SINGH H. P. Effect of time and methods of applying nitrogen to dwarf wheats. Exptal. Agr. 7:21-26. 1971.
- JEWITT, T. N. Loss of ammonia from ammonium sulfate applied to alkaline soils. Soil Sci. 54:401-409. 1942.
- JONES, M. J. y BROMFIELD, A. R. Nitrogen in the rainfall at Samaru, Nigeria. Nature 227:86. 1970.
- _____. Time of application of nitrogen fertilizer to maize at Samaru, Nigeria. Exptal. Agr. 9:113-120. 1973.
- KANEHIRO, Y., NAGASAKO, L. K., y HADANO, M. F. Leaching losses of nitrogen fertilizers. Hawaii Farm Sci. October 1970:6-7. 1960.
- KASS, D. L. y DROSDOFF, M. Sources of nitrogen in tropical environments. Agron. Mimeo 70-9. Cornell University, Ithaca, N.Y. 1970.
- _____, _____, y ALEXANDER, M. Nitrogen fixation by *Azotobacter paspali* in association with Bahiagrass (*Paspalum notatum*). Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35:286-289. 1971.
- KHALIFA, M. A. Effects of nitrogen on leaf area index, leaf area duration, net assimilation rate and yield of wheat. Agron. J. 65:253-256. 1973.
- KINJO, T. y PRATT, P. F. Nitrate adsorption. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35:722-732. 1971.
- LAIRD, R. J. y LIZARRAGA, H. Fertilizantes y población óptima de plantas para maíz de temporal en Jalisco. Secretaría de Agricultura y Ganadería (México) Folleto Tec. 35. 1959.
- LANDRAU, P. y SAMUELS, G. The effect of fertilizers on the yield and quality of sweet potatoes. J. Agr. Univ. Puerto Rico 35:71-87. 1951.
- LATHWELL, D. J., DUBEY, H. D., y FOX, R. H. Nitrogen supplying power of some tropical soils of Puerto Rico and methods for its evaluation. Agron. J. 64:763-766. 1972.
- LUGO, J. C. Determination of nitrogen use efficiency in wheat by the isotopically labelled fertilizer techniques. Ceiba 16:57-87. 1970.
- MALAVOLTA, B. Studies on the mineral nutrition of cassava. Plant Physiol. 30:81-82. 1955.
- McCOLLUM, R. E. y VALVERDE, C. The fertilization of potatoes in Peru. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 185. 1968.
- MEDINA, H. (ed.). El uso del nitrógeno en el trópico. Segundo Coloquio de Suelos, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos Ecuatoriales 3(1):1-464. 1972.

- MEIKLEJOHN, J. Microbiology of the nitrogen cycle in some Ghana soils. *Emp. J. Exptal. Agr.* 30:115-126. 1962.
- MONTOJOS, J. C. y MAGALHAES, A. C. Growth analysis of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L. var Pintado) under varying conditions of solar radiation and nitrogen application. *Plant and Soil* 35:217-223. 1971.
- NORMANHA, E. S., PEREIRA, A. S., y FREIRE, E. S. Modo e época de aplicação de adubos minerais em cultura de mandioca. *Bragantia* 27:143-154. 1968.
- NYE, P. H. Fertilizer responses in the Gold Coast in relation to time and method of application. *Emp. J. Exptal. Agr.* 22:101-111. 1954.
- OCHSE, J. J., SOULE, M. J., DIJKMAN, M. J., y WEHLBURG, C. Tropical and subtropical agriculture. Macmillan, New York, 1961.
- OELSLIGLE, D. D. Accumulation of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Turrialba* 25:85-87. 1975.
- ORIOLE, G. A., MOGILNER, I., y BARTRA, W. L. Acumulación de materia seca. N, P, K, y Ca en *Manihot esculenta*. *Bonplandia* 2:175-182. 1967.
- PASSIOURA, J. B. y WETSELAAR, R. Consequences of banding nitrogen fertilizers in soil. II. Effect on the growth of wheat roots. *Plant and Soil* 36:461-473. 1972.
- PEARSON, R. W., ABRUÑA, F., y VICENTE-CHANDLER, J. Effects of lime and nitrogen applications in the downward of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. *Soil Sci.* 93:77-82. 1962.
- PRASAD, R., RAJALE, G. B., y LAKDIVE, B. A. Nitrification retarders and slow-release nitrogen fertilizers. *Adv. Agron.* 23:337-383. 1971.
- PUNTE, F. F., SANCHEZ, D. N., CHAVEZ, S., y LAIRD, R. J. Prácticas de fertilización y población óptima para siembras de maíz en las regiones tropicales de Veracruz. Secretaría de Agricultura y Ganadería (México) Folleto Tec. 45. 1963.
- RAMIREZ, A. y LOTERO, J. Efecto de la dosis y frecuencia de aplicación de nitrógeno en la fertilidad y propiedades químicas del suelo. *Rev. Inst. Colomb. Agropec.* 4:227-254. 1969.
- RICHARDSON, H. L. The use of fertilizers. In R. P. Moss (ed.). *The soil resources of Tropical Africa.* Cambridge University Press, Oxford, 1966. pp. 137-154.
- ROCKEFELLER FOUNDATION. Annual Report Program in the Agricultural Sciences. New York, 1963-1964.
- ROY, R. N. y WRIGHT, B. C. Sorghum growth and nutrient uptake in relation to soil fertility. I. Dry matter accumulation patterns, yield and N content of the grain. *Agron. J.* 65:709-711. 1973.
- SANCHEZ, P. A. y CALDERON, M. V. Timing of nitrogen applications for rice grown under intermittent flooding in the Coast of Peru. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:595-602. 1971.
- _____. Nitrogen fertilization and management in tropical rice. *North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 213. 1972.
- _____. Nitrogen fertilization. In *A review of soil research in Tropical Latin America.* North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 90-125.
- _____, RAMIREZ, G. E., y CALDERON, M. V. de. Rice responses to nitrogen under high solar radiation and intermittent flooding in Peru. *Agron. J.* 65:523-529. 1973a.
- _____, GAVIDIA, A., RAMIREZ, G. E., VERGARA, R., y MUINGUILLO, F. Performance of sulfur-coated urea under intermittently flooded rice culture in Peru. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:789-792. 1973b.

- SEMB, G. y ROBINSON J. B. D. The natural nitrogen flush in different arable soils and climates in East Africa. *East Afr. Agr. For. J.* 34:350-370. 1969.
- SHANKARACHARYA, N. B. y MEHTA, B. V. Note on the losses of nitrogen by volatilization of ammonia from loamy-sand soil of Anand treated with different N carriers under field conditions. *Indian J. Agr. Sci.* 41:131-133. 1971.
- SHARMA, K. C., MISRA, R. D., WRIGHT, B. C., KRANTZ, B. Response of some dwarfs and tall wheats to nitrogen. *Indian J. Agron.* 15:97-105. 1970.
- SINGH, B. R. y KANEHIRO, Y. Adsorption of nitrate in amorphous and kaolinitic soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33:681-683. 1969.
- SMITH, R. L., BOUTON, J. H., SCHANK, S. C., y QUEENSBERRY, K. H. Yield increases in tropical grain and forage grasses after inoculation with *Spirillum lipoferum* in Florida. Paper presented at a Conference on Biological Nitrogen Fixation and Farming Systems of the Humid Tropics. International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, 1975.
- SRIVATSAVA, S. P. An appraisal of nitrogen fertilization practices for paddy, wheat, sugar cane and potato. *Plant and Soil* 33:265-271. 1969.
- _____, y SINGH, A. Utilization of nitrogen by dwarf sorghum. *Indian J. Agr. Sci.* 41:543-546. 1971.
- STANFORD, G., AYRES, A. S., y DOI, M. Mineralizable soil nitrogen in relation to fertilizer needs of sugar cane in Hawaii. *Soil Sci.* 99:132-137. 1965.
- _____. Nitrogen requirements of crops for maximum yields. In M. H. MacVickar. et al. (eds.). *Agricultural anhydrous ammonia-technology and use.* American Society of Agronomy, Madison, Wisc. 1966. pp. 237-257.
- _____, y SMITH, S. J. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:465-472. 1972.
- _____. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *J. Environ. Quality* 2:159-166. 1973.
- STEPHENS, D. Upward movement of nitrate in a bare soil on Uganda. *J. Soil Sci.* 13:52-59. 1962.
- TAKAHASHI, D. T. Fate of unrecovered fertilizer nitrogen in lysimeter studies with N^{15} . *Hawaii Sugar Planters Rec.* 58:95-101. 1970.
- TAMINI, Y. N., y KANEHIRO, Y. Urea transformations in Hawaiian soils. *Hawaii Farm Sci.* July 1962:6-7. 1962.
- TERRY, D. L. y McCANTS, C. B. Quantitative prediction of leaching in field soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:271-276. 1970.
- VICENTE-CHANDLER, J., CARO-COSTAS, R., PEARSON, R. W., et al. Intensive pasture management in Puerto Rico. *Univ. Puerto Rico Agr. Exp. Sta. Bull.* 202. 1964.
- VILLAMIZAR, F. y LOTERO, J. Respuesta del pasto Pangola a diferentes fuentes y dosis de nitrógeno. *Rev. Inst. Colomb. Agropec.* 2:57-70. 1967.
- WEBSTER, C. C. y WILSON, P. N. *Agriculture in the tropics.* Longmans, London, 1966.
- WETSELAAR, R. Nitrate distribution in tropical soils. I. Possible causes of nitrate accumulation near the surface after a long dry period. II. Extent of capillary accumulation of nitrate during a long dry period. *Plant and Soil* 15:110-133. 1961.
- _____. Nitrate distribution in tropical soils. III. Downward movement and accumulation of nitrate in the subsoil. *Plant and Soil* 16:19-31. 1962a.
- _____. The fate of nitrogenous fertilizers in a monsoonal climate. In *Trans. Comm. IV and V. Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*, 1962f. pp. 588-595.

- WETSELAAR, R., PASSIOURA, J. B., SINGH, B. R. Consequences of banding nitrogen fertilizers in soil. I. Effects of nitrification. *Plant and Soil* 36:159-175. 1972.
- _____, JAKOBSEN, P., y CHAPLIN, G. R. Nitrogen balance in crop systems in tropical Australia. *Soil Biol. Biochem.* 5:35-40. 1973a.
- _____, PASSIOURA, J. B., ROSE, D. A., y JAKOBSEN, P. Banding nitrogen fertilizers soil: principles and practice. *Chim. et Ind.* 106:567-572. 1973b.
- WILD, A. Mineralization of soil nitrogen at a savanna site in Nigeria. *Exptal. Agr.* 8:91-97. 1972a.
- _____. Nitrate leaching under bare fallow at a site in northern Nigeria. *J. Soil Sci.* 23:315-324. 1972b.
- WRIGLEY, G. *Tropical agriculture*. Batsford, London, 1961.

CAPITULO 7

ACIDEZ DEL SUELO Y ENCALAMIENTO

La gran mayoría de los suelos de los trópicos son ácidos. Sin embargo la gran mayoría de los suelos cultivados de los trópicos húmedos no son ácidos. A través de las civilizaciones el hombre ha tenido la tendencia a establecerse en suelos con niveles altos de bases. No obstante, cuando la población crece más allá de estos centros iniciales, a menudo se ponen en cultivo suelos ácidos. Generalmente se puede generalizar con seguridad que una gran proporción de los trópicos está ocupada por suelos con valores de pH menores de 6. Como región, América tropical tiene más suelos ácidos que Asia o África tropical. Por ejemplo León (1970) estima que el 70% de los suelos de Colombia tienen problemas de acidez.

La práctica bien establecida de encalar los suelos de la zona templada hasta alcanzar su neutralidad, no resulta efectiva en la mayoría de los suelos altamente meteorizados de los trópicos. Con demasiada frecuencia el encalamiento hasta pH 7 ocasiona más daño que bien. Además muchos cultivos tropicales están bien adaptados a condiciones de suelo ácido y a menudo no responden a la cal, como lo hacen cultivos bien conocidos.

El propósito de este capítulo es examinar el nivel de la acidez del suelo y de los problemas de encalamiento en los trópicos a la luz de conceptos modernos y en términos de diferencias varietales y de especies.

NATURALEZA DE LA ACIDEZ DEL SUELO

ALUMINIO INTERCAMBIABLE Y PORCENTAJE DE SATURACION DE ALUMINIO

La acidez del suelo es un parámetro con una definición deficiente. A finales de la década de los cincuenta se creía que el hidrógeno intercambiable era la causa de la acidez del suelo. Sin embargo los trabajos de Coleman y otros probaron que el aluminio intercambiable era el catión dominante asociado con la acidez del suelo. Los iones de

hidrógeno producidos por la descomposición de la materia orgánica son inestables en suelos minerales porque reaccionan con arcillas de silicatos laminares, liberando aluminio intercambiable y ácido silíceo (Coleman y Thomas, 1967). En suelos minerales ácidos se encuentra hidrógeno intercambiable en pequeñas cantidades. En suelos altos en materia orgánica el hidrógeno intercambiable está asociado con los grupos carboxil de la materia orgánica.

El aluminio intercambiable se determina mediante extracción con sales normales sin tamponar, tal como KCl y titulando el extracto con una base (Lin y Coleman, 1960). El aluminio intercambiable se precipita con un pH alrededor de 5,5 a 6,0. Por lo tanto con valores de pH del suelo mayores se encuentra poco o nada de aluminio intercambiable. La Fig. 7.1 ilustra esta relación en Oxisoles y Andepts de Panamá.

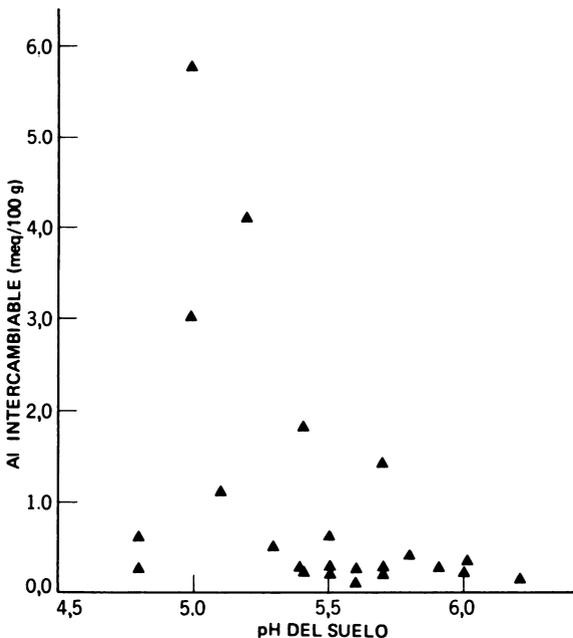


Fig. 7.1 Aluminio intercambiable a diferentes valores de pH en nueve Oxisoles y Andepts de Panamá. (Fuente: Mendez-Lay, 1973).

Además de los valores reales de aluminio intercambiable, una medida útil de la acidez del suelo es el porcentaje de saturación de aluminio de la CIC efectiva. La saturación de aluminio se calcula dividiendo el aluminio intercambiable (e H^+ si hay presente) extraídos por KCl normal sin tamponar entre la suma de las bases intercambiables más aluminio intercambiable (e hidrógeno). El porcentaje de

aluminio intercambiable o su recíproco, porcentaje de saturación de bases, es un parámetro útil. En la Fig. 7.2 aparece un ejemplo de relaciones de pH y saturación de aluminio en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico. Como el aluminio se precipita con un pH alrededor de 5,5 a 6,0, a esos niveles de pH los suelos están esencialmente saturados de bases.

Otros métodos que hacen caso omiso de la carga dependiente del pH todavía se usan ampliamente en todos los trópicos. La acidez titulable, total o no intercambiable es la cantidad de acidez extraída con solución de BaCl_2 -TEA tamponada a pH 8,2. Este valor es mucho mayor (en ocasiones 10 veces más) que el de aluminio intercambiable porque también incluye hidrógeno no intercambiable asociado con los grupos carboxil, y con óxidos hidratados de hierro y aluminio. Estos componentes no tienen efectos nocivos en el crecimiento de las plantas (Kamprath, 1972). Por lo tanto la acidez titulable no es de valor práctico. Cuando el porcentaje de saturación de bases se calcula como la suma de cationes básicos más la acidez titulable, los valores que se obtienen exageran la verdadera acidez de suelos que tienen carga dependiente del pH. El Cuadro 4.6 del Capítulo 4 ilustra esas diferencias. Cuando la saturación de bases se calcula como la

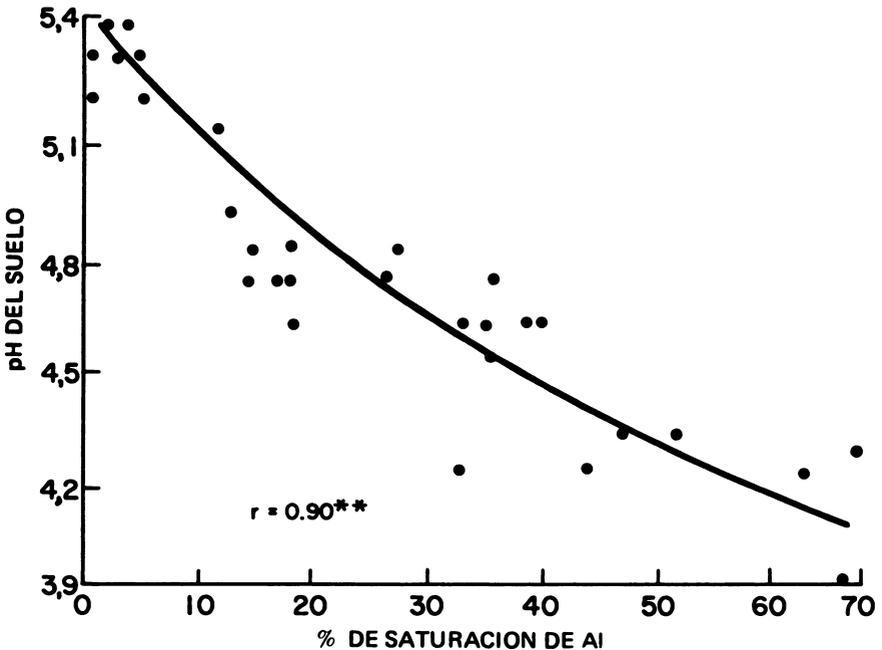


Fig. 7.2. Relación entre pH del suelo y saturación de aluminio en ocho Ultisoles y Oxisoles de Puerto Rico. (Fuente: Abruña et al, 1975).

suma de bases dividida entre la CIC determinada con acetato de amonio tamponado a pH 7, el valor resultante también exagera la acidez de suelos con pH menor de 7. Desafortunadamente muchos especialistas en fertilidad del suelo aún usan los niveles de saturación de bases basados en extracciones tamponadas a pH 7 u 8,2. Los términos “saturación de aluminio” y “saturación de bases”, usados en este libro se refieren al método de CIC efectiva, a menos que se especifique lo contrario.

ALUMINIO EN LA SOLUCION DEL SUELO

El aluminio intercambiable se retiene muy fuertemente con las cargas negativas de los sistemas de silicatos laminares y de silicatos laminares con revestimientos de óxidos. Trabajos en Carolina del Norte (Nye et al., 1961; Evans y Kamprath, 1970) y en Guyana (Cate y Sukhai, 1964) mostraron que hay menos de 1 ppm de aluminio en la solución del suelo cuando la saturación de aluminio es menor del 60%. Sin embargo, el aluminio en la solución del suelo sube marcadamente cuando la saturación de aluminio pasa del 60%, tal como muestra la Fig. 7.3.

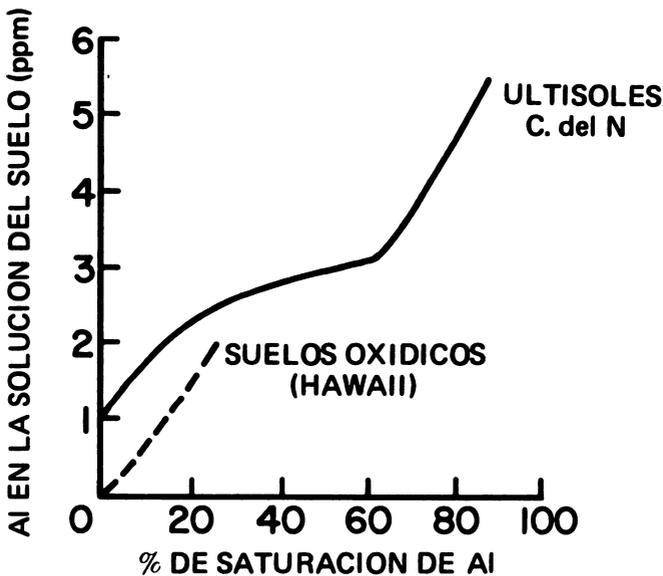


Fig. 7.3. Relación entre saturación de aluminio y concentración de aluminio en la solución del suelo en Ultisoles de Carolina del Norte y Oxisoles, Ultisoles y Andepts, de Hawái. (Fuente: Ayres et al, 1965; y Evans y Kamprath, 1970).

En sistemas de óxidos la relación entre aluminio intercambiable y aluminio en la solución del suelo es constante, asemejándose a la solubilidad de la gibssita. Ayres et al, (1965) estudiaron esta relación en Andepts, Ultisoles y Oxisoles de Hawaii, como se indica en la Fig. 7.3. Los niveles de saturación de aluminio son demasiado bajos para determinar si la saturación de aluminio del 60% es un punto crítico en tales suelos.

Los niveles de aluminio en la solución del suelo también dependen del contenido de materia orgánica en el suelo y el contenido de sales (Kamprath, 1972). El aluminio de la solución del suelo disminuye conforme aumenta la materia orgánica debido a que la materia orgánica forma complejos muy fuertes con el aluminio. El aluminio de la solución del suelo aumenta conforme aumenta el contenido de sales, debido a que entonces otros cationes desplazan al aluminio intercambiable por acción de masa (Brenes y Pearson, 1973).

NIVELES DE SATURACION DE ALUMINIO EN SUELOS TROPICALES

El Cuadro 7.1 presenta el nivel de acidez de algunos perfiles representativos de Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles e Inceptisoles. Generalmente los Oxisoles tienen un alto porcentaje de saturación de aluminio en todos sus perfiles (Guerrero, 1971). Una excepción es el Eutruxtox o Eutrorthox, que se encuentra en Brasil, Cuba y otros países que tienen esencialmente un 100% de saturación de bases (Moura y Buol, 1972).

Algunos Ultisoles también tienen una alta saturación de aluminio, particularmente en el subsuelo. En el Cuadro 7.1 algunos ejemplos de la selva amazónica peruana muestran valores muy bajos de pH, debido probablemente a los altos contenidos de aluminio. El nivel muy alto de aluminio intercambiable en el subsuelo del Tropaquult está asociado con una capa montmorilonítica moteada que libera grandes cantidades de aluminio (Sánchez y Buol, 1974).

La mayoría de los Alfisoles tienen valores bajos de saturación de aluminio. Como el requisito de más de 35% de saturación de bases (a pH 8,2) se refiere a profundidades inferiores a la sección de control, algunos Alfisoles pueden tener saturación baja de bases en la capa arable. Muchos Alfisoles de Africa Occidental tienen una baja saturación aluminica, pero se trata de suelos muy deficientemente taponados (Juo, 1972). Por lo tanto, su nivel de bases puede cambiar rápidamente con la aplicación de fertilizantes nitrogenados.

Los Andepts generalmente tienen valores de pH superiores a 5,5 y baja saturación de aluminio, excepto los Dystrandeps y Hidrandeps que pueden tener una saturación aluminica mayor de 60%. El hidrógeno intercambiable puede ser considerable en estos suelos debido a

CUADRO No. 7.1. Niveles de acidez en algunos suelos tropicales. (Fuente: Guerrero, 1971; Igue y Fuentes, 1972; Joo, 1972; León, 1967; Moura y Buol, 1972; y Sánchez y Buol, 1974).

Suelo y Localización	Horizonte (cm)	pH (en H ₂ O)	Al* intercambiable	H* intercambiable (meq/100 g)	CIC efectiva	Saturación aluminica (%)
OXISOLES						
Haplustox (Carimagua, Colombia)	0-8	4.8	3.1	1.0	6.5	63
	8-22	4.7	3.2	0.6	4.6	83
	22-46	4.4	1.9	0.5	2.9	83
	46-132	4.9	0.6	0.4	1.4	71
	132-140	5.4	0.3	0.4	1.6	44
Eustrustox (Minas Gerais, Brasil)	0-10	5.5	0.2	-	19.5	2
	20-30	4.9	0.8	-	13.0	6
	40-50	5.1	0.6	-	10.7	5
	100-110	5.3	0.3	-	9.0	4
	140-170	5.5	0.3	-	9.1	4
Acrustox (Brasil, Brasil)	0-20	4.7	2.6	-	2.7	94
	20-40	4.8	1.9	-	2.0	94
ULTISOLES						
Paleudult (Yurimaguas, Perú)	0-5	3.6	1.9	-	3.6	52
	5-40	4.2	4.2	-	4.7	89
	40-60	4.1	4.5	-	6.2	72
	60-90	4.2	6.0	-	6.5	92
	90-140+	4.0	6.1	-	8.4	73
Tropaquilt (Iquitos, Perú)	0-5	5.6	0.0	-	16.7	0
	5-10	4.7	5.5	-	19.3	28
	10-50	4.6	14.6	-	18.4	79
	50-90	4.7	29.3	-	35.3	83

Continúa en página siguiente

CUADRO No. 7.1. Cont.

Suelo y Localización	Horizonte (cm)	pH (en H ₂ O)	Al* intercambiable	H* intercambiable (meq/100 g)	CIC efectiva	Saturación aluminica (%)
ALFISOLES						
Haplustalf (Ibadán, Nigeria)	0-5	6.8	0.01	-	5.36	0.2
	5-15	6.7	0.01	-	6.99	0.1
	15-45	7.1	0.03	-	5.26	0.6
	45-65	6.7	0.04	-	4.24	0.9
	65-95	6.3	0.06	-	4.06	1.5
Ustalf (Zaria, Nigeria)	0-27	5.8	0.20	-	4.41	4.5
	27-75	6.0	0.18	-	6.45	2.8
	75-116	6.1	0.17	-	8.43	2.0
Tropaqualf (Yurimaguas, Perú)	0-5	5.5	0.55	-	21.13	3
	5-25	4.9	9.20	-	27.55	33
	25-80	5.0	12.50	-	28.35	44
	80-100	5.2	14.55	-	33.37	44
INCEPTISOLES						
Vitrandept (Turrialba, Costa Rica)	A ₁	4.5	0.52	0.23	10.57	7
	B ₂	5.8	0.30	0.53	10.83	7
Dystrandept (Turrialba, Costa Rica)	A _p	5.4	2.45	1.25	5.39	69
	IIB _i	5.4	0.38	0.53	1.96	46
Umbrandept (Chinchiná, Colombia)	A	5.5	0.4	-	7.4	5
	B	5.8	0.2	-	1.2	17
Dystraptept (Turrialba, Costa Rica)	A ₁	4.8	4.43	1.90	9.53	66
	B ₁₂	5.3	3.95	1.16	6.61	77

(*) Extracción I/V K Cl sin tamponar. Guiones en la columna intercambiable indican que no se hizo análisis. En las muestras de Perú las determinaciones de Al intercambiable se incluye H intercambiable.

su alto contenido de materia orgánica (Igue y Fuentes, 1971). Los ejemplos del Cuadro 7.1 tienen del 13 al 27% de materia orgánica.

El nivel de aluminio de otros Inceptisoles y Entisoles es bastante variable. Los términos dístrico (ácido) y éutrico (no ácido) empleados por la Taxonomía de Suelos y el Sistema FAO, son útiles para distinguir suelos ácidos. La mayoría de Vertisoles, Mollisoles y Aridisoles tienen un 100% de saturación de bases. La mayoría de los Espodosoles e Histosoles son ácidos. Algunos suelos orgánicos tienen un contenido muy alto de hidrógeno intercambiable.

CAUSAS DE INFERTILIDAD DE SUELOS ACIDOS

El crecimiento deficiente de un cultivo en un suelo ácido puede correlacionarse directamente con saturación de aluminio; la Fig. 7.4 muestra un ejemplo típico. Es bien sabido que el pH *per se* no tiene efecto directo en el crecimiento de las plantas, excepto a valores inferiores a 4,2 donde la concentración de iones de hidrógeno puede detener y hasta invertir la absorción de cationes por la raíz (Black, 1967). La infertilidad de los suelos ácidos se debe a uno o más de los siguientes factores: toxicidad aluminica, deficiencia de calcio o magnesio y toxicidad de manganeso. Jackson (1967) ha resumido estos conceptos en una revisión completa. Los siguientes ejemplos ilustran los efectos individuales bajo condiciones tropicales.

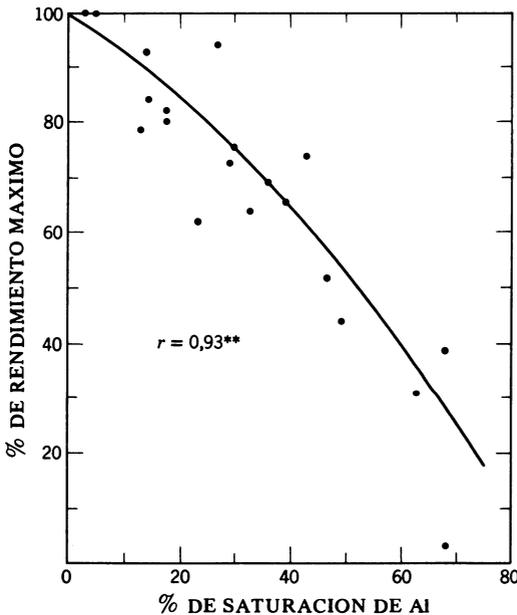


Fig. 7.4. Relación entre niveles de saturación de aluminio en Oxisoles y Alfisoles de Puerto Rico y producción de vainitas. (Fuente: Abruña et al, 1975).

TOXICIDAD DE ALUMINIO

Concentraciones de aluminio en la solución del suelo superiores a 1 ppm frecuentemente son causa directa de reducción de rendimiento. Estudios de Abruña et al., (1970) en tabaco y de Villagarcía (1973) en papa, muestran que el efecto primario de la toxicidad de aluminio es daño directo al sistema radicular. El desarrollo radicular se restringe, y las raíces se vuelven más gruesas y presentan puntos muertos. El Cuadro 7.2 muestra el efecto del aluminio en el crecimiento de la raíz. El crecimiento del maíz no fue afectado hasta que se alcanzó un 60% de saturación de aluminio, mientras que el crecimiento de las raíces de sorgo resultó restringido con el primer incremento de aluminio. Estos estudios, así como muchos otros similares hechos en la zona templada, indican que el aluminio tiende a acumularse en las raíces, impidiendo la absorción y el traslado del calcio y el fósforo a la parte aérea (Foy, 1974). De esta manera la toxicidad aluminica puede producir o acentuar deficiencias de calcio y fósforo.

CUADRO No. 7.2. Efecto del aluminio en el crecimiento de raíces en dos suelos de Puerto Rico. (Fuente: Brenes y Pearson, 1973).

Suelo	pH	Aluminio intercambiable (meq/100 g)	Saturación de aluminio (%)	Peso seco de raíces	
				Maíz (mg/maceta)	Sorgo
Humatas (Ultisol)	4,8	4	40	931	400
	4,5	6	57	895	296
	3,9	11	87	209	19
Coto (Oxisol)	4,8	3	52	687	345
	4,5	4	70	630	126
	4,0	5	87	389	128

DEFICIENCIAS DE CALCIO Y MAGNESIO

Aunque el aluminio es el principal culpable, el crecimiento deficiente en suelos ácidos también puede deberse a deficiencias directas de calcio o magnesio. El trabajo de Abruña y sus colegas en tabaco en Puerto Rico, reproducido en la Fig. 7.6, también ilustra este punto. Se cultivó tabaco en un Ultisol con un pH de 4,2 y 0,4 meq Ca/100 g. Sin enclamiento el resultado fue un crecimiento restringido de las



Fig. 7.5. Síntomas típicos de toxicidad de aluminio en raíces de maíz cultivado en un Oxisol ácido. Nótense las raíces engrosadas. (Cortesía del señor Enrique González, North Carolina State University).

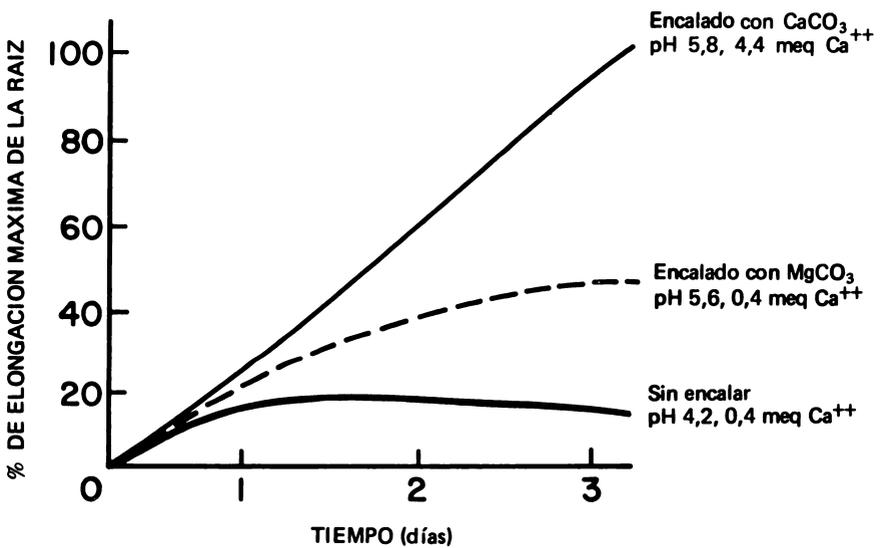


Fig. 7.6. Evidencia de toxicidad de aluminio y deficiencia de calcio afectando la elongación de las raíces de tabaco cultivado en un Ultisol de Puerto Rico. (Fuente: Abruña et al, 1970).

raíces debido tanto a toxicidad de aluminio como a deficiencia de calcio. Cuando el aluminio se precipitó por encalamiento a un pH de 5,6 con $MgCO_3$, el crecimiento de las raíces prosiguió normalmente. Por lo tanto, ambas, la toxicidad aluminica como la deficiencia de calcio eran factores limitantes. En forma similar, la deficiencia severa de magnesio puede también restringir el crecimiento por sí misma.

En los trópicos muchos suelos ácidos son deficientes en calcio sin que tengan problemas de toxicidad de aluminio. Ejemplos de este tipo se encuentran en Hawaii, donde muchos suelos tienen valores de pH inferiores a 5 pero poco aluminio intercambiable (Ayres et al., 1965). En tales suelos el encalamiento se usa esencialmente como fertilización cálcica en caña de azúcar. Igualmente según Nikklesen et al., (1963) ciertos Oxisoles del Cerrado de Brasil, son muy bajos en magnesio y responden directamente a fertilización magnésica.

TOXICIDAD DE MANGANESO

El manganeso es muy soluble a valores de pH menores de 5,5 (Black, 1967). Si este elemento está presente en cantidad suficiente, puede haber toxicidad de manganeso conjuntamente con toxicidad de aluminio con valores de pH alrededor de 5,5 a 6,0. La solubilidad del manganeso también aumenta con la reducción del suelo cuando los iones Mn^{4+} se convierten en Mn^{2+} : ciertos suelos ácidos pueden ser bajos en aluminio pero altos en manganeso. La arcilla Coto, Oxisol de Puerto Rico con pH de 4,4, es un ejemplo de esta situación (Pearson, 1975). Abruña y sus colaboradores (1970) encontraron que las respuestas de rendimiento al encalamiento estaban correlacionadas con una disminución progresiva en los niveles de toxicidad del manganeso en hojas de tabaco en arcilla Coto, pero no en arcilla Humatas, un Ultisol con niveles más altos de aluminio intercambiable. Estos resultados se presentan en el Cuadro 7.3. En suelos como arcilla Coto, el encalamiento está dirigido a disminuir la solubilidad del manganeso. Contrariamente al aluminio, el manganeso es un nutriente de las plantas; por lo tanto la finalidad no es eliminar el manganeso soluble, sino mantenerlo dentro de un ámbito entre toxicidad y deficiencia. Una concentración en la solución del suelo entre 1 y 4 ppm de Mn representa ese ámbito, aún cuando hay una variabilidad considerable entre los suelos.

DIFERENCIAS ENTRE CULTIVOS Y VARIEDADES

El crecimiento de distintas especies en suelos ácidos depende de su relativa tolerancia a los niveles de aluminio y manganeso y a sus necesidades relativas de calcio y magnesio. Recientemente se ha encontrado que existen diferencias considerables entre y dentro de es-

CUADRO No. 7.3. Efectos del encalamiento en los rendimientos y contenido de manganeso en hojas de tabaco en dos suelos de Puerto Rico. (Fuente: Abruña et al, 1970).

Ambito de saturación de bases (%)	Coto (Oxisol)		Humatas (Ultisol)	
	Rendimientos de hojas (kg/ha)	Mn en hojas (ppm)	Rendimientos de hojas (kg/ha)	Mn en hojas (ppm)
20-40	—	—	630	274
30-40	262	2380	1043	200
50-60	503	1170	1688	142
70-80	539	660	1686	140
80-90	682	580	—	—

pecies de cultivos en relación con su tolerancia a los factores de la acidez del suelo.

Ciertos cultivos exclusivamente tropicales crecen normalmente a niveles de pH con que el maíz o la soya morirían. La piña es quizás el ejemplo más conocido, pero el café, el té, el caucho y la yuca también toleran niveles muy altos de aluminio intercambiable. Entre las especies de pasturas, varias gramíneas y leguminosas están bien adaptadas a condiciones de suelos ácidos. Algunos pastos tropicales como guinea (*Panicum maximum*), gordura (*Melinis minutiflora*), y varias especies de los géneros *Paspalum* y *Brachiaria* crecen bien en suelos muy ácidos.

Aunque las leguminosas se consideran muy susceptibles a la acidez del suelo por sus necesidades altas de calcio para la nodulación, varias leguminosas tropicales de pastura están sorprendentemente bien adaptadas a condiciones de acidez. Las principales son: *Stylosanthes* spp., *Desmodium* spp., *Centrosema* ssp., *Calopogonium* spp., y Kudzú tropical (*Pueraria phaseoloides*). Entre las leguminosas de grano el caupí y el gandul parecen ser más tolerantes que el frijol o la soya.

Muchas de estas especies han evolucionado en suelos ácidos y poseen genes responsables para la tolerancia de niveles altos de aluminio. Los mecanismos involucrados no están bien entendidos, pero las diferentes respuestas de estas especies al encalamiento pueden determinarse en pruebas simples de campo.

La Fig. 7.7 muestra las diferencias sorprendentes entre varias leguminosas forrajeras en la tolerancia del aluminio en la solución del suelo. Andrew y Vanden Berg (1973) mostraron que *Stylosanthes*

humilis y *Desmodium intortum* son relativamente insensibles a niveles de aluminio en la solución del suelo de la magnitud de 2 ppm, mientras que la alfalfa muere prácticamente con 1 ppm. Otra leguminosa tropical, *Glycine wightii* (soya perenne), también es sensitiva a niveles bajos de aluminio; se desarrolló en los trópicos, pero en áreas calcáreas.

La Fig. 7.7 también muestra las respuestas de estas 4 especies a niveles altos de manganeso en solución. *Stylosanthes humilis* fue relativamente insensible al manganeso, pero *Desmodium intortum* fue tan susceptible como la alfalfa. En consecuencia, la tolerancia o susceptibilidad o una de las causas de la infertilidad de suelos ácidos no significa necesariamente una reacción similar a otras causas.

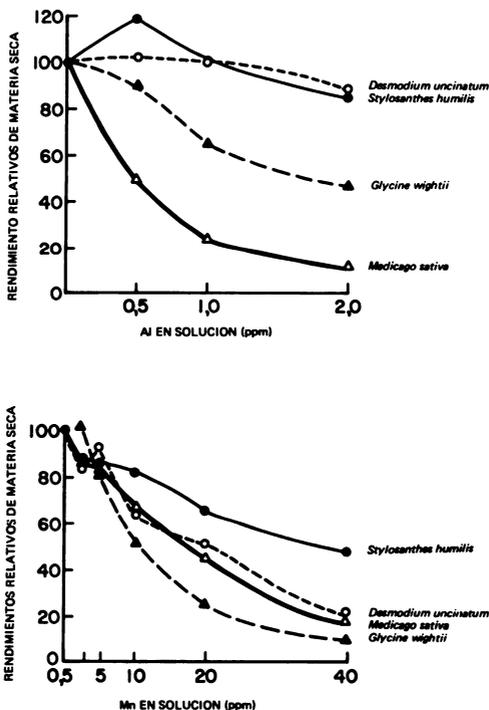


Fig. 7.7. Diferencias entre especies en la tolerancia a aluminio y manganeso de cuatro leguminosas de pastura. (Fuente: adaptado de Andrew y Hegarty, 1969; y Andrew y Vanden Berg, 1973).

Evidencia similar se ha obtenido recientemente con cultivos alimenticios por Spain et al., (1975) en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. Los suelos en que los experimentos se llevaron a cabo tenían un pH de 4,3 y 3,5 meq/100 g de aluminio intercambiable, que equivalía a una saturación aluminica del 80%. La Fig. 7.8

muestra que existen considerables diferencias entre especies en cuanto a tolerancia al aluminio y al encalamiento necesario. El caupí (*Vigna sinensis*) alcanza su rendimiento máximo con 0,5 toneladas de cal, mientras que la soya y el frijol requieren aplicaciones más altas de cal y aún así no se aproximan a la productividad del caupí bajo estas condiciones. Dentro de *Phaseolus vulgaris* existen diferencias varietales significativas. Como grupo, las variedades con cáscara negra son mucho más tolerantes al aluminio que las variedades blancas, amarillas o pardas. Es interesante anotar que la soya se comporta un poco mejor que los frijoles en estos suelos ácidos. Otra leguminosa de grano bien adaptada a condiciones de suelo ácido es el gandul (*Cajanus cajan*). Esta información confirma los descubrimientos previos sobre la conveniencia de usar caupí en lugar de frijoles en suelos ácidos.

Spain y sus colaboradores también han probado varios cientos de variedades de arroz bajo las mismas condiciones en secano. Algunas variedades locales respondieron al primer incremento de cal y después se encamaron. Este comportamiento se ilustra en la Fig. 7.8 con la variedad Colombia 1. La mayoría de las variedades desarrolladas en el Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz (IRRI) no presentan tal tolerancia porque fueron seleccionadas en suelos con niveles altos de bases. Por lo tanto requieren por lo menos 4 toneladas de cal por hectárea para aproximarse a buenos rendimientos, como se ilustra con la variedad IR5 en la Fig. 7.8. Desafortunadamente la mayoría de las variedades tolerantes al aluminio, como Colombia 1, tienen muchas características indeseables; la mayoría son de porte alto y por lo tanto susceptibles al encame. Es necesario incorporar

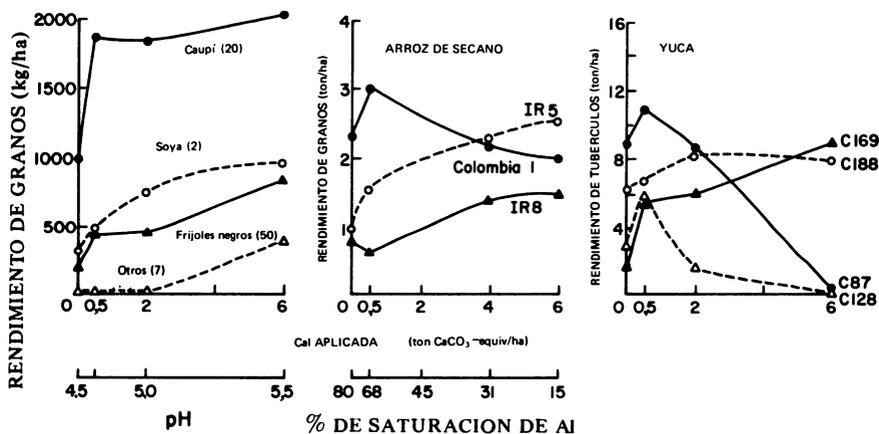


Fig. 7.8. Diferencias varietales y de especies en la tolerancia a condiciones de acidez del suelo en un Oxisol de Carimagua, Colombia. Los números entre paréntesis se refieren al número de las variedades probadas. (Fuente: adaptado de Spain et al, 1975).

tolerancia al aluminio en las variedades de porte bajo con un alto potencial de rendimiento.

También existen diferencias varietales en yuca, especie que se considera bien adaptada a condiciones de suelo ácido. La Fig. 7.8 indica que algunas variedades como Cl69 dan una respuesta directa a la cal, en forma de mayor rendimiento a las dosis más altas de este elemento, mientras que otras no responden; dos sólo dieron respuesta al primer incremento y una disminución marcada posteriormente. El nivel de rendimiento en este ensayo fue bastante bajo debido a problemas de enfermedades. Otras investigaciones han mostrado una respuesta positiva de este cultivo a la cal a niveles más altos de rendimiento. La selección de variedades o especies que se comporten bien con niveles altos de saturación aluminica y por lo tanto necesitan sólo una fracción de la cantidad normal de cal necesaria es de gran importancia práctica. Con base en sus observaciones Spain et al, (1975) han preparado una lista de especies adaptadas a tales condiciones.

CUADRO No. 7.4. Especies de cultivos y pasturas apropiadas para suelos ácidos con necesidad mínima de cal. (Fuente: Spain et al, 1975).

Necesidad de cal (ton/ha)	Saturación de Al (%)	pH	Cultivos (usando variedades tolerantes)
0,25 a 0,5	68 a 75	4,5 a 4,7	Arroz de secano, yuca, mango, marañón, cítricos, piña, <i>Stylosanthes</i> , <i>Desmodium</i> , Kudzú, <i>Centrosema</i> , <i>Melinis minutiflora</i> <i>Brachiaria decumbens</i>
0,5 a 1,0	45 a 58	4,7 a 5,0	Caupí, plátano (?)
1,0 a 2,0	31 a 45	5,0 a 5,3	Maíz, frijoles negros

Se han identificado varios mecanismos fisiológicos asociados con la tolerancia o sensibilidad al aluminio entre o dentro de las especies, pero no se ha encontrado ninguno que intervenga en todos los casos. En una revisión de este tema, Foy (1974) cita lo siguiente:

- a. Diferencias en morfología de la raíz. Algunas variedades tolerantes al aluminio mantienen su desarrollo y no sufren daño en sus yemas radicales o laterales en suelos ácidos.
- b. Cambios en el pH de la rizosfera. Algunas variedades tolerantes al aluminio aumentan el pH de su medio de crecimiento, mien-

tras que las sensitivas lo disminuyen. Se cree que tales cambios resultan de una absorción diferencial de cationes y aniones, de secreción de ácidos orgánicos, dióxidos de carbono y bicarbonato.

- c. Traslocación más lenta del aluminio a la parte aérea de las plantas. Algunas especies y variedades tolerantes al aluminio acumulan este elemento en las raíces, pero lo trasladan a la parte aérea más lentamente que las variedades sensitivas. Sin embargo, varias especies de árboles y helechos adaptados a condiciones de acidez acumulan grandes cantidades de aluminio en sus partes aéreas.
- d. En variedades tolerantes el aluminio de las raíces no impide la absorción y traslocación del calcio, magnesio y potasio mientras que si lo impide en variedades sensitivas. La tolerancia varietal al aluminio en soya, trigo y cebada está relacionada con la absorción y traslocación del calcio; en sorgo con el potasio; y en papas con la traslocación del magnesio y el potasio.



Fig. 7.9. Ejemplos de diferencias varietales a tolerancia de aluminio. Se presentan dos variedades de sorgo creciendo en un Oxisol con pH de 4,5 y 75% de saturación de aluminio en Brasilia, Brasil. La variedad de la izquierda está sufriendo severamente de toxicidad de aluminio, mientras que la variedad de la derecha crece normalmente.

- e. En ciertas variedades un alto contenido de silicio en la planta está asociado con la tolerancia al aluminio.
- f. En las variedades tolerantes al aluminio no se inhibe la absorción y traslocación del fósforo en la medida en que sucede en variedades o especies susceptibles. Además muchas especies o variedades tolerantes al aluminio, también toleran niveles bajos de fósforo.

Trabajos posteriores en Brasil (North Carolina State University, 1974; Salinas y Sánchez, 1976) sugieren que la tolerancia varietal tanto al alto aluminio intercambiable como a niveles bajos de fósforo aprovechable, están relacionados y dependen de la habilidad de la planta para trasladar fósforo de las raíces al tallo en presencia de altos niveles de aluminio en solución. Estos resultados se obtuvieron con arroz, maíz, trigo, sorgo y frijoles.

Andrew y colaboradores en Australia han mostrado que varios de estos factores son responsables de las diferencias de especies de leguminosas forrajeras tropicales presentadas en la Fig. 7.7. Ellos encontraron que especies tolerantes al aluminio nodulaban abundantemente a niveles bajos de pH, indiferentemente del nivel del calcio. En especies tolerantes el contenido de calcio no disminuyó marcadamente en presencia de aluminio, mientras que sí bajó de 1,0 a 0,1% en alfalfa. Las especies tolerantes al aluminio acumularon este elemento en las células de la capa cortical de la raíz, pero en la parte aérea la concentración era mucho más baja que en alfalfa. En alfalfa y *Glycine wightii* con niveles altos de aluminio, disminuyó drásticamente el traslado de fósforo a la parte aérea, pero ciertamente aumentó en las especies tolerantes a aluminio con niveles altos de este elemento en el suelo. *Stylosanthes humilis* tiene además una necesidad muy baja de fósforo. Con una concentración de fósforo en la planta del 0,17% se obtuvieron rendimientos máximos, mientras que otras leguminosas tropicales, como *Phaseolus lathyroides* necesitaba 0,24% de P para dar rendimientos máximos.

Se está comenzando a acumular evidencia que indica que uno o varios genes controlan la tolerancia a aluminio dentro de una especie. En cebada se encontró un gene dominante, y tres genes en maíz (Reid, 1971; Gorsline et al., 1968). Técnicas de invernadero o de soluciones nutritivas se han desarrollado para selección preliminar rápida de grandes cantidades de líneas con tolerancia a aluminio. Varios cientos de variedades de arroz se hicieron crecer en solución de aluminio con 33 y 30 ppm durante 3 semanas en el CIAT. Cuando se midió la longitud de las raíces, se encontró que la longitud relativa estaba bien correlacionada con el rendimiento de campo con niveles bajos de cal; los resultados se presentan en la Fig. 7.10. Con estas técnicas se podrían seleccionar, y probar en el campo, variedades que tengan un alto potencial de rendimiento y tolerancia a aluminio.

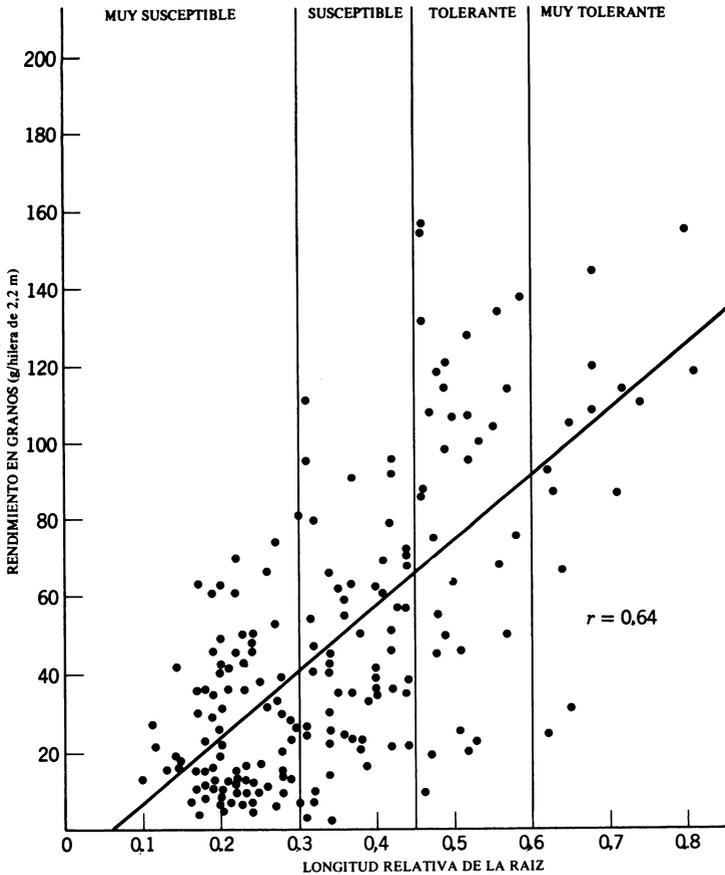


Fig. 7.10. Correlación entre la longitud relativa de las raíces de variedades de arroz a 30 ppm de Al versus 3 ppm de Al en solución de cultivo y su rendimiento en granos cuando se les cultivó en un Oxisol de Carimagua, Colombia. (Fuente: Spain et al, 1975).

ENCALADO

De las consideraciones anteriores resulta obvio que el propósito del encalamiento es primariamente neutralizar el aluminio intercambiable, y que es factible normalmente subiendo el pH a 5,5. Cuando se sospecha toxicidad de manganeso, el pH debe subirse a 6,0. Los factores a considerar son: 1) la cantidad necesaria de cal para disminuir el porcentaje de saturación de aluminio a un nivel en el cual el cultivo particular y la variedad crezcan bien; 2) la calidad de la cal; y 3) el método de colocación.

DETERMINACION DE LA NECESIDAD DE CAL

Gran cantidad de esfuerzos se han hecho para encontrar los mejores métodos para estimar las necesidades de cal en los trópicos. Parte de la confusión surgió ciertamente de los intentos por encalar los suelos hasta su neutralidad y el uso de la acidez titulable como criterio. Kramprath (1970) sugirió que las recomendaciones de encalado se basen en la cantidad de aluminio intercambiable en la capa arable del suelo y que las dosis de cal se calculen multiplicando los miliequivalentes de aluminio por el factor 1,5. El resultado da los miliequivalentes de calcio que es necesario aplicar en forma de cal. Las dosis de cal calculadas por este método neutralizan del 85 al 90% del aluminio intercambiable en suelos con 2 al 7% de materia orgánica. La razón para el factor 1,5 es la necesidad de neutralizar los iones de hidrógeno liberados por la materia orgánica, o los hidróxidos de hierro y aluminio conforme aumenta el pH. En suelos con más materia orgánica, el factor tiene que subirse a 2 ó 3 debido a la presencia de hidrógeno intercambiable. Este método se ha usado satisfactoriamente en Brasil desde 1965 (Cate, 1965) y se le empleaba en la mayoría de los países latinoamericanos al escribir este libro.

Por cada miliequivalente de aluminio intercambiable presente, debe aplicarse 1,5 meq de calcio o 1,65 ton/ha del equivalente de CaCO_3 . Este procedimiento es satisfactorio en los trópicos y elimina la necesidad de pruebas de neutralización de laboratorio que consumen mucho tiempo.

La aplicación de este concepto ha reducido considerablemente las dosis de encalamiento en Oxisoles y Ultisoles, bajos en CIC efectiva. En la mayoría de los casos en que hay presentes de 1 a 3 meq de aluminio intercambiable, las aplicaciones de cal son ahora del orden de 1,6 a 5 ton/ha. En el pasado con frecuencia se recomendaron y aplicaron dosis de 10 a 30 ton/ha con resultados confusos. Agricultores del sur de Brasil acostumbrados al alto contenido de aluminio intercambiable de ciertos Oxisoles y Ultisoles se sorprenden agradablemente cuando se trasladan hacia el norte, al Cerrado, donde los Oxisoles altamente meteorizados tienen alrededor de 1 meq de aluminio intercambiable. Sus aplicaciones de cal se reducen a la mitad o a la tercera parte de lo que ellos estaban acostumbrados a aplicar. Aunque en ambas áreas los suelos tienen una alta saturación de aluminio, los niveles menores de aluminio intercambiable en los Oxisoles más meteorizados disminuyen las necesidades de cal.

Otro componente importante de la determinación de la necesidad de cal es el nivel de aluminio intercambiable que pueden tolerar variedades o cultivos específicos. Los cultivos desarrollados originalmente en suelos calcáreos, tales como algodón, sorgo y alfalfa son susceptibles a niveles del 10 al 20% de saturación aluminica. Para ellos el encalamiento debería tener como meta cero de saturación aluminica para que la aplicación dure por varios años. El maíz es

susceptible del 40 al 60% de saturación aluminica. Aunque encalar hasta cero de saturación aluminica puede ser beneficioso, bajar la saturación a niveles de 20% podría resultar más económico. Otros cultivos, como arroz y caupí son más tolerantes. El café, la piña y algunas especies de pasturas pocas veces responden a la cal, aún en suelos con alta saturación de aluminio.

En la Fig. 7.11 se ilustra un ejemplo de estas relaciones, en el que los rendimientos relativos de sorgo, maíz, pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) y café en ensayos de encalamiento se grafican en función de la saturación de aluminio. El rendimiento del sorgo comenzó a bajar dramáticamente con una saturación aluminica del 15%, y del maíz con 40% aproximadamente. El rendimiento del pasto elefante bajó bruscamente con alrededor del 60% de saturación aluminica, mientras que el café solamente sufrió disminución del rendimiento con el 80%.

Sin embargo, el encalamiento puede ser necesario en algunos de estos cultivos tolerantes para contrarrestar deficiencias de calcio o magnesio. En Puerto Rico se obtienen altos rendimientos en café sin

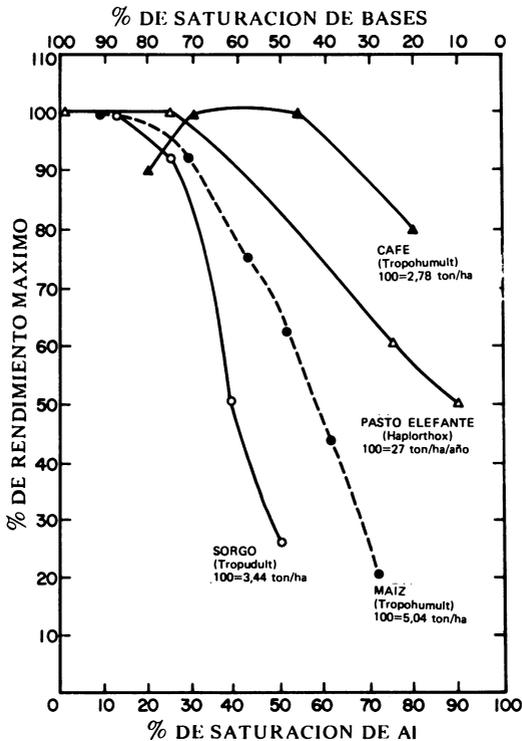


Fig. 7.11. Respuestas de rendimiento al encalamiento en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico. (Fuente: compilado de Abruña et al, 1964, 1965, 1975).

cal en suelos con pH de 3,8, pero el encalamiento es necesario en ciertos suelos altos en manganeso para evitar la toxicidad de este elemento. Gran parte de la respuesta a 0,5 toneladas de cal en los Oxisoles de Colombia que se presentan en la Fig. 7.8 pueden representar simplemente la respuesta a fertilización cálcica y magnésica.

FUENTES DE CAL

Encontrar fuentes de cal de suficiente fineza y pureza es un problema práctico muy grande en los trópicos. La selección de la fuente debe tomar en cuenta contenidos de calcio y magnesio del material calizo y el nivel de calcio y magnesio del suelo. La fineza es crítico. La cal que no pasa por una malla No. 20 tendrá muy poca reactividad; la que pase por una malla No. 60 reaccionará muy lentamente. La cal que pasa por una malla No. 100 reacciona prontamente. Un buen grado de fineza debe ser mayor del No. 60, y el mejor grado es el No. 100.

APLICACION DE CAL

Corrientemente la cal se incorpora dentro de los 15 cm superiores del suelo varios días antes de la siembra. Aunque generalmente ésta es la mejor manera, hay ocasiones en que no es posible arar y otras en que una incorporación más profunda es beneficiosa.

El encalamiento de pasturas establecidas impide la incorporación, a menos que se contemple una resiembra. Según el trabajo de Vicente-Chandler et al, (1964) generalmente la aplicación basal se incorpora bien, pero aplicaciones menores dirigidas a corregir el efecto acidificante de los fertilizantes nitrogenados son efectivas cuando se hacen al voleo sobre la pastura. En un Oxisol de Puerto Rico, Abruña et al, (1964) no observaron diferencias en los rendimientos de pasturas entre aplicaciones sobre la superficie e incorporadas.

Cuando Oxisoles sumamente ácidos son encalados en su capa arable hasta un pH de 5,5 la mayoría de las raíces se desarrollan en la capa arable. La alta saturación aluminica del subsuelo impide un desarrollo radicular más profundo. Cuando durante la estación lluviosa ocurren períodos cortos de sequía, las plantas pueden sufrir de retención fuerte del agua aún cuando el subsuelo está todavía húmedo. Por esta razón Gonzáles y Kamprath (North Carolina State University, 1973) compararon la incorporación de cal a dos profundidades, 0 a 15 cm y 0 a 30 cm, en un Oxisol de Brasilia. Este suelo tiene una excelente estructura granular que permitió una incorporación profunda con un cultivador rotatorio. En la Fig. 7.12 se presentan los resultados de la primera cosecha de maíz. Las aplicaciones más profundas dieron por resultado rendimientos más altos. Los estudios de las raíces indicaron que los rendimientos mayores estaban asociados con un desarrollo radicular más profundo, en la capa de 0 a

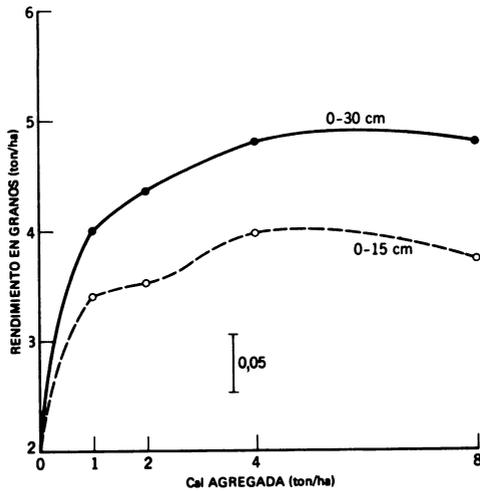


Fig. 7.12. Efecto de la incorporación de cal en el rendimiento de maíz en un Oxisol de Brasilia, Brasil. (Fuente: E. González, North Carolina State University, 1973).

30 cm, lo cual disminuyó la retención del agua durante los períodos cortos de sequía.

La factibilidad de una incorporación profunda de la cal depende en gran parte de las propiedades estructurales del suelo y del equipo disponible. Es razonable pensar que ello es posible en suelos arenosos y en Andepts y Oxisoles altamente agregados, pero dudoso en Ultisoles con horizontes argílico arcillosos.

MOVIMIENTO DESCENDENTE DEL CALCIO Y DEL MAGNESIO

La reducción de la toxicidad aluminica en el subsuelo constituye un objetivo muy importante pero difícil del manejo en muchas áreas de los trópicos. Cuando no es factible la incorporación profunda de la cal, deben buscarse otros caminos. Una alternativa es el uso de variedades tolerantes al aluminio. Otra posibilidad es el movimiento descendente del calcio y el magnesio. Pearson y sus colaboradores (1962) encontraron que bajo manejo intensivo de pasturas, una aplicación de 12 ton/ha de cal hacía que el calcio y el magnesio se movieran de los 15 cm superiores al interior del subsuelo cuando estaba acompañada de aplicaciones altas y anuales de sulfato de amonio, equivalentes a 800 kg/ha de N en un Ultisol de Puerto Rico. El movimiento ocurrió en forma de calcio y magnesio intercambiables pero también como sulfatos de calcio y magnesio. Las altas dosis aplicadas de cal y sulfato de amonio limitan la aplicación de estos resultados a sistemas intensivos.

Un movimiento descendente similar de calcio y magnesio fue observado en un Dystrandept óxico de Costa Rica por Morelli et al,

(1971). Después de 4 años de encalar midieron los cambios en pH y en saturación de aluminio en el perfil. Los resultados mostrados en la Fig. 7.13 indican un movimiento considerable de calcio y magnesio de la capa superior (0-20 cm) hasta 60 u 80 cm. Este efecto, conseguido con una dosis de 3,6 ton/ha, tiene significado práctico. Antes de encalar, este Andept tenía valores positivos de ΔpH , indicativo de una mineralogía oxidica en todo el perfil. El ΔpH cambió a valores negativos después de encalar tan profundamente como el movimiento descendente del calcio y el magnesio había llegado. Mahilum et al, (1970) han hecho observaciones similares pero menos bien cuantificadas en un Hidrandept de Hawaii.

En un estudio de laboratorio con un Oxisol de Surafrica, Reeve y Summer (1972) mostraron un movimiento mucho más rápido del calcio y el magnesio al subsuelo, cuando se usó yeso en lugar de hidróxido de calcio. Con una dosis de cal que precipitaba al aluminio intercambiable de la capa arable, la saturación aluminica del subsuelo bajó de 57 a 53% con $\text{Ca}(\text{OH})_2$; pero cuando se aplicó la misma cantidad de calcio en la forma de CaSO_4 , la saturación aluminica del subsuelo bajó de 53 a 43%. Con un exceso de encalamiento en la capa arable se redujo aún más la saturación aluminica en el subsuelo, lo cual se ilustra en el Cuadro 7.5. Amaral et al, (1965) también obtuvieron evidencia de movimiento descendente de calcio y magnesio en Oxisoles de São Paulo, Brasil.

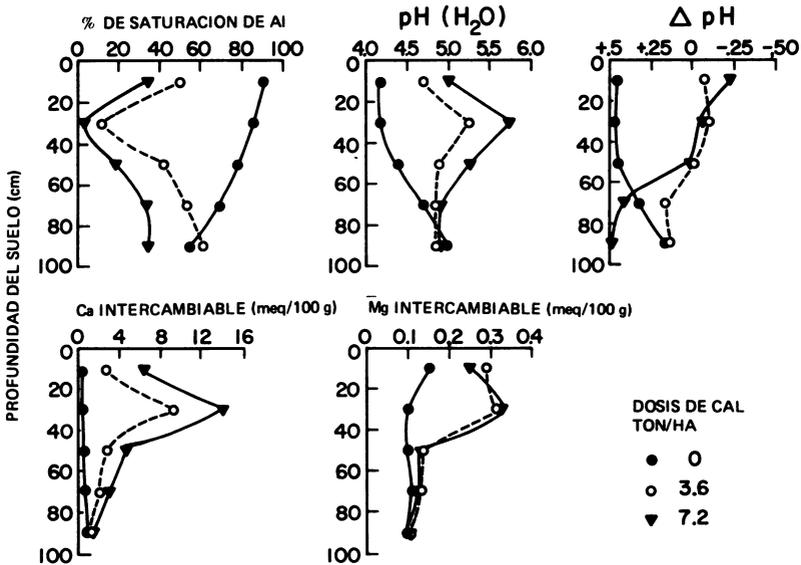


Fig. 7.13. Efectos de cal aplicada cuatro años antes de la toma de muestras en las propiedades del perfil de un Dystrandept Oxico de Costa Rica. (Fuente: calculado con datos de Morelli et al, 1971).

CUADRO No. 7.5. Efectos del encalado de la capa arable en el porcentaje de saturación de aluminio en el subsuelo en un Oxisol de Sur Africa bajo condiciones de laboratorio. (Fuente: adaptado de Reeve y Sumner, 1972).

Dosis incorporada en la capa arable (meq Ca/100 g)	Fuente de encalamiento	
	Ca(OH) ₂	CaSO ₄
0	57	57
3*	53	43
6	49	34
9	44	30

(*) Dosis recomendada para neutralizar Al intercambiable.

Estos resultados muestran que el movimiento descendente de calcio y magnesio ocurre en suelos tropicales bien agregados cuando se encalan con las dosis necesarias para neutralizar el aluminio intercambiable o con dosis mayores. Una posible explicación de este fenómeno es que una vez que los sitios de carga permanente están saturados, el calcio y magnesio intercambiables retenidos en los sitios de las cargas dependientes del pH es probable que se muevan hacia abajo fácilmente. La naturaleza porosa de suelos bien agregados con mineralogía oxídica y la alta pluviosidad anual característica de estos sitios favorecen tal movimiento. Esta situación es ciertamente diferente de la que prevalece en suelos con sistemas de silicatos laminares. No se dispone de información sobre el movimiento descendente de partículas de cal sin reaccionar en suelos de óxidos o revestidos con óxidos. La investigación en esta dirección es importante en áreas en que la acidez del suelo es un factor limitante de mucha importancia.

EFFECTO RESIDUAL DEL ENCALAMIENTO

El efecto residual del encalamiento depende de la rapidez con que el calcio y el magnesio están siendo desplazados por la acidez residual de los fertilizantes nitrogenados.

Los análisis de suelo son una herramienta adecuada para determinar cuándo debe aplicarse una cantidad adicional de cal.

En la Fig. 7.14 se muestra el efecto residual del encalamiento de pasto elefante fertilizado anualmente con 800 kg/ha de N como sulfato de amonio (Abruña et al., 1964). Durante el primer año hubo poca respuesta; pero conforme la acidez residual de las aplicaciones de sulfato de amonio se tornó efectiva, con 4 ton/ha de cal se obtuvieron rendimientos óptimos. Las curvas de respuestas fueron

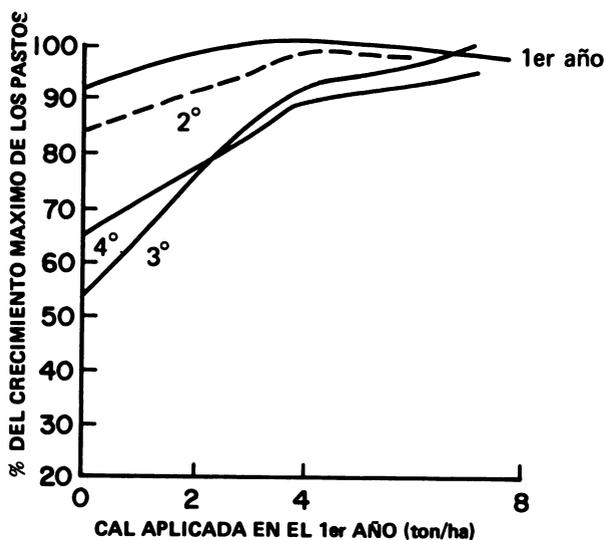


Fig. 7.14. Efecto residual de aplicaciones de cal en el rendimiento relativo de zacates de pastura en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico. (Fuente: Abruña et al, 1964).

más pronunciadas cada año debido a las disminuciones de los tratamientos sin cal.

Mahilum et al. (1970) estudiaron el efecto residual del encalamiento en un Hidrandept de Hawaii y encontraron que después de 5 años una dosis de 2 ton/ha de cal mantenía el nivel de aluminio a alrededor de 1 meq (de un valor original de 3 meq) aún cuando la mayor parte del calcio era lixiviado a niveles inferiores. Aparentemente los iones de aluminio no recuperaban fácilmente los sitios de intercambio aún cuando el calcio se lixivió en la parte inferior. Después de 5 años el efecto residual de un encalamiento con una dosis de 5 ton/ha desapareció por completo.

En contraste pronunciado De Freitas y Van Raij (1975) obtuvieron respuestas positivas de maíz y soya a cal en un Oxisol arenoso de São Paulo, Brasil, 6 años después de la aplicación. Con el tiempo observaron respuestas de aumento de rendimiento y las atribuyeron a la disolución de las partículas más ordinarias de la cal.

SOBREENCALAMIENTO

La literatura está llena de informes en que se menciona la falta de respuesta o la respuesta negativa, al encalamiento de suelos tropicales. Esto ha creado la idea generalizada de que el encalamiento no

resulta en los trópicos (Richardson, 1951). En muchos casos los suelos se encalaron hasta su neutralidad. Este concepto se originó en el medio oeste de Estados Unidos, en rotaciones de maíz y leguminosas porque la alfalfa y el trébol crecían mejor con un pH de 6,5 a 7,0 debido a sus altas necesidades de calcio. Esta práctica significaba que el encalamiento hasta la neutralidad era también mejor para rotaciones de maíz y granos menores con alfalfa. Los suelos eran Molisoles o Alfisoles desprovistos de carga dependiente del pH. Kamprath (1971) hizo una revisión de las razones para la falta de respuestas positivas a la cal cuando se encalan hasta la neutralidad suelos altamente lixiviados. Las consecuencias del sobreencalamiento son: reducción del rendimiento, deterioro de la estructura del suelo, y disminución en la disponibilidad de fósforo, boro, zinc y manganeso. El sobreencalamiento puede definirse como el encalamiento con dosis mayores de las necesarias para neutralizar el aluminio intercambiable o eliminar la toxicidad del manganeso.

En su revisión Kamprath menciona varios casos en que los rendimientos de los cultivos disminuyeron cuando Oxisoles y Ultisoles fueron encalados hasta pH 7. En la Fig. 7.15 se ilustra un ejemplo de maíz creciendo en un Ultisol hawaiano. Hay alguna evidencia de Indonesia y Carolina del Sur que indica que el encalamiento hasta la neutralidad provoca la formación de agregados más pequeños y de esa manera reduce las tasas de infiltración y algunos Oxisoles y Ultisoles se tornan más susceptibles a la erosión (Peele, 1936; Schuffelen y Middleburg, 1954). Esto puede ser consecuencia de un aumento en la actividad microbiana debido al encalamiento. Ghani et al. (1955) encontraron que el encalamiento con MgO disminuía las tasas de infiltración y la porosidad no capilar en un suelo ácido "laterítico" de Bangladesh, mientras que CaCO_3 no producía un efecto consistente. No se han registrado correlaciones entre tales cambios en las propiedades físicas y los rendimientos de los cultivos.

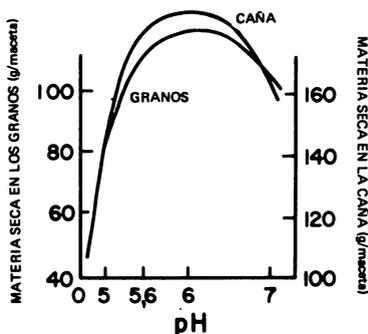


Fig. 7.15. Efectos del encalamiento hasta neutralidad en el crecimiento de maíz en un Ultisol de Hawái. (Fuente: Younge y Plucknett, 1964).

En suelos con una alta capacidad de fijación de fósforo, el sobreencalamiento induce deficiencia de ese elemento. Cuando un Gibbsiumox de Hawaii se encaló de pH 5,3 a 6,1, la absorción de fósforo por sorgo y *Desmodium intortum* aumentó dramáticamente (Fox et al., 1974). Sin embargo cuando este suelo se encaló a pH 7 la absorción de fósforo disminuyó y se observó una severa deficiencia de fósforo, aparentemente debida a la formación de fosfatos insolubles de calcio.

El sobreencalamiento de suelos altos en revestimientos con óxidos aumenta mucho la absorción de boro por las arcillas y reduce la disponibilidad de este elemento. Kamprath (1971) cita varios ejemplos del sureste de Estados Unidos de tales problemas que surgen cuando el pH del suelo aumenta más allá de 6,5 en Ultisoles. También se pueden observar deficiencias de manganeso inducidas por la cal a niveles de pH superiores a 6,2 debido a que el manganeso tiende a precipitarse con este ámbito de pH en presencia de óxidos de hierro y aluminio.

El sobreencalamiento también puede inducir deficiencias de zinc. La solubilidad del zinc disminuye rápidamente con pH de 6 a 7. En suelos naturalmente bajos en zinc, tal como se demostró cuando se sobreencalaron Oxisoles del Cerrado (North Carolina State University, 1972).

El grueso de la evidencia sugiere que los suelos altamente meteorizados no deben encalarse hasta valores de pH mayores de 5,5. Más allá de este nivel pueden presentarse disminuciones de rendimiento. Sin embargo, en muchos casos el sobreencalamiento no da lugar a descensos en el rendimiento, sino que éste se mantiene nivelado. Efectos nocivos se notan más comúnmente en sistemas de silicatos laminares con revestimientos de óxidos o sistemas de óxidos en suelos bajos en fósforo, boro y zinc aprovechables y con alta capacidad de fijación de fósforo. Según McLean (1971) el sobreencalamiento de sistemas de silicatos laminares con poca carga dependiente del pH difícilmente ocasiona efectos nocivos.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. Los problemas de acidez del suelo están asociados con niveles de pH menores de 5,5 y la presencia de aluminio intercambiable en el suelo. Una medida útil de la acidez del suelo la constituye el porcentaje de saturación alumínica, calculada con base en la capacidad efectiva de intercambio catiónico. Cuando la acidez total extraíble o saturación alumínica se calcula usando soluciones tamponadas a pH 7,0 u 8,2, el resultado tiende a sobreestimar considerablemente los problemas de acidez de la mayoría de los suelos tropicales.

2. La toxicidad aluminica es la causa más común de la infertilidad de suelos ácidos. Los niveles altos de aluminio en la solución del suelo causan daño directo a las raíces y disminuyen su crecimiento y la traslocación del calcio y el fósforo a la parte aérea de la planta. La toxicidad de aluminio puede corregirse por medio del encalamiento a pH 5,5 a 6,0, para precipitar el aluminio intercambiable como hidróxido de aluminio. La toxicidad de manganeso puede presentarse en ciertos suelos altos en manganeso soluble. Este problema también puede corregirse con encalamiento a niveles de pH de 5,5 a 6,0, con los cuales la solubilidad del manganeso disminuye lo suficiente para eliminar la toxicidad pero no suficientemente para prevenir deficiencias. Las deficiencias de calcio y magnesio son también causas importantes de la infertilidad de suelos ácidos. A menudo se presentan conjuntamente con toxicidad de aluminio o manganeso, pero en ciertos suelos bajos en todos estos elementos el encalamiento actúa como fertilizante cálcico y/o magnésico.
3. Los cultivos tropicales difieren ampliamente en su habilidad para tolerar condiciones de suelo ácido. El café, el caucho, la piña y ciertas gramíneas y leguminosas forrajeras son muy tolerantes a niveles altos de saturación aluminica. El arroz y los frijoles negros también son bastante tolerantes mientras que el algodón y el sorgo son muy intolerantes. En arroz, maíz, trigo, frijoles y soya existen diferencias varietales importantes en tolerancia de aluminio.
4. Las dosis de encalamiento pueden calcularse con base de 1,65 ton/ha de equivalente de CaCO_3 por miliequivalente de aluminio intercambiable. Tales dosis suben el pH del suelo a alrededor de 5,5 a 6,0 y virtualmente eliminan la saturación aluminica en la mayoría de los suelos minerales. Para las especies y variedades más tolerantes el encalado debe tener como meta disminuir la saturación aluminica al 20 ó 40%. Uno de los problemas más críticos del manejo es la obtención de materiales de encalamiento con la fineza y contenido apropiado de magnesio.
5. En Oxisoles bien agregados con subsuelos ácidos el encalamiento de la capa arable no soluciona el problema del impedimento del desarrollo radicular en el subsuelo para que aprovechen la humedad almacenada. En ciertos suelos es factible el encalamiento profundo y dar por resultado un aumento considerable en los rendimientos por razón de un desarrollo radical más profundo y del mejoramiento de las relaciones de agua. En suelos oxídicos bien agregados hay movimiento descendente de calcio y magnesio al subsuelo.

6. En algunos suelos las aplicaciones adecuadas de cal pueden tener efecto residual de largo plazo, y relativamente cortos en otros. Las aplicaciones periódicas de mantenimiento pueden calcularse de acuerdo con el criterio del aluminio intercambiable.
7. El encalamiento a niveles de pH mayores de 6 ó 7 pueden disminuir seriamente los rendimientos, particularmente en suelos altos en óxidos de hierro y aluminio. El encalamiento hasta la neutralidad puede causar deterioro estructural, reducir la disponibilidad del fósforo e inducir deficiencias de zinc, boro y manganeso. En suelos de silicatos laminares el encalamiento a pH 7 generalmente no es perjudicial, pero resulta nocivo o neutral en sistemas de óxidos y de silicatos laminares con revestimientos de óxidos.
8. En los trópicos el manejo del encalamiento debe tener como meta la determinación del nivel mínimo de cal necesario, la selección de especies y variedades más tolerantes al aluminio, siguiendo prácticas que estimulen un sistema radicular más profundo en subsuelos ácidos.

REFERENCIAS

- ABRUÑA, F., VICENTE-CHANDLER, J., y PEARSON, R. W. Effects of liming on yields and composition of heavily fertilized grasses and on soil properties under humid tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:657-661. 1964.
- _____, _____, BECERRA, L., y BOSQUE-LUGO, R. Effects of liming and fertilization on yields and foliar composition of high yielding sun-grown coffee in Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 49:413-428. 1965.
- _____, _____. Sugar cane yields as related to the acidity of a humid tropic Ultisol. *Agron. J.* 59:330-332. 1967.
- _____, _____; PEARSON, R. W., et al. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols. I. Tobacco. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:629-635. 1970.
- _____, PEARSON, R. W., y PEREZ-ESCOLAR, R. Lime responses of corn and beans grown on typical Ultisols and Oxisols of Puerto Rico. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 261-281.
- AMARAL, A. Z., VERDADE, F. C., SCHMIDT, N. C., WUTKE, A. C. P., y IGUE, K. Parcelamento e intervalo de aplicação de calcário. *Bragantia* 24:83-96. 1965.
- ANDREW, C. S. y HEGARTY, M. P. Comparative responses to manganese excess of eight tropical and four temperate pasture legume species. *Aust. J. Agr. Res.* 20:687-696. 1969.
- _____, JOHNSON, A. D., y SANDLAND, R. L. Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical pasture legumes. *Aust. J. Agr. Res.* 24:325-339. 1973.

- ANDREW, C. S., y VANDEN BERG, P. J. The influence of aluminum on phosphate sorption by whole plants and exised roots of some pasture legumes. *Aust. J. Agr. Res.* 24:341-351. 1973.
- AYRES, A. S., HAGIHARA, H. H., y STANFORD, G. Significance of extractable aluminum in Hawaiian sugar cane soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29:387-392. 1965.
- BLACK, C. A. *Soil-plant relationships*, 2nd ed. Wiley, N.Y. 1967.
- BRENES, E. y PEARSON, R. W. Root responses of three gramineae species to soil acidity in an Oxisol and an Ultisol. *Soil Sci.* 116:295-302. 1973.
- CATE, R. B., Jr., y SUKHAI, A. P. A study of aluminum in rice soils. *Soil Sci.* 98:85-93. 1964.
- _____. Sugestões para adubação na base de análise de solo: primera aproximação. Duarte Coelho, Recife, Brasil, 1965.
- CERVANTES, O., LEON, L. A., y MARIN, G. Relaciones entre pH, aluminio y materia orgánica en algunos suelos de Colombia. *Rev. Inst. Colomb. Agropec.* 5:43-64. 1970.
- CHAKRABORTY, M., CHAKRAVARTI, B., y MUKHERJEE, S. K. Liming in crop production in India. *Indian Soc. Soil Sci. Bull.* 7. 1961.
- COLEMAN, N. T. y THOMAS, G. W. The basic chemistry of soil acidity. *Agron. Monogr.* 12:1-41. 1967.
- De FREITAS, L. M. M., y PRATT, P. F. Response of three legumes to lime in various acid soils in São Paulo. *Pesq. Agropec. Bras.* 4:89-95. 1969.
- _____, LOBATO, E., y SOARES, W. V. Experimentos de calagem em solos sob vegetação de cerrado de Distrito Federal. *Pesq. Agropec. Bras.* 6:81-90. 1971.
- _____, y VAN RAIJ, B. Residual effects of liming a sandy clay loam Latosol. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.) *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 300-307.
- EKPETE, D. M. Assessment of lime requirements of Eastern Nigeria soils. *Soil Sci.* 113:363-372. 1972.
- EVANS, C. E. y KAMPATH, E. J. Lime response as related to percent aluminum saturation, soil solution, aluminum and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:893-896. 1970.
- FASSBENDER, H. W. y MOLINA, R. The influence of silicate and liming on phosphate fertilization on volcanic ash soil in Costa Rica. In *Panel on Soils derived from volcanic ash in Latin America*. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969. pp. C2.1-C2.12.
- FOX, R. L., DeDATTA, S. K., y SHERMAN, G. D. Phosphorus solubility and availability to plants and aluminum status of Hawaiian soils as influenced by liming. In *Trans. Comm. IV and V, Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*, 1962. pp. 574-583.
- _____, DeDATTA, S. K., y WANG, J. M. Phosphorus and aluminum uptake by Latosols in relation to liming. *Trans. 8th Int. Congr. Soil Sci. (Bucharest)* 4:595-603. 1964.
- FOY, C. D. Effects of aluminum on plant growth. In E. W. Carson (Ed.) *The plant root and its environment*. University Press of Virginia, Charlottesville, 1974. pp. 601-642.
- _____, y BROWN, J. C. Toxic factors in acid soils. II. Differential aluminum tolerance of plant species. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:27-32. 1964.
- GHANI, M. O., HASSAN, K. A., y KAHN, M. F. A. Effects of liming on aggregation, noncapillary pore space and permeability of laterite soils. *Soil Sci.* 80:469-478. 1955.

- GORSLINE, G. W., THOMAS, W. I., y BAKER, D. E. Major gene inheritance of Sr-Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, B, Al-Fe, and Mn concentrations in corn. Pennsylvania Agr. Exp. Sta. Bull. 746. 1968.
- GUERRERO, R. Soils of the Colombian Llanos Orientales-composition and classification of selected soil properties. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, 1971.
- HARDY, F. The role of aluminum in soil in fertility and toxicity. J. Agr. Sci. 16:616-631. 1926.
- HEYLAR, K. R. y ANDERSON, A. J. Effects of lime on the growth of five species, on aluminum toxicity, and on phosphorus availability. Aust. J. Agr. Res. 22:707-721. 1971.
- IGUE, K. y FUENTES, R. Characterization of aluminum in volcanic ash soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36:292-296. 1972.
- JACKSON, W. A. Physiological effects of soil acidity. Agron. Monogr. 12:43-124. 1967.
- JUO, A. S. R. The problems of soil acidity and crop growth in acid tropical soils. Paper presented at a Tropical Soils Research Seminar, International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, 1972.
- KAMPRATH, E. J. Soil acidity and response to liming. Int. Soil Testing Program Tech. Bull. 4. North Carolina State University, Raleigh, 1967.
- _____. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34:252-254. 1970.
- _____. Potential detrimental effects from liming highly weathered soils to neutrality. Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla. 31:200-203. 1971.
- _____. Soil acidity and liming. Soils of the humid tropics. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 136-149.
- _____. Soil acidity and liming. In P. A. Sanchez (ed.). A review of soils research in tropical Latin America. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 126-128.
- LEON, L. A. Chemistry of some acid tropical soils of Colombia. Ph.D. Thesis, University of California at Riverside, 1967.
- _____. Teorías modernas sobre la naturaleza de la acidez del suelo. Suelos Ecuatoriales 3:1-23. 1970.
- LIN, C. y COLEMAN, N. T. The measurement of exchangeable aluminum in soil and clays. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23:12-18. 1960.
- LUGO-LOPEZ, M. A., HERNANDEZ, E., y ACEVEDO, G. Response of some tropical soils and crops of Puerto Rico to applications of lime. Puerto Rico Agr. Exp. Sta. Tech. Paper 28. 1959.
- MAHILUM, B. C., FOX, R. L., y SILVA, J. A. Residual effects of liming volcanic ash soils in the tropics. Soil Sci. 109:102-109. 1970.
- McLEAN, E. O. Potentially beneficial effects of liming: chemical and physical. Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla. 31:189-199. 1971.
- MENDEZ-LAY, J. Effects of lime on phosphorus fixation and plant growth in various soils of Panama. M.S. Thesis, Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1973. 90 p.
- MIKKLESEN, D. S., De FREITAS, L. M. M., y McCLUNG, A. C. Effects of liming and fertilizing cotton, corn and soybeans on Campo Cerrado soils, State of São Paulo, Brazil. IRI Res. Inst. Bull. 29. 1963.
- MONTEITH, N. H., y SHERMAN, G. D. A comparison of the use of liming materials on a hydrol humic Latosol and a humic ferruginous Latosol in Hawaii. In Trans. Comm. IV and V. Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand), 1962. pp. 584-587.

- MORELLI, M., IGUE, K., y FUENTES, R. Effect of liming on the exchange complex and on the movement of Ca and Mg. *Turrialba* 21:317-322. 1971.
- MOURA, W. y BUOL, S. W. Studies on a Latosol Roxo (Eutruxox) in Brazil. *Experientiae* 13:201-212. 1972.
- NAVAS, J. A. y SILVA F. (eds.). *Acidez y encalamiento en el trópico. Primer coloquio de suelos. Suelos Ecuatoriales* 3:1-309. 1971.
- NORRIS, D. O. The role of calcium and magnesium in the nutrition of *Rhizobium*. *Aust. J. Agr. Res.* 10:651-698. 1959.
- NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Agronomic-economic research on tropical soils. Annual Reports, 1973 and 1974. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1973, 1974.
- NYE, P., CRAIG, D., COLEMAN, N. T., y RAGLAND, J. L. Ion exchange equilibrium involving aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25:14-17. 1961.
- PEARSON, R. W., ABRUÑA, F., y VICENTE-CHANDLER, J. Effects of lime and nitrogen applications on the downward movement of Ca and Mg in two humid tropical soils of Puerto Rico. *Soil Sci.* 93:77-82. 1962.
- _____. Soil acidity and liming in the humid tropics. *Cornell Int. Agr. Bull.* 30. 1975.
- PEELE, T. C. The effect of calcium on the erodibility of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1:47-58. 1936.
- PRATT, P. F. y ALVAHYDO, R. Cation exchange characteristics of soils from São Paulo, Brazil. *IRI Res. Inst. Bull.* 31. 1966.
- RANA, S. K. y SHERMAN, G. D. Effect of liming and air drying on plant nutrition in two Hawaiian Latosols. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 19:203-208. 1971.
- REEVE, N. G. y SUMNER, M. E. Lime requirements of Natal Oxisols based on exchangeable aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:595-598. 1970.
- _____, y SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface applied amendments. *Agrochemophysica* 4:1-5. 1972.
- REID, D. A. Genetic control of reaction to aluminum in winter barley. In R. A. Nilan (ed.). *Barley genetics. Vol. II.* Washington State University Press, 1971. pp. 409-413.
- RICHARDSON, H. L. Soil acidity and liming with tropical crops. *World Crops* 3:339-340. 1951.
- RIXON, A. J. y SHERMAN, G. D. Effects of heavy lime applications to volcanic ash soils in the humid tropics. *Soil Sci.* 94:119-127. 1962.
- SALINAS, J. G. y SANCHEZ, P. A. Soil-plant relationships affecting varietal and species differences in tolerance to low available soil phosphorus. *Ciencia e Cultura (Brazil)* 28:156-168. 1976.
- SAMUELS, G. The pH of Puerto Rican soils used for principal crops. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 46:107-119. 1962.
- SANCHEZ, P. A. y BUOL, S. W. Properties of some soils of the upper Amazon Basin of Peru. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:117-121. 1974.
- SCHUFFELEN, A. C. y MIDDLEBURG, H. A. Structural deterioration of lateritic soils through liming. *Trans. Fifth Int. Congr. Soil Sci.* 2:158-165. 1954.
- SOARES, W. V., LOBATO, E., GONZALEZ, E., y NADERMAN, Jr. G. C. Liming soils of the Brazilian Cerrado. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America.* North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 283-299.

- SPAIN, J. M., FRANCIS, C. A., HOWELER, R. H., y CALVO, F. Differential species and varietal tolerance to soil acidity in tropical crops and pastures. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 308-324.
- SUMNER, M. E. Aluminum toxicity—a growth-limiting factor in some Natal sands. *Proc. Ann. Congr. South Afr. Sugar Technol. Assoc.* 44:176-182. 1970.
- VAN RAIJ, B., SACCHETTO, M., y DOVICH, TH. Correlações entre o pH e o grão de saturação em bases nos solos com horizonte B textural e horizonte B latossólico. *Bragantia* 27:193-200. 1968.
- VICENTE-CHANDLER, J., CARO-COSTAS, R., PEARSON, R. W., ABRUÑA, F., FIGARELLA, J., y SILVA, S. The intensive management of tropical forages in Puerto Rico. *Univ. Puerto Rico, Agr. Exp. Sta. Bull.* 187. 1964.
- VILLAGARCIA, S. Aluminum tolerance in the Irish potato and the influence of substrate aluminum on growth and mineral nutrition of potatoes. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, 1973. 200 p.
- YOUNGE, O. R. y PLUCKNETT, D. L. Liming materials. *Hawaii Farm Sci.* 13(3):7-8. 1964.

CAPITULO 8

FOSFORO, SILICIO Y AZUFRE

Después del agua y el nitrógeno, los dos elementos nutritivos limitantes más comunes en los trópicos son probablemente el fósforo y el azufre. Las deficiencias de fósforo son muy corrientes en Oxisoles y Ultisoles altamente meteorizados y en Andepts y Vertisoles ligeramente meteorizados. Muchos suelos tropicales tienen una capacidad muy alta para fijar fósforo. Para tales suelos son necesarias modificaciones considerables de las prácticas de manejo de fósforo desarrolladas para suelos de poca fijación. Por otra parte, existen diferencias significativas entre y dentro de especies en su habilidad para tolerar niveles bajos de fósforo disponible en el suelo.

Las aplicaciones de silicatos con frecuencia tienen un efecto benéfico en disminuir la fijación del fósforo. Aunque el sílice generalmente no se considera como un nutrimento esencial para el crecimiento de las plantas, en suelos tropicales altamente meteorizados se ha obtenido aumento de rendimientos con aplicaciones de sílice por causas nutritivas.

Evidencia que se está acumulando rápidamente indica que las deficiencias de azufre son más extensas en los trópicos que las de potasio. Muchos casos de deficiencias de azufre se han estado corrigiendo inconscientemente mediante el uso de fertilizantes que contienen azufre, tales como el sulfato de amonio y el superfosfato simple. El uso de fuentes más concentradas tales como urea y superfosfato triple, ha dado lugar a una mayor cantidad de deficiencias severas de azufre.

El propósito de este capítulo es resumir los conocimientos actuales sobre el manejo de estos tres elementos en condiciones tropicales.

CONTENIDO Y FORMAS DEL FOSFORO

FOSFORO TOTAL

El contenido total del fósforo del suelo no es de importancia práctica directa, pero a menudo se le ha usado como índice de me-

teorización. El fósforo total en la capa arable disminuye conforme aumenta la intensidad de la meteorización. Olson y Englestad (1972) expresaron que suelos representativos del medio oeste de Estados Unidos tenían un promedio de 3000 ppm de P en la capa arable; los suelos más meteorizados del sureste de Estados Unidos alrededor de 500 ppm, y “suelos tropicales” cerca de 200 ppm. Debido a la mayor extensión superficial de los suelos altamente meteorizados en los trópicos, esto es generalmente cierto, pero hace caso omiso de las diferencias marcadas entre los suelos tropicales. En Venezuela, por ejemplo, los contenidos de fósforo total están correlacionados con el aumento de meteorización de acuerdo con mediciones de la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas. El Cuadro 8.1 muestra dicha variabilidad.

CUADRO No. 8.1. Distribución de las fracciones de fósforo total (ppm) en la capa arable de algunos suelos venezolanos con relación a su grado de meteorización. (Fuente: adaptado de Westin y Brito, 1969).

Serie	Orden	CIC de la arcilla (meq/100 g)	pH	Fósforo				
				Total	Orgánico	Ca-P	Al-P	Fe-P
Chispa	Molisol	100	6,9	692	235	70	33	43
Maracay	Entisol	127	5,9	298	79	88	20	33
Paya	Alfisol	50	5,0	144	85	3	14	19
Guataparo	Oxisol	18	4,8	59	11	0	2	17

Aunque los Oxisoles son generalmente bajos en fósforo total (menos de 200 ppm), algunos son sumamente altos. Moura et al, (1972) encontraron 3760 ppm de P total en un Eustruox de Brasil. Los Ultisoles y Alfisoles son generalmente bajos en fósforo total, con valores mayormente inferiores a 200 ppm (Nye y Bertheux, 1957; Westin y Brito, 1969; Cabala y Fassbender, 1970). Según Fassbender (1969) los Andepts son generalmente altos en fósforo total, con ámbito entre 1000 y 3000 ppm. Muchos Vertisoles de India y América Central son muy bajos en fósforo total, variando de 20 a 90 ppm (Mehta y Patel, 1963; Danke et al, 1964). El contenido de fósforo total de Entisoles y otros Inceptisoles varía de acuerdo con los materiales de partida.

FOSFORO ORGANICO

El fósforo orgánico generalmente corresponde del 20 al 50% del fósforo total en la capa arable. En los Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles más altamente meteorizados a menudo representa del 60 al 80% del

fósforo total del suelo. Investigadores en Africa consideran que el fósforo orgánico es la fuente principal de fósforo para la agricultura sin fertilizantes. Por lo tanto, su conservación es de gran significado práctico en sistemas agrícolas tradicionales. Por ejemplo, Smith y Acquaye (1963) observaron una alta correlación entre el rendimiento de cacao y contenido de fósforo orgánico en el suelo. Friend y Birch (1960) obtuvieron una correlación negativa entre las respuestas a fósforo aplicado y contenido de fósforo orgánico en Africa Oriental. En plantaciones de cacao de Ghana, Omatoso (1971) sólo obtuvo incrementos marcados de rendimiento con aplicaciones de fósforo cuando el contenido de fósforo orgánico del suelo era menor de 150 ppm.

Las razones C:P de la materia orgánica en suelos representativos de Ghana son del orden de 240:1 según Nye y Bertheux (1957). Este valor representa un contenido de fósforo mucho más bajo que en Estados Unidos, donde la razón promedio de C:P es del orden de 110:1. Las razones N:P en Ghana son del orden de 20:1; en Estados Unidos, alrededor de 9:1. Estos ámbitos tan amplios de C:N y N:P son indicativos de deficiencia de fósforo. El hecho que Nye y Bertheux no encontraron diferencias en razones de C:P con práctica de labranza, sugiere que el fósforo se mineraliza aproximadamente con la misma velocidad que el carbono orgánico. Las razones de N:P disminuyen con la labranza, dando a entender que el fósforo orgánico se mineraliza con mayor velocidad que el nitrógeno orgánico. Este punto de vista se confirma mediante evidencia de que suelos de sabana recientemente desmontados son deficientes en nitrógeno pero no en fósforo durante el primer año, en Alfisoles de Africa Occidental (Nye y Greenland, 1960).

La mineralización del fósforo orgánico es difícil de cuantificar porque los iones $H_2PO_4^-$ se pueden fijar rápidamente en compuestos inorgánicos. Experimentos de laboratorio en Ghana sugieren que el fósforo orgánico puede liberar de 2 a 27 ppm de P al suelo, según Acquaye (1963). Este investigador también encontró que las aplicaciones de nitrógeno y fósforo aumentaban la mineralización del fósforo orgánico. Awan (1964), también encontró con trabajos en Honduras, que aumentos de rendimiento en maíz, sorgo y caupí, al encalar el suelo, estaban asociados con un aumento en la mineralización del fósforo orgánico. Estos efectos pueden atribuirse al establecimiento por medio de la fertilización, de un medio más favorable para los microorganismos encargados de la mineralización.

La importancia de conservar la materia orgánica es también función del mantenimiento del fósforo orgánico, particularmente en suelos en que la mayor parte del fósforo está en esta forma. En los lugares donde los fertilizantes están disponibles en forma económica, el fósforo orgánico merece menos consideración.

FRACCIONES DE FOSFORO INORGANICO

Las formas sólidas de fósforo inorgánico por lo general están divididas en tres fracciones activas y dos relativamente inactivas. Las fracciones activas pueden agruparse en fosfatos enlazados a calcio (Ca-P), fosfatos enlazados a aluminio (Al-P) y fosfatos enlazados a hierro (Fe-P). Los fosfatos de calcio están presentes como películas o partículas definidas, mientras que Al-P y Fe-P se presentan como películas o están adsorbidos en las superficies de arcilla y limo. Las fracciones relativamente inactivas son las formas ocluidas y aquellas que se disuelven con la reducción química del suelo. El fósforo ocluido consiste de compuestos de Fe-P y Al-P rodeados de un revestimiento inerte de otro material que evita la reacción de estos fosfatos con la solución del suelo. Las formas solubles en reducción están cubiertas por un revestimiento que puede disolverse parcial o totalmente bajo condiciones anaeróbicas.

Las formas de fósforo inorgánico presentes en un suelo dependen de su etapa de meteorización química. Esto se muestra en el Cuadro 8.1 donde la proporción de fosfatos de calcio disminuye con aumentos en la meteorización mientras la proporción de los fosfatos de hierro aumenta. Los fosfatos de calcio son más solubles que los fosfatos de aluminio, y éstos a su vez más solubles que los de hierro.

La transformación de una forma de fosfato a otra está controlada principalmente por el pH del suelo. Conforme los suelos se tornan más ácidos aumenta la actividad del hierro y el aluminio, y los fosfatos de calcio relativamente solubles se convierten en fosfatos menos solubles de aluminio y hierro (Kamparath, 1973). Estos procesos son lo suficiente lentos para permitir que en suelos ácidos con valores de pH menores de 5,5 existen considerables cantidades de fosfatos de calcio.

En suelos altamente meteorizados la mayor parte del fósforo inorgánico está en forma ocluida o soluble en reducción debido a la formación de revestimientos de óxidos de aluminio o de hierro. El Cuadro 8.2 muestra que los fosfatos de hierro soluble en reducción son la forma dominante del fósforo inorgánico en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. La mayor parte del fósforo total que se encuentra en el Eustrustox, que Moura et al (1972) estudiaron en Brasil, también está en la forma soluble en reducción. En Ultisoles predominan ambos: los fosfatos de hierro y de aluminio. En Andepts son más comunes los fosfatos de calcio en niveles de pH superiores a 6 y de aluminio con pH menores. Los regímenes de humedad también juegan un papel significativo en las transformaciones del fósforo. Los fosfatos de aluminio tienden a acumularse en regímenes ácuicos de humedad del suelo, mientras que los fosfatos de hierro se acumulan en regímenes ústicos.

FIJACION* Y LIBERACION DEL FOSFORO

PROCESOS DE FIJACION DEL FOSFORO

“Fijación de fósforo” es otro término con una definición deficiente en la ciencia del suelo. Este autor prefiere considerar la fijación como el proceso que altera la disponibilidad de los compuestos fosfatados conforme lo indica el crecimiento de las plantas. El término “fijación” tiene una connotación equivocada de irreversibilidad. El proceso consiste en la transformación de fosfatos monicálcicos solubles (superfosfatos) en fosfatos menos solubles de calcio, aluminio o hierro. Estos compuestos liberan fósforo dentro de la solución del suelo por un período de años.

CUADRO No. 8.2. Fracciones de fósforo en el perfil de un Oxisol de Carimagua, Llanos Orientales, Colombia. (Fuente: Benavides, 1963).

Horizonte (cm)	pH	C orgá- nico (%)	Satura- ción de bases (%)	P total (ppm)	Porcentaje de P total					
					P orga- nico	Ca-P	Al-P	Fe-P	Fe-P sol. reduc.	Al-P ocluído
0-6	4,5	2,26	7	185	77	0,9	0,8	10	9	1
6-15	4,6	1,84	7	151	75	0,6	0,9	11	11	1
15-40	4,6	1,13	13	126	73	0,7	1,2	6	17	1
40-70	4,9	0,53	15	114	55	0,8	1,3	7	34	1
70-100	5,1	0,43	29	90	47	0,6	1,0	9	41	1
100-150	5,1	0,24	21	84	35	0,7	1,2	4	53	4

Cuando se coloca un gránulo de superfosfato en el suelo, el agua se mueve inicialmente al interior del gránulo y disuelve parte del fosfato monocálcico en fosfato dicálcico y ácido fosfórico libre. La solución que sale de estos gránulos tiene un pH de 1 a 1,5 y disuelve compuestos de aluminio, hierro, potasio y magnesio de las partículas de suelo. En suelos ácidos, el aluminio y el hierro son más abundantes y reaccionan con el fósforo formando fosfatos de aluminio y hierro relativamente insolubles. En suelos calcáreos los iones de fosfatos son precipitados por el calcio y el magnesio como compuestos relativamente insolubles.

En suelos ácidos hay un mecanismo adicional de fijación. El aluminio intercambiable reacciona con los abonos fosfatados y forma compuestos que tienen la fórmula general $Al(OH)_2H_2PO_4$, que se asemejan a la forma cristalina variscita, pero son más solubles (Coleman et al, 1960). Un efecto indirecto de este mecanismo es la precipitación del aluminio intercambiable con fósforo. De acuerdo con cálculos de

(*) Los términos “sorción” y adsorción” también se usan para expresar el mismo concepto. Para mayor claridad se usará “fijación” tal como se define en esta sección.

Coleman y colaboradores, 1 meq de aluminio intercambiable puede fijar alrededor de 70 ppm de P porque el aluminio se precipita de esta manera. A esto se denomina a menudo "encalamiento con fósforo".

Cuanto mayor sea el contenido de óxidos de aluminio y hierro tanto mayor la capacidad de fijación del suelo. Además, cuanto mayor sea el contenido de aluminio intercambiable, tanto mayor será la capacidad de fijación de fósforo. Por consiguiente los Oxisoles y Ultisoles muy ácidos y meteorizados generalmente tienen alta capacidad de fijación de fósforo, mientras que suelos menos ácidos con mineralogía de silicatos laminares tienen capacidad de fijación mucho más baja. Debido a su alto contenido de óxidos de aluminio, los Andepts también tienen una capacidad muy alta de fijación de fósforo.

En sistemas de óxidos o de silicatos laminares con revestimiento de óxido la fijación de fósforo aumenta al aumentar el contenido de arcilla, lo cual es un efecto indirecto de los contenidos de óxidos de hierro y aluminio que se encuentran en la fracción de arcilla. Woodruff y Kamprath (1965) encontraron que los Ultisoles arenosos retienen mucho menos fósforo que los Ultisoles arcillosos de mineralogía similar. Además de los contenidos de óxidos de hierro y aluminio, el grado de cristalinidad también afecta la magnitud de la fijación de fósforo. Pratt et al, (1969) encontraron que ciertos Ultisoles de Brasil fijaban más fósforo por unidad de contenido de óxido de hierro que los Oxisoles de ese país. Esto se debe a la existencia de formas menos cristalinas del óxido de hierro en los Ultisoles, en contraste con las formas más cristalinas en los Oxisoles. Debido a su mayor área superficial, los óxidos amorfos retienen más fósforo que sus formas cristalinas. Sin embargo, como el contenido de óxido de hierro es por lo general mayor en el horizonte A de los Oxisoles, como orden, ellos probablemente fijan más fósforo que los Ultisoles. Syers et al, (1971) encontraron que entre los materiales amorfos, los compuestos amorfos de aluminio eran fijadores más activos que los óxidos amorfos de hierro en Ultisoles y Oxisoles del sur de Brasil.

La mineralogía de los suelos determina el producto de la fijación del fósforo. En suelos con mineralogía oxídica, la mayor parte del fósforo se fija como fosfatos de hierro; en familias caoliníticas la forma predominante es fosfatos de aluminio, pero con la edad se transforman en fosfatos de hierro. En un experimento a largo plazo en un Ultisol, Shelton y Coleman (1968) encontraron que el fósforo añadido se convertía en proporciones iguales en fosfatos de hierro y aluminio durante el primer año. En tres años dos terceras partes del fósforo fue encontrado como fosfato de hierro, y durante el sexto año la proporción subió al 75%. Por ser más solubles, los fosfatos de aluminio gradualmente se transformaron en fosfatos de hierro. En familias alofánicas la fijación es principalmente en forma de fosfatos de aluminio debido al alto contenido de óxidos de aluminio y al bajo contenido de óxidos de hierro en los Andepts ácidos.

La intensidad de la fijación de acuerdo con la mineralogía, es la siguiente:

Oxidos amorfos > Oxidos cristalinos > Arcillas 1:1 > Arcillas 2:1

(incluyendo alófana) (gibbsita, geotita, etc).

MAGNITUD DE LA FIJACION DE FOSFORO

Los Cuadros 8.3 y 8.4 dan una idea sobre las cantidades máximas de fósforo que los suelos tropicales pueden fijar. Como grupo, los Andepts y otros suelos altos en alófana son los mayores fijadores con

CUADRO No. 8.3. Cantidades de fósforo fijado y cantidades de fósforo añadido necesarios para dar a la solución del suelo concentraciones de 0,1 y 0,2 ppm de P en suelos de México, América Central y Brasil. (Fuente: adaptado de Rivera-House, 1971 y North Carolina State University, 1973).

Suelo	Mineral dominante en la arcilla	Arcilla (%)	Adsorción máxima	P fijado (ppm)	
				A 0,1 ppm P en solución del suelo	A 0,2 ppm P en solución del suelo
Inceptisol	Montmorilonita	27	106	65	83
Ultisol	Caolinita	38	480	285	360
Oxisol	Caolinita	36	531	310	395
Oxisol	Caolinita	78	—	720	900
Andept	Alófana	11	1050	500	670

CUADRO No. 8.4. Fijación de fósforo y cantidad necesaria para mantener 0,2 ppm de P en la solución del suelo en una sección transversal en meteorización en Oahu, Hawaii. (Fuente: Fox et al, 1971).

Suelo	Precipitación anual (mm)	Minerales de la arcilla	pH	P fijado (ppm)	
				Adsorción máxima	A 0,2 ppm de P en solución del suelo
Chromustert	500	Montmorilonita	7,6	300	85
Haplustox	600	Caolinita	7,8	500	145
Haplustox	950	Caolinita	6,8	525	145
Eutrorthox	1200	Caolinita	5,1	725	235
Tropohumult	2200	Caolinita, gibbsita	4,5	670	335
Tropohumult	2300	Gibbsita, goctita	6,6	1320	435

más de 1000 ppm de fósforo añadido. Los suelos caoliníticos, incluyendo Oxisoles y Ultisoles son los que siguen, con valores que van de 500 a 1000 ppm de fósforo, excepto los de textura arenosa. Suelos altos en Montmorilonita y aquellos calcáreos pueden fijar de 0 a 100 ppm de fósforo.

LIBERACION DE FOSFORO

Lo que las plantas realmente usan son iones de fosfato en la solución del suelo. La concentración de iones de $H_2PO_4^-$ son de fracciones de partes por millón. Las plantas acumulan en sus tejidos alrededor de 2000 ppm de P. Por lo tanto la solución del suelo debe renovarse varias veces al día para que las plantas acumulen tal concentración de fósforo. El fósforo fijado se libera lentamente a la solución del suelo, en función de la solubilidad de los compuestos inorgánicos. La mineralización del fósforo orgánico también proporciona iones $H_2PO_4^-$ a la solución del suelo, pero la mayor parte de ellos se fijan inmediatamente.

Se ha encontrado que algunas plantas tienen una concentración óptima de fósforo en la solución del suelo asociada con el crecimiento máximo de ellas. Baldovinos y Thomas (1967) en Virginia, y Fox et al, (1971, 1974) en Hawaii, han mostrado que el crecimiento máximo del maíz y del frijol están asociados con un nivel de 0,07 ppm de P en la solución del suelo de Ultisoles, Oxisoles y Andepts arcillosos. En suelos arenosos la concentración óptima es alrededor de 0,2 ppm de P en la solución del suelo. Esta diferencia se debe probablemente a la mayor velocidad de difusión de la solución de suelos arenosos debido a películas descontínuas de agua alrededor de las partículas. Aún a 15 bares las películas de agua alrededor de las arcillas pueden ser continuas.

La relación entre la cantidad de fósforo inorgánico añadido al suelo y la concentración de equilibrio de fósforo en la solución del suelo, es un indicador general de la cantidad de fertilizante fosfatado que debe agregarse para alcanzar un nivel deseado de fósforo en la solución del suelo. Estas relaciones, que se obtienen en el laboratorio añadiendo diferentes cantidades de fósforo al suelo, agitándolo por seis días y determinando la cantidad que permanece en solución, se conocen como "isotermas de fijación de fósforo" (Fox y Kamprath, 1970). La Fig. 8.1 presenta ejemplos de tales relaciones en varios suelos tropicales. Las isotermas evalúan el grado de fijación y de liberación al mismo tiempo. Son esencialmente funciones de intensidad y capacidad.

La Fig. 8.1 muestra que un suelo montmorilonítico fija poco fósforo y requiere poco fósforo en el suelo para suplir 0,1 ppm en la solución. Oxisoles y Ultisoles arcillosos necesitan cerca de 300 ppm de P añadido para suministrar la misma cantidad. El Andept, por su

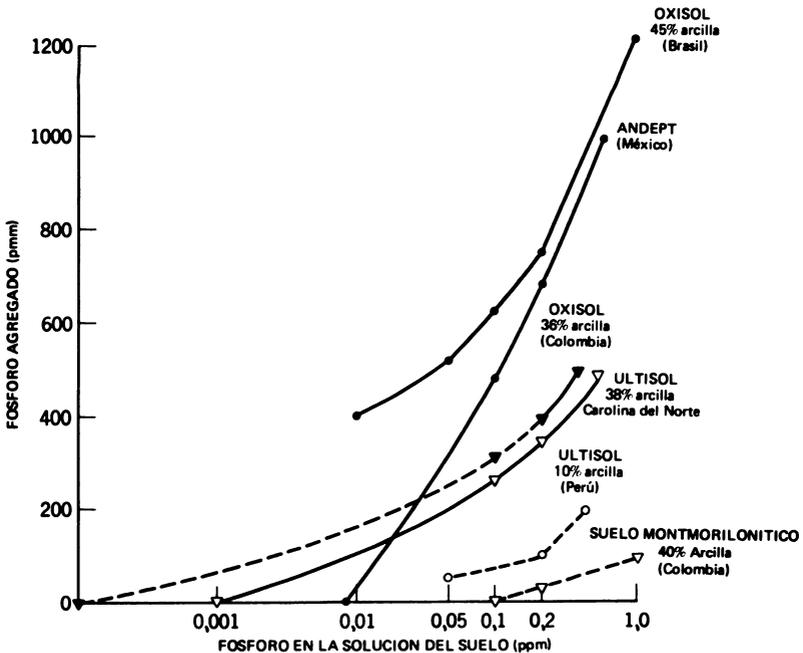


Fig. 8.1. Ejemplos de isoterma de fijación de fósforo en suelos tropicales. (Fuente: Rivera-House, 1971; North Carolina State University, 1973; y Fox, 1974).

alto contenido de aluminosilicatos amorfos necesita alrededor de 450 ppm de fósforo para alcanzar ese nivel. Un Oxisol muy arcilloso de Brasil requiere más de 700 ppm de P para alcanzar 0,1 ppm en la solución del suelo. Se necesita poco fertilizante fosfatado adicional para subir el nivel de la solución del suelo a 0,2 ppm.

Fox y sus colaboradores (1971) han mostrado relaciones similares en otros suelos tropicales; también han demostrado una relación entre la mineralogía de la arcilla y la fijación de fosfato (Cuadro 8.4). Los mayores fijadores son las familias oxídicas y alofánicas, seguidas por suelos con mezclas de caolinita y óxidos; luego siguen las familias caoliníticas y montmoriloníticas.

Los análisis de fósforo disponible son determinaciones empíricas que intentan extraer una cantidad que se correlacione con la respuesta de las plantas a la fertilización fosfatada. Cuando se usan y se interpretan correctamente dichos análisis, pueden separar suelos que probablemente respondan al fósforo de los que probablemente no respondan. Cuando se conoce la capacidad de fijación de los suelos, el significado de los análisis de suelo adquiere un enfoque más agudo. En el Cuadro 8.5 se presentan ejemplos de tales calibraciones para dos análisis de suelo de uso común. Los niveles críticos del

CUADRO No. 8.5. Relación entre valores de extracción con los métodos de Carolina del Norte y Olsen necesarios para predecir los valores de equilibrio del fósforo en la solución del suelo, en suelos de México, Colombia y Carolina del Norte. (Fuente: Rivera-House, 1971).

Minerales de arcilla y suelo	Extracción Carolina del Norte (ppm)			Extracción Olsen (ppm)		
	0,07	0,1	0,2	0,07	0,1	0,2
Alófana						
Olotepc	14	20	25	—	—	—
Caolinita						
Acayúcan	9	11	20	4	5	9
Carimagua	60	72	100	21	26	34
Georgeville	57	70	87	17	21	28
Montmorilonita o 14 A						
Escórcega	—	—	—	4	4	6
Cárdenas	—	—	—	15	15	19

análisis de suelo pueden definirse como los que predicen de 0,07 a 0,2 ppm de P en la solución del suelo. Los niveles críticos son bastante variables en los principales tipos de suelo.

NECESIDADES DE FOSFORO DE LOS CULTIVOS TROPICALES

ACUMULACION DE FOSFORO

Con los bajos niveles actuales de rendimiento, alrededor de 1 ton/ha, la absorción de fósforo por cereales y leguminosas de grano es menor de 10 kg/ha de P (véase Cuadro 6.7). Con niveles altos de rendimiento de 4 a 8 ton/ha, el maíz, el arroz y el trigo extraen de 14 a 35 kg/ha de P.

Los cultivos de raíces son grandes extractores de fósforo. Con niveles promedio de rendimiento de aproximadamente 8 ton/ha el contenido de fósforo en raíces de yuca y tubérculos de papa son de 35 a 40 kg/ha de P. Cuando se toma en cuenta la parte aérea de estas plantas y con mayores niveles de rendimiento, la absorción de fósforo es mucho más alta. Como posibles excepciones pueden citarse el camote y el ñame, los cuales tienen necesidades bajas de fósforo.

Gramíneas forrajeras y caña de azúcar con manejo intensivo pueden extraer de 20 a 70 kg/ha de P por año, según los niveles de rendimiento. Algunas leguminosas forrajeras responden dramáticamente a la fertilización fosfatada pero no requieren tanto fósforo

como las gramíneas debido a su producción de materia seca generalmente menor. El banano es un extractor de fósforo relativamente bajo; los racimos pueden extraer anualmente menos de 10 kg/ha de P. Los cultivos arbóreos extraen poco fósforo en las partes que se recolectan. El café, el caucho y el cacao corrientemente extraen menos de 2 kg/ha de P en las porciones recolectadas. El ciclo de nutrientes de estos cultivos probablemente proporcionan una gran parte de la necesidad de fósforo del árbol. Los bosques pluviales tropicales por ejemplo, agregan un promedio anual de 15 kg/ha de P al suelo en forma de adiciones de biomasa.

DIFERENCIAS VARIETALES Y DE ESPECIES

Existen diferencias significativas en la tolerancia a bajo fósforo aprovechable. Con niveles similares de rendimiento el arroz de secano generalmente requiere menos fósforo que el maíz. Las recomendaciones generales para estos cultivos en América Latina oscilan entre 100 y 150 kg de P_2O_5 /ha para maíz y de 0 a 60 para arroz de secano (Kamprath, 1973). En la Fig. 8.2 se presenta un ejemplo que ilustra esta relación. Maíz y arroz de secano se cultivaron en experimentos adyacentes idénticos en un Oxisol en Colombia. En las parcelas encañadas el maíz mostró una marcada respuesta a 50 kg de P_2O_5 /ha con un aumento de rendimiento de 0,8 a 3,2 ton/ha. En las parcelas encañadas el arroz no respondió al fósforo y dio un rendimiento de 3,2 ton/ha sin adición de fósforo. No se comprenden por completo

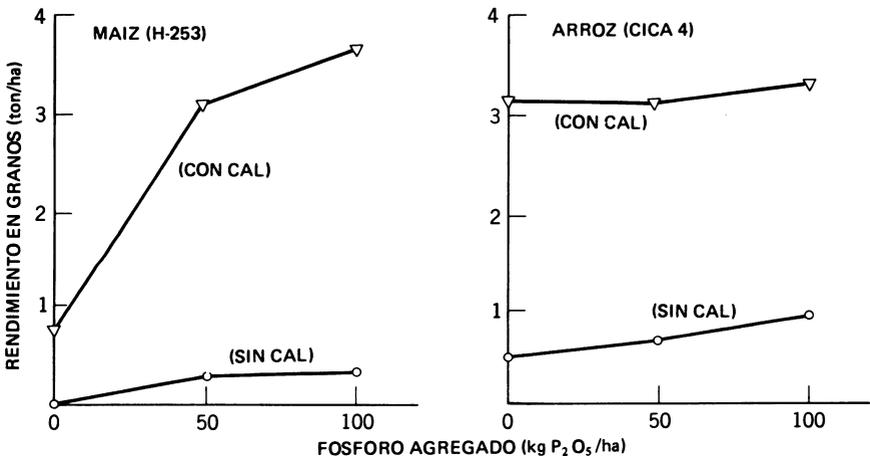


Fig. 8.2. Diferencias de especies en la respuesta al fósforo entre maíz y arroz de secano cultivados en parcelas adyacentes en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. (Fuente: adaptado de CIAT, 1971).

las razones de tales diferencias en las necesidades externas (ppm de P en la solución del suelo) e internas (porcentaje de fósforo en los tejidos de la planta) de fósforo asociadas con rendimientos máximos.

La única forma de fósforo disponible para las plantas son los iones de fosfato en la solución del suelo. Un informe de Fox et al, (1974) demostraba que hay una concentración óptima de fósforo en la solución del suelo correlacionada con buen crecimiento y que varía según la especie. Estos resultados se ilustran en la Fig. 8.3 e indican que el camote (*Ipomoea batata*) es más tolerante a bajos niveles de fósforo en la solución del suelo que la lechuga (*Latuca sativa*), mientras que el maíz (*Zea mays*) y el repollo chino (*Brassica pekinensis*) ocupan posiciones intermedias.

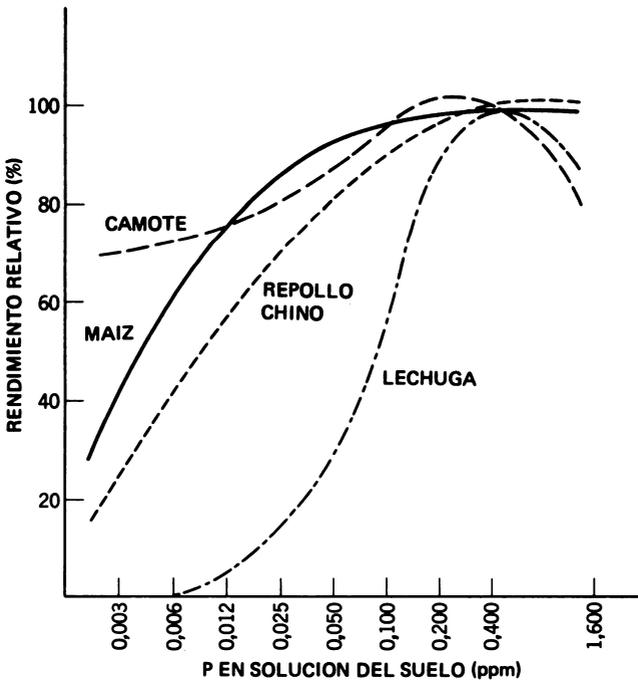


Fig. 8.3. Respuesta diferencial al fósforo entre camote, maíz, repollo chino y lechuga cultivados en un Eustrtox de Hawaii. (Fuente: Fox et al, 1974).

Si la concentración de fósforo en la solución del suelo que produce el 95% del rendimiento máximo se considera que es la necesidad externa de fósforo, hay muchas diferencias entre especies. El Cuadro 8.6 indica una diferencia diez veces mayor entre las necesidades externas de dos legumbres similares, lechuga y repollo. Este cuadro también indica que la necesidad externa de una leguminosa forrajera del género *Desmodium* es alta durante el período de establecimiento

CUADRO No. 8.6. Niveles críticos externos de fósforo de varios cultivos tropicales. (Fuente: Fox et al, 1974).

Cultivo	P en la solución del suelo asociado con el 95% del rendimiento máximo (ppm)
Lechuga	0,40
Tomate	0,25
Pepino	0,20
Soya (legumbre)	0,20
<i>Desmodium aparines</i> = establecimiento	0,20
segunda corta	0,01
Camote	0,10
75% del rendimiento máximo	0,003
Maíz	0,60
Sorgo	0,50
Repollo	0,04

(0,20 ppm de P), pero decrece a 0,01 ppm de P después del segundo corte. Esta información refleja la necesidad de aplicar fósforo a las leguminosas forrajeras tropicales durante el período de establecimiento en los suelos bajos en este elemento.

La baja necesidad externa de fósforo del camote es de considerable interés. El haber obtenido el 75% del rendimiento máximo con niveles tan bajos como de 0,003 ppm de P tiene grandes consecuencias económicas. Desafortunadamente no existen datos semejantes para otros cultivos importantes como arroz, yuca, trigo, caupí, ñame y también muchas gramíneas y leguminosas forrajeras. Tampoco existen datos parecidos sobre diferencias varietales dentro de una misma especie.

El trabajo de Andrew y Robins (1969) en Australia revela diferencias entre especies con respecto a los niveles críticos internos de fósforo. Ellos determinaron las concentraciones críticas de fósforo en la parte aérea de varias gramíneas y leguminosas forrajeras correlacionadas con rendimientos máximos. Se consideró que el porcentaje del fósforo de la parte aérea de la planta asociado con la producción máxima de materia seca era el nivel crítico interno de fósforo. Algunos de sus resultados (Cuadro 8.7) muestran que especies de leguminosas tales como *Stylosanthes humilis* y *Centrosema pubescens* tienen niveles críticos internos menores que especies tales como *Glycine wightii* (soya forrajera) y *Medicago sativa* (alfalfa). Las dos primeras especies son nativas de regiones con suelos bajos en fósforo disponible, mientras que las dos últimas se originaron en regiones con suelos

CUADRO No. 8.7. Contenido de fósforo en la planta asociado con el crecimiento máximo de varias especies de pasturas en Queensland, Australia. (Fuente: Andrew y Robins, 1969, 1971).

Especie	Necesidad interna de P (% de P)
Leguminosas	
<i>Stylosanthes humilis</i>	0,17
<i>Centrosema pubescens</i>	0,16
<i>Desmodium intortum</i>	0,22
<i>Glycine wightii</i>	0,23
<i>Medicago sativa</i>	0,25
Pasturas	
<i>Digitaria decumbens</i>	0,16
<i>Melinis minutiflora</i>	0,18
<i>Panicum maximum</i>	0,19
<i>Pennisetum clandestinum</i>	0,22
<i>Chloris gayana</i>	0,23
<i>Paspalum dilatatum</i>	0,25

altos en fósforo disponible y en otros nutrimentos. La misma cosa ocurre con gramíneas forrajeras. Las gramíneas como *Melinis minutiflora* y *Panicum maximum* son muy comunes en suelos ácidos con poca disponibilidad de fósforo, mientras que *Chloris gayana* y *Paspalum dilatatum* tienen niveles críticos internos más altos.

El Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz, de Filipinas, está llevando a cabo un programa amplio e inteligente para seleccionar variedades de arroz tolerantes a varios problemas de suelo, incluyendo disponibilidad baja de fósforo. Por medio de experimentos preliminares en invernaderos (IRRI, 1971; Ponnampereuma y Castro, 1971), seguidos por experimentos de campo con dos dosis de fósforo aplicada (IRRI, 1972) el Instituto ha clasificado un grupo grande de variedades de acuerdo con su tolerancia a niveles bajos de fósforo en el suelo. El Cuadro 8.8 presenta algunos ejemplos. La clasificación por grado de tolerancia se basa en la respuesta relativa al fósforo en aplicaciones de campo.

Un punto interesante de este estudio es la posible selección de variedades no solamente con tolerancia al fósforo, sino también tolerantes a otros problemas del suelo, tales como deficiencia o toxicidad de hierro, y la presencia de productos tóxicos de la reducción del suelo. Las variedades con un espectro más amplio de resistencia a condiciones adversas de suelo son: IR 24, CAS209, y BG79. Las variedades Pelita I/1 y Pelita I/2 se consideran como fuentes genéti-

CUADRO No. 8.8. Clasificación de variedades de arroz de acuerdo con su tolerancia a niveles bajos de fósforo en un Ultisol de Luisiana, Filipinas. (Fuente: IRRI, 1972).

Tolerantes	Moderadamente tolerantes	Moderadamente sensitivas	Sensitivas
IR4-11	IR5	IR442-2-58	IR579-48-1
Bahagia	IR8	IR1008-14-1	IR747B-26-3
BG 79	IR20	IR1154-233-2	IR878B-4-220
CAS 209	IR22	Taichung (N) 1	Bala
Engkatok	IR24	TKM6	C 22
Pelita I/1	IR661-1-70		Colombia 1
Pelita I/2	IR1154-68-2		CP231xSL017
RD 1	CICA 4		ICA 10
SR 26 B	Peta		M1-48
	T442-35		M1-273
			OS 4
			SML Acorni

cas para tolerancia a niveles bajos de fósforo. Aunque la genética de las diferencias varietales en tolerancia a bajo fósforo no está tan avanzada como la de la tolerancia a aluminio, parece razonable suponer que las variedades o especies desarrolladas en suelos bajos en fósforo mostraran tolerancia, mientras que las desarrolladas en suelos con un buen suministro de fósforo, ya sea en forma natural o por fertilización abundante, es probable que no presenten tal tolerancia.

Los mecanismos fisiológicos responsables de estas diferencias varietales y entre especies no están comprendidos por completo. En una revisión de este tópico, Salinas y Sánchez (1976) observaron que las variedades y especies más tolerantes a la baja disponibilidad de fósforo pueden absorber fósforo a una velocidad mayor o traslocarlo a la parte aérea de la planta a un ritmo más rápido que las variedades o especies sensitivas. En algunos casos las variedades tolerantes tienen una velocidad relativa de crecimiento menor que les permite funcionar con niveles bajos en el suministro externo de fósforo.

En muchos suelos ácidos es difícil separar el efecto de una alta saturación aluminica del de una baja disponibilidad de fósforo. La tolerancia al aluminio se ha relacionado con la habilidad de la planta para absorber y trasladar fósforo en presencia de aluminio.

Evidencia al respecto la proporcionaron Andrew y Vanden Berg (1973) para el mismo grupo de especies de leguminosas forrajeras a que se hizo referencia en el Capítulo 7. La Fig. 8.4 muestra que los niveles crecientes de aluminio en solución disminuyeron el crecimiento de la parte aérea de dos especies sensitivas al aluminio, *Glycine*

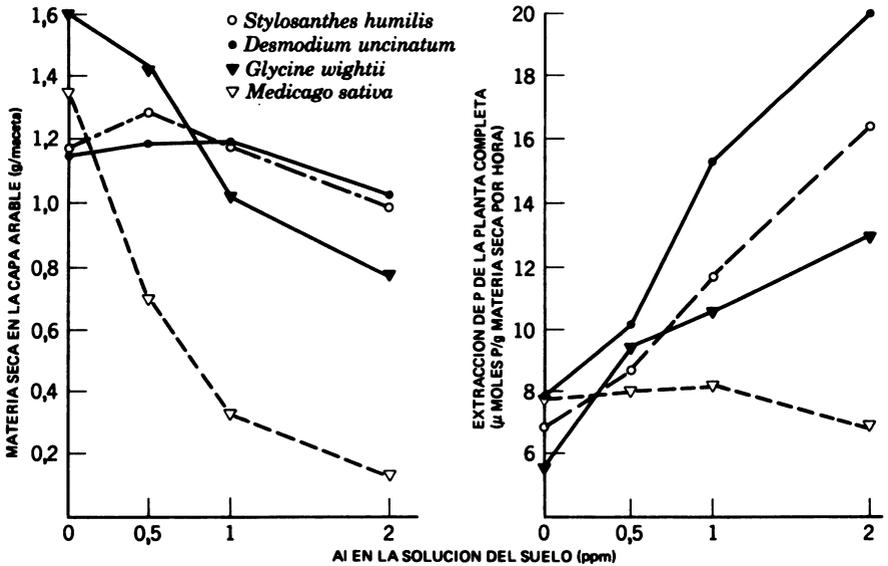


Fig. 8.4. Efectos del aluminio en el crecimiento y en la absorción de fósforo de cuatro leguminosas de pastura. (Fuente: adaptado de Andrew y Vanden Berg, 1973).

wightii y alfalfa, pero no tuvieron mucho efecto en los dos géneros tolerantes, *Stylosanthes* y *Desmodium*. Aumentando la concentración de aluminio aumentaba la absorción de fósforo de las tres especies, pero no la de la alfalfa. Sin embargo, el fósforo no se trasladaba a la parte aérea de las plantas con igual velocidad. La velocidad de traslado en *Stylosanthes* y *Desmodium* era más o menos el doble de la de *Glycine wightii* y alfalfa. Resultados semejantes se han obtenido con arroz, maíz y variedades de frijol (North Carolina State University, 1974).

El aluminio precipita el fósforo de las paredes celulares de la raíz y membranas citoplasmáticas en forma de fosfatos de aluminio (Rasmussen, 1968; McCormick y Borden, 1972). Consecuentemente, las especies o variedades que puedan trasladar el fósforo a la parte aérea de la planta más rápidamente pueden escapar a esta precipitación y tornarse más tolerante a niveles altos de aluminio.

Las diferencias varietales y de especies en tolerancia a baja disponibilidad de fósforo en el suelo tienen un gran significado práctico, y la aplicación de tal información puede reducir significativamente la fertilización fosfatada en muchos casos. Desafortunadamente, es poco lo que se sabe acerca de la naturaleza de tales diferencias en la mayoría de los cultivos tropicales. La investigación en este campo merece una alta prioridad.

MANEJO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

DOSIS

Las respuestas a fósforo son corrientes en Oxisoles, Ultisoles, Andepts y Vertisoles. Análisis de suelo bien calibrados identifican fácilmente los suelos que tienen una alta probabilidad de respuesta a fósforo y los que no la tienen (véase el Capítulo 9). En América tropical las dosis recomendadas para maíz, soya, forrajes y caña de azúcar son de 100 a 150 kg de P_2O_5 /ha, generalmente aplicado en bandas. Las dosis recomendadas para papas y trigo son de 120 a 240 kg de P_2O_5 /ha, pero para arroz de secano sólo se recomienda de 0 a 60 kg de P_2O_5 /ha (Kamprath, 1973). En Africa tropical, donde la investigación se ha llevado a cabo con dosis de aplicación menores y niveles de rendimiento más bajos, las pruebas simples de FAO muestran buenas respuestas de los cultivos a dosis de 20 kg de P_2O_5 /ha (Richardson, 1968).

El manejo del fósforo en suelos con una capacidad moderada de fijación es por lo general una operación simple. Dosis pequeñas de superfosfato pueden aplicarse al voleo e incorporarse en la capa arable o aplicarse en bandas una vez al año.

En suelos con una alta capacidad de fijación de fósforo, como ciertos Ultisoles y Oxisoles arcillosos, y la mayoría de los Andepts, el manejo económico y eficiente del fósforo incluye varios procedimientos. En muchos casos no se nota respuesta a aplicaciones de fósforo con dosis de bajas a moderadas. Por ejemplo, en suelos de cenizas volcánicas de Japón se creía que el arroz inundado no respondía a aplicaciones de fósforo, hasta que un investigador agregó cerca de 1000 kg de P_2O_5 /ha en un experimento y obtuvo un dramático aumento de rendimiento.

APLICACIONES MASIVAS INICIALES VERSUS APLICACIONES MODERADAS EN BANDAS

En suelos con una alta capacidad de fijación de fósforo actualmente se siguen dos estrategias en la fertilización fosfatada. Una consiste en aplicar dosis moderadas colocándolas en bandas a cada cultivo. La otra consiste en aplicar el fósforo en dosis suficientemente grandes para saturar la capacidad de fijación del suelo de una sola vez y contar con una liberación adecuada por muchos años. El alto costo inicial puede considerarse como una inversión que puede amortizarse en varios años con los efectos residuales.

Un ejemplo de este procedimiento es el trabajo de Younge y Plucknett (1966) en Hawaii. Ellos aplicaron dosis de 330 a 1320 kg/ha de P a un Gibbsihumox y midieron el efecto residual por varios años en una pastura de gramínea y leguminosa. Tal como se aprecia

en la Fig. 8.5, después de 12 años estas aplicaciones masivas continuaban manteniendo el rendimiento del forraje. Durante los tres primeros años sólo hubo respuesta a la dosis más baja, 300 kg/ha de P. Con el tiempo se obtuvieron rendimientos máximos con dosis progresivamente más altas, pero durante los primeros nueve años los rendimientos a niveles de P más altos no variaron.

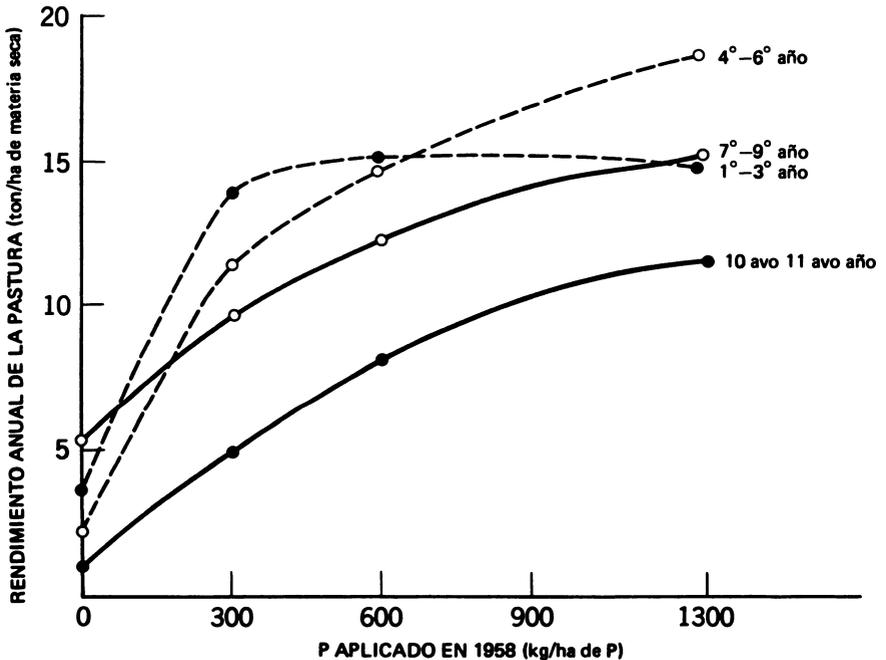


Fig. 8.5. Efectos residuales de aplicaciones masivas de fósforo a un Oxisol hawaiano en los rendimientos de una pastura de zacate y leguminosa. (Fuente: adaptado de Fox et al, 1971).

Las ventajas de bloquear la capacidad de fijación de fósforo de tales suelos es que el problema se elimina de inmediato. Además, estas aplicaciones masivas pueden aumentar el pH en suelos con sistemas de óxidos. El contenido de materia orgánica también aumenta con buenos rendimientos a través de los años. Las desventajas son: inversión inicial muy alta, la necesidad de un financiamiento adecuado, de un patrón estable de tenencia de la tierra, y buen precio de los cultivos de mucho valor. Las consideraciones económicas probablemente limiten este procedimiento a zonas bien desarrolladas, tales como Hawaii. Los marcados aumentos en los precios de los fertilizantes fosfatados desde 1972 han hecho que muchos agricultores quisieran haber adoptado este procedimiento antes de esa fecha. En cierta

forma las aplicaciones masivas de fósforo constituyen una protección contra la inflación.

En otro suelo con una alta capacidad fijadora, un Ultisol de Carolina del Norte, Kamprath (1967) estudió el efecto residual de aplicaciones masivas iniciales versus dosis anuales pequeñas de mantenimiento aplicadas en bandas. En el Cuadro 8.9 se presenta el rendimiento de maíz durante el sétimo año. Los resultados indican que aplicaciones anuales pequeñas en bandas son superiores a la inversión inicial alta. Una dosis inicial de 337 kg/ha de P dio resultados similares a los que se obtuvieron con una dosis anual de 22 kg/ha de P durante siete años (un total de 154 kg/ha de P durante este período). Sin embargo, este Ultisol fijaba menos fósforo que el Oxisol hawaiano de la Fig 8.5. La Serie Georgeville de Carolina del Norte necesitaba 360 ppm de P para suministrar 0,2 ppm a la solución del suelo, mientras la serie Kapaa de Hawaii necesitaba 1000 ppm para proporcionar el mismo nivel de P a la solución del suelo. Por lo tanto, la elección de la estrategia depende tanto de las propiedades del suelo, como de las consideraciones económicas. Desafortunadamente hay poca información adicional de áreas tropicales que midan el efecto residual de aplicaciones de fósforo durante un período de tiempo suficientemente largo para complementar el estudio de Hawaii.

La aplicación del fósforo en bandas es una práctica simple que satisface la capacidad de fijación de fósforo de un pequeño volumen

CUADRO No. 8.9. Efectos de una aplicación masiva inicial vs. pequeñas dosis anuales de fósforo en los rendimientos de maíz (ton/ha) en un Ultisol de Carolina del Norte, con alta capacidad de fijación de fósforo, siete años después de la aplicación inicial*. (Fuente: Kamprath, 1967).

Aplicación inicial de fósforo kg/ha	Rendimiento (ton/ha)	
	Mantenimiento anual Aplicaciones (en bandas)	
	Ninguna	Fósforo 22 kg/ha
0	1,7	5,7
168	3,9	6,2
337	5,5	6,8
673	7,0	7,1

(*) D.M.S._{0,05} = 1,3 ton/ha.

de suelo y de esa manera hace que gran parte del fertilizante aplicado sea directamente aprovechable por la planta. La efectividad de las bandas depende de otros factores de suelo. Por ejemplo, la aplicación en bandas se comparó con la aplicación al voleo en un Oxisol de Brasilia con una capacidad de fijación de fósforo muy alta (alrededor de 700 ppm de fósforo añadido para suministrar 0,2 ppm de P en la solución). Los resultados (Fig. 8.6) muestran que en la primera cosecha, las aplicaciones al voleo e incorporadas, fueron superiores a las aplicaciones en bandas. Yost y sus colaboradores encontraron que con las aplicaciones en bandas el desarrollo de las raíces de maíz se concentraba alrededor de la banda y que cuando se presentó una sequía temporal, estas plantas sufrieron más que las de las parcelas al voleo, las cuales presentaban un desarrollo radical más extenso. No obstante, con el tiempo aumentó la efectividad de los tratamientos

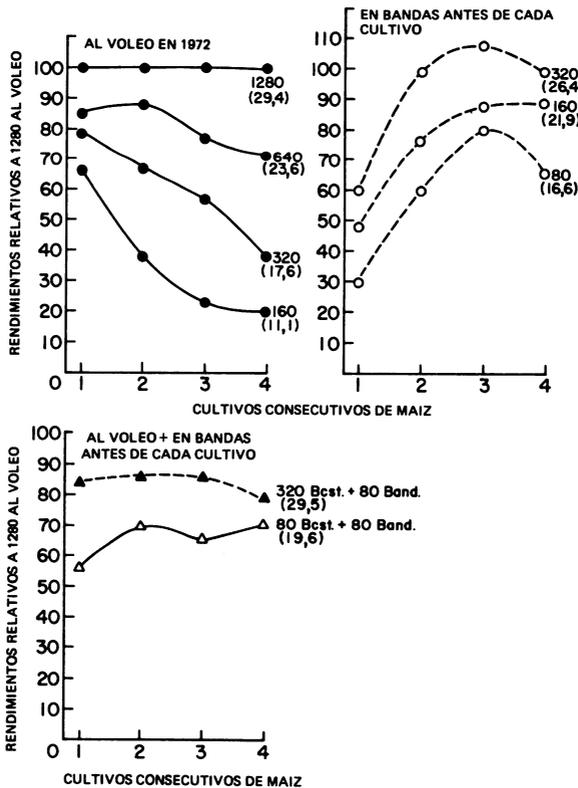


Fig. 8.6. Efectos iniciales y residuales de aplicaciones de superfosfato en bandas y al voleo en el rendimiento de maíz en un Oxisol de Brasilia, Brasil. Los números entre paréntesis son los rendimientos acumulativos del maíz (ton/ha). (Fuente: R.S. Yost, North Carolina State University, 1974).

en bandas, mientras que en las parcelas al voleo disminuyó. La mejor combinación se obtuvo por voleo e incorporación de una dosis de 320 kg de P_2O_5 /ha antes de la primera siembra, seguida por una aplicación en bandas de 80 kg de P_2O_5 /ha antes de la siembra de los cultivos siguientes.

Con cultivos continuos las aplicaciones en bandas se mezclan con un volumen mayor de suelo después de cada operación de labranza. Con el tiempo la aplicación anual en bandas comienza a aproximarse a la aplicación al voleo en términos de distribución de fósforo en la capa arable. Para suelos con alta capacidad de fijación y baja capacidad de retención de humedad, lo mejor es una buena aplicación al voleo inicialmente, seguida de pequeñas aplicaciones en bandas a cada siembra siguiente.

FUENTES DE FOSFORO

Investigaciones de la región templada indican que los fertilizantes fosfatados deben tener por lo menos de 40 a 50% de fósforo soluble en agua para asegurar un suministro adecuado en las etapas iniciales del crecimiento (Englestad, 1972). El superfosfato simple, el superfosfato triple y los fosfatos monoamoniacos y diamónicos satisfacen este requisito y pueden usarse efectivamente en suelos con capacidad fijadora de baja a moderada.

En suelos ácidos, que fijan grandes cantidades de fósforo, la aplicación de fuentes con menos fósforo soluble, como rocas fosfatadas pueden resultar más efectivas y económicas que las fuentes muy solubles. Las rocas fosfatadas son más reactivas en suelos ácidos y generalmente cuestan de una tercera a una quinta parte de lo que cuesta el superfosfato por unidad de P_2O_5 .

La literatura tropical está llena de ejemplos que indican que es deseable usar fuentes de roca fosfatada de alta calidad en vez de superfosfatos en suelos ácidos (Motsara y Datta, 1971; Awan et al., 1971; Englestad, 1972) y señalan el comportamiento deficiente en suelos ácidos de rocas fosfatadas de baja solubilidad en citrato (Alvarez et al, 1965, Viegas et al, 1970, Miranda et al, 1970). Estudios de Lehr y McClellan (1972) del Tennessee Valley Authority, Estados Unidos, indican que cuando las rocas fosfatadas se clasifican de acuerdo con la solubilidad absoluta en citrato, se puede predecir su efectividad agronómica. Si a la solubilidad de los mejores depósitos de rocas fosfatadas (Carolina del Norte y Tunisia) se le da un índice de 100, las rocas fosfatadas con un índice de solubilidad del 70% o más, se podrían recomendar para aplicación directa sin investigación agronómica. Estas están concentradas mayormente en Africa del Norte, Unión Soviética y el sureste de Estados Unidos.

La Fig. 8.7 ilustra los efectos de roca fosfatada de variable solubilidad en citrato en campos de arroz anegado en suelos ácidos sulfata-

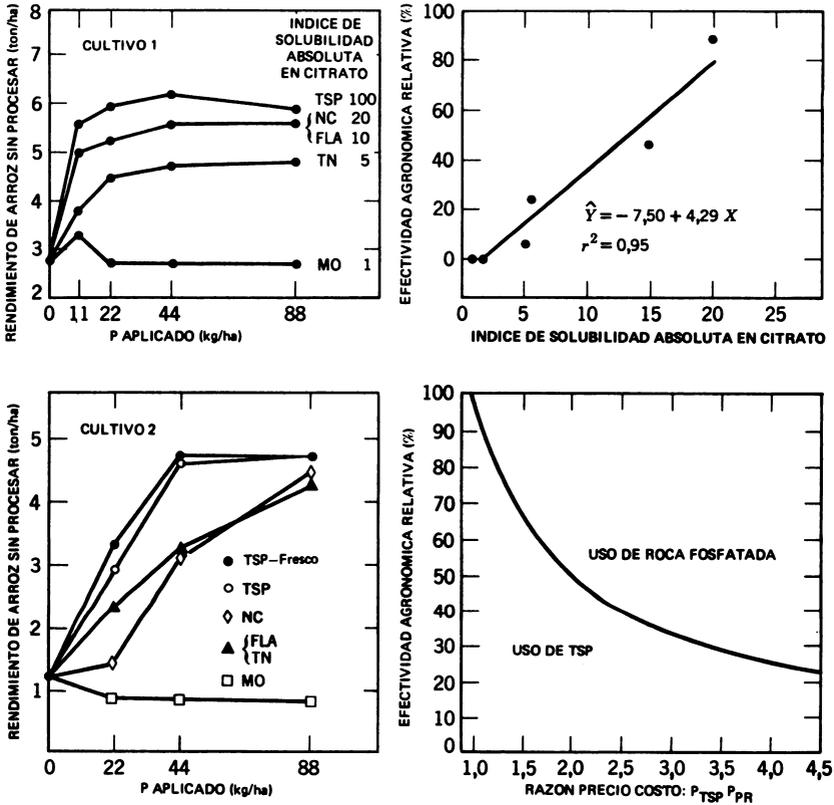


Fig. 8.7. Eficiencia de fuentes de roca fosfatada de diferente solubilidad en citrato en las respuestas de rendimiento de dos cultivos de arroz inundado en un suelo ácido sulfatado de Klong Luang, Tailandia, y la relación entre la solubilidad absoluta del citrato, efectividad agronómica relativa y precio. (Fuente: Englestad et al, 1974). TSP = superfosfato triple. Roca fosfatada: NC = North Carolina. Fla = Florida. TN = Tennessee. MO = Missouri.

dos de Tailandia. Los efectos iniciales y residuales de las rocas fosfatadas resultaron muy dependientes de su solubilidad absoluta en citrato. Las respuestas de rendimiento de las rocas de Carolina del Norte y de Florida se aproximaron a las del superfosfato triple. Los resultados se interpretaron luego en términos de la efectividad agronómica relativa, que es la razón de la respuesta de rendimiento con roca fosfatada dividida entre la respuesta con superfosfato triple. La decisión económica del uso de roca fosfatada o superfosfato puede hacerse usando el diagrama de la parte derecha inferior de la Fig. 8.7, en el cual se grafica la efectividad agronómica relativa contra las razones de costo:precios de las fuentes fosfatadas.

En los trópicos los depósitos de alta solubilidad en citrato están limitados a yacimientos pequeños en Perú e India. La mayoría de los depósitos en áreas tropicales, incluyendo algunas importantes en Brasil, Colombia, Venezuela, Togo e India, tienen solubilidad relativa menor del 40%. La mayoría no son adecuadas para aplicación directa, pero su reactividad puede aumentarse con una pulverización fina o por medio de alteración térmica y fusión con arena silícea o carbonatos de sodio o magnesio. Estos silicofosfatos llamados "Rhenania" o "termofosfatos" parecen ser promisorios para suelos ácidos que fijan grandes cantidades de fósforo, debido al efecto de bloqueo del silicio en los sitios de fijación del fósforo (Olson y Englestad, 1972, Fassbender y Molina, 1969).

En el Cuadro 8.10 se ilustra el potencial de estas formas de fósforo más baratas en suelos ácidos con una alta capacidad de fijación en donde se clasifican las diversas fuentes de fósforo por su efectividad relativa en un experimento de campo por 5 años en el sur de Brasil. La roca fosfatada "Olinda", de baja solubilidad en citrato, fue inferior al superfosfato simple pero cuando esta roca o una similar fue tratada térmicamente con silicatos y carbonatos para producir termofosfato, su efectividad fue superior a la del superfosfato simple. En vista del costo considerablemente más bajo de las rocas fosfatadas y algunos termofosfatos, ambos parecen alternativas deseables para suelos con alta capacidad de fijación de fósforo.

CUADRO No. 8.10. Comportamiento de diferentes fuentes de fertilizantes en trigo cultivado en Oxisoles del sur de Brasil. (Fuente: W. J. Goedert, comunicación personal).

Fuentes de fósforo	Rendimiento relativo (promedio de 5 años)
Sin fósforo	100
Roca fosfatada Olinda (baja solubilidad del citrato)	179
Superfosfato simple	206
Termofosfato	218

EFFECTOS DE APLICACIONES DE CAL Y SILICATOS PARA DISMINUIR LA FIJACION DEL FOSFORO

Una estrategia adicional es a veces factible para el manejo de suelos con alta capacidad de fijación de fósforo: reducir su fijación por medio de enmiendas que bloqueen algunos de los sitios de fijación del

suelo. Esto puede lograrse en algunos suelos por medio del encalado y por la edición de silicatos.

El encalado hasta un pH de 5,5 generalmente aumenta la disponibilidad de fósforo. El encalado precipita el aluminio intercambiable y parte de los iones hidroxialuminio como hidróxidos de aluminio, los cuales fijan considerablemente menos fósforo. La parte superior de la Fig. 8.8 presenta la disminución en la fijación de fósforo de un Oxisol de Panamá que fue encalado a pH 5,5. En este caso menos de la mitad de la dosis de aplicación fue necesaria en el suelo encalado para producir el rendimiento máximo, en comparación con el suelo sin encalar tal como lo ilustra la parte inferior de la Fig. 8.8. Fox et al,

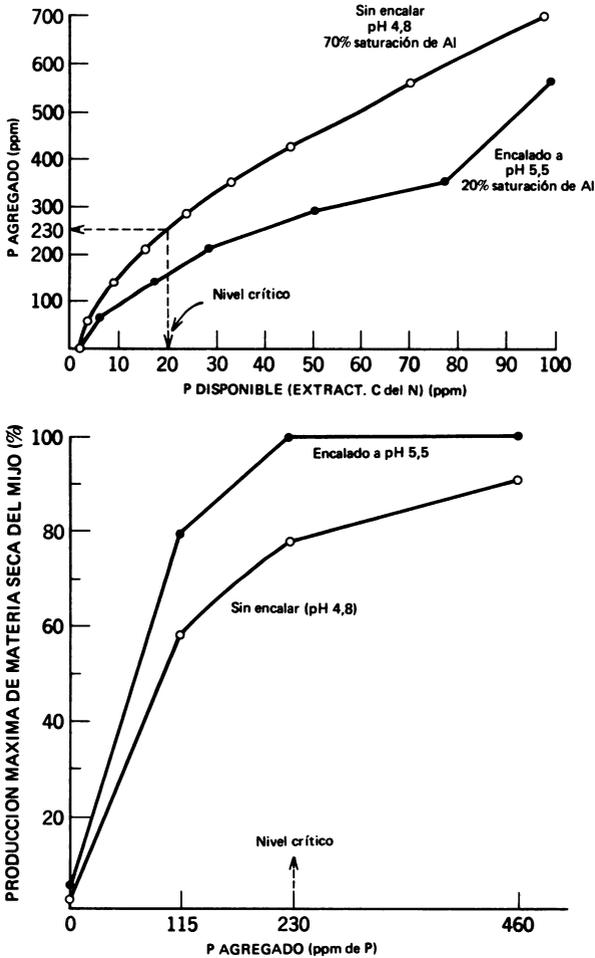


Fig. 8.8. Efectos del encalamiento en la fijación y respuesta al fósforo en un Oxisol de Panamá. (Fuente: adaptado de Mendez-Lay, 1973).

(1964), han informado de grandes aumentos en la asimilación de fósforo derivado de fertilizantes por varias especies de pasturas en Hawaii, cuando varios suelos se encalaron hasta pH entre 5 y 6. El efecto fue más pronunciado en suelos con alta capacidad de fijación de fósforo y altos niveles de aluminio intercambiable. Fox y colaboradores también encontraron que encalando más allá de niveles de pH 6 disminuye la absorción de fósforo, tal vez por la formación de fosfatos cálcicos poco solubles.

Esta evidencia indica que el encalado de suelos ácidos con pH entre 5,5 y 6,0 disminuye la fijación de fósforo pero no la elimina. El encalado no afecta la fijación por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, sólo la de aluminio intercambiable. Además muchos suelos que fijan grandes cantidades de fósforo tienen niveles muy bajos de aluminio intercambiable; el caso más común es el de los Andepts. El encalado de tales suelos probablemente tendrá como resultado los efectos nocivos del sobreencalamiento.

Se sabe que las aplicaciones de silicio, en formas de silicatos de calcio, silicato de sodio o escorias Thomas, disminuyen la fijación del fósforo e incrementan la absorción de este elemento por los cultivos. Por ejemplo, Suehisa et al (1963), informó que el rendimiento de pasto Sudán aumentó de 2 a 7,6 ton/ha, y la asimilación de fósforo subió de 4 a 15 kg/ha de P cuando se aplicó una tonelada de Si/ha a un Ultisol sin añadir fósforo. Silva (1971) revisó la mayor parte de los trabajos de Hawaii y llegó a la conclusión que los aniones de silicatos pueden reemplazar los aniones de fosfatos en los sitios de fijación, y que las aplicaciones de silicatos aumentan la solubilidad del fósforo fijado. Roy et al (1971), encontraron que las aplicaciones de 500 ppm de Si como metasilicato de calcio disminuyó dramáticamente el fósforo fijado por ciertos suelos oxídicos (Cuadro 8.11). La disminución fue mayor en los suelos de menor capacidad de fijación de fósforo, el Tropohumult y el Eutrorthox.

CUADRO No. 8.11. Efectos de aplicaciones de silicato de calcio en la fijación de fósforo en suelos hawaianos (expresado como ppm de fósforo fijado para obtener 0,2 ppm de P en la solución del suelo). (Fuente: Roy et al, 1971).

Suelo	Si agregado (ppm)		Disminución (%)
	0	500	
Tropohumult	187	100	47
Eutrorthox	425	250	41
Gibbsihumox	725	550	24
Hydrandept	1150	1050	9

En el Cuadro 8.12 se presenta el efecto combinado de estas dos enmiendas en la disminución de la fijación de fósforo en un Humox con un pH original de 5,5, y necesidad de 900 ppm de P para alcanzar el nivel adecuado de 0,2 ppm en la solución del suelo. Encalando a pH 6,2 disminuyó la necesidad de fósforo a 800 ppm de P, mientras que aplicando silicato como escorias Thomas disminuyó a 580 ppm de P sin encalar.

CUADRO No. 8.12. Efecto combinado de aplicaciones de cal y silicato de calcio en la fijación de fósforo en un gibbsihumox de Hawaii (expresado como ppm de P fijado para dar 0,2 ppm de P en la solución del suelo). (Fuente: Silva, 1971).

Silicato aplicado (ton/ha)	Sin cal (pH 5,5)	Encalado a pH 6,2
0	910	800
1,6	580	675

En este suelo el encalamiento es de valor dudoso debido al pH inicial alto.

El manejo de fósforo en suelos tropicales ácidos con muy alta capacidad de fijación debe incluir las siguientes posibilidades: 1) una combinación de aplicaciones al voleo y en bandas; 2) uso de roca fosfatada soluble en citrato o fosfatos alterados térmicamente con baja solubilidad inicial en citrato; 3) disminución de la capacidad de fijación por medio del encalado o de la aplicación de silicatos; y 4) uso de especies y variedades tolerantes a niveles bajos de fósforo disponible en el suelo. Consideraciones económicas, tales como el costo relativo de fuertes aplicaciones iniciales al voleo y en bandas, y el costo relativo de las diferentes fuentes de fertilizante fosfatado, definirán en gran parte la mejor alternativa.

EL SILICIO COMO NUTRIMENTO

Además del efecto benéfico de las aplicaciones de silicio como medio de disminuir la fijación del fósforo y aumentar la disponibilidad de este elemento, en los trópicos se han obtenido respuestas nutricionales directas al silicio. Aunque el silicio no se considera un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, se han observado deficiencias y respuestas al silicio en suelos tropicales altamente lixiviados, bajo cultivo intenso de ciertas especies de pasto, y particularmente con caña de azúcar y arroz.

Suelos con un contenido bajo de silicio soluble son los más probables de dar respuesta a las aplicaciones de este elemento. Fox et al, (1967), sugirieron que el nivel crítico es 0,9 ppm de Si en extractos de agua. Se han obtenido respuestas en Oxisoles y Ultisoles derivados de basalto en Hawaii y Mauritius, y en arroz inundado, en Japón, Corea y Sri Lanka.

En el caso de arroz las aplicaciones de silicio incrementaron el rendimiento debido a un hábito más erecto de la hoja, mayor tolerancia a insectos y enfermedades, menor absorción de hierro y manganeso cuando están presentes en concentraciones tóxicas en el suelo, y quizás un aumento en el poder de oxidación de las raíces del arroz (Okuda y Takahashi, 1965). Los efectos beneficiosos del silicio en la absorción de fósforo también se han observado en suelos con arroz inundado.

Revisiones de Silva (1971) y Plucknett (1972) resumen la gran investigación llevada a cabo en Hawaii en fertilización con sílice en caña de azúcar. Son comunes las respuestas dramáticas a las aplicaciones de silicato en ausencia de problemas de fijación de fósforo tal como la que se ilustra en el Cuadro 8.13. Las respuestas de rendimiento a aplicaciones de sílice dan por resultado mayores contenidos de materia seca y de azúcar, tallos de mayor tamaño, mayor alargamiento y número de hojas verdes funcionales, y la desaparición del síntoma de moteamiento foliar. El problema de moteamiento parece estar asociado con un alto contenido de manganeso pero no está totalmente comprendido. Las aplicaciones de silicato de calcio tienen un efecto residual significativo, pero pueden ser necesarias aplicaciones pequeñas de mantenimiento cada año o cada dos años (Wong, 1971; Plucknett, 1972).

CUADRO No. 8.13. Respuesta directa de caña de azúcar a fertilización con metasilicato de calcio en un Oxisol de Hawaii. (Fuente: Plucknett, 1972).

CaSiO ₃ Aplicado (ton/ha)	Producción de azúcar (ton/ha de azúcar)	
	Primera cosecha	Retoños
0	34	27
4,5	40	28
9,0	42	29
13,5	43	31
18,0	45	38

DEFICIENCIA DE AZUFRE

De todas partes de los trópicos se ha informado de deficiencias de respuestas al azufre. Uno de los primeros informes fue del Cerrado, Brasil, donde McClung et al, (1959), observaron respuestas no solamente en sabanas, sino también en suelos de bosque virgen recién talados. En América Central las deficiencias de azufre también están muy extendidas, particularmente en Andepts, en los que su origen volcánico hacen suponer que dichos suelos son altos en este elemento (Müller, 1965; Fitts, 1970). Según una revisión de Bolle-Jones (1964) en áreas del subShara de Africa, el azufre es limitante en Alfisoles y Oxisoles con precipitación pluvial mayor de 600 mm, y en suelos arenosos de Africa Central. Las deficiencias de azufre también se presentan en Asia, particularmente en el Punjab de India y en Malasia (Olson y Englestad, 1972; Fox et al, 1971).

Por lo general los suelos deficientes en azufre tienen una o más de las siguientes propiedades: son altos en alófana u óxidos, también son bajos en materia orgánica, y a menudo arenosos. Los suelos expuestos a quemas anuales son frecuentemente deficientes en azufre ya que alrededor del 75% del azufre se volatiliza por el fuego. Los suelos deficientes en azufre se encuentran en áreas impolutas del interior donde la atmósfera contiene poco azufre.

CONTENIDO Y FORMAS DE AZUFRE

AZUFRE TOTAL

En la zona templada el azufre total del suelo está positivamente correlacionada con el contenido de materia orgánica e inversamente correlacionada con el grado de meteorización. Olson y Englestad (1972) proporcionaron los siguientes valores promedio de azufre total en las capas arables de la región templada: 500 ppm en Mollisoles; 400 ppm en Alfisoles; y 200 ppm en Ultisoles. Con base en este razonamiento ellos supusieron que los suelos tropicales tendrían un promedio de 100 ppm. Un resumen de suelos del este de Australia por Williams y Steinbergs (1958) muestra un contenido promedio de 167 ppm de S, del cual sólo 7 ppm es azufre inorgánico. Sin embargo, suelos tropicales altos en materia orgánica y alófana tienen cantidades grandes de azufre total. Un Eutrandept de Hawaii tenía 1280 ppm de S en la capa arable (Fox et al, 1971).

AZUFRE ORGANICO

La mayor parte del contenido de azufre en suelos tropicales sin fertilizar está en forma orgánica. La razón C:N:S de la materia orgánica es del orden de 126:10:1 en suelos de Nigeria y el este de

Australia, según reconocimientos de Oke (1971) y de Williams y Steinbergs (1958).

El azufre orgánico se mineraliza en forma similar al nitrógeno orgánico. Hay gran semejanza entre los ciclos del nitrógeno y del azufre. Las tasas de mineralización de azufre varían del 1 al 10% por año. Barrow (1961) encontró que la inmovilización de azufre ocurre a razones de C:S mayores de 200, y que los materiales que contienen menos de 0,15% de azufre son inmovilizados. Los Andepts y otros suelos altos en alófana, son también altos en azufre orgánico, pero las plantas que crecen en estos suelos son generalmente muy deficientes en azufre debido a que la tasa de mineralización de este elemento es baja cuando la materia orgánica está íntimamente asociada con alófana. Barrow también ha observado incrementos repentinos de mineralización de azufre al mojarse suelos previamente secos.

Se supone que los procesos involucrados son similares a los que gobiernan los incrementos repentinos de nitrógeno. Sin embargo, el destino del azufre mineralizado puede ser distinto del de los nitratos debido a la capacidad de adsorción de azufre de muchos suelos.

Como en el caso del nitrógeno, la labranza reduce el contenido de azufre orgánico debido al aumento en la velocidad de descomposición de la materia orgánica. McClung et al, (1959), observaron un contenido de azufre orgánico entre 79 a 540 kg/ha de S en suelos vírgenes del centro de Brasil (Cuadro 8.14). Después de 20 a 30 años de cultivos, el azufre orgánico bajó entre 44 a 130 kg/ha de S.

CUADRO No. 8.14. Efecto de siembras durante 20 a 30 años en el contenido y respuesta de azufre en dos suelos del Cerrado de Brasil, en condiciones de macetas. (Fuente: McClung et al, 1959).

Suelo	Condición	Capa arable (ppm)		Subsuelo (ppm)	
		S orgánico	SO ₄ -S inorgánico	S orgánico	SO ₄ -S inorgánico
Ultisol (Baurú)	Virgen	36	4,0	12	6,4
	Cultivado	24	2,5	10	12,0
Oxisol (Ribeirão Preto)	Virgen	247	3,7	11	3,3
	Cultivado	60	7,2	10	12,3

AZUFRE INORGANICO

En suelos aeróbicos los sulfatos son la principal forma inorgánica del azufre. En suelos tropicales susceptibles a lixiviación, los iones de SO₄²⁻ se encuentran en bajas concentraciones asociados con Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺. Además de la mineralización del azufre orgánico, los

iones de SO_4^{2-} pueden agregarse al suelo por medio de la lluvia, fertilizantes, pesticidas, el agua de riego, gases de erupciones volcánicas y contaminación ambiental. La lluvia generalmente contiene menos de 1 ppm de azufre; esto es equivalente a 10 kg/ha de S por año aproximadamente, cantidad que puede ser suficiente para prevenir deficiencias de azufre. En áreas con seria contaminación ambiental y en las áreas cercanas al mar la lluvia contribuye con mucho más azufre. Las contribuciones de los fertilizantes y otros productos químicos para la agricultura pueden ser considerables, principalmente cuando se usa sulfato de amonio o superfosfato simple. Los gases sulfurosos de erupciones volcánicas pueden ser adsorbidos directamente por las plantas o disueltos en la solución del suelo.

Los suelos altos en óxidos de hierro y de aluminio o en alófana, tienen una capacidad considerable para absorber iones sulfato a través de los sitios de intercambio aniónico. Este proceso da por resultado una acumulación de SO_4^{2-} inorgánico en muchos Ultisoles, Oxisoles y Andepts con mineralogía oxídica. Los contenidos de SO_4^{2-} soluble en agua y de SO_4^{2-} extraíble con fosfato por lo general son mayores en tales suelos que en los que tienen sistemas puros de silicato laminares como indica el Cuadro 8.15.

CUADRO No. 8.15. Contenido de azufre inorgánico extraído de capas arables de Hawaii (ppm de S). (Fuente: Fox et al, 1965).

Gran grupo de suelo	Extraído por	
	H_2O -	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$ -
Rojo desértico (Aridisol)	8	16
Arcilla magnésica oscura (Vertisol)	18	11
Latosol húmico bajo (Ustox)	20	55
Latosol húmico (Ultisol)	23	33
Latosol húmico ferruginoso (Humult)	22	53
Latosol hidrol húmico (Hydrandept)	11	134

Cuando suelos con mineralogía de óxidos o de silicatos laminares con revestimiento oxídico se fertilizan abundantemente y ocurre lixiviación, cantidades relativamente grandes de SO_4^{2-} se acumulan en el subsuelo debido a su capacidad para adsorber azufre. En los subsuelos brasileños del Cuadro 8.14 el sulfato inorgánico se convirtió en la fracción dominante. Lo mismo ocurrió en un Eutrorthox de Hawaii fertilizado abundantemente, en el que grandes cantidades de SO_4^{2-} se acumularon en el subsuelo. Relaciones similares se han observado en Ultisoles de Carolina del Norte por Kamprath et al,

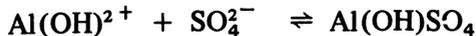
(1957). Bajo tales condiciones ciertos cultivos pueden presentar deficiencias de azufre en etapas iniciales del crecimiento, cuando el sistema radicular no ha penetrado aún en el subsuelo. Estas deficiencias desaparecen gradualmente conforme las raíces entran en contacto con el subsuelo rico en SO_4^{2-} .

ADSORCION* Y LIBERACION DE AZUFRE

Se reconocen dos mecanismos responsables de la adsorción del azufre en el suelo. Uno es el intercambio de iones de SO_4^{2-} por iones de OH^- en superficies de óxidos de hierro y aluminio. Esta reacción también ocurre en sitios de intercambio aniónico a lo largo de las esquinas y filos de partículas de la caolinita y radicales orgánicos con carga positiva. En subsuelos esto puede dar por resultado aumento de pH de 0,3 a 0,9 unidades.



El segundo mecanismo es la formación de complejos con hidroxialuminio en la forma siguiente:



Las propiedades de adsorción y liberación de azufre pueden caracterizarse por isotermas de adsorción en forma muy similar a las usadas para el fósforo. La Fig. 8.9 presenta ejemplos de estas relaciones en algunos suelos tropicales. El Molisol montmorilonítico del Valle del Cauca de Colombia no presenta adsorción de azufre, caso típico de otros suelos con mineralogía similar de Hawaii y Australia según Fox et al, (1971). Algunos Oxisoles muestran una fuerte capacidad de adsorber azufre, especialmente en el subsuelo.

Además de la mineralogía, hay otros factores que afectan la intensidad de adsorción de azufre. En sistemas de óxidos la adsorción aumenta conforme baja el pH, ya que con valores altos de pH los iones de OH^- tienden a reemplazar los iones de SO_4^{2-} . La adsorción de azufre disminuye con la fijación de fósforo ya que el ion H_2PO_4^- reemplaza iones de SO_4^{2-} . Esta reacción tiene lugar en la capa arable

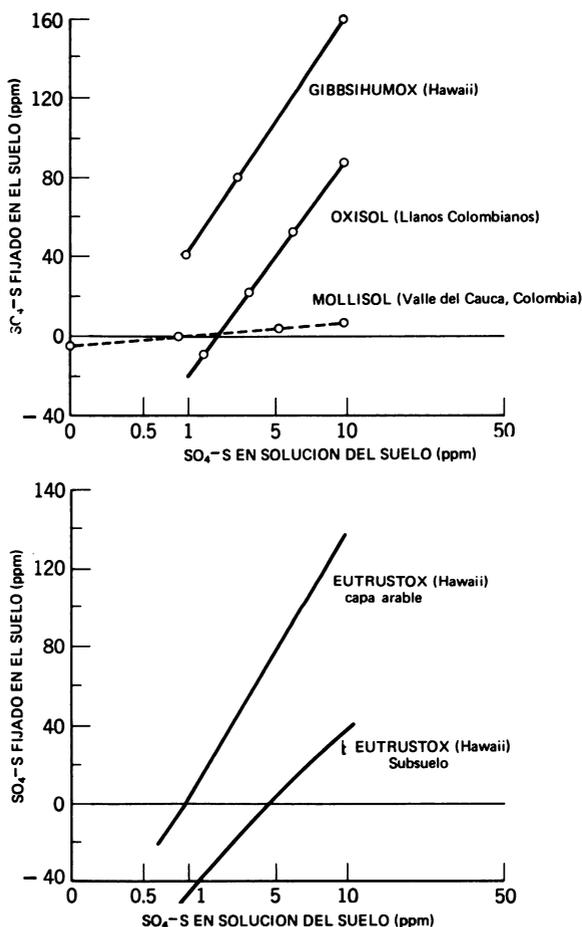


Fig. 8.9. Ejemplos de isotermas de fijación de azufre. (Fuente: Fox et al, 1971; y Fox, 1974).

y puede ocasionar movimiento de sulfato al interior del subsuelo, donde el azufre puede ser adsorbido.

El azufre adsorbido es retenido con mucho menos fuerza por las partículas de arcilla que el fósforo fijado. Por consiguiente la disponibilidad de azufre adsorbido es generalmente mayor que la del fósforo fijado. Los iones SO_4^{2-} tienen que ser liberados en la solución del suelo antes de que puedan ser utilizados por las plantas. En Hawaii se considera que de 8 a 10 ppm de azufre extraíble con fosfato es el nivel crítico (Hasan et al, 1970). No se han establecido niveles críticos para azufre soluble en agua.

NECESIDADES DE AZUFRE DE CULTIVOS TROPICALES

Los valores de asimilación de azufre por cultivos tropicales son similares a los del fósforo. Las concentraciones de azufre en los tejidos de las plantas son también similares a las concentraciones de fósforo, oscilando entre 0,1 a 0,3% de S. Una buena indicación de deficiencia de azufre es una razón N:S en los tejidos de menos de 17:1, por cuanto la razón de proteína de nitrógeno a proteína de azufre es 15:1. Entre especies, las leguminosas de grano y de pastoreo así como el algodón, son muy sensitivas a la deficiencia de azufre.

Una deficiencia de azufre en una etapa temprana del crecimiento puede desaparecer posteriormente cuando la raíz se pone en contacto con el subsuelo. En tales casos pueden ser necesarias pequeñas aplicaciones de fertilizante al momento de la siembra.

FERTILIZACION CON AZUFRE

En general, dosis de 10 a 40 kg/ha de S son suficientes para eliminar deficiencias de azufre. La Fig. 8.10 muestra que esas dosis triplicaron el rendimiento de pasturas en presencia de fósforo. Jones y

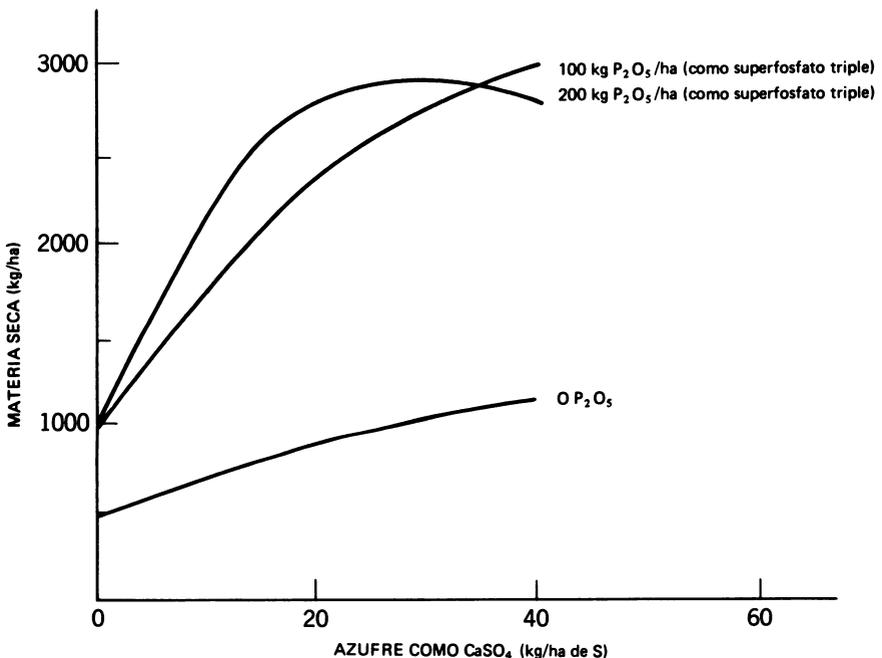


Fig. 8.10. Efectos de fertilización con azufre y fósforo en el crecimiento de *Paspalum notatum* en un Ultisol de Brasilia. (Fuente: McClung y Quinn, 1959).

Quagliato (1970) mostraron que 10 a 20 kg/ha de S son suficientes para la mayoría de las leguminosas de pastoreo, incluyendo la alfalfa. En Brasil con una dosis anual de 30 kg/ha de S se aumentó el rendimiento del café en un 82% durante un período de 10 años (Cuadro 8.16). En esta área la fertilización con azufre es una práctica establecida.

La mayoría de los requerimientos de azufre son lo suficientemente pequeños para ser satisfechos por portadores de nitrógeno y fósforo que contienen azufre. Cuando se usa urea y superfosfato triple, se necesitan aplicaciones directas de azufre.

CUADRO No. 8.16. Efecto de fertilización con azufre en rendimientos anuales de café en un latosol rojo-amarillo (Oxisol) de Brasil. (Fuente: De Freitas et al, 1972).

Aplicación anual de azufre (kg/ha)	Rendimiento (promedio de 10 años) (kg/ha)
0	1320
16	2040
33	2341
66	2400
132	2172

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El contenido de fósforo total del suelo, así como sus formas predominantes en que se encuentra, reflejan la intensidad de meteorización del suelo. La mayoría de los suelos altos de bases de los órdenes Entisol, Vertisol, Inceptisol y Molisol tienen el fósforo enlazado a calcio como forma dominante. Los Andepts son muy altos en fósforo orgánico y fosfatos de calcio o aluminio según el pH. En Ultisoles y Oxisoles predominan los fosfatos de hierro y aluminio, a menudo en forma ocluida o en forma soluble en reductores.
2. En suelos altamente meteorizados y en Andepts, el fósforo orgánico constituye más del 50% del fósforo total en el suelo. En agricultura sin fertilizantes el mantenimiento del fósforo orgánico es una práctica importante de manejo.
3. Las isotermas de fijación de fósforo proporcionan un medio adecuado para cuantificar las relaciones de intensidad y capacidad. La cantidad de fertilizante fosfatado que hay que agregar

para lograr una concentración de 0,05 a 0,2 ppm de P en la solución del suelo proporciona una indicación de la magnitud de la fijación de fósforo. Oxisoles arcillosos, Ultisoles arcillosos y la mayoría de los Andepts tienen capacidad de fijación de fósforo alta, que va de 300 a 1000 ppm de P para alcanzar la concentración deseada en la solución del suelo. Otros suelos tropicales con mineralogía predominante de silicatos laminares, así como Ultisoles y Oxisoles de textura arenosa tienen capacidad de fijación de fósforo de moderada a débil.

4. Los cultivos tropicales difieren ampliamente en sus necesidades de fósforo. El arroz, el camote y muchas pasturas tropicales tienen una necesidad de fósforo considerablemente más baja que el maíz, la papa y ciertas especies de pasturas desarrolladas bajo condiciones de alta fertilidad. Existen diferencias varietales en tolerancia a bajo fósforo disponible. Deben seleccionarse variedades que requieren menos fósforo a fin de bajar las dosis de aplicación de fósforo.
5. La mayoría de los Oxisoles, Ultisoles, Andepts y Vertisoles de los trópicos son deficientes en fósforo. La deficiencia de fósforo puede predecirse por medio de análisis de suelo. La corrección del problema depende de la magnitud de la fijación en el suelo. Con suelos que fijan cantidades de moderadas a bajas, el manejo del fósforo es sencilla. Las dosis recomendadas pueden aplicarse al voleo en forma de superfosfatos o de fosfatos de amonio, e incorporadas en la capa arada. Pequeñas dosis de mantenimiento pueden aplicarse al voleo o en banda una vez al año.
6. El manejo del fósforo en suelos con una alta capacidad de fijación es más complicado. Cuando hay disponibilidad de capital se puede aplicar al voleo una cantidad fuerte para satisfacer la capacidad de fijación del suelo. El fósforo fijado se irá liberando gradualmente con el transcurso de los años. La inversión sumamente alta necesaria se amortizará en un período considerable de tiempo. Sin embargo este procedimiento probablemente no está al alcance de la mayoría de los agricultores de los trópicos. En tales casos se requiere otra estrategia, que consiste en el uso de fuentes de fosfato de bajo costo, tales como rocas fosfatadas de alta solubilidad en citrato, o rocas fosfatadas de baja solubilidad en citrato modificadas térmicamente. La combinación de una aplicación inicial al voleo de superfosfato, seguida por aplicaciones en bandas antes de cada siembra sucesiva, parece prometedora. La sola aplicación en bandas puede ser insuficiente en Oxisoles porque éstas limitan el desarrollo de las raíces fuera de las bandas. Un tercer componente de esta estrategia consiste en reducir la capacidad de fijación de fósforo del suelo por medio

de aplicaciones de cal y silicatos. El encalado a pH 5,5 precipita el aluminio intercambiable que fija el fósforo, mientras que el sílice parece que bloquea los sitios de fijación de fósforo, debido al tamaño similar de los aniones de fosfato y silicato. El cuarto componente de la estrategia es el uso de especies y variedades con mayor tolerancia a niveles bajos de fósforo disponible para que las dosis de aplicación puedan minimizarse.

7. Además del efecto del sílice en la disminución de la fijación de fósforo, se han observado respuestas directas al sílice como nutriente en algunos Oxisoles y Ultisoles de los trópicos que tienen menos de 1 ppm de Si en la solución del suelo. La fertilización con sílice en una práctica corriente en tales suelos cuando se usan para caña de azúcar en Hawaii y Maritius. La posibilidad de deficiencia de silicio por otros cultivos en esos suelos debe ser investigada.
8. Las deficiencias de azufre están extendidas por todos los trópicos. Se les encuentra en Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles altamente meteorizados, en suelos recientes desarrollados de ceniza volcánica, en suelos arenosos, en sabanas expuestas a quemadas anuales y en áreas del interior de los continentes con poca contaminación ambiental.
9. La fijación y liberación de azufre puede caracterizarse por medio de isoterms similares a las del fósforo. El azufre es retenido con menos fuerza por las partículas de óxido que el fósforo. En muchos Ultisoles y Oxisoles el sulfato tiende a acumularse en el subsuelo, donde la capacidad de fijación o el intercambio aniónico es mayor. Este mecanismo evita la lixiviación.
10. La necesidad de azufre por las plantas es similar a la de fósforo. Varias especies —algodón y ciertas leguminosas— son muy susceptibles a la deficiencia de azufre. Aplicaciones de dosis de 10 a 40 kg/ha de S generalmente son suficientes para corregir la deficiencia de azufre. Tales dosis pueden suministrarse mediante sulfato de amonio o superfosfato simple en lugar de otras fuentes de fertilizantes que no contienen azufre.

REFERENCIAS

- ACQUAYE, D. K. Some significance of soil organic matter on soil organic phosphorus mineralization in phosphorus nutrition of cocoa in Ghana. *Plant and Soil* 19:65-80. 1963.
- ALVAREZ, R., OMETTO, J. C., OMETTO, J., WUTKE, A., et al. Adubação de cana de-açúcar. *Bragantia* 24:97-107. 1965.
- ANDREW, C. S. y ROBINS, M. F. The effect of phosphorus on the growth and chemical composition of some tropical pasture legumes. I. Growth and critical percentages of phosphorus. *Aust. J. Agr. Res.* 20:655-674. 1969.
- _____, _____. The effect of phosphorus on the growth, chemical composition and critical phosphorus percentages of some tropical pasture grasses. *Aust. J. Agr. Res.* 22:693-703. 1971.
- _____ y VANDEN BERG, P. J. Influence of aluminum on phosphate sorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. *Aust. J. Agr. Res.* 24(3):341-351. 1973.
- AWAN, A. B. Effect of lime on the availability of phosphorus in Zamorano soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:672-673. 1964.
- _____, et al. Estudio comparativo de roca fosfatada y superfosfato triple como fuente de fósforo para los cultivos. *Rev. Agr. Cuba* 4:55-61. 1971.
- BACHE, B. W. Aluminum and iron phosphate studies related to soils. II. Reactions between phosphates and hydrous oxides. *J. Soil Sci.* 15:110-116. 1964.
- _____ y ROGERS, N. E. Soil phosphate values in relation to phosphate supply to plants from Nigerian soils. *Samaru Res. Bull.* 123:383-390. 1970.
- BALDOVINOS, S. F., y THOMAS, G. W. The effect of soil clay on phosphorus uptake. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31:680-682. 1967.
- BARROW, N. J. Studies on the mineralization of sulfur from soil organic matter. *Aust. J. Agr. Res.* 12:306-391. 1961.
- BENAVIDES, S. T. Fractionation of phosphorus from soils of the Llanos Orientales of Colombia. M.S. Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, 1963.
- BOLLE-JONES, E. W. Incidence of sulfur deficiency in Africa-a review. *Emp. J. Exptal. Agr.* 32:241-248. 1964.
- BORNEMISZA, E. y LLANOS, R. Sulfate movement, adsorption and desorption in three Costa Rican soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31:356-360. 1967.
- BRAMS, E. Soil organic matter and phosphorus relationships under tropical forests. *Plant and Soil* 39:465-468. 1973.
- BROMFIELD, A. R. Sulfur in northern Nigerian soils. I. Effects of cultivation and fertilizers on total sulfur and sulfate pattern in soil profiles. *J. Agr. Sci.* 78:465-470. 1972.
- CABALA, P. y FASSBENDER, H. W. Formas de fósforo en la región cacaotera del Brasil. *Turrialba* 20:439-444. 1970.
- CHANG, C. A. y SHERMAN, G. D. Differential fixation of phosphate by typical soils of the Hawaiian great soil groups. *Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 16. 1961.
- CIAT. Annual Report. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1971. pp. 119-121.
- COCK, J. H. y YOSHIDA, S. Effects of silicate applications on rice by the simulation method. *Soil Sci. Plant Nutr.* 16:212-214. 1970.
- COLEMAN, N. T., THORUP, J. T., JACKSON, W. A. Phosphate sorption reactions that involve exchangeable aluminum. *Soil Sci.* 90:1-7. 1960.

- DABIN, B., y GAVINELLI, E. Preliminary results of a survey showing the sulfur contents of soils of tropical Africa. In *Proceedings of the International Symposium on Sulphur in Agriculture*, 1970. pp. 113-136.
- _____. The use of phosphate fertilizer in a long-term experiment on a ferallitic soil at Bambari, Central African Republic. *Phosphorus in Agr.* 58:1-11. 1971.
- DANKHE, W. C., MALCOLM, J. L., MENENDEZ, M. E. Phosphorus fractions in selected soil profiles of El Salvador as related to their development. *Soil Sci.* 98:33-38. 1964.
- De FREITAS, L. M. M., GRUNES, F. P., LOTT, W. L. Effect of sulphur fertilizer on coffee. *IRI Res. Inst. Bull.* 41. 1972.
- D'HOORE, J. L. y COULTER, J. K. Soil silicon and plant nutrition. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 163-173.
- ENGLESTAD, O. P. Fertilizers. In *Soil of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 174-188.
- _____, JUGSUJINDA, A., DeDATTA, S. K. Response by flooded rice to phosphate rocks varying in citrate solubility. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:524-529. 1974.
- ENSMINGER, L. E. Some factors affecting adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 18:259-264. 1954.
- FASSBENDER, H. W. Estudio del fósforo en suelos de América Central. IV. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. *Turrialba* 19:497-505. 1969.
- _____, y MOLINA, R. Influencia de enmiendas calcáreas y silicatadas sobre el efecto de fertilizantes fosfatados en suelos derivados de cenizas volcánicas en Costa Rica. In *Panel on soils derived from volcanic ash in Latin America*. Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Turrialba, Costa Rica, 1969. pp. C2.1-C2.12.
- FITTS, J. W. Sulfur deficiency in Latin America. *Sulphur Inst. J.* 6:14-16. 1970.
- FOX, R. L., OLSON, R. A., y RHODES, J. F. Evaluating the sulphur status of soils by plant and soil tests. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:243-246. 1964a.
- _____, DeDATTA, S. K., y WANG, J. M. Phosphorus and aluminum uptake by plants from Latosols in relation liming. *Trans. 8th Int. Congr. Soil Sci.* 4:595-603. 1964b.
- _____, MOORE, D. G., WANG, J. M., PLUCKNETT, D. L., y FURR, R. D. Sulfur in soils, rainwater and forage plants in Hawaii. *Hawaii Farm Sci.* 14:9-12. 1965.
- _____, SILVA, J. A., YOUNG, O. R., PLUCKNETT, D. L., y SHERMAN, G. D. Soil and plants silicon and silicate response to sugar cane. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31:775-779. 1967.
- _____, PLUCKNETT, D. L., y WHITNEY, A. S. Phosphate requirements of Hawaiian Latosols and residual effects of fertilizer phosphorus. *9th Int. Congr. Soil Sci.* 2:301-310. 1968.
- _____, y KAMPRATH, E. J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:902-906. 1970.
- _____, HASAN, S. M., y JONES, R. C. Phosphate and sulfate sorption by Latosols. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:857-864. 1971.
- _____, HASHIMOTO, R. K., THOMPSON, J. R., y PEÑA, R. S. de la. Comparative external phosphorus requirements of plants growing in tropical soils. *Tenth Int. Congr. Soil Sci. (Moscow)* 4:232-239. 1974.

- FOX, R. L. Examples of anion and cation adsorption by soils of tropical America. *Trop. Agr. (Trinidad)* 51:200-210. 1974.
- FRIEND, M. T. y BIRCH, H. F. Phosphate responses in relation to soil tests and organic phosphorus. *J. Agr. Sci.* 54:341-347. 1960.
- GREENWOOD, M. Fertilizer trials with groundnuts in Northern Nigeria. *Emp. J. Exptal. Agr.* 19:225-241. 1951.
- HASAN, S. M., FOX, R. L., y BOYD, C. C. Solubility and availability of sorbed sulfate in Hawaiian soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:897-901. 1970.
- HESSE, P. R. Sulfur and nitrogen changes in forest soils of East Africa. *Plant and Soil* 9:86-96. 1958.
- HOSSNER, L. R., FREEHOUF, J. A., y FOLSOM, B. L. Solution phosphorus concentration and the growth of rice in flooded soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:405-408. 1973.
- IGUE, K. et al. Mineralización de P orgánico en suelos ácidos de Costa Rica. *Turrialba* 21:47-52. 1971.
- _____ y FUENTES, R. Retención y solubilización de fósforo-32 en suelos ácidos de las regiones tropicales. *Turrialba* 21:429-434. 1971.
- IRRI. Annual Reports. Soil Chemistry Section. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1971, 1972.
- JONES, M. B. y FREITÁS, L. M. De M. Response of four tropical legumes to phosphorus, potassium and lime when grown in Red-Yellow Latosols from a dense forest. *Pesq. Agrop. Bras.* 5:91-99. 1970.
- _____ y QUAGLIATO, S. L. Respostas de quatro leguminosas tropicais e da alfalfa a varios niveles de enxofre. *Pesq. Agropec. Bras.* 5:359-363. 1970.
- JONES, R. K., ROBINSON, P. J., HAYDOCK, F. P., y MEGARRITY, R. G. Sulfur-nitrogen relations in the tropical legume *Stylosanthes humilis*. *Aust. J. Agr. Res.* 22:885-894. 1971.
- JUO, A. S. R. y MADUAKOR, H. O. Phosphate sorption of some Nigerian soils and its effect on cation exchange capacity. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.* 5:479-497. 1977.
- KAMATH, M. B. y SUBBIAH, B. V. Phosphorus uptake pattern by crops from different soil depths. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:281-291. 1971.
- KAMPRATH, E. J., NELSON, W. L., y FITTS, J. W. Sulfur removed from soils by field crops. *Agron. J.* 49:289-293. 1957.
- _____ . Residual effects of large applications of phosphorus on high fixing soils. *Agron. J.* 59:25-27. 1967.
- _____ . Sulfur reactions and availability in highly weathered soils. *Sulphur Inst. J.* August 1968:4-6. 1968.
- _____ . Phosphorus. In Sanchez, P. A. (ed.). A review os soils research in tropical Latin America. North Carolina Agr. Exp. Sta. Bull. 219. 1973a. pp. 138-161.
- _____ . Sulfur. In P. A. Sanchez (ed.). "A review of soils research in tropical Latin America." North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973b. pp. 179-181.
- _____ . Aspectos químicos y formas minerales del fósforo del suelo en regiones tropicales. *Suelos Ecuatoriales* 4:1-18. 1974.
- KOYAMA, T. y CHAMMEK, C. Soil-plant nutrition studies on tropical rice. I. Studies on the varietal differences in absorbing soil phosphorus from soils low in available phosphorus. *Soil Sci. Plant Nutr.* 17:115-126. 1971.

- KOYAMA, T., y SNITWONGSE, P. Soil-plant nutrition studies in tropical rice II. Varietal differences in absorbing phosphorus from soils low in available phosphorus. *Soil Sci. Plant Nutr.* 17:186-194. 1971.
- LEHR, J. A. y McCLELLAN, G. H. A revised laboratory scale for evaluating phosphate rocks for direct application. *Tennessee Valley Authority Bull.* Y-43. 1972.
- Le MARE, P. H. Experiments on the effects of phosphate applied to a Buganda soil. II. Field experiments on the response curve to superphosphate. *J. Agr. Sci.* 70:271-279. 1968.
- LOTT, W. L., McCLUNG, A. C., y MEDCALF, J. C. Sulfur deficiency in coffee. *IBEC Res. Inst. Bull.* 22. 1960.
- McCLUNG, A. C., FREITAS, L. M. M. De., y LOTT, W. L. Analysis of several Brazilian soils in relation to plant responses to sulfur. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 23:221-224. 1959.
- _____, y QUINN, L. R. Sulfur and phosphorus responses in Batatais grass (*Paspalum nutatum*). *IBEC Res. Inst. Bull.* 18. 1959.
- McCORMICK, L. H. y BORDEN, F. Y. Phosphate fixation by aluminum in plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:799-802. 1972.
- MEHTA, B. V. y PATEL, J. M. Some aspects of phosphorus availability in Gurajat soils. *J. Indian Soc. Sci.* 11:151-158. 1963.
- MENDEZ-LAY, J. M. Effect of lime on P fixation and plant growth in various soils of Panama. M. S. Thesis, Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1973.
- MIRANDA, L. T. de, VIEGAS, G. P., FREIRE, E. S., y IGUE, T. Adubação do milho. XXVII. Ensaio com diversos fosfatos. *Bragantia* 29:301-308. 1970.
- MONTEITH, N. H. y SHERMAN, G. D. The comparative effects of calcium carbonate and of calcium silicate on the yield of Sudan grass grown in a Ferruginous Latosol and a Hydrol Humic Latosol. *Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 53. 1963.
- MOURA FILHO, W., BUOL, S. W., y KAMPRATH, E. J. Studies on a Latosol Roxo of Brazil: phosphate reactions. *Experientiae* 13:235-247. 1972.
- MOTSARA, M. R. y DATTA, N. P. Rock phosphate as a fertilizer for direct application in acid soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 19:107-113. 1971.
- MÜLLER, L. E. Deficiencia de azufre en algunos suelos de Centro America. *Turrialba* 15:208-215. 1965.
- NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Agronomic-economic research on tropical soils. *Annual Reports. Soil Science Department, North Carolina State University. Raleigh, 1973, 1974.*
- NYE, P. H. y BERTHEUX, M. H. The distribution of phosphorus in forest and savanna soil of the Gold Coast and its agricultural significance. *J. Agr. Sci.* 49:141-149. 1957.
- _____, y GREENLAND, D. J. The soil under shifting cultivation. *Commonwealth Bur. Soils Tech. Commun.* 15. 1960.
- OKE, O. L. Sulfur in relation to soil organic matter in Nigerian soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 19:309-311. 1971.
- OKUDA, A. y TAKAHASHI, E. The role of silicon. In *The mineral nutrition of the rice plant*. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 123-146.
- OLSON, R. A. y ENGLESTAD, O. P. Soil phosphorus and sulfur. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 82-101.
- OMOTOSO, T. I. Organic phosphorus contents of some cocoa growing soils of Southern Nigeria. *Soil Sci.* 112:195-199. 1971.

- PICHOT, J. y ROCHE, P. Phosphore dans les sols tropicaux. *Agron. Tropicale (France)* 27:939-965. 1972.
- PLUCKNETT, D. L. The use of soluble silicates in Hawaiian agriculture. *Univ. Queensl. Papers, Dept. Agri.* 1:203-223. 1972.
- PONNAMPERUMA, F. N. y CASTRO, R. U. Varietal differences in resistance to adverse soil conditions. In *Rice breeding*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1971. pp. 677-684.
- PRASAD, R., BHENDIU, M. L., y TÜRKHEDE, B. B. Relative efficiency of phosphate fertilizers in different soils of India. *Proc. Int. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:747-756. 1971.
- PRATT, P. F., PETERSON, F. F., y HOLZLEY, C. S. Qualitative mineralogy and chemical properties of a few soils from São Paulo, Brazil. *Turrialba* 19:491-496. 1969.
- RAJAN, S. S. S. y FOX, R. L. Phosphate adsorption by soils. I. Influence of time and ionic environment on phosphate adsorption. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 3:493-504. 1972.
- RASMUSSEN, H. P. Entry and distribution of aluminum in *Zea mays*: electron microprobe x-ray analysis. *Planta* 81:28-37. 1968.
- RICHARDSON, H. L. The use of fertilizers. In R. P. Moss (ed.). *The soil resources of tropical Africa*. Cambridge University Press, Oxford, 1968. pp. 135-154.
- RIVERA-HOUSE, C. Phosphate fixation by tropical soils. M. S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, 1971. 112 p.
- ROBERTS, K. J. y WEAVER, R. M. Organic phosphorus in soils with special interest in soils of the tropics. *Agron. Mimeo* 73-1. Cornell University, Ithaca, N.Y., 1973.
- ROY, A. C., ALI, M. Y., FOX, R. L., y SILVA, J. A. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian Latosols. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:757-768. 1971.
- SALINAS, J. G. y SANCHEZ, P. A. Soil-plant relationships affecting varietal and species differences in tolerance to low available soil phosphorus. *Ciência e Cultura* 28:156-168. 1976.
- SHELTON, J. E. y COLEMAN, N. T. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32:91-94. 1968.
- SILVA, J. A. Possible mechanisms for crop response to silicate applications. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:805-814. 1971.
- SMITH, R. W. y ACQUAYE, D. K. Fertilizer responses in peasant cocoa farms in Ghana: a factorial experiment. *Emp. J. Exptal. Agr.* 31:115-123. 1963.
- SONI, S. L., KAUFMAN, P. B., y BIGELOW, W. C. Electron probe analysis of silicon and other elements in leaf epidermal cells of the rice plant. *Amer. J. Bot.* 59:38-42. 1972.
- SUEHISA, R. H., YOUNGE, O. R., y SHERMAN, G. D. Effects of silicate on phosphorus availability to Sudan grass grown on Hawaiian soils. *Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 51. 1963.
- SYERS, J. K. et al. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil Sci.* 112:267-275. 1971.
- TAKIJAMA, Y., WIJAYARATNA, H. M. S., y SENEWIRATNE, E. J. Nutrient deficiency and physiological disease of lowland rice in Ceylon. 3. Effect of silicate fertilizers and dolomite for increasing rice yield. *Soil Sci. Plant Nutr.* 16:11-16. 1970.

- TENNESSEE VALLEY AUTHORITY. Tailoring fertilizers for rice. Muscle Shoals, Ala, 1972.
- TRUONG, B., BURDIN, S. y PICHOT, J. Etudes des effets residuels du phosphore dans deux sol ferralitiqúes par diverses methods analitiques. Agron. Tropicale (France) 28:147-155. 1973.
- VIEGÁS, G. P., MIRANDA, L. T. de, y FREIRE, E. S. Adubação do milho. XXVI. Ensaio com diversos fosfatos. Bragantia 29:191-198. 1970.
- VOGT, J. B. M. Responses to sulfur fertilization in northern Rhodesia. Agrochimica 10:105-113. 1966.
- WESTIN, F. C. y BRITO, J. G. de. Phosphorus fractions of some Venezuela soils as related to their stage of weathering. Soil Sci. 107:194-202. 1969.
- WILLIAMS, C. H. y STEINBERGS, A. Sulphur and phosphorus in Eastern Australian soils. Aust. J. Agr. Res. 9:483-491. 1958.
- _____. Reaction of surface-applied superphosphate with soil. I. The fertilizer solution and its initial reaction with soil. II. Movement of phosphorus and sulfur into the soil. Aust. J. Soils Res. 9:83-106. 1971.
- _____. Sulfur deficiency in Australia. Sulphur Inst. J. 8:5-8. 1972.
- WONG, Y. C. y HALAIS, P. Needs of sugarcane for silicon when growing in highly weathered Latosol. Exptal. Agr. 6:99-106. 1970.
- _____. The residual effect of calcium silicate applications on sugarcane growth. Annual Report Mauritius Sugar Industry Research Institute, 1971. pp. 63-68.
- WOODRUFF, J. R., y KAMPRATH, E. J. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29:148-150. 1965.
- YOUNGE, O. R., y PLUCKNETT, D. L. Quenching the high phosphorus fixation of Hawaiian Latosols. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30:653-655. 1966.

CAPITULO 9

EVALUACION DE LA FERTILIDAD DEL SUELO

La evaluación de la fertilidad del suelo es el proceso mediante el cual se hace un diagnóstico de los problemas de nutrición y se hacen recomendaciones de fertilización. Actualmente en los trópicos se usan varios procedimientos así como en el resto del mundo. Los más difundidos se basan en análisis de suelo, análisis de plantas, técnicas de elemento faltante, ensayos de fertilizantes simples, y con frecuencia combinaciones de ellos. Las ventajas y desventajas de los distintos procedimientos es tema de mucha discusión, tal como se aprecia por la cantidad de referencias que aparecen al final de este capítulo.

En muchos países de América Latina y en India existen métodos efectivos de evaluación de la fertilidad del suelo, pero pocos en África tropical y el sureste de Asia. La razón principal de este limitado desarrollo, es la falta de un uso difundido de fertilizantes en África, y la preponderancia del cultivo de arroz inundado en el sureste de Asia. Este capítulo examina los diferentes procedimientos para la evaluación de la fertilidad del suelo que se usan en los trópicos. También describe algunos de los esfuerzos por correlacionar los parámetros de fertilidad con la clasificación de suelos.

SISTEMAS DE EVALUACION DE FERTILIDAD BASADOS EN ANALISIS DE SUELO

Uno de los procedimientos más populares que usa un gran número de países tropicales es el que desarrolló el "Programa Internacional de Fertilidad y Mejoramiento del Suelo" (ISFEIP). Su concepto y alcance se describen seguidamente:

Un programa de evaluación de la fertilidad del suelo incluye varias partes. La fertilidad del suelo tiene que ver principalmente con los elementos nutritivos de las plantas y con las condiciones del suelo. La evaluación de intereses por los niveles de disponibilidad y equilibrio de los nutrimentos en el suelo, incluyendo métodos apropiados para evaluar estos factores (análisis de suelos, análisis de

plantas, reconocimientos de suelos, condiciones climáticas). El mejoramiento incluye la adición al suelo de fertilizantes, cal, abonos orgánicos, y otras enmiendas en tales cantidades, tales épocas de aplicación, y de tales maneras como para proporcionar el ambiente nutricional óptimo para la producción de cultivos. Por lo tanto, un programa de evaluación de la fertilidad y mejoramiento del suelo es específico en cuanto al sitio y en cuanto a la situación. Es el uso juicioso de información para un campo específico en el que se consideran factores que afectarán el rendimiento, la capacidad de los agricultores y la disponibilidad de capital (ISFEIP, 1974).

Según Fitts (1974) tal programa tiene seis facetas interrelacionadas: 1) muestreo (suelo y plantas); 2) análisis de laboratorio (suelo y planta); 3) correlación entre análisis y respuestas de rendimiento; 4) interpretación y recomendaciones; 5) poner la información en uso; 6) investigación.

Esta filosofía más amplia ha evolucionado gradualmente del concepto de análisis de suelo, es decir, el uso de análisis de suelo como medio para obtener recomendaciones sobre fertilizantes. El uso del análisis de suelo exclusivamente no se considera un procedimiento satisfactorio. El programa completo tiene componentes de laboratorio, invernadero y campo.

MUESTREO DEL SUELO

La toma de una muestra representativa de suelo es a la vez el primer paso y la mayor fuente de error en un programa de evaluación de la fertilidad del suelo. Los científicos en suelos suponen que la distribución de instrucciones impresas y diagramas sobre la forma en que se toman las muestras de suelo son suficientes para asegurar especímenes representativos. Esto pocas veces resulta cierto. Por otra parte, instrucciones detalladas a extensionistas y agricultores como las que contiene un boletín reciente por Perur et al (1974) de India, resultan muy valiosas.

Una muestra representativa de suelo se compone de 10 a 20 submuestras de la zona radicular de un campo con poca variación en declive, drenaje, color, o historia en cuanto a fertilizantes en el pasado. Areas no representativas, tales como cercas y montones de estiércol deben evitarse. También se necesita información tal como el nombre y dirección del agricultor, número del campo, cultivo anterior, y prácticas de fertilización. Una buena manera es imprimir la información deseada en las cajas para las muestras.

La profundidad de la muestra depende del cultivo que vaya a ponerse y de la profundidad a que pueden incorporarse las enmiendas; esto es casi universalmente en la capa arable o en los 15 cm

superiores del suelo. En caso de cultivos de sistema radicular profundo como caña de azúcar y té, a menudo se toma una muestra del subsuelo (Wong, 1971). En pasturas establecidas o cultivos permanentes en que los fertilizantes probablemente no se incorporan, por lo general se toman en los 15 cm superiores del suelo.

Otro punto importante es dónde muestrear cuando se ha aplicado fósforo en bandas. La respuesta es, entre las bandas, si se conoce su localización. Otra consideración es la época del año. Las muestras deberán tomarse antes de la siembra, para que se conozcan los resultados a la hora de decidir cuánto fertilizante debe aplicarse. En regímenes ústicos de humedad del suelo, eso significa muestrear durante la estación seca. En los capítulos anteriores se discutió el movimiento ascendente de los iones durante la estación seca. Esto puede cambiar algunos de los resultados de los análisis de suelo, principalmente con respecto a sales solubles.

La frecuencia con que un campo debe muestrearse depende en primer lugar de la intensidad de la fertilización y del valor económico de la cosecha. En caso de manejo de intensidad promedio ISFEIP (1971) recomienda tomar muestras una vez cada 3 años, mientras que en áreas de manejo muy intensivo es necesario el muestreo anual.

La razón por la cual el muestreo del suelo es la mayor fuente de error al evaluar la fertilidad del suelo es la magnitud de la extrapolación de los resultados analíticos. Cuando una submuestra tomada de una muestra compuesta que pesa 500 g de un campo de 2,5 hectáreas a una profundidad de 15 cm para la determinación de fósforo ésta representa un mil millonésimo (10^{-9}) del volumen total del suelo del cual se hizo el análisis (Perur et al, 1974).

Siendo este un programa de servicio al agricultor, debe reducirse al mínimo el tiempo entre el muestreo del suelo y el análisis. Las demoras en el envío, las fallas de energía y la falta de reactivos críticos son muy comunes en muchos laboratorios tropicales. Se han hecho varios estudios sobre el efecto del tiempo de almacenamiento y secado en los resultados analíticos. Bouldin et al (1974) estudiaron el efecto de secar en vez de mantener húmedos por unos meses varios Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico y Colombia. El secamiento disminuyó el contenido de aluminio intercambiable en un 20% y aumentó el contenido de NH_4^+ intercambiable cuando en ambos la extracción se hizo con KCl normal. No se observaron cambios en pH, potasio, calcio o magnesio intercambiable. Está bien establecido que el almacenamiento aumenta el contenido de nitrógeno inorgánico del suelo. Nelson y Bremner (1972) recomiendan que suelos secados al aire se almacena en frascos bien tapados si el análisis de nitrógeno inorgánico se va a demorar. Sin embargo lo mejor es reducir al mínimo las demoras entre el muestreo y el análisis.

Con el aumento de la cooperación internacional muchas muestras de suelo se envían a otros países con propósitos de investigación y control de calidad. Todas las muestras de suelo que entran a los

Estados Unidos son tratadas por el Servicio de Cuarentena* en el punto de entrada. Las muestras destinadas para uso de laboratorio se fumigan con bromuro de metilo, mientras que las que se destinan para el uso en invernaderos se tratan con calor en una autoclave. López (1975) ha evaluado los efectos de estos tratamientos del Servicio de Cuarentena en los análisis de suelo. El tratamiento con bromuro de metilo no induce cambios de importancia en las propiedades del suelo. Por otra parte el tratamiento en autoclave aumenta el contenido de NH_4^+ y de manganeso drásticamente.

Después de que llega al laboratorio la muestra se seca, se muele por trituración o en molinos eléctricos, se pasa por una criba No. 2, se le asigna un número de laboratorio y se almacena hasta que esté lista para el análisis. En la mayoría de los casos se conserva la caja original de la muestra que tiene la fuente de información y se le agrega un número de laboratorio y así se guarda.

ORGANIZACION DEL LABORATORIO

El laboratorio de análisis rutinario de suelo es la columna vertebral del programa de evaluación de la fertilidad (Fitts, 1974). A diferencia de los laboratorios de investigación, los laboratorios de servicios deben estar dispuestos de manera que puedan manejar grandes cantidades de muestras rápidamente y con precisión. El programa ISFEIP ha desarrollado un sistema completo de aparatos semiautomáticos especialmente para laboratorios tropicales. Este sistema ha sido descrito por Vettori (1969); ISFEIP (1973); Perur et al (1974); y Hunter (1975), y se resume seguidamente:

Las muestras se miden volumétricamente, eliminando así el proceso de pesar que tanto tiempo consume, y luego se colocan en cilindros de plástico ubicados en bandejas de 30 unidades, en las que se agregan las soluciones extractoras y diluyentes o se transfieren por medio de equipo automático de entrega de alicuotas. Otros aparatos transfieren las alicuotas a los espectrofotómetros y unidades que miden el pH automáticamente. Los aparatos para agitar, decantar y limpiar son semiautomáticos y tienen capacidad para manipular 30 unidades simultáneamente. Un sólo técnico puede analizar hasta 100 muestras de suelo por día, con 10 determinaciones por muestra (Hunter, 1975). Los aparatos se basan en operación manual y usan un mínimo de energía eléctrica. Equipo electrónico costoso, como potenciómetros, espectrofotómetros, y aparatos de absorción atómica sólo se usan en las fases finales. Una ventaja adicional es que las mismas unidades pueden usarse tanto para análisis de tejidos vegetal

(*) U.S. Plant Quarantine Service.

como para suelo. El grueso del trabajo se hace con dos soluciones extractoras: el ácido doble diluido, el Olsen modificado para P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn y Cu disponibles, y la extracción con 1 N KCl para aluminio. Las pruebas de N, B, S y Mo requieren otros métodos que no han sido aún adaptados al sistema. Las mediciones de pH también se adaptan a análisis rutinarios.

Un resultado interesante de este proceso es que la precisión analítica aumenta con el tamaño de la operación. Cada décima muestra es un testigo que se revisa periódicamente por un laboratorio de control. Con base en estos registros, cuanto mayor sea el tamaño del laboratorio, tanto mayor resulta su precisión (Fitts, 1974). Investigaciones sobre la variación del error total de análisis químicos de rutina, por Ng et al (1974) muestran que los errores por los instrumentos y el operador son pequeños, mientras que el tratamiento químico constituye la principal fuente de error.

Actualmente en América Latina hay aproximadamente unos 50 laboratorios equipados con este sistema o modificaciones del mismo, los cuales analizan unas 400.000 muestras de suelos de agricultores al año (ISFEIP, 1970, 1973). Cada uno de los laboratorios analiza más de 100 muestras diarias, y 12 analizan más de 500 por día. El funcionamiento de estos laboratorios ha tenido un impacto perceptible en el aumento de rendimientos por medio del incremento en el uso de fertilizantes en América Latina (ISFEIP, 1972).

SELECCION DE LOS METODOS DE EXTRACCION

La selección de soluciones extractoras de los elementos nutritivos disponibles ha recibido la mayor atención en las investigaciones en suelos y es tópicamente de considerable discusión. Según Bray (1948) un método satisfactorio de laboratorio para análisis rutinario de suelos debe satisfacer tres criterios:

- a. debe extraer todas las formas disponibles o una parte proporcional, del nutrimento en suelos con propiedades ampliamente diferentes;
- b. el procedimiento debe ser rápido y preciso;
- c. las cantidades extraídas deben estar correlacionadas con el crecimiento y respuesta de cada cultivo bajo diversas condiciones.

Si toda la literatura sobre métodos de análisis de suelo fuera evaluada de acuerdo con esos criterios, solamente unos pocos métodos los satisfarían. Inmediatamente quedarían excluidas las pruebas biológicas (Neubauer), las de intercambio con resinas, y otros métodos analíticos que consumen mucho tiempo, como los que esbozan

Müller y Van Baren (1971). Estas son buenas técnicas de investigación pero no pruebas rutinarias de suelo. El siguiente es un resumen de pruebas para cada elemento nutritivo o condición adversa del suelo.

Nitrógeno. Bartholomew (1972) clasificó las pruebas de suelo para nitrógeno en tres categorías: 1) determinación del nitrógeno orgánico o una fracción de nitrógeno extraído químicamente, incluyendo materia orgánica como indicadora de nitrógeno orgánico; 2) métodos de incubación para evaluar las tasas de mineralización; y 3) medición directa del nitrógeno inorgánico. Desafortunadamente en la mayoría de los casos ninguno de estos métodos satisface los tres criterios mencionados anteriormente.

El nitrógeno total del suelo o el contenido de materia orgánica algunas veces se correlaciona con la respuesta al nitrógeno en suelos y climas semejantes. En tales casos las pruebas satisfacen los tres criterios, excepto el de amplia aplicabilidad, y pueden ser útiles a nivel local. Aunque es frecuente obtener buenas correlaciones entre el nitrógeno total y la respuesta de rendimiento en el invernadero (Conforth y Walmsley, 1971), éstos son menos frecuentes bajo condiciones de campo. Por ejemplo, Baynes y Walmsley (1973) correlacionaron el nitrógeno total del suelo con la respuesta al nitrógeno del maíz en varias localidades de las Antillas Menores, y pudieron predecir la presencia o ausencia de respuesta al nitrógeno con un nivel crítico de 0,17% de N en dos terceras partes de los casos.

Normalmente el nitrógeno total y el carbono orgánico del suelo están mal correlacionados con la respuesta al nitrógeno en el campo. Sin embargo, a falta de un método mejor, muchos laboratorios usan estas mediciones para suministrar información a los agricultores.

Los métodos de la segunda categoría consisten en la incubación de un número grande de muestras bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas y midiendo la tasa de mineralización, calculada del contenido de nitrógeno inorgánico antes y después de la incubación. Algunas veces también se determina el contenido total de nitrógeno. Las tasas de mineralización reflejan con mayor aproximación la disponibilidad de nitrógeno de la materia orgánica del suelo que ningún otro análisis, según Bartholomew (1972). Sin embargo, el requisito de tiempo las descalifica como un método satisfactorio de análisis rutinario. Aunque existen buenas correlaciones entre el valor de la incubación y la respuesta de rendimiento (Conforth y Walmsley, 1971; Lathwell et al, 1972; Baynes y Walmsley, 1973) estos métodos consumen demasiado tiempo para propósitos de rutina. Sin embargo son excelentes herramientas de investigación.

Los métodos que evalúan el nitrógeno inorgánico directamente han resultado satisfactorios en áreas con baja precipitación pluvial cuando el muestreo se hace en fechas definidas. De acuerdo con Bartholomew (1972) estos métodos son útiles en suelos altos en

materia orgánica y en campos irrigados en los que se acumula el nitrógeno inorgánico. Lathwell et al (1972) intentaron su aplicación bajo condiciones tropicales húmedas; tuvieron éxito en correlacionar el nitrógeno orgánico extraído por 0,01 *M* CaCl₂ con la absorción del cultivo a nivel de invernadero en Puerto Rico. La extracción con 1 *N* KCl ha sido estudiada por ISFEIP con resultados promisorios. Hasta donde se sabe, no se han obtenido correlaciones con las respuestas de campo con tales extracciones en áreas tropicales húmedas.

Por lo tanto, la mayoría de las pruebas de suelo para nitrógeno no satisfacen los tres criterios para un método satisfactorio de rutina y servicio al agricultor. Con pocas excepciones los análisis de suelo para nitrógeno no son suficientemente confiables para predecir las respuestas del nitrógeno. Se usan otros medios, principalmente experimentos de campo y absorción de nitrógeno por los cultivos, para evaluar la fertilización nitrogenada.

Fósforo. La situación con el fósforo es la opuesta a la del nitrógeno. Varios métodos son muy efectivos, satisfacen los tres criterios de Bray y se usan en todo el mundo. En el Cuadro 9.1 se presenta la lista de los procedimientos principales que se usan en los trópicos. De éstos los más comunes son los métodos de Olsen, Bray 2 y el Carolina del Norte, (llamado también de "Mehlich", o "ácido doble diluido").

La efectividad de cada uno de estos métodos está relacionado con su habilidad para extraer distintas formas de fósforo inorgánico. Una comparación en suelos ampliamente diferentes de Bangladesh ilustra la habilidad relativa de los métodos comunes de suelos para identificar diversas fracciones de fósforo (Cuadro 9.1). La mayoría de las soluciones extractoras ácidas son efectivas para determinar Ca-P. Los métodos Carolina del Norte, Bray 2, KCl 0,3 *N* y Na-EDTA son efectivos para extraer ambos, Ca-P y Al-P. Por otra parte el método alcalino de Olsen es el único sensitivo a Fe-P. No hay métodos capaces de extraer el fósforo en las formas soluble en reductores, ocluída y orgánica. Resultados similares a los del Cuadro 9.1 han sido obtenidos por Tyner y Davide (1962) en Filipinas, Chang y Juo (1963) en Taiwan, Balerdi et al (1968) en América Central, Srivastava y Pathak (1971) y John (1972) en India, Chotikul y Tyner (1971) en Tailandia y Pagel (1972) en toda la región tropical. La conclusión de tales estudios es que no hay una solución extractora universal que sea efectiva en todos los suelos, lo cual es lógico en vista de la variabilidad en las propiedades del suelo relacionadas con la disponibilidad del fósforo. Por lo tanto, varios estudios recomiendan diferentes soluciones extractoras para diferentes grupos amplios de suelos (Goswami et al, 1971; Oko y Agboola, 1974).

La extracción que parece tener la más extensa aplicabilidad es el método de bicarbonato de calcio (Olsen), como se aprecia en el Cuadro 9.1, por los mayores coeficientes de correlación. La etapa de la filtración del carbono a causa de la contaminación con color, de las

CUADRO No. 9.1. Correlación entre métodos de análisis de fósforo y fracciones de fósforo inorgánico en diversos suelos de Bangladesh. (Fuente: Ahmed e Islam, 1975).

Método	Solución extractora	Ca-P	Al-P	Fe-P	Fe-P Soluble en reductores	Fe-P, Al-P ocluidos
Olsen	NaHCO ₃ 0,5 M a pH 8,5	,55	,62	,78*	,01	-,17
Truog	H ₂ SO ₄ 0,002 N a pH 3	,90*	,59	,09	-,32	-,49
North Carolina	H ₂ SO ₄ 0,025 N + HCl 0,05 N	,88*	,65*	,06	-,39	-,62
HCl	HCl 0,3 N	,95*	,70*	,23	-,38	-,61
Bray 1	HN ₄ F 0,03 N + HCl 0,025 N	,72*	,73*	,46	-,17	-,48
Bray 2	HN ₄ F 0,3 N + HCl 0,025 N	,78*	,74*	,38	-,24	-,50
Schoefield	CaCl ₂ 0,01 M	,06	,05	,03	-,30	-,60
Morgan	NaOAc + HOAc	,79*	,56	,18	-,47	-,60
EDTA	Na ₂ -EDTA 0,02 N	,77*	,95*	,41	-,23	,53

(*) Los asteriscos indican significación estadística.

soluciones extractoras alcalinas, se han eliminado mediante el tratamiento de los suelos con "Superfloc 127", un floculante comercial (Hunter, 1975). Una modificación posterior, adición de EDTA, mejoró la efectividad del método de Olsen. El "Olsen modificado", como se llama ahora, es un extractor efectivo no sólo para fósforo disponible, sino también para K, Ca, Mg, Zn, Mn, Fe, Cu y NH₄ (ISFEIP, 1971, 1972).

Las pruebas de fósforo para suelos de arroz inundado no son tan satisfactorias como las de cultivos aeróbicos. Este problema y las razones del mismo se analizan en el Capítulo 11. Varias referencias que aparecen al final de este capítulo indican que el método de Olsen es nuevamente el más efectivo, aunque ninguno es verdaderamente satisfactorio.

Potasio. En la mayoría de los suelos las formas de potasio disponible son el potasio intercambiable y potasio soluble. Una serie de soluciones extractoras son capaces de satisfacer los tres criterios de Bray para ambas formas. El método más común es la extracción con acetato de amonio normal; este es generalmente el mejor o por lo menos tan bueno como otros (Datta y Kalbande, 1967; Boyer, 1972; Boyer, 1972, Ekpete, 1972; Ahmad et al, 1973; Rodríguez, 1974). Los intentos de usar la misma solución extractora que se usa para el fósforo, en la estimación del potasio disponible también han sido satisfactorios. La extracción de Carolina del Norte se usa ahora en Brasil para ambos elementos (PIPAEMG, 1972); y como se mencionó antes la extracción modificada de Olsen también es efectiva para el potasio. La interpretación varía un tanto de acuerdo con las propiedades del suelo. Los niveles críticos son más altos para los suelos

montmoriloníticos con una alta capacidad de fijación de potasio que para otros suelos (Boyer, 1972).

Necesidad de cal. Las recomendaciones para la determinación de la necesidad de cal de los suelos ácidos han sido resumidas por McLean (1973). De éstas solamente dos satisfacen los criterios de Bray: 1) la determinación directa del pH; y 2) el uso de aluminio intercambiable extraído con 1 N KCl. El encalado a un pH deseado puede no correlacionar bien con las respuestas de los cultivos, debido a la correlación imperfecta entre pH y aluminio, a los problemas de sobreencalamiento, y a diferencias en la tolerancia de las plantas a la acidez, tal como se vio en el Capítulo 7. La determinación de aluminio intercambiable es una prueba sencilla que se ha correlacionado bien con la respuesta a la cal en suelos ácidos de los trópicos (Kamprath, 1967; Reeve y Sumner, 1970; Tobón y León, 1970). Con frecuencia se usa el porcentaje de saturación de aluminio como nivel crítico, (Muzulli y Kalckmann, 1971) y se recomienda tal práctica.

Nutrientes secundarios. El calcio y el magnesio intercambiables pueden determinarse por absorción atómica de los mismos extractos del potasio sin mayores complicaciones (Doll y Lucas, 1973). Cuando no se dispone de los instrumentos necesarios, la extracción con EDTA y la filtración son adecuadas. Las pruebas de calcio y magnesio pueden facilitar la interpretación de la prueba de potasio si se sospecha problema con el equilibrio catiónico. Las pruebas de calcio y magnesio son necesarias para estimar la capacidad efectiva del intercambio catiónico y el porcentaje de saturación de aluminio conjuntamente con las pruebas de potasio y aluminio. Aunque no son análisis rutinarios de suelo en sentido estricto, estos parámetros son muy útiles en el proceso de interpretación.

Los análisis de suelo para el azufre son aún un problema porque los métodos corrientes son lentos, fastidiosos y a menudo imprecisos. El problema principal es la determinación turbidimétrica del sulfato como BaSO_4 . Los métodos actuales y sus problemas han sido discutidos en artículos por Tisdale (1971), Pal y Motiranami (1971), Reinsenauer et al (1973), y otros. Las extracciones con agua y $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ son las más comunes. Hay esfuerzos en marcha por simplificar las determinaciones de azufre al nivel de otras pruebas de suelos.

Microelementos. En la actualidad hay una variedad de métodos en uso para determinar la disponibilidad de B, Cu, Fe, Mn, Mo, y Zn en suelos. La literatura sobre este tema ha sido revisada por Cox y Kamprath (1971). En el Cuadro 9.2 se presentan los niveles críticos para los diferentes análisis rutinarios de suelos y los factores de interacción. Como se indicó anteriormente, el método modificado de

CUADRO No. 9.2. Métodos de pruebas de suelo, factores de suelo que influyen su interpretación, y ámbitos típicos de niveles críticos de micronutrientes. (Fuente: Cox y Kamrath, 1971).

Elemento	Factores de interacción*		Método	Ambito de nivel crítico (ppm)
	Esencial	Probable		
B	Textura, pH	Cal	H ₂ O caliente	0,1–0,7
Cu	--	M.O., Fe	NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ (pH 4,8) EDTA 0,5 M HNO ₃ 0,43 N Prueba biológica	0,2 0,75 3–4 2–3
Fe	--	pH, cal	NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ (pH 4,8) DTPA + CaCl ₂ (pH 7,3)	2 2,5–4,5
Mn	pH	M.O.	HCl 0,05 N + H ₂ SO ₄ 0,025 N H ₃ PO ₄ 0,1 N y NH ₄ H ₂ PO ₄ 3 N Hidroquinona + NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ H ₂ O	5–9 15–20 25–65 2
Mo	pH	Fe, P, S	(NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ (pH 3,3)	0,04–0,2
Zn	pH, cal	P	HCl 0,1 N Ditizona + NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ EDTA + (NH ₄) ₂ CO ₃ DTPA + CaCl ₂ (pH 7,3)	1,0–7,5 0,3–2,3 1,4–3,0 0,5–1,0

(*) Los factores climáticos y de los cultivos aunque altamente importantes, no se toman en cuenta aquí.

Olsen puede usarse ahora para determinar Cu, Fe, Mn y Zn en la misma extracción para P, K, Ca y Mg (ISFEIP, 1972). Por otra parte boro y molibdeno requieren extracciones separadas. En general las pruebas de suelo para microelementos son efectivas cuando se hacen suficientes esfuerzos concernientes a la correlación e interpretación.

Salinidad y alcalinidad. La conductividad eléctrica de una pasta de suelo saturado se acepta casi universalmente como el mejor método para estimar salinidad. Hay que tener cuidado con respecto a la profundidad de las muestras, y la época en que se toman ya que las sales solubles son muy móviles en sistemas irrigados. La alcalinidad se determina mejor por medio del cálculo de la saturación del sodio intercambiable. El sodio se determina fácilmente en la misma solución extractora del potasio, siempre que las soluciones extractoras no contengan sodio libre. Los detalles de estos métodos y su interpretación se explican en el (Manual No. 60 del Laboratorio de Salinidad del Suelo de E.U. U.S. Soil Salinity Laboratory, 1954).

CORRELACION ENTRE ANALISIS DE SUELO Y RENDIMIENTOS

Los aspectos más difíciles del proceso de evaluación de fertilidad del suelo son la correlación, interpretación y las recomendaciones de fertilizantes debido a la complejidad del fenómeno involucrado. Un análisis de suelo por sí no tiene valor; es una cifra empírica que puede reflejar o no la disponibilidad de un nutrimento en forma indirecta. El valor del análisis de suelo se torna útil solamente cuando se correlaciona con la respuesta del cultivo. Tales correlaciones son generalmente a dos niveles: uno exploratorio en el invernadero con un número grande de suelos ampliamente divergentes; y uno más definitivo en el campo, con un número menor de suelos, pero cuidadosamente seleccionados.

El propósito principal de la correlación a nivel de invernadero es comparar diferentes métodos de extracción y determinar los niveles críticos tentativos. El objeto de las correlaciones a nivel de campo es establecer los niveles críticos definitivos para un método de extracción seleccionado. Sin embargo las correlaciones a nivel de invernadero no son prueba de la efectividad de un método en particular; ésta sólo se puede demostrar en el campo. El grueso de la investigación en pruebas de suelo en los trópicos, lamentablemente, se detiene en la etapa de invernadero.

El crecimiento y el rendimiento de cultivos son funciones de muchas variables más allá del simple nutrimento en consideración. Los rendimientos verdaderos son función de más de 100 variables, que pueden agruparse en las categorías suelo, cultivo, clima y manejo (Fitts, 1955). Por lo tanto cuando el rendimiento se correlaciona con una variable, tal como fósforo disponible, ello significa que el fósforo disponible es un factor limitante más importante que las numerosas variables sin controlar en cualquier estudio de correlación. Generalmente en los estudios de invernadero se obtienen mejores correlaciones, pues allí las variables no controladas son más uniformes. Sin embargo cuando el rendimiento absoluto, la respuesta de rendimiento, la absorción de nutrimento u otros parámetros de crecimiento se grafiquen en función de los valores analíticos del suelo ocurre una considerable dispersión de puntos. En la Fig. 9.1 se presenta un ejemplo. La continuidad de puntos se divide corrientemente en varias categorías arbitrarias, tales como "baja", "media" y "alta" (Fig. 9.2). Las recomendaciones de dosis se basan en el fertilizante necesario para elevar el nivel del análisis de suelo a "alta".

Cuando se usa rendimiento relativo en lugar de rendimiento absoluto, la variabilidad se reduce considerablemente. Los cálculos del rendimiento relativo son de dos clases: respuesta en porcentaje de rendimiento, en el cual la verdadera respuesta de rendimiento se divide entre el rendimiento absoluto al nivel cero, y el valor que se obtiene cuando el rendimiento a cierto nivel de fertilidad se divide

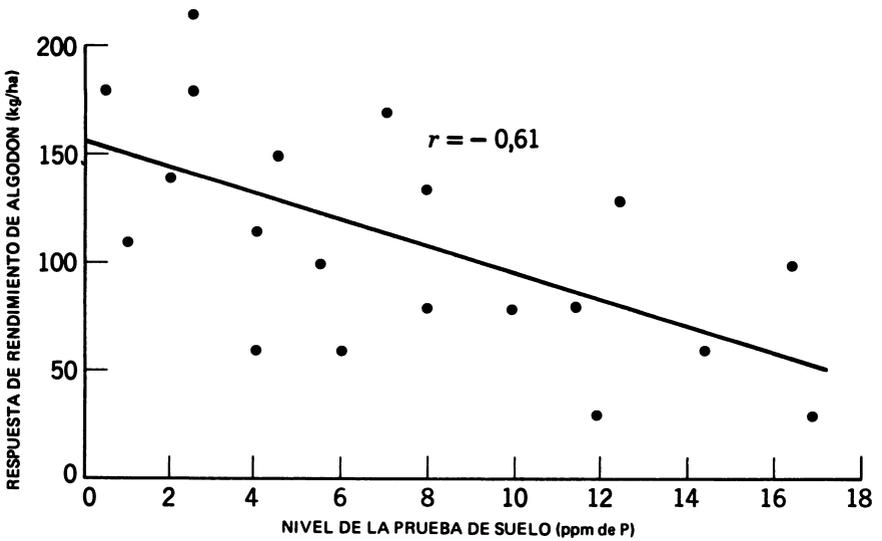


Fig. 9.1. Correlación entre niveles de fósforo de la prueba del suelo y respuesta de rendimiento absoluto con algodón de Irán. (Fuente: Hauser, 1973).

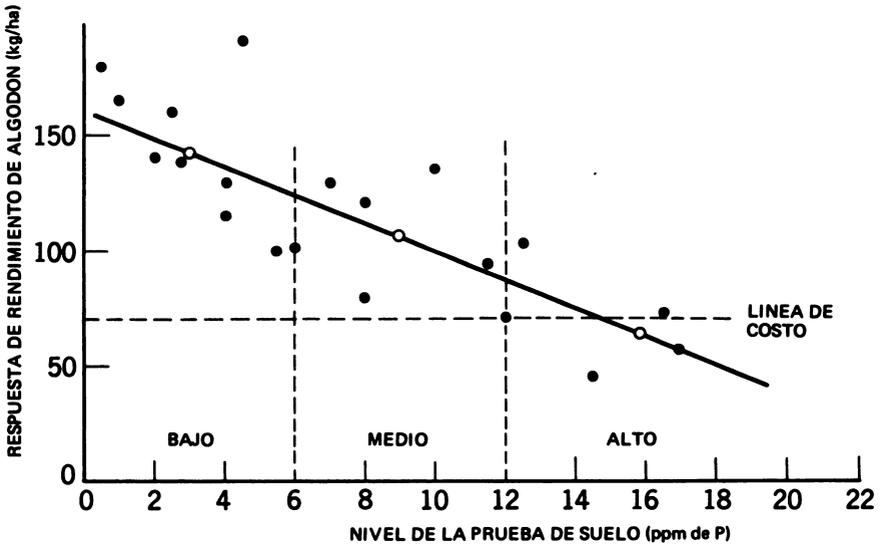


Fig. 9.2. Agrupamiento arbitrario de categorías de pruebas de suelo de la Fig. 9.1. (Fuente: Hauser, 1973).

entre el rendimiento máximo obtenido. En ambos casos los valores de rendimiento relativo reducen la variabilidad de los resultados y dirigen la correlación del análisis de suelo hacia la meta realística: la predicción de la situación suelo-cultivo en que hay probabilidad de respuesta significativa al fertilizantes (Waugh et al, 1973). Las correlaciones de análisis de suelo no pueden predecir rendimientos, ni aún respuesta de rendimiento absoluto debido a las muchas otras variables involucradas.

Un avance muy importante en este tema tuvo lugar con el desarrollo del método Cate-Nelson (Cate y Nelson, 1965). El método gráfico simple consiste en marcar con puntos los rendimientos relativos (porcentajes del máximo) en función del análisis de suelo, tal como se ilustra en la Fig. 9.3. En vez de intentar adecuar una función matemática continua a través de los puntos diseminados, se usa una hoja transparente de superposición dividida en cuadrantes por líneas horizontales y verticales. Esta hoja se superimpone sobre los datos, de manera tal que el mayor número de puntos caigan en los cuadrantes inferior izquierdo y superior derecho, y el número menor de puntos se deja en los cuadrantes superior izquierdo y derecho inferior. El punto en que la línea vertical corta el eje 'x' se considera que es el

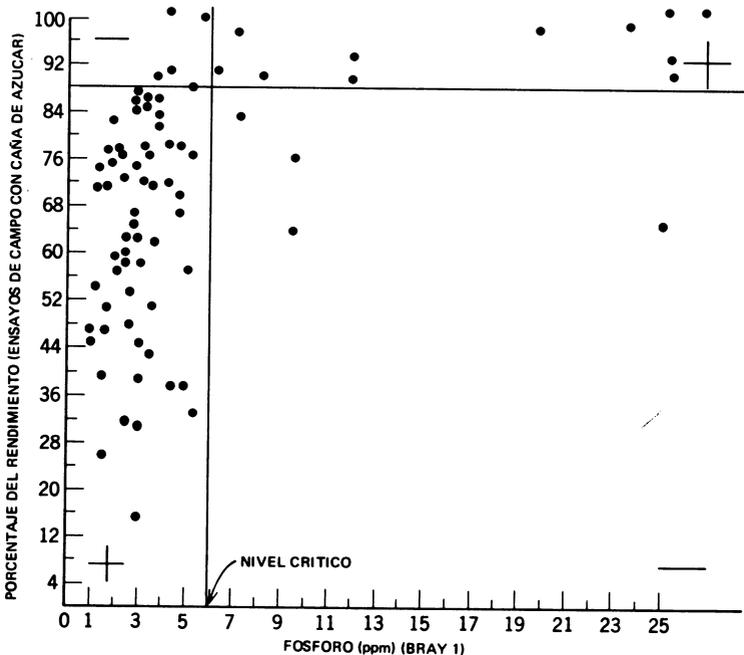


Fig. 9.3. Análisis de datos de caña de azúcar de Pernambuco, Brasil, por el método Cate-Nelson. Cada punto representa una parcela de campo. (Fuente: ISFEIP, 1967).

nivel crítico para el método de análisis de suelo bajo consideración. El punto en que la línea horizontal corta el eje 'y' separa a los suelos de respuesta alta de los de respuesta baja. Por lo tanto, el nivel crítico divide los puntos con probabilidad de una respuesta de rendimiento grande, de los con poca probabilidad de que se obtenga respuesta.

En comparación con las técnicas convencionales de correlación, el método Cate-Nelson tiene algunas ventajas fundamentales y prácticas. Al separar los puntos de los datos en dos poblaciones, sigue la Ley del Mínimo de Leibig por cuanto el nivel crítico es el punto más allá del cual el nutrimento de que se trata deja de ser un factor limitante. En contraposición, los modelos de regresión continuos no presentan puntos de inflexión y obligan a que los agrupamientos sean arbitrarios. La ventaja principal del procedimiento Cate-Nelson es que reconoce la limitación básica de las pruebas de suelo: éstas sólo son capaces de separar los suelos con probabilidad de responder al fertilizante de los que probablemente no respondan. De esa manera la población se separa en dos categorías de suelo-cultivo.

Otra ventaja es que el método identifica los suelos en que la solución extractora no trabaja bien (los puntos que quedan en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho). Ellos pueden someterse a mayor estudio y refinamiento.

La simplicidad de este procedimiento tiene una importante ventaja práctica, particularmente en laboratorios tropicales sin acceso fácil a computadoras. Todo lo que se necesita es un pedazo de papel transparente en lugar de los complejos cálculos matemáticos que hay que hacer por medio de computadoras. Sin embargo, la validez estadística de la técnica también ha sido comprobada adecuando un modelo de regresión lineal discontinuo y comparándolo con los modelos curvilíneos convencionales (Cate y Nelson, 1971). En el Cuadro 9.3 se

CUADRO No. 9.3. Comportamiento de distintos modelos matemáticos en una muestra mundial de correlaciones entre rendimientos relativos y niveles de análisis de suelo. (Fuente: Cate y Nelson, 1971).

Modelo de regresión	Ecuación	R ²
Cuadrática	$Y = b_0 + b_1 x - b_2 x^2$	0,58
Logarítmica	$Y = b_0 + b_1 (\log x)$	0,59
Mitscherlich	$Y = A(1 - e^{-cx})$	0,66
Cate-Nelson	$Y = b_0 + b_1 x_1$	0,73
	donde $x = 0$ si es inferior al nivel crítico $x = 1$ si es superior al nivel crítico	

compara este modelo con los modelos convencionales cuadrático, logarítmico y de Mitscherlich en una colección mundial de datos de correlación de pruebas de suelo-rendimiento relativo. Los coeficientes de determinación (valores de R^2) fueron un poco más altos con el modelo nuevo.

El uso de esta técnica se muestra en las Figs. 9.4, 9.5 y 9.6. El primer paso, la comparación de distintos métodos de análisis de suelo, se llevó a cabo en el invernadero (Fig. 9.4). En este caso todos los métodos correlacionaron bien, y cada uno de ellos produjo un nivel crítico específico. Luego los resultados se llevaron al campo usando el método de Carolina del Norte. Los resultados confirmaron que 10 ppm era el nivel crítico bajo condiciones de campo (Fig. 9.5).

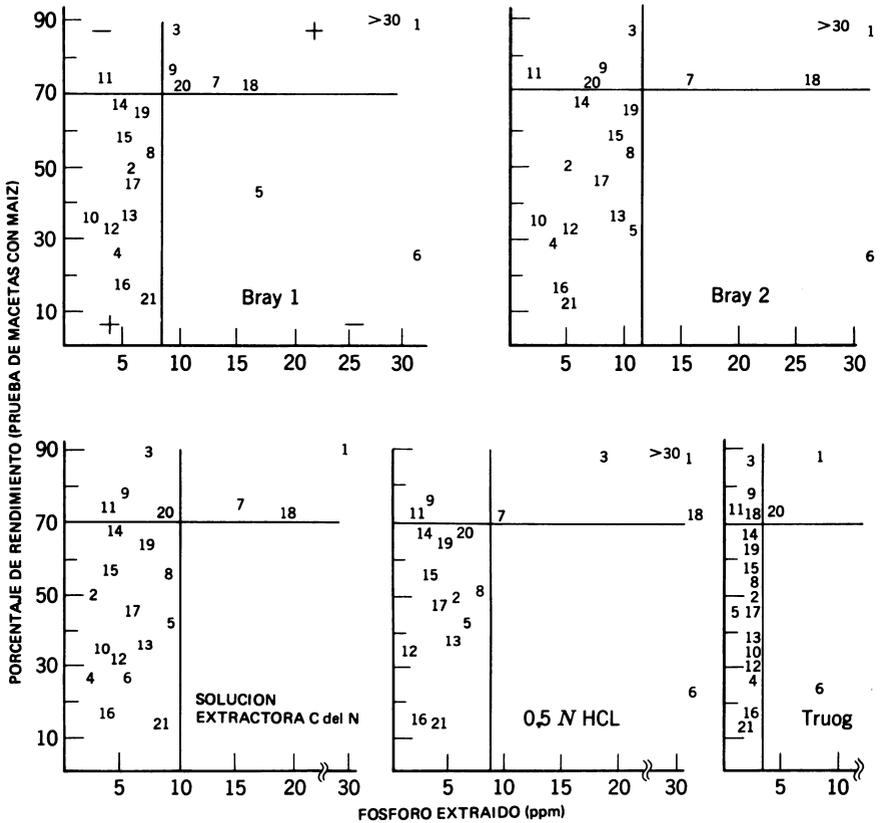


Fig. 9.4. Correlación entre niveles de pruebas de suelo y rendimientos relativos usando varios métodos de pruebas de suelo en experimentos de invernadero con maíz, en Recife, Brasil. Los números indican la cantidad de puntos de datos en cada posición. (Fuente: ISFEIP, 1967).

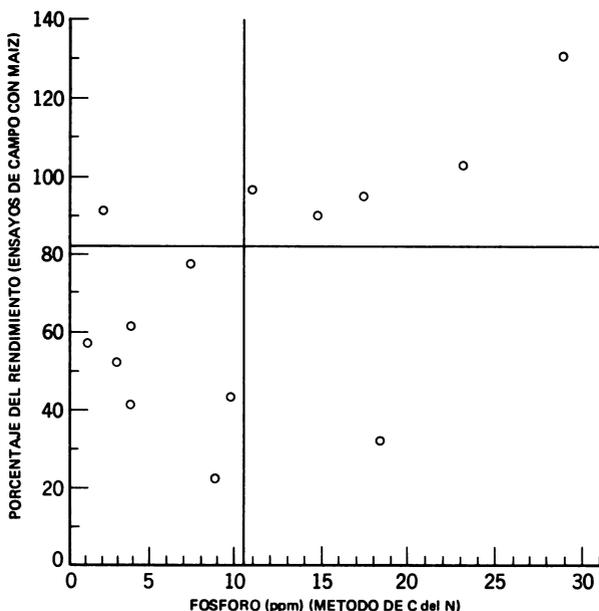


Fig. 9.5. Correlación entre el método escogido de prueba de suelo y la respuesta de maíz en el campo, en Recife, Brasil, según resultados de la Fig. 9.4. (Fuente: ISFEIP, 1967).

El nivel crítico es específico para ciertas situaciones de suelo-cultivo, aun con las mismas soluciones extractoras. Por lo tanto cada laboratorio debe establecer sus propios niveles críticos para sus suelos y cultivos de mayor importancia. Por ejemplo, en el Perú se encontraron dos niveles críticos para zinc cuando la población de suelos se dividió en suelos calcáreos y ácidos (Fig. 9.6). Este ejemplo confirma la fuerte influencia descrita antes del nivel del pH en el zinc disponible y muestra la forma en que las correlaciones pueden refinarse con tales agrupaciones. Los cultivos con diferentes necesidades nutritivas probablemente tengan distintos niveles críticos. Por ejemplo, Goswami et al (1971), recopilaron un número grande de estudios de correlaciones y encontraron un nivel crítico de 30 ppm de P (Olsen) para arroz inundado y de 49 ppm de P para trigo en Vertisoles. Esta diferencia probablemente se debe a la menor necesidad de fósforo del arroz y quizás también a la mayor disponibilidad de fósforo bajo condiciones de anegamiento.

El método Cate-Nelson es ampliamente usado ahora en los trópicos (Goswami et al, 1971; Roufunnisa et al, 1971; Subramanian, 1971; Baynes y Walmsley, 1973; Palencia, 1974; Cano, 1973; Perur et al, 1974). En algunos laboratorios se modifica la interpretación

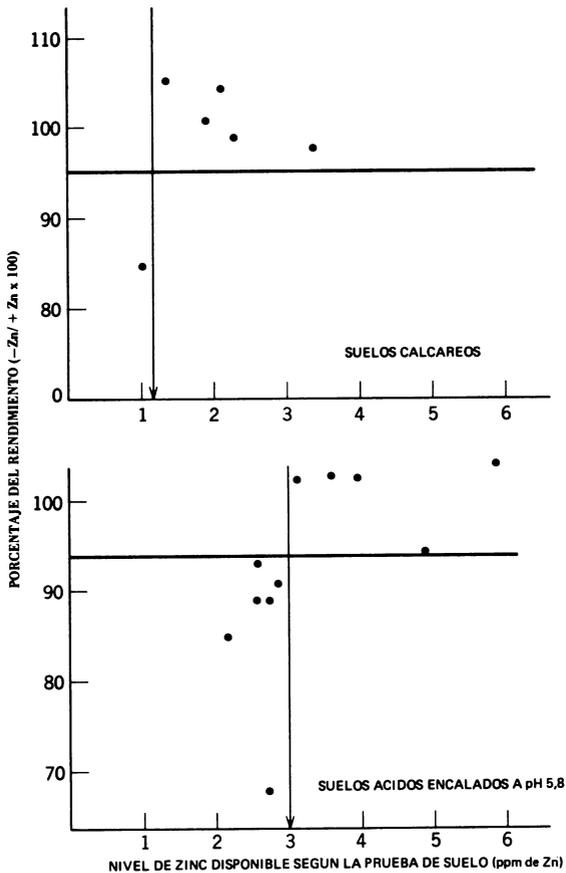


Fig. 9.6. Correlación entre análisis de suelo para determinar zinc disponible y respuesta de rendimiento a zinc aplicado a sorgo en suelos de la costa, la sierra y la selva de Perú. (Fuente: ISFEIP, 1968).

separando los suelos en niveles “bajo”, “medio” y “alto” (Hauser, 1973). El método Cate-Nelson no se ha usado en los programas de análisis rutinarios de suelo en Estados Unidos ni Australia. Los métodos de correlación en estos países se basan en programas de computación de regresión múltiple, con un énfasis fuerte en las interacciones entre los elementos nutritivos (Cope y Rouse, 1973; Hanway, 1973; Colwell, 1971).

INTERPRETACION Y RECOMENDACIONES

Aunque el nivel crítico separa los suelos con alta probabilidad de respuesta al fertilizante de aquellos con poca probabilidad, no dice

nada con respecto a la dosis que debe recomendarse. De la misma manera, las correlaciones hechas de acuerdo con regresiones continuas no indican cuánto fertilizante se debe recomendar. Las recomendaciones de fertilizantes sólo se obtienen mediante ensayos de campo. Como los ensayos de campo son caros los suelos deben seleccionarse cuidadosamente y el número de experimentos debe ser relativamente pequeño para poder manejarlos con todo cuidado.

El propósito de la interpretación de los análisis de suelo es establecer la cantidad de cada nutrimento que debe aplicarse para lograr una cierta respuesta de rendimiento en una categoría predecible de cultivo-suelo (Waugh et al, 1973). Una categoría separada de cultivo-suelo indica que la interpretación debe ser distinta para suelos que están encima o debajo del nivel crítico y también para cultivos diferentes. La Fig. 9.7 resume los resultados de varios años de ensayos con trigo en Bolivia, bajo condiciones de irrigación como de secano. Este ejemplo sugiere que los ensayos debieran hacerse probando suelos inferiores al nivel crítico, una vez determinado éste, y que la falta de respuesta de suelos superiores al nivel crítico debiera confirmarse en el campo.

Como en el caso de las correlaciones, dos métodos principales de interpretación de pruebas de suelos se usan en los trópicos: el método continuo (curvilíneo), y el discontinuo (lineal).

Modelos continuos. Estos modelos clásicos se basan en la ley de rendimiento decreciente, donde funciones curvilíneas apropiadas se ajustan a los datos de respuesta de rendimiento. Las funciones más

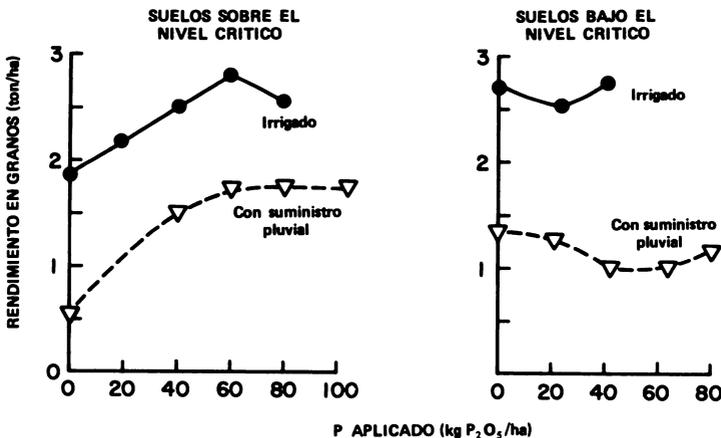


Fig. 9.7. Contraste entre respuestas de trigo a fósforo en suelos con niveles superiores o inferiores al nivel crítico (7 ppm de P Olsen) en Bolivia, bajo condiciones de anegamiento y de suministro pluvial. (Fuente: adaptado de Waugh y Manzano, 1971).

comunes son la cuadrática, la raíz cuadrada, la logarítmica, y la de Mitscherlich. Las técnicas estadísticas determinan cuál función se ajusta mejor a los datos al proporcionar el mayor coeficiente de determinación (R^2). La dosis óptima de fertilizante está en el punto de la curva en que el ingreso marginal iguala al costo marginal (es decir, el punto en el precio del último incremento de rendimiento iguala al costo del último aumento de fertilizante). Este punto puede determinarse matemáticamente o gráficamente mediante el dibujo de una línea de la razón precio-costo, expresada en los equivalentes agronómicos, en el diagrama de respuesta de rendimiento. El rendimiento óptimo se determina entonces en el punto en que una tangente de la línea de la razón precio-costo corta la curva de respuesta.

Entonces, se preparan ecuaciones de respuesta de rendimiento de acuerdo con los agrupamientos hechos durante el proceso de correlación de cada grupo. Si se usa la técnica de Cate-Nelson, se pueden desarrollar ecuaciones para probar suelos superiores e inferiores al nivel crítico. Si la continuidad se separa en categorías “muy baja”, “baja”, “media” y “alta” y “muy alta”, habrá cinco funciones de respuesta y una recomendación de dosis óptima de fertilizante para cada categoría. En la Fig. 9.8 se presenta un ejemplo de este segundo

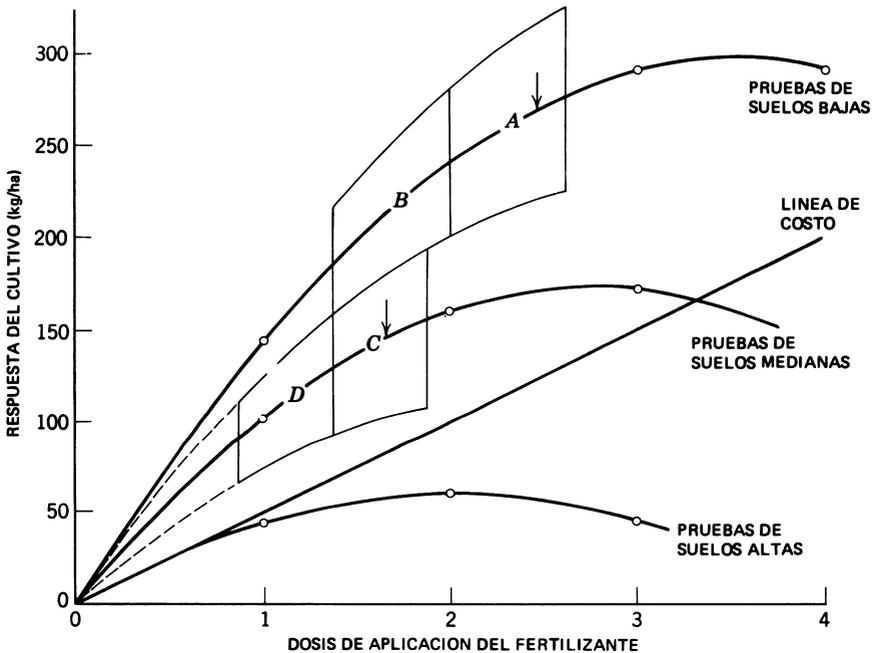


Fig. 9.8. Gráfica de interpretación usando funciones continuas de respuesta curvilínea en experimentos de fertilización de algodón de la Fig. 9.1. Las flechas indican dosis económicas óptimas. (Fuente: adaptado de Hauser, 1973).

procedimiento, basado en los datos de correlación de las Figs. 9.1 y 9.2. La Fig. 9.8 presenta una modificación útil: indica un ámbito óptimo, más que un nivel óptimo. Los ámbitos A y C reflejan recomendaciones para una mayor ganancia por hectárea, mientras que B y D son áreas de menor costo del fertilizante y mayor utilidad por unidad de fertilizante (Hauser, 1973). Interpretaciones similares para otras alternativas económicas han sido presentadas por Heady y Ray (1971). Esta modificación es útil para manejar las incertidumbres económicas típicas de los países en desarrollo.

Cuando hay deficiencia de más de un elemento, los modelos de regresión toman esto en cuenta, así como las interacciones entre esos elementos. Las dosis recomendables se determinan por medio de la solución de ecuaciones simultáneas.

Los modelos continuos también se usan de manera diferente para producir una función que toma en cuenta los niveles de análisis de suelos como variables, así como otras variables relacionadas con el suelo, clima y propiedades del manejo, en un intento por tomar en cuenta las variables no controladas. Esta es la filosofía que prevalece en Estados Unidos (Hanway, 1971; Walsh y Beaton, 1973) y en Australia (Colwell, 1971). Una ecuación de rendimiento concerniente a rendimientos de maíz en Iowa con factores controlados e incontrolados, incluía 30 variables (Hanway, 1971). Una ecuación para fertilización de papa en Perú necesitó 27 variables (Ryan y Perrin, 1973). Los niveles óptimos de fertilizantes se calculan con base en ciertos niveles de precios de los cultivos, costos de fertilizantes, lluvias que se esperan, y propiedades del suelo.

Tales modelos complejos son efectivos cuando hay información adecuada acerca de las variables involucradas y cuando los precios son estables. Sin embargo, ellos generalmente fallan en los trópicos debido a insuficiencia de datos para cuantificar todas las variables. Su uso en las regiones tropicales está limitado al análisis posterior en áreas con información detallada. No resultan satisfactorios como herramientas de predicción.

Los modelos cuadráticos también tienen limitaciones. Anderson y Nelson (1975) encontraron que los modelos cuadráticos se sesgan cuando hay una respuesta marcada al primer incremento de fertilizante, seguida por poca o no respuesta con dosis mayores. En tales casos las recomendaciones de dosis óptimas de fertilizantes son irrealísticamente altas.

Las recomendaciones óptimas de fertilizantes varían con las razones de precio-costo que son característicamente más erráticas en los trópicos que en los países desarrollados. Dichas recomendaciones son tan buenas como los precios pronosticados.

Modelo discontinuo lineal. Una serie de estudios llevados a cabo en Inglaterra por Boyd (1970, 1974) y en Estados Unidos por Bartholomew (1972) resumieron muchas funciones de respuestas a

fertilizantes en todo el mundo y separadamente llegaron a la conclusión de que en la mayoría de los casos las curvas de respuestas a fertilizantes pueden caracterizarse por un marcado aumento lineal seguido por una línea recta horizontal.

Waugh, Caté y Nelson desarrollaron luego el modelo "respuesta lineal y (plateau)" que también se basa en la Ley del Mínimo de Leibig, y es una extensión lógica del modelo de correlación de Cate-Nelson (Waugh et al, 1973, 1975). En este modelo la respuesta a fertilizantes de un campo o grupo de campos está representada por dos líneas rectas para cada nutrimento individual. La primera línea representa la respuesta marcada de un nutrimento que se agrega hasta que deje de ser factor limitante. Esto es seguido por una meseta o ("plateau") donde las adiciones posteriores no aumentan el rendimiento. La curva de respuesta de rendimiento construida de esa manera consiste de tres puntos principales: 1) el "umbral de rendimiento" que es el rendimiento al nivel cero del fertilizante considerado, pero no de todos los elementos nutritivos; 2) el "rendimiento (plateau)" que es el rendimiento en el punto en que el elemento deja de ser factor limitante; no es el rendimiento máximo por cuanto otros factores pueden aún limitar el rendimiento; 3) y el "rendimiento relativo" que es el umbral de rendimiento dividido entre el rendimiento ("plateau"). La dosis de fertilizante necesaria para alcanzar el rendimiento "plateau" es la dosis que se recomienda del nutrimento en consideración.

Cuando un elemento deja de ser limitante, otros lo pueden ser aún. Este concepto, que constituye la interpretación clásica de la Ley del Mínimo de Leibig está ilustrado en la Fig. 9.9. El rendimiento plateau final es el efecto de limitaciones genéticas, radiación solar, y otras variables no controladas.

Estudios de regresión indican que no hay diferencia entre este modelo y los curvilíneos en términos de determinación de coeficientes (R^2). El modelo de respuesta lineal y de plateau proporcionaron la mayor R^2 en 27 de las 37 funciones de respuesta estudiadas por Waugh et al, (1973). Aunque la verdadera función biológica es curvilínea, la interpretación de ésta como dos líneas rectas es de considerable valor al simplificar la interpretación de las pruebas de suelo. Así mismo proporciona recomendaciones más reales de las dosis, por cuanto se elimina el prejuicio hacia las recomendaciones de dosis demasiado altas típicas de la ecuación cuadrática.

Waugh et al, (1973) describió detalladamente la adecuación de las dos líneas rectas. Esta puede hacerse por suelo individual, o por categorías de suelo-cultivo separadas por medio de las técnicas de Cate-Nelson para cada cultivo; también gráficamente, dibujando una línea recta a lo largo de puntos que muestran aumento y otra a lo largo de los puntos horizontales; o estadísticamente por medio de las diferencias menos significativas entre los puntos del rendimiento

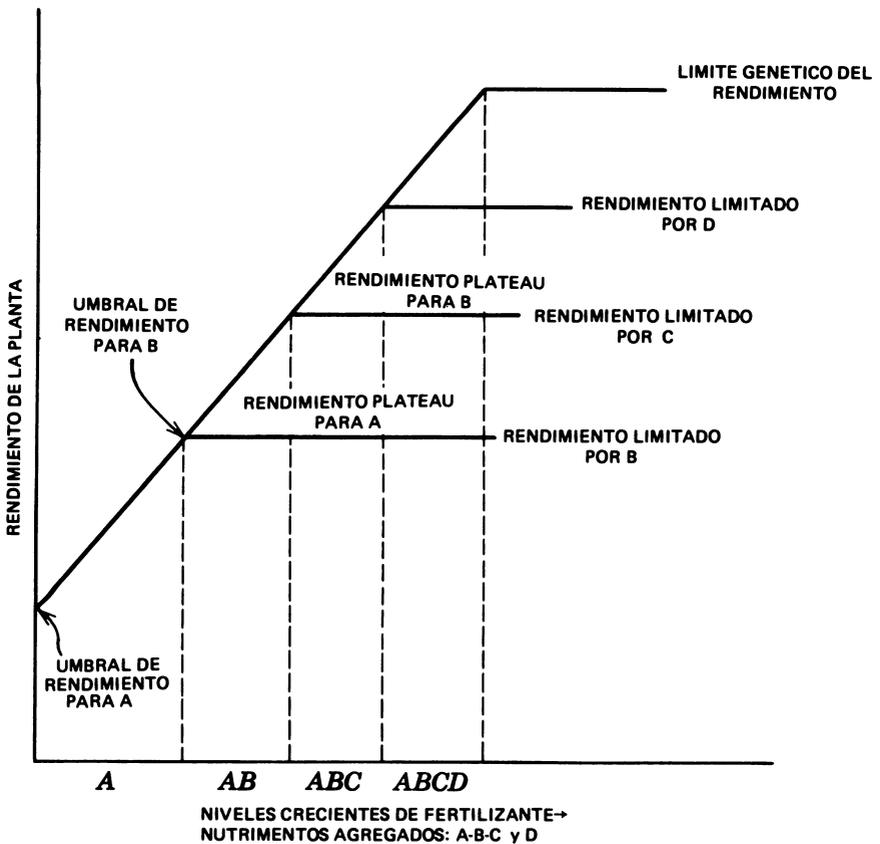


Fig. 9.9. Modelo de respuesta lineal y plateau (RLP) basado en la ley del mínimo de Leibig. (Fuente: Waugh et al, 1973).

“plateau” y de otras técnicas estadísticas más refinadas. En la mayoría de los casos una adecuación visual es suficiente. Este modelo hace caso omiso de los descensos de rendimiento con dosis de fertilizante excesivamente altas. Esta parte de la curva, cuando existe no tiene significación en las recomendaciones de análisis de suelo.

En la Fig. 9.10, lado izquierdo, se presenta una adecuación de una respuesta lineal y una función de “plateau” de un elemento individual (nitrógeno) en un grupo de suelos de Bolivia. En la Fig. 9.11 se ilustra la interpretación de las respuestas para separar los nutrimentos con base en la misma categoría de suelo-cultivo de la Fig. 9.10. La Fig. 9.11 muestra una respuesta fuerte al nitrógeno y al fósforo y débil al potasio. La escogencia de la recomendación depende del nivel de rendimiento deseado. Se requiere una dosis de 25-0-0 para elevar el rendimiento al umbral del fósforo (ausencia de P); una dosis de

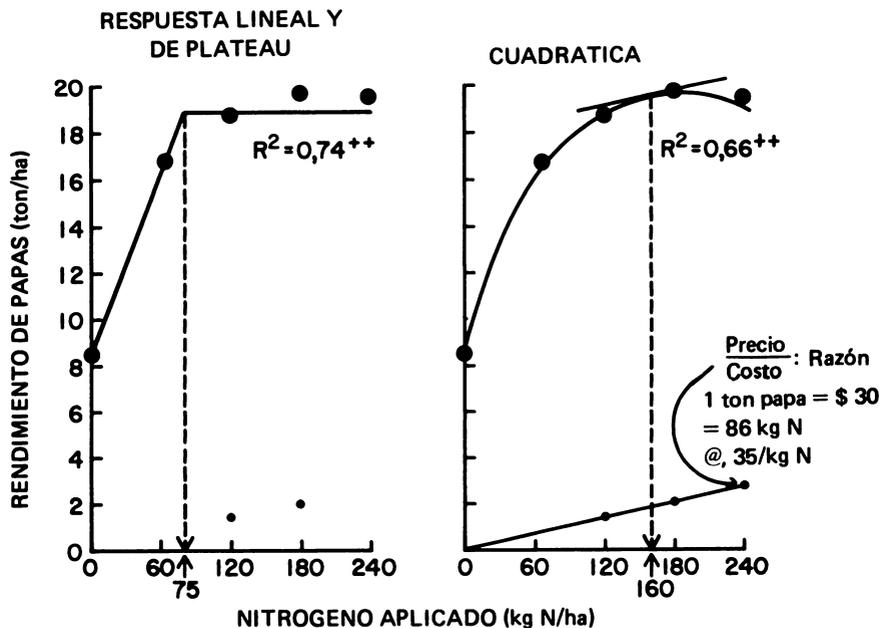


Fig. 9.10. Determinación de recomendaciones sobre nitrógeno en una serie de experimentos de campo en Bolivia, de acuerdo con la respuesta plateau lineal y los modelos curvilíneos convencionales. Cada punto representa la media de varios experimentos de campo en una categoría dada de suelo-cultivo. (Fuente: adaptado de Waugh et al, 1973).

65-60-0 para elevar el rendimiento al umbral del potasio (ausencia de K); y una dosis de 75-70-20 para alcanzar el rendimiento máximo bajo estas condiciones. La decisión entre estas cuatro escogencias (incluyendo ausencia de fertilización) se basa en una especie de análisis marginal que se muestra en el Cuadro 9.4. Si se sigue la regla de no recomendar dosis que produzcan menos de \$1,50 por dólar invertido en fertilizante, la recomendación será 60-55-0. Otros factores, tales como riesgo pueden tomarse en consideración al hacer la decisión final.

La comparación de los dos procedimientos, con la misma serie de datos se presenta en la Fig. 9.10. Las líneas de puntos indican cómo se llegó a las recomendaciones de fertilizante. El modelo lineal de respuesta sólo tiene un punto óptimo independiente de costo y precio. El modelo curvilíneo muestra un punto óptimo basado en la razón particular de precio:costo en el momento en que los experimentos se llevaron a cabo. Es interesante observar las marcadas diferencias entre las dosis óptimas recomendadas por los dos métodos. El modelo de respuesta lineal y de "plateau" tiene una dosis recomendada menor por cuanto intenta alcanzar un rendimiento "plateau"

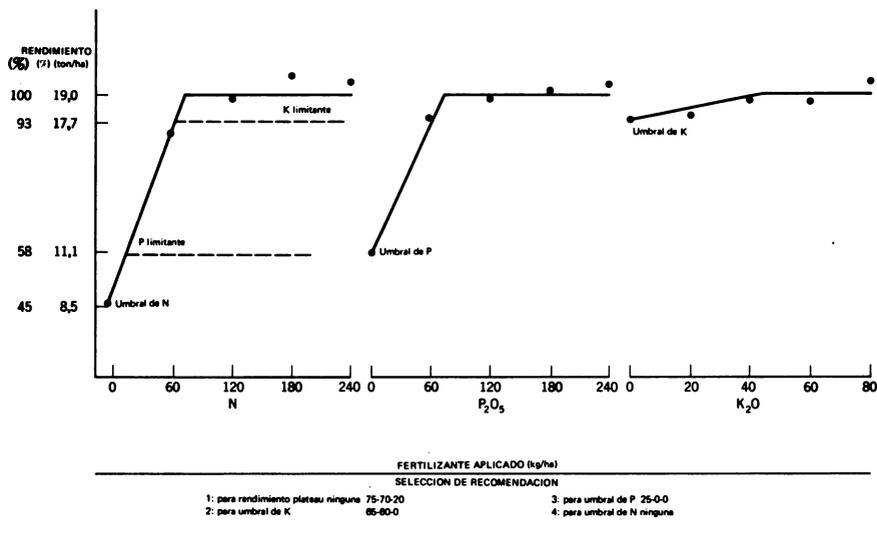


Fig. 9.11. Interpretación de respuestas a multinutrientos y desarrollo de recomendaciones sobre fertilizantes usando modelos combinados de fertilizantes simples de RLP en fertilización de papa en Bolivia. (Fuente: Waugh et al, 1973).

de apenas unas 19 ton/ha. Esta dosis proporciona casi rendimientos máximos a la vez que mantiene un ingreso eficiente por unidad de fertilizante por cuanto todavía está en la pendiente de incremento. En este caso el modelo cuadrático casi duplica las recomendaciones óptimas para un rendimiento de 20 ton/ha, el cual está en la parte relativamente horizontal de la curva, en donde la variabilidad es bastante alta. Cambios pequeños de rendimiento dan por resultado cam-

CUADRO No. 9.4. Análisis económico de los datos de respuestas de la Fig. 9.11 que se usaron para llegar a las recomendaciones de fertilizantes. (U.S.\$/ha). (Fuente: adaptado de Waugh et al, 1973).

Recomendación de fertilizante a escoger (kg N-P ₂ O ₅ -K ₂ O/ha)	Rendimiento promedio de papa (ton/ha)	Valor de la cosecha US\$30/ton	Aumento marginal en el valor de la cosecha	Costo del fertilizante	Aumento marginal en el costo del fertilizante	Razón de valor marginal costo marginal
0-0-0	8,5	255	-	0	-	-
25-0-0	11,1	333	78	10	10	7,8
60-55-0	17,7	531	198	40	30	6,6
70-65-40	19,0	570	39	60	20	1,9

bios grandes en las dosis recomendadas. Con otras comparaciones, sin embargo, la diferencia en las dosis recomendadas puede no ser tan grande como en este ejemplo.

¿Cuál es el procedimiento correcto? La respuesta puede derivarse del análisis económico posterior. El Cuadro 9.5 presenta datos de respuesta a nitrógeno de arroz analizados de acuerdo con el modelo cuadrático (Sánchez et al, 1973). Por medio de la técnica gráfica se computaron los rendimientos "plateau" y las dosis recomendadas. El promedio de nitrógeno recomendado fue de 224 kg/ha de N de acuerdo con el modelo cuadrático, y 170 kg/ha de N con el modelo lineal. El ingreso bruto promedio producto de la fertilización con las dosis recomendadas fue de \$486/ha con el modelo cuadrático, y \$457/ha con el modelo de respuesta lineal y "plateau". La diferencia no es estadísticamente significativa. El ingreso neto por dólar invertido en fertilizante fue superior en el modelo lineal y "plateau", \$8,8 versus \$6,1 por dólar gastado. En el Cuadro 9.6 se presenta una comparación entre el modelo lineal y "plateau" con una función cuadrática de respuesta generalizada, con 20 variables en 26 experimentos con maíz en Minas Gerais, Brasil. En este caso no hubo diferencia significativa en las dosis recomendadas ni provecho de la predicción, pero ambos modelos sobreestimaron las dosis necesarias para la combinación verdaderamente más productiva.

CUADRO No. 9.5. Recomendación de dosis de nitrógeno de una serie de experimentos con arroz, con urea revestida con azufre, en Perú, con base en el análisis marginal de la curva cuadrática (como se publicó originalmente) y de acuerdo con el modelo gráfico de respuesta lineal y de "plateau". (Fuente: adaptado de Sánchez et al, 1973).

Experi- mento No.	Recomendación de N (kg N/ha)		Ingreso sobre el fertilizante (US\$/ha)		Ingreso neto por dólar gastado en fertilizante (US\$/ha)	
	Modelo cuadrático	Modelo RLP	Modelo cuadrático	Modelo lineal y "plateau"	Modelo cuadrático	Modelo RLP
1	266	160	406	385	4,5	7,1
2	201	180	522	493	7,7	8,1
3	372	240	617	648	4,9	7,9
4	258	160	529	475	6,0	8,8
5	290	160	708	617	7,2	11,4
6	147	90	465	448	9,3	14,9
7	186	120	300	225	4,7	5,5
8	222	160	338	361	4,5	6,7
Media	224	170	486	459	6,1	8,8
DMS _{0,05}				52		

CUADRO No. 9.6. Comparación de dosis recomendadas y retorno determinado por el modelo gráfico de respuesta lineal y de "plateau" y por una ecuación cuadrática generalizada con 20 variables: media de 26 experimentos con maíz en Minas Gerais, Brasil. (Fuente: North Carolina State University, 1973).

Modelo usado	Dosis recomendada (kg/ha)		Provecho con las dosis recomendadas (Cr\$/ha)
	N	P ₂ O ₅	
Mejor tratamiento actual	107	50	1460
Gráfico RLP	120	85	1118
Cuadrática computada	127	64	1109

La decisión sobre el modelo a usarse puede variar de acuerdo con las inclinaciones individuales y la disponibilidad de computadoras. El modelo de respuesta lineal y "plateau" es nuevo y controversial. Se ha aplicado con buen éxito en varios países (Perur et al, 1974; Palencia, 1974), es tan bueno para predecir respuestas de rendimiento como el modelo cuadrático. Además, el modelo de respuesta lineal y de "plateau" tiene una ventaja muy práctica y no requiere computadora ni cálculos complicados. El hecho de que el precio sólo entre en consideración en las etapas finales de la interpretación también es útil. Un aspecto significativo del proceso de interpretación es que se puede llegar a las recomendaciones sobre fertilizantes sin necesidad de datos de análisis de suelo. Así es como generalmente se hacen las recomendaciones sobre nitrógeno, debido a la falta general de análisis rutinarios de suelo aceptables para nitrógeno, pero no es una vía corta de valor para otros elementos nutritivos. Los valores de las pruebas de suelo ayudan mucho en la separación de categorías de suelos que sirve de base para la interpretación. Según Waugh (1973) las mejores interpretaciones son la que se hacen para categorías específicas de suelo-cultivo.

USO DE LAS RECOMENDACIONES

Cualesquiera que sea la forma en que se determinan las recomendaciones sobre fertilizantes, éstas carecen de valor si el agricultor no las pone en práctica. Su aplicación eficaz depende de los aspectos educativos y de extensión del programa de evaluación de suelos, así como de la validez de sus recomendaciones. Los aspectos educativos y de promoción se dirigen inicialmente a atraer la atención del agricultor. Generalmente este esfuerzo incluye días de campo, parcelas demostrativas, programas radiales, y ayudas audiovisuales. Una vez que los agricultores están familiarizados con el programa, aceptarán o rechazarán.

zarán las recomendaciones. En las áreas tropicales en donde los rendimientos son bajos, para que los rendimientos esperados llamen la atención deben ser por lo menos el doble de los rendimientos sin fertilización (Fitts, 1971). Conforme aumentan los rendimientos promedio, incrementos menores pueden ser suficientes, pero al principio los programas de evaluación de fertilidad del suelo deben dar resultados muy buenos.

Los fracasos en estos esfuerzos se deben a muchos factores. Uno de los principales es la incapacidad para obtener respuestas de rendimiento de una magnitud tal que permita duplicar los rendimientos en áreas donde los rendimientos medios son bajos. Russell (1974) reconoció a éste como uno de los factores limitantes que impiden el uso extensivo de los fertilizantes en Africa. Ningún agricultor racional va a adoptar una práctica que puede aumentar sus rendimientos en un 10 ó 20%, si los riegos son mayores que eso. La falta de tales respuestas de rendimiento puede deberse a una investigación incompleta, tal como estudios limitantes de correlación en la etapa de invernadero o a la extrapolación de unos pocos resultados de campo de un cultivo a otros muy distintos.

Los programas satisfactorios de evaluación de la fertilidad del suelo también resumen su información por regiones o subdivisiones políticas para cada cultivo de mayor importancia. Se dispone de ejemplos de estos resúmenes de países de América Central (ISFEIP, 1967), Venezuela (Chirinos et al, 1971), Perú (Cano, 1973) y muchos otros países. Estos resúmenes indican los principales problemas de fertilidad y son útiles para determinar las razones de P:K de las mezclas de fertilizantes que una región debiera usar.

Las recomendaciones específicas sobre fertilizantes deben ser claras y correctas. Deben incluir no sólo las dosis recomendadas para cultivos y suelos específicos, sino también las mejores fuentes de los fertilizantes, método de colocación y fechas de aplicación, derivados de otros proyectos de investigación. Un ejemplo excelente son las recomendaciones sobre fertilizantes del Estado de Minas Gerais, Brasil (PIPAEMG, 1972).

En áreas en donde se han puesto en práctica las evaluaciones de fertilidad de suelos del tipo descrito, existen correlaciones positivas entre el número de pruebas de suelo y el consumo de fertilizantes (Kanwar, 1971; ISFEIP, 1972). Aunque una correlación no significa una relación causa-efecto, los buenos análisis de suelo y el aumento en el consumo de fertilizantes marcha a la par. Al comienzo de un programa es probable que al intensificarse los análisis de suelo aumente el uso de fertilizantes; conforme las prácticas de fertilización se extienden, el incremento en la demanda de fertilizantes se hacen necesarios más análisis de suelos.

INVESTIGACION

La última fase de la evaluación de la fertilidad del suelo es la investigación para mejorar la calidad de las recomendaciones. Esto involucra la búsqueda de soluciones a problemas de las muestras por medio de investigación de invernadero, análisis de cultivo, y averiguar por qué algunos suelos están en el cuadrángulo incorrecto del gráfico de correlación. En la lista de referencias se encuentran ejemplos de proyectos de investigación. Los nuevos métodos de extracción y las técnicas mejoradas de laboratorio deben evaluarse bajo condiciones locales. Como cualquier otra función de servicio, la evaluación de la fertilidad del suelo requiere investigación para mantenerla al día. De los avances en los últimos años se desprende que ésta es una área muy productiva de investigación e innovación.

SISTEMAS DE EVALUACION DE LA FERTILIDAD BASADOS EN ANALISIS FOLIARES

Otros sistemas de evaluación de la fertilidad del suelo se basan en análisis de plantas. Estos están muy extendidos en áreas que carecen de sistemas efectivos de análisis de suelo y especialmente en cultivos permanentes. La división entre sistemas de evaluación de fertilidad basados en análisis de suelo y los que utilizan los análisis foliares, es un tanto arbitraria porque el análisis de plantas es un componente de los sistemas que se basan en pruebas de suelo y viceversa. Sin embargo, algunos sistemas de evaluación se basan en primer lugar en análisis de plantas.

El análisis de plantas tiene una ventaja fundamental: integra los efectos del suelo, la planta, el clima, y el manejo. En esta forma constituye la mejor medida de la disponibilidad de los nutrimentos. Sin embargo el análisis foliar tiene una desventaja fundamental: en el momento en que el análisis señala un problema nutritivo, es ya muy tarde para corregirlo sin que se produzca una considerable pérdida de rendimiento.

Los análisis foliares se hacen con tres propósitos principales: 1) para identificar problemas nutritivos y cuantificar su corrección por medio del establecimiento de niveles críticos; 2) para computar niveles de absorción de nutrimentos, como clave para el uso de fertilizantes; y 3) para revisar la nutrición de cultivos perennes, práctica conocida como registro de observaciones y actividades (en inglés "crup logging").

NIVELES CRITICOS

Cuando se toman muestras de plantas de la misma parte anatómica y en la misma etapa de crecimiento, pueden establecerse ciertos nive-

les críticos, más arriba de los cuales la planta cuenta con un buen suministro del nutrimento en consideración y más abajo el suministro es insuficiente. Se necesita una segunda serie de niveles críticos para los nutrimentos que puedan estar presentes en cantidades tóxicas, tales como boro, hierro y manganeso, o de casos en que la cantidad excesiva de un nutrimento pueda ser causa de un descenso del rendimiento. Un ejemplo del último caso es el contenido excesivamente alto de nitrógeno en las variedades de arroz de porte alto. El ámbito comprendido entre esos dos niveles críticos se conoce como "ámbito de suficiencia". El término "nivel crítico" se usa corrientemente en conjunto con el umbral de deficiencia-suficiencia.

Los niveles críticos en los análisis de plantas siguen la ley del mínimo y esencialmente el mismo procedimiento del concepto de Cate-Nelson. La forma es de datos de concentración de nutrimentos versus datos de rendimiento relativo (Ulrich y Hills, 1973) que podrían separarse fácilmente usando la técnica Cate-Nelson. El nivel crítico de toxicidad es un factor adicional que comúnmente no se toma en cuenta en los análisis de suelos.

Los niveles críticos de los análisis de plantas son menos específicos en sitio y situación que los que se obtienen de análisis de suelo, siempre que se estandaricen con respecto a la parte de la planta, a su edad, y en algunos casos, a variedades. El Cuadro 9.7 presenta algunos ejemplos típicos de partes de plantas y etapas de crecimiento estandarizadas. Mayores detalles pueden encontrarse en las referencias que se citan en este cuadro así como en los artículos sobre el tema, de Wallace (1956), INEAC (1958), Malavolta et al, (1962), Ishizuka (1971), Walsh y Beaton (1973) y Okajima et al, (1975). Hay algunos cuadros excelentes de síntomas de deficiencias nutritivas en algunas de estas publicaciones, lo mismo que en "Hunger Signs in Crops" (Signos de Hambre en los Cultivos) de Sprague (1965).

Una mención rápida de la identificación de los síntomas visuales de las deficiencias nutritivas no significa que se niegue el valor de esta técnica. Sin embargo, la descripción de los síntomas visuales de las deficiencias nutritivas de los principales cultivos tropicales está más allá de la esfera de este libro. La habilidad de algunos agrónomos para identificar síntomas visuales de deficiencias es un elemento muy valioso en los programas de evaluación de la fertilidad del suelo. Estas observaciones visuales debieran confirmarse por medio de análisis químicos de la planta y relacionarse con los niveles críticos. Desafortunadamente, tanto las determinaciones visuales como las químicas se dificultan cuando hay deficiencias juntas de más de un elemento. Esta situación puede conducir a una acumulación de otros nutrimentos o a lo contrario. Los síntomas visuales pueden volverse aún más complejos cuando también hay síntomas de ataque de insectos o de enfermedades.

CUADRO No. 9.7. Ejemplos de niveles críticos que separan deficiencia y suficiencia en algunos cultivos.

Elemento	Caña de azúcar ¹	Arroz ²	Maíz ³	Soya ⁴
N (%)	1,5	2,5	3,0	4,2
P (%)	0,05	0,10	0,25	0,26
K (%)	2,25	1,0	1,90	1,71
Ca (%)	0,15	0,15	0,40	0,36
Mg (%)	0,10	0,10	0,25	0,26
S (%)	0,01	0,10	—	—
B (ppm)	1	3,4	10	21
Cu (ppm)	5	6	5	10
Fe (ppm)	±10	70	15	51
Mn (ppm)	10—20	20	15	21
Mo (ppm)	—	—	0,1	1,0
Zn (ppm)	10	10	15	21
Si (%)	—	5	—	—

- (1) De Humbert (1973). Los valores se refieren a las láminas de las hojas 2, 4, 5 y 6 excepto para P, K, Ca, Mg y Zn que representan envolturas foliares 2, 4, 5 y 6.
- (2) De Tanaka y Yoshida (1970). Los valores de N, P, K y Fe son para las láminas de las hojas en la etapa del macollaje; los valores de Ca, Mg, S, B y Cu para la paja en el momento de la cosecha; los valores de Mn y Zn para los tallos en la etapa del macollaje.
- (3) De Jones y Eck (1973). Todos los valores corresponden a la hoja de la mazorca al aparecer las flores masculinas excepto Mo, que representa la planta completa.
- (4) De Small y Ohlrogge (1973). Límite inferior del ámbito de suficiencia de láminas de hojas tripoliadas de la parte superior, completamente desarrolladas y muestreadas antes de la formación de las vainas.

ABSORCION DE NUTRIMENTOS COMO HERRAMIENTA DE PREDICION

El fracaso general de los análisis rutinarios de suelos para el nitrógeno ha estimulado un procedimiento completamente distinto para estimar dosis de fertilizantes nitrogenados. En una revisión de la literatura mundial, Bartholomew (1972) observó una relación constante entre rendimientos de cultivos de cereales y su absorción de nitrógeno total (incluyendo raíces). En la Fig. 9.12 se presenta esta relación para rendimientos comerciales de maíz, trigo y arroz. Las pendientes de las curvas indican que el maíz y el arroz tuvieron un promedio de 30 a 35 kg de granos por kg de N agregado, mientras que el promedio del trigo fue de solamente 15 a 20 kg. Se cree que la menor eficiencia del trigo resulte del clima generalmente más seco y

de la susceptibilidad al acamado de las variedades de porte alto. Si se conocen los rendimientos promedio sin fertilización con nitrógeno (umbral de rendimientos) y los rendimientos "plateau" en un área específica, la cantidad de nitrógeno necesaria para aumentar el umbral de rendimiento a "plateau" puede averiguarse de ese gráfico. Las relaciones de absorción-rendimiento de Bartholomew se ilustran en la mitad superior de la Fig. 9.12. Por ejemplo, si el umbral de rendimiento del maíz es de 2 ton/ha y se sabe que con fertilización nitrogenada y buen manejo hay probabilidad de 6 ton/ha, el

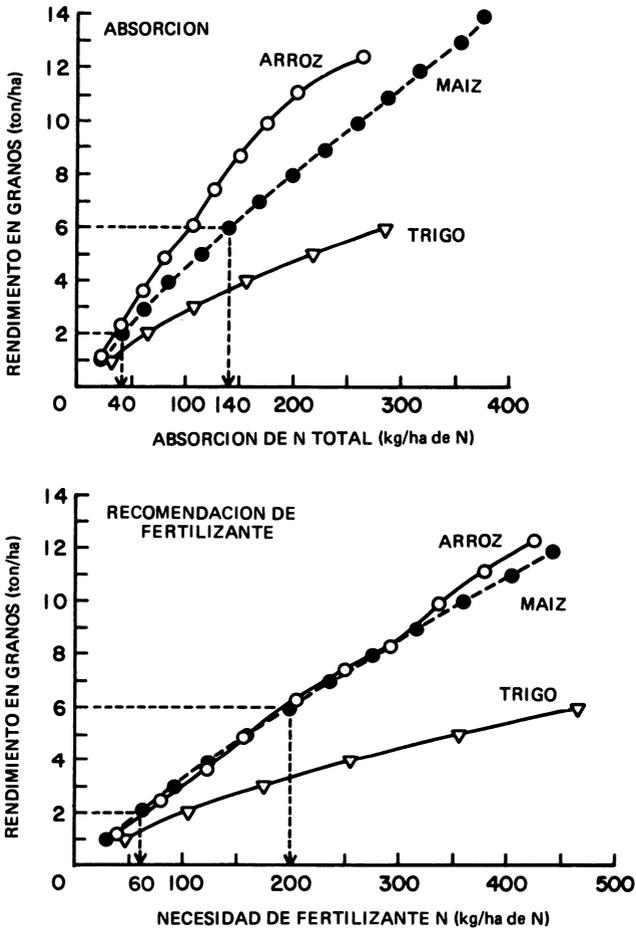


Fig. 9.12. Procedimiento para calcular dosis de nitrógeno con datos de absorción del cultivo, con base en el promedio de ensayos de campo y de recuperación promedio del fertilizante. El rendimiento se expresa en ton/ha de arroz (inundado) sin procesar. (Fuente: adaptado de datos de Bartholomew, 1972).

cultivo necesitará absorber 100 kg/ha de N extra (140-40) para alcanzar 6 ton/ha, siempre que el nitrógeno sea el principal factor limitante dentro de este ámbito de rendimiento. La Fig. 9.12 también muestra las diferencias en las necesidades de nitrógeno entre los tres cereales. El arroz necesitó cerca de 17 kg de N para producir una tonelada extra de arroz sin procesar, el maíz cerca de 25 kg de N y el trigo cerca de 42 kg de N. Estas cifras muestran que el trigo es el usuario menos eficiente de nitrógeno de estos tres cultivos.

No todo el fertilizante nitrogenado será extraído por la planta. La eficiencia en la utilización del fertilizante varía de acuerdo con el suelo, las variedades, el clima y el manejo. Con base en un reconocimiento mundial, Bartholomew (1972) calculó las necesidades reales de fertilizante nitrogenado a niveles alto, medio y bajo de eficiencia del fertilizante. La mitad inferior de la Fig. 9.12 se basa en la tasa media de recuperación del nitrógeno. Las tasas porcentuales de recuperación son 36 para el arroz, 72 para el maíz y 62 para el trigo. Las cantidades de fertilizante nitrogenado necesarias para un incremento dado de rendimiento son casi iguales para maíz y arroz, y tienen un ámbito de 30 a 35 kg de granos por kg de N. Sin embargo, la alta eficiencia del arroz en la absorción de nitrógeno está contrarrestada por la baja eficiencia del nitrógeno aplicado bajo condiciones de anegamiento, en comparación con el maíz. El trigo responde con una tasa de 15 a 20 kg de granos por kg de fertilizante, a pesar de la alta recuperación del fertilizante nitrogenado aplicado. La recomendación de fertilizante nitrogenado para aumentar el rendimiento del maíz de 2 a 6 ton/ha, sería de 140 kg de ha de N, que es la diferencia entre los puntos de la Fig. 9.12 marcados con flechas.

Estas estimaciones, así como los cuadros más detallados de la publicación de Bartholomew, se basan en generalizaciones amplias. Predicciones más precisas pueden hacerse con datos locales de absorción y eficiencia de la fertilización.

REGISTRO DE OBSERVACIONES Y ACTIVIDADES

Tal como se mencionó anteriormente, el análisis de plantas es particularmente útil en el caso de cultivos permanentes, en donde los análisis de suelos son menos significativos debido a la gran proporción de raíces en el subsuelo. Clements (1960) desarrolló un sistema intensivo de planta-muestreo, llamado "crop logging" para revisar el nivel de nutrimentos y de agua en plantaciones de caña de azúcar, como guía para la fertilización y el riego. Este sistema que luego se denominó registro de observaciones y actividades se usa en varias áreas productoras de caña, pero principalmente en Hawaii. Humbert (1963), lo describe detalladamente. Campos individuales se muestrean cada 35 días durante los seis primeros meses del crecimiento, y los resultados se ponen en gráficos. Los gráficos o diagramas muestran el

porcentaje de nitrógeno en las láminas de las hojas y los porcentajes de fósforo y potasio en las envolturas foliares alargadas. También se llevan registros de lluvia, temperatura, irrigación y altura de las plantas, y se anotan las prácticas de fertilización y de irrigación. Cuando el laboratorio de análisis foliar está en capacidad de analizar muestras de plantas rápidamente el registro de observaciones constituye una excelente medida del crecimiento del cultivo y aumenta la eficiencia de la fertilización y el riego. El registro de observaciones también se ha practicado en otros cultivos permanentes, pero no en cultivos de corta duración tales como maíz por cuanto no hay suficiente tiempo para utilizar los análisis.

SISTEMAS DE EVALUACION DE LA FERTILIDAD BASADOS EN LA TECNICA DEL ELEMENTO FALTANTE

Un tercer procedimiento muy importante se basa en la identificación de deficiencias de elementos nutritivos por medio de la técnica del elemento faltante. Esto involucra el uso de plantas indicadoras en el invernadero o en el campo en un suelo al que se le agrega un fertilizante completo, y una serie de tratamientos en los cuales se deja de agregar uno de los elementos. Generalmente las plantas se cosechan antes de su madurez.

Esta técnica ha sido usada en forma rutinaria por los investigadores del IRAT en Africa de habla francesa en donde la primera etapa del proceso de evaluación consiste de pruebas de macetas en el invernadero en las que se usan cereales como plantas indicadoras (Kilian y Velly, 1964; Chaminade, 1972; Charreau, 1974). Este procedimiento también se ha usado en pruebas de invernadero en Costa Rica (Martini, 1969b) y en Gambia (Webb, 1955); por ISFEIP (1971, 1972, 1973) con recipientes plásticos pequeños en América Latina; y en el campo con "microparcels" de maíz, con menos de 1 m² de superficie, por tratamiento en Costa Rica y Brasil (Hardy y Bazán, 1966; Alvim, 1968; Martini, 1969a; Cordero y Salas, 1971).

Según Chaminade (1972) los experimentos en macetas con la técnica del elemento faltante dan tres tipos de información: 1) cuáles elementos son deficientes; 2) la importancia relativa de las deficiencias; y 3) la tasa a que se agota la fertilidad con los cortes sucesivos cuando se usa un pasto como planta indicadora. Los investigadores del IRAT consideran que las deficiencias son serias si la producción de materia seca baja al 40% o menos del tratamiento completo. Los experimentos en macetas son seguidos por ensayos de campo con los elementos faltantes apropiados y sirven de base para las recomendaciones sobre fertilizantes. El procedimiento francés pone énfasis en los reconocimientos de suelos para seleccionar aquellos con que se va a trabajar. Los experimentos para determinar las dosis se complementan con investigación sobre sistemas de rotación, efectos residuales de la fertilización, y las cantidades necesarias para mantener el nivel

adecuado de fertilidad. La absorción de nutrimentos sirve de base para las aplicaciones de mantenimiento.

Las técnicas del elemento faltante tienen la desventaja de que sólo se obtienen datos a principio del crecimiento de las plantas, de que las deficiencias nutritivas pueden resultar exageradas por el poco volumen del suelo, y que el esfuerzo que se requiere excluye su uso para gran número de suelos en los campos de los agricultores. Su mayor valor está en la selección preliminar en proyectos de investigación o para la obtención de información adicional necesaria sobre suelos con los cuales las pruebas de respuesta de rendimiento dieron correlaciones deficientes. Las modificaciones del ISFEIP proporcionan una metodología más simple para buscar soluciones a los problemas. Hunter (1975) encontró que un volumen de suelo de 150 ml era tan bueno como volúmenes mayores para identificar nutrimentos faltantes cuando se hacía crecer sorgo por 6 a 8 semanas. Se usan recipientes pequeños de espuma de polietileno que se riegan automáticamente por medio de mechas de filtros de cigarrillos conectadas a un reservorio de agua. Esta técnica también es útil para diagnosticar deficiencia o toxicidad de microelementos así como problemas de desequilibrio de nutrimentos.

En todos los casos el punto clave es la determinación de las dosis de nutrimentos para el tratamiento "completo". Pueden ocurrir errores serios cuando se usan dosis arbitrarias. Las pruebas rutinarias de suelo con que se inicien los experimentos de invernadero deberían eliminar esta clase de problemas.

ENSAYOS SIMPLES DE FERTILIZACION EN CAMPOS DE AGRICULTORES

Un cuarto procedimiento muy importante en la evaluación de la fertilidad de los suelos en los trópicos consiste en ensayos sencillos de fertilización llevados a cabo bajo la dirección de técnicos de la FAO de las Naciones Unidas. El propósito de este programa es el de introducir los fertilizantes como medio de aumentar los rendimientos en grandes áreas de los trópicos. Este programa ha sido descrito en sus diversas etapas por Mukerjee (1963) y Hauser (1971, 1973 y 1974).

Este programa de la FAO se basa en el "método de experimentos dispersos" de Mukerjee. Su suposición básica es la de que las necesidades de fertilizantes se pueden estimar mejor mediante la realización de muchos ensayos de fertilización sin repeticiones, en campos de agricultores escogidos al azar sin análisis previo. Los ensayos individuales diseminados sobre una área visualmente uniforme o sobre un tipo de suelo, se consideran como réplicas y se determina el rendimiento promedio de tales áreas. El experimento individual consta de un número pequeño de tratamientos, generalmente un diseño facto-

rial de NPK 2 x 2 x 2. Las dosis que se usan son bastante bajas (20 y 40 kg/ha) porque el propósito es conseguir un máximo de eficiencia con la inversión del fertilizante, la cual normalmente se obtiene en la parte inicial de la curva. Posteriormente los diseños incluyen hasta 16 tratamientos para determinar la curva de respuesta de dos elementos. La filosofía que sirve de fundamento a este programa, es que la respuesta de fertilidad debe evaluarse en los campos de los agricultores y no bajo condiciones bien controladas en las estaciones experimentales.

Cientos de miles de tales ensayos se han llevado a cabo con cultivos principales en todos o gran parte de 40 países que incluyen a Filipinas, Pakistán, Bangladesh, India, Indonesia, Malasia, Vietnam, Sri Lanka, Tailandia, Ghana y Brasil. Los resultados se publican en informes individuales de los países con distribución limitada. Siempre que se dispone de mapas de suelos los resultados se dan por grupos de suelos; cuando no existen mapas los resultados se ofrecen por áreas geográficas aparentemente uniformes. Cuando se dispone de laboratorios de análisis de suelo, se intenta correlacionar la respuesta de rendimiento con los niveles de análisis de suelo, pero generalmente con poco éxito. Mukerjee (1963) expresó que la estimación promedio de necesidad de nutrimentos para una área visualmente uniforme no es suficiente para proporcionar recomendaciones sobre fertilizantes a un agricultor individual. Considera que para este objetivo es necesario el análisis del suelo.

Los resultados generales del programa han sido resumidos por Hauser (1974). El promedio de respuesta del rendimiento con las modestas dosis usadas fue del 60% en comparación con las parcelas testigo. En cultivos de granos esto representa un aumento de rendimiento de 1,0 a 1,6 ton/ha y una utilidad media de \$3,30 por dólar gastado en fertilizantes en todos los países involucrados, lo que da un promedio de utilidad de \$40 millones por año durante los últimos 10 años.

El Cuadro 9.8 presenta ejemplos de algunos resúmenes de países o regiones; (también el Cuadro 10.11 del próximo capítulo). En general estos ensayos muestran que es posible obtener incrementos moderados de rendimiento con dosis moderadas de fertilizantes. La respuesta de cultivos individuales por áreas indica si tales áreas son deficientes o no en nitrógeno, fósforo, o potasio. Así mismo muestra los diferentes potenciales de rendimiento de las distintas regiones.

Los beneficios de este procedimiento, tomando en consideración el número de experimentos y los esfuerzos que ellos demandan, se limitan esencialmente a las conclusiones anteriores. La capacidad de predicción del método es mínima por cuanto no toma en cuenta la

CUADRO No. 9.8. Resultados de ensayos de fertilizantes simples llevados a cabo en maíz, en las Filipinas, arreglado por regiones. (Fuente: FAO, 1969).

Tratamiento (kg/ha)			Rendimiento de maíz (ton/ha)		
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Isabela (20 ensayos)	Luzón Central (35 ensayos)	Península de Bicol (14 ensayos)
0	0	0	1,0	2,0	2,1
45	0	0	1,4	2,9	2,5
90	0	0	1,6	3,2	3,2
0	45	0	1,0	2,2	2,6
45	45	0	1,9	3,2	3,1
90	45	0	1,8	3,1	2,9
45	90	0	1,6	3,2	2,9
45	45	90	1,9	3,2	3,1

variabilidad local en suelos. Por lo tanto no es posible hacer recomendaciones específicas de sitio.

El advenimiento de las variedades de alto rendimiento de arroz y trigo hicieron que los miles de experimentos llevados a cabo con variedades de porte alto resultaran obsoletos cuando los agricultores adoptaron las variedades de porte bajo y aplicaron con buen éxito nitrógeno en dosis muy superiores de las que se usaban en esos ensayos. Aunque el procedimiento de llevar a cabo experimentos en campos de los agricultores es válido, la falta de réplicas *in situ*, las bajas dosis de fertilizantes usadas y el hecho de no tomar en cuenta la variabilidad local de suelos, han limitado la utilidad de este enfoque.

Los esfuerzos por seleccionar sitios de acuerdo con criterios de las propiedades del suelo y de las pruebas de suelo, así como el uso de variedades mejoradas y dosis de fertilización más altas para alcanzar alguna clase de rendimiento "plateau" están mejorando la calidad del procedimiento de FAO y sus posibilidades de predicción. En las etapas posteriores del proyecto en Filipinas (FAO, 1969), una pequeña porción de los experimentos (alrededor del 7%) se llevó a cabo con variedades de arroz de porte bajo como alto, con dosis de nitrógeno que llegaban a 130 kg/ha de N y los rendimientos llegaron de 5 a 7 ton/ha. Tales experimentos llevados a cabo en campos de los agricultores proporcionan una información muy valiosa en la formulación de recomendaciones sobre nitrógeno.

RELACION ENTRE FERTILIDAD DEL SUELO Y CLASIFICACION DE SUELOS

La suposición subyacente de los principales procedimientos de la evaluación de la fertilidad del suelo es que las recomendaciones sobre fertilizantes son específicas para cada campo. Las diferencias en las propiedades del suelo son una de las principales razones para la especificidad del sitio. Una conclusión lógica es que los programas de evaluación de la fertilidad del suelo deben estar estrechamente relacionados a los programas de clasificación y reconocimiento de suelos. Con frecuencia este no es el caso en la región tropical ni en la templada. Buol et al (1975) han resumido el problema en los párrafos siguientes:

Dentro del campo de la ciencia del suelo hay una clara diferencia entre las subdisciplinas de reconocimientos de suelos y de fertilidad del suelo. Frecuentemente estos grupos compiten entre sí por el papel dominante de proporcionar información acerca del potencial agrícola del país. El grupo de reconocimiento de suelos quiere producir mapas que presenten un inventario de las condiciones existentes, mientras que el grupo de fertilidad evalúa el potencial del suelo para la producción de cultivos mediante análisis de suelo y experimentos de campo. Las funciones de estos dos grupos han tendido a excluirse mutuamente y han dado por resultado diferentes procedimientos para proporcionar información. La mayor diferencia está en el énfasis. Los sistemas taxonómicos de suelos subrayan los rasgos del subsuelo como criterio de más importancia para diagnosticar los agrupamientos jerárquicos de los suelos y solamente usan las características de la capa arable en las categorías más bajas. Los especialistas en evaluación de la fertilidad confinan su muestreo a la capa arada, o a los 20 cm superiores del suelo. De esta manera los dos grupos realmente ven dos suelos distintos cuando examinan el mismo perfil.

Los dos grupos están aún más alejados debido a la naturaleza divergente de sus objetivos inmediatos, pero no de largo alcance. Quienes hacen los reconocimientos de suelos intentan proporcionar información que sea de utilidad para las necesidades de todos los usuarios potenciales del suelo por varias décadas, mientras que los especialistas en fertilidad del suelo intentan evaluar las necesidades de fertilidad de un cultivo dado para uno o cuando más unos pocos años, después de lo cual ellos procederán a reevaluar el suelo. De esa manera el grupo de reconocimiento intenta servir de almacén de las propiedades físicas y químicas del suelo, de condición casi permanente; el grupo de fertilidad trata con componentes menos estables.

La cantidad de información que necesitan los especialistas en fertilidad del suelo es apenas una fracción de los datos recolectados por los grupos de reconocimiento de suelos. Por eso se han hecho esfuerzos por interpretar los mapas de suelos en términos del potencial de productividad del suelo. El más generalizado de estos sistemas, es el sistema de capacidad de uso de la tierra desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos desde hace varias décadas

(Klingebiel, 1958). Este sistema agrupa los suelos en clases de limitaciones crecientes en el uso de la tierra, designadas como clases I a VIII. Los criterios empleados involucran en primer lugar las propiedades físicas del suelo tales como permeabilidad, declive y susceptibilidad a la erosión. No se incluyen criterios relacionados específicamente con la fertilidad del suelo. Este sistema, con modificaciones locales es tal vez el sistema técnico más extensamente usado en los trópicos (Steele et al, 1954; ONERN, 1971). En algunos casos la fertilidad del suelo se incluye como un parámetro adicional y se clasifica como "alta", "media" o "baja" (Da Silva y Carvalho 1971; Equipe de Pedología e Fertilidade do Solo, 1972).

En ausencia de un sistema técnico de clasificación para la fertilidad del suelo, se hacen muchas interpretaciones empíricas. En Africa después de los reconocimientos de suelo, las interpretaciones de la capacidad de las unidades del mapa se basan en la experiencia personal y en las observaciones del comportamiento general del cultivo sin fertilización (Sys y Frankart, 1971; Bertrand, 1972). En algunos casos las observaciones sobre el crecimiento de las plantas se cuantifican ya sea muestreando en los campos de los agricultores o por medio de experimentos de campo (Waffelaert, 1963; Bouyer, 1963).

Un procedimiento más cuantitativo ha sido desarrollado por Beek et al (1965), como sistema de capacidad de la tierra para la interpretación de reconocimientos de suelos de Brasil. Se desarrollaron clases de capacidad "buena", "regular", "restringida", y "ninguna" para seis sistemas de manejo que van desde el más primitivo al más refinado, de acuerdo con cinco factores limitantes: fertilidad natural del suelo, deficiencia de agua, exceso de agua, erosión y limitaciones para mecanización. Se da información sobre la extensión de las limitaciones y las posibilidades de su mejoramiento. Por ejemplo, la baja fertilidad del suelo restringirá severamente el crecimiento en un sistema tradicional de manejo sin fertilización, mientras que no limitará un sistema de manejo más intensivo con abundante fertilización. Las cuatro clases de limitación de la fertilidad natural del suelo incluye en sus definiciones algunos límites cualitativos. Por ejemplo la clase "mejor" se define como incluyendo suelos con un horizonte óxico o argílico, bien drenado, con más de 3 meq/100 g de bases intercambiables, menos del 50% de saturación de aluminio, y menos de 4 mmhos/cm de conductividad eléctrica. Las otras clases también se definen cuantitativamente. El sistema se ha aplicado a los más recientes reconocimientos de suelos de Brasil, de los que se dibujan mapas de adaptabilidad de acuerdo con los sistemas de manejo (Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973).

Se ha dado especial énfasis a la clasificación de suelos bajo producción de arroz inundado con propósitos de productividad. La razón

para esto es la inaplicabilidad del sistema de capacidad de la tierra del Departamento de Agricultura de Estados Unidos a los suelos anegados. Los sistemas de capacidad para suelos de arroz se basan en limitaciones tales como drenaje excesivo, salinidad, y daño de inundaciones (Moormann y Dudal, 1964), y textura y drenaje (Kilian, 1972; Kilian y Teissier, 1973) o en unidades de mapas de suelos con potenciales de rendimiento de arroz (Panabokke, 1969).

Otro grupo de investigadores intentó correlacionar los rendimientos de arroz con las propiedades del suelo. El esfuerzo más completo de este tipo, emprendido por Kyuma y Kawaguchi (1973) se basó en las características del perfil de 41 campos inundados de Malasia. Se examinó un total de 23 parámetros de suelo, físicos y químicos. Algunos de los parámetros que no eran mutuamente excluyentes se agruparon en cuatro factores por análisis del componente principal y otros medios matemáticos: materia orgánica, fósforo disponible, "potencialidad inherente" y nitrógeno amoniacal disponibles. La potencialidad inherente es función de la capacidad de intercambio catiónico, nivel de bases, contenido de arcilla y sílice disponible. A cada factor se le asignó un puntaje numérico. Una regresión cuadrática entre rendimientos de arroz y estos cuatro factores más sus interacciones produjo una R^2 de 57%.

Un sistema técnico de clasificación para agrupar los suelos de acuerdo con limitaciones de fertilidad ha sido propuesto por Buol et al, (1975). Este sistema de fertilidad-capacidad de clasificación de suelos es el primero en agrupar suelos con limitaciones similares de fertilidad, usando límites cuantitativos. En el Cuadro 9.9 se presenta la segunda aproximación de este sistema. Los suelos se agrupan al más alto nivel de categoría de acuerdo con la textura de la capa arable y del subsuelo. Se definen 13 modificadores para delimitar parámetros relativos a fertilidad. Estos incluyen identificación de drenaje deficiente (que es bueno para el arroz) estación seca marcada, CIC baja, niveles altos y medios de saturación de aluminio, problemas de fijación de fósforo, limitaciones físicas severas de los Vertisoles, deficiencia de potasio, y problemas de suelos calcáreos, incluyendo salinidad y alcalinidad. La aplicación inicial de este sistema pone de manifiesto que algunas de las agrupaciones tienen diferentes patrones de respuesta a los fertilizantes. Los parámetros cuantitativos actúan como niveles críticos, siguiendo nuevamente el concepto de Leibig. Cuando las agrupaciones de fertilidad-capacidad se usaron conjuntamente con niveles críticos de análisis de suelo, el provecho de las recomendaciones sobre fertilizantes aumentó para papas en la Sierra de Perú (North Carolina State University, 1973). Aunque algunos de los parámetros necesitan refinamiento adicional, este procedimiento parece útil como manera de agrupar suelos con limitaciones similares con propósitos de evaluación de la fertilidad.

CUADRO No. 9.9. Sistema fertilidad-capacidad de clasificación de suelos: versión 1974. (Fuente: Boul et al, 1975).

Tipo: la textura es promedio de la capa arada a los 20 cm superiores (8 pulg de profundidad), cualquiera que sea menor.

S = Capas arables arenosas: arenas francas y arenas (USDA).

L = Capas arables francas: <35% de arcilla, pero no arena franca o arena.

C = Capas arables arcillosas: >35% de arcilla.

O = Suelo orgánico: >30% M.O. hasta una profundidad de 50 cm o más.

Tipos de sustratos: se usan si el cambio textural o capa dura que restringe la raíz se encuentra dentro de los 50 cm superiores (20 pulg).

S = Subsuelo arenoso: textura como la del tipo.

L = Subsuelo franco: textura como la del tipo.

C = Subsuelo arcilloso: textura como la del tipo.

R = Roca u otra capa dura restringiendo penetración radicular.

Modificadores condicionadores: en capa arada o 20 cm superiores (8 pulg) cualquiera que sea menor, a menos que se especifique lo contrario*.

*g = (gley): moteadoras con cromas ≤ 2 dentro de los 60 cm en la superficie y debajo de todos los horizontes A, o saturado con H_2O por >60 días en la mayoría de los años.

*d = (seco): ambiente ústico o xérico: seco >60 días consecutivos por año dentro de 20-60 cm de profundidad.

e = (CIC baja): <4 meq/100 g suelo por Σ bases + Al no tamponado.

<7 meq/100 g suelo por Σ cationes a pH 7.

<10 meq/100 g suelo por Σ cationes + Al + H a pH 8,2.

*a = (Al tóxico): >60% saturación de Al de CIC por Σ bases y Al no tamponado dentro de 50 cm.

>67% saturación de Al de CIC por Σ cationes a pH 7 dentro de 50 cm.

>86% saturación de Al de CIC por Σ cationes a pH 8,2 dentro de 50 cm o pH < 5,0 en 1:1 H_2O excepto en suelos orgánicos.

Continúa en página siguiente

CUADRO No. 9.9. Cont.

*h = (ácido):	10-60% de saturación de Al de CIC por Σ de bases y aluminio no tamponado dentro de los 50 cm superiores o pH en 1:1 H ₂ O entre 5,0 y 6,0.
i = (fijación de Fe-P):	% de Fe ₂ O ₃ libre-arcilla > 0,20 ó tinte más rojo que 5 YR y estructura granular.
x = (amorfo rayos X):	pH > 10 en NaF 1 N o prueba positiva de NaF de campo u otras evidencias indirectas de dominancia de alófana en la fracción de arcilla.
v = (Vertisol):	arcilla plástica muy pegajosa, >35% de arcilla y > 50% de arcillas expandibles 2:1. Coeficiente de expansión lineal > 0,09. Contracción e hinchamiento severos de la capa arable.
*k = (def. de K):	<10% de minerales meteorizables en la fracción de limo y arena dentro de los 50 cm superiores o K intercamb <0,20 meq/100 g o K <2% de Σ de bases si Σ de bases < 10 meq/100 g.
*b = (carbonato):	CaCO ₃ libre dentro de 50 cm (efervescente con HCl) o pH >7,3.
*s = (salinidad):	>4 mmhos/cm del extracto saturado a 25° dentro de 1 m.
*n = (sódico):	>15% saturación con Na o CIC dentro de 50 cm.
*c = (cat clay):	pH en 1:1 H ₂ O < 3,5 después de secarse; manchas de jarosita con tinte 2,5 Y o más amarillo y cromas de 6 ó más dentro de 60 cm.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El proceso de diagnóstico de problemas nutritivos de las plantas y la formulación de recomendaciones sobre fertilizantes en los trópicos, está basado en diferentes procedimientos en distintas etapas de refinamiento. Los programas eficientes de evaluación de la fertilidad han jugado un papel muy importante en varios países tropicales en el aumento de producción de alimentos por medio del incremento en el uso de fertilizantes.
2. Los programas en marcha de evaluación de la fertilidad pueden agruparse de acuerdo con la técnica principal que usan. Las principales son los análisis de suelo, análisis foliares, técnicas del elemento faltante en invernaderos, y ensayos de fertilizantes simples. Los tres primeros enfatizan el concepto central de que la evaluación de la fertilidad es específico para cada campo y cultivo.

3. El propósito del laboratorio de evaluación de fertilidad del suelo es proporcionar servicios rápidos de diagnóstico a los agricultores. Esto involucra hacer cantidades grandes de muestras diariamente con técnicas sencillas pero precisas. Un procedimiento satisfactorio de pruebas de suelo debe extraer todas las formas de los nutrimentos disponibles o una parte proporcional de suelos ampliamente diferentes por medio de técnicas rápidas y precisas. Los resultados deben estar correlacionados con la respuesta de crecimiento bajo condiciones de campo. Pocos de los procedimientos de pruebas de suelo satisfacen estos requisitos.
4. En la actualidad no se dispone de procedimientos satisfactorios de análisis rutinarios de suelo para el nitrógeno. Muchos análisis para el fósforo son efectivos para grupos específicos de suelos debido a las diferencias en las formas de fósforo inorgánico presente. Se dispone de pruebas de suelo efectivas para potasio, elementos secundarios y microelementos y para diagnosticar problemas de acidez, salinidad y alcalinidad. Con el uso de equipo diseñado especialmente la mayoría de los nutrimentos pueden determinarse con una o dos soluciones extractoras. Las excepciones son azufre, boro, molibdeno y nitrógeno.
5. Los valores que se obtienen en los análisis de suelos son cifras empíricas que sólo tienen significado cuando se correlacionan con respuestas de rendimiento. El concepto de definir un nivel crítico por arriba del cual un elemento nutritivo deja de ser un factor limitante, ha afinado mucho el enfoque de estas técnicas. Una ordenación correcta de puntos diseminados en una gráfica de una prueba de suelo y respuesta de rendimiento se divide en suelos con una alta probabilidad de respuesta de rendimiento a los nutrimentos agregados, y de suelos con baja probabilidad.
6. Las correlaciones de las pruebas de suelo en el invernadero son útiles para comparar las soluciones extractoras y determinar los niveles críticos tentativos. Los límites críticos definitivos para las pruebas así como los análisis de plantas solamente se establecen por medio de ensayos de campo.
7. La interpretación de los ensayos de campo constituye la base para formular recomendaciones sobre dosis de fertilizantes, indiferentemente del tipo de procedimiento usado para la evaluación de la fertilidad del suelo. Los niveles óptimos debieran determinarse para categorías específicas de suelo-cultivo separadas con base en niveles críticos, propiedades del suelo, y sistemas de cultivo usados. El clásico involucra la formulación de ecuaciones de regresión curvilínea y análisis marginal. Un nuevo modelo de respuesta lineal y "plateau" sólo requiere técnicas

- de gráficas simples y la determinación de un nivel óptimo independiente de razones de precio-costo. El tipo de recomendaciones obtenidas por medio del último método parece bien apropiado a las condiciones tropicales.
8. El análisis de plantas es especialmente útil para cultivos de larga duración y puede refinarse por medio de métodos de registro de observaciones y actividades desarrollados para plantaciones. El uso de los niveles de absorción de las plantas es un medio valioso para determinar las recomendaciones sobre fertilizantes nitrogenados.
 9. Las técnicas del elemento faltante se usan en muchos países tropicales. Sin embargo, la cantidad de trabajo y de tiempo involucrados, limita su empleo con propósitos rutinarios.
 10. Los ensayos simples de fertilizantes esparcidos al azar en áreas aparentemente homogéneas son de valor en la determinación de las deficiencias generales de nutrimentos y las necesidades promedio de una región. Sin embargo no se pueden utilizar como base para recomendaciones sobre fertilización de un campo específico, a menos que se correlacionen con técnicas analíticas de laboratorio o de invernadero.
 11. Hay que aumentar los esfuerzos por introducir datos de reconocimientos de suelos en los programas de evaluación de la fertilidad del suelo. Las metas inmediatas de los grupos de clasificación de suelos y de fertilidad del suelo son diferentes. Con una excepción, los sistemas técnicos de clasificación no incluyen datos de fertilidad. El desarrollo de sistemas para agrupar suelos con limitaciones similares de fertilidad es probable que mejore la efectividad de los programas de evaluación de la fertilidad del suelo y que sirva de puente en la brecha actual entre las dos subdisciplinas.

REFERENCIAS

- AGBOOLA, A. A. The relationship between yields of eight varieties of Nigerian maize and content of nitrogen, phosphorus and potassium in the leaf at flowering stage. *J. Agr. Sci.* 79: 391-396. 1972.
- _____. Correlations of soil tests for available phosphorus with maize in soils derived from metamorphic and igneous rocks in the Western State of Nigeria. *West Afr. J. Biol. Appl. Chem.* 16: 14-23. 1973.
- AHMAD, N. Seasonal changes and availability of phosphorus in swamp rice soils of North Trinidad. *Trop. Agr. (Trinidad)* 44: 21-32. 1967.

- AHMAD, N., CORNFORTH, I. S., y WALMSLEY, D. Methods of measuring available nutrients in West Indian soils. III. Potassium. *Plant and Soil* 39:635-647. 1973.
- AHMED, B., y ISLAM, A. Extractable phosphate in relation to the forms of phosphate fractions in some humid tropical soils. *Trop. Agr. (Trinidad)* 52:113-118. 1975.
- ALVIM, P. T. Avaliação de fertilidade dos solos de Cerrado por testes de micro-parcelas. *Ciência é Cultura* 20:613-619. 1968.
- ANDERSON, R. L., y NELSON, L. A. A family of models involving intersecting straight lines and concomitant experimental designs useful in evaluating response to fertilizer nutrients. *Biometrics* 31:303-318. 1975.
- BALERDI, F., MULLER, L., y FASSBENDER, H. W. A study of phosphorus in Central America. III. Comparison of five chemical analysis methods for available phosphorus. *Turrialba* 18:348-360. 1968.
- BARTHOLOMEW, W. V. Soil nitrogen: supply processes and crop requirements. *Int. Soil Fert. Eval. Improvement Program Tech. Bull.* 6. North Carolina State University, Raleigh, 1972.
- BAVER, L. D., y AYRES, A. S. Soil analysis as basis for fertilizer recommendations in sugarcane. In *Trans. Comm. IV and V. Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*, 1962. pp. 835-841.
- BAYNES, R. A., y WALMSLEY, D. Fertility evaluation of some soils in the Eastern Caribbean. *Univ. West Indies Dept. Soil Sci. Rept.* 17. 1973. 80 p.
- BEEK, K. J., BENNEMA, J., y CAMARGO, M. N. Primer intento de interpretación de un levantamiento de suelos en Brasil. Centro Interamericano de Foto-interpretación, Informe 3677. Bogotá, Colombia, 1965.
- BERTRAND, R. Morphopédologie et orientations culturales des régions soudanaises du Siné Saloum (Sénégal). *Agron. Tropicale (France)* 27:1115-1190. 1972.
- BEUFILS, E. R. Physiological diagnosis. Guides for improving maize production based on principles developed for rubber trees. *J. Fert. Soc. South Afr.* 1:1-30. 1971.
- BHAN, C., y SHANKER, H. Correlation of available phosphorus values obtained by different methods to phosphorus uptake by paddy. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 21:177-180. 1973.
- BOULDIN, D. R., GREWELING, T., y LUI, J. The effect of drying soils from the humid tropics on selected soil properties. *AID Rept.* 1. Agronomy Department, Cornell University, Ithaca, N.Y., 1971.
- BOUYER, S. Considerations d'ordre pratique sur l'étude de la fertilité des sols tropicaux. *Agron. Tropicale (France)* 18:933-938. 1963.
- BOYD, D. A. Some recent ideas on fertilizer response curves. 9th Congr. Int. Potash Inst. Berne, Switzerland, 1970. pp. 461-473.
- _____. Developments, in field experimentation with fertilizers. *Phosphorus in Agr.* 1974:7-17. 1974.
- BOYER, J. Soil potassium. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 102-135.
- BRAY, R. H. Requirements for successful soil tests. *Soil Sci.* 66:83-89. 1948.
- BRUCE, R. C., y BRUCE, I. J. The correlation of soil phosphorus analysis with response of tropical pastures to superphosphates on some north Queensland soils. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 12:188-194. 1972.
- BUOL, S. W. A soil-fertility capability classification system. Contract AID/scd 2806, Annual Report. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1971. pp. 44-50.

- BOUL, S. W., SANCHEZ, P. A., CATE, Jr. R. B., y GRANGER, M. A. Soil fertility capability classification: a technical soil classification for fertility management. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). Soil management in tropical America. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 126-141.
- CABALA-ROSAND, F. P. A disponibilidade de fósforo e o uso de extratores químicos no Brasil Centro de Pesquisas da Cacao, Itabuna, Bahía, 1972. 27 p.
- _____, y SANTANA, M. B. M. Comparação de extratores químicos de fósforo em solos do sul da Bahia. Turrialba 22:19-26. 1972.
- CAJUSTE, L. J., y KUSSOW, W. R. Use and limitations of the North Carolina method to predic available phosphorus in some Oxisols. Trop. Agr. (Trinidad) 51:246-252. 1974.
- CANO, M. Evaluación de la fertilidad de los suelos en el Perú. Min. de Agr. Dirección de Investigación Agraria, Bol. Tec. 78. La Molina, Perú, 1973.
- CARANDANG, D. A. The fertility status of soils of the Philippines. ASPAC Tech. Bull. 12. Taipei, Taiwan, 1973. pp. 29-49.
- CATE, R. B. Jr., y NELSON, L. A. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. Int. Soil Testing Ser. Tech. Bull. 1. North Carolina State University, Raleigh, 1965.
- _____, HUNTER, A. H., y FITTS, J. W. Economically sound fertilizer recommendations based on soil analysis. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi) 1:1083-1091. 1971.
- _____, y NELSON, L. A. A single statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35:658-659. 1971.
- CHAKRAVARTI, S. N. Nutrient status of some West Bengal soils as determined by rapid chemical methods. J. Indian Soc. Soil Sci. 3(2):83-86. 1956.
- CHAMINADE, R. Recherches sur la fertilité et la fertilisation des sols en régions tropicales. Agron. Tropicale (France) 27:891-904. 1972.
- CHANG, S. C., y JUO, S. R. Available phosphorus in relation to forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 95:91-96. 1963.
- _____. Phosphorus and potassium tests on rice soils. In The mineral nutrition of the rice plant. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1964. pp. 373-381.
- CHARREAU, C. Soils of tropical dry and dry-wet climatic areas of West Africa and their use and management (preliminary draft). Agronomy Department, Cornell University, Ithaca, N.Y., 1974.
- CHAU, C. C. Study on the correlations of soil tests and response of rice to added fertilizers in regions north of Maiolie in Taiwan. Soils Fert. Taiwan 170:1-20. 1970.
- CHIRINOS, A. V., BRITO, J. de, y ROJAS, I., de. Características de fertilidad de algunos suelos venezolanos vistos a través de los resúmenes de análisis rutinarios. Agron. Trop. (Venezuela) 21:397-409. 1971.
- CHOLITKUL, W. y TYNER, E. H. Inorganic phosphorus fractions and their relation to some chemical indices of phosphorus availability for some lowland rice soils of Thailand. Proc. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi) 1:7-20. 1971.
- CLEMENTS, H. F. Crop logging of sugar cane in Hawaii. In H. E. Reuther (ed.), plant analysis and fertilizer problems. American Institute of Biological Science, Washington, 1960. pp. 131-147.
- COLWELL, J. D. Effects of variation in soil composition on soil test values for phosphorus fertilizer requirements. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi) 1:327-336. 1971.

- COMMITTEE ON TROPICAL SOILS. Soil testing and soil fertility evaluation services. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 198-202.
- COPE, J. T. Jr., y ROUSE, R. D. Interpretation of soil test results. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.), *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 35-54.
- CORDERO, A., y SALAS, J. Evaluación de la fertilidad de tres suelos aluviales de Costa Rica mediante el método de las microparcelas de maíz. *Min. Agr. Ganad. (Costa Rica) Bol. Tec.* 58. 1971.
- _____, y MINER, G. A field research program for obtaining interpretation data. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.), *soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 518-532.
- CORNFORTH, I. S., y WALMSLEY, D. Methods for measuring available nutrients in West Indian soils. 1. Nitrogen. *Plant and Soil* 35:389-399. 1971.
- COX, F. R., y KAMPRATH, E. J. Micronutrient soil tests. In J. J. Mordvedt, (ed.), *micronutrients in agriculture*. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1971. pp. 289-317.
- DaSILVA, L. F., y CARVALHO, R. Suitability classes for cacao soils of Bahia, Brazil. *Theobroma* 1:39-54. 1971.
- DATTA, N. P., y KALBANDE, A. R. Correlation of response in paddy with soil test potassium in different Indian soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 15:1-6. 1967.
- DIVISAO DE PESQUISA PEDOLOGICA. Levantamento exploratorio-reconhecimento de solos do Estado de Ceará, Vols. I, II. *Boletim Tec.* 28. Rio de Janeiro, Brasil, 1973.
- DOLL, E. C., y LUCAS, R. E. Testing soils for potassium, calcium and magnesium. In L. M. Walsh y J. D. Beaton, *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 133-154.
- EKPETE, D. M. Predicting response to potassium for soils of eastern Nigeria. *Geoderma* 1:177-189. 1972.
- EQUIPE DE PEDOLOGIA E FERTILIDADE DO SOLO. Levantamento exploratorio-reconhecimento de solos do Estado de Paraíba. *Boletim Tec.* 15. 1972. pp. 664-670.
- ESTRADA, J. A. Reconocimiento del estado de fertilidad de los suelos del Huallaga Central. *Anal. Cient. (Perú)* 4:127-146. 1966.
- _____. Interralaciones suelo-planta-nutrición. III. Reconocimiento del estado de fertilidad de algunos suelos del Departamento de Arequipa. *Anal. Cient. (Perú)* 5:169-182. 1967.
- FAO. Report of the first meeting on soil fertility and fertilizer use in West Africa. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1963.
- _____. Soil fertility survey and research. The Philippines. Field experiments, plant nutrition, and soil classification. LA:SF/PH1 10. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1969.
- _____. Improving soil fertility in Africa. *FAO Soils Bull.* 14. Rome, 1971.
- FITTS, J. W. Using soil tests to predict a probable response from fertilizer application. *Better Crops with Plant Food* 39(3):17-28. 1955.
- _____, CATE, Jr., R. B., HUNTER, A. H., WALKER, J. L., y WAUGH, D. L. Evaluation of soil fertility in Latin America: soil testing plant analysis. *Int. Soil Testing Ser. Tech. Bull.* 2. North Carolina State University, Raleigh, 1965.
- _____. Using soil fertility evaluation and improvement information. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:1065-1072. 1971.

- FITTS, J. W. Nécessité pour l'agriculture de disposer d'informations précises sur les besoins en matière de fertilité du sol. *Phosphore et Agr.* 26(59):1-7. 1972.
- _____. Proper soil fertility evaluation as an important key to increased crop yields. In V. Hernando (ed.). *Fertilizers, crop quality and economic.* Elsevier, Amsterdam, 1974. pp. 5-44.
- FOSTER, H. L. Fertilizer recommendations for cereals grown on soils derived from volcanic rocks in Uganda. *East. Afr. Agr. For. J.* 38:303-313. 1973.
- GALIANO, F. Diagnóstico foliar en maíz: ensayo de campo con Diacol V-103. *Rev. Inst. Inv. Tecnol.* (Colombia) J2:14-24. 1968.
- GALLO, J. R., y COELHO, F. A. S. Diagnose da nutrição nitrogenada do milho pela análise química das folhas. *Bragantia* 23:537-548. 1963.
- _____, HIROCE, R., y MIRANDA, L. T. de. Análise foliar na nutrição de plantas de milho. II. Relatório em progresso sobre estudos em N, P, K e elementos menores. *Bragantia* 24:41-47. 1965.
- _____, HIROCE, R., y ALVAREZ, R. Levantamento do estado nutricional de canaviais de São Paulo pela análise foliar. *Bragantia* 27:365-382. 1968a.
- _____, HIROCE, R., y MIRANDA, L. T. de. Análise foliar na nutrição das plantas de milho. III. Correlações de análise das folhas com produção. *Bragantia* 27:177-186. 1968b.
- GOSWAMI, N. N., BAPAT, S. R., y PATHAK, V. N. Studies on the relationship between soil tests and crop responses to phosphorus under field conditions. *Proc. Int. Symp. Soil. Fert. Eval. (New Delhi)* 1:351-359. 1971.
- GOVINDA IYER, T. A., RENGANATHAU, V., GHOUSE, L. M., y TEEKARAMARAN, G. Studies on the productivity rating of alluvial soils. *Madras Agr. J.* 57:221-226. 1970.
- GUAJARDO, R., y ORTEGA, E. Estudio de calibración y correlación de un método químico para el análisis de fósforo en suelos del valle del Yaqui. *Agr. Técnica (México)* 2:396-399. 1968.
- HANWAY, J. J. Relating laboratory test results and field crop response: principles and practices. *Int. Symp. Soil-Fert. Eval. Proc. (New Delhi)* 1:337-343. 1971.
- _____. Future direction of research on soil testing in agronomy. *Indian J. Agr. Sci.* 42:357-359. 1972.
- _____. Experimental methods for correlating and calibrating soil tests. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.). *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 55-66.
- HARDY, F. y BAZAN, R. The maize microplot method of soil testing. *Turrialba* 16:267-270. 1966.
- HAUCK, F. W. Die Bedeutung der mineraldüngung für die landwirtschaft Westafrikas. In *Afrika Heute*, Jahrb. 1963. pp. 250-266.
- HAUSER, G. F. Specialized techniques and experimental designs used by FAO in large scale soil fertility investigations in developing countries. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:549-561. 1971.
- _____. Guide to calibration of soil tests for fertilizer recommendation. *FAO Soils Bull.* 18. 1973. 71 p.
- _____. FAO's efforts to increase food production by promoting fertilizer use. In V. Hernando (ed.). *Fertilizers, crop quality and economy.* Elsevier, Amsterdam, 1974. pp. 343-361.
- HEADY, E. O., y RAY, H. E. Application of soil test data, fertilizer response research and economic models in improving fertilizer use. *Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)*. Proc. 1:1073-1082. 1971.

- HIROCE, R., GALLO, J. R., y MASCARENHAS, H. A. A. Análise foliar do feijão (*Phaseolus vulgaris*): diagnose de necessidades de fósforo. *Bragantia* 29(2):7-9. 1970.
- HUNBERT, R. P. The growing of sugarcane. Elsevier, Amsterdam, 1963.
- _____. Plant analysis as an aid in fertilizing sugar crops. II. Sugarcane. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.). *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 289-297.
- HUNTER, A. H., y FITTS, J. W. Soil test interpretation studies: field trials. *Int. Soil Testing Program Tech. Bull.* 5. North Carolina State University, Raleigh, 1969.
- _____. New techniques and equipment for routine plant analytical procedures. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.), *soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 467-483.
- INEAC. Techniques de prélèvements en vue du diagnostic chimique du besoin en engrais. *Inst. Nat. Etud. Agron. Congo Belgue Bull. Infom.* 7(5):273-302. 1958.
- ISFEIP. Annual Reports. International Soil Fertility Evaluation and Improvement Program. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1967-1974.
- ISHAQUE, M. y HAFIZAR RAHMAN, A. F. M. Some studies on fertilizers and soils of Bangladesh. *Bangladesh Soil Fertility and Soil Testing Institute, Tejgaon, Dacca*, 1971. 22 p.
- ISHIZUKA, Y. Nutrient deficiencies of crops. *ASPAC Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan*, 1971a. 112 p.
- _____. Physiology of the rice plant. *Adv. Agron.* 23:241-315. 1971b.
- JOHN, M. K. Extractable phosphorus related to forms of P and other soil properties. *J. Sci. Food Agr.* 23:1425-1433. 1972.
- JONES, J. B., Jr., y ECK, H. V. Plant analysis as an aid in fertilizing corn and grain sorghum. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.). *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 349-364.
- JOSEPH, K. T. Nutrient content and nutrient removal in bananas as an initial guide for assessing fertilizer needs. *Planter* 47(538):7-10. 1971.
- KAMPRATH, E. J. Soil acidity and response to liming. *Int. Soil Testing Ser. Tech. Bull.* 4. North Carolina State University, Raleigh, 1967.
- KANWAR, J. S. Soil testing service in India-retrospect and prospect. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:1103-1113. 1971.
- KILIAN, J. y VELLY, J. Diagnostic des carences minérales en vases de végétation sur quelques sols de Madagascar. *Agron. Tropicale (France)* 19:413-443. 1964.
- _____. Contribution a l'étude d'aptitude des terres a la riziculture en Dahomey septentrionale. *Agron. Tropicale (France)* 27:321-257. 1972.
- _____, y TEISSIER, J. Methodes d'investigation pour l'analyse et le classement des bas-fonds dans quelques regions de l'Afrique de l'Ouest. *Proportion de classification d'aptitudes des terres a la riziculture. Agron. Tropicale (France)* 28:156-172. 1973.
- KIM, Y. K., HONG, C. W., PARK, C. S., y KIM, Y. S. Rapid examination of available silica for paddy soil. *Res. Repts. Office Rural Dev. (Korea)* 14:39-44. 1971.
- KLINGEBIEL, A. A. Soil survey interpretations-capability groupings. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 22:160-163. 1958.

- KYUMA, K. y KAWAGUCHI, K. A method of fertility evaluation for paddy soils. I. First approximation: chemical potentiality grading. II. Second approximation: evaluation of four independent constituents of soil fertility. III. Third approximation: synthesis of fertility constituents for soil fertility evaluation. *Soil Sci. Plant Nutr.* 19:1-27. 1973.
- LATHWELL, D. J., DUBEY, H. D., y FOX, R. H. Nitrogen supplying power of some tropical soils of Puerto Rico and methods for its evaluation. *Agron. J.* 64:763-766. 1972.
- LAYESE, M. F., y TILO, S. N. Evaluation of three phosphorus test methods for lowland rice soils. *Philipp. Agr.* 54:302-311. 1970.
- LIZARASO, B. y TINNERMEIER, R. Normas para el uso óptimo de los fertilizantes en algunos valles de la Costa. *Min. Agr. y Pesquería Bol.* 3. Lima, Perú, 1961.
- LOPEZ, A. S. Comparative effects of methyl bromide, propylene oxide and autoclave sterilization on specific soil chemical characteristics. Unpublished paper. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1975. 20 p.
- LOTT, W. L., McCLUNG, A. C., VITA, R. de, y GALLO, J. R. Survey of coffee fields in São Paulo and Paraná by foliar analysis. *IBEC. Res. Inst. Bull.* 26. 1961.
- MALAVOLTA, E., HAAG, H. P., MELLO, F. A. F., y BRASIL, M. O. C. On the mineral nutrition of some tropical crops. International Potash Institute, Berne, Switzerland, 1962. 155 p.
- MANZANO, A., CARRERA, W., y WAUGH, D. L. La fertilización del trigo y su relación con el análisis de suelo. *ISFEIP Bol. Esp.* 1. North Carolina State University, Raleigh, 1969. 46 p.
- MARIN, G. Recomendaciones tentativas de fertilizantes y cal para diversos cultivos de acuerdo con los resultados de análisis de suelos. *Rev. ICA (Colombia)* 3:91-102. 1968.
- _____, y LEON, L. A. El análisis de suelos como guía para hacer recomendaciones de fertilizantes y enmiendas. *Agr. Tropical (Colombia)* 26:24-33. 1970.
- MARTINI, J. A. La microparcela de campo como un método biológico rápido para evaluar la fertilidad del suelo. *Turrialba* 19:161-266. 1969a.
- _____. Caracterización del estado nutricional de los "Latosoles" principales de Costa Rica utilizando la técnica del elemento faltante en el experimento de invernadero. *Turrialba* 19:394-408. 1969b.
- McCOLLUM, R. E., y VALVERDE, C. The fertilization of potatoes in Peru. *North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 185. 1958.
- McLEAN, F. O. Testing soils for pH and lime requirement. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.). *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 77-96.
- MIRANDA, L. T. Relação entre teores de nitrogênio e fósforo e pH do solo, e a resposta a adubação fosfatada em milho. *Bragantia* 19:503-513. 1960.
- MOORMANN, F. R., y DUDAL, R. Characteristics of soils on which paddy is grown in relation to their capability classification. Proc. 9th Meeting working party on rice, soils, water, and fertilizer practices. Mimeo IRC/SF-64/4. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1964.
- MORILLO, M. R., y FASSBENDER, H. W. Formas y disponibilidad de fosfatos de los suelos de la cuenca baja del río Choluteca, Honduras. *Turrialba* 18:26-33. 1968.

- MUKERJEE, H. N. Determination of nutrient needs of tropical soils. *Soil Sci.* 95:276-280. 1963.
- MULLER, A. y VAN BAREN, F. A. Standard method of soil characterization as a first approach to the evaluation of soil fertility. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:1-6. 1971.
- MUZILLI, O. y KALCKMANN, R. E. Análise de assistência – interpretação de resultados e determinação de níveis críticos. I. Determinação de níveis críticos de acidez. *Bol. Univ. Fed. Paraná* 1:1-18. 1971a.
- _____, y KALCKMANN, R. E. Suggestoes de calagem e adubação para recuperação dos solos da região nordeste do Estado do Paraná. *Bol. Univ. Fed. Paraná* 2:1-12. 1971b.
- NAVAS, J., MANZANO, H., y McCLUNG, A. C. Calibraciones del análisis de fósforo. *Agr. Tropical (Colombia)* 22:23-32. 1966.
- NELSON, D. W., y BREMNER, J. M. Preservation of soil samples for inorganic nitrogen analyses. *Agron. J.* 64:196-199. 1972.
- Ng, S. K., IYER, G. C., y RATNASINIGAM, K. Laboratory errors in soil analysis. *J. Rubber Res. Inst. Malaysia* 24:39-44. 1974.
- NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Research on tropical soils. Annual Report. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1973.
- OKAJIMA, H., URITANI, I., y HOUNG, K. H. The significance of minor elements in plant physiology. ASPAC Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan, 1975. 76 p.
- OKO, B. F. D., y AGBOOLA, A. A. Comparison of different phosphorus extractants in soils of the Western State of Nigeria. *Agron. J.* 66:639-642. 1974.
- ONERN. Capacidad de uso de los suelos de Perú (tercera aproximación). Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Lima, Perú, 1971. 57 p.
- ORTEGA, E. Correlation and calibration studies of chemical analysis in soils and plant tissues for nitrogen and available phosphorus. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 19:147-153. 1971.
- OTENG, J. W., y ACQUAYE, D. K. Studies on the availability of phosphorus in representative soils of Ghana. I. Availability tests by conventional methods. *Ghana J. Agr. Sci.* 4:171-183. 1971.
- PAGEL, H. Comparison of various extraction methods for determining the available phosphates in important soils of the arid and humid tropics (in German). *Beitr. Trop. Subtrop. Landwirt. Tropenveterinaermed* 10:123-138. 1972.
- PAL, A. R., y MOTIRAMANI, D. P. Evaluation of some soil test methods for measuring available sulfur in medium black soils. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:297-307. 1971.
- PALENCIA, J. A. Programa de nutrición vegetal. Memoria anual de 1973. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola, Guatemala, 1974. 73 p.
- _____, ESTRADA, E., y WALKER, J. L. A soil fertility evaluation program. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 455-466.
- PANABOKKE, C. R. Soil science and agricultural development in Ceylon. *Proc. Ceylon Assoc. Adv. Sci.* 2:124-144. 1969.
- PARRA, J. y QUICENO, G. Los sistemas biológicos en la evaluación de la fertilidad de los suelos. *Cenicafé* 9(1-2):5/22. 1958.
- PERUR, N. C., SUBRAMANIAN, C. K., MUHR, G. R., y RAY, H. E. Soil fertility evaluation to serve Indian farmers. Mysore Department of Agriculture, Bangalore, India, 1974. 123 p.

- PETERSON, F. J., BRUPBACHER, R. H., CLARK, H. L., y SEDBERRY, Jr. J. E. Rice fertilization as related to soil type and soil test. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi) 1:445-454. 1971.
- PIPAEMG. Recomendações do uso de fertilizantes para o Estado de Minas Gerais. 2ª tentativa. Programa Integrado de Pesquisas Agropecuárias do Estado de Minas Gerais. Secretaria da Agricultura, Belo Horizonte, M.G., Brasil, 1972.
- PRIMAVESI, A. y PRIMAVESI A. M. Constant relationships between available nutrients in different soil-mapping units in Rio Grande do Sul, Brazil (in German). *Agrochimica* 15:212-227. 1971a.
- PRIMAVESI, A. M., y PRIMAVESI, A. Various analytical results with dry and wet soils (in German). *Agrochimica* 15:454-460. 1971b.
- REEVE, N. G., y SUMNER, M. E. Lime requirements of Natal Oxisols based on exchangeable aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:595-598. 1970.
- REISENAUER, H. M., McWALSH, L., y HOEFT, R. G. Testing soils for sulfur, boron, molybdenum and chlorine. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.). *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 173-200.
- RODRIGUEZ, N. Potassium supplying capacity of some Venezuelan soils. *Trop. Agr. (Trinidad)* 51:189-199. 1974.
- ROUFUNNISA, K., SESHAGIRI RAO, V., SESHAGIRI RAO, T., y VENKATESWARLU, K. Crop response to available phosphorus and potassium in the soils of Nagarjunagasar Project. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi) 1:407-414. 1971.
- RUSSELL, E. W. The role of fertilizer in African agriculture. In V. Hernando (ed.). *Fertilizers, crop quality and economy*. Elsevier, Amsterdam, 1974. pp. 213-250.
- RYAN, J. C., y PERRIN, R. K. The estimation and use of a generalized response function for potatoes in the Sierra of Peru. *North Carolina Exp. Sta. Tech. Bull.* 214. 1973.
- RYU, I. S., KIM, Y. S., y PARK, C. S. Relationship between the productivity of paddy soils and their physical and chemical properties. Res. Rept. Office Rural Dev. and Plant Environment (Korea) 14:1-6. 1971.
- SALAZAR, J. R. Clasificación de las zonas de respuesta a la aplicación de fósforo en los suelos de El Salvador. *Agr. El Salvador* 8 (Num. esp.):27-29. 1968.
- SANCHEZ, P. A., GAVIDIA, A., RAMIREZ, G. E., VERGARA, R., y MINGUILLO, F. Performance of sulfur-coated urea under intermittently flooded rice culture in Peru. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:789-792. 1973.
- SARKAR, M. C. Equilibrium-phosphate potential as a measure of available soil phosphorus as judged from the crop-response correlation studies. *Punjab Agr. Univ. J. Res.* 8:206-210. 1971.
- SAUNDER, D. H., ELLIS, B. S., y HALL, A. Estimation of available nitrogen for advisory purposes in Southern Rhodesia. *J. Soil Sci.* 8:301-312. 1957.
- SAXENA, M. C., y GAUTAM, O. P. Foliar diagnosis of nitrogen and phosphate status of hybrid maize. *Indian J. Agr. Sci.* 41:803-807. 1971.
- SIMS, J. L., y BLACKMAN, B. G. Predicting nitrogen availability to rice. II. Assessing available nitrogen in silt loam with different previous year crop history. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31:676-680. 1967.
- _____, WELLS, J. B., y TACKETT, D. L. Predicting nitrogen availability to rice. I. Comparison of methods for determining available nitrogen to rice from field and reservoir soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31:672-675. 1967.

- SINGH, B. Soil test-crop response correlation studies on wheat crop in alluvial soil associations of Uttar Pradesh. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 21:467-474. 1973.
- SINGH, R. M., y TRIPATHI, B. R. Correlation studies of soil-tests for available nitrogen and response of paddy on certain soils of Uttar Pradesh. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 18:313-318. 1970.
- SMALL, H. G., Jr., y OHLROGGE, A. J. Plant analysis as an aid in fertilizing soybeans and peanuts. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.). *Soil testing and plant analysis*, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 315-328.
- SOPHER, C. D., y McCracken, R. J. Relationships between soil properties, management practices and corn yields in South Atlantic Coastal Plain Soils. *Agron. J.* 65:595-600. 1973.
- SPENCE, J. A., y AHMAD, N. Plant nutrient deficiencies and related tissue composition of sweet potatoes. *Agron. J.* 59:59-62. 1967.
- SPRAGUE, H. Hunger signs in crops. McVay, New York, 1965.
- SRIVATSAVA, O. P., y PATHAK, A. N. Available phosphorus in relation to the forms of phosphorus fractions in Uttar Pradesh soils. *Geoderma* 5:287-296. 1971.
- STANFORD, G., LEGG, J. O., y SMITH, S. J. Soil nitrogen availability evaluations based on nitrogen mineralization potentials of soils and uptake of labelled and unlabelled nitrogen by plants. *Plant and Soil* 39:113-124. 1973.
- STEELE, J. C., VERNON, K. C., y HEWITT, C. W. A capability grouping of the soils of Jamaica, B.W.I. *Trans. 5th Int. Congr. Soil Sci.* 5:402-406. 1954.
- STEFANSON, R. C., y COLLIS-GEORGE, N. The importance of environmental factors in soil fertility assessment. I. Dry matter production. II. Nutrient concentration and uptake. *Aust. J. Agr. Res.* 25:299-316. 1974.
- Su, N. R. The fertility status of Taiwan soils. *ASPAC Tech. Bull.* 18:15-100. 1972.
- SUBRAMANIAN, C.K. A quick method for correlation of soil test values with plant response. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:371-375. 1971.
- SUDJADI, M. Soil fertility studies to support agricultural intensification program in Indonesia. *FAO World Soil Resources Rept.* 41. 1971. pp. 103-105.
- SYS, C. y FRANKART, R. Land capability classification in the humid tropics. *Soils Afr.* 16:153-200. 1971.
- TANAKA, A. y YOSHIDA, S. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. *IRRI Tech. Bull.* 10. 1970.
- THENEBADU, M. W. Evaluation of the nitrogen status of rice by plant analysis. *Plant and Soil* 37:41-48. 1972.
- TISDALE, S. L. Soil and plant tests for the evaluation of the sulfur status of soils. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:119-133. 1971.
- TIWARI, K. N., y SINGH, M. P. Effect of soil types on nutrient responses of high yielding varieties of kharif crops. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 20:211-217. 1972.
- TOBON, J. M., y LEON, L. A. Comparación de varios métodos para determinar requerimientos de cal en algunos suelos colombianos. *Rev. ICA* 5:307-326. 1970.
- TWYFORD, I. T., y COULTER, J. K. Soil capability assessment in the West Indies. In *Trans. Comm. IV and V. Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*, 1962. pp. 761-769.
- TYNER, E. H., y DAVIDE, J. G. Some criteria for evaluating soil phosphorus tests for lowland rice soils. In *Trans. Comm. IV and V. Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*, 1962. pp. 625-634.

- ULRICH, A. y HILLS, F. J. Plant analysis as an aid in fertilizing sugar crops. Part I. Sugar beets. In L. M. Walsh y J. D. Beaton (eds.). Soil testing and plant analysis. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973. pp. 271-288.
- UNITED STATES SOIL SALINITY LABORATORY. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. Handbook 60. U.S. Department of Agriculture, Washington, 1954.
- VAJRAGUPTA, Y., HALEY, L. E., y MELSTED, S. W. Correlation of phosphorus soil test values with rice yields in Thailand. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27:395-397.
- VELAYOTHAM, M. y JAIN, J. M. Preliminary studies on the development of an ideal soil test for available phosphorus for rice under field conditions. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi) 1:135-143. 1971.
- VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Equipe de pedologia e fertilidade de solo (Brasil) Bol. Tec. 7. Rio de Janeiro, 1969.
- VIRMANI, S. M. Comparative efficacy of different methods for evaluating available sulphur in soils. Indian J. Agr. Sci. 41:119-125. 1971.
- WAFFELAERT, T. Essai d'estimation de la valeur agricole de familles de sols au Congo. Ann. Gembloux 69:688-699. 1963.
- WALKER, J. L. El Análisis de suelo y recomendaciones para fertilizantes. Min. de Agr. DIGESA, Guatemala, 1971. 16 p.
- WALLACE, T. Plant analysis and fertilizer problems. Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux, Paris, 1956. 410 p.
- WALMSLEY, D. et al. An evaluation of soil analysis methods for nitrogen, phosphorus and potassium using banana. Trop. Agr. (Trinidad) 48:141-155. 1971.
- _____, y CORNFORTH, I. S. Methods of measuring available nutrients in West Indian soils. II. Phosphorus. Plant and Soil 39:93-101. 1973.
- WALSH, L. M., y BEATON, J. D. (eds.). Soil testing and plant analysis, rev. ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1973.
- WAUGH, D. I., y MANZANO, A. The correlation of phosphorus response with soil analysis in tall and dwarf wheat varieties in Bolivia. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi) 1:377-382. 1971.
- _____, CATE, Jr., R. B., y NELSON, L. A. Discontinuous models for rapid correlation, interpretation and utilization of soil analysis and fertilizer response data. Int. Soil Fert. Eval. Improvement Program. Tech. Bull. 7. North Carolina State University, Raleigh, 1973.
- _____, _____, y MANZANO, A. New concepts in biological and economical interpretation and fertilizer response. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). Soil management in tropical America. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 484-501.
- WEBB, R. A. A new approach to the study of the fertility of tropical soils. Sols Afr. 3:379-391. 1955.
- WEIR, C. C. Evaluation of chemical soil tests for measuring available phosphorus on some Jamaican soils. Trop. Agr. (Trinidad) 39:67-72. 1962.
- _____. Phosphorus and potassium states of some Trinidad soils. Trop. Agr. (Trinidad) 43:315-321. 1966.
- WONG, C. M. Soil testing and its application with special reference to Taiwan. ASPAC Ext. Bull. 10. 1971.

CAPITULO 10

MANEJO DEL SUELO EN AREAS DE AGRICULTURA NOMADA

El resto de los capítulos de este libro intentan consolidar la información presentada previamente en términos de los cuatro sistemas de manejo más comunes que se encuentran en los trópicos: agricultura nómada, cultivo de arroz inundado, cultivos intercalados, y pasturas tropicales.

De éstos, la agricultura nómada cubre la mayor parte de la masa de tierras tropicales y es el sistema tropical de manejo del suelo más generalizado.

SISTEMAS DE AGRICULTURA NOMADA

La agricultura nómada puede definirse como el sistema agrícola en que desmontes temporales se cultivan por un número menor de años de los que permanece en barbecho. Es la práctica predominante el 30% aproximadamente de los suelos explotables del mundo, 3600 millones de hectáreas, así como el medio de subsistencia de más de 250 millones de personas, o sea el 8% de la población del mundo (Hauck, 1974). Aún en el área tropical más densamente poblada, el sureste de Asia, alrededor de una tercera parte de su tierra cultivable está bajo agricultura nómada (Dobby, 1950). En términos de área total, la agricultura nómada es el sistema agrícola predominante en América y África tropicales. Se le emplea mayormente en áreas poco pobladas donde no se cuenta con fuerza mecánica ni fertilizantes.

Esta práctica se conoce con una diversidad de nombres, tales como "milpa" en México y América Central, "conuco", "roza", "monte" y "chaco" en América del Sur, "kaingin" en las Filipinas, "chena" en Sri Lanka, "lua" en Vietnam, "ray" en Laos y "ladang" en Indonesia. En inglés también se le llama "slash and burn agriculture", "bush following" y "swidden farming". Recientemente se aplicó el término "rotación de tierras" a los sistemas de agricultura nómada en que los agricultores viven en asentamientos permanentes, en contraposición con agricultura nómada "verdadera" en la cual tanto los campos como los asentamientos se trasladan. En este libro se usa el término agricultura nómada para ambas situaciones.



Fig. 10.1. Patrón de agricultura nómada cerca de Yurimaguas, en la selva amazónica del Perú.



Fig. 10.2. Quema después de que el material cortado se ha secado, en Yurimaguas, Perú.

Sin embargo, existe una similitud notable en las prácticas de la agricultura tropical en todo el mundo. Se pueden distinguir dos formas principales fácilmente: agricultura nómada en los bosques y en las sabanas. En las áreas boscosas se desmontan pequeños campos con hacha o machete durante los períodos menos lluviosos y se quema poco antes de las primeras lluvias. Sin mayor remoción de escombros se procede a sembrar cultivos tales como maíz, arroz, frijoles, yuca, ñame, y plátano en huecos hechos con un palo con punta llamado "tacarpo", "macana", "espeque", etc. Para los cultivos de raíces en Africa a menudo se hacen montones de suelo con una azada. Los cultivos intercalados son muy comunes y hay cierto grado de desyerbas manuales. Después de la primera o segunda cosecha el campo se abandona y hay una regeneración rápida del bosque. El barbecho secundario puede crecer de 4 a 20 años antes de volver a ser cortado. Esta es la forma más corriente de agricultura nómada en los trópicos en general.

La agricultura nómada también se practica en las sabanas africanas situadas entre las regiones de bosques y de desierto. En estos ambientes ústicos la vegetación se quita durante la estación seca mediante la corta de los árboles esparcidos, se arrancan los pastos y se quema. Nye y Greenland (1960) informan de un ejemplo típico. Después de limpiar y quemar el suelo se raspa con azada y se forman montones de tierra de unos 50 cm de alto. En los montones se siembran ñames, con intersiembras de maíz, zapallos o frijoles. Después del primer año los montones con ñames se destruyen y se siembran maíz y frijoles en lomos angostos, seguidos por maní y mijo. Luego el terreno se abandona y aparecen varias gramíneas no apetecibles, especialmente *Imperata cylindrica*. Después de 10 años se repite el ciclo.

Por lo tanto, la agricultura nómada de sabana difiere de la de regiones boscosas en cuatro aspectos principales: 1) la capa arable sufre muchos disturbios en el proceso de arrancar las raíces de las gramíneas, de amontonar la tierra y de hacer los lomos; 2) el período de cultivo es más largo; 3) el suelo permanece desnudo durante la estación seca, con considerable peligro de erosión; y 4) las malas hierbas son un problema mucho más serio.

Se usa la mayoría de los tipos de suelo, cualquiera que sea su nivel de fertilidad. La agricultura nómada se practica en áreas con precipitación pluvial de 750 a 4500 mm. En las áreas de mayor pluviosidad en las que no es posible quemar, como en la costa del Pacífico, en Colombia, la vegetación cortada se usa como cubierta para el suelo (Snedaker y Gamble, 1969). Ruthenberg (1971) y Greenland (1974) se refieren a otras variaciones en los sistemas de bosque y de sabana.

La literatura sobre agricultura nómada es abundante. Conklin (1963) compiló una bibliografía con más de 1300 citas referentes principalmente a aspectos geográficos y antropológicos. En Africa los países coloniales llevaron a cabo una extensa investigación sobre suelos antes de la independencia. Estos estudios están resumidos en tres

publicaciones: Nye y Greenland (1960), Newton (1960) y Jurion y Henry (1969). La literatura latinoamericana ha sido resumida por Sánchez (1973). La evolución de la agricultura nómada en relación con otros sistemas agrícolas del mundo está bien cubierta por Gregg (1974). Valiosa información de actualidad también se ha publicado de un seminario sobre agricultura nómada y conservación de suelos en Africa (FAO-SIDA, 1974).

A pesar de la extensa literatura sobre este tópico y las grandes cantidades de tierras y de gentes involucradas, hay una considerable controversia en círculos académicos y populares sobre el valor de la agricultura nómada. En 1957 la FAO condenó oficialmente la agricultura nómada por considerarla como un desperdicio de tierra y de recursos humanos y una causa importante de erosión y deterioro del suelo (FAO, 1957). Esta organización ha urgido a los gobiernos miembros a eliminar la agricultura nómada tan pronto como sea posible. Estudios subsiguientes de FAO apoyan este punto de vista pero con menos vehemencia (Watters, 1971; FAO-SIDA, 1974). Esta posición se refuerza a menudo con la creencia común de que los suelos tropicales se deterioran rápidamente tanto física como químicamente con la exposición y que con frecuencia se vuelven laterita.

En los últimos años el movimiento ecológico mundial ha expresado argumentos en el otro sentido; la agricultura nómada se considera un sistema ecológicamente sano para áreas poco pobladas y con poca disponibilidad de capital e insumos.

Esta divergencia de opinión es paradójica si se toma en cuenta la gran cantidad de información disponible. Para alcanzar un equilibrio razonable, este capítulo describe las diversas fases de la agricultura nómada, y los intentos que se han hecho ya sea por mejorar esta práctica o por reemplazarla.

CICLOS DE LOS NUTRIMENTOS EN SUELOS DE BOSQUE

El concepto central de la agricultura nómada es la dependencia en los períodos de barbecho en bosques o sabanas como fuente de nutrientes para los cultivos. Estos nutrientes se acumulan gradualmente durante el período de barbecho y sirven como alternativa de la fertilización. Por lo tanto, es necesario hacer un examen de los ciclos por los que pasan los nutrientes durante el período de barbecho.

La existencia de un ciclo de nutrientes casi cerrado entre un bosque tropical adulto y el suelo, fue reconocido primero por Hardy (1936) en Trinidad. Desde entonces muchos estudios han intentado cuantificar este fenómeno con el objeto de entender el mecanismo responsable del crecimiento exuberante del bosque en suelos de otra manera infértiles. El ciclo de los nutrientes tiene dos áreas principales de almacenamiento: la biomasa y la capa superior del suelo conectadas por varias sendas, tal como se ilustra en la Fig. 10.3.

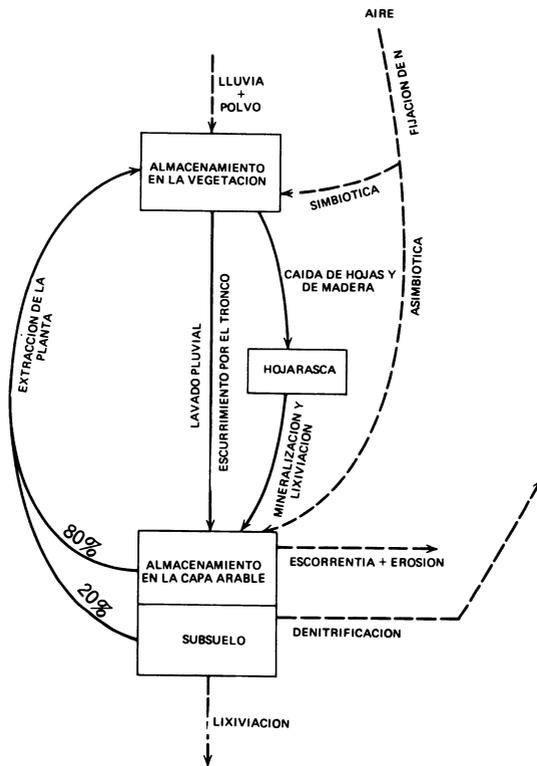


Fig. 10.3. Ciclo simplificado de los nutrientes del suelo en un bosque. Las líneas de puntos representan adiciones o remociones del sistema.

ALMACENAMIENTO DE BIOMASA

La biomasa total de bosques tropicales adultos oscila entre 200 y 400 ton/ha de materia seca. Los estudios llevados a cabo en Zaire (Bartholomew et al, 1953), Ghana (Greenland y Kowal, 1960), Panamá (Golley et al, 1969) y Puerto Rico (Ovington y Olson, 1970) indican que la proporción de los componentes principales del bosque es bastante constante. Aproximadamente el 75% de la biomasa consiste en ramas y troncos, 15 a 20% de raíces, 4 a 6% de hojas y 1 a 2% de hojarasca (Cuadro 10.1).

Estudios en Guatemala muestran que la tasa del recrecimiento del bosque secundario es alrededor de 10 ton/ha por año durante los 9 primeros años (Snedaker, 1970). Estudios en Zaire, (Fig. 10.4) indican que aproximadamente el 90% del máximo de biomasa se produce durante los primeros 8 años del crecimiento. La curva de esta materia seca es similar a las curvas de muchos cultivos, excepto con diferentes

CUADRO No. 10.1. Distribución de la biomasa de algunos bosques tropicales adultos. (Fuente: calculado con base en datos de Bartholomew et al, 1953; Golley et al, 1969; Greenland y Kowal, 1960; y Ovington y Olson, 1970).

Componente de la biomasa	MATERIA SECA (ton/ha)				
	Kade, Ghana (40 años de edad)	Yangambi, Zaire (18 años de edad)	El Verde, Puerto Rico (virgen)	Darién, Panamá	
				Tropical húmedo (virgen)	Premontano (virgen)
Hojas	25*	6	8	12	11
Madera	278	132	190	377	259
Hojarasca	2	6	6	3	5
Raíces	54	31	65	10*	13**
Total	361	175	269	402	288

(*) Incluye ramillas y otros materiales.

(**) Solamente raíces superficiales.

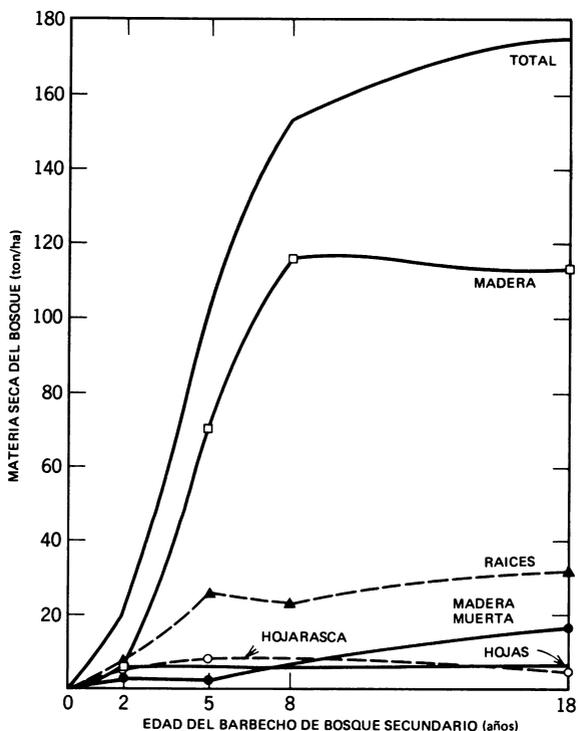


Fig. 10.4. Aumentos de biomasa en los componentes del bosque según la edad, en un bosque secundario de Yangambi, Zaire. (Fuente: adaptado de Bartholomew et al, 1953).

órdenes de magnitud tanto en el eje de la materia seca como en el tiempo.

El primer año de recrecimiento del bosque es similar al crecimiento de cultivos en términos de producción de materia seca. Tergas y Popenoe (1971) encontraron que la producción de materia seca de un bosque de 10 meses de edad era de 9,7 ton/ha, mientras que maíz sin fertilizar producía 9,9 ton/ha cerca de Izabal, Guatemala. Cuando el maíz se fertilizaba adecuadamente producía 30 ton/ha de materia seca durante el mismo período. Resultados de comparaciones de períodos más largos en Nigeria mostraron que el bosque secundario producía 40 ton/ha después de 6 años de recrecimiento, mientras que pasturas de pasto estrella (*Cynodon dactylon*) producían 17 ton/ha (Jaiyebo y Moore, 1964).

Las cantidades de nutrimentos acumulados por los barbechos de bosques son notables. La Fig. 10.5 muestra que en un período de 8 años la biomasa acumulada sobrepasa 500 kg/ha de N, K, Ca, y Mg,

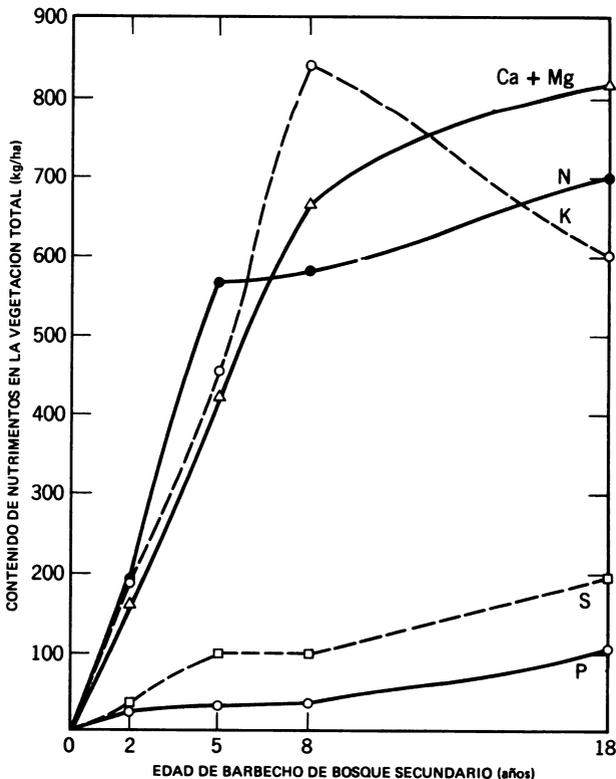


Fig. 10.5. Patrón de acumulación de nutrimentos en el barbecho de un bosque secundario en Yangambi, Zaire. (Fuente: adaptado de Bartholomew et al, 1953).

así como cantidades considerables de S y P. En el Cuadro 10.2 se presenta el ámbito del contenido de nutrimentos de la biomasa del bosque. Nye y Greenland (1960) explican el mecanismo como sigue:

“Cuando una parcela cultivada se abandona, supuestamente por agotamiento de la fertilidad, las plántulas y el recrecimiento del bosque anterior en poco tiempo forman un dosel que reduce la temperatura del suelo y detiene la erosión. Las adiciones de hojarasca se descomponen rápidamente, agregando nutrimentos al suelo, los cuales no son lixiviados debido al pronto establecimiento de las raíces del bosque. Se forma un ciclo de nutrimentos casi cerrado”.

Las cantidades de nutrimentos del ciclo aumentan con la hojarasca agregada y con el tiempo alcanza una meseta. Según las Figs. 10.4 y 10.5 esta meseta se alcanza aproximadamente en 8 años en bosque tropical údico desarrollado en un Ultisol en Zaire. No se dispone de datos comparables de otras áreas. Presumiblemente las tasas de crecimiento pueden ser mayores en suelos con un nivel más alto de basés.

CUADRO No. 10.2. Ambito de contenido de nutrimentos en biomasa total de bosques adultos en Zaire, Ghana, Panamá y Puerto Rico. (Fuente: Sánchez, 1973).

Elemento	Ambito (kg/ha)	Elemento	Una observación (kg/ha)
Nitrógeno	701–2044	Azufre	196
Fósforo	33–137	Hierro	43
Potasio	600–1017	Zinc	13
Calcio	653–2760	Manganeso	5
Magnesio	381–3890	Cobre	3

Fuera de esta explicación queda la interrogante de por qué un bosque secundario crece tan rápidamente en un suelo en que los cultivos no logran hacer lo mismo. Allí debe haber un suministro adecuado de nutrimentos para especies arbóreas, no aprovechables por los cultivos. No se conoce la respuesta correcta a esta pregunta, pero los requisitos de nutrimentos de los bosques son distintos a los de los cultivos. Además, muchos de los árboles talados brotan nuevamente y aprovechan los grandes sistemas radiculares existentes. Sin embargo, se ha demostrado que si el período de cultivos se extiende por mucho tiempo, el bosque no vuelve a crecer, y en su lugar aparecen gramíneas no forrajeras.

Los bosques tropicales acumulan nutrimentos con mayor rapidez que los bosques de zona templada. Según Greenland y Kowal (1960) los bosques tropicales secundarios con 18 años de edad, acumulan en

su biomasa más nutrimentos que bosques templados de coníferas o de maderas duras de 50 a 100 años de edad.

Solamente alrededor del 40 ó 50% de la biomasa total se agrega al suelo, principalmente en forma de hojas, ramas pequeñas y raíces. El patrón de acumulación de nutrimentos en estas partes es más rápido que en el resto de la vegetación. Las hojas acumulan cerca del 94% de su absorción máxima en dos años de recrecimiento del bosque. De acuerdo con cálculos basados en el estudio de Zaire, alrededor del 80% de la producción máxima de hojarasca y 64% de la producción máxima de hojarasca y 64% de la producción máxima de raíces se logran dentro de los 5 primeros años (Fig. 10.6).

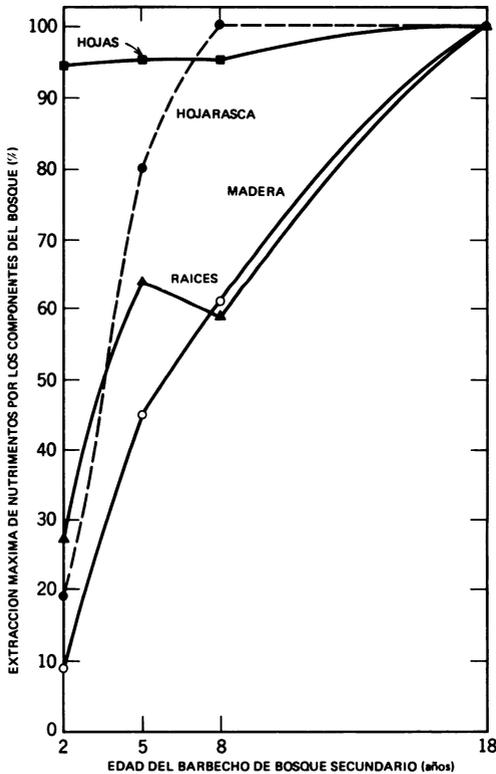


Fig. 10.6. Patrones de acumulación de nutrimentos en los principales componentes de un bosque secundario en Yangambi, Zaire. (Fuente: adaptado de Bartholomew et al, 1953).

ALMACENAMIENTO EN EL SUELO

Greenland y Kowal (1960) establecieron la magnitud de la capacidad de almacenamiento de nutrimentos de Alfisoles de Africa Occi-

dental en equilibrio con un bosque adulto. La capa superior de 30 cm de un Alfisol contenía 2,6 veces la cantidad de nitrógeno de la biomasa, y una cantidad de calcio y magnesio intercambiables más o menos igual a la de calcio y magnesio total de las plantas. La capa arable contenía el 75% de potasio de la biomasa como potasio intercambiable, pero apenas el 9% del fósforo de la biomasa como fósforo disponible.

El nivel de fósforo y bases de este suelo es considerablemente más alto que el de Ultisoles, Oxisoles y algunos Inceptisoles. Las relaciones en tales suelos pueden ser considerablemente diferentes. El estudio de Ghana también pone de manifiesto que más de dos terceras partes del sistema radicular de los bosques adultos se encuentran dentro de los 20 a 30 cm superiores del suelo (Greenland y Kowal, 1960), de manera que el subsuelo juega un papel secundario en el ciclo de nutrimentos. La naturaleza superficial de los sistemas de raíces de los bosques tropicales también se ha observado en otras áreas.

TRANSFERENCIA DE NUTRIMENTOS DE LA VEGETACION AL SUELO

Los mecanismos reconocidos en la transferencia de nutrimentos son el lavado de la lluvia (flujo a lo largo del tallo y caída total), caída de hojarasca, caída de madera y descomposición de raíces. Aunque el lavado pluvial varía considerablemente con las estaciones y especies, su contribución es considerable. Nye (1961) estimó que el lavado pluvial agregaba al suelo alrededor de 12 kg de N, 4 kg de P, 220 kg de K, 311 kg de Ca y 70 kg de Mg/ha por año. Sollins y Drewry (1970) observaron que las concentraciones de N, K, Ca, Mg y S en el agua de lluvia aumentó de dos a seis veces al pasar a través de un bosque en Puerto Rico. En el Cuadro 10.3 se presentan sus estimaciones. Aunque el contenido de nutrimentos en el agua de lluvia es

CUADRO No. 10.3. Aumentos en composición nutritiva del agua de lluvia conforme pasa a través del bosque pluvial tropical. (Fuente: adaptado de datos de Sollins y Drewry, 1970).

Agua de lluvia	Nutrimentos (ppm)				
	NO ₃	K + Na	Ca	Mg	SO ₄
Lluvia*	0,1	3,6	0,9	0,7	1,1
A través del follaje	0,6	14,1	2,1	1,2	3,0
Flujo por el tallo	1,7	4,7	1,7	0,9	0,1

(*) Antes de llegar al dosel del bosque.

bajo, una considerable cantidad de nutrimentos llegan al suelo conforme la lluvia pasa a través de la vegetación.

Las cantidades anuales de hojarasca caída oscila de 5,5 a 15,3 ton/ha en los trópicos, en comparación con 1,0 a 8,1 ton/ha en los bosques de zona templada (Ewell, 1968). La composición nutritiva de la hojarasca es similar en bosques tropicales y templados, con excepción de un contenido considerablemente mayor de nitrógeno en los trópicos. En el Cuadro 10.4 aparece la composición nutritiva en capas de hojarasca en Guatemala, Puerto Rico, Ghana y Zaire.

CUADRO No. 10.4. Ambitos en composición nutritiva de capas de hojarasca de Zaire, Ghana, Guatemala y Puerto Rico. (Fuente: Sánchez, 1973).

Nutrimento	Ambito (kg/ha)
Nitrógeno	74–200
Fósforo	1–7
Potasio	8–81
Calcio	45–220
Magnesio	10–94
Azufre	9–10

Las relaciones entre producción, acumulación y descomposición de la hojarasca fueron estudiados en Colombia, Guatemala y Puerto Rico, así como por los grupos de Nye y Bartholomew, en Africa. Aunque ha habido mucha controversia acerca de cuáles son los parámetros apropiados, las tasas de descomposición de la hojarasca varían del 50 al 500% por año (McGinnis y Golley, 1967). Estudios de descomposición con el tiempo en Zaire (Bartholomew et al, 1953) y en Guatemala (Ewell, 1968) muestran tendencias muy semejantes. Aproximadamente la mitad de la materia seca de la hojarasca se mineraliza dentro de las primeras 8 a 10 semanas, después de las cuales la tasa disminuye. Alrededor del 80% del potasio se mineraliza dentro del primer mes. Fósforo, calcio, magnesio y azufre se mineralizan más rápidamente que la materia orgánica, pero el nitrógeno se mineraliza más lentamente. La Fig. 10.7 representa gráficamente los datos de Zaire, de Bartholomew. Los resultados de Ewell en Guatemala obtenidos 15 años más tarde son esencialmente idénticos.

La única estimación en la literatura disponible que incluye las cuatro fuentes de transferencia de nutrimentos es la de Nye (1961) de un Alfisol de Ghana. Suponiendo que el 10% de las raíces se descomponen anualmente, la tasa anual de transferencia de nutrimentos de la vegetación al suelo es como se aprecia en el Cuadro 10.5.

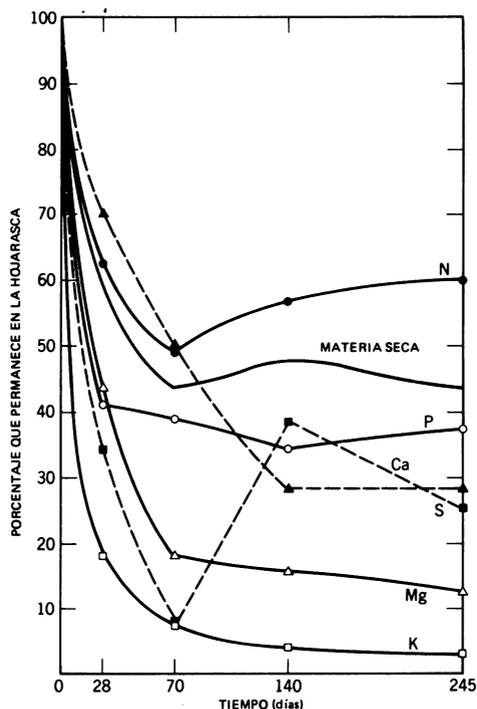


Fig. 10.7. Tasas de la descomposición de la hojarasca en Yangambi, Zaire. (Fuente: adaptado de Bartholomew et al, 1953).

CUADRO No. 10.5. Adiciones anuales de nutrientes de un bosque adulto a un Alfisol en Ghana. (Fuente: calculado de datos de Nye, 1961).

Vía de transferencia	Materia seca (kg/ha)	Nutrientes (kg/ha)				
		N	P	K	Ca	Mg
Lavado pluvial	—	12	3,7	220	29	18
Caída de hojarasca	10.528	199	7,3	68	206	45
Caída de madera	11.200	36	2,9	6	82	8
Descomposición de raíces	<u>2.576</u>	<u>21</u>	<u>1,1</u>	<u>9</u>	<u>15</u>	<u>4</u>
Total	24.304	268	15,0	303	332	75
Transferencia anual (%)	7	13	11	33	12	19

¡Este programa de fertilización natural es la que conserva los bosques tropicales tan bien provistos de nutrimentos!

PERDIDAS DE NUTRIMENTOS DEL SISTEMA

Las adiciones de nutrimentos de la vegetación al suelo están bien balanceadas por la absorción de nutrimentos en la capa arable por la vegetación. Aparentemente la naturaleza superficial de las raíces de los bosques tropicales proporciona un medio muy efectivo de mantener un ciclo de nutrimentos casi cerrado (Nye y Greenland, 1960). Sin embargo la absorción de nutrimentos del subsuelo puede ser del 20% del total, contribuyendo así a la eficiencia del sistema. Casi no existen datos sobre pérdidas por lixiviación. Un análisis de aguas del río Amazonas dio las siguientes estimaciones sobre lixiviación: 0,5 kg NO₃, 4,4 kg K, 37 kg Mg y 5 kg SO₄/ha por año (Russell, 1950). Estas pequeñas cantidades confirman la tesis de que las pérdidas de nutrimentos del ciclo cerrado son pequeñas.

EL CICLO COMO UN TODO

Odum y sus colaboradores intentaron un estudio cuantitativo del ciclo de nutrimentos en Puerto Rico. Desafortunadamente la calidad de los datos es dudosa en muchos de sus informes. Sin embargo, las siguientes generalizaciones pueden ser de valor. El ciclo del nitrógeno consiste de un flujo anual de 102 kg de N/ha por año. Este elemento está estrechamente retenido en el ciclo. Las adiciones del lavado pluvial y la fijación biológica más las posibles pérdidas por desnitrificación se consideran importantes (Edminsten, 1970). El ciclo del fósforo está restringido a la capa superficial del suelo. El ³²P liberado de las hojas en descomposición fue capturado cuantitativamente por las raíces superficiales en la capa de los 5 cm superiores del suelo y subsecuentemente absorbido por las plantas (Luse, 1970). El potasio circula rápido pero es retenido débilmente. Por otra parte el Ca, Mg, Mn, Fe y Cu circulan lentamente y son retenidos fuertemente (Jordan, 1970; Odum, 1970).

CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO BAJO AGRICULTURA NOMADA

Cuando el equilibrio descrito en la sección anterior se rompe, el suelo sufre una serie de cambios causado por desmonte, quema, siembra de cultivos y rebrote del bosque. Esta sección describe lo que se conoce sobre este proceso. El lector debe estar seguro de que aquí se presentan datos de una gran variedad de suelos, y la magnitud de los cambios pueden depender del suelo.

TEMPERATURA DEL SUELO

La temperatura del aire en un bosque tropical en quema puede llegar de 450 a 650°C a 2 cm sobre la superficie del suelo. Según Zinke et al, (1970), la temperatura disminuye a razón de 100°C/cm bajo la superficie del suelo en los primeros 5 cm. Más abajo de esa profundidad, Suárez de Castro (1957) no encontró cambios en la temperatura del suelo durante quemas en Colombia.

La variabilidad en las temperaturas del suelo durante las quemas, depende de la duración e intensidad de la misma quema. Un estudio en Tailandia proporcionó información interesante. La Fig. 10.8 muestra el perfil de temperatura de una quema “normal”, una quema “fuerte” y alrededor de un montón de residuos que arden por varios días. La figura indica que el aumento de la temperatura del suelo es moderado en las quemas normal y fuerte, pero considerable alrededor de los montones de leña que se volvieron a quemar.

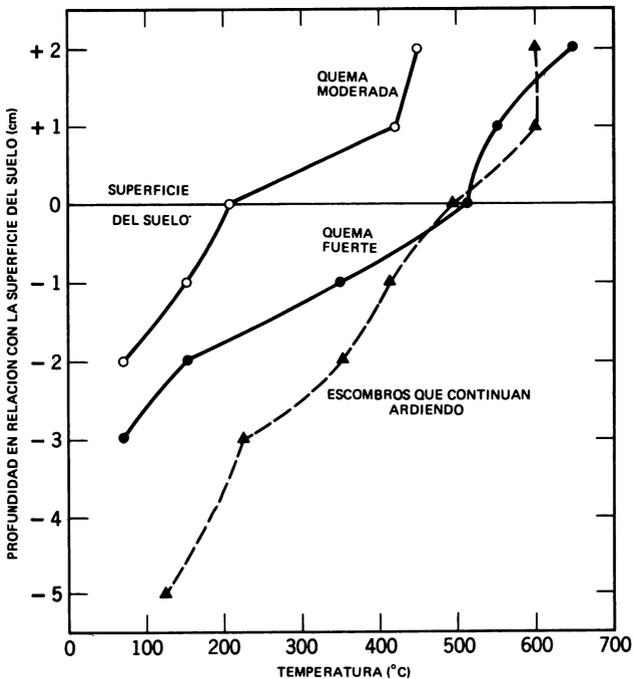


Fig. 10.8. Temperaturas del aire y del suelo en el momento de la quema en un Alfisol en Ban Pa Paes, Tailandia. (Fuente: adaptado de datos de Zinke et al, 1970).

Después de terminado el proceso de quema, las áreas limpias tienen temperaturas medias del aire y del suelo más altas que antes (Budowski, 1956; Ahn, 1974). En un bosque cortado en Tailandia, la temperatura máxima del aire subió de 25 a 32°C después del desmonte, pero no registraron cambios en la temperatura mínima del aire (ASRCT, 1968). La temperatura máxima del suelo a 7,5 cm de profundidad subió de 27 a 38°C cuando se cortó un bosque en Ghana, mientras que la temperatura mínima permaneció en 24°C (Cunningham, 1963).

La presencia de muchas partículas de carbón de tamaño variable puede cambiar el color de la capa arable, especialmente en suelos arenosos y aumentar la capacidad calórica de ellos. Muchas de estas partículas no se descomponen rápidamente. Este autor ha observado fragmentos de carbón en la superficie de suelos de bosques que han estado 18 años en barbecho, en la amazonía peruana.

Estudios de Lal y sus colegas (1975) en Alfisoles de Nigeria, muestran que la remoción de la vegetación también aumenta las fluctuaciones en las temperaturas diurnas del suelo a niveles tan altos como de 20 a 30°C. La germinación, la emergencia, el crecimiento de las plántulas y la absorción de agua y de nutrimentos de cultivos tales como maíz, soya, y ñames resultan seriamente afectados por temperaturas altas del suelo del orden de 40 a 50°C. Estos valores extremos se deben a la baja capacidad de conducción del calor de estos Alfisoles, los cuales tienen una capa arable arenosa. El bajo contenido de arcilla y la baja capacidad de retención de humedad hacen que estos suelos sean más calientes que los suelos de textura más pesada.

En un bosque virgen de Guatemala solamente el 4% de la radiación solar total llega a la superficie del suelo (Snedaker, 1970). Por lo tanto la energía solar que llega a un suelo desmontado es 25 veces mayor que la del bosque. Hay muy poca duda de que los procesos biológicos, principalmente la descomposición de la materia orgánica avanzan con mayor rapidez en los suelos limpios. En la agricultura nómada tradicional el suelo sólo queda expuesto de 1 a 2 meses después de la tala hasta la formación del primer dosel de follaje. El efecto es más marcado cuando el cambio es de agricultura nómada a cultivos continuos.

Cuando los campos se abandonan y comienza el rebrotamiento del bosque, las temperaturas del suelo descienden. Snedaker informó que durante el primer año del rebrotamiento del bosque, la radiación solar que llegaba al suelo disminuyó a un 35% de la cantidad cuando se desmontó el terreno. En bosques secundarios de mayor edad solamente del 10 al 15% de la radiación solar llega a la superficie del suelo, lo que se nota fácilmente cuando se entra al bosque tropical después de haber caminado por un campo desmontado; siempre es más fresco (pero más húmedo) dentro del bosque.

No se dispone de información similar de las áreas de sabana. Las diferencias de las temperaturas del aire y del suelo después del des-

monte son probablemente menores en comparación con los cambios que se acaban de describir en áreas desmontadas.

HUMEDAD DEL SUELO

El régimen de humedad del suelo también cambia cuando se tala un bosque. El efecto inicial es equivalente al de un aumento considerable de la pluviosidad. Greenland y Kowal (1960) encontraron que el follaje de un bosque de 40 años de Ghana interceptaba y evaporaba como un 16% más de lluvia. Después de que un bosque de Tailandia fue talado la evapotranspiración diaria aumentó 8 veces (ASRCT, 1968). La mayoría de las pérdidas por evapotranspiración fueron de los horizontes superiores, lo que dio por resultado un suministro no uniforme de humedad. Después de la tala se pueden formar capas freáticas fluctuantes (Budowski, 1956) el contenido de humedad del suelo puede aumentar en el horizonte B (ASRCT, 1968).

ESTRUCTURA DEL SUELO

Corrientemente se cree que la tala y la quema son causa de deterioro de las propiedades físicas del suelo. Sin embargo la evidencia indica que este efecto depende de las propiedades del suelo. Suárez de Castro (1957) observó que la quema aumentó las tasas de infiltración y la fracción de agregados de suelo mayores de 0,25 mm en un Andept de Colombia. Popenoe (1957) encontró que la densidad aparente de la capa de 5 a 10 cm de suelos volcánicos de Guatemala aumentó de 0,56 a 0,66 g/cc después de la tala, y en otra observación disminuyó de 0,74 a 0,70 g/cc después de 3 ó 5 años de rebrotamiento del bosque. Probablemente estas diferencias no son lo suficientes significativas para afectar el crecimiento de las plantas. Popenoe (sin publicar) informa de casos de deshidratación irreversible en suelos que están alrededor de troncos que se queman durante mucho tiempo o en montones de residuos que vuelven a encenderse y a quemarse.

Observaciones de Moura y Buol (1972) en un Oxisol de Brasil indican una marcada disminución en la tasa de infiltración de 82 a 12 cm/hr cuando se taló el bosque original y la tierra se labró por 15 años. Esta disminución fue beneficiosa por cuanto la tasa original de infiltración era excesiva. Por lo tanto, en suelos altos en óxidos, tales como Andepts y Oxisoles, los cambios de estructura que tienen lugar con la tala no son, de ninguna manera perjudiciales.

Sin embargo, en suelos con propiedades físicas menos deseables la situación es bastante diferente. Lal et al, (1975), informaron que cuando ciertos Alfisoles de Nigeria con capas arables arenosas fueron desmontados, hubo una seria formación costrosa en la superficie, que dio por resultado serias pérdidas por erosión.

Las tasas de infiltración declinaron rápidamente después del desmonte y del cultivo del bosque. Cunningham (1963) observó una disminución en porosidad total, del 52 a 43%, y una disminución semejante en agregados estables en agua, en suelos con más de 3 años de desmonte en un Alfisol de Ghana, que había permanecido sin vegetación durante ese período de tiempo. Seubert (1975) observó que la tasa de infiltración de un Ultisol arenoso del Amazonas peruano era de 26 cm/hr bajo un bosque secundario de 17 años. Después de la tala la tasa de infiltración bajó a 14 cm/hr y permaneció así durante el primer año. Problemas similares de costras superficiales a las mencionadas por Lal se observaron en este sitio amazónico, especialmente después del segundo año de siembra continua de cultivos. Friese (1939) informó que la porosidad total de algunos suelos del sur de Brasil disminuyó del 51% en un bosque virgen al 12% en una sabana derivada. Este investigador atribuyó la disminución a la contracción y agrietamiento de la arcilla, que sugieren la presencia de montmorilonita. Estas observaciones sugieren que en suelos que inicialmente tienen propiedades físicas deficientes, tales como Alfisoles o Ultisoles arenosos, y también en familias montmoriloníticas, ocurren cambios perjudiciales en las propiedades físicas del suelo o a consecuencia del desmonte.

ESCORRENTIA Y EROSION

La escorrentía y la erosión son insignificantes en la mayoría de los suelos protegidos por el dosel de un bosque. Después de la tala la magnitud de estos procesos depende de las propiedades del suelo y del manejo.

En Guatemala, Popenoe (1957), encontró poca erosión superficial en campos desmontados con pendientes fuertes y lo atribuyó a la baja densidad aparente de los suelos. Observó que la mayor parte de la erosión ocurre en forma de derrumbes durante lluvias fuertes. Suárez de Castro (1957) mostró que la escorrentía disminuye después del desmonte en Colombia y lo atribuyó a un aumento en la permeabilidad a consecuencia de la quema. Ambos sitios estaban afectados por ceniza volcánica y probablemente son Andepts.

El efecto del desmonte sobre las pérdidas por escorrentía y erosión puede ser severo en otros suelos. Estudios en Africa Occidental llevados a cabo por Le Buanec (1972) en la Costa de Marfil y por Lal (1974) y Lal et al, (1975) en Nigeria, muestran que una gran cantidad de suelo se pierde por escorrentía y erosión cuando se desmontan Alfisoles con capa superficial arenosa. Lal informa que mientras la erosión es insignificante cuando hay bosque, puede ser tan alto como de 115 ton/ha de suelo por año en tierra arada no protegida. Cuando se perdió la primera pulgada de suelo, los rendimientos de los cultivos se redujeron hasta en un 50%. Las adiciones de fertilizantes no sustituyen la pérdida de suelo superficial debido a la penetración

deficiente de las raíces en el subsuelo arcilloso y pedregoso de los sitios mencionados por Lal. Consecuentemente, la magnitud de la amenaza de pérdidas por escorrentía y erosión depende de las propiedades del suelo.

El manejo es otro parámetro importante. La erosión sólo avanza cuando no hay dosel que proteja el suelo. En agricultura nómada tradicional, el suelo sólo carece de dosel durante unas pocas semanas. Los abundantes desechos en forma de troncos, ramas, pedazos de carbón y ceniza, protegen a la mayoría de los suelos durante este período crítico. Este autor ha observado que virtualmente no hay erosión en campos desmontados en Ultisoles escarpados en las selvas amazónicas con manejo tradicional. Sin embargo cuando se desmontan mecánicamente grandes extensiones de tierra, puede haber erosión, y ocurre. Así mismo, cuando la agricultura nómada es hecha por habitantes urbanos desplazados, se producen grandes cantidades de erosión. Watters (1971) ofrece una excelente descripción de este proceso tal como se observa en Venezuela. En los mismos tipos de suelo los agricultores nómadas tradicionales no provocan erosión, mientras que los recién llegados a esta práctica destruyen grandes cantidades de tierra. En consecuencia, los problemas de erosión están íntimamente ligados a la composición social de los agricultores.

En este tipo de situación es dónde ocurren los peligros de dejar expuestas capas de plintita. Este problema es particularmente serio en sabanas de Africa Occidental, en dónde las presiones de población han reducido el período de barbecho, dando lugar a que ocurra erosión cuando la tierra queda expuesta por la baja densidad de plantas de los cultivos y donde hay plintita en el subsuelo.

CAMBIOS EN EL NIVEL NUTRITIVO DEL SUELO BAJO AGRICULTURA NOMADA

Los suelos pasan por una serie de cambios en las propiedades químicas cuando se desmontan, se queman, se cultivan y luego se abandonan para que el bosque vuelva a crecer. Como se explicó antes, el desmonte aumenta la temperatura del suelo y por lo tanto la actividad biológica. La quema aumenta la temperatura del suelo temporalmente y produce grandes cantidades de ceniza que resultan equivalentes a buenas dosis de fertilizantes.

Se han hecho dos clases de estudios para seguir estos cambios. El primero y más común consiste en muestrear suelos simultáneamente en áreas donde se sabe que tienen edades determinadas después del desmonte. Sin embargo, tales estudios confunden los efectos del tiempo con los de variabilidad del suelo y no muestran una tendencia clara. Un número muy limitado de estudios ha seguido los cambios que tienen lugar en un suelo como función del tiempo. La discusión que sigue se basa en estudios del último tipo.

COMPOSICION DE LA CENIZA

Es muy poco lo que se sabe acerca de la cantidad y la composición química de la ceniza que queda después de la quema del bosque. Seubert (1975) obtuvo muestras de ceniza inmediatamente después de la quema de un bosque secundario de 17 años que había en un Ultisol de Yurimaguas, Perú. El peso medio de la ceniza de 64 parcelas era de 4 ton/ha en base de peso seco. Esto incluía partes de plantas quemadas parcialmente o chamuscadas así como ceniza verdadera. El hecho de que este material agregara el equivalente de aproximadamente 70, 14, 45 kg de N, P₂O₅ y K₂O/ha, 240 kg/ha de cal dolomítica, y considerables cantidades de Mn, Fe, Cu y Zn (Cuadro 10.6) indica que contrariamente a lo que corrientemente se cree, no todo el nitrógeno se pierde en el proceso de quema, por cuanto no toda la vegetación se quema completamente. La mayor parte de los materiales quemados total o parcialmente consisten en hojas, hojarasca, ramillas, y la corteza de las ramas y el tallo. El grueso de la materia seca del bosque (truncos, ramas, tocones y raíces) no se quemaron en este ambiente údico.

No se dispone de datos similares en la literatura tropical. Boyle (1973) informó que la ceniza producida después de la quema de un bosque de *Pinus banksiana* de 32 años de edad en un suelo arenoso de Wisconsin dio un promedio de 16 ton/ha de materia seca. La variabilidad entre las muestras varió entre 5 y 54 ton/ha de ceniza, lo

CUADRO No. 10.6. Composición elemental de la ceniza y material quemado parcialmente, y total de nutrimentos agregados a un Ultisol después de la quema de un bosque secundario de 17 años, en Yurimaguas, Perú. (Fuente: North Carolina State University, 1973 y Seubert, 1975).

Elemento	Composición	Adiciones totales (kg/ha)
N	1,72%	67
P	0,14%	6
K	0,97%	38
Ca	1,92%	75
Mg	0,41%	16
Fe	0,19%	7,6
Mn	0,19%	7,3
Na	180 ppm	0,7
Zn	137 ppm	0,7
Cu	79 ppm	0,3

que agregó al suelo de 46 a 595 kg/ha de K y de 37 a 1128 kg/ha de Ca.

Evidencia indirecta de la magnitud de las adiciones de nutrimentos al suelo mediante el proceso de desmonte y quema se obtiene por medio de análisis de suelo antes y después de la quema. En Alfisoles de Ghana las cenizas contribuyeron con 1,5 a 3 ton/ha de Ca, cerca de 180 kg/ha de Mg y 600 a 800 kg/ha de K según cálculos con datos de Nye y Greenland (1960, 1964). Sin embargo, las estimaciones para Oxisoles o Ultisoles son mucho más bajas. Cálculos para estos órdenes de suelos han sido hechos por Nye y Greenland (1960) en Ultisoles de Yangambi y Zaire y un número grande de suelos de Liberia, supuestamente Ultisoles. Este autor ha hecho cálculos semejantes en seis Latosoles amarillos (Oxisoles) con datos publicados por Brinkmann y Nascimento (1973), de Manaus, Brasil. Las cantidades agregadas de calcio iban de 275 a más de 600 kg/ha; magnesio de 30 a 80 kg/ha; y potasio, de 90 a 240 kg/ha. El nivel más bajo de bases de Oxisoles y Ultisoles se refleja dramáticamente en el valor nutritivo de la ceniza, en comparación con los Alfisoles.

La intensidad de la quema es una variable de mucha importancia. Desafortunadamente no se dispone de datos al respecto. Sin embargo, los agricultores de la Amazonía evalúan la calidad de la quema y con base en ella predicen si la cosecha va a ser buena. El proceso de quema es más completo en regímenes ústicos de humedad que en regímenes údicos, debido al menor contenido de humedad de la vegetación cortada en el primero de los regímenes en la estación seca.

CAMBIOS DE ACIDEZ EN EL SUELO

El pH aumenta después de la quema y baja gradualmente con el tiempo debido a la lixiviación de las bases. La magnitud y la rapidez de estos cambios varían de acuerdo con las propiedades del suelo y las cantidades de ceniza. En un Alfisol de Ghana, Nye y Greenland (1964) encontraron que el pH aumentó de 5,2 a 8,1 en la capa superior de 5 cm inmediatamente después de la quema, y bajó a 7,0 después de dos años (Fig. 10.9). En las capas de 5 a 15 y de 15 a 30 cm el pH aumentó de 4,9 y 6,2 con la quema y descendió a 5 después de dos años. Popenoe (sin publicar) también observó aumento del pH hasta 40 cm en un suelo afectado por cenizas volcánicas en Guatemala.

Estudios en la selva amazónica indican que los aumentos de pH con las quemas son de diferente orden de magnitud en suelos más ácidos. Brinkmann y Nascimento (1973) observaron que el pH de un Latosol amarillo (Oxisol) aumentó en la capa arable de 3,8 a 4,5 con la quema, y bajó rápidamente a su valor original en unos 4 meses. Seubert (1975) encontró que el pH aumentó de 4,0 a 4,5 en la capa

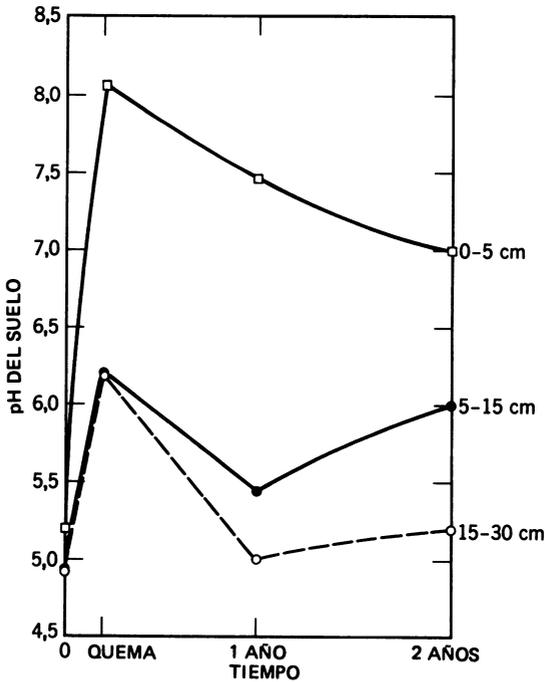


Fig. 10.9. Cambios de pH a diferentes profundidades del suelo en Kake, Ghana. (Fuente: adaptado de Nye y Greenland, 1964).

arable de un Ultisol y que permaneció estable en este nivel durante el primer año. Las cantidades menores de bases en las cenizas de estos suelos ácidos minimizan los aumentos en pH.

El efecto de estos cambios en el crecimiento de las plantas depende de la magnitud de los mismos. Según Lal et al, (1975), los niveles muy altos de pH que se observaron después de la quema en Alfisoles de Africa Occidental causó deficiencia de hierro en arroz de secano. En tales suelos la quema quizás tiene efectos dañinos inmediatos. Por otra parte los aumentos más moderados en los Oxisoles y Ultisoles amazónicos son beneficiosos para el crecimiento de las plantas. Los datos de Nye y Greenland muestran que los cambios de pH ocurren a profundidades considerables, sugiriendo un rápido movimiento descendente de la ceniza. Estos Alfisoles de Africa Occidental tienen una capa arable arenosa y con grava que facilitan el descenso. En un Ultisol del Amazonas no se observó evidencia alguna de movimiento descendente del calcio y el magnesio, pero el potasio se movilizó rápidamente durante el primer año después de la quema (North Carolina State University, 1974).

BASES INTERCAMBIABLES

Los cationes básicos de la ceniza producen aumentos dramáticos en los niveles de calcio, magnesio y potasio intercambiables después de la quema, seguidos de una disminución gradual durante el período de cultivos debido a la lixiviación y a la absorción de las plantas cultivadas. La magnitud de estos cambios varía de acuerdo con las propiedades del suelo y la composición de la ceniza. En la Fig. 10.10 se compara la dinámica de bases intercambiables y el pH en un Ultisol de Perú y un Alfisol de Ghana. En ambos suelos el contenido de calcio intercambiable se triplicó con la quema. El magnesio intercambiable se triplicó en el Ultisol, pero aumentó apenas ligeramente en el Alfisol. En ambos casos el potasio intercambiable mostró un aumento marcado después de la quema, seguido por un pronunciado descenso. Esto sugiere que el potasio se lixivió más rápidamente que el

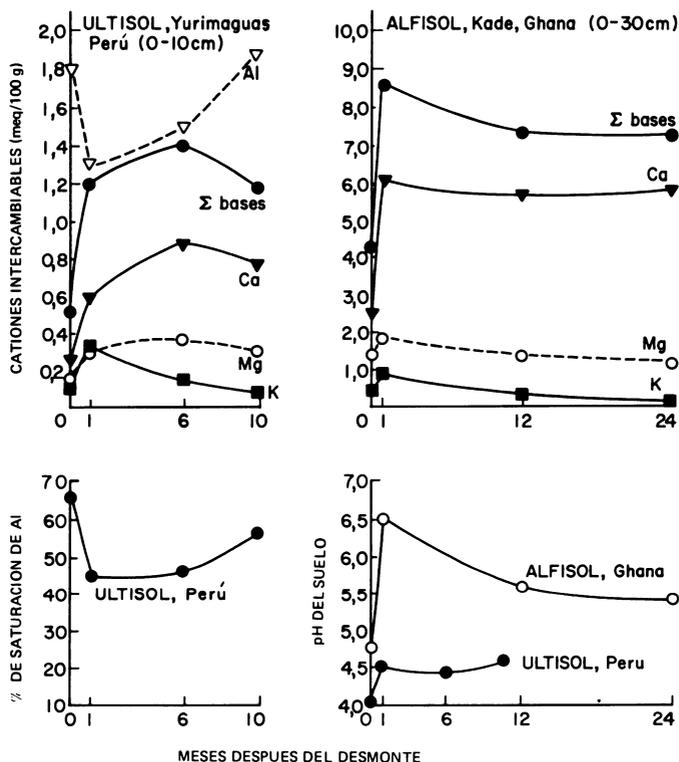


Fig. 10.10. Dinámica de las bases intercambiables y de la acidez del suelo después del desmonte y quema de un Ultisol de Yurimaguas, Perú, y en un Alfisol de Kade, Ghana. (Fuente: adaptado de Nye y Greenland, 1964; North Carolina State University, 1974; y Seubert, 1975).

calcio y el magnesio. Es interesante notar las diferencias entre estos dos suelos después de la quema. En el Ultisol había evidencia de agotamiento de bases después del sexto mes posterior a la quema, mientras que en el Alfisol no ocurrió ningún cambio significativo en el nivel de bases durante dos años después de la quema.

En suelos ácidos el aluminio es el catión dominante. El efecto de la quema en la disminución del aluminio intercambiable y de la saturación de aluminio fue bastante dramática en el Ultisol. Después de 6 meses el agotamiento de las bases y quizás una alta tasa de descomposición de la materia orgánica cambiaron la dirección de la curva (Fig. 10.10). Estos datos muestran cuán delicada es la situación en estos suelos altamente meteorizados. La quema cambió la condición del suelo de deficiente en potasio a suficiencia en este elemento, y de toxicidad de aluminio a ausencia de problemas de este elemento. Sin embargo durante el primer año las propiedades del suelo retrocedieron a los niveles de antes de la quema. Brinkmann y Nascimento (1973) han hecho observaciones semejantes en Oxisoles de Manaus, Brasil.

No hay datos comparables del Alfisol de Ghana. La curva de pH sugiere esencialmente el 100% de saturación de bases durante los dos años siguientes a la quema. Se supone que las razones para la agricultura nómada en el Alfisol después de dos años son otras aparte del nivel de bases. Por lo tanto, los efectos beneficiosos de la ceniza se pueden prolongar desde la iniciación al rebrotamiento del barbecho. Los niveles de calcio, magnesio y potasio intercambiables ha aumentado con el tiempo en la vegetación secundaria en Guatemala (Popenoe, 1957; Urrutia, 1967).

MATERIA ORGANICA Y NITROGENO ORGANICO DEL SUELO

Aunque la quema volatiliza la mayor parte del carbono, el azufre y el nitrógeno presentes en la vegetación, tiene poco efecto en la materia orgánica. Contrariamente a la creencia popular, en el proceso de la agricultura nómada la quema no destruye la materia orgánica. Las temperaturas del suelo durante la quema no son lo suficiente altas por un período suficientemente largo para combustión excepto en los montones de escombros que continúan ardiendo. Estudios de Nye y Greenland (1964) en Ghana, de Popenoe en Guatemala y de Seubert (1975) en Perú, muestran que más bien hay un pequeño aumento en carbono del suelo y de nitrógeno total después de la quema. Estos aumentos se han atribuido a combustión incompleta de la vegetación y a las dimensiones de las partículas de carbón en forma de carbono orgánico. En casos en que se ha informado de disminución marcada de la materia orgánica, tales disminuciones probablemente están asociadas con pérdidas por erosión de la capa arable.

Con el cultivo y la exposición el contenido de carbono orgánico disminuye en unos pocos centímetros de la parte superior debido al aumento de temperatura y de disturbios causados por los equipos de labranza. Laudelot (1961) en Zaire, también ha informado de un desarrollo repentino de mineralización de materia orgánica después de la quema. Este investigador lo atribuyó a un aumento repentino en la población microbiana después de la quema, y a algunas lluvias.

La magnitud de la disminución subsiguiente parece estar relacionada con el contenido de carbono orgánico en la capa arable. La Fig. 10.11 presenta los cambios observados por Popenoe en un Andept de Guatemala. Hubo un ligero aumento en materia orgánica del suelo inmediatamente después de la quema, que fue seguido por una marcada disminución y una tendencia hacia el equilibrio después de 4 meses. Este suelo está afectado por ceniza volcánica, lo cual explica el alto contenido de materia orgánica. La Fig. 10.12 muestra los cambios en materia orgánica en la capa arable de dos Oxisoles de Sierra Leona durante 5 años consecutivos de siembras de cultivos después de que el bosque fue cortado. A pesar de las diferencias en el contenido original de materia orgánica (3,5 y 10%) cada Oxisol perdió cerca de la mitad de su materia orgánica en 5 años. Los descensos más marcados ocurrieron durante el primer año.

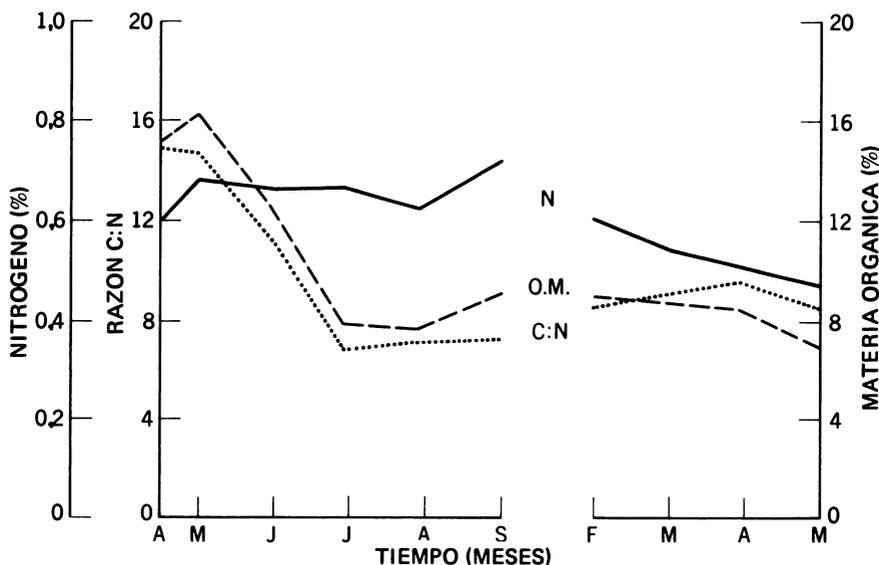


Fig. 10.11. Cambios en nitrógeno total del suelo, materia orgánica y razón C:N después del desmonte y quema de un suelo de Murciélago, Izabal, Guatemala. (Fuente: Popenoe, datos sin publicar).

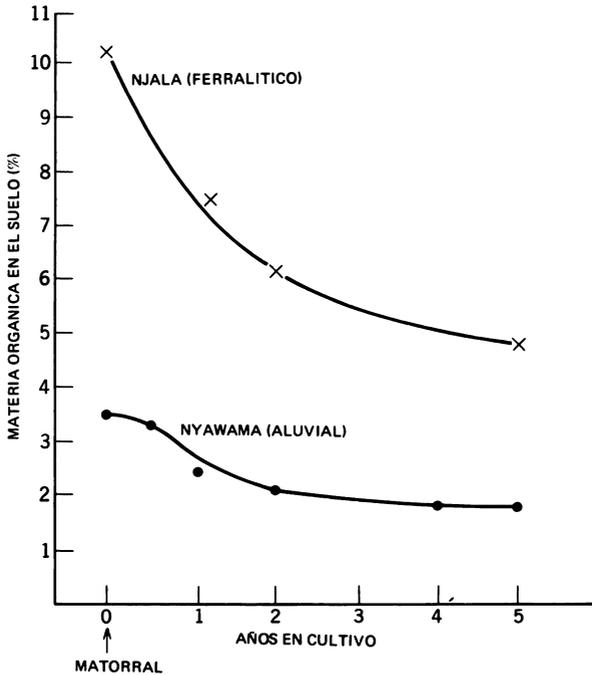


Fig. 10.12. Disminución de la materia orgánica en dos Oxisoles de Sierra Leona (profundidades de 2,5 y 18 cm) a consecuencia de 5 años de cultivos continuos después del desmonte. (Fuente: Brams, 1971).

En suelos con contenidos iniciales menores de materia orgánica la situación es diferente. En un Alfisol de Ghana, Nye y Greenland (1964) encontraron que el contenido de carbono orgánico de la capa arable aumentó de 0,94 a 1,25% con la quema, seguido por una disminución a 0,94% después de dos años del desmonte. En otras palabras, no hubo agotamiento marcado del carbono orgánico en relación con los niveles anteriores al desmonte. En un estudio por 10 años de Le Buanec (1972) en Alfisoles de la Costa de Marfil, no se observaron diferencias significativas en los contenidos de materia orgánica en tres áreas con prácticas adecuadas de control de la erosión y de fertilización. En este estudio el contenido de materia orgánica de la capa arable tenía un ámbito de 1,3 a 2,9%.

Estos pocos ejemplos sugieren que la magnitud del agotamiento del carbono orgánico después de la quema es mayor en suelos con mayores contenidos de carbono orgánico.

Los cambios en nitrógeno orgánico de la capa arable a consecuencia del desmonte muestra una tendencia diferente. Informes de Colombia y Guatemala sobre suelos afectados por ceniza volcánica indican muy poco cambio en nitrógeno y una disminución mucho más

lenta que la del carbono orgánico. Esto se ilustra en la Fig. 10.11 con los datos de Popenoe, y también ha sido observado por Suárez de Castro (1957). En tales casos la razón C:N cae marcadamente, sugiriendo que el aumento en la actividad biológica produjo grandes cantidades de CO₂, pero que parte del nitrógeno orgánico o estaba en forma bastante resistente, o estaba retenido en el suelo en forma de tejido microbiano. En suelos con contenidos menores de nitrógeno orgánico, la razón C:N permanece igual después del desmonte y el cultivo, tal como observaron en Alfisoles de Africa Occidental Cunningham (1963), Nye y Greenland (1964) y Le Buanec (1972), y en Perú North Carolina State University (1974).

Los datos disponibles también indican que los cambios en carbono orgánico, nitrógeno, o razón C:N están limitados a la capa arable, excepto cuando el efecto de la descomposición de las raíces del cultivo es evidente en el subsuelo.

Sin embargo, cuando los campos se abandonan y viene el rebrotamiento la tendencia antes descrita se invierte. Tanto el contenido de carbono orgánico como el de nitrógeno orgánico aumentan gradualmente sin cambios en la razón C:N. Reed (1975) en Liberia, Greenland y Nye (1959) en Ghana, y Urrutia (1967) en Guatemala, encontraron correlaciones positivas entre la edad de barbechos de bosques secundarios y los contenidos en el suelo de carbono y nitrógeno orgánicos. El efecto general de la agricultura nómada tradicional en los bosques no es de agotamiento de la materia orgánica, sino de alcanzar los niveles de equilibrio ligeramente más bajos que los del bosque virgen. Después de analizar 100 lugares con agricultura nómada en Liberia, Reed (1951) encontró que el carbono orgánico alcanzaba el equilibrio a un nivel equivalente al 75% de los valores del bosque virgen. Esto se ilustra en la línea superior de la Fig. 10.13 que representa una razón cultivo-barbecho de 2:12 años. De acuerdo con Nye y Greenland (1960) cuando la razón cultivo-barbecho se vuelve más estrecha debido a presiones de la población, un nuevo nivel de equilibrio se logra a aproximadamente el 50% de los valores del bosque virgen, lo cual se ilustra en la línea inferior de la Fig. 10.13. En el caso de áreas de sabana, una razón cultivo-barbecho más amplia de 1:12 años es necesaria para alcanzar el equilibrio del contenido de carbono orgánico de 75% por cuanto las adiciones de materia orgánica son mucho más bajas que en el bosque, de acuerdo con Greenland y Nye (1959). Ellos estimaron que la tasa promedio anual de descomposición del carbono orgánico era del orden del 3% en áreas de agricultura nómada.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Los cambios en pH y contenido de materia orgánica de suelos bajo agricultura nómada afectan su capacidad efectiva de intercambio catiónico debido a que en muchas áreas de agricultura nómada su con-

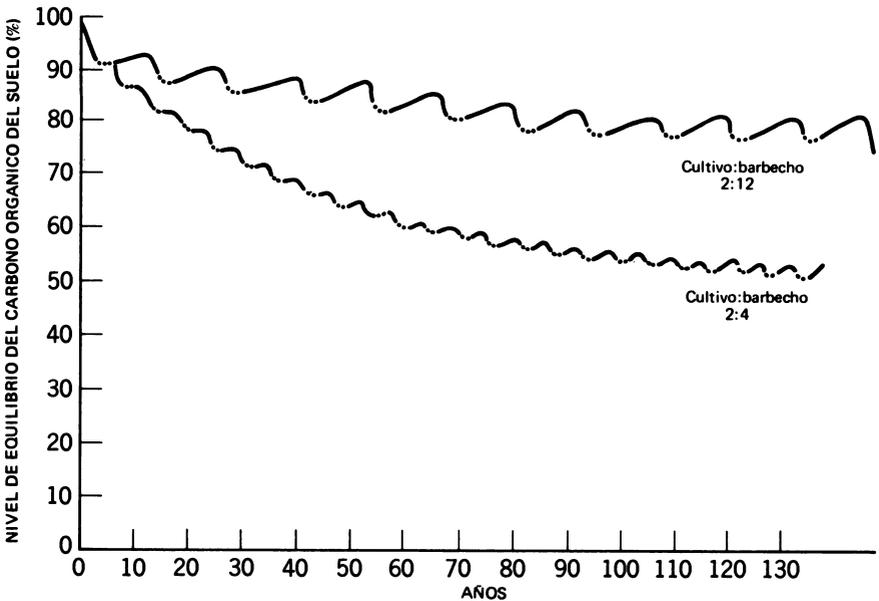


Fig. 10.13. Representación teórica de los cambios en carbono orgánico del suelo en los 30 cm superiores por efecto de la razón cultivo:barbecho. Las líneas discontinuas representan períodos de dos años de espera para que el barbecho se reestablezca por sí mismo. (Fuente: Nye y Greenland, 1960).

dición es predominantemente dependiente del pH. Durante los primeros meses después de la quema la CIC efectiva de un Ultisol peruano aumentó de 2,9 a 3,4 meq/100 g, probablemente como resultado del aumento del pH a consecuencia de la quema. En etapas posteriores la CIC disminuye debido a los descensos del pH y contenido de materia orgánica en el suelo. En dos Oxisoles de Sierra Leona, Brams (1971) observó una reducción del 50% en materia orgánica del suelo dentro de los 5 años posteriores al desmonte, que daba por resultado una reducción del 30% en la CIC. Esta observación subraya la estrecha dependencia de los radicales negativos de la materia orgánica de la CIC de suelos altamente meteorizados. Aunque no se dispone de datos comparables, se supone que los cambios en CIC en suelos con niveles altos de bases con un suministro moderado de materia orgánica no serán tan grandes como los descritos antes.

FOSFORO DISPONIBLE

El nivel de fósforo disponible de un suelo aumenta con el desmonte y la quema a consecuencia del fósforo que contiene la ceniza. La magnitud de estas adiciones es del orden de 7 a 25 kg/ha de P, según Nye y Greenland (1960) y North Carolina State University (1974).

Estos cambios se reflejan en los valores de las pruebas de suelos. Después de quemar el fósforo extraíble por el procedimiento de Bray en la capa superior de 5 cm de un Inceptisol de Guatemala aumentó unas 4 veces y permaneció a este nivel por cerca de 6 meses. Al cabo de un año todavía era el doble del valor original (Popenoe sin publicar). Debajo de esa capa no se observaron cambios en fósforo disponible. En la Fig. 10.14 se ilustran estas relaciones. Suárez de Castro (1957) en Colombia, Watters y Bascones (1971) en Venezuela, y North Carolina State University (1974) en Perú obtuvieron resultados similares.

Las disminuciones de fósforo aprovechable con la siembra de cultivos no está bien comprendida. Puede deberse a fijación y a/o remoción por los cultivos. El descenso en fósforo disponible puede ser una de las razones para abandonar el campo y dejar rebrotar el bosque. Urrutia (1967) encontró que el rebrotamiento del bosque secundario aumenta el fósforo extraíble por el procedimiento Bray en Rendolls del Petén, Guatemala. Tergas y Popenoe (1971) observaron diferencias drásticas entre especies en la absorción de fósforo después de 10 meses de rebrotamiento del bosque secundario en Guatemala. Con niveles similares de producción de materia seca, *Heliconia* sp (pariente del banano) y *Gynerium* sp (una gramínea) acumularon alrededor de tres veces lo que acumula la vegetación promedio.

Muchos de los suelos con agricultura nómada son deficientes en fósforo. Nye y Bertheux (1957) indican que las razones C:P y N:P de

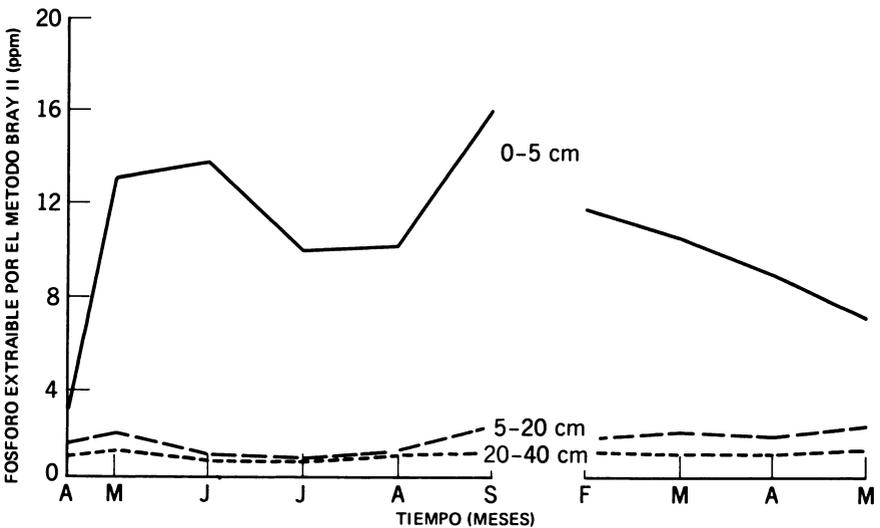


Fig. 10.14. Cambios en la disponibilidad de fósforo con el desmonte y quema en un suelo de Murciélagos, Izabal, Guatemala. (Fuente: Popenoe, datos sin publicar).

la materia orgánica de Alfisoles boscosos de Ghana son considerablemente más altas que las de la región templada. Ellos aseguran que esto es indicación de deficiencia de fósforo. Sin embargo, no hay síntomas de deficiencia de fósforo en los bosques tropicales adultos. Las pequeñas cantidades de fósforo que circulan por el ciclo cerrado de nutrimentos son aparentemente suficientes para prevenir la deficiencia de fósforo en condiciones naturales.

POBLACION MICROBIANA

El desmonte y la quema también causan cambios significativos en la microflora del suelo. Una revisión de la literatura por Laudelot (1961) indica que la quema ocasiona una esterilización parcial del suelo, y que esto es seguido por un brote rápido de población microbiana, y eventualmente por un descenso que se aproxima a un nuevo nivel de equilibrio. También se encuentra una proporción mayor de bacterias después del desmonte. La población microbiana total disminuye durante la estación seca y aumenta durante la estación lluviosa, y también cuando se colocan cubiertas protectoras al suelo y cuando se fertiliza. La única evidencia contraria es un estudio de Micklejohn (1955) en Kenia, donde ella observó que la quema disminuyó la microflora del suelo, y notó que fijadores anaeróbicos del nitrógeno sobrevivían, mientras que fijadores aeróbicos morían. Sin embargo, estudios de Suárez de Castro (1957) y muchos otros indican que tales efectos nocivos son de corta duración. Una revisión de este tópico en la zona templada por Ahlgren (1974) concuerda con las observaciones de Laudelot y de Suárez de Castro.

Poco se sabe sobre el efecto de la quema acerca de las bacterias simbióticas y asimbióticas fijadoras de nitrógeno, pero los cambios de pH afectan su población. Laudelot señala que el *Rhizobium* del grupo inoculador del caupí es efectivo en suelos ácidos e inocula algunas especies tolerantes al aluminio, tales como *Stylosanthes guyanensis*.

DESCENSOS DE RENDIMIENTO DE CULTIVOS EN AGRICULTURA NOMADA

Las adiciones de ceniza más la rápida mineralización de la materia orgánica después de desmontar y quemar producen un incremento marcado de nutrimentos disponibles para las plantas del primer cultivo. Después los rendimientos bajan gradualmente, pero la rapidez de este proceso varía de acuerdo con las propiedades del suelo, los sistemas de cultivo y el manejo. Las bajas de rendimiento sucesivo con cada cultivo, constituyen la razón fundamental para que los agricultores cambien el campo.

EVIDENCIA

Reconocimientos de fincas en América Latina indican que los agricultores abandonan sus campos cuando no esperan que la cosecha siguiente sea más de la mitad de la primera. Cowgill (1962) y Watters (1971) informan que generalmente la disminución del segundo cultivo consecutivo de cereales es del 50% en América Central y América del Sur. Según Pendleton (1954) en suelos muy arenosos de Trinidad una segunda cosecha es imposible. Por otra parte en Africa Occidental normalmente se hacen tres o más cosechas consecutivas en los sistemas de agricultura nómada.

Estas discrepancias aparentes pueden relacionarse con las propiedades de suelo y clima por medio de estudios comparativos en la siembra continua de monocultivos sin fertilización en regiones de agricultura nómada. En la Fig. 10.15 aparecen algunos ejemplos ilustrativos.

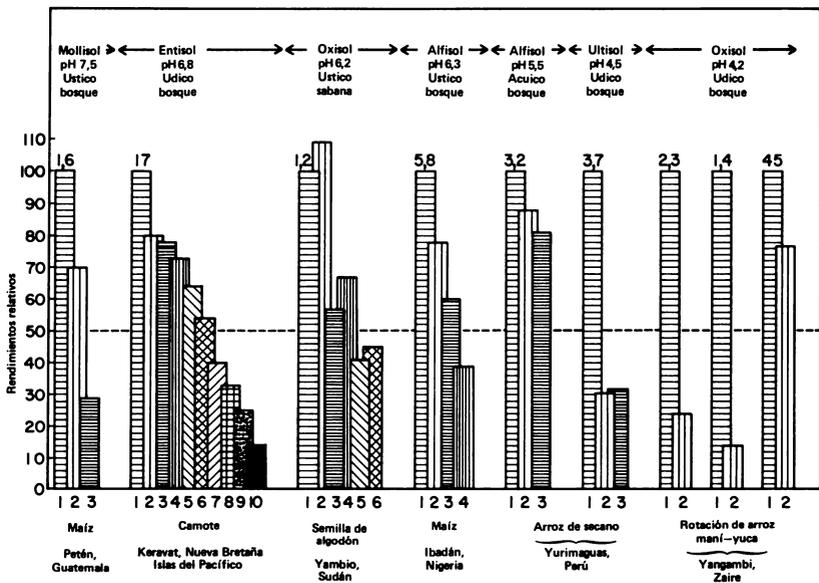


Fig. 10.15. Ejemplos de descensos de rendimiento en condiciones de cultivos continuos sin fertilización en áreas de agricultura nómada, como función del suelo, el clima y la vegetación. Las cifras en la parte superior de los histogramas se refieren a los rendimientos económicos de los cultivos (ton/ha). Los números en el eje "X" se refieren a los cultivos consecutivos. (Fuente: adaptado de Cowgill, 1962; Newton y Jamieson, 1968; Anthony y Willimott, 1956; ITTA, 1974; Sánchez y Nureña, 1972; North Carolina State University, 1974; y Nye y Greenland, 1960).

En ellos se puede apreciar que la tasa de disminución del rendimiento es mayor conforme disminuye el pH.

Hay datos experimentales disponibles de suelos con niveles altos de bases y pH mayor de 6 de Entisoles de Bolivia (Cordero, 1964) y New Britain (Newton y Jamieson, 1968); Alfisoles de Africa por Nye y Greenland (1960), Nye y Stephens (1962) e IITA (1974); y Oxisoles éutricos de Africa por Anthony y Willimott (1956), Abu-Zeid (1973) y Cutting et al, (1959). Todos estos eran experimentos sin fertilización y con un adecuado control de malas hierbas. En general el rendimiento bajó a un 50% del cuarto al sexto año de siembras consecutivas. Sin embargo, en algunos casos los rendimientos realmente aumentaron a causa de mejores condiciones del tiempo o a menos problemas con insectos. En algunos casos la disminución del 50% no se presentó entre el octavo y el decimoquinto años (Nye y Greenland, 1960; Nye y Stephens, 1962). En Molisoles de Guatemala los rendimientos bajaron a un 30% los valores originales. Estos son los únicos datos recogidos de campos de agricultores en que las malas hierbas fueron una variable no controlada.

En un pronunciado contraste, datos experimentales de suelos con niveles bajos de bases, muestran que el rendimiento de la segunda cosecha baja a cerca de un 30% del rendimiento de la primera. La variación local del suelo es muy importante. Los dos ejemplos que se presentan en la Fig. 10.15 de la misma Estación Experimental de Yurimaguas, Perú, describen un descenso lento de rendimiento en el Alfisol mal drenado y con un pH de 5,5, y una baja precipitada en el Ultisol bien drenado y con un pH de 4,5. Los tres ejemplos de Yangambi, Zaire, subrayan las diferencias de los cultivos. El arroz de secano y el maní sufrieron una baja considerable, y no así la yuca.

Además del suelo, el tipo de barbecho tiene influencia en la tasa de descenso del rendimiento. Varios experimentos de larga duración llevados a cabo en Ghana y Nigeria, en Ustalfs, indican que las bajas de rendimiento fueron más rápidas en áreas boscosas que en sabanas (Nye y Greenland, 1960; Nye y Stephens, 1962). Las Figs. 10.16 y 10.17 ilustran la influencia del barbecho de vegetación. La Fig. 10.16 presenta un descenso de rendimiento bastante rápido en una región boscosa ústica. El patrón en zigzag es típico cuando se siembran dos cultivos anuales en regímenes ústicos en que la humedad del suelo es marginal para maíz durante la estación seca. La Fig. 10.17 muestra experimentos a largo plazo en una región ústica de sabana. En esta área fueron necesarios de 10 a 15 años para llegar a un 50% de disminución de los rendimientos; en esta área la humedad sólo permite una cosecha por año. El hecho de que el rendimiento baje con mayor celeridad en las áreas boscosas probablemente se debe a la mayor cantidad de nutrientes liberados por el desmonte y la quema. Como en las sabanas la liberación de nutrientes es menor, hay menos fertilidad que perder.

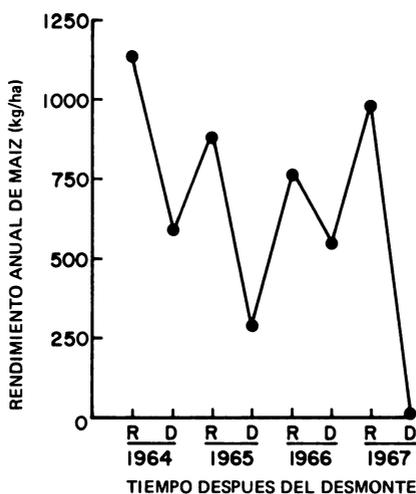


Fig. 10.16. Descensos en los rendimientos de maíz durante cuatro años consecutivos después del desmonte de un bosque alto en un Alfisol de Kade, Ghana. R= cultivo durante la estación lluviosa; D= cultivo durante la estación seca. (Fuente: adaptado de Ahn, 1974).

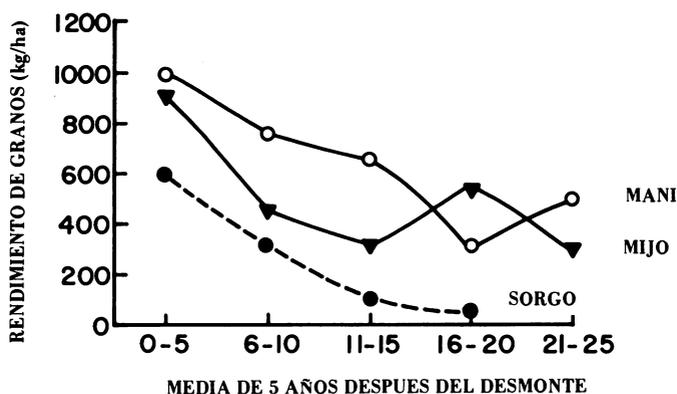


Fig. 10.17. Rendimientos en cultivos continuos por largo tiempo en áreas de sabana cerca de Kano, Nigeria. (Fuente: adaptado de Nye y Greenland, 1960).

Como se mencionó antes los agricultores nómadas pocas veces tratan de poner el mismo cultivo consecutivamente. La experiencia ha mostrado que ciertas secuencias de cultivos, generalmente intercalados, dan mejores resultados. La selección de cultivos parece obedecer a dos principios: 1) sembrar primero los cultivos que consumen

más nutrimento, tales como granos, seguidos por cultivos menos exigentes, como yuca; y 2) sembrar sucesivamente cultivos más altos para simular el verdadero rebrotamiento del bosque. Un caso común es arroz seguido por yuca y luego por plátano. Los cultivos más altos son así mismo de crecimiento más largo y puede desarrollar cierto grado de ciclo de nutrimentos. El último ejemplo de la Fig. 10.15 ilustra este principio con una sucesión de arroz, maní y yuca. El último cultivo, yuca, es más tolerante que los cultivos anteriores de granos. Sin embargo el descenso del rendimiento es evidente cuando se considera una segunda sucesión. Los agricultores casi nunca plantan un segundo ciclo de tales sucesiones.

Tanto los agricultores como los científicos identifican 5 razones principales para los descensos de rendimiento y lo mismo para la agricultura nómada: agotamiento de la fertilidad del suelo, mayor infestación de malas hierbas, deterioro de las propiedades físicas del suelo, aumento en el ataque de insectos y enfermedades, y costumbres sociales. Seguidamente se hace un examen de cada una de estas razones.

AGOTAMIENTO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO

En la sección anterior de este capítulo se sugiere que la disminución de nutrimentos disponibles durante el período de cultivos podría ser la razón principal del descenso de rendimientos. Los datos experimentales de la Fig. 10.15 indican que este es el caso. Sin embargo existe muy poca correlación entre descensos de rendimientos y cambios de suelos medidos antes y después del período de cultivos. Esto es cierto de la mayoría de los datos de Africa, donde los cambios en las propiedades del suelo no tienen suficiente magnitud para asegurar que el agotamiento de la fertilidad es la causa primaria de los descensos, de rendimiento en Alfisoles. Lo mismo ocurre en Andepts guatemaltecos (Popenoe, 1957) y Molisoles del mismo país (Cowgill, 1962). Por ejemplo, los cambios en niveles de bases que muestra la Fig. 10.10 para el Alfisol, y los otros parámetros son demasiado lentos para ser responsables de descensos de rendimiento (Nye y Greenland, 1964). En todos estos suelos con niveles altos de bases, la deficiencia de nitrógeno parece ser un factor limitante muy importante que no puede cuantificarse adecuadamente mediante análisis de suelo.

Hay ejemplos muy claros del efecto del agotamiento de la fertilidad en los descensos de rendimiento de Ultisoles y Oxisoles. La baja de rendimiento en arroz de secano cultivado continuamente en Yuriaguas, Perú, está correlacionada con la disminución de potasio intercambiable y el aumento en la saturación de aluminio (North Carolina State University, 1974).

AUMENTO EN LA INFESTACION DE MALAS HIERBAS

Los descensos de rendimiento más pronunciados que se observan en los campos de los agricultores en comparación con las parcelas experimentales sin fertilización sugieren que una infestación acrecentada de malas hierbas es un factor muy importante. Generalmente las parcelas experimentales se mantienen libres de malas hierbas; esta puede ser la razón del más lento descenso de los rendimientos que se observa en una amplia variedad de suelos. La necesidad de mano de obra para el control de malezas aumenta dramáticamente con la continuidad de cultivos. La cantidad de mano de obra necesaria para controlar las malas hierbas durante el segundo cultivo es a menudo el doble de la que se necesita para el mismo propósito durante el primer año, según Nye y Greenland (1960). Cuando la mano de obra necesaria para la desyerba es mayor que la que demanda el desmonte de un nuevo bosque, el agricultor prefiere esta última alternativa. En los dos libros africanos más importantes sobre agricultura nómada (Nye y Greenland, 1960; Jurion y Henry, 1969), los autores aseguran que la infestación de malas hierbas constituye la principal razón para que los agricultores cambien de terreno.

El sistema tradicional de agricultura nómada está bien adaptado al control temporal de malas hierbas. Sucesivamente se plantan cultivos con doseles más altos (cereales, yuca, plátano). De esa manera el cultivo menos competidor, el cereal, se siembra cuando la infestación de malezas es menos intensa, inmediatamente después de la quema. Conforme crecen los cultivos de mayor altura, permiten el rebrote de las especies leñosas, tolerantes a la sombra, que son el punto de partida del bosque secundario. De esa manera el sistema tradicional está bien a tono con el control mínimo de las malezas y permite un buen rebrotamiento del bosque.

La desyerba excesiva puede destruir el sistema tradicional. En suelos ácidos de Sierra Leona dos años consecutivos de rotaciones de arroz-maní indujeron una sabana de gramíneas cuando se hicieron desyerbas (Brams, 1971). Los métodos de desyerba también son importantes. En la selva amazónica se hace una desyerba mínima con machete, sin matar las raíces de los retoños del bosque. En opinión de este autor la necesidad de desyerbar puede ser la principal razón por la que se abandonan los campos en suelos con niveles altos de bases; en suelos con niveles bajos de bases el agotamiento de la fertilidad puede ser la causa principal.

DETERIORO DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

La sección que precede mostró casos bastante dramáticos de deterioro de las propiedades físicas del suelo relacionados con el movimiento del agua en suelos, con propiedades físicas inherentemente

deficientes (tales como Alfisoles arenosos y Vertisoles, cuando carecen de la protección del dosel de un cultivo por períodos considerables de tiempo. Los cambios descritos previamente de tales suelos son responsables de los descensos en los rendimientos de cultivos.

También hay muchos ejemplos en los que la erosión del suelo puede ser la causa principal de la declinación de los rendimientos (Watters, 1971; Nye y Greenland, 1960; IITA, 1973). Esto es más serio en suelos susceptibles a la erosión. En casos extremos la erosión incontrolada puede dejar expuestas las capas suaves de plintita que se endurecen con la exposición al aire. Tal como se mencionó antes, este fenómeno ocurre en una extensión superficial limitada. Debiera recordarse que el agricultor nómada sabe manejar bien las propiedades físicas del suelo. Sus técnicas de labranza mínima causan un mínimo de disturbios al suelo. Su secuencia de cultivos intercalados con plantas gradualmente más altas proporcionan un buen dosel protector. Pocas veces provocan erosión del suelo. Los peligros se presentan cuando hay presiones de población que lo obligan a reducir la razón cultivo:barbecho, o cuando habitantes urbanos desplazados, no familiarizados con el sistema, intentan utilizarlo como medio de vida. Tales situaciones producen grandes pérdidas por erosión (Watters, 1971; Lal et al, 1975).

AUMENTO EN LA INCIDENCIA DE PLAGAS Y ENFERMEDADES

Los monocultivos continuos generalmente intensifican los ataques de plagas y enfermedades especialmente en ambientes tropicales údicos. Experimentos de siembras continuas de arroz en Yurimaguas, Perú, han puesto de manifiesto una mayor incidencia de ataques del grillo topo (*Grillotalpa cultriger*) y varias enfermedades causadas por *Helminthosporium oryzae* y *Rinchosporium orizae*. Los daños de roedores, pájaros, y animales mayores aumentan conforme crece el área dedicada a un cultivo. El agricultor nómada tradicional ha aprendido a evitar o minimizar estos problemas mediante el uso de secuencias de cultivos intercalados y a menudo sembrando una mezcla de diversas variedades de un cultivo que tiene tolerancias a las enfermedades. Es probable que exista cierto grado razonable de equilibrio entre estos factores. Por lo tanto la mayoría de los problemas de insectos y enfermedades están llamados a aumentar drásticamente, cuando la razón cultivo-barbecho disminuye o cuando se intentan cultivos contínuos.

COSTUMBRES SOCIALES

Factores sociales y culturales también pueden ser la causa de que los agricultores abandonen sus campos. Se sabe que muchos agricultores cuidan menos los cultivos que ellos creen que van a producir menos. Por lo tanto, la desyerba y otras prácticas de manejo son

menos intensas después de la primera cosecha porque se espera que las siguientes sean más bajas (Ahn, 1974).

La estacionalidad en la demanda de mano de obra es otro factor adicional. La desyerba tiene que hacerse durante la estación lluviosa, cuando la gente está muy ocupada. Por otra parte, el desmonte y la quema se hacen durante los meses más secos, cuando hay menos actividad. Coulter (1972) señala que en algunas partes de Asia las mujeres hacen la desyerba y los hombres la tala. Como muchas de estas sociedades son matriarcales, la decisión puede ser en favor de trasladarse a un campo nuevo. Jurion y Henry (1969) informaron que otros factores sociales, tales como muerte en la familia, superstición y decisiones arbitrarias de los jefes de tribus, también pueden ser causa de abandonar el terreno sin que hayan razones agronómicas aparentes.

MEJORAMIENTO DE LA PRODUCCION EN LA AGRICULTURA NOMADA

Los rendimientos en la agricultura nómada son muy bajos, con ámbitos de 0,5 a 1,5 ton/ha en cereales y alrededor de 8 ton/ha en yuca y ñames. Sin embargo, son estables y suficientes para la agricultura de subsistencia. Tomando en cuenta la enorme proporción de la tierra arable de los trópicos permanentemente bajo agricultura nómada (44%), hay que hacer esfuerzos por aumentar la productividad de estas áreas, en consideración a las necesidades mundiales de alimentos, así como el bienestar de los 250 millones de personas que dependen de este tipo de agricultura.

Los procedimientos para aumentar la producción varían ampliamente, yendo desde la política de "manos afuera" que en la actualidad proclaman los ecólogos, hasta la recomendación de que se elimine totalmente este tipo de agricultura, política expresada por la Organización de Alimentación y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO, 1957). En Indonesia la agricultura nómada ha sido declarada ilegal (Van Beukering, 1947). Sin embargo, todas las partes se unen al solicitar datos básicos de manejo de suelos y una considerable cantidad de trabajo se ha llevado a cabo en este tópico, principalmente en Africa. Las diversas soluciones planteadas pueden agruparse en las que tienden al mejoramiento del sistema actual, y las que abogan por reemplazarlo por otros tipos de agricultura.

NO HACER NADA

La primera alternativa es no hacer nada. Esta probablemente es una alternativa razonable para áreas remotas y escasamente pobladas donde los costos de transporte son muy altos, los mercados están distantes, y no se contemplan mayores cambios en las tasas de crecimiento de la población. Son pocas tales áreas en los trópicos, restrin-

gidas principalmente a tribus aborígenes esparcidas en las selvas amazónicas, las montañas del sureste de Asia, y la cuenca del Congo, que viven lejos de los caminos o de ríos navegables. Una política de "manos afuera" significa aceptar que la agricultura nómada tradicional es un sistema ecológico sano que permite subsistir pero nada más. Además, esta política obliga a quienes la ponen en práctica a mantener su bajo nivel actual de vida. Estas gentes son, por lo general, invisibles políticamente y por eso ejercen poca o ninguna presión en las autoridades de desarrollo en los diversos países.

EL SISTEMA DE FRANJAS

Después de muchos años de intentar la abolición de la agricultura nómada en lo que actualmente es Zaire, los agrónomos belgas desarrollaron un plan para racionalizarla en las áreas escasamente pobladas. Esta historia aparece detalladamente en un libro de Jurion y Henry (1969). Grandes áreas boscosas fueron divididas en franjas o "corredores" de aproximadamente 100 m de ancho y orientadas de este a oeste para lograr una máxima penetración de luz solar. Las franjas se desmontaron en forma alternada cada año. De esta manera cada franja cultivada tenía en ambos lados un barbecho boscoso. La suma del número de años en cultivo más el número de años en barbecho determinaban el número de franjas por unidad de manejo.

Las franjas tenían la longitud permitida por la topografía. Los límites individuales o comunales se trazaban en ángulos rectos a ellos. En Yamgambi, Zaire, el ciclo consistía de 3 años de cultivos, seguidos por 12 años de barbecho. En esa forma la tierra disponible se dividía en 15 franjas, trazadas en contorno a lo largo del terreno ondulado. El sistema se ilustra en la Fig. 10.18. La ventaja principal de este sistema es el control de la razón cultivo:barbecho. Además, las franjas con bosque son una buena fuente de semillas de árboles para el rebrotamiento, y en algunos casos evitan la erosión. La desventaja principal es que se requiere un control completo de la población, situación difícil de encontrar en muchas de las áreas con agricultura nómada. Cuando el Congo Belga logró su independencia el sistema de franjas fue abandonado (Ruthenberg, 1971).

AUMENTO DE RENDIMIENTO DENTRO DEL PERIODO DE CULTIVOS

La estrategia de aumentar el rendimiento de los cultivos sin alterar el patrón de agricultura nómada ha tenido buen éxito en algunos casos en que las prácticas recomendadas son realistas en términos de los recursos económicos de los agricultores. Un ejemplo lo constituye la introducción de nuevas variedades y prácticas culturales en una área de arroz de secano en Yurimaguas, Perú. Una serie de experimentos de los que informa Sánchez y Nureña (1972), mostraron

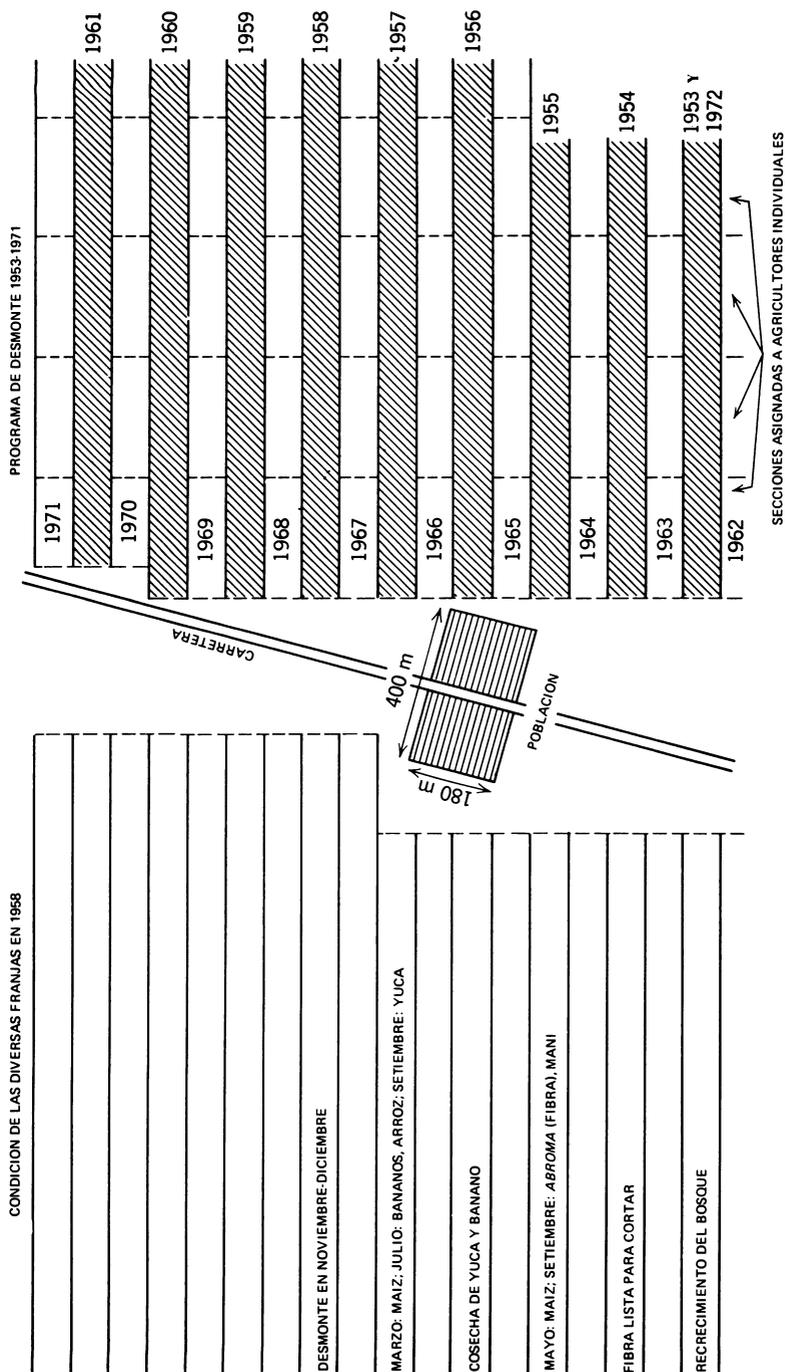


Fig. 10.18. Agricultura nómada controlada usando el sistema corredor. (Fuente: Ruthenberg, 1971).

que los rendimientos del arroz podían duplicarse o triplicarse mediante el empleo de variedades de porte bajo resistentes a las enfermedades, y reduciendo el distanciamiento de siembra a 25 x 25 cm. La mano de obra necesaria para la recolección de la cosecha también se redujo debido a la maduración más uniforme de las variedades. La recolección era posible con una sola operación utilizando hoces (que se llevaron por primera vez a esa región) lo cual sustituyó el proceso convencional de cosechar manualmente panícula por panícula. Como no había fertilizantes disponibles, las recomendaciones se limitaron a suelos con altos niveles de bases a lo largo de las riberas de los ríos y en las cercanías de los pantanos o "aguajales". La investigación puso de manifiesto que con aplicación de fertilizantes era factible hacer siembras continuas, pero no era realista recomendar fertilizantes. Comparaciones en campos de los agricultores en toda la región, mostraron que con la nueva variedad y el espaciamiento más corto el promedio de rendimiento fue de 1,67 ton/ha, mientras con la variedad y espaciamiento tradicionales era de 0,95 ton/ha, lo que significaba un 76% de aumento sin mayor inversión (Donovan, 1973).

La aplicación de fertilizantes para mejorar el rendimiento y alargar la duración del período de cultivos debe ser económica. El efecto de los fertilizantes será tratado conjuntamente con los intentos que se han hecho por reemplazar la agricultura nómada por un sistema de cultivos continuos.

ACORTAMIENTO DEL PERIODO DE BARBECHO

Los limitados estudios que se han hecho sobre la acumulación de nutrimentos en los barbechos de bosques, discutidos en la primera sección de este Capítulo, sugieren que no se necesitan más de 8 a 10 años para que la absorción de nutrimentos alcance el nivel máximo. En muchas áreas de agricultura nómada, es común que se corten barbechos de 20 años de edad. Una mejora posible es reducir la edad de los barbechos a lo necesario para una absorción máxima de nutrimentos. El problema es que por lo general no existe información local disponible. La Fig. 10.19 ilustra este concepto y los peligros de subestimar la duración óptima del período de barbecho.

Sin embargo la Fig. 10.19 hace caso omiso del aspecto crítico del control de malezas. La corta de barbechos viejos no sólo consume menos tiempo, sino que además reduce el grado de infestación de malas hierbas, especialmente de malezas leñosas que se encuentran al cortar barbechos más jóvenes. Ensayos demostrativos del Servicio de Extensión del Perú llevados a cabo por Donovan (1973), en Yurimaguas, mostraron que el rendimiento promedio de arroz de secano era 2:1 ton/ha en desmontes de barbechos viejos y más o menos la mitad, 1,1 ton/ha, en desmontes de barbechos jóvenes. Los agricultores consideran que la principal razón para esta diferencia es el control de malezas.

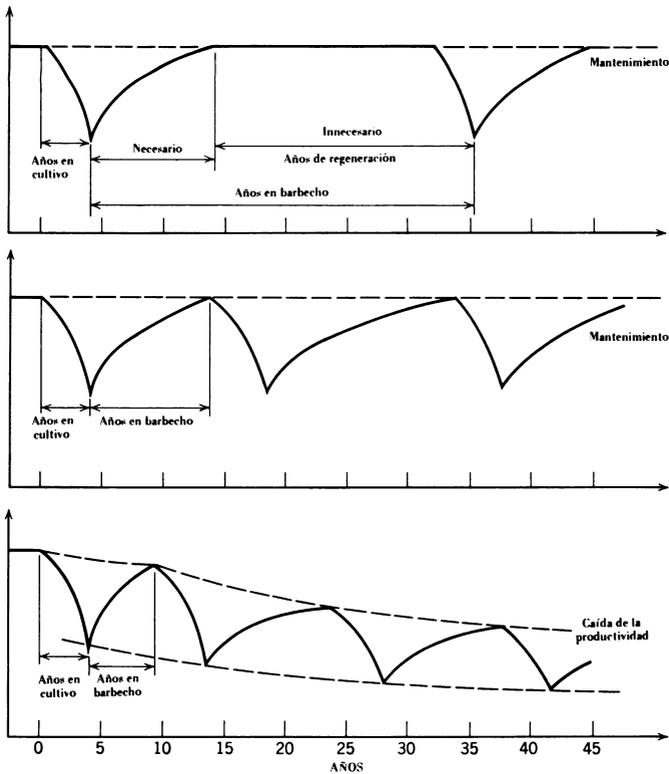


Fig. 10.19. Relación teórica entre duración del barbecho y la productividad del suelo. (Fuente: Guillemín, 1956).

MEJORAMIENTO DE BARBECHOS

El bosque secundario o el rebrotamiento de las sabanas no son los únicos tipos de vegetación capaces de acumular nutrientes aprovechables mediante la formación de un ciclo cerrado de nutrientes. Se han hecho varios intentos para aumentar la eficiencia del período de barbecho ya sea acelerando el proceso de acumulación de nutrientes o sustituyendo el barbecho natural con barbechos de cultivos con valor económico.

En áreas boscosas se pueden seleccionar algunas pocas especies nativas por su capacidad de acumular ciertos nutrientes con una mayor rapidez que los barbechos mixtos de bosques secundarios. Tergas y Popenoe (1971) informaron que poblaciones puras de 10 meses de *Heliconia* spp y *Gynerium* spp acumulaban 3 ó 4 veces más fósforo que los barbechos mixtos de igual edad. En suelos deficientes en fósforo, como los de Guatemala, estas diferencias pueden resultar

muy importantes. Desafortunadamente, debido a diferencias en tolerancia a la sombra, tales especies son reemplazadas por otras conforme crece el barbecho boscoso.

Especies arbóreas de rápido crecimiento tal como *Acioa barteri* se han usado como barbecho artificial en el sur de Nigeria. Nye y Stephens (1962) informaron de la siembra de plántulas de especies forestales en hileras inmediatamente después del desmonte, las cuales crecieron mientras se producían productos alimenticios por 1 ó 2 años. Estos árboles de crecimiento rápido acumulaban más calcio y magnesio que el bosque secundario natural, pero apenas la mitad del fósforo y del potasio. Desafortunadamente en estos Alfisoles el fósforo y el potasio eran nutrientes limitantes. Después de 4 años de rebrotamiento, los rendimientos de los cultivos no ofrecían diferencias, entre tierra limpia o en barbecho natural y *Acioa* (Newton, 1960).

En las tierras altas de Nueva Guinea el pino *Casuarina* ha sustituido en forma efectiva el barbecho natural. Su principal ventaja es que esta especie fija nitrógeno simbióticamente. Newton (1970) informa que la *Casuarina* fue sembrada con los últimos cultivos, y que se le dejó crecer por 10 a 20 años antes de cortarla. Los árboles se usan como madera para construcción y también como leña.

Los servicios coloniales europeos de investigación consideraron el uso de una cobertura de leguminosas como barbecho como una posibilidad lógica. Experimentos de corta duración llevados a cabo en Africa indicaron buenas posibilidades, pero las recomendaciones no fueron acogidas por los agricultores (Vine, 1968; Nye y Stephens, 1962). Un experimento de largo plazo de Jaiyebo y Moore (1964) proporcionó las razones. Ellos desmontaron un bosque en un Alfisol en Ibadán, Nigeria, y plantaron varias clases de barbecho que estudiaron por 7 años. Después cortaron los barbechos y los quemaron, y sembraron maíz sin fertilizar. Los resultados que presenta el Cuadro 10.7 indican que el barbecho de bosque secundario natural acumuló

CUADRO No. 10.7. Efectos de barbechos de siete años en el suelo y en el almacenamiento de biomasa en un Alfisol de Ibadán, Nigeria. (Fuente: adaptado de Jaiyebo y Moore, 1964).

Tipo de barbecho	Materia seca (ton/ha)	Biomasa antes del desmonte					Propiedad del suelo (0-10 cm)				
		N	P	K	Ca	Mg	pH	M.O (%)	P Bray (ppm)	K Intercambiable (meq/100 g)	
		(kg/ha)									
Bosque	39,6	433	27	304	407	52	6,6	4,4	5	0,4	
Kudzú	8,7	187	11	103	113	38	6,4	3,4	4	0,3	
Pasto estrella	16,9	120	10	146	64	23	7,1	2,8	4	0,3	
Cubierta de pasto	47,7*	---	---	---	---	---	6,5	2,3	8	0,4	
Suelo descubierto	---	---	---	---	---	---	6,8	1,4	4	0,1	

(*) Total agregado en 7 años. (*Imperata cylindrica*).

dos o tres veces más nitrógeno, fósforo, potasio y calcio que el barbecho de una leguminosa (kudzú) o de una gramínea (pasto estrella). Esto dio por resultado un contenido menor de materia orgánica en el suelo en los barbechos artificiales, pero ningún cambio significativo en las propiedades del suelo. El rendimiento de maíz y la absorción de nutrimentos fueron esencialmente iguales, cuando estuvo precedido por barbecho natural o de kudzú, pero se redujo a más o menos la mitad cuando estuvo precedido por barbecho de gramínea o cubierta protectora (mulch) de gramínea forrajera (Cuadro 10.8).

CUADRO No. 10.8. Efectos de los tratamientos anteriores de barbecho en el rendimiento de maíz sin fertilizar y en absorción de nutrimentos. (Fuente: adaptado de Jaiyeb y Moore, 1964).

Tipo de barbecho	Rendimiento de maíz (ton/ha)	Absorción de nutrimentos (kg/ha)				
		N	P	K	Ca	Mg
Bosque	3,76	99	8	68	23	20
Kudzú	3,71	97	10	74	24	19
Pasto estrella	1,95	57	4	35	12	13
Cubierta de pasto	1,97	43	6	53	12	9
Suelo descubierto	1,09	22	3	17	9	6

Por lo tanto, los barbechos artificiales no fueron mejores que los barbechos de bosque natural en términos de acumulación de nutrimentos en la biomasa o rendimientos subsecuentes de los cultivos. Sólo cuando el mismo barbecho se puede utilizar económicamente, es factible el cambio. Por ejemplo, los barbechos de pastos, especialmente de gramíneas con leguminosas, deberían recomendarse cuando se cría ganado. En la mayoría de las áreas boscosas údicas de África la mosca tse-tsé impide extender la producción de carne o de leche. Los datos de los Cuadros 10.7 y 10.8 indican que es posible obtener una acumulación efectiva de nutrimentos con especies de pasturas tales como kudzú, que dan lugar a un reciclaje adecuado de nutrimentos. Hace falta investigación sobre su uso para pastoreo, incluyendo los efectos de la alimentación en animales y sus excreciones y pisoteo. Para áreas de América tropical donde la carne es el artículo de consumo más importante, es necesario examinar esta posibilidad.

Otra alternativa económica es plantar árboles comerciales en lugar de barbechos. Sin embargo, en la mayoría de los casos esto significa un cambio al cultivo continuo de árboles y será discutido en la siguiente sección.

En las áreas de sabana la experiencia indica poca esperanza de mejorar los barbechos. Los intentos que se han hecho por reemplazar

las especies ordinarias nativas, *Andropogon* o *Imperata* por pastos mejorados han fallado. Experimentos en el este de Zaire ponen de manifiesto que el pasto *Setaria sphacelata* sólo acumuló dos tercios de nutrimentos en comparación con los barbechos de pastos nativos (Van Parijs, 1959). En las tierras montañosas de Africa Oriental se ha reunido una cantidad significativa de información sobre el uso de barbechos del pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) sembrado a lo largo de las líneas de contorno. Esto ha sido descrito por Kerr (1942) y Webster (1954) como análogo al sistema de barbecho de pastos tipo "ley" usado en Inglaterra. Extensivas investigaciones llevadas a cabo por Jameson y Kerkham (1960), Pereira et al, (1954) y Stephens (1960, 1967) no indican diferencias significativas de rendimiento entre las especies nativas y las mejoradas tanto en condiciones de pastoreo como de no pastoreo, y con diversas razones cultivo-barbecho. La mayoría de los experimentos produjeron rendimientos tan bajos (< 1,5 ton/ha de granos) que indudablemente había otros factores limitantes. En varios casos los barbechos de pasto elefante de 3 años mejoraron la estructura del suelo, las tasas de infiltración, y la humedad almacenada del suelo. Sin embargo, estos efectos beneficiosos sólo duraron durante 2 años de cosechas. El problema con este sistema es que la ausencia de leguminosas produce agotamiento del nitrato, y que gramíneas como pasto elefante pueden agotar la humedad del suelo que de otra manera estaría disponible para los cultivos. Webster (1954) subrayó que el mantenimiento de la fertilidad del suelo por medio de barbechos de pastos en Inglaterra involucra el uso de leguminosas, estiércol, aplicación de fertilizantes y pastoreo por animales.

El único informe positivo de regiones de sabana, es el de Nye (1958) en el norte de Ghana. El encontró que un cultivo de gandul (*Cajanus cajan*) si se siembra tupido se establece pronto, soporta la estación seca y tiene cabida para tres veces la cantidad de fósforo, potasio, calcio y magnesio de las sabanas de *Andropogon* bien establecidas. El gandul puede, además, cosecharse como una leguminosa de grano para alimentación humana directa.

En resumen, parece difícil mejorar los barbechos con simples cambios de especies. Conjuntamente con prácticas productoras de ingresos, tales como sembrar pastos para ganadería o árboles para leña, los barbechos mejorados pueden desempeñar un papel en los sistemas de agricultura nómada.

CULTIVOS SEMIPERMANENTES

Generalmente hay una etapa intermedia entre cultivos nómadas y continuos que coexiste con la agricultura nómada. Ruthenberg (1971) discute detalladamente el concepto de agricultura semipermanente, y describe varias formas que tienen mucha importancia en Africa. Consisten fundamentalmente en razones cultivo:barbecho

muy estrechas, con el uso de barbechos de pastos de corta duración para el pastoreo de ganado. Se les encuentra en suelos relativamente fértiles o en campos continuamente fertilizados con estiércol y desechos de las casas. En la Fig. 10.20 se presenta una disposición que comúnmente se encuentra alrededor de un poblado africano, que consiste de cultivos permanentes o huertos cerca de las casas, por lo general como resultado de una abundante aplicación de estiércol y control intensivo de malezas, seguido por un cultivo semipermanente de productos de primera necesidad, por barbechos de pasturas, y finalmente por la verdadera agricultura nómada. Aunque agrónomicamente la agricultura semipermanente es un sistema separado, representa una etapa intermedia en términos de fertilidad del suelo y control de malezas.

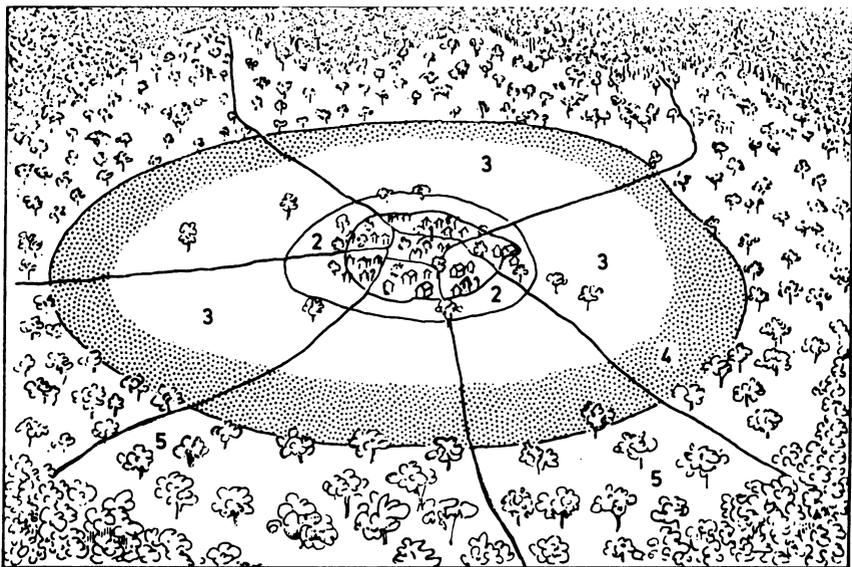


Fig. 10.20. Arreglo espacial de sistemas de cultivos continuos, semipermanentes y agricultura nómada en los alrededores de una población en Senegal: 1) casas y huertos; 2) cultivos continuos; 3) cultivos semipermanentes; 4) agricultura nómada intensiva; y 5) agricultura nómada extensiva. (Fuente: Ruthenberg, 1971).

CAMBIO DE AGRICULTURA NÓMADA A AGRICULTURA CONTINUA

En la mayoría de las áreas con agricultura nómada, la presión demográfica requiere un cambio hacia la agricultura continua. Las presiones de población han reducido la razón cultivo:barbecho y han precipitado la productividad del suelo en una espiral descendente.

Esto es muy evidente en partes densamente pobladas de África Occidental y en áreas de América del Sur donde están llegando fuertes migraciones de las congestionadas Sierras Andinas y el noreste de Brasil. La construcción de carreteras de penetración y el descubrimiento de petróleo en partes de la selva amazónica y del sureste de México, están agravando la situación. Esta sección discute prácticas de manejo de suelos para el establecimiento de agricultura continua bajo presión de la población.

DESMONTE

Los planes de agricultura continua generalmente comienzan con el proceso de desmonte del bosque que varía del corte manual de roza, tumba y quema, a una operación completamente mecanizada con tractores especialmente equipados y trituradores de árboles. También se han usado venenos para árboles, descortezamiento y anillamiento. La efectividad de un método en particular de desmonte depende de las propiedades del suelo, las prácticas de manejo, y la escala de las operaciones.

Cordero (1964) comparó el método convencional de roza, tumba y quema, con el desmonte con tractor seguido por la aradura y



Fig. 10.21. Operaciones mecanizadas de desmonte como las de esta figura en Ultisoles de textura ordinaria producen una compactación severa del suelo y rendimientos más bajos que los que se obtienen con el sistema tradicional de corta y quema.

nivelación, con o sin el uso de rastra para raíces, en un Entisol cerca de Santa Cruz, Bolivia. Se llevaron registros de rendimiento de caña de azúcar y de arroz de secano durante 5 años, después de los cuales se tomaron muestras de suelo. El Cuadro 10.9 no muestra diferencias significativas de rendimiento o cambio en las propiedades del suelo con los diferentes métodos de desmonte. Sin embargo, el costo del desmonte fue más o menos el doble en el caso de la mecanización. Cordero concluye que el sistema tradicional fue mejor por razón de su menor costo.

CUADRO No. 10.9. Efectos de sistemas de desmonte en la producción de cultivos y cambios en los 50 cm superiores de un Entisol de Santa Cruz, Bolivia. (Fuente: adaptado de Cordero, 1964).

Método de desmonte	Costo de desmonte (1957) (US\$/ha)	Arroz de secano producción (3 años) (ton/ha)	Caña de azúcar producción (5 años) (ton/ha)	pH del suelo	Materia orgánica (%)	P disponible (Bray) (ppm)	K intercambiable (meq/100 g)
Roza, tumba y quema sin arar	41	5,0	338	7,1	4,5	37	0,60
Desmonte con tractor, arado, rastreo y nivelación	92	5,5	343	7,1	3,2	17	0,32
Desmonte con tractor con rastra para raíces, arado, rastreo y nivelación	141	5,8	365	6,7	3,9	21	0,53

En contraste marcado con los resultados de Cordero, diferentes estudios han indicado que el desmonte mecanizado puede causar serias desventajas agronómicas. La remoción de la vegetación talada con un tractor D-6 equipado con una cuchilla convencional produjo menores rendimientos de los cultivos que el sistema tradicional de roza, tumba y quema tal como se practica en Ultisoles de la selva amazónica. El Cuadro 10.10 muestra que los rendimientos de los cultivos en desmontes con equipo mecanizado fueron consistentemente menores tanto con fertilización como sin ella.

Seubert (1975) ha expuesto tres razones para explicar estas diferencias: los beneficios de la ceniza producto de la quema; la compactación ocasionada por el tractor, y los disturbios de la capa arable por la cuchilla del tractor. Los beneficios químicos de la ceniza, cuya composición se presenta en el Cuadro 10.6 se reflejan en los cambios de la capa arable ilustrados en la Fig. 10.22. El suministro de calcio, magnesio y potasio intercambiables aumentó dramáticamente, el fósforo disponible se triplicó, la acidez intercambiable disminuyó, y la disminución de materia y nitrógeno orgánicos fue más lenta con el sistema de roza, tumba y quema que con el mecanizado.

CUADRO No. 10.10. Efectos de métodos de desmonte y fertilización en la producción de cultivos en un Ultisol de Yurimaguas, Perú (ton/ha). (Fuente: North Carolina State University, 1973, 1974).

Método de desmonte	Fertilizante	Cultivos continuos, arroz de secano			Yuca	Soya	<i>Panicum maxima</i> (producción anual)
		2°	3°	4°			
Rosa, tumba y quema	Ninguno	1,93	1,36	0,77	22,5	0,72	9,9
	Completo*	3,20	3,53	2,00	34,2	2,34	24,1
Desmonte con tractor	Ninguno	1,09	0,92	0,20	10,1	0,12	8,3
	Completo	2,52	3,19	1,42	32,0	1,31	18,4

(*) Aplicación inicial de cal hasta pH 6,2, 50-172-40 kg NPK/ha y las mismas dosis de N + K después de cada cultivo o corte de pastura.

Las tasas de infiltración 1 y 11 meses después del desmonte tuvieron promedios de 10,5 cm/hr con el método de roza, tumba y quema, en contraste con 0,5 cm/hr con el sistema mecanizado. Se cree que la diferencia es el resultado del paso del tractor por las capas arables arenosas muy susceptibles a la compactación. Datos similares obtuvo Van der Weert (1974) en el interior de Surinam con un sistema más refinado de desmonte que incluía el uso de una cuchilla K.G. El dramático aumento en densidad aparente en todo el perfil,

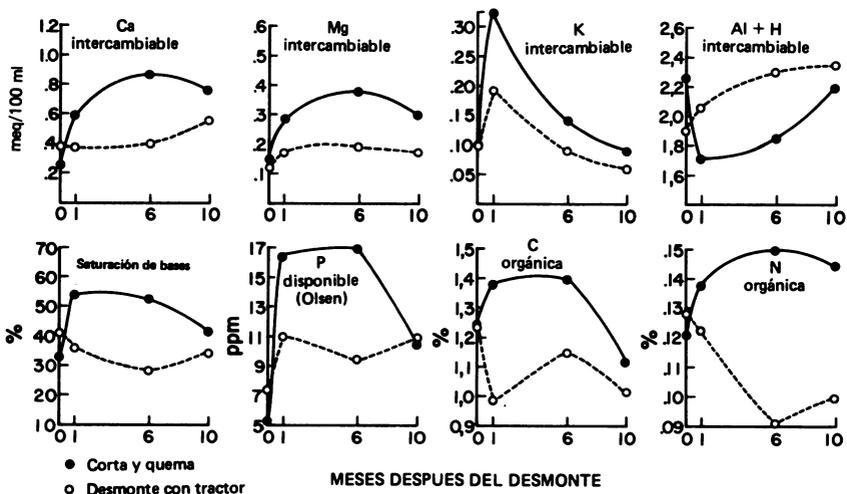


Fig. 10.22. Efectos de métodos de desmonte en las propiedades químicas en la capa arable (0-10 cm) de un Ultisol en Yurimaguas, Perú. (Fuente: adaptado de North Carolina State University, 1974).

dio por resultado una disminución en las tasas de aeración e infiltración, y en desarrollo radicular. Los resultados de Van der Weert se presentan en la Fig. 10.23.

El tercer factor no deseable del desmonte mecanizado es la remoción parcial de la capa arable y su depósito en alguna otra parte durante el proceso. Aunque las cuchillas del tractor pueden mantenerse a una altura que evite el contacto con el suelo, el proceso de remoción y acarreo de troncos y ramas generalmente incluye el traslado de tierra de las partes altas a las partes bajas o a las cercanías de las hileras de desechos. En la mayoría de los suelos en equilibrio con un bosque tropical la remoción del grueso de la materia orgánica y nutrientes disponibles en la capa arable puede resultar catastrófica. Lal y sus colaboradores (1975) observaron una reducción del 50% en el rendimiento de maíz con la remoción de los 2,5 cm superiores de un Alfisol de Nigeria, y una reducción del 90% del rendimiento cuando la remoción fue de 7,5 cm. Van der Weert (1974) observó en Surinam mejor crecimiento de los cultivos en las cercanías

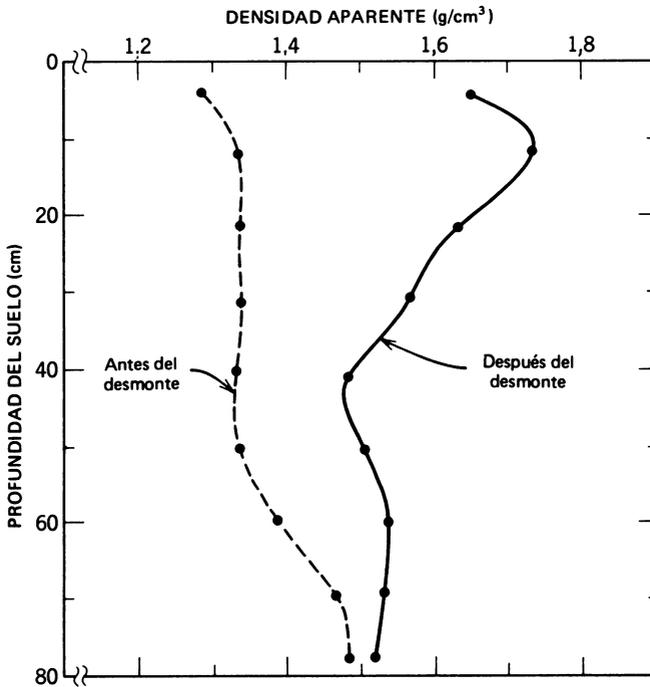


Fig. 10.23. Efectos del desmonte con tractor, usando una cuchilla K.G., en la densidad aparente de un suelo caolinítico arenoso en Coebiti, Surinam. (Fuente: Van den Weert, 1974).

de las hileras de desechos de vegetación, lo cual era probablemente un resultado directo de acumulación de la capa arable.

También hay consideraciones económicas y sociales que deben evaluarse cuando se comparan el sistema mecanizado de desmonte con el tradicional de roza, tumba y quema. Además de las desventajas agronómicas del ejemplo de Perú, (Cuadro 10.10) el costo real por hectárea del desmonte mecanizado fue tres veces más alto que el de corta y quema. También hay dificultades adicionales con el transporte y mantenimiento del pesado equipo en áreas primitivas. Quizás más importante aún, el desmonte inmediato de grandes áreas impone serios problemas de manejo.

Los agricultores tienen que hacerle frente al atraso en recibir fertilizantes y a la necesidad de controlar el rápido crecimiento de las malas hierbas. En Pucallpa, Perú, se hicieron extensos desmontes mecanizados con maquinaria (Abastos, 1971). Muchos de estos campos han sido abandonados desde entonces por la falta de suficiente mano de obra para el control de malezas, o de suficientes fertilizantes para contrarrestar el descenso de la fertilidad. Este autor cree que la transición de agricultura nómada a cultivos continuos por agricultores pequeños se logra mejor gradualmente, y que el desmonte de roza, tumba y quema permite a los agricultores concentrarse en las nuevas prácticas, fertilización y desyerbas a una escala manejable.

Por otra parte, los desmontes mecánicos pueden ser económicamente factibles para el establecimiento de plantaciones comerciales o grandes cooperativas con suficiente capital. Las desventajas agronómicas que se encontraron en los estudios de Perú, Surinam y Nigeria, pueden contrarrestarse por medio de mejoras en las técnicas de desmonte. La quema debe ser una parte integral del sistema mecanizado de desmonte para aprovechar la ventaja completa del valor fertilizante de la ceniza. Esto puede lograrse cortando los árboles en una sola operación y quemándolos cuando estén secos; y en una segunda operación amontonando los desechos en hileras. Los efectos de compactación pueden minimizarse mediante el uso de equipo más adecuado, tal como rastras de cadena con dos tractores, pero más importante aún, haciendo el desmonte con un contenido de humedad en el suelo que no cause encharcamiento o compactación. En muchos suelos con excelentes propiedades estructurales es probable que la compactación no sea tan seria como en los ejemplos mencionados. El traslado de la capa arable puede reducirse al mínimo mediante el uso de una rastra para raíces, de cuchillas flotantes y buenos operadores.

Jurion y Henry (1964) resumieron la experiencia belga en Zaire recomendando que el desmonte mecanizado sólo se practique conjuntamente con aradura y establecimiento de monocultivos en operaciones de gran escala. Esto representa una transición drástica de agricultura nómada a un tipo de agricultura de la región templada.

Otro método que puede usarse para el desmonte de áreas boscosas es el envenenamiento de los árboles con sustancias químicas de bajo

costo como 2,4-D. Sin embargo, esta práctica no se recomienda por los efectos nocivos en el ambiente. Además un estudio de Ahn (1970) en Ghana, indica que con el método tradicional de corta y quema se obtuvieron rendimientos más altos de plátano y ñame que con el método de envenenamiento de árboles; la razón era el valor de la ceniza como fertilizante.

Los problemas de desmonte en áreas de sabana son menos complejos. La vegetación leñosa se elimina fácilmente por medios manuales o mecánicos. No se han descrito problemas serios de compactación, por cuanto la remoción de árboles de sabana no requiere el esfuerzo necesario para el desmonte de bosque. El traslado de suelo de la capa arable de un lugar a otro es probablemente insignificante ya que tanto la materia orgánica como los nutrimentos están mejor distribuidos en el perfil del suelo por la acción de las raíces de las gramíneas. La quema se hace generalmente por ser el único medio efectivo de eliminar la sabana nativa. El problema principal es el de regular el tiempo si se va a mantener la agricultura nómada. Ramsay y Rose-Innes (1963) encontraron que quemando a principios de la estación seca el peligro de daño a los árboles se reduce al mínimo, mientras que si se quema a finales de la estación seca cuando la vegetación está mucho más seca, se pueden matar muchas especies de árboles y provocar el desarrollo de gramíneas indeseables.

Un problema adicional que siempre se presenta son los montículos de los comejenes en áreas de sabana y de bosques en el proceso de desmonte. El número de montículos y el área que ellos cubren pueden ser muy grandes. Lal et al, (1975) estiman que en Nigeria puede haber un promedio de 60 montículos por hectárea, algunos activos y otros abandonados. Estos montículos consisten primariamente de material de subsuelo. Cuando el subsuelo es bajo en nutrimentos aprovechables, el crecimiento será limitado. En casos de subsuelos altos en bases, puede haber algunos beneficios de fertilidad. Los montículos de comejenes no sufren disturbios con el método de corta y quema. Pero con el método de desmonte mecanizado se destruyen, especialmente si luego se ara. La mejor política depende de su composición química y de las consideraciones locales de manejo.

FERTILIZACION

La transición de cultivos nómadas a continuos invariablemente involucra fertilización. No se trata de si se fertiliza o no; lo que debe determinarse son las fuentes (estiércoles vs fertilizantes inorgánicos) a usar, las cantidades a aplicar, y los efectos residuales que pueden esperarse.

En algunas áreas de Africa con agricultura nómada se ha hecho mucha investigación sobre fertilización. Estos estudios han sido resumidos periódicamente por Vine (1954), Nye y Stephens (1962),

Touré (1964), Nye (1966), Richardson (1968), y FAO (1973). Lamentablemente, su impacto sobre la producción de cultivos alimenticios ha sido mínima. El grueso de la investigación se ha limitado a dosis de fertilizantes muy bajas, de 10 a 40 kg de N, P₂O₅ y K₂O/ha. Como se puede comprender, las respuestas de rendimiento han sido muy modestas. En el Cuadro 10.11 se presenta un resumen del programa "Freedom from Hunger" de la FAO sobre los ensayos llevados a cabo en Africa Occidental. Las respuestas son típicas de gran parte de los datos de investigación en la región. ¡No es de extrañarse que con tales respuestas los agricultores no usen fertilizantes! Muchas de las investigaciones se han hecho sin tomar en cuenta las características del suelo o datos de análisis de suelo. Es desalentador leer informes sobre cientos de ensayos con cal en suelos con niveles de pH entre 6 y 7.

CUADRO No. 10.11. Resumen de los ensayos simples del programa de fertilizantes de FAO en Ghana, Nigeria y Senegal, durante el período de 1961-1964 (rendimientos en ton/ha). (Fuente: Nye, 1966).

Cultivo	Zona	Número de ensayos	Rendimientos de testigos	Rendimiento con 20 ó 40 kg/ha		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Maíz	Bosque	343	1,22	1,40	1,38	1,38
	Sabana	159	1,19	1,37	1,40	1,32
Arroz	Bosque	153	1,31	1,53	1,52	1,39
	Sabana	199	1,27	1,48	1,47	1,44
Ñame	Bosque	60	9,0	10,0	10,1	9,6
	Sabana	160	8,4	9,4	9,5	9,2
Sorgo	Sabana	21	0,40	0,49	0,43	0,43
Mijo	Sabana	91	0,57	0,70	0,70	0,63

De esos datos pueden hacerse algunas generalizaciones válidas. Invariablemente hay respuesta al nitrógeno en la primera cosecha después del desmonte de una sabana, pero pocas veces después del desmonte del bosque. Nye (1966) informa de respuestas de cereales al nitrógeno observadas después de 6 cultivos sucesivos en áreas de bosque. Esto lo explican las diferencias en los patrones de acumulación de nutrimentos entre los barbechos de bosque y de sabana. Los barbechos de sabana están agotados de nitrógeno inorgánico por causa de la absorción de las gramíneas. La mayor parte del nitrógeno acumulado se va a la atmósfera con las quemadas anuales. Por lo tanto, es de esperar respuestas marcadas al nitrógeno. Por otra parte, en áreas boscosas el contenido de nitrógeno total del suelo es más alto y

se mineraliza más pronto después de quemar. Los agricultores generalmente siembran cultivos exigentes en nitrógeno, tales como cereales, después de desmontar el bosque, mientras que en las sabanas los primeros en sembrarse son los cultivos de raíces debido al poco nitrógeno que necesitan y a la abundancia de potasio aprovechable.

La mayoría de los suelos de Africa Occidental con agricultura nómada son deficientes en fósforo pero no son muy fijadores de este elemento debido a la textura no arcillosa de su capa arable. Tanto en áreas de bosque como de sabana comúnmente hay respuestas al fósforo después del primer cultivo. La modesta adición del fósforo que hay en la ceniza evita la deficiencia en el primer cultivo. En las áreas boscosas la deficiencia de potasio es corriente después de la segunda cosecha, pero pocas veces se presenta en sabanas antes de la octava cosecha consecutiva. La respuesta a la cal es positiva en suelos con pH menor de 6 y a menudo negativa con pH mayor. La deficiencia de azufre ocurre frecuentemente en leguminosas de grano.

Con la excepción de nitrógeno y azufre, los datos de análisis rutinarios de suelo deberían identificar las posibilidades de respuesta a los fertilizantes. Gran parte de la confusión acerca del encalado en los trópicos surge de las aplicaciones empíricas de cal hechas sin tomar en cuenta el pH del suelo. Al mismo tiempo, no es factible desarrollar buenas correlaciones de análisis de suelo con las bajas respuestas de los fertilizantes que se obtienen debido a las bajas dosis que se aplicaron.

Una serie de experimentos de larga duración llevados a cabo en todo el Africa prueban que con el uso de estiércol y fertilizantes es posible el cultivo continuo (Vine, 1953; Culot y Meyer, 1959; Djokoto y Stephens, 1961; Grimes y Clark, 1962; Heathcote, 1969; Stephens, 1969; Heathcote y Stockinger, 1970; Dabin, 1971; Abu-Zeid, 1973; Ofori, 1973). En la mayoría de los casos solamente se usó una mezcla de fertilizantes en comparación con cubiertas protectoras del suelo (mulch) y estiércoles. Un ejemplo típico son los resultados del experimento de Abu-Zeid (1973) de 10 años de duración con una rotación de algodón, maní y eleusine en Yambio, Sudán. El Cuadro 10.12 muestra que los rendimientos de la rotación aumentaron en cerca del 60% cuando el suelo fue alomado, fertilizado, tratado con estiércol o con cubierta protectora. Sin embargo los rendimientos fueron muy bajos. Una serie de experimentos en continuidad de cultivos llevados a cabo en Ibadán, Nigeria, de 1922 a 1951, y resumidos por Vine (1953, 1954, 1968) muestra que los rendimientos pueden mantenerse a niveles entre 0,4 y 1,7 ton/ha de maíz, alrededor de 7 ton/ha de ñames, y 12 ton/ha de yuca casi indefinidamente con aplicaciones esporádicas de 60 kg/ha de N y 20 kg/ha de P en forma de sulfato de amonio y superfosfato simple. Sin embargo en ningún momento se determinó la validez económica de tales tratamientos.

CUADRO No. 10.12. Efectos de fertilizantes, estiércol, cubierta protectora (mulch) y alomado en una rotación continua de 10 años con algodón, maní y *Eleusine* sp. en un Oxisol de Yambio, Sudán (los rendimientos son las medias de 10 años). (Fuente: Abu-Zeid, 1973).

Tratamiento aplicación anual	Semilla de algodón (ton/ha)	Maní en cáscara (ton/ha)	Eleusine (granos) (ton/ha)	Rendimiento relativo de la rotación
Práctica tradicional	0,29	0,73	0,61	100
Alomado	0,49	0,87	0,78	131
Alomado + 52-86-105 NPK	0,72	1,00	0,94	165
Alomado + estiércol*	0,74	0,98	0,84	157
Cubierta protectora	0,70	0,98	0,88	157

(*) Contenido de nutrimentos estimado de 108-80-18 kg NPK/ha.

Trabajos más recientes en que se usaron dosis más altas de fertilizantes muestran que los rendimientos de los cultivos se pueden mantener a niveles altos. Jones (1972) obtuvo rendimientos de maíz de 3 a 7 ton/ha y rendimientos altos de frijoles y de semilla de algodón en Ultisoles de Namungolo, Uganda. En la Fig. 10.24 se ilustran los dos últimos, en los que se usó una aplicación anual de 51 kg/ha de N, 22 kg/ha de P, 63 kg/ha de K, 32 kg/ha de S y 78 kg/ha de Ca.

La interacción entre fertilización y desyerba en cultivos continuos se demuestra dramáticamente en la Fig. 10.24. Sin una adecuada fertilización y desyerba el rendimiento bajó a menos del 30% del original en el segundo año. Con solamente desyerba, el descenso fue menos pronunciado. Con sólo fertilización, el rendimiento comenzó a declinar durante el tercer año, pero con ambos: fertilización y desyerba, los rendimientos aumentaron y tuvieron un promedio de cerca de 6,5 ton/ha. Aunque no se dispone de una interpretación económica, las respuestas a la fertilización y a la desyerba son de tal magnitud que probablemente compensan los costos involucrados.

Para obtener una evaluación económica real de la fertilización como elemento clave en agricultura continua, los efectos residuales, especialmente del fósforo, la cal y los microelementos, deben evaluarse después de un período de varios años. Varios ejemplos de la literatura indican la importancia de los efectos residuales, pero todavía no se ha llevado a cabo ninguna investigación por un período suficientemente largo en áreas de agricultura nómada. Con una aplicación ini-

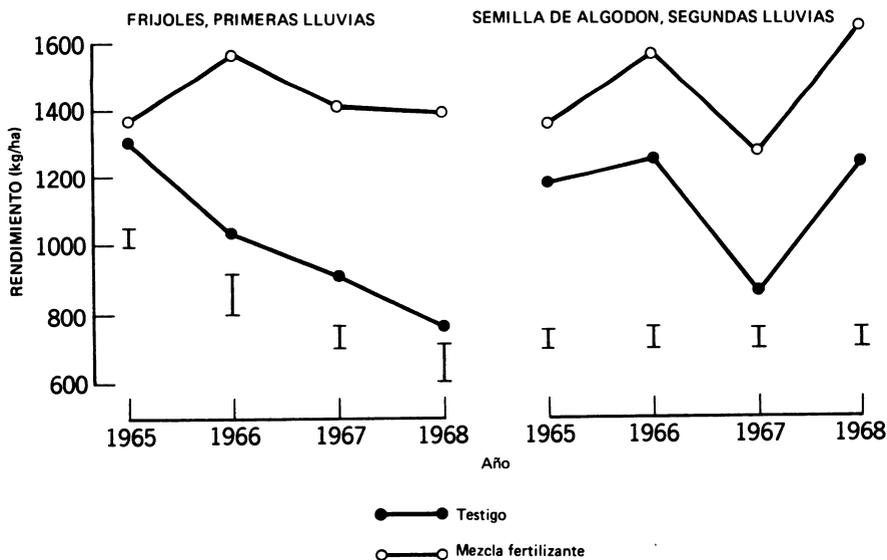


Fig. 10.24. Efectos de adiciones anuales de adiciones en una rotación continua de frijol y algodón en Namungole, Uganda. (Fuente: Jones 1972).

cial de 4 ton/ha de cal que elevó el pH de 4,5 a 6,2 en un Ultisol de Perú, la producción de tres cultivos sucesivos por año de arroz de secano, maíz y soya, se mantuvo un rendimiento total anual de granos de 8 a 10 ton/ha durante los dos primeros años (North Carolina State University, 1974). Según Stephens (1960) los efectos residuales de dosis bajas (10 kg/ha de P) de superfosfato simple fueron suficientes para evitar descensos de rendimiento en Ghana en los dos años subsiguientes. En Africa Oriental las aplicaciones continuas de sulfato de amonio y otros fertilizantes con efectos acidificantes han bajado el pH del suelo hasta un punto que hace necesario el encalado (Grimes y Clark, 1962).

ABONOS ORGANICOS

El alto costo de los fertilizantes y en muchos casos el costo del transporte a las áreas de agricultura nómada hacen que su uso resulte antieconómico a pesar de las marcadas respuestas agronómicas que con frecuencia se obtienen con las dosis correctas. Según Grigg (1974), los estiércoles de animales y las rotaciones de cultivos incluyendo leguminosas constituyeron los medios para transformar la agricultura nómada en la que actualmente se ve en la región templada. El uso de estiércol animal ha sido responsable en primer lugar del

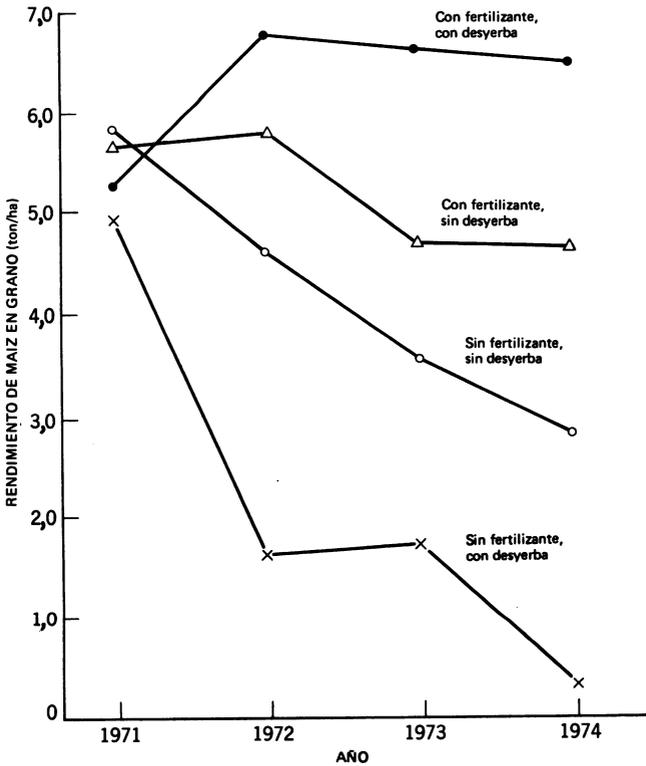


Fig. 10.25. Efectos de fertilización (120 kg/ha de N, 40 kg de P y 50 kg/ha de K por cultivo) y de desyerba, en los rendimientos de cultivo continuo en un Alfisol cerca de Ibadán, Nigeria. El bosque fue desmontado en 1970 y sometido a un ensayo de uniformidad con maíz. (Fuente: IITA, 1974).

cultivo permanente en pequeños lotes de terreno cercanos a los hogares de los agricultores nómadas, tal como se ilustra en la Fig. 10.20. Investigación llevada a cabo en Africa ha mostrado que los estiércoles pueden mantener cultivos continuos con bajos niveles de rendimiento similares a los que se obtienen con aplicaciones modestas de fertilizantes inorgánicos. El Cuadro 10.12 muestra algunos resultados típicos. Culot y Meyer (1959), Cutting et al (1959), Grimes y Clark (1962) y Heathcote (1969) han mostrado que la efectividad de las aplicaciones de estiércol está relacionado con su contenido de nutrientes. El problema en la mayoría de las áreas es que la disponibilidad de estiércol de bovinos es insuficiente. En muchas áreas de agricultura nómada en Africa, la producción de ganado vacuno está seriamente obstaculizada por la enfermedad de la mosca tse-tse; en otras áreas los pastoreos extensivos impiden la acumulación de estiércol. En las tierras altas de Zaire Oriental, Van Parijs (1959) desarrolló

un sistema para el uso efectivo del estiércol. Encontró que pasturas pequeñas, de 3 hectáreas de extensión, producían suficiente estiércol para abonar alrededor de 1 hectárea de cultivos por un período indefinido. Quizás en escala como ésta, la aplicación de estiércol resulte práctica.

También se ha explorado la función de los abonos verdes y en muchos casos se les ha encontrado agrónomicamente buenos. El problema ha consistido en convencer al agricultor nómada que siembre un cultivo que no va a producir una ventaja económica directa, en lugar de un cultivo comercial. Además la incorporación del abono verde requiere fuerza en mayor grado de la que disponen la mayoría de los agricultores. Vine (1953, 1954) encontró en Ibadán, Nigeria, que el rendimiento de maíz se mantuvo entre 1,3 y 1,6 ton/ha por 17 años cuando se puso un cultivo de frijol terciopelo una vez al año. Vine calculó que esta práctica agregaba 20 kg/ha de N al suelo. En la mayoría de los casos la misma cantidad de nitrógeno puede agregarse como fertilizante o estiércol, y cosechar un cultivo adicional. Algunos abonos verdes están produciendo interesantes efectos marginales. Cuando en Perú se incorporó kudzú al suelo en un Ultisol, la soya creció mejor, noduló más y el rendimiento fue mayor que con tratamientos comparables al mismo nivel de fertilidad y con tratamientos de inoculación (North Carolina State University, 1974). Intercalando cultivos de abonos verdes con cereales se ha incrementado el rendimiento de los cultivos sin la pérdida de tiempo que significa cultivar el abono verde separadamente. (Agboola y Fayemi, 1972). Los efectos de los abonos verdes en cultivos intercalados se discutirán en el Capítulo 12.

CUBIERTAS PROTECTORAS (MULCH)

Una práctica que consistentemente ha sido satisfactoria en áreas de agricultura nómada, es el empleo de cubiertas protectoras (mulch). Cuando se usa paja u otros residuos de cultivos de otras áreas las respuestas de rendimiento han sido tan altas o más altas que las obtenidas con fertilizantes o estiércol. Esto se muestra en los resultados de Abu-Zeid que se presentan en el Cuadro 10.12 y también en algunos otros informes (Djokoto y Stephens, 1961; Nye y Stephens, 1962; Ofori, 1972). Lal et al (1975) han mostrado que la aplicación de cubiertas protectoras disminuyen la temperatura del suelo, conservan la humedad, evitan la erosión y agregan nutrimentos al suelo.

Un mínimo de prácticas de labranza que consisten en labrar únicamente las hileras, con el resto del suelo con una cubierta protectora, ha dado excelentes resultados. Los Cuadros 10.13 y 10.14 muestran algunos de los resultados de Lal. No existe duda de que las cubiertas protectoras y el mínimo de labranza debieran ser partes integrales de sistemas de cultivos continuos en áreas de agricultura nómada. Green-

CUADRO No. 10.13. Efecto de cubiertas protectoras en las pérdidas por escorrentía, en Ibadán, Nigeria (% de pluviosidad). (Fuente: Lal et al, 1975).

Pendiente (%)	Cultivo de maíz		Cobertura boscosa
	Sin cubierta protectora	Con cubierta protectora	
1	6,4	2,0	1,7
5	40,3	7,7	1,3
10	42,7	5,7	1,7
15	17,6	1,9	2,0

CUADRO No. 10.14. Rendimientos comparativos de cultivos con labranza mínima y convencional en Ibadán, Nigeria (ton/ha). (Fuente: Lal et al, 1975).

Cultivo	Labranza mínima	Labranza convencional
Maíz	4,50	3,00
Caupí	0,78	0,63
Soya	0,84	1,06
Camote	22,00	17,75
Gandul (materia seca)	26,25	25,00

land (1975) ha desarrollado un modelo para Africa Occidental que integra estas prácticas de manejo.

ROTACION DE CULTIVOS

Las ventajas bien conocidas de la rotación de cultivos en la zona templada también son aplicables a las áreas tropicales con agricultura nómada, en las que los insumos externos deben ser mínimos por razón de su alto costo. La selección de cultivos depende de las condiciones locales y de la demanda del mercado. Una ventaja es que se evita el crecimiento de las poblaciones de insectos comunes en la agricultura continua. Una rotación anual de arroz de secano, maíz y soya, en Yurimaguas, Perú, ha producido excelentes resultados, mientras que el cultivo continuo de arroz ha dado por resultado un marcado descenso en el rendimiento, con niveles adecuados de fertilidad.

Una combinación compleja de ataques de insectos y patógenos parece ser la causa del comportamiento deficiente del cultivo continuo de arroz.

Newton (1960) ha hecho una revisión crítica de la literatura sobre este tópico. Su conclusión es que no ha habido un plan satisfactorio de rotación que incluya leguminosas y/o abonos verdes para el mantenimiento de cultivos continuos en áreas de agricultura nómada. Este es un desafortunado resultado de experimentos de un simple factor. Lo que se necesita urgentemente es desarrollar sistemas completos de manejo que incluyan planes de rotación y cultivos intercalados, más fertilización y empleo de cubiertas protectoras. De esta manera podrían desarrollarse sistemas para producción continua de alimentos.

CULTIVOS PERMANENTES

En muchas áreas de agricultura nómada una alternativa más factible es el cultivo de árboles que producen cosechas que pueden recolectarse. En los trópicos se han establecido grandes plantaciones de este tipo. La ventaja de plantar cultivos arbóreos permanentes es que ellos establecen sus propios ciclos cerrados de nutrimentos. Las cantidades que se recolectan anualmente constituyen por lo general una pequeña fracción de la biomasa de cultivos tales como cacao, palma aceitera, caucho y muchas frutas tropicales. La dinámica del suelo después del establecimiento de una plantación de palma de aceite en el sur de Nigeria está ilustrada en la Fig. 10.26. La mayoría de los parámetros permanecieron estáticos, excepto el de potasio, el que por lo general se pierde rápidamente después de la quema. Una ventaja adicional de los cultivos arbóreos es que la tierra puede usarse para la producción de alimentos o pasturas mientras los árboles crecen. La Fig. 10.26 indica que en una plantación de palma aceitera intercultivada por 12 años con cultivos alimenticios (ñame, yuca y maíz) ciertos nutrimentos se agotaron, pero la producción de aceite no se afectó (Cuadro 10.15). Este cuadro también muestra los efectos nocivos de no desyerbar, aún en estas condiciones.

Otra alternativa es la siembra de árboles de madera comercial. Especies de crecimiento rápido como teca (*Tectona grandis*), se han sembrado en enormes extensiones en climas ústicos de Africa y del sureste de Asia. En el sistema "Taungya", (llamado así corrientemente) la corta de madera se hace después de un considerable período de tiempo, sembrando cultivos mientras se establecen las nuevas plántulas. En Jarilandia, Brasil, varios miles de hectáreas de la selva amazónica se han sembrado con la especie forestal de crecimiento rápido *Gmelina arborea*, la que se puede cosechar para pulpa en 6 a 8 años, o como madera después de 10 años (Lamb, 1973). En esta forma el uso de la tierra puede ser muy provechoso si se acompaña con facilidades de elaboración.

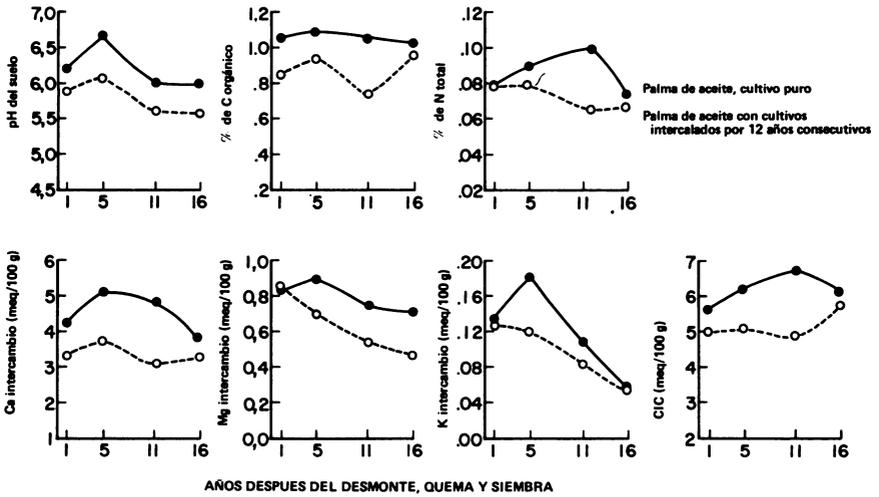


Fig. 10.26. Cambios en el suelo de una plantación de palma de aceite establecida donde había un bosque secundario, en un Alfisol de Benin, Nigeria (0-10 cm de profundidad). (Fuente: adaptado de Kowal y Tinker, 1959).

CUADRO No. 10.15. Producción total de palma aceitera en función de tratamientos de establecimiento de un Oxisol de Benin, Nigeria, plantado en 1940. (Fuente: adaptado de Kowal y Tinker, 1959).

Tratamiento de establecimientos	Producción total de frutos 1945-1956 (ton de racimos/ha)
Cultivo puro, cobertura normal de malezas	85,0
2 años de cultivos intercalados*	87,8
12 años de cultivos intercalados*	93,4
Cultivo puro, cobertura de kudzú controlada	89,0
Cultivo puro, sin desyerbar	75,6

(*) Con ñame, yuca y maíz.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. La agricultura nómada constituye la forma más extensa de manejo de suelo en los trópicos; cubre alrededor del 44% de las tierras potencialmente arables o pastoreables del trópico. Aunque la practican naciones muy distintas, los componentes principales son muy semejantes, siendo la principal diferencia si se lleva a cabo en vegetación de bosque o de sabana.

2. Antes del desmonte el suelo y el bosque tienen un ciclo de nutrientes muy cerrado, en el cual se almacenan la mayoría de los elementos nutritivos en la biomasa y la capa arable y se trasladan de una a la otra por vía de lavado pluvial, caída de hojarasca, caída de madera, descomposición de raíces y absorción de las plantas. Las pérdidas de este sistema son por lo general insignificantes. Es por eso que hay exuberante vegetación tropical que crece sin síntomas de deficiencias nutritivas en suelos de muy baja fertilidad natural.
3. Cuando se rompe el ciclo de nutrientes a causa del desmonte y la quema de la vegetación, ocurren cambios significativos en las propiedades físicas del suelo. La temperatura del suelo aumenta durante la quema pero pocas veces afecta a más de los 2 a 5 cm superiores del suelo. Después de la quema la temperatura del aire y del suelo aumentan debido a que más radiación solar llega a la superficie del suelo. Los regímenes de humedad del suelo también se alteran, con menos remoción de humedad del subsuelo que cuando las raíces del bosque están activas. Ocurre deterioro de la estructura del suelo que conduce a pérdidas por escorrentía y erosión en capas arables con agregación deficiente expuestas a prácticas inadecuadas de manejo, corrientemente a causa de la densidad creciente de población. Los cambios en estructura del suelo son menores en Oxisoles y Andepts bien agregados, y en la mayoría de los suelos protegidos por ceniza o cubiertas protectoras (mulch) y un dosel continuo del follaje del cultivo, como en los sistemas tradicionales de agricultura nómada.
4. La composición química de la ceniza produce cambios importantes en las propiedades químicas del suelo, pero la magnitud y duración de estos cambios dependen del tipo de vegetación cortada, el clima y las propiedades del suelo. Los valores de pH del suelo suben después de la quema debido a la incorporación de cationes básicos y gradualmente disminuye con el cultivo. En suelos ácidos estos cambios son beneficiosos porque aumentan el calcio y el magnesio intercambiables y neutralizan parte del aluminio intercambiable. En suelos con niveles altos de bases la ceniza puede elevar el pH a 7 u 8, produciendo posiblemente efectos nocivos, tales como deficiencia de hierro. Sin embargo en todos los casos los niveles de fósforo y potasio disponibles de las pruebas de suelo aumentan después de la quema debido a la contribución de la ceniza. Los contenidos de materia orgánica y nitrógeno del suelo aumentan ligeramente después de la quema debido a la adición de vegetación parcialmente quemada, pero disminuyen gradualmente con el cultivo. La magnitud de esta disminución es mayor en suelos con contenidos altos de materia

orgánica, y en casos en que la superficie del suelo está expuesta durante considerables períodos de tiempo.

5. La magnitud de los descensos de rendimiento cuando no se fertiliza, depende de las propiedades del suelo, el clima y la vegetación. Los descensos de rendimiento son más marcados en suelos ácidos, en regímenes údicos de humedad del suelo y en áreas boscosas. Las razones para abandonar los campos cultivados uno o pocos años después del desmonte son el agotamiento de la fertilidad del suelo, mayores dificultades en el control de malas hierbas, erosión del suelo, mayor incidencia de insectos y enfermedades y ciertas costumbres sociales. Se cree que el agotamiento de la fertilidad del suelo es la causa más importante para el abandono de suelos con niveles bajos de bases, pero en suelos con niveles altos de bases el factor más importante es el control de malezas.
6. Se han propuesto varios procedimientos para aumentar la producción de cosechas sin cambiar el sistema de agricultura nómada; el sistema de franjas, mejoramiento de variedades y cambio de espaciamiento, reducción del período de barbecho, y mejoramiento de la calidad de los barbechos. Las mejoras más prometedoras son las variedades mejoradas o diferentes, espaciamiento más corto, y fertilización modesta, cambios que están dentro de las posibilidades económicas de los agricultores.
7. En algunas áreas las presiones de población requieren un cambio completo a agricultura continua. Los métodos de desmonte son cruciales por cuanto ciertas operaciones mecánicas pueden resultar en daño serio a las propiedades físicas del suelo, conduciendo a compactación, remoción de la capa arable y erosión. El método tradicional de corta y quema no causa tales problemas y agrega valiosos fertilizantes en forma de ceniza. La elección de las prácticas de desmonte también dependen de las propiedades del suelo, el manejo, y el capital disponible para el manejo después del desmonte.
8. El descenso de fertilidad en que se incurre al cambiar a agricultura continua puede corregirse por medio de fertilización o aplicación de estiércol en forma apropiada. En muchas áreas el costo de los fertilizantes y del transporte hacen que una fertilización abundante resulte antieconómica. La combinación de labranza mínima, aplicación de cubierta protectora (mulch), cultivos múltiples, y prácticas modestas de fertilización han demostrado ser satisfactorias para mantener buenos rendimientos en base de continuidad de cultivos en ciertas áreas que anteriormente tuvieron agricultura nómada.

REFERENCIAS

- ABASTOS, M. Inventario y evaluación de la concesión tournavista. Pucallpa. LeTourneau del Perú, Inc., Lima, 1971. 76 p.
- ABU-ZEID, M. O. Continuous cropping in areas of shifting cultivation in Southern Sudan. *Trop. Agr. (Trinidad)* 50:285-290. 1973.
- AGBOOLA, A. A., y FAYEMI, A. A. Effect of soil management on corn yield and soil nutrients in the rainforest zone of western Nigeria. *Agron. J.* 64:641-644. 1972.
- AHLGREN, I. F. Effect of fire on soil organisms. In T. T. Kozlowski (ed.). *Fire and ecosystems*. Academic Press, New York, 1974. pp. 47-72.
- AHN, P. M. The effects of large scale mechanized agriculture on the physical properties of West African soils. *Ghana J. Agr. Sci.* 1:35-40. 1968.
- _____. Shifting cultivation and mechanized agriculture. In *West African Soils*. Oxford University Press, London, 1970a. pp. 232-253.
- _____. The effects of clearing by poisoning as against felling and burning on plantations and cocoyam yields on acid Ghana forest soils. *Ghana J. Agr. Sci.* 3:93-97. 1970b.
- _____. Some observations on basic and applied research in shifting cultivation. *FAO Soils Bull.* 24. 1974. pp. 123-154.
- ANTHONY, K. R. M., y WILLIMOTT, S. G. A study of soil fertility in Zandeland. *Emp. J. Exptal. Agr.* 24:75-88. 1956.
- ASRCT. Semiannual Report 2. Cooperative Research Programme 27, Applied Scientific Research Corporation of Thailand, Bangkok, 1968.
- BARTHOLOMEW, W. V., MEYER, I., y LAUDELLOT, H. Mineral nutrient immobilization under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgian Congo) region. *INEAC, Ser. Sci.* 57, Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1953. pp. 1-27.
- BOUYER, S., TOURTE, R., y COLLOT, L. Deuxieme contribution a l'etude de la fumure des terres a arachide du Sénégal; effet résiduel des formules NPK sur la deuxieme année de culture. *Agron. Tropicale (France)* 6:287-293. 1951.
- BOYLE, J. R. Forest soil chemical changes following fire. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 4:369-374. 1973.
- BRAMS, E. A. Continuous cultivation of West African soils: organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and Soil* 35:401-414. 1971.
- _____. Residual soil phosphorus under sustained cropping in the humid tropics. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:579-583. 1973.
- BRIGGS, G. W. G. Maintenance of soil fertility. *Third West Afr. Agr. Conf.* 1:1-8. 1938.
- BRINKMANN, W. L. F., y NASCIMENTO, J. C. de. The effect of slash and burn agriculture on plant nutrients in the tertiary region of Central Amazonia. *Turrialba* 23:284-290. 1973.
- BUDOWSKI, G. Tropical savannas, a sequence of forest felling and repeated burning. *Turrialba* 6:23-33. 1956.
- CHARREAU, C. y NICOU, R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Tropicale (France)* 26:903-978, 1184-1247. 1971.

- CLARKE, R. T. The effect of some resting treatments on a tropical soil. *Emp. J. Exptal. Agr.* 30:57-62. 1962.
- CONKLIN, H. C. The study of shifting cultivation. Panamerican Union, Studies and Monographs, no. 6. Washington, 1963. 165 p.
- COOKE, C. W. Why the Mayan cities of the Petén district. Guatemala were abandoned. *J. Wash. Acad. Sci.* 21:283-287. 1931.
- CORDERO, A. The effect of land clearing on soil fertility in the tropical region of Santa Cruz, Bolivia. M.S. Thesis, University of Florida, Gainesville, 1964. 102 p.
- COULTER, J. K. Soil management systems. In *Soils of the humid tropics*. National Academy of Sciences, Washington, 1972. pp. 189-197.
- COWGILL, U. M. Soil fertility, population, and the ancient Maya. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 46:1009-1011. 1960.
- _____. An anthropological study of the southern Maya lowlands. *Amer. Anthropologist* 64:273-286. 1962.
- CULOT, J. P., y MEYER, J. Possibilities des cultures vivrières continues en conditions équatoriales. *Proc. Third Inter-Afr. Soils Conf. (Dalaba)* 2:831-841. 1959.
- CUNNINGHAM, R. K. The effect of clearing a tropical forest soil. *J. Soil Sci.* 14:334-345. 1963.
- CUTTING, C. V., WOOD, R. A., BROWN, P. et al. Assessment of fertility status and the maintenance of productivity of soils in Nyasaland. *Proc. Third Inter-Afr. Soils Conf. (Dalaba)* 2:817-824. 1959.
- DABIN, B. The use of phosphate fertilizer in a long-term experiment on ferralitic soil at Bambari, Central African Republic. *Phosphorus in Agr.* 25:1-11. 1971.
- DAVIDE, J. G., VILLEGAS, L. M., y TYNER, E. H. Rotation and fertilizer studies on abandoned Kainging lands in the Island of Palawan, Philippines. In *Trans. Comm. IV and V, Int. Soc. Soil Sci. (New Zealand)*, 1962. pp. 556-573.
- DJOKOTO, R. K., y STEPHENS, D. Thirty long term fertilizer experiments under continuous cropping in Ghana I & II. *Emp. J. Exptal. Agr.* 29:181-196, 245-258. 1961.
- DOBBY, E. G. H. *Southeast Asia*. Wiley, New York, 1950.
- DONOVAN, K. Informe de ensayos con arroces Chancay y Huallaga 1972-73. Ministerio de Agricultura. Zona Agraria IX, Agencia de Extensión, Yurimaguas, Perú, 1973. 9 p.
- DOYNE, H. C., HARTLEY, K. T., y WATSON, W. A. Soil types and manurial experiments in Nigeria. In *Third West Afr. Agr. Conf.* 1938. pp. 227-298.
- DUMONT, R. *Types of rural economy*. Methuen, London, 1966.
- EDMINSTEN, J. Preliminary studies of the nitrogen budget of a tropical rain forest. In H. T. Odum (ed.). *A tropical rain forest*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970. pp. H211-H216.
- EWELL, J. J. Dynamics of litter accumulation under forest succession in eastern Guatemala lowlands. M.S. Thesis, University of Florida, Gainesville, 1968.
- FAO STAFF. Shifting cultivation. *Trop. Agr. (Trinidad)* 34:159-164. 1957.
- FAO. Improving soil fertility in Africa. *FAO Soils Bull.* 14. 1973. 145 p.
- FAO-SIDA. Shifting cultivation and soil conservation in Africa. *FAO Soils Bull.* 24. 1974. 248 p.
- FERWERDA, J. D. Soil fertility in the tropics as affected by land use. In *Int. Potash Inst. Proc. 9th Congr. (Berne)*, 1970. pp. 317-329.

- FRIESE, F. W. Untersuchungen über die Folgen der Brandwirtschaft an tropischen Böden. *Tropenpflanzer* 42:1-22. 1939.
- GILLIER, P. La reconstitution et le maintien de la fertilité des sols du Sénégal et le problème des jachères. *Oleagineux* 15:699-704. 1960.
- GOLLEY, F. B., MCGINNINS, J. T., CLEMENTS, R. J. et al. The structure of tropical forests of Panama and Colombia. *Biol. Sci.* 19:693-696. 1969.
- GOSWAMI, P. C. Shifting cultivation in the hills of northeastern India. *Indian Farming* 21:10-13. 1971.
- GRANT, P. M. Restoration of productivity of depleted sands. *Rhodesia Agr. J.* 67:131-137. 1970.
- GREENLAND, D. J. Evolution and development of different types of shifting cultivation. *FAO Soils Bull.* 24. 1974. pp. 5-13.
- . Bringing the green revolution to the shifting cultivator. *Science* 190:841-844. 1975.
- , y KOWAL, J. M. L. Nutrient content of a moist tropical forest of Ghana. *Plant and Soil* 12:154-174. 1960.
- , y NYE, P. H. Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *J. Soil Sci.* 9:284-299. 1969.
- GRIGG, D. B. The agricultural systems of the world. Cambridge University Press, London, 1974. pp. 57-74.
- GRIMES, R. C., y CLARKE, R. T. Continuous arable cropping with the use of manures and fertilizers. *East. Afr. Agr. For. J.* 28:74-80. 1962.
- GUILLEMIN, R. Evolution de l'agriculture autochtone dans les savannes de l'Oubangui. *Agron. Tropicale (France)* 11:143-176. 1956.
- HARDY, F. Some aspects of tropical soils. *Trans. 3rd Int. Congr. Soil Sci.* 2:150-163. 1936.
- HAUCK, F. W. Introduction. Shifting cultivation and soil conservation in Africa. *FAO Soils Bull.* 24. 1974. pp. 1-4.
- HEATHCOTE, R. G. Soil fertility under continuous cultivation in northern Nigeria. I. The role of organic manures. *Exptal. Agric.* 6:229-237. 1959.
- , y STOCKINGER, K. R. Soil fertility under continuous cultivation in northern Nigeria. II. Responses to fertilizers in the absence of organic manures. *Exptal. Agric.* 6:345-350. 1970.
- HUTTEL, C. H. Vertical distribution of roots in a tropical rainforest in Southern Ivory Coast. *J. West Afr. Sci. Assoc.* 14:65-72. 1959.
- IITA. Annual Reports. Farming systems program, International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, 1971-1974.
- JAIYEBO, E. O., y MOORE, A. W. Soil fertility and nutrient storage in different soil-vegetation systems in a tropical rain forest environment. *Trop. Agr. (Trinidad)* 41:129-139. 1964.
- JAMASON, J. D., y KERKHAM, R. K. The maintenance of soil fertility in Uganda. *Emp. J. Exptal. Agr.* 28:179-192. 1960.
- JEWITT, T. N. Shifting cultivation in the clay plains of the central Sudan. *Trans. Fourth Int. Congr. Soil Sci. (Amsterdam)*, 1950. pp. 331-333.
- JONES, E. Principles for using fertilizers to improve red ferralitic soils in Uganda. *Exptal. Agr.* 8:315-320. 1972.
- JORDAN, C. F. A progress report on studies of mineral cycles at El Verde. In H. T. Odum (ed.). *A tropical rain forest*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970. pp. H217-H219.
- JURION, F. y HENRY, J. Can primitive farming be modernized? INEAC. Ser. HORS 1969. Institut National pour L'Etude Agronomique du Congo, Brussels, 1969. 445 p.

- KAWANO, K., SANCHEZ, P. A., NUREÑA, M. A., y VELEZ, J. Upland rice in the Peruvian Jungle. Rice breeding. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 637-644.
- KEEN, B. A., y DUTHIE, D. W. Crop responses to fertilizers and manures in East Africa. *East Afr. Agr. For. J.* 19:19-28. 1953.
- KELLOGG, C. E. Shifting cultivation. *Soil Sci.* 95:221-230. 1963.
- KERR, A. I. A new system of grass fallow strip cropping for the maintenance of soil fertility. *Emp. J. Exptal. Agr.* 16:125-132. 1942.
- KOWAL, J. M. L., y TINKER, P. B. H. Soil changes under a plantation established from high secondary forest. *J. West Afr. Inst. Oil Palm Res.* 2:376-389. 1959.
- LAFONT, P. O. Slash and burn (ray) agriculture systems in mountain populations of Central Vietnam. *Proc. 9th Pacific Sci. Cong.* 7:56-59. 1959.
- LAL, R. Soil erosion and shifting agriculture. *FAO Soils Bull.* 24. 1974. pp. 48-71.
- _____. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. *IITA Tech. Bull.* 1. 1975.
- _____, KANG, B. T., MOORMAN, F. R., JUO, A. S. R., y MOOMAW, J. C. Soil management problems and possible solutions in Western Nigeria. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America.* North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 372-408.
- LAMB, A. F. A. *Gmelina arborea*. Commonwealth Forestry Institute, Oxford University, 1973. 31 p.
- LAUDELLOT, H. Investigation of the mineral-element supply by forest fallow burning. *Proc. Second Inter-Afr. Soil Congr.* 1:383-388. 1954.
- _____. Principles of the utilization of mineral fertilizers in the Belgian Congo. *Agr. Louvain* 7:451-470. 1959.
- _____. Dynamics of tropical soils in relation to their fallowing techniques. Paper 11266/E. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Rome, 1961. 111 p.
- LAWES, D. A. Rainfall conservation and yield of cotton in northern Nigeria. *Emp. J. Exptal. Agr.* 29:307-318. 1961.
- Le BUANEC, B. Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant du centre Cote d'Ivoire. Evolution de la fertilité et de la production. *Agron. Tropicale (France)* 27:1191-1211. 1972.
- LEWIN, C. J. The maintenance of soil fertility in southern Nigeria. *Third Spec. Bull. Agr. Dept. Lagos, Nigeria*, 1931. 43 p.
- LUSE, R. A. The phosphorus cycle in a tropical rainforest. In H. T. Odum (ed.). *A tropical rain forest.* U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970. pp. H161-H166.
- MARTIN, W. W., y BIGGS, C. E. J. Experiments on the maintenance of soil fertility in Uganda. *East Afr. Agr. For. J.* 2:371-378. 1937.
- MCGINNIS, J. T., y GOLLEY, F. B. Atlantic-Pacific Interocean Canal. Phase I. Final Report. Bioenvironmental and Radiological Safety Feasibility Studies, Batelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 1967.
- MIEKLEJOHN, J. Effect of bush burning on the microflora of a Kenya upland soil. *J. Soil Sci.* 6:111-118. 1955.
- MOBERG, J. P. Soil fertility problems in the West Lake Region of Tanzania. Effects of different forms of cultivation on the fertility of some Ferral soils. *East Afr. Agr. For. J.* 38:35-46. 1972.
- MOURA, W. y BUOL, S. W. Studies of a Latosol Roxo (Eutrustox) in Brazil. *Experientia* 13:201-217. 1972.

- NEWTON, K. Shifting cultivation and crop rotation in the tropics. *Papua New Guinea Agr. J.* 13:81-118. 1960.
- _____, y JAMIESON, G. I. Cropping and soil fertility studies at Keravat, New Britain, 1954-1962. *Papua New Guinea Agr. J.* 20:25-51. 1968.
- NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Research on tropical soils. Annual Report. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1973-1974.
- NYE, P. H., y BERTHEUX, M. H. The distribution of phosphorus in forest and savanna soil of the Gold Coast and its agricultural significance. *J. Agr. Sci.* 49:141-149. 1957.
- _____. The relative importance of fallows and soils in storing plant nutrients in Ghana. *J. West Afr. Sci. Assoc.* 4:31-49. 1958.
- _____, y GREENLAND, D. J. The soil under shifting cultivation. *Commonwealth Bur. Soils Tech Commun.* 51.1960. 156 p.
- _____. Organic and nutrient cycles under a moist tropical forest. *Plant and Soil* 13:333-346. 1961.
- _____, y FOSTER, W. N. M. The relative uptake of phosphorus by crops and natural fallow from different parts of their root zone. *J. Agr. Sci.* 56:299-306. 1961.
- _____, y STEPHENS, D. Soil fertility. In J. B. Wills (ed.). *Agriculture and land use in Ghana*. Oxford University Press, London, 1962. pp. 127-143.
- _____, y GREENLAND, D. J. Changes in the soil after clearing a tropical forest. *Plant and Soil* 21:101-112. 1964.
- _____. African experience of the use of fertilizers in the production of basic food crops. *Proc. Soil Crop. Sci. Soc. Fla.* 26:306-313. 1966.
- ODUM, H. T. Summary, an emergent view of the ecological system at El Verde. In H. T. Odum (ed.). *A tropical rain forest*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970. pp. 1191-1281.
- OFORI, C. S. Decline in fertility status of a tropical forest Ochrosol under continuing cropping. *Exptal. Agr.* 9:15-22. 1973.
- OVINGTON, J. D., y OLSON, J. S. Biomass and chemical content of El Verde lower montane rain forest plants. In H. T. Odum (ed.). *A tropical rain forest*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970. pp. H53-H75.
- PENDLETON, R. L. The place of tropical soils in feeding the world. *Ceiba* 4:201-222. 1954.
- PEREIRA, H. C., CHENERY, E. M., y MILLS, W. R. The transient effects of grasses on the structure of tropical soils. *Emp. J. Exptal. Agr.* 22:148-160. 1954.
- PHILLIPS, J. Effects of fire in forest and savanna ecosystems of sub-Saharan Africa. In T. J. KowloSKI (ed.). *Fire and ecosystems*. Academy Press, New York, 1974. pp. 435-482.
- POPENOE, H. L. The influence of the shifting cultivation cycle on soil properties in Central America. *Proc. 9th Pacific Sci. Congr. (Bangkok)* 7:72-77. 1957.
- _____. Effects of shifting cultivation on natural soil constituents in Central America. Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, 1960. 156 p.
- RAMSAY, J. M., y ROSE-INNES, R. Some observations on the effects of fire on the Guinea Savanna vegetation of northern Ghana over a period of 11 years. *Afr. Soils* 8:41-85. 1963.
- REED, W. E. Reconnaissance soil survey of Liberia. U.S. Dept. Agr. Agr. Inf. Bull. 66. Washington, 1951.

- RICHARDSON, H. L. The use of fertilizers. In R. P. Moss (ed.). The soil resources of Tropical Africa. Cambridge University Press, London, 1968. pp. 137-154.
- RUSSELL, E. J. Soil conditions and plant growth. Longmans, London, 1950. 635 p.
- RUTHENBERG, H. Farming systems in the tropics. Oxford University Press, London, 1971.
- SANCHEZ, P. A., y NUREÑA, M. A. Upland rice improvement under shifting cultivation systems in the Amazon Basin of Peru. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 210. 1972.
- _____. Soil management under shifting cultivation. In P. A. Sánchez (ed.). A review of soils research in tropical Latin America. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 46-67.
- _____, SEUBERT, C. E., TYLER, E. J. et al. Investigaciones en manejo de suelos tropicales en Yurimaguas. Selva Baja del Perú. In Reunión Internacional sobre Sistemas de Producción para el Trópico Húmedo. Zona Andina, Lima, Perú, 1974. pp. II-B-1-II-B-36.
- SEUBERT, C. E. Effect of land clearing methods on crop performance and changes in soil properties in an Ultisol of the Amazon Jungle of Peru. M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, 1975. 152 p.
- SIBAND, P. Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance: principaux resultats. Agron. Tropicale (France) 27:574-591. 1972.
- SINGH, K. Value of bush, grass or legume fallow in Ghana. J. Sci. Food Agr. 12:160-168. 1961.
- SNEDAKER, S. C., y GAMBLE, J. F. Compositional analysis of selected second growth species in lowland Guatemala and Panama. Bio. Sci. 19:536-538. 1969.
- _____. Ecological studies on tropical moist forest succession in eastern lowland Guatemala. Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, 1970.
- SOLLINS, P. y DREWRY, G. Electrical conductivity and flow rates of water through the forest canopy. In H. T. Odum (ed.). A Tropical rain forest. U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970. pp. H135-H154.
- STEPHENS, D. Fertilizer trials on peasant farms in Ghana. Emp. J. Exptal. Agr. 28:1-15. 1960a.
- _____. Some fertilizer trials with phosphorus, nitrogen and sulfur in Ghana. Emp. J. Exptal. Agr. 28:154-164. 1960b.
- _____. Three rotation experiments with grass fallows and fertilizers. Emp. J. Exptal. Agr. 28:165-178. 1960c.
- _____. The effects of different nitrogen treatments and of potash, lime and trace elements on cotton on Buganda clay loam soil. East. Afr. Agr. For. J. 23:320-325. 1967a.
- _____. Effects of grass fallow treatments in restoring fertility of Buganda clay loam in South Uganda. J. Agr. Sci. 68:391-403. 1967b.
- _____. The effects of fertilizers, manure and trace elements in continuous cropping rotations in Southern and Western Uganda. East Afr. Agr. For. J. 34:401-417. 1969.
- SUAREZ DE CASTRO, F. y RODRIGUEZ, A. Equilibrio de materia orgánica en plantaciones de café. Fed. Nac. Cafeteros de Colombia, Bol. Tec. 15. 1955.
- _____. Las quemas como práctica agrícola y sus efectos. Fed. Nac. Cafeteros de Colombia, Bol. Tec. 2. 1957.

- TERGAS, L. E., y POPENOE, H. L. Young secondary vegetation and soil interactions in Izabal, Guatemala. *Plant and Soil* 34:675-690. 1971.
- TOURE, E. H. O. Maintenance of the fertility of savanna zone soils. Effects of annual or biennial mineral fertilizer applications under conditions of continuous cropping in the Sudan zone of West Africa. *Afr. Soils* 9:221-246. 1964.
- URIBE, A., SUAREZ DE CASTRO, F., y RODRIGUEZ, A. Efectos de las quemadas sobre la productividad de los suelos. *Cenicafé* 18:116-135. 1967.
- URRUTIA, V. M. Corn production and soil fertility changes under shifting cultivation in Uxatún, Guatemala. M.S. Thesis, University of Florida, Gainesville, 1967. 101 p.
- VAN BEUKERING, J. A. Het Ladangvraagstuk, een bedrijsten sociaal economisch probleem. *Landbouw* 19:241-285. 1947.
- VANDERWEERT, R. y LENSELINK, K. J. The influence of mechanical clearing of forest on some physical and chemical soil properties. *Surinaamse Landbouw* 20:2-14. 1972.
- _____. The influence of mechanical forest clearing on soil conditions and resulting effects on root growth. *Trop. Agr. (Trinidad)* 51:325-331. 1974.
- VAN PARIJS, A. Mantién de la productividad de los suelos en cultivos continuos en Ituri (Congo Belga). III Conf. interafricanos de Suelos. 1959. pp. 857-863.
- VINE, H. Experiments on the maintenance of soil fertility at Ibadan, Nigeria, 1922-1951. *Emp. J. Exptal. Agr.* 21:65-85. 1953.
- _____. Is the lack of fertility of tropical African soils exaggerated? *Proc. 2nd Int. Afr. Soils Conf. (Leopoldville)* 2:389-412. 1954.
- _____. Developments in the study of soils and shifting agriculture in tropical Africa. In R. P. Moss (ed.). *The soil resources of Tropical Africa*. Cambridge University Press, London, 1968. pp. 89-119.
- WATTERS, R. F. The shifting cultivation problem in the American Tropics. In *Reunión Internacional sobre Problemas de la Agricultura en los Trópicos Húmedos de América Latina*. Lima, Belem do Pará, 1966. pp. 1-16.
- _____. *La agricultura migratoria en Venezuela*. Instituto Forestal Latinoamericano de Investigación y Capacitación, Mérida, 1968. 34 p.
- _____. Shifting cultivation in Latin America. *FAO For. Dev. Paper* 17. 1971. 305 p.
- _____, y BASCONES, L. The influence of shifting cultivation on soil properties at Altamira-Calderas, Venezuelan Andes. *FAO For. Dev. Paper* 17. 1971. pp. 291-299.
- WEBSTER, C. C. The ley and soil fertility in Britain and Kenya. *East Afr. Agr. For. J.* 20:71-74. 1954.
- WEIGERT, R. G., y MURPHY, P. Effect of season, species and location on the disappearance rate of leaf litter in a Puerto Rico rain forest. In H. T. Odum (ed.). *A tropical rain forest*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970. pp. H101-H104.
- WOODS, F. W., y GALLEGOS, C. M. Litter accumulation in selected forests of the Republic of Panamá. *Biotropica* 2:46-50. 1970.
- ZINKE, P. J., SABHASRI, S., y KUNDSTADLER, P. Soil fertility aspects of Lua forest fallow system of shifting cultivation. Unpublished paper. University of California, School of Forestry and Conservation, Berkeley, 1970.

CAPITULO 11

MANEJO DEL SUELO EN SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ

El arroz es el cultivo alimenticio que se produce en mayor cantidad en los trópicos, y el que ocupa la mayor área cultivada. Según estadísticas de FAO, en 1970 se produjeron más de 170 millones de toneladas de arroz en 94 millones de hectáreas en los trópicos. Más del 90% de esta producción corresponde a Asia tropical. Sin embargo el arroz es un cultivo alimenticio muy importante en los trópicos africanos y americanos.

El arroz es el único cultivo básico capaz de cultivarse en suelos inundados, debido a su poder de oxidar su rizosfera. La inundación da lugar a una serie de cambios físicos, químicos y biológicos que causan un conjunto de relaciones suelo-planta completamente distintos a otros cultivos. En las dos últimas décadas se han hecho considerables avances en el manejo de suelos inundados para producir arroz. Este capítulo describe los cambios físicos y químicos ocasionados por la inundación y el fanguero* del suelo, las propiedades fisiológicas de la planta de arroz, y el manejo del agua y los elementos nutritivos en los diversos sistemas de cultivo de arroz en los trópicos.

La gran mayoría del arroz tropical se produce en Entisoles, Inceptisoles, Vertisoles, Molisoles y Alfisoles relativamente fértiles, en los que predominan mineralogía de silicatos laminares, por lo que este capítulo se concentrará en estos suelos. Una excepción principal es el arroz de secano, el cual también se cultiva en Oxisoles y Ultisoles.

EFFECTOS DE LA INUNDACION EN LAS PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

Cuando un suelo seco se inunda repentina y completamente, los agregados estructurales se saturan con agua. El aire en los microporos

(*) "Fanguero" término con que se denomina la operación que consiste en batir o revolver el suelo hasta darle consistencia de fango o lodo. Aunque este término no está aceptado por la Real Academia Española se usa por no existir uno que exprese o describa acertadamente esa operación.

se comprime al avanzar el agua hasta que pequeñas explosiones ocurren dando lugar a la ruptura de los agregados más grandes (Yoder, 1936).

HINCHAMIENTO

Los minerales montmoriloníticos comienzan a hincharse; para que los agregados se hinchen libremente, sus agentes cementadores deben sufrir ciertas transformaciones. Kita y Kawaguchi (1960) encontraron que la hidratación del óxido de hierro y manganeso reducibles de silicatos y de materia orgánica tiene lugar en suelos inundados y que esto facilita el hinchamiento. El resultado es una menor cohesión dentro de los agregados y un aumento de cohesión entre agregados. En suelos con amonio fijado entre las láminas de silicatos laminares este proceso también da por resultado una pronta liberación de iones de NH_4^+ a la solución del suelo, independientemente de la transformación microbiana del nitrógeno (Bhattacharyya, 1971).

PERMEABILIDAD

Inmediatamente después de la inundación las pérdidas por percolación aumentan rápido, luego disminuyen y gradualmente se vuelven insignificantes, tal como se aprecia en la Fig. 11.1. El aumento en la permeabilidad en los primeros 10 a 20 días después de la inundación se atribuye a la liberación del aire atrapado en los poros y a la rápida producción de CO_2 . La disminución gradual que sigue se debe a una desintegración lenta de los agregados y a la obstrucción de los poros del suelo por los desechos microbianos. Allison (1947) y otros investigadores han encontrado por medio de técnicas de esterilización que este proceso es microbiológico, tal como se aprecia en la Fig. 11.1. Después de secar y volver a mojar el suelo la permeabilidad se restablece al valor aeróbico original.

Con el cultivo continuo de arroz inundado la permeabilidad del suelo disminuye aún más. Mikklesen y Patrick (1968) informaron que en ciertos suelos permeables de California, las tasas de percolación bajaron a una tercera o quinta parte de los valores originales después de varios años de cultivo continuo de arroz. Ellos atribuyeron este efecto a disminución en la estabilidad de los agregados. La mayoría de los suelos que se usan para arroz tienen muy baja permeabilidad para comenzar, debido a altos contenidos de arcilla o limo, alta saturación de sodio, niveles freáticos altos, o a la presencia de capas impermeables en el subsuelo. Por consiguiente, los cambios en permeabilidad por inundación pueden ser menos marcados que en el ejemplo de California.

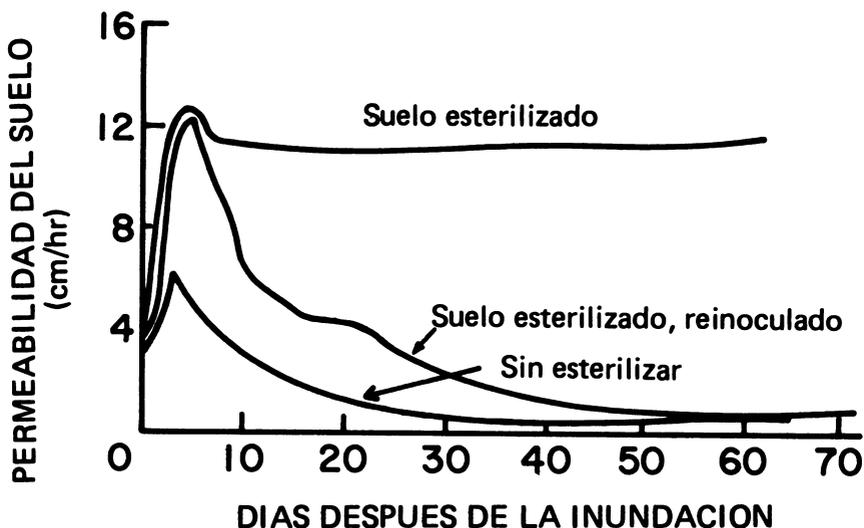


Fig. 11.1. Dinámica de la permeabilidad del suelo bajo condiciones de inundación (sin fangueo). (Fuente: Allison, 1947).

ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS

La estabilidad de los agregados generalmente disminuye con la inundación debido a hinchamiento, hidratación y mayor solubilidad de los agentes aglutinadores. La magnitud de este fenómeno varía mucho de acuerdo con las propiedades del suelo y la calidad del agua, yendo desde no destrucción a casi destrucción completa de los agregados (en ausencia de fangueo). En general, los sistemas de silicatos laminares puros con pH o contenido de sodio altos, presentan una marcada destrucción de agregados con la inundación. En el otro extremo, suelos altos en materia orgánica, óxidos de hierro y aluminio, a menudo retienen su estructura cuando están inundados, aun cuando los agregados pueden ser bastante suaves y pueden romperse fácilmente si se les aplica alguna clase de fuerza en el estado de inundación. Una serie de estudios por Kawaguchi et al, (1956), y Kawaguchi y Kita (1957), en Japón, y por Ahmad (1963), en Trinidad, confirmaron que la inundación disminuye gradualmente la estabilidad de los agregados, debido a la descomposición de la materia orgánica y a la reducción de los revestimientos de los óxidos de hierro y manganeso a formas solubles. Con el secamiento y la reoxidación la estabilidad de los agregados aumenta debido a la precipitación de los compuestos férricos y mangánicos como revestimientos alrededor de las partículas de arcilla. Este proceso es particularmente importante en los sistemas de óxidos y de silicatos laminares revestidos por óxidos.

FANGUEO

El fangueo puede definirse como el proceso de destruir los agregados del suelo de manera que se forme un lodo uniforme, lo cual se consigue aplicando fuerza al suelo cuando éste tiene un contenido alto de humedad. En la mayoría de los sistemas agrícolas el fangueo es un efecto no intencional de la labranza y resulta en severas disminuciones de rendimiento o en demoras de la siembra. En los sistemas de arroz inundado el fangueo es una importante práctica de manejo que se lleva a cabo con gran cuidado, con el propósito de destruir la estructura de la capa arable del suelo. En Asia es casi sinónimo de cultivo de arroz inundado.

El proceso del fangueo comprende una serie de operaciones de labranza: comienza con un contenido de humedad superior al de saturación del suelo y termina con un contenido de humedad más cercano a la capacidad de campo. Este proceso se entiende mejor considerando los cambios de fuerza dentro de un agregado y entre agregados del suelo, conforme se ilustra en la Fig. 11.2. La cohesión dentro de los agregados disminuye al aumentar el contenido de humedad del suelo. Los agregados individuales se tornan suaves y pueden desintegrarse o no, de acuerdo con su estabilidad. La cohesión entre agregados es muy baja cuando hay contenidos bajos de humedad, pero aumenta rápidamente al aumentar la humedad, llegando al máximo alrededor de la capacidad de campo, y disminuyendo conforme el contenido de humedad se aproxima a la saturación (Koenigs, 1961). La cohesión entre agregados depende principalmente del número de puntos de contacto entre ellos. El número de puntos de contacto es mínimo en un suelo seco y es máximo alrededor de la capacidad de campo debido al aumento del espesor de las películas de agua y al hinchamiento de los agregados. Con contenidos mayores de humedad las películas más gruesas de agua actúan como lubricantes y disminuyen el número de puntos de contacto entre los agregados. En la Fig. 11.2 el ámbito A es demasiado seco para una labranza efectiva, B es óptimo para labranza convencional y C indica el ámbito en que se logra el máximo fangueo. En este ámbito la cohesión dentro de los agregados es muy baja, y la cohesión entre agregados es máxima. Cuando se ejerce fuerza por medio de un tractor o del pie de un hombre, los agregados se destruyen fácilmente debido al efecto multiplicador de la alta fricción y de la baja fuerza interna de los agregados.

En la práctica los agricultores comienzan sus operaciones de fangueo con un contenido de humedad más alto que la saturación. En este ámbito D en la Fig. 11.2, tanto la cohesión dentro como entre los agregados es mínima. La aplicación de fuerza en este ámbito no produce fangueo máximo, pero incorpora malezas y comienza el proceso de destrucción de agregados. Los agricultores continúan luego

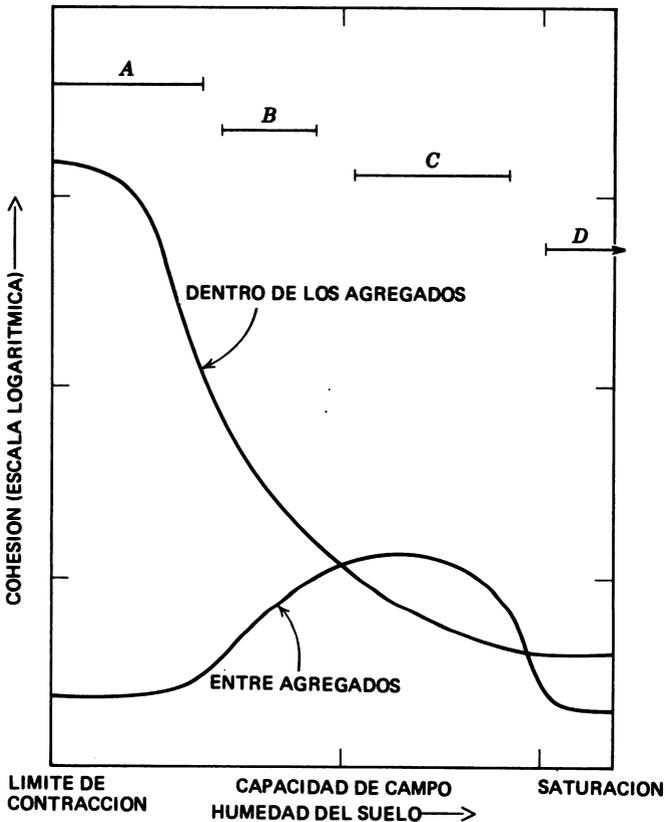


Fig. 11.2. Cohesión de los agregados del suelo afectada por el contenido de humedad del suelo. (Fuente: adaptado de Koenigs, 1961; y Koenigs, comunicación personal).

fangueando el suelo con contenidos de humedad progresivamente más bajos hasta alcanzar el máximo a la capacidad de campo.

El grado de fangueo que se logra varía según el tipo de suelo y el manejo. Un contenido alto de arcilla facilita el fangueo y da lugar a mayor destrucción de agregados. Sin embargo suelos arenosos con un bajo contenido de arcilla pueden ser fangueados. Las familias montmoriloníticas se fanguean más fácil y completamente que las familias caoliníticas u oxídicas. Los suelos saturados con sodio son los más fáciles de fanguear. En general cuanto más alto es el contenido de materia orgánica o el contenido de óxidos de hierro y aluminio, tanto más difícil es fanguear el suelo. Los Andepts y los Oxisoles son muy difíciles de fanguear y el grado de destrucción de agregados es probablemente menor que en otros suelos.

Las consecuencias del fanguero son: la destrucción de agregados, eliminación del espacio poroso no capilar, aumento de porosidad capilar, aumento de retención de humedad del suelo, disminución de pérdidas por evaporación y percolación y reducción del suelo sin inundación.

DESTRUCCION DE AGREGADOS

La principal consecuencia de fanguear el suelo es que se destruyen sus agregados. Un suelo fanguado consiste esencialmente de un sistema sólido-líquido difásico. Las partículas individuales de arcilla o grupos de ellas se orientan paralelamente y están rodeadas de poros capilares saturados con agua. Partículas de arena y limo y algunos



Fig. 11.3. Operación final del fanguero del suelo, incluyendo nivelación, en Ilocos Sur, Filipinas.

agregados restantes también son parte de la matriz. Es difícil cuantificar el grado de destrucción de agregados porque para medir la agregación es necesario el secamiento. Kawaguchi et al (1956), Chaudhary y Ghildyal (1969) y otros han presentado evidencia de la destrucción de agregados después de fanguear y secar varias veces.

CAMBIOS EN POROSIDAD

Los poros no capilares se eliminan esencialmente en el proceso de fangueo. Bodman y Rubin (1948) encontraron que del 91 al 100% del volumen ocupado por tales poros fue destruido al fanguear un suelo franco-limoso. La porosidad capilar aumenta drásticamente al fanguear hasta el 223% en una observación de Jamison (1953). Como la mayoría de estos poros tienen radios efectivos menores de 0,2 el agua puede movilizarse a través de los poros como líquido, pero sólo se pierde como vapor.

CAMBIOS EN DENSIDAD APARENTE

Después de fanguear la densidad específica aparente del suelo disminuye debido al mayor volumen poroso total ocupado por agua. Sin embargo, con el tiempo los suelos fangueados aumentan su densidad aparente mientras están todavía inundados probablemente debido a un lento asentamiento de las arcillas. Sin embargo, cuando se secan, los suelos fangueados se contraen dramáticamente y aumentan su densidad aparente (Kawaguchi et al, 1956; Sánchez, 1968).

AUMENTO DE RETENCION DE HUMEDAD DEL SUELO

Como consecuencia de la destrucción de poros no capilares, del aumento de poros capilares saturados con agua y la disminución en la densidad aparente inicial, los suelos fangueados retienen más agua a una tensión dada de humedad del suelo que antes de su fangueo. Este efecto se puede medir como lo ilustra la Fig. 11.4, dentro de un ámbito de 0 a 10 bares de tensión de humedad del suelo.

DISMINUCION EN PERDIDAS DE HUMEDAD

Los cambios en porosidad y retención de agua dan por resultado patrones de pérdida de humedad del suelo marcadamente reducidos en los suelos fangueados. El Cuadro 11.1 muestra los efectos del fangueo en las tasas de drenaje en seis suelos filipinos que varían ampliamente en textura y mineralogía. El fangueo disminuyó las pérdidas de percolación por un factor de 1000 veces indiferentemente de las propiedades del suelo. Entre los suelos fangueados el Entisol arenoso y el Andept arcilloso tuvieron pérdidas más altas de

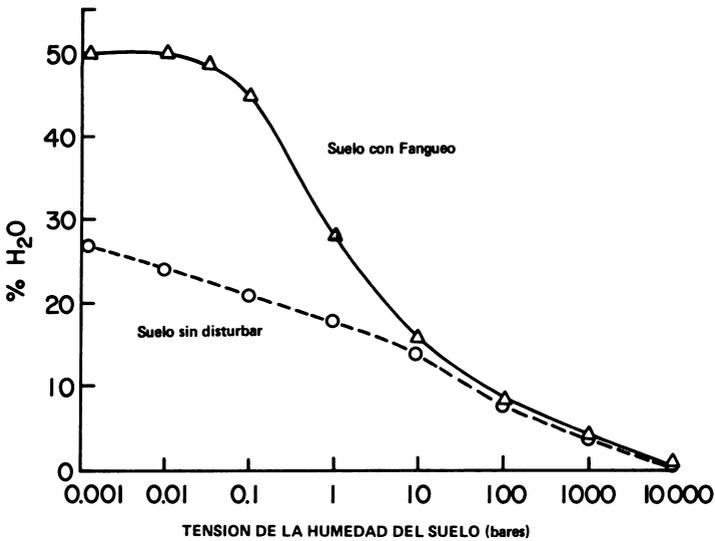


Fig. 11.4. Curvas de retención de humedad de un suelo arcilloso con fangueo y sin disturbar. (Fuente: Cronney y Coleman, 1954).

percolación debido a las dificultades para fanguear tales suelos. Otros suelos arcillosos percolaban con una tasa de 0,5 mm/día, resultado que concuerda con observaciones de campo.

CUADRO No. 11.1. Efectos del fangueo en las tasas de drenaje de seis suelos Filipinos inundados en condiciones de macetas. (Fuente: Sánchez, 1973).

Suelo	Mineralogía	Arcilla (%)	Tasa de drenaje (cm/día)	
			Condición granulada	Condición fangueada
Pasamment	Silíceo	9	267	0,45
Fluvent	Mixta	24	215	0,17
Aquept	Montmorilonítica	30	183	0,05
Aqualf	Montmorilonítica	40	268	0,05
Ustox	Caolinítica	64	155	0,05
Andept	Alofánica	46	214	0,31
Media			217	0,18

Los beneficios del fangueo al retardar el movimiento del agua se atribuyen a la formación de "capas de aradura"* relativamente impermeables inmediatamente debajo de la capa fangueada. Estas capas de aradura se encuentran en suelos francos cultivados con arroz por muchos años, en Oxisoles bien drenados, y como materiales concrecionales en Andepts.

En suelos arenosos y arcillosos no se encuentran capas de aradura; tampoco en Vertisoles y suelos aluviales jóvenes y calcáreos (Sánchez, 1973). Sin embargo, el fangueo se practica casi universalmente en cultivos de arroz inundado. Si el campo está rodeado por diques y el suelo fangueado hasta el fondo los campos inundados por la lluvia mantienen cantidades máximas de agua para el cultivo del arroz en la época lluviosa.

Otra consecuencia del fangueo es la lentitud de secamiento del suelo. El proceso de secamiento puede durar varios meses en suelos arcillosos fangueados en contraposición con suelos bien estructurados (Sánchez, 1973).

REDUCCION DEL SUELO

Debido a la ausencia de aire, tan pronto como se fanguea un suelo empieza el proceso de reducción del mismo (Brezcale y McGeorge, 1937). Los suelos fangueados permanecen reducidos indiferentemente de si están inundados o no hasta que comiencen a formarse grietas. En la sección que sigue se analizan las consecuencias químicas de la reducción del suelo que ocurren.

REGENERACION DE LA ESTRUCTURA

El fangueo no es un proceso irreversible. Se puede recobrar la estructura original por medio de mojado y secamiento alternos. El suelo fangueado debe secarse primero. Luego los agregados se forman nuevamente mediante mojado y secado alternos. La labranza a un contenido apropiado de humedad facilita este proceso. Los suelos altos en materia orgánica u óxidos de hierro y aluminio se regeneran más fácilmente que otros (Koenings, 1961, 1963; Sánchez, 1968).

CONSECUENCIAS QUIMICAS DE LA INUNDACION

Cuando un suelo se inunda su suministro de oxígeno baja a cero en menos de un día. La tasa de difusión del oxígeno atmosférico es 10.000 veces más lenta a través de capas de agua o poros llenos de

(*) En inglés "plow pans".

agua que a través del aire o de poros llenos de aire. Los microorganismos aeróbicos consumen en poco tiempo el oxígeno que queda y se quedan en reposo o mueren. Los microorganismos anaerobios o anaerobios potestativos se multiplican rápidamente y se hacen cargo del proceso de descomposición de la materia orgánica usando, en lugar de oxígeno, componentes oxidados del suelo como aceptantes de electrones. Estos productos son reducidos en la siguiente secuencia termodinámica: nitratos, compuestos mangánicos, compuestos férricos, productos intermedios de descomposición de materia orgánica, sulfatos y sulfitos. En el Cuadro 11.2 se presentan las reacciones principales. Mayores detalles pueden encontrarse en las monografías de Ponnampuram (1965, 1972).

CUADRO No. 11.2. Principales reacciones de reducción que ocurren en suelos inundados en una secuencia termodinámica aproximada. (Fuente: simplificado de Ponnampuram 1965, 1972).

Etapa	Eh ₇ (mV)	Reacción
0	+800	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$
1	+430	$2NO_3^- + 12H^+ + 10e^- \rightleftharpoons N_2 + 6H_2O$
2	+410	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$
3	+130	$Fe(OH)_3 + e^- \rightleftharpoons Fe(OH)_2 + OH^-$
4	-180	Acidos orgánicos (láctico, pirúvico) + $2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ alcoholes
5	-200	$SO_4^{2-} + H_2O + 2e^- \rightleftharpoons SO_3^{2-} + 2OH^-$
6	-490	$SO_3^{2-} + 3H_2O + 6e^- \rightleftharpoons S^{2-} + 6OH^-$

El resultado es que el suelo cambia de su estado oxidado al reducido. El potencial de oxidación-reducción (valores de Eh corregidos a pH 7) es un parámetro útil para medir la intensidad de la reducción del suelo y para identificar las reacciones predominantes que tienen lugar. El cambio de Eh en función del tiempo después de la inundación se ilustra en la Fig. 11.5. Los nitratos se tornan inestables con valores de Eh entre +400 y +300 mV y se desnitrifican. Después de que se consumen los nitratos, los microorganismos anaeróbicos reducen los compuestos Mn^{4+} a Mn^{2+} . Esto ocurre a valores de Eh alrededor de +200 mV. Sin embargo los compuestos mangánicos generalmente no abundan en los suelos; como sólo bacterias específicas los pueden reducir, su función es de poca importancia en la mayoría de los suelos.

Después de que los iones mangánicos se reducen, los iones Fe^{3+} se reducen a iones Fe^{2+} con una disminución correspondiente de Eh a cerca de +120 mV. Esta es quizás la más importante reacción de la

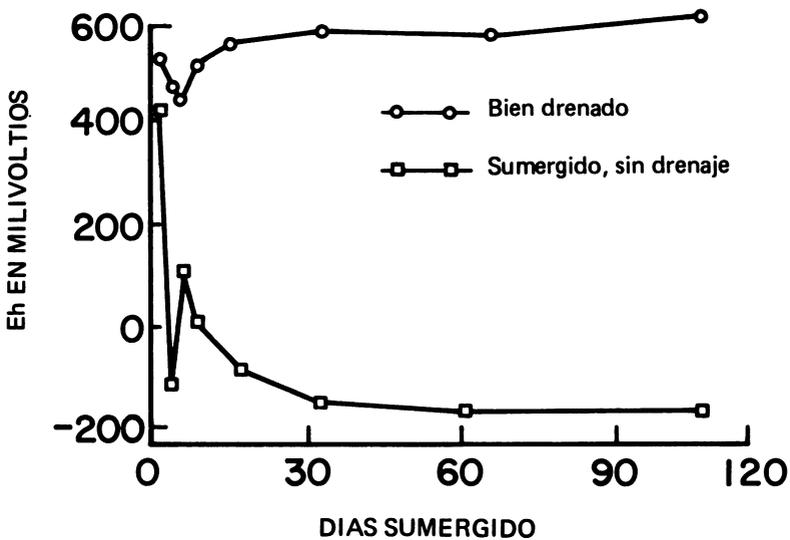


Fig. 11.5. Cambios con el tiempo en el potencial redox de un Inceptisol bien drenado y sumergido. (Fuente: Ponnampuruma, 1965).

reducción que tiene lugar en suelos inundados por cuanto los compuestos de hierro son generalmente más abundantes en los suelos que los nitratos, los hidróxidos mangánicos o los sulfatos.

Varios ácidos orgánicos, tales como el láctico y pirúvico, son reducidos a alcoholes a valores de Eh aproximados de -180 mV. Los iones de sulfato son reducidos a iones SO_3^{2-} y S^{2-} en potenciales de redox de aproximadamente -150 mV. Otras reacciones de reducción tienen lugar en suelos reducidos más intensivamente pero a valores de Eh que normalmente no se encuentran en suelos cultivados de arroz inundados.

La intensidad del proceso de reducción depende de la cantidad de materia orgánica fácilmente descomponible (el sustrato de los microorganismos), y de la temperatura del suelo. La Fig. 11.6 ilustra la disminución de Eh con el tiempo de sumersión, seguido por un nivel de equilibrio. Cuanto más alto sea el contenido de materia orgánica del suelo tanto más alta será la intensidad de la reducción. Las cantidades de sustancias reducidas pueden medirse como materia oxidable. En la mayoría de los suelos la concentración de sustancias reducidas alcanza un pico 2 a 4 semanas después de la inundación y disminuye gradualmente a un nivel de equilibrio (Ponnampuruma, 1965).

La reducción del suelo en sí no es perjudicial para el arroz, excepto posiblemente a potenciales mayores de -300 mV, cuando los sulfuros pueden llegar a niveles tóxicos (Patrick y Mahapatra, 1968).

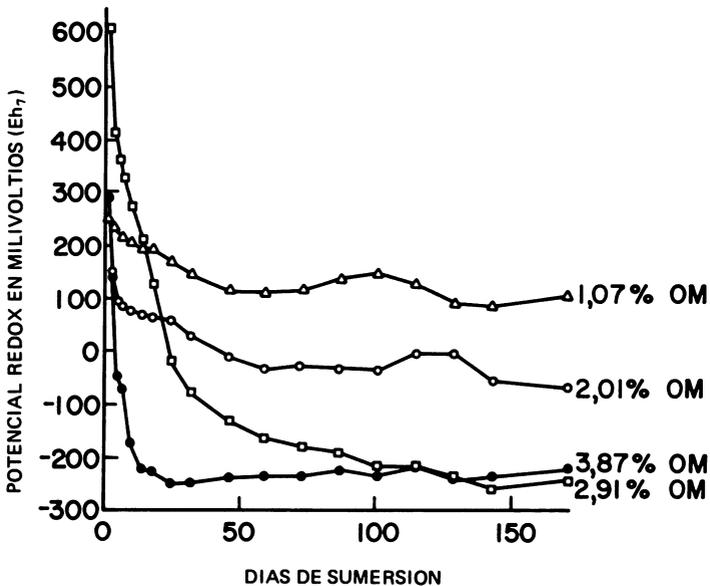


Fig. 11.6. Cambios en los potenciales redox de cuatro suelos de Filipinas con diferentes contenidos de materia orgánica cuando están sumergidos. (Fuente: Ponnamparuma, 1965).

El hierro ferroso $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$ es el producto inorgánico reducido más abundante; por consiguiente los valores de Eh se equilibran con los sistemas $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$ a cerca de +100 mV. Los valores de Eh suficientemente bajos para reducir sulfato pocas veces se obtienen excepto en suelos altos en materia orgánica y bajos en hierro.

Sin embargo, las consecuencias indirectas de la reducción del suelo son de importancia fundamental para el cultivo de arroz.

ZONAS OXIDADAS Y REDUCIDAS EN SUELOS INUNDADOS

El perfil de un suelo inundado no está completamente reducido. Existen varias zonas oxidadas en donde el proceso antes descrito no ocurre; esto se ilustra en la Fig. 11.7. Una capa superficial que varía de 1 mm a 1 cm de espesor permanece oxidada debido a que está en equilibrio con el oxígeno disuelto en la capa de agua. Esta capa se identifica fácilmente en campos de arroz inundado porque conserva el color aeróbico del suelo, mientras que la capa inferior reducida cambia al color típico grisáceo-azulado o negro del hierro reducido, excepto en la rizosfera de raíces activas, la cual está oxidada debido a

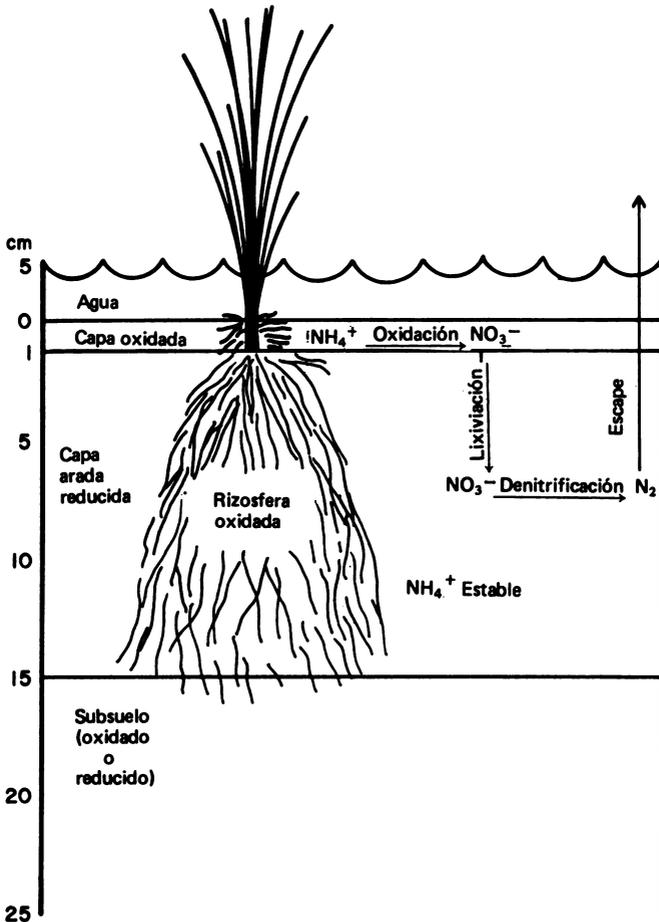


Fig. 11.7. Perfil redox y dinámica de nitrógeno en un suelo constantemente inundado. (Fuente: Sánchez, 1972a).

la exudación de compuestos oxidados por las raíces. Esto también se puede reconocer visualmente por la presencia de revestimientos amarillentos-rojos de las raíces, a causa de la precipitación de compuestos férricos en partes de la superficie de las raíces.

El subsuelo puede estar reducido u oxidado; esto depende de su contenido de materia orgánica y de la presencia o ausencia de una napa freática. La mayoría de los subsuelos inundados pueden estar ligeramente reducidos, pero en algunos casos el contenido de materia orgánica es demasiado bajo para que los microorganismos puedan efectuar la reducción del suelo. En caso de napas freáticas flotantes, el subsuelo puede permanecer oxidado si la inundación no tiene lugar debajo de la capa arada.

CAMBIOS EN pH

Indiferentemente del pH original la mayoría de los suelos alcanzan un pH de 6,5 a 7,2 dentro de un mes después de la inundación y permanecen con ese nivel hasta que se secan. La Fig. 11.8 muestra esta dramática consecuencia de la inundación en suelos con pH que va de 3,4 a 8,2, en su estado aeróbico. El efecto general de la sumersión es el aumento del pH en suelos ácidos y su disminución en suelos alcalinos. Estos cambios ocurren en función de la concentración de iones Fe^{2+} y de la presión parcial de CO_2 . El pH de suelos ácidos aumenta debido a la liberación de iones de OH^- cuando el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y compuestos similares se reducen a $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ó $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$. Otras reacciones de reducción descritas en el Cuadro 11.2 también muestran disminución en iones de H^+ o aumento e iones de OH^- con la reducción. El pH de suelos alcalinos disminuye a cerca de 7 debido al aumento de presión parcial del CO_2 que da por resultado una liberación neta de iones H^+ . En suelos alcalinos el efecto de la reducción es menos importante porque contienen poco hierro, mientras que en suelos ácidos el aumento de presión parcial del CO_2 es menos importante que la reducción de compuestos de hierro. En suelos neutrales, el pH cambia poco por cuanto estos dos factores tienden a equilibrarse mutuamente.

Las excepciones a esta generalización son raras. La Fig. 11.8 muestra una de las pocas registradas, un suelo ácido sulfatado con un pH aeróbico de 3,4 que sólo subió a 5,0. Este suelo resultó ser muy bajo en hierro (0,08% de Fe reducible), y no tenía manganeso reducible. Por lo tanto no se producía mucha reducción.

Esta consecuencia de la inundación equivale a una operación de autoencalamiento y da por resultado un ámbito óptimo de pH para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes. La toxicidad de

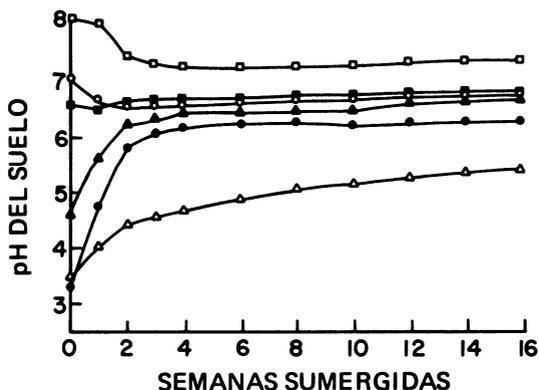


Fig. 11.8. Kinética de los valores de pH de algunos suelos sumergidos. (Fuente: Ponnamperuma, 1972).

aluminio se elimina rápidamente en suelos ácidos cuando éstos se inundan debido a que el aluminio intercambiable se precipita a pH 5,5. Por lo tanto el encalado es de poco valor en la producción de arroz inundado. Sin embargo conviene notar que este aumento de pH requiere alrededor de dos semanas de inundación. En algunos suelos ácidos sulfatados, el arroz puede morir por toxicidad de aluminio si se transplanta al principio de la inundación (Nhung y Ponnamperruma, 1966). Demorando el trasplante por 2 ó 3 semanas después de la inundación se puede eliminar este peligro sin necesidad de aplicaciones de cal.

TRANSFORMACIONES DEL NITROGENO

Después que el oxígeno se consume, todos los nitratos presentes en el suelo se desnitrifican y se pierden en la atmósfera. Se han registrado pérdidas del orden de 20 a 300 kg/ha de N durante el primer mes de la inundación. Se presentan valores altos cuando el movimiento ascendente de nitratos durante la estación seca da por resultado su acumulación en la capa arable y cuando se usan fuentes de fertilizantes que contienen nitrato. Esta reacción ocurre con mucha rapidez y es completa. En los suelos inundados no se acumulan nitritos (Ponnamperruma, 1955). Los brotes repentinos de mineralización de nitrógeno asociados con las primeras lluvias al principio de la estación lluviosa pueden perderse del todo cuando el suelo se inunda subsecuentemente.

Contrariamente a los nitratos, el ión amonio está en estado reducido y por lo tanto es estable bajo condiciones anaeróbicas. La mineralización del nitrógeno orgánico del suelo se detiene en el estado de amonificación. Por lo tanto los iones de NH_4^+ se acumulan en los suelos inundados ya sea como NH_4^+ intercambiable o en la solución del suelo. La Fig. 11.9 muestra la acumulación de NH_4^+ intercambiable y soluble en varios suelos de arroz. La magnitud de estos incrementos depende principalmente del contenido de materia orgánica del suelo, excepto en los Andepts, los cuales tienen tasas menores de mineralización; el suelo con 6,2% de materia orgánica en la Fig. 11.9 es un Andept. Cuando se cultiva arroz la acumulación de iones de NH_4^+ puede agotarse debido a la absorción de las plantas.

Una concentración alta de Fe^{2+} puede desplazar considerables cantidades de iones de NH_4^+ de los sitios de intercambio a la solución del suelo. Las pérdidas por lixiviación de iones de NH_4^+ son un mecanismo importante en suelos inundados que tienen movimiento considerable del agua (Patrick y Mahapatra, 1968).

La presencia de una delgada capa oxidada sobre la capa arable reducida tiene profundas consecuencias en la disponibilidad del nitrógeno. La nitrificación tiene lugar en la capa oxidada, superficial ya sea por la mineralización de la materia orgánica o por la adición de

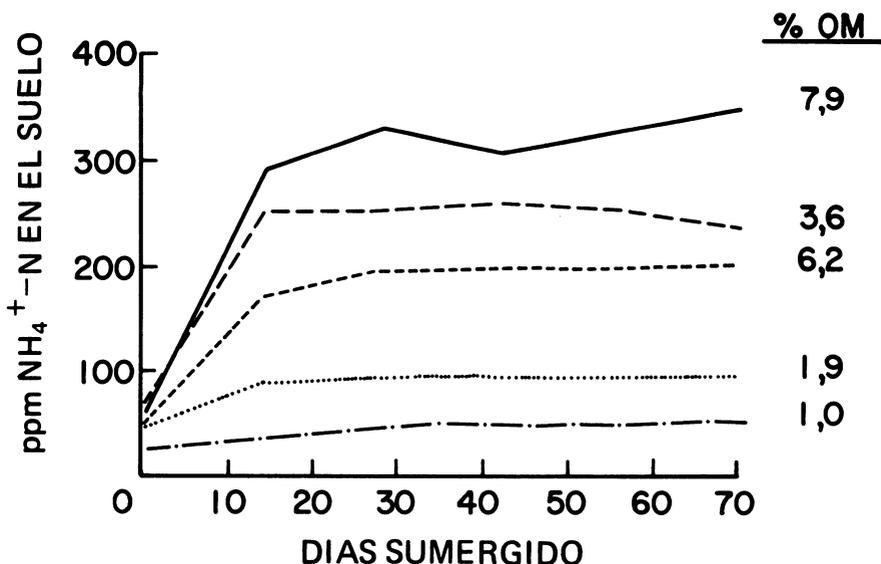


Fig. 11.9. Kinética de la liberación de NH_4 en seis suelos sumergidos. (Fuente: Ponnampuruma, 1965).

fuentes de fertilizantes que contienen amonio. Los iones de nitrato pueden movilizarse hacia abajo y entrar en la capa reducida, ya sea por difusión o por el movimiento descendente del agua. En la capa reducida ocurre desnitrificación rápidamente y los gases N_2 producidos escapan a la atmósfera; este mecanismo se aprecia en la Fig. 11.7. La consecuencia práctica es que las fuentes de amonio deben mezclarse en la capa reducida para evitar dicho problema y no aplicarlas al voleo sobre la superficie del suelo.

DESCOMPOSICION DE LA MATERIA ORGANICA

La descomposición de la materia orgánica avanza más lentamente en suelos inundados que en suelos aeróbicos. Las bacterias anaeróbicas involucradas son menos eficientes que la microflora aeróbica más diversificada. La descomposición anaeróbica se efectúa con niveles menores de energía, y por lo tanto requiere menos nitrógeno. En consecuencia la mineralización del nitrógeno del suelo puede efectuarse con razones C:N más altas en suelos inundados que en aeróbicos (DeDatta y Magnaye, 1969). Materiales orgánicos que no se mineralizan bajo condiciones aeróbicas pueden mineralizarse en suelos inundados. Esto ocurre en la paja de arroz, que tiene una razón C:N alta. A pesar de la tasa menor de mineralización del carbono orgánico, la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico con frecuencia es

más alta en suelos inundados que en los aeróbicos debido a la utilización de materiales con razón C:N más alta (Patrick y Mahapatra, 1968).

Los productos finales de la descomposición de la materia orgánica también son diferentes en los suelos inundados. Ponnampuruma (1972) señala que mientras que en un suelo normal bien drenado los productos finales son CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} y materiales humificados resistentes, en suelos inundados son CO_2 , NH_4^+ , metano, aminas, mercaptanos, H_2S y residuos parcialmente humificados. Las vías son similares en ambas condiciones hasta la formación de ácido pirúvico. En suelos inundados éstos y otros productos intermedios son aún reducidos más allá, hasta varios alcoholes y ácidos orgánicos, los que con el tiempo se reducen a CH_4 ó CO_2 por anaerobios.

Durante las primeras semanas de la inundación, se producen grandes cantidades de CO_2 , que van de 1 a 3 ton/ha. Los picos son seguidos por un descenso en la concentración de CO_2 , a causa de escape, lixiviación y precipitación como carbonatos insolubles. La presión parcial del CO_2 puede alcanzar niveles tóxicos, particularmente en suelos altos en materia orgánica y bajos en hierro.

TRANSFORMACIONES DEL MANGANESO Y EL HIERRO

La solubilidad del manganeso aumenta marcadamente con la inundación debido a la reducción de los compuestos de Mn^{4+} a la forma más soluble Mn^{2+} . La Fig. 11.10 muestra que en el suelo se presenta un pico de concentración de Mn^{2+} durante el primer mes seguido por un descenso gradual. Ponnampuruma (1972) atribuye este descenso a la precipitación de Mn^{2+} como MnCO_3 . Los suelos altos en manganeso reducible sufren los cambios más pronunciados a pesar de su pH o su nivel de materia orgánica originales. Los suelos ácidos altos en manganeso y materia orgánica desarrollan concentraciones pico de 90 ppm de Mn^{2+} en la solución del suelo, seguidas por un descenso y estabilización alrededor de 10 ppm. Suelos alcalinos o suelos bajos en manganeso pocas veces contienen más de 10 ppm de Mn^{2+} en la solución del suelo.

La mayoría de los suelos inundados contienen suficiente manganeso para el cultivo de arroz. No se conocen evidencias de toxicidad de manganeso en condiciones de inundación. La inundación elimina la toxicidad de manganeso en suelos ácidos aeróbicos porque la solubilidad de los compuestos de Mn^{4+} disminuye considerablemente cuando el pH sube a cerca de 7. La liberación de Mn^{2+} con la inundación aparentemente no es suficiente para alcanzar niveles tóxicos para el arroz.

Después de que los nitratos y los compuestos de manganeso se reducen, la solubilidad del hierro aumenta debido a la reducción de los compuestos de Fe^{3+} a compuestos de Fe^{2+} más solubles. Normal-

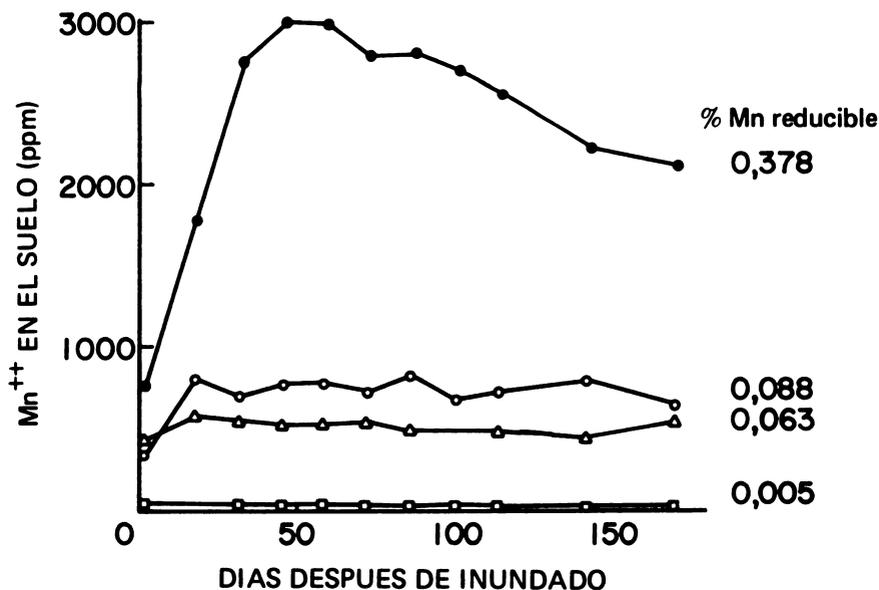


Fig. 11.10. Cambios en la concentración de Mn^{2+} en cuatro suelos con la inundación. (Fuente: Ponnamperuma, 1965).

mente se presenta un pico en la concentración de Fe^{2+} intercambiable y en la solución del suelo dentro del primer mes después de la inundación y es seguido por un descenso gradual. La magnitud e intensidad de estos picos varía considerablemente con las propiedades del suelo. La Fig. 11.11 muestra que los picos más pronunciados se presentan en suelos ácidos altos en materia orgánica. Estos son generalmente Oxisoles o Ultisoles con grandes cantidades de hierro reducible. Los suelos con pH alto muestran pequeños aumentos de Fe^{2+} debido a su menor contenido de hierro reducible. El porcentaje de hierro libre total reducido dentro de unas pocas semanas de inundación va del 5 al 50%. Más hierro se reduce cuando las formas oxidadas son menos cristalinas (Ponnamperuma, 1972). El color grisáceo de los suelos reducidos se atribuye al FeS , aunque también pueden estar presentes magnetita hidratada, $[Fe_3(OH)_8]$, silicatos ferrosos y vivianita.

La reducción del hierro es la reacción más importante que ocurre en suelos inundados porque éste eleva el pH, aumenta la disponibilidad de fósforo, y desplaza muchos cationes de los sitios de intercambio. El aumento de la concentración de Fe^{2+} generalmente es beneficiosa para el arroz en suelos alcalinos, llegando a 20 ppm en la solución del suelo, nivel que generalmente es suficiente para eliminar la deficiencia de hierro. Por otra parte, los aumentos en Fe^{2+} en Oxisoles y Ultisoles ácidos pueden alcanzar niveles alrededor de 350

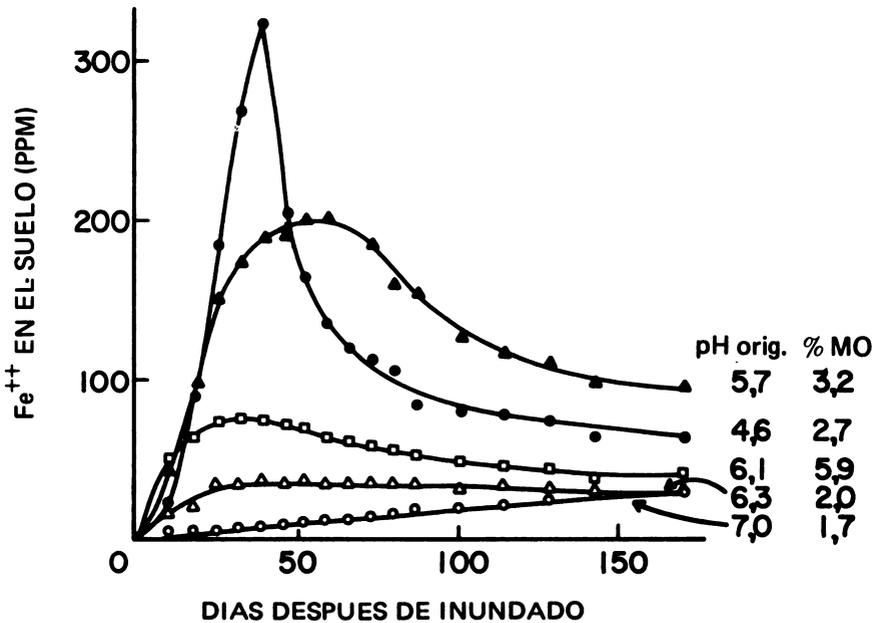


Fig. 11.11. Cambios en la concentración de Fe^{2+} en la solución de cinco suelos inundados. (Fuente: Ponnampuruma, 1965).

ppm de Fe^{2+} que pueden causar toxicidad de hierro al arroz. Aunque la toxicidad del hierro es común en estos suelos, se puede evitar por medio de drenaje y algunas veces atrasando el transplante hasta después de que haya pasado el pico de reducción.

Ni el hierro ni el manganeso pueden considerarse como micronutrientes en cultivo de arroz inundado. La planta de arroz asimila grandes cantidades de ambos elementos, con un promedio de 12 kg de Fe o Mn/ha, cantidad ligeramente menor que la absorción de fósforo (Tanaka et al, 1964). Además, Fe^{2+} y Mn^{2+} se tornan en los cationes intercambiables dominantes en suelos inundados y desplazan a Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+} al interior de la solución del suelo por acción de las masas. Los iones Fe^{2+} y Mn^{2+} en la solución del suelo pueden movilizarse hacia partes oxidadas del perfil del suelo, formando coprecipitados de Fe^{3+} y óxidos hidratados de Mn^{4+} en forma de manchas, nódulos o concreciones.

DISPONIBILIDAD DE FOSFORO

La concentración de fósforo en la solución del suelo aumenta con la inundación. Este aumento se debe: 1) a la reducción de fosfatos férricos a formas más solubles de fosfatos de hierro; 2) a la disponibi-

lidad de compuestos de fósforo solubles en reductores motivada por la disolución previa de las capas oxidadas que rodean las partículas de fosfatos; 3) a la hidrólisis de algunos fosfatos de hierro y aluminio en suelos ácidos, lo cual resulta en una liberación de parte del fósforo fijado a mayor pH del suelo; 4) al aumento de mineralización del fósforo orgánico en suelos ácidos a causa del aumento del pH a valores entre 6 y 7; 5) al aumento de solubilidad de la apatita en suelos calcáreos cuando el pH disminuye a 6 ó 7; y 6) a la mayor difusión de iones de H_2PO_4^- en un volumen mayor de solución del suelo (Ponnamperuma, 1972; Turner y Gilliam, 1976).

La Fig. 11.12 muestra que en algunos suelos no hay picos claros de concentración de fósforo en la solución del suelo, mientras que otros presentan un pico mensurable y un subsecuente descenso. Estos descensos se han atribuido a la refijación del fósforo de la solución del suelo como fosfatos de calcio (Patrick y Mahapatra, 1968; Ponnamperuma, 1972).

La importancia relativa de estos diversos mecanismos no está clara. Lo que sí está claro es que en la mayoría de los suelos hay un marcado aumento en el fósforo de la solución del suelo, más allá de 0,1 a 0,2 ppm, nivel que se considera adecuado para el cultivo de arroz (Hossner et al, 1973).

La magnitud de este fenómeno varía con las propiedades del suelo. Sería de esperar que fuera mayor en suelos altos en fosfatos férricos o en fosfatos solubles en reductores. Sin embargo los datos de Ponnamperuma en la Fig. 11.12 indican que los mayores aumentos tienen lugar en suelos arenosos bajos en hierro, mientras que en suelos arcillosos altos en hierro no hay aumentos grandes. Probablemente la razón para esta diferencia es el grado de cristalinidad de los compuestos de hierro, suponiendo que las formas de hierro más cristalinas y en consecuencia menos solubles están presentes en suelos arcillosos rojos.

Estos cambios se pueden detectar por medio de análisis de suelos cuando se toman las previsiones del caso para analizar el suelo en su estado reducido. La Fig. 11.13 muestra los efectos de la inundación en el fósforo disponible extraído por el método 2 de Bray poco después de tomadas las muestras. Los cambios fueron más marcados en el Inceptisol ácido que en el Vertisol o el Ultisol usados por Tusneem (1967).

La inundación también causa un cambio marcado en la distribución de las diversas fracciones de fósforo. Las fracciones soluble en reductores y Ca-P, disminuyen mientras que la fracción Fe-P aumenta. En la Fig. 11.14 Patrick y Mahapatra (1968) muestran este proceso en un suelo ácido. Resultados semejantes han sido observados en varios suelos filipinos por Tusneem (1967) y Singlachar y Samaniego (1973) y en un Mollisol del norte de India por Gupta et al (1972). El aumento en fósforo enlazado a hierro puede explicarse como precipitación del fósforo por el Fe^{3+} con el secamiento. Con subsecuentes

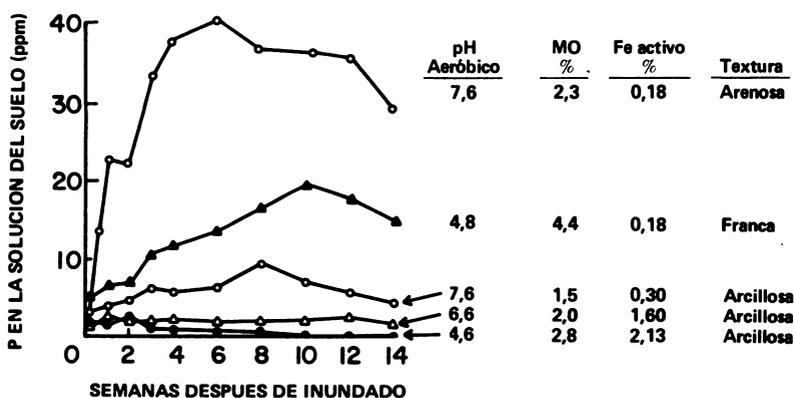


Fig. 11.12. Kinética del fósforo soluble en agua en algunos suelos sumergidos. (Fuente: Ponnampuruma, 1972).

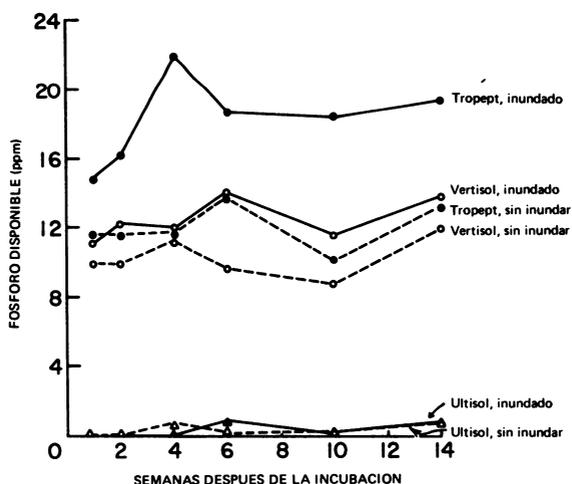


Fig. 11.13. Cambios en la disponibilidad del fósforo extraíble por el método Bray-2 en suelos sumergidos y no sumergidos. (Fuente: Tusneem, 1967).

inundaciones este Fe^{3+}P recién formado se reducirá a Fe^{2+}P . En suelos calcáreos el efecto de larga duración de la inundación será la transformación de Ca-P a Fe-P . Esto puede resultar en una disponibilidad menor de fósforo, no para el arroz inundado, sino para los cultivos aeróbicos que se plantan en rotación con el arroz debido a la baja solubilidad del Fe-P a niveles altos de pH en suelos calcáreos aeróbicos.

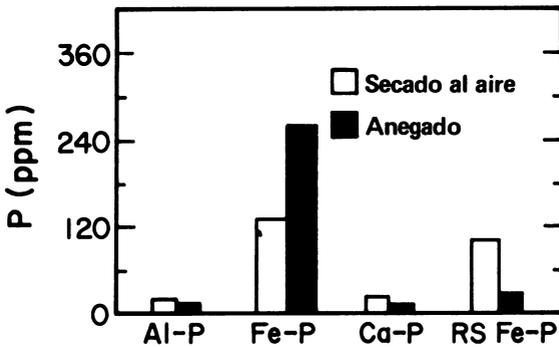


Fig. 11.14. Transformación del fosfato inorgánico de un Alfisol como resultado del anegamiento. (Fuente: Patrick y Mahapatra, 1968).

La inundación también altera el proceso de fijación del fósforo. Un informe sobre suelos aluviales arroceros en Louisiana, Estados Unidos, indica que bajo condiciones reducidas se adsorbió menos fósforo a concentraciones menores de 1 ppm de P en la solución del suelo, y más fósforo cuando la concentración era alta. Los resultados se presentan en la Fig. 11.15. Patrick y Khalid (1974) llegaron a la conclusión de que las diferencias en el patrón de fijación y liberación

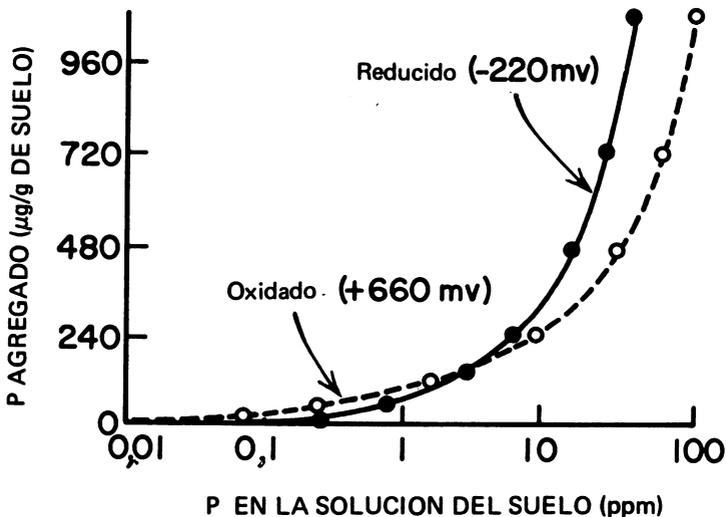


Fig. 11.15. Efecto de la inundación en la fijación de fósforo después de 24 horas de equilibración en un "Crowley" franco-limoso (Aqualf) de Louisiana. (Fuente: adaptado de Patrick y Khalid, 1974).

del fósforo bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas podían atribuirse a la reducción de oxihidróxido férrico a compuestos de hierro 2 similares a un gel con mayor área superficial. Todos los suelos en consideración tienen capacidad baja de fijación de fósforo. En Ultisoles y Oxisoles de alta fijación la magnitud de este fenómeno es probablemente diferente. Aunque no se dispone de evidencia directa, la falta de aumento marcado de fósforo soluble en agua o extraíble, al inundar tales suelos según observaron Ponnampereuma y otros, quiere decir que no hay disminución importante en la fijación de fósforo.

TRANSFORMACION DEL AZUFRE

A niveles muy intensos de reducción del suelo, los iones de sulfato se reducen a SO_3^{2-} y S^{2-} por medio de bacterias del género *Desulfovibrio*. Las relaciones entre estas formas oxidadas y reducidas de azufre se presentan en la Fig. 11.16. La magnitud de la reducción del sulfato depende de las propiedades del suelo. Los suelos ácidos presentan primero un aumento de SO_4^{2-} en la solución del suelo debido a la liberación de SO_4^{2-} adsorbido como aumentos de pH. Esto es seguido por una disminución lenta, y depende de la intensidad de la reducción del suelo. La disponibilidad de azufre como SO_4^{2-} y como SO_3^{2-} es la misma. Sin embargo, la disponibilidad de azufre disminuye con la formación de S^{2-} por cuanto éste se precipita mayormente como FeS . En suelos muy bajos en hierro se forma H_2S , que resulta en toxicidad directa para las plantas de arroz.

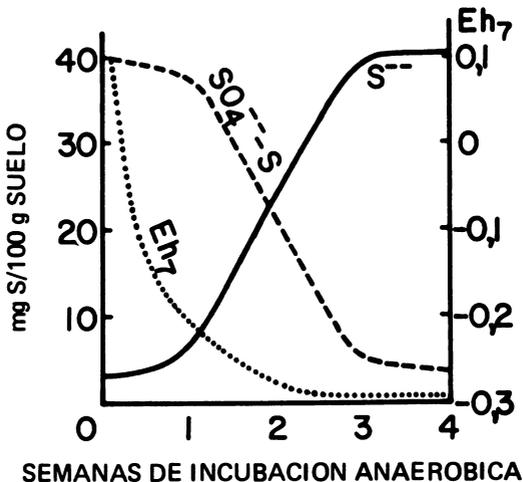


Fig. 11.16. Relación entre Eh y reducción de sulfato. (Fuente: Ponnampereuma, 1965).

CATIONES NO REDUCIBLES

Como K^+ , Ca^{2+} y Na^+ ya están reducidos no se afectan directamente con la reducción del suelo. Sin embargo, el aumento cabal en el volumen del agua de los suelos inundados puede acelerar la disolución de los compuestos sólidos de estos elementos. Las grandes cantidades de iones NH_4^+ , Fe^{2+} y Mn^{2+} liberados por la inundación pueden desplazar considerables cantidades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ de los sitios de intercambio a la solución del suelo. En el Cuadro 11.3 se presenta un ejemplo en que el aumento de K^+ en la solución del suelo está relacionado con aumentos de Fe^{2+} y Mn^{2+} . Consecuentemente estos iones se han vuelto más susceptibles a la lixiviación. Por otra parte, las aguas de inundación generalmente acarrean considerables cantidades de estas bases intercambiables que normalmente evitan las deficiencias de potasio en la mayoría de los suelos de arroz inundado.

CUADRO No. 11.3. Efectos de la inundación en la concentración de potasio en la solución del suelo de varios suelos de Filipinas (ppm). (Fuente: adaptado de Ponnamperuma, 1965).

Suelo (textura)	Solución del suelo $Fe^{2+} + Mn^{2+}$	K intercambiable	K^+ en solución del suelo	
			Antes de inundar	Pico en inundación
Arcilloso	342	165	2,3	7,9
Franco arcilloso	230	140	7,6	12,5
Franco arenoso	72	100	3,2	5,2
Arcilla	39	60	1,6	1,9

Las formas de boro, cobre, molibdeno y zinc que están presentes en los suelos inundados no sufren reacciones de oxidación y reducción; están indirectamente afectados por los cambios de pH, la reducción de hierro, y la producción de agentes orgánicos formadores de complejos. La sumersión prolongada reduce la disponibilidad de zinc, en parte debido a los aumentos de pH. Sin embargo el mecanismo completo no está bien comprendido (IRRI, 1970, 1971, 1972).

Se sabe que una interacción negativa fósforo-zinc similar a la que se observa en suelos aeróbicos tiene lugar en suelos arroceros (Patrick y Mikklesen, 1971). El resultado neto de la inundación es probablemente un aumento en la disponibilidad de boro, cobre y molibdeno (Patrick y Mikklesen, 1971; Ponnamperuma, 1972).

La concentración de sílice monomérico $[Si(OH)_4]$ en la solución del suelo aumenta ligeramente con la inundación y disminuye posteriormente. El aumento puede deberse a la liberación de silicio ocluido por reducción de óxidos de hierro y el efecto del CO_2 en los

silicatos de aluminio. Aunque el sílice es en la práctica un elemento esencial para la planta de arroz, y existen respuestas a la fertilización con sílice, estos cambios con la inundación no son de magnitud suficiente para que sean de importancia agronómica.

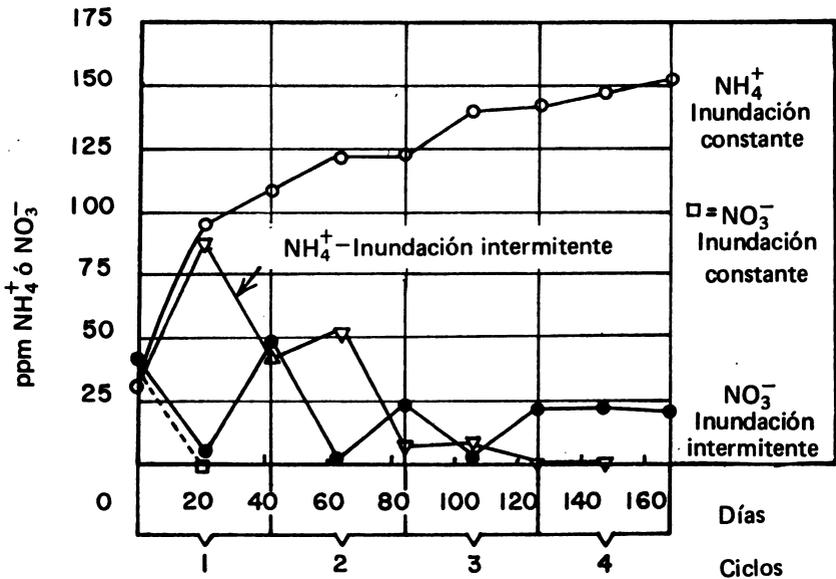
REVERSIBILIDAD

Todas las reacciones anteriores se reversan cuando un suelo inundado se seca y se reoxida. El nivel del pH vuelve a su valor original. La velocidad de la reoxidación depende de la tasa de las pérdidas de agua del suelo. En suelos arcillosos fangueados el proceso puede durar varios meses, mientras que en suelos bien agregados la reoxidación comienza pocos días después del drenaje.

INUNDACION INTERMITENTE

Las reacciones acabadas de describir son propias de sistemas constantemente inundados. En la práctica, sin embargo, más del 80% del área arrocería tropical raras veces está inundada permanentemente como se discutirá en la sección siguiente. Las pozas de arroz inundado que dependen de la lluvia pueden permanecer inundados durante todo el período de cultivo o estar inundados y secos alternativamente de acuerdo con la distribución de las lluvias. Muchos campos de arroz de secano están temporalmente inundados o anegados durante períodos de lluvias fuertes. El arroz flotante comienza como un sistema aeróbico y se torna anaeróbico en etapas posteriores. Aun en sistemas de inundación constante el proceso de preparación del suelo generalmente incluye inundación y secamiento alternos al principio. Por lo tanto los conceptos expresados en la sección precedente, requieren modificación cuando se aplican a un régimen particular de manejo de agua.

Las modificaciones más importantes son los cambios del nitrógeno bajo mojamiento y secamiento alternos, no sólo por su importancia en las prácticas de fertilización, sino también porque se presentan umbrales de nitrificación y desnitrificación con potenciales de redox relativamente altos. Bajo inundación constante los nitratos se pierden pronto y los iones de amonio se acumulan. Bajo inundación intermitente se desarrolla el siguiente ciclo: inmediatamente después de la inundación los nitratos desaparecen rápidamente y aumenta el contenido de NH_4^+ . Cuando el suelo se seca una porción de los iones de NH_4^+ se nitrifica a NO_3^- . En la próxima inundación estos iones de NO_3^- se pierden por desnitrificación o lixiviación. Los ciclos de inundación y secamiento alternos reflejan este patrón el cual resulta en grandes pérdidas de nitrógeno (Fig. 11.17). Patrick y Wyatt (1964) mostraron que las pérdidas son mayores durante el primer ciclo y después disminuyen progresivamente.



CICLOS DE ANEGAMIENTO Y SECADO AL HORNO

Fig. 11.17. Efectos de inundación constante e intermitente en la producción de NH₄⁺ y NO₃⁻ bajo condiciones de laboratorio. (Fuente: adaptado de datos de Patrick y Wyatt, 1964).

La influencia de la inundación intermitente en el comportamiento del fósforo y otras transformaciones de los nutrientes durante el crecimiento del cultivo no se han estudiado en detalle. Patrick y Mikklesen (1971) han sugerido sin embargo que la fijación de fósforo es más intensa y menos reversible bajo inundación intermitente que bajo inundación continua o condiciones aeróbicas continuas. Si el secamiento es de suficiente duración para que ocasione reoxidación, puede desarrollarse toxicidad de aluminio o manganeso en suelos que tienen un pH aeróbico bajo.

SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ

El arroz tropical se cultiva en una gran variedad de sistemas, que pueden agruparse en 5 principales, descritos en los Cuadros 11.4 y 11.5. Los términos seco e inundado o anegado que se usan muy a menudo se refieren a sistemas particulares de cultivo y no a topografía o elevación. Por ejemplo el arroz anegado ("lowland") se cultiva en Filipinas a 2000 m de altura, y arroz de seco (upland) a nivel del mar en toda la costa del Pacífico de América Central. El término

CUADRO No. 11.4. Extensión y distribución del cultivo de arroz en los trópicos. (Fuente: FAO (1970), CIAT (1972) y fuentes sin publicar).

Extensión y distribución de áreas	Asia tropical	América tropical	África tropical	Total
Producción (millones de ton)	153	11	5	169
Rendimiento en granos (Ton/Ha)	1,81	1,84	1,43	1,80
Area sembrada (millones de Ha)	84	6	3	94
Distribución superficial (estimaciones burdas) (%)				
Inundado (sin riego)	50	0	20	46
Inundado (con irrigación)	20	4	18	19
Secano	20	75	72	25
Flotante (agua profunda)	10	0	—	9
Irrigado (sembrado directamente)	—	21	—	1

CUADRO No. 11.5. Componentes principales de los sistemas de cultivo de arroz.

Sistema de cultivo	Suministro de agua	Preparación del suelo	Establecimiento del cultivo	Humedad del campo	Localidad
Inundado (sin riego)	Lluvia	Fangueo	Transplante	Inundación intermitente	Filipinas
Inundado con riego	Irrigación	Fangueo	Transplante	Inundación constante	Filipinas
Secano	Lluvia	Seco, sin diques	Siembra directa	Principalmente sin inundar	Brasil
Flotante	Lluvia e inundación	Seco, sin diques	Siembra directa	Inundado 5-400 cm de profundidad	Tailandia
Siembra directa, inundado	Irrigación	Seco, con diques	Siembra directa	Inundación constante	Nicaragua

“paddy rice” es esencialmente sinónimo de arroz anegado. Seguidamente se hace una descripción de los cinco principales sistemas de cultivo de arroz.

SISTEMAS INUNDADOS (ANEGADO, “PADDY”)

El arroz inundado cubre alrededor del 65% del área total arrocera de los trópicos. El sistema irrigado considerado como el estereotipo típico de la producción de arroz sólo existe en el 19% del área total arrocera de los trópicos. En los climas monsonícos ústicos del sureste de Asia el proceso comienza después de la llegada de las primeras

lluvias fuertes que marcan el final de la estación seca. Campos pequeños, generalmente menores de 1 ha, y a menudo más pequeños se rodean con diques para atrapar tanta lluvia como sea posible. Después de que el suelo se satura con agua por varios días, estas pozas se aran con herramientas tiradas por animales o tractores pequeños para incorporar los rastros y las hierbas. En un espacio pequeño y bien cuidado se preparan los semilleros atendidos por un miembro de la familia. Hay dos tipos comunes de semilleros o almácigos: el convencional, en el que semillas pregerminadas se siembran directamente en el suelo a razón de 1 a 2 toneladas de semillas por hectárea, o el sistema "dapog" en que se evita que las semillas entren en contacto directo con el suelo, por medio de una capa de hojas de banano, lámina plástica u otra clase de barrera y se siembran con una densidad cinco veces mayor. En ambos casos el nivel del agua se controla cuidadosamente. Los semilleros convencionales se arrancan para el trasplante de 15 a 30 días después de sembradas, mientras que en el sistema "dapog" las plántulas tienen que transplantarse de 8 a 12 días después de la siembra, ya que para entonces las reservas de nutrimentos en las semillas comienzan a agotarse.

Mientras las plántulas crecen en los semilleros los campos principales se fanguen por medio de varias operaciones de rastreado que se efectúan con contenidos de humedad de suelo progresivamente menores hasta que la capa arable se convierta en un barro uniforme. Se hacen aplicaciones basales de fertilizantes al voleo y se mezclan con el suelo durante la última operación del fanguero. Los campos se nivelan por medio del agua durante este proceso y el barro extra se emplea para reparar los diques o bordos. Las plántulas de arroz se transplantan en "golpes" de 3 a 6 plántulas con espaciamientos que varían de 20 x 20 a 50 x 50 cm. Después de unos cuantos días sin inundar, el nivel del agua se eleva 5 ó 10 cm sobre la superficie del suelo al iniciarse la etapa de macollamiento o sea, la formación de tallos secundarios. El arroz se cosecha de 100 a 150 días después de la siembra, generalmente a mano. El manejo de los residuos es muy variable. Puede haber un segundo y hasta un tercer cultivo durante el año, siempre que haya disponibilidad de agua de riego durante la estación seca. Alrededor de la mitad del área inundada del sureste de Asia es de dos cosechas. Estas áreas representan el 25% de la producción de arroz de Asia tropical (Barker, 1972). La mayoría de las nuevas variedades de porte bajo se cultivan siguiendo este sistema. Además el grueso de las investigaciones en arroz se han llevado a cabo en campos anegados.

SISTEMA INUNDADO SIN RIEGO

El sistema inundado sin riego es semejante al anterior, excepto la falta de control del agua. Este es el sistema principal en los trópicos y ocupa el 46% del área total. El depender del agua de lluvia significa que la programación de las operaciones está supeditada a grandes

variaciones, ya que la variabilidad de la precipitación durante la estación lluviosa es por lo general grande. En un estudio de fincas que dependen de la lluvia, en Luzón Central, Filipinas, Johnson (IRRI, 1966) encontró que la mayoría de los agricultores no comienzan la preparación del terreno sino hasta dos meses después de iniciada la estación lluviosa, cuando las lluvias son más confiables. Después del trasplante el cultivo puede sufrir por falta de agua en varias etapas del crecimiento, de acuerdo con el patrón de pluviosidad. En regímenes ústicos en que se depende de la lluvia solamente un cultivo por año es posible. Una situación semejante se encuentra en algunas áreas irrigadas de América Latina en donde los sistemas de riego son muy deficientes y con frecuencia puede haber falta de agua. El régimen de humedad del suelo, a diferencia del de arroz inundado, es de inundación intermitente. Poca investigación se ha llevado a cabo sobre sistemas de inundación intermitente.

ARROZ DE SECANO

El arroz se secano (términos equivalentes: “upland rice”, “arroz de sequeiro”, “riz pluvial”) es un sistema en que el arroz se planta como cualquier otro cultivo, sin preparación de tierra mojada, trasplante, o diques alrededor de los campos. Aproximadamente el 25% del arroz del mundo tropical se cultiva en secano. Este sistema se caracteriza por una preparación convencional de la tierra, siembra directa en suelo seco, y dependencia completa de la lluvia para el suministro de agua. El arroz de secano se cultiva durante estaciones con un promedio de por lo menos 150 mm de lluvia por mes. La mayoría de los suelos que se usan son arcillosos; algunos de ellos tienen drenaje deficiente, pero muchos otros, como en la parte central de Brasil, son bien drenados. El arroz de secano es la forma predominante de cultivo en América y África tropical. Representa el 72% del área total en arroz en África tropical, y el 75% en América tropical.

El arroz de secano se cultiva bajo un amplio ámbito de intensidades, incluyendo agricultura migratoria en la cuenca amazónica, gran parte de África y las montañas del sureste de Asia. También se cultiva en pequeñas fincas de subsistencia en todos los trópicos, y en gran escala, casi completamente mecanizado en fincas del centro de Brasil situadas en terrenos ondulados.

Casi universalmente, los rendimientos del arroz de secano son más bajos que los de arroz inundado. Probablemente la falta de agua y la falta de investigación sobre este sistema, constituyen las principales razones por las cuales los rendimientos son menores.

ARROZ FLOTANTE

En algunas partes de las llanuras inundables del Mekon, Chao Phya, Irrawaddy y el Ganges, en Asia, se ha desarrollado un sistema

único de cultivos de arroz. El arroz se siembra al voleo en tierra seca labrada al comienzo de la estación lluviosa. Después de la llegada de las lluvias fuertes, estos campos se inundan a profundidades de 50 cm a 4 m. Las variedades adaptadas a estas condiciones continúan elongándose conforme el agua sube. A menudo es necesario hacer la cosecha en canoas. Los rendimientos son considerablemente más bajos que los de arroz inundado. Se han hecho avances significativos en la investigación, especialmente en Tailandia, los cuales pueden dar por resultado en aumentos del potencial de rendimiento de este sistema. El arroz flotante representa el 9% del total del área arroceras tropical. Sistemas parecidos ocurren también en América Latina, en la cuenca del Guayas, en Ecuador, y en los "barriales", en las márgenes del río Amazonas en el Perú.

SISTEMA IRRIGADO CON SIEMBRA DIRECTA

Este es el sistema más mecanizado desarrollado, en primer lugar, en Estados Unidos y Australia, y puesto en práctica en áreas arroceras más desarrolladas de los trópicos, principalmente en América Latina. Las pozas son grandes, por lo general bien niveladas y rodeadas por diques. La preparación del terreno es mecanizada y en seco. Semillas pregerminadas se distribuyen al voleo sobre el agua estancada por medio de avionetas o se siembran dentro del suelo seco usando sembradoras mecánicas. El control del agua es exacto; la inundación se mantiene desde 20 días después de la siembra hasta 20 días antes de la cosecha. Por medio de avionetas se aplica nitrógeno más los herbicidas e insecticidas necesarios. La cosecha se hace con cosechadoras mecánicas. Los rendimientos son altos y la investigación local generalmente es suficiente. Este sistema sólo se aplica en el 1% del área arroceras tropical. Como ejemplos, pueden citarse el Valle de Piura, en Perú, y algunas partes de Nicaragua y Cuba.

MANEJO DEL AGUA

ADAPTACION DE LA PLANTA DE ARROZ A LA INUNDACION

El arroz es uno de los pocos cultivos capaces de crecer en condiciones de anegamiento debido a su habilidad para oxidar su propia rizosfera. El oxígeno se difunde de las hojas, por vía de las macollas a las raíces a través de pequeñas aberturas y canales en sus tejidos. No se sabe en qué forma llega el oxígeno a los tejidos meristemáticos carentes de canales. Sin embargo, este mecanismo es suficiente no sólo para satisfacer la necesidad de oxígeno para la respiración de las células radicales sino también para secretar oxígeno o componentes oxidados al interior de la rizosfera (Alberda, 1953; Ponnampuruma, 1965; Luxmoore y Stolzy, 1972). Muchas otras plantas de pantano

también poseen este mecanismo, mientras que otras pueden respirar anaeróbicamente.

Otros cultivos tropicales tienen la capacidad de oxidar su rizosfera cuando están inundados pero la diferencia es de grado. Por ejemplo, Yoshida (1967) midió la capacidad de oxidación radicular de especies comunes en términos de la cantidad de naftilamina oxidada por gramo de raíz durante 2 días de inundación. Los resultados, presentados en el Cuadro 11.6 muestran que el poder oxidante de las raíces del arroz es de un orden de mayor magnitud que el de otros cultivos comunes. Este cuadro también explica por qué el sorgo tolera inundación temporal mejor que el maíz.

CUADRO No. 11.6. Poder relativo de oxidación de raíces de varios cultivos bajo condiciones de inundación. (Fuente: Yoshida, 1964).

Cultivo	Naftilamina oxidada en 48 hrs (mg/g raíz seca)
Arroz	15–30
Soya	7,1
Trigo	4,9
Sorgo	4,0
Avena	2,9
Maíz	1,4

El poder oxidante de las raíces de arroz depende de varios factores. Yoshida observó diferencias considerables entre variedades. También encontró que el poder oxidante es mayor en etapas tempranas del crecimiento y que éste aumenta con la radiación solar y disminuye cuando la planta tiene deficiencia de nitrógeno, fósforo o potasio, pero no de calcio, magnesio o sílice (IRRI, 1966).

Como resultado de la exudación de compuestos oxidados las raíces de arroz se revisten de una capa rojo-amarillenta de composición desconocida. Se supone que están formadas por óxidos e hidróxidos férricos y mangánicos. No se forman alrededor de los meristemas radiculares activos, los que permanecen de color blanco. No se conoce la función de estos revestimientos de la raíz en la absorción de iones y de agua.

REQUERIMIENTO DE AGUA PARA EL CULTIVO DEL ARROZ

La necesidad de agua de plantas de arroz no se diferencia de la de otros cultivos importantes. La tasa de transpiración del arroz (400 g

H₂O/g de materia seca) es similar a la de otros cultivos (Sánchez, 1968). Sin embargo el consumo total de agua de sistemas de arroz inundado oscila entre 6 a 16 mm/día, con un promedio de 9 mm/día del transplante a la cosecha (IRRI, 1963). Esto representa aproximadamente 1000 mm para un cultivo de arroz de 4 meses. Estas cifras son considerablemente más altas que las de la mayoría de otros cultivos, que tienen un promedio cercano a 5 mm/día o 600 mm en 4 meses, según Kelley (1954). Un 25 a 30% adicional también se usa en el proceso de preparación de la tierra y el fanguero disminuyendo aún más el uso eficiente del agua en sistemas de arroz inundado.

En los sistemas de arroz inundado el agua se consume por evaporación, transpiración, percolación vertical y lateral. Los valores promedios de campos de arroz inundados constantemente en el sureste de Asia, aparecen en el Cuadro 11.7, con base en un reconocimiento de King et al, (1965). La mayor parte de las pérdidas por percolación son laterales por cuanto el fanguero disminuye la percolación descendente (IRRI, 1965).

CUADRO No. 11.7. Cifras promedio de consumo de agua en suelos inundados del sureste de Asia. (Fuente: Kung et al, 1965).

Uso	Consumo por cosecha (mm H ₂ O)
Preparación del suelo	240
Evaporación	180-380
Transpiración	200-550
Percolación y escape	<u>200-700</u>
Total	800-1200

SUSCEPTIBILIDAD A LA ESCASEZ DE AGUA

La razón por la cual el arroz requiere más agua que otros cultivos a pesar de una tasa similar de transpiración es su susceptibilidad a la escasez de agua. Jana y DeDatta (1971) observaron que el arroz sufre de escasez de humedad cuando la tensión de humedad del suelo es tan baja como de 0,3 bares y que el llamado ámbito de humedad disponible para el arroz puede estar entre el anegamiento y la capacidad de campo y no entre 0,3 y 15 bares como en otros cultivos. Lal y Moomaw (1972) también mostraron esta relación tanto con una variedad mejorada de porte bajo (IR8), como con una variedad tradicional de secano de Nigeria; los resultados de estos investigadores aparecen en la Fig. 11.18. Además, algunas veces se observaron síntomas de marchitamiento bajo condiciones de anegamiento, en días

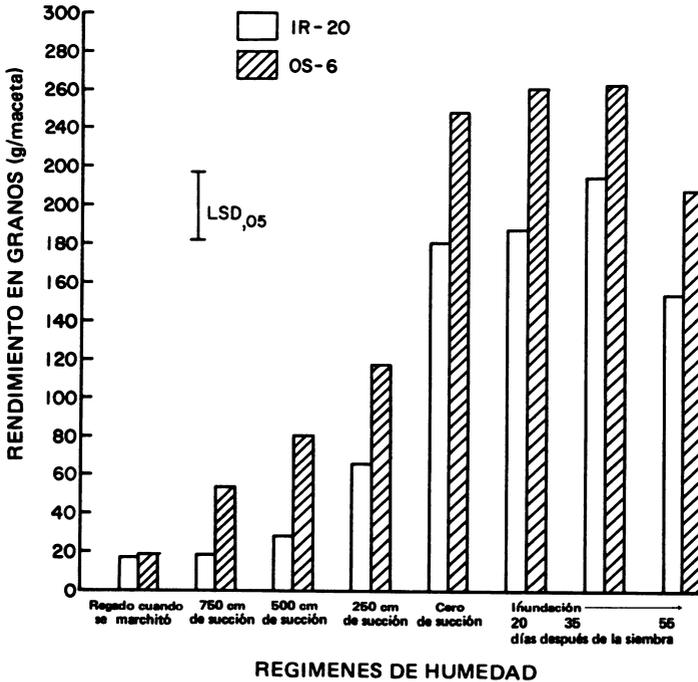


Fig. 11.18. Efecto del régimen de humedad del suelo en el rendimiento de granos de las variedades de arroz IR20 y OS-60. (Fuente: Lal y Moomaw, 1972).

calurosos y asoleados, indicando que la tasa de transpiración excedía a la absorción de agua.

Las razones por las que el arroz es tan susceptible a la escasez de agua no están bien comprendidas. El arroz tiene un sistema radicular bastante superficial, generalmente con una profundidad no mayor de 20 cm. La gran cantidad de vacíos llenos de aire en las raíces probablemente retardan la traslocación de agua. Estos cambios posiblemente reflejan el resultado de la evolución del cultivo bajo condiciones de inundación en la que no hay necesidad de un enraizamiento profundo o un mecanismo eficiente de absorción de agua.

Las etapas más críticas de susceptibilidad a la escasez de agua son desde la iniciación del primordio de la panícula hasta la floración. Estas son también las etapas en las que la demanda de agua es mayor. El Cuadro 11.8 muestra los resultados de un experimento llevado a cabo en Filipinas durante la estación seca, en que se aplicó escasez de agua en varias etapas de crecimiento. Estos y otros datos semejantes indican que una escasez severa de agua en cualquier período de crecimiento puede reducir considerablemente los rendimientos.

CUADRO No. 11.8. Rendimiento de granos y consumo de agua por la variedad de arroz IR8 con diferentes prácticas de manejo de agua en Los Baños, Filipinas.* (Fuente: DeDatta et al, 1973a).

Transplante	Macollaje máximo	Iniciación de panículas	Floración	Madurez	Rendimiento de gramos (ton/ha)	Uso de agua (mm)
I				→	7,16	1147
E	→ I			→	5,84	1435
E		→ I		→	4,68	1438
E			→ I	→	3,75	1121
Riego a escasez visual de agua					1,84	432
I	→ E		→ I	→	6,31	1178
I		→ E		→	5,87	730
I			→ E	→	6,09	904

(*) I = inundado a 2,5 cm; E = escasez de agua (0,5 bares).

DIFERENCIAS VARIETALES EN TOLERANCIA A LA ESCASEZ DEL AGUA

Entre las variedades de arroz se presentan diferencias en el grado de susceptibilidad a la escasez del agua. Las variedades desarrolladas para el sistema de secano por lo general se consideran más tolerantes a la escasez de agua que las desarrolladas para sistemas inundados. Sin embargo este concepto ha sido desafiado por nuevos resultados de Filipinas, Senegal y Perú. Chang et al, (1972) compararon 25 variedades de secano y de inundación, y encontraron que las variedades de secano africanas y asiáticas tienen poca capacidad de macollaje, deficiente vigor de crecimiento inicial y hojas largas pendientes que generalmente se enrollan cuando comienza la escasez de agua. Una tolerancia moderadamente buena a la sequía se encuentra en algunas variedades que tienen raíces gruesas y profundas y baja relación: follaje y raíz cuando ocurre la escasez de agua; dichas variedades, sin embargo, tienen baja capacidad inherente de rendimiento debido al limitado número de panículas por unidad de superficie.

Algunas variedades de inundación tienen un grado parecido de tolerancia a la sequía, pero con un potencial de rendimiento mucho más alto debido al mejor tipo de planta y a la mayor capacidad de macollaje (Nicou et al, 1970; Chang et al, 1972). Algunas de las variedades o selecciones del IRRI tienen estas propiedades: IR4, IR5, IR20, y IR442. En la selva del Perú, IR4-2, que es una variedad de inundación sobrepasó consistentemente el rendimiento de Carolina, la variedad local de secano durante un período de prueba de 18 meses (Kawano et al, 1972; Sánchez, 1972). Los rendimientos de estas dos variedades se correlacionaron con la precipitación pluvial

durante el período de crecimiento, pero indiferentemente del régimen de lluvias, IR4-2, de porte bajo consistentemente, duplicó el rendimiento de la variedad tradicional de secano. La Fig. 3.12 presenta esta relación. En las Filipinas DeDatta et al, (1973b) también ha mostrado que IR20 sobrepasa el rendimiento de la variedad tradicional de secano MI-48 con varios niveles de tensión de la humedad del suelo (Fig. 11.19). Por lo tanto, es evidente de que el nuevo tipo de planta desarrollado para condiciones de anegamiento puede aplicarse a condiciones de secano cuando se combina con tolerancia a la escasez de agua. Este concepto está sin embargo, mal cuantificado y su significado no está claro. DeDatta y Beachell (1972) han sugerido que más que tolerancia a escasez prolongada, puede ser más importante la habilidad para recuperarse de períodos de escasez relativamente cortos. Otros factores, como control de malezas y tolerancia a insectos y enfermedades también son de importancia al seleccionar variedades para condiciones de secano (DeDatta et al, 1973).

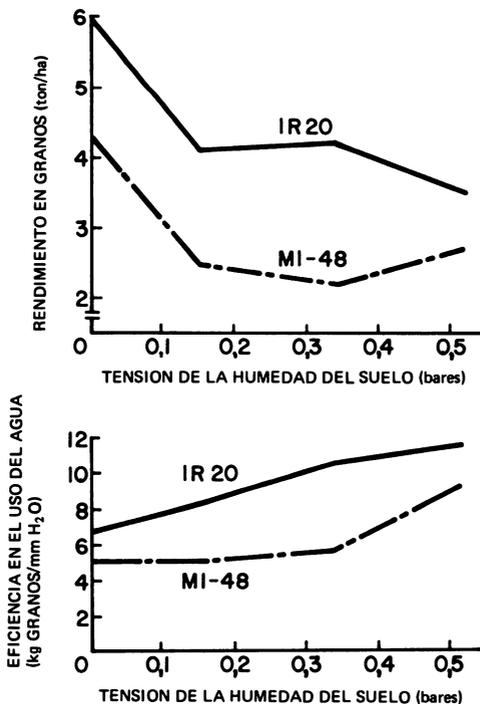


Fig. 11.19. Rendimiento en granos y eficiencia del uso del agua afectados por la tensión de la humedad del suelo en el momento de la irrigación de dos variedades de arroz, una de secano (MI48) y una de inundación (IR20) en un Mollisol arcilloso de los Baños, Filipinas. (Fuente: DeDatta et al, 1973b).

¿ES EL ANEGAMIENTO NECESARIO PARA RENDIMIENTOS ALTOS?

El arroz generalmente produce mejor bajo condiciones de inundación que de secano. Esta afirmación tiene el apoyo de amplia evidencia empírica, aunque algunas veces se obtienen rendimientos muy altos en arroz de secano. El suelo anegado es generalmente un mejor medio para el cultivo del arroz porque: 1) se elimina la escasez de agua; 2) el control de malezas es más fácil; y 3) la disponibilidad de algunos nutrimentos, particularmente fósforo, aumenta conforme el pH se aproxima a la neutralidad. Muchas publicaciones enfatizan la importancia de uno de estos factores sobre los otros dos, con evidencia que sirve de soporte a su afirmación. La abundante y conflictiva literatura sobre este tema ha sido revisada periódicamente por Ponnampetuma (1955), Nojima (1963) y Sánchez (1968).

En la opinión de este autor los tres factores contribuyen a rendimientos más altos y la importancia relativa de cada uno depende de las condiciones locales. Como el arroz es bastante susceptible a la escasez de agua, la eliminación de esta limitación es probablemente el factor más generalizado. Los rendimientos mayores que ocasionalmente se obtienen con arroz de secano (en el orden de 6 a 7 ton/ha), han sido en áreas con napas freáticas altas y suficiente precipitación pluvial para evitar fuerte escasez de agua (DeDatta y Beachell, 1972).

La inundación realmente facilita el control de malezas por cuanto elimina las malas hierbas aeróbicas y aumenta la efectividad de varios yerbicidas en el control de las malezas acuáticas. Sin embargo, hay otros métodos igualmente efectivos en el control de malas hierbas, aunque pocas veces tan baratos. La saturación de la superficie del suelo con agua debería ser suficiente para eliminar la escasez de agua y dar lugar a la reducción del suelo. Bajo condiciones controladas se obtienen rendimientos similares de arroz en suelos saturados o inundados. Sin embargo bajo condiciones reales de campo la saturación no es práctica porque es difícil de mantener y porque aumenta drásticamente el desarrollo de las malas hierbas.

Los beneficios químicos del anegamiento son de gran importancia práctica para el arroz en ciertos suelos, no tienen importancia en otros, y son extremadamente perjudiciales en un tercer grupo. En algunos suelos ácidos, particularmente Oxisoles, Ultisoles e Inceptisoles, la inundación elimina la toxicidad de aluminio y manganeso y en algunos casos incrementa la disponibilidad de fósforo (IRRI, 1970). Aunque el encalado y la aplicación de fósforo puede producir el mismo efecto éste se logra sin costo adicional. La inundación de suelos salinos también disminuye la conductividad eléctrica y provoca la lixiviación de sales. Aunque el arroz es relativamente susceptible a la salinidad, el efecto de dilución del anegamiento permite que crezca en suelos donde otros cultivos no crecen, y al mismo tiempo ayuda a la recuperación del suelo por medio de una lixiviación más

rápida (Pearson y Ayres, 1960). El anegamiento en suelos calcáreos aumenta la disponibilidad de hierro. lo que a menudo da por resultado aumentos marcados de rendimiento (Ponnamperuma, 1965). En muchos suelos anegados de origen reciente, principalmente Entisoles, Inceptisoles, Alfisoles, Vertisoles y Molisoles con pH aeróbico entre 6 y 7, la inundación no tiene efecto en la disponibilidad de nutrimentos. Cuando se elimina la escasez de agua y las malezas no hay diferencia en el rendimiento de tales suelos debidas a la inundación.

La inundación causa efectos dañinos en ciertos suelos en que los productos de la reducción pueden acumularse en cantidades tóxicas. En ciertos Oxisoles y familias oxídicas la toxicidad del hierro puede matar las plantas o disminuir drásticamente el rendimiento. En algunos suelos arenosos altos en materia orgánica y bajos en hierro, la concentración de ácidos orgánicos o de sulfuro de hidrógeno puede también alcanzar niveles tóxicos. En tales casos la única solución práctica es drenar el suelo durante períodos cortos.

En resumen, se puede asegurar que la inundación generalmente contribuye a la obtención de rendimientos mayores debido a la eliminación de la escasez de agua y a la disminución de la infestación de malezas en la mayoría de los suelos, pero el mejoramiento de las condiciones químicas ocurre sólo en ciertos casos.

¿ES EL FANGUEO NECESARIO PARA RENDIMIENTOS ALTOS?

La principal contribución del fangueo es la disminución de las pérdidas de agua, y no el aumento de disponibilidad de nutrimentos en sí (Sánchez, 1973). Sin embargo, el fangueo puede aumentar indirectamente la disponibilidad de nutrimentos por medio de la disminución de pérdidas por lixiviación de iones tales como NH_4^+ ; La Fig. 11.20 presenta las diferencias en consumo de agua entre Mollisol fangueado y sin fanguear, y el aumento de rendimiento debido a la disminución de la percolación. Por consiguiente, el fangueo es generalmente beneficioso para el arroz en suelos expuestos a pérdidas por lixiviación en sistemas de arroz inundado. Esta generalización es de particular importancia en suelos arenosos y Oxisoles y Andepts bien agregados, en los que el fangueo es a menudo esencial para el anegamiento de tales suelos. En el otro extremo el fangueo tiene probablemente poca importancia en suelos que tienen una capa impermeable en el subsuelo o una capa freática constantemente alta, o en suelos sódicos que ya están dispersos. En la mayoría de los suelos el fangueo ayuda a disminuir las pérdidas por percolación.

Sin embargo el fangueo es una espada de doble filo en sistemas que dependen de las lluvias para mantenerse inundados. En la mayoría de los casos el fangueo atenúa los aumentos de tensión de la humedad del suelo durante las sequías temporales y aumenta los rendimientos.

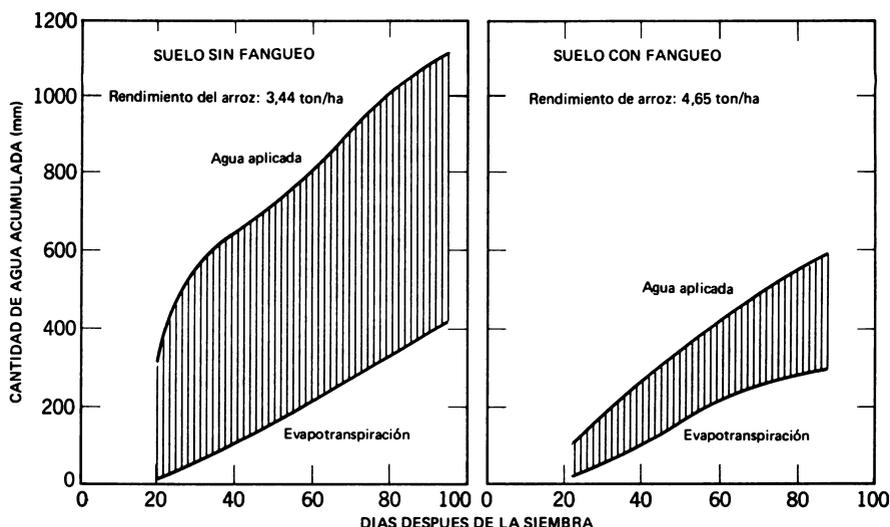


Fig. 11.20. Comparación del agua acumulativa aplicada, y pérdidas por evapotranspiración y percolación en un Inceptisol arcilloso con fangueo y sin fangueo, con inundación continua de 5 cm, en los Baños, Filipinas. (Fuente: DeDatta y Kerim, 1974).

Sin embargo cuando hay sequías intensas poco después del transplante, el suelo fangueado puede contraerse, agrietarse, e impedir el desarrollo de raíces hasta un grado tal que las plantas no se recuperan posteriormente. DeDatta y Kerim (1974) obtuvieron rendimientos de arroz de 2,8 ton/ha en condiciones de dependencia de la lluvia y suelo sin fanguear, y de 4,0 ton/ha en condiciones de suelo fangueado y dependencia de la lluvia. Esta diferencia está asociada con menor escasez de agua en el suelo fangueado durante un período de 20 días aproximadamente al iniciarse la etapa de formación de panículas. En el mismo suelo, Sánchez (1973) observó que cuando hubo escasez de agua poco después del transplante, se presentó un severo impedimento en el desarrollo de las raíces y el rendimiento sólo llegó a 1,8 ton/ha. Cuando una escasez similar del agua ocurrió alrededor de la etapa de iniciación de las panículas, el rendimiento en campos fangueados dependientes de la lluvia aumentó a cerca de 4,5 ton/ha. El sistema radicular estaba ya bien desarrollado y la escasez de agua en esta etapa más tardía no causó daños irreversibles.

Otro efecto potencialmente dañino del fangueo es el tiempo que se requiere para que el suelo se seque y esté preparado para los cultivos aeróbicos que se siembran en rotación con el arroz. Este intervalo de tiempo es muy prolongado en familias montmoriloníticas arcillosas, pero considerablemente más corto en familias arcillosas caoliníticas,

alofánicas u oxídicas. Este efecto no tiene importancia en cultivos continuos de arroz.

PRACTICAS ACTUALES DE MANEJO DEL AGUA

Tal como se mencionó previamente, la inundación constante está limitada cerca del 20% del área arroceras tropical. En la Fig. 11.21 se ilustra un ejemplo de un campo inundado en Luzón Central, Filipinas, que muestra que la inundación se mantuvo a un nivel constante antes del transplante y hasta unas 3 semanas antes de la cosecha. La cantidad real de agua consumida por evaporación, escape, y percolación fue aproximadamente de 1000 mm. La Fig. 11.22 muestra un campo típicamente dependiente de la lluvia caracterizado por períodos alternos de inundación y ausencia de saturación. En este caso el consumo total de agua fue alrededor de 2700 mm. Estas cifras son típicas de consumos mayores de agua en inundación intermitente en contraposición a inundación constante.

MANEJO DEL NITROGENO

El arroz responde casi universalmente a aplicaciones de nitrógeno, excepto en terrenos recién desmontados o en circunstancias en que

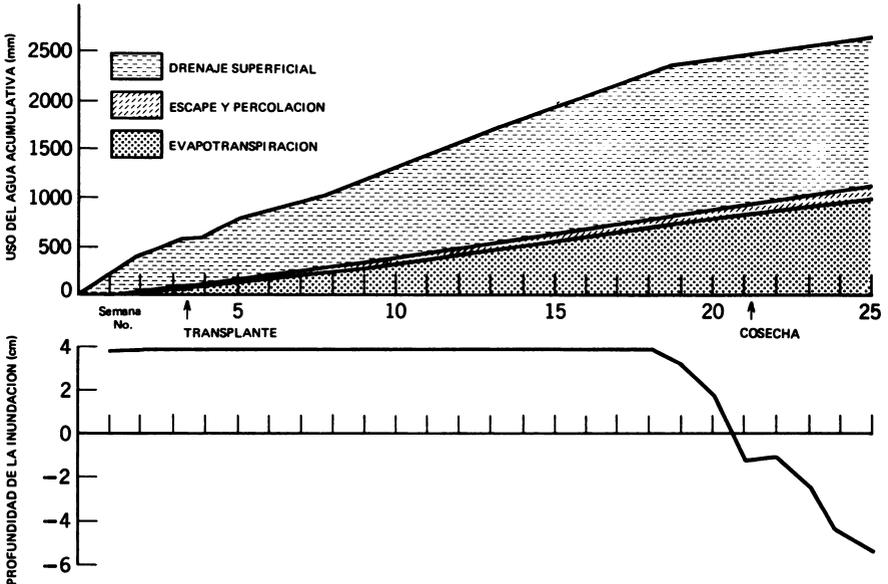


Fig. 11.21. Evapotranspiración acumulativa, escape y percolación, y drenaje superficial (parte superior), y profundidad de la inundación computada (parte inferior), en un suelo con inundación constante, en Luzón Central, Filipinas. (Fuente: Wickham, 1971).

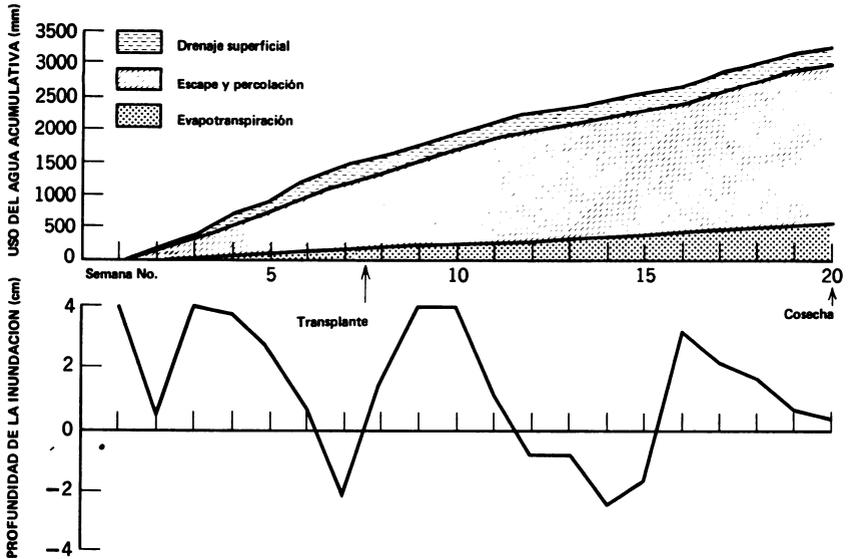


Fig. 11.22. Evapotranspiración acumulativa, escape y percolación, y drenaje superficial (parte superior), y profundidad de la inundación computada (parte inferior), en un suelo con inundación intermitente en Luzón Central, Filipinas. (Fuente: Wickham, 1971).

otros factores limitan severamente el crecimiento. En los principales países productores de arroz, India, Indonesia, Tailandia, Filipinas y Brasil, las respuestas óptimas se obtienen con dosis de 30 a 50 kg/ha de N, con rendimientos del orden de 2 a 3 ton/ha con variedades de porte alto. Con dosis mayores las variedades tradicionales altas "indica" tienden a acamarse o tumbarse y el rendimiento disminuye. La introducción de un nuevo tipo de planta por el IRRI en 1966 y su rápida distribución por todos los trópicos han cambiado por completo las prácticas de manejo del nitrógeno.

Las respuestas al nitrógeno dependen principalmente de factores ajenos al suelo. Los principales son: tipo de planta, radiación solar, manejo del agua, período vegetativo y finalmente, propiedades del suelo.

TIPO DE PLANTA

La variedad IR8 es el prototipo de la nueva planta de arroz tropical. Se caracteriza por porte bajo, alta capacidad de macollaje, tallos y hojas erectos, razón grano:paja alta, y resistencia a la tumbada o a came. Los tipos tradicionales de planta tienen crecimiento vigoroso, porte alto, baja capacidad de macollaje, tallos y hojas débiles, y baja

razón grano:paja. Estas variedades tradicionales responden al nitrógeno con un aumento de altura que da lugar a la tumbada del cultivo y subsiguientes pérdidas de rendimiento a causa de dosis altas de nitrógeno (DeDatta et al, 1966). La Fig. 11.23 ilustra las diferencias en respuesta entre el tipo de planta de variedades de porte bajo (IR8) y la variedad tradicional "Peta". La respuesta negativa de las variedades tradicionales a dosis altas de nitrógeno se deben en gran parte a la tumbada; curvas similares de respuesta se han obtenido en otros ambientes ampliamente distintos (Sánchez, 1972a).

Ninguno de estos tipos de planta muestra cambios significativos en la duración de su crecimiento con diferentes dosis de nitrógeno, y la acumulación de nitrógeno de la cosecha es esencialmente idéntica. Entre los tres componentes del rendimiento, el número de panículas por unidad de área está más relacionado con el aumento de rendimiento en las variedades de porte bajo como IR8, que el número de granos por panícula o el peso individual del grano. Por otra parte en variedades de porte alto, la respuesta de rendimiento está relacionada tanto a número de panículas por unidad de área, como al número de granos por panícula (Sánchez, 1972a). Estos resultados sugieren que las nuevas variedades responden principalmente con un aumento de macollaje, mientras que las variedades tradicionales responden en términos

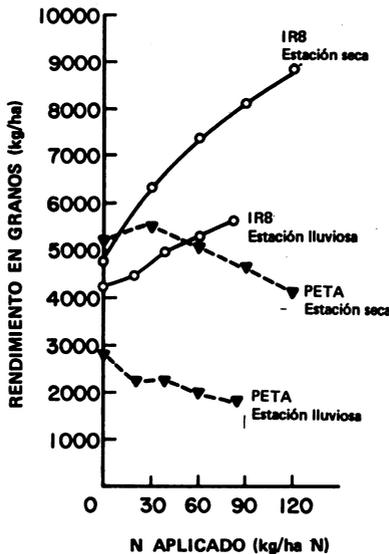


Fig. 11.23. Respuestas de dos tipos de plantas (promedios de tres años) durante estaciones con diferente radiación solar en los Baños, Filipinas. Sistema de transplante bajo inundación constante. (Fuente: DeDatta, 1970).



Fig. 11.24. Minabir-2, tipo de planta de porte alto (izquierda) en contraste con IR8, tipo de planta de porte bajo (derecha) en Lambayeque, Perú.

de tamaño de las panículas. El macollaje del arroz está íntimamente asociado con el nivel del nitrógeno en la planta (Tanaka et al, 1964).

Las diferencias generales de los dos tipos de planta se resumen en la Fig. 11.25 que muestra la proporción de granos a paja que se producen en función del nitrógeno aplicado. Las nuevas variedades tienen la habilidad de convertir más nitrógeno y productos de la fotosíntesis en granos, usando una base menor de paja que las variedades tradicionales altas.

RADIACION SOLAR

Cuando el arroz se cultiva en suelos constantemente inundados, las diferencias en respuestas al nitrógeno entre la estación lluviosa y la seca, están asociadas principalmente con diferencias en radiación solar, por cuanto la fluctuación de otros factores climáticos y agrónómicos es pequeña (DeDatta, 1970). La mayor radiación solar durante la estación seca suministra más energía fotosintética y permite mayores respuestas al nitrógeno y rendimientos más altos en ambos tipos de plantas, la de porte bajo y la de porte alto, que durante la estación lluviosa. Las respuestas al nitrógeno son mayores en los tipos de planta de porte bajo, expuestas a más radiación solar. En las variedades de porte alto hay respuestas positivas con mayor radiación solar, mientras que con radiación solar baja sólo se observan respues-

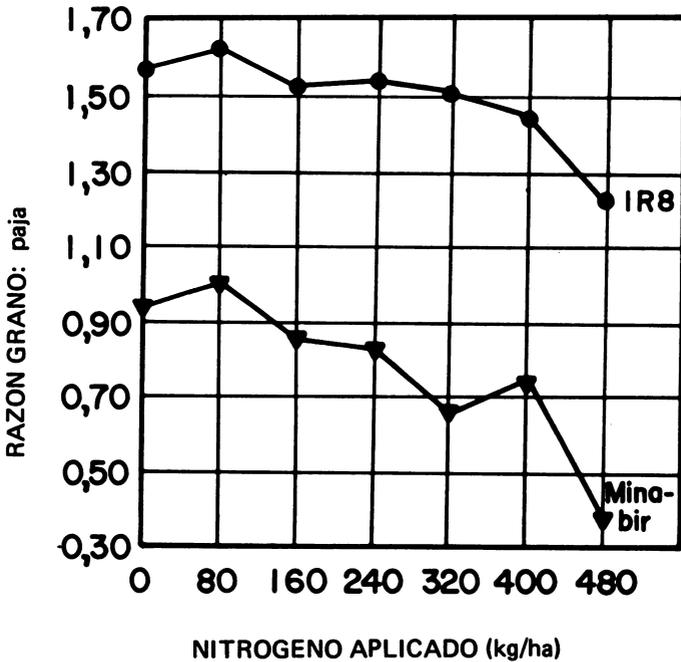


Fig. 11.25. Razón grano:paja como función de la dosis de nitrógeno en dos tipos de plantas, en Lambayeque, Perú. IR8 es de porte bajo y Minabir de porte alto. (Fuente: Sánchez, 1973a).

tas negativas. La Fig. 11.26 ilustra esta situación. La estación lluviosa con su alto grado de nubosidad proporciona menos radiación solar y consecuentemente menores rendimientos y respuestas al nitrógeno. Durante el período de reproducción, el rendimiento y la radiación solar están altamente correlacionados (DeDatta y Zarate, 1970). Las respuestas al nitrógeno en la selva peruana son similares a las que se observan en Filipinas durante la estación lluviosa debido a los niveles semejantes de radiación solar. Las altas respuestas que se obtienen en la costa peruana son en parte el resultado de los niveles de radiación solar más altos que los de la estación seca en Filipinas, dando lugar a rendimientos altos y respuestas óptimas a 160 kg/ha de N de las variedades tradicionales y a unos 300 kg/ha de N de los tipos de porte bajo (Sánchez, 1972a). La inundación intermitente típica de esta área explica parcialmente las altas dosis de nitrógeno que se usan.

MANEJO DEL AGUA

Debido a las grandes pérdidas de nitrógeno a causa del anegamiento y secamiento alternos, las respuestas al nitrógeno son diferentes

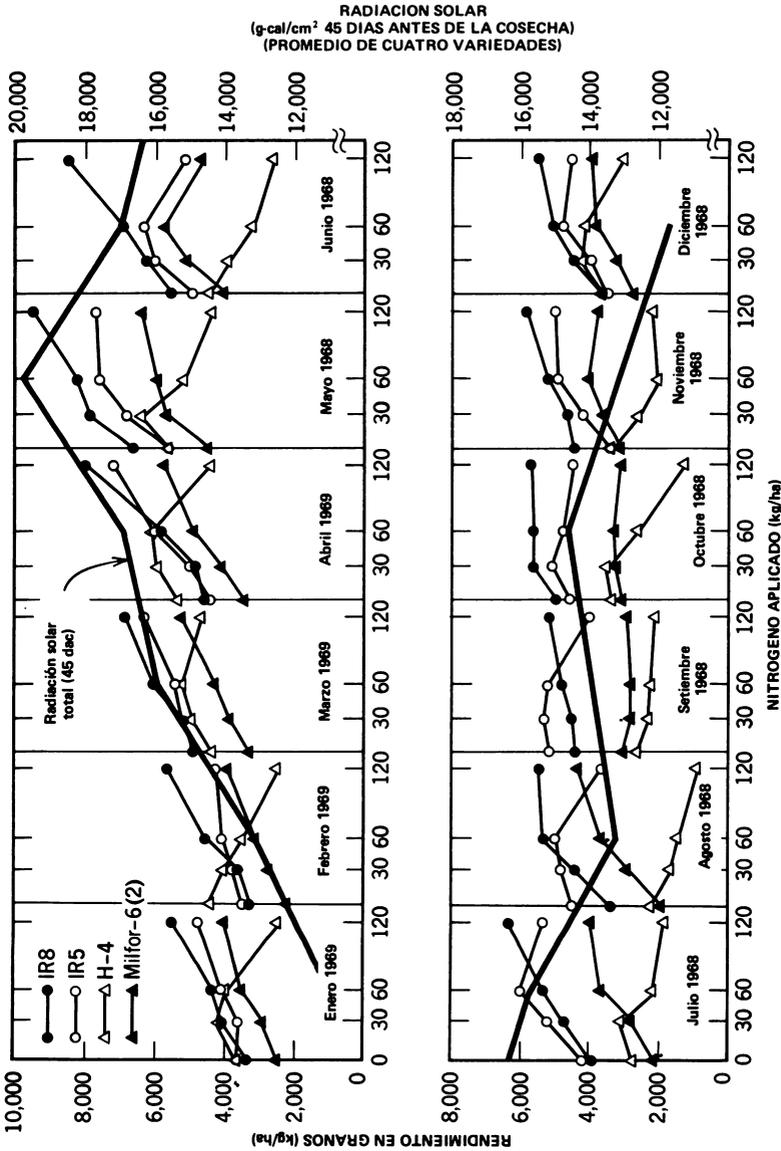


Fig. 11.26. Respuestas a nitrógeno de cuatro variedades de arroz indica como cosecha mensual, graficadas juntamente con la radiación solar total de los 45 días anteriores a la cosecha (DAC), en los Baños, Filipinas. Transplantado y con anegamiento constante. (Fuente: DeDatta y Zarete, 1970).

bajo inundación intermitente e inundación permanente. La Fig. 11.27 ilustra que el efecto de un manejo de agua progresivamente peor, depende marcadamente de la variedad. Variedades de porte bajo como C4-63 presentan rendimientos más bajos sin la aplicación de nitrógeno, conforme el manejo del agua va siendo peor, debido al agotamiento de nitrógeno aprovechable. La respuesta a nitrógeno agregado es a menudo más baja con inundación intermitente, pero en algunos casos los niveles de rendimiento son semejantes a los que se obtienen con inundación permanente. La situación con la variedad de porte alto (Peta) es al contrario. Su rendimiento aumenta con cualquier nivel de nitrógeno con un manejo de agua progresivamente más deficiente, por cuanto menos nitrógeno disponible hay, menos tumada ocurre. Esta relación probablemente refleja una adaptación natural de las variedades altas al manejo deficiente del agua (Krupp et al, 1972; Sánchez, 1972b; DeDatta et al, 1973b).

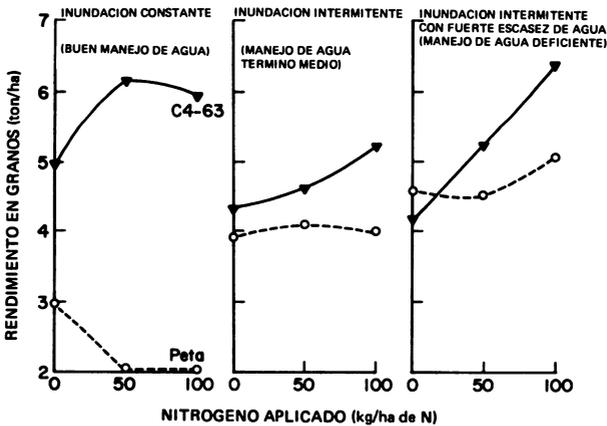


Fig. 11.27. Efectos del manejo del agua y del tipo de planta en la respuesta a nitrógeno, en los Baños, Filipinas. C4-63 es de porte bajo, y Peta de porte alto. (Fuente: adaptado de DeDatta et al, 1973b).

TEMPERATURA Y DURACION DEL CRECIMIENTO

La duración promedio del crecimiento del arroz en los trópicos va de 120 a 140 días desde la siembra hasta la madurez en variedades poco sensitivas al fotoperíodo. Hay varias grandes áreas productoras de arroz en los trópicos en donde las temperaturas bajas pueden afectar el crecimiento de las plantas, tales como Bangladesh, Assam, Nepal y partes de Madagascar y Perú. Uno de los efectos de las temperaturas bajas es el aumento en la duración del crecimiento. En tales ambientes existe interacción entre duración del crecimiento,

tipo de planta y respuesta al nitrógeno. En la costa de Perú rendimientos máximos y respuestas al nitrógeno están asociados con una duración de crecimiento de aproximadamente 180 días (Sánchez, 1972a). Variedades más precoces fallan en alcanzar niveles altos de rendimiento por cuanto no acumulan suficiente materia seca. Las variedades tardías también tienen rendimientos menores debido a menor razón grano-paja y a esterilidad inducida por la temperatura baja.

FUENTES DE NITROGENO PARA SISTEMAS DE INUNDACION CONSTANTE

La Fig. 11.7 ilustra la dinámica en suelos inundados y sugiere que las fuentes amoniacales son superiores a las nítricas. Una revisión de este tópico por DeDatta y Magnaye (1969), así como una serie de experimentos de campo con ^{15}N llevados a cabo por la Agencia Internacional de Energía Atómica, (IAEA, 1970), en 15 países confirma la falta general de diferencias entre sulfato de amonio y urea en suelos con anegamiento permanente. En suelos deficientes en azufre, el sulfato de amonio es algunas veces superior a la urea, pero lo contrario sucede en suelos muy ácidos con menor contenido de hierro, en que puede ocurrir toxicidad de H_2S . La hidrólisis de la urea a carbonato de amonio requiere el mismo tiempo en suelos inundados que en los bien aireados (Delaune y Patrick, 1970). Antes de la hidrólisis la urea no puede ser retenida por las partículas de arcilla; por lo tanto puede movilizarse tan rápidamente como los nitratos. Esta mayor movilidad y posibles pérdidas por volatilización cuando la urea se aplica a la superficie del suelo, es la explicación que más frecuentemente se da en casos en que la urea resulta inferior al sulfato de amonio (DeDatta y Magnaye, 1969).

La ineficiencia del nitrato de sodio también es obvia debido al proceso de desnitrificación. La utilización de nitratos aumenta cuando se aplica en la superficie en el momento en que la planta de arroz ha formado una alfombra de raíces capaces de absorber nitratos antes de que se lixivien a la zona reducida. Sin embargo, aún en estos casos, el nitrato es menos eficiente que las fuentes amoniacales. Los inhibidores de nitrificación que se usan como aditivos han fallado a nivel de campo (DeDatta y Magnaye, 1969; IAEA, 1970). El amoniaco anhidro es una excelente fuente de nitrógeno para arroz inundado pero las dificultades de mecanización y las posibles pérdidas por volatilización en el momento de la incorporación han impedido su uso en gran escala. Abonos orgánicos de origen vegetal o animal se han empleado por siglos en Asia. Aunque la materia orgánica generalmente se descompone más lentamente bajo condiciones de anegamiento, los microorganismos responsables funcionan con razones C:N más altas que bajo condiciones aeróbicas (DeDatta y Magnaye, 1969). Con los niveles de nitrógeno que ahora se recomiendan, el

verdadero potencial de los abonos orgánicos es limitado. Se les puede usar como posible complemento a las fuentes inorgánicas.

FUENTES DE NITROGENO PARA SISTEMAS DE INUNDACION INTERMITENTE

Las comparaciones entre fuentes de nitrógeno para inundación intermitente son muy limitadas. Estudios en Perú indican que cuando el nitrógeno se divide en dos aplicaciones no hay diferencias entre urea y sulfato de amonio, a pesar de que el suelo tenía un pH aeróbico de 8,2. Las aplicaciones de nitrato de sodio en el momento de iniciación de las panículas resultó muy ineficiente debido a que el arroz bajo condiciones alternas de anegamiento y secamiento no desarrolla una cantidad significativa de raíces superficiales capaces de absorber el NO_3^- antes de que se lixivie hacia la capa reducida (Sánchez, 1972a). Varias fuentes de nitrógeno de liberación lenta, como urea revestida con azufre han sido estudiadas en varios países. Experimentos con urea revestida con azufre suministrada por Tennessee Valley Authority, indican que esta fuente se comporta en forma parecida a la urea convencional bajo condiciones de inundación constante y con tasas bajas de percolación (Englestad et al, 1972). Sin embargo, bajo condiciones de inundación intermitente, la urea revestida con azufre incorporada antes del transplante es superior a las fuentes convencionales aplicadas en la misma forma, y en algunos casos, a aplicaciones divididas de urea corriente (Sánchez et al, 1973b). El potencial de fertilizantes de liberación lenta en sistemas de secano está siendo evaluado en varios países.

COLOCACION DE LOS FERTILIZANTES NITROGENADOS

El nitrógeno generalmente se aplica en cualquiera de las dos maneras siguientes: incorporado al suelo antes de la siembra directa o del transplante, o al voleo en diferentes etapas del crecimiento. La necesidad de incorporar las fuentes amoniacales dentro de la capa reducida en sistemas de inundación permanente es bien conocida (Mikkelsen y Finrock, 1957; DeDatta et al, 1968). La incorporación a una profundidad de 5 cm es suficiente en condiciones de inundación constante. Con inundación intermitente una incorporación más profunda puede ser beneficiosa para escapar de la reoxidación. Los estudios con ^{15}N llevados a cabo por la Agencia Internacional de Energía atómica, (IAEA, 1970), han proporcionado información adicional. El que no se observen beneficios con la incorporación a 5 cm en suelos con pH aeróbico de 4,7 ó 8,1 se ha atribuido a inhibición de la nitrificación de las fuentes amoniacales aplicadas a la capa superficial, en donde el pH no cambia. Con estos valores extremos de pH la nitrificación es mínima.

Bajo condiciones alternas de oxidación-reducción en Perú, la incorporación al transplante fue inferior que aplicaciones al voleo en etapas avanzadas del crecimiento. Sánchez (1972) ha atribuido esta diferencia a grandes pérdidas de nitrógeno ocasionadas por ciclos de inundación y secamiento frecuentes y pronunciados durante el período inicial de crecimiento.

Las aplicaciones al voleo durante el macollaje o la iniciación de las panículas son más eficientes cuando hay una capa delgada de agua estancada. Por lo tanto, no es recomendable drenar el suelo después de las aplicaciones de nitrógeno (AICRIP, 1969; DeDatta, 1970).

EPOCAS DE APLICACION DE NITROGENO BAJO CONDICIONES DE INUNDACION CONSTANTE

Debido a los rápidos cambios que el nitrógeno sufre en suelos inundados durante cortos períodos, la época de aplicación de nitrógeno es un factor de manejo muy crítico. La absorción de nitrógeno es efectiva durante todo el ciclo de crecimiento de la planta de arroz, pero su contenido de este elemento durante dos etapas fisiológicas es crítico: al principio del macollaje, y en la etapa de iniciación del primordio de las panículas (Matsushima, 1956). Un suministro adecuado de nitrógeno disponible durante el comienzo del macollaje resulta en más macollas las cuales están estrechamente relacionadas con el rendimiento en tipos de plantas de porte bajo. Sin embargo, suministros excesivos de nitrógeno después del macollaje máximo y antes de la etapa de iniciación del primordio de las panículas puede resultar en una gran proporción de macollas improductivas y tumbada prematura de variedades altas. El nitrógeno disponible entre la iniciación de las panículas y la floración está estrechamente correlacionado con el número de granos fértiles por panícula. Excesivo nitrógeno después de la floración puede extender la duración del crecimiento y aumentar la susceptibilidad a enfermedades tales como *Piricularia oryzae*. El propósito de programar las aplicaciones de nitrógeno es sincronizar las necesidades de la planta con la disponibilidad del elemento en el suelo durante todo el período de crecimiento. Como se puede esperar, hay gran variabilidad de los resultados experimentales en diferentes localidades, así como en una misma localidad en diferentes años.

Bajo inundación permanente, una aplicación básica completamente incorporada en la capa arable antes de la siembra directa o del transplante, normalmente es suficiente en suelos con tasas bajas de percolación y para variedades resistentes a la tumbada. Sin embargo, en suelos inundados con tasas altas de percolación, la división del nitrógeno en dos aplicaciones resulta más eficiente, siempre que la segunda mitad se aplique en la etapa de iniciación del primordio de las panículas (Evatt, 1965; DeDatta, 1970). Con variedades susceptibles a la tumbada las aplicaciones a la hora de iniciación del primordio de

las panículas son recomendables, ya que tienden a reducir el crecimiento inicial excesivo (DeDatta, 1970), y pueden evitar del todo la tumbada (Sims et al, 1967).

EPOCAS DE APLICACION DE NITROGENO BAJO INUNDACION INTERMITENTE

Cuando se llevan a cabo experimentos en campos de agricultores con manejo de agua intermitente, se encuentra que las dosis óptimas, así como la programación óptima de aplicación son completamente diferentes de los resultados de estaciones experimentales (IRRI, 1969, 1971, 1972; Sánchez y Calderón, 1971; DeDatta et al, 1969). El uso de dosis mayores y la división de las aplicaciones en dos partes fueron necesarios para obtener rendimientos altos con tipos de plantas altas y bajas con distintos niveles de radiación solar. En el caso de anegamiento y secamiento alternos en Perú, más del 90% del nitrógeno incorporado durante el transplante puede perderse; mientras que con el nitrógeno que se aplicó durante la etapa de iniciación de las panículas los rendimientos aumentaron (Fig. 11.28) y la eficiencia en la utilización del nitrógeno se duplicó. En arroz de secano la división del nitrógeno en dos partes es definitivamente superior a una sola aplicación, especialmente durante la fase de reproducción (Cordero y Romero, 1972; Kass et al, 1974). En general muy pocos beneficios adicionales se obtienen con más de dos aplicaciones.

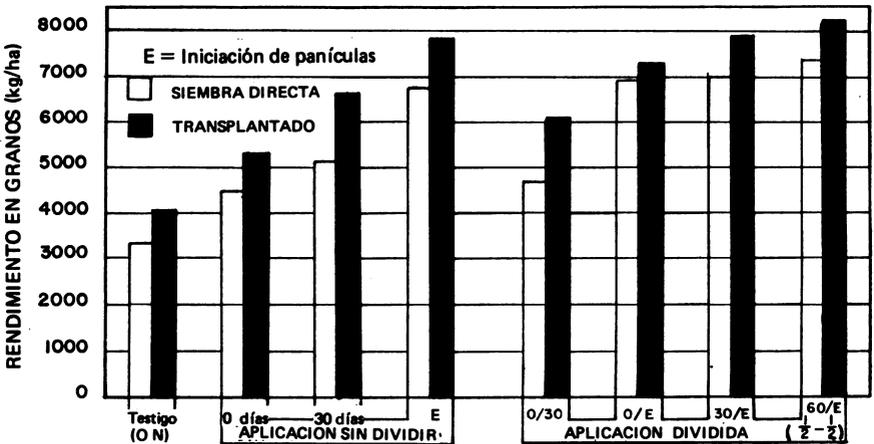


Fig. 11.28. Efectos de programar una aplicación de 180 kg/ha de N en arroz IR8 en dos sistemas de siembra e inundación intermitente, en Lambayeque, Perú. E= iniciación de panículas. (Fuente: Sánchez y Calderón, 1971).

RECUPERACION DEL NITROGENO APLICADO

La recuperación del nitrógeno aplicado es más baja en arroz inundado que en otros cultivos. En las áreas arroceras de Estados Unidos, Westfall (1969) estimó que la recuperación del fertilizante tiene un ámbito de 33 a 53% con dosis de 40 a 120 kg/ha de N. Racho y DeDatta (1968) informaron de un máximo del 33% de recuperación de aplicaciones de 30 kg/ha de N en la estación lluviosa y 57% con dosis de 90 kg/ha de N en la estación seca en Filipinas. Los diversos mecanismos de pérdida no se han evaluado en detalle, aunque se supone que la desnitrificación y la lixiviación son los procesos más importantes involucrados.

Bajo condiciones alternas de oxidación y reducción aumentan las pérdidas de nitrógeno. La recuperación del fertilizante nitrogenado durante la recolección fluctuó entre 20 y 30% con las prácticas convencionales de manejo en Perú; pero la eficiencia puede incrementarse considerablemente por medio de prácticas más adecuadas para las condiciones locales, tales como la selección de fuentes, método de colocación y épocas de aplicación (Sánchez y Calderón, 1971; Sánchez et al, 1973b).

MANEJO DEL FOSFORO

RESPUESTAS

El arroz responde a las aplicaciones de fósforo con menos frecuencia y menos intensidad que otros cereales por varios motivos. El aumento en la disponibilidad de fósforo en la solución del suelo con la inundación es a menudo de tal magnitud que hacen innecesarias las aplicaciones de fósforo para arroz inundado, mientras que cultivos aeróbicos en el mismo suelo requieren que se agregue fósforo para obtener rendimiento alto. Muy a menudo en suelos con menos de 1 ppm de fósforo disponible, el arroz no responde a aplicaciones de fósforo. En ensayos en estos suelos el arroz puede mostrar una dramática respuesta visual al fósforo en las etapas iniciales del crecimiento, pero las parcelas sin fertilización gradualmente alcanzan condiciones semejantes, y a la cosecha no se observan diferencias de rendimiento (DeDatta et al, 1966; Davide, 1965).

El aumento en la disponibilidad de fósforo bajo condiciones de inundación es dependiente del suelo. La Fig. 11.12 muestra que en algunos suelos hay poco cambio, particularmente en suelos altamente meteorizados. Por lo tanto la inundación no elimina la deficiencia de fósforo en tales suelos, ejemplos de esto son los Oxisoles, Ultisoles, Andepts y Sulfaquepts. La respuesta al fósforo es común en estos suelos, aún bajo condiciones de inundación. La disponibilidad del fósforo es aún más afectada por el tipo de manejo de agua empleado (Sánchez y Briones, 1973).

DIFERENCIAS VARIETALES

Bajo condiciones de secano, el arroz generalmente necesita dosis más bajas de fósforo para rendimiento máximo que otros cultivos como el maíz. Tal como se comentó en el Capítulo 8, la necesidad de fósforo del arroz puede ser menor que la de otros cereales. Trabajos llevados a cabo en Filipinas ponen de manifiesto que existen diferencias varietales en relación con la tolerancia a bajos contenidos de fósforo disponible. Ponnampertuma y Castro (1972) y Koyama y Chammeck (1971) han probado que ciertas variedades se comportan mejor que otras con poca disponibilidad de fósforo. Variedades de uso común, como IR20 y IR22, dieron rendimientos de 50% más altos que IR8 en condiciones de poco fósforo. Salinas y Sánchez (1976) informan que tales diferencias varietales están relacionadas con tasas más altas de absorción y traslocación de fósforo.

FUENTES, COLOCACION Y EPOCAS DE APLICACION

El superfosfato simple o el triple son excelentes fuentes de fósforo para el arroz. Los fosfatos amoniacales también son buenos. Los suelos con pH aeróbicos bajos, de rocas fosfatadas de alta solubilidad en citrato han demostrado ser tan eficientes como los superfosfatos. Varias fuentes de rocas fosfatadas de diferente solubilidad en citrato fueron evaluadas en suelos ácidos sulfatados en Tailandia y en Oxisoles en Colombia (Englestad et al, 1972, 1974), y la Fig. 8.7 presenta algunos de los resultados. Las consecuencias económicas son obvias en áreas como Tailandia, donde las rocas fosfatadas locales cuestan cerca de \$20 (US) por tonelada, mientras que el superfosfato triple costaba \$105 la tonelada en el momento del estudio. Las rocas fosfatadas con alta solubilidad en citrato producen un excelente efecto residual.

El método más práctico de aplicar fósforo a los suelos de arroz es aplicarlo al voleo e incorporarlo en la capa fangueada antes del transplante. En arroz de secano el fósforo se aplica en bandas cercanas a los surcos de siembra (Novais y DeFelipo, 1971; Freitas et al, 1973).

EL PROBLEMA DEL ANALISIS DE SUELO EN ARROZ

En general los análisis de suelo para fósforo resultan en fracaso cuando se aplican al arroz inundado. Las correlaciones que se obtienen en el campo, y aún en pruebas de macetas son deficientes (Chang, 1965). Hay varias razones para este comportamiento. Ninguna de las soluciones extractoras comunes de suelo pueden detectar fósforo soluble en reductores, que pueden tornarse aprovechables con el anegamiento. Muchas de las soluciones extractoras comunes (Bray, Truog, Carolina del Norte) no detectan mucho Fe-P. La solución extractora Olsen es generalmente mejor, pero pocas veces satis-

factoria. Parecería lógico preinundar los suelos antes de la extracción para tomar en cuenta el aumento en la disponibilidad que generalmente se observa con el anegamiento. Desafortunadamente los intentos en esta dirección han fallado. La investigación en este aspecto no ha sido sistemática y esfuerzos bien programados deberían dar mejores resultados.

MANEJO DE OTROS NUTRIMENTOS

El ámbito muy amplio de suelos y las condiciones climáticas en que se cultiva el arroz en los trópicos, han producido algunos desórdenes de nutrición de importancia local, yendo de toxicidades directas o deficiencias a interacciones de nutrición complejas con enfermedades de plantas. Tanaka y Yoshida (1970) publicaron un reconocimiento de estos desórdenes en Asia, el que ha aumentado significativamente el conocimiento sobre la importancia de algunos de estos problemas. Sus resultados se presentan en la Fig. 11.29 y Cuadro 11.10. Ellos también desarrollaron niveles críticos tentativos de estos nutrientes en tejidos de arroz para cada problema (Cuadro 11.9) y proporcionaron excelentes fotografías de los diversos síntomas. Mayor evidencia se está acumulando también sobre varios problemas de nutrición en América Latina y Africa.

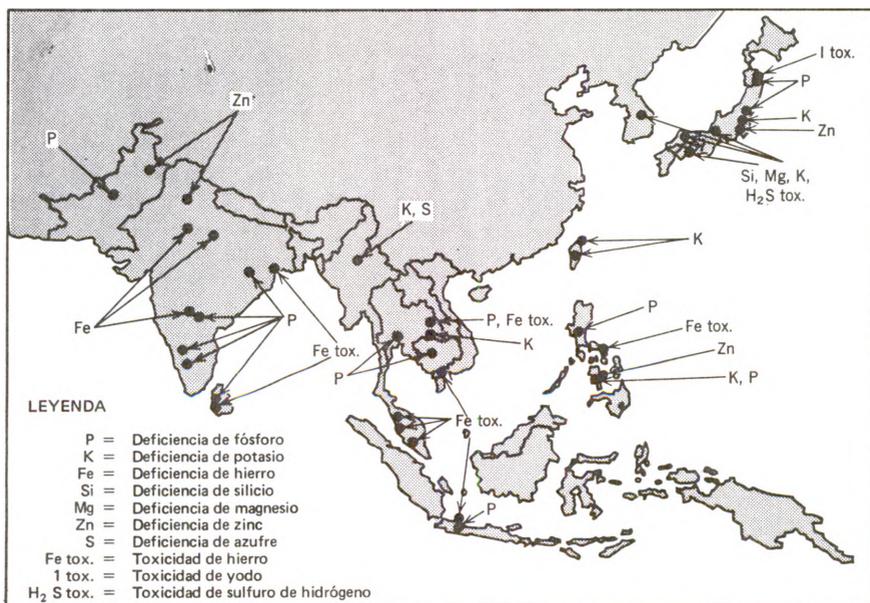


Fig. 11.29. Localización y clasificación de desórdenes nutritivos del arroz en Asia. (Fuente: Tanaka y Yoshida, 1970).

CUADRO No. 11.9. Niveles críticos de deficiencia y toxicidad de diferentes elementos en la planta de arroz. (Fuente: Tanaka y Yoshida, 1970).

Elemento	Deficiencia (D) o toxicidad (T)	Nivel crítico	Parte analizada	Etapas de crecimiento
N	D	2,5%	Lámina foliar	Mac*
P	D	0,1%	Lámina foliar	Mac
	T	1,0%	Paja	Mad**
K	D	1,0%	Paja	Mad
	D	1,0%	Lámina foliar	Mac
Ca	D	0,15%	Paja	Mad
Mg	D	0,10%	Paja	Mad
S	D	0,10%	Paja	Mad
Si	D	5,0%	Paja	Mad
Fe	D	70 ppm	Lámina foliar	Mac
	T	300 ppm	Lámina foliar	Mac
Zn	D	10 ppm	Tallo	Mac
	T	1500 ppm	Paja	Mad
Mn	D	20 ppm	Tallo	Mac
	T	2500 ppm	Tallo	Mac
B	D	3,4 ppm	Paja	Mad
	T	100 ppm	Paja	Mad
Cu	D	6 ppm	Paja	Mad
	T	30 ppm	Paja	Mad
Al	T	300 ppm	Tallo	Mac

(*) Mac = macollamiento

(**) Mad = madurez

DEFICIENCIA DE ZINC

La deficiencia de zinc es probablemente el desorden de nutrición más extendido en el arroz tropical. Se presenta en partes de la India, Pakistán, Filipinas y Colombia, bajo condiciones de anegamiento (Tanaka y Yoshida, 1970; Yoshida y Forno, 1971; CIAT, 1971; IRRI, 1971, 1972). También se presenta en el Cerrado de Brasil bajo condiciones de secano (De Souza e Hiroce, 1970). En áreas de arroz inundado la deficiencia de zinc está asociada con suelos calcáreos y acentuada por inundación prolongada. Los síntomas de la deficiencia de zinc son más pronunciados en las etapas iniciales de crecimiento, y algunas veces la planta se recupera por completo en etapas posteriores. Tanaka y Yoshida atribuyen este efecto a grandes concentraciones de bicarbonato durante los picos de reducción del suelo, las cuales dan por resultado una inmovilización del zinc en las raíces. Sin embargo, no todos los suelos calcáreos son deficientes en zinc. Las

pruebas convencionales de suelo están bien correlacionadas con el contenido de zinc en la planta y con las respuestas a este elemento (IRRI, 1972). El nivel crítico por el método de Lindsay es de 1,5 ppm de Zn en el suelo; está asociado con niveles de 14 ppm de Zn en los tejidos de las plantas. Es concebible que el aumento en disponibilidad del fósforo con la inundación pueda disminuir la disponibilidad de zinc, de acuerdo con estudios preliminares de Giordano y Mortvedt (1972).

En Oxisoles ácidos de Brasil las deficiencias de zinc están extendidas por la zona arroceras de secano a pesar de que la solubilidad del zinc es mayor con pH bajos. Aparentemente estos suelos son tan bajos en zinc que la deficiencia se presenta a pesar de la gran solubilidad de este elemento.

La deficiencia de zinc puede corregirse con aplicaciones de 5 a 10 kg/ha de Zn como sulfato u óxido de zinc incorporado al suelo antes de la siembra directa o el trasplante (Yoshida et al, 1970; Giordano y Mortvedt, 1973). Tales dosis aumentaron los rendimientos de 0,5 a 7,5 tón/ha en un Mollisol de Colombia (CIAT, 1971). Otras alternativas incluyen la sumersión de las plántulas en una suspensión de óxido de zinc antes del trasplante, y mezcla de óxido de zinc con semillas de arroz preremojadas antes de la siembra directa (Yoshida y Forno, 1971; CIAT, 1972).

Hay diferencias varietales importantes en la tolerancia a la deficiencia de zinc. Las variedades locales colombianas de porte alto son muy tolerantes, mientras que las variedades IRRI no lo son (CIAT, 1971). Esto es resultado de selección por medio de hibridación, sin que los fitomejoradores se dieran cuenta de que estaban seleccionando para tolerancia al zinc.

DEFICIENCIA DE HIERRO

La deficiencia de hierro está extendida en suelos calcáreos y alcalinos, tanto en cultivos de arroz inundado como de secano, y también ocurre en algunos suelos anegados con contenido muy bajo de materia orgánica para que se produzca reducción química del suelo. Las deficiencias de hierro se extienden por la parte norte y central de la India, Filipinas y partes de Japón y Estados Unidos (Tanaka y Yoshida, 1970; Okajima et al, 1970; Ponnampertuma y Castro, 1972). En suelos inundados la deficiencia de hierro está asociada con pH aeróbico mayor de 7 ó con reducción insuficiente del suelo. Cuando el arroz está en suelos calcáreos, la deficiencia de hierro puede aparecer en condiciones de secano y estar ausente en áreas inundadas debido al aumento en la disponibilidad de hierro bajo condiciones de anegamiento. La deficiencia de hierro se ha observado en suelos ácidos con pH alrededor de 5,0, tanto en Filipinas (DaDatta et al, 1975) como en Brasil (Costa y Souza, 1972) en condiciones de secano

CUADRO No. 11.10. Localización y clasificación de desórdenes de nutrición en arroz, en Asia. (Fuente: Tanaka y Yoshida, 1970).

pH del suelo	Condición del suelo	Desorden	Nombre local
pH muy bajo	Suelo ácido sulfatado	Toxicidad de hierro	“Bronceado”
	Bajo en materia orgánica	Deficiencia de fósforo	
pH bajo	Alto en materia orgánica	Deficiencia de fósforo combinada con toxicidad de hierro	“Akagare tipo III”
	Alto en yodo	Toxicidad de yodo combinada con deficiencia de fósforo	
	Alto en manganeso	Toxicidad de manganeso	
	Bajo en potasio	Toxicidad de hierro interactuando con deficiencia de potasio	
Bajos en hierro activo y cationes intercambiables	Bajo en bases y sílice, con aplicación de sulfato	Desequilibrio de nutrimentos asociado con toxicidad de hidrógeno y sulfuro	“Akiochi”

Continúa en página siguiente

CUADRO No. 11.10. Cont.

pH del suelo	Condición del suelo	Desorden	Nombre local		
pH alto	Alto en calcio	Deficiencia de fósforo Deficiencia de hierro Deficiencia de zinc	{ “Khaira” “Hadda” “Taya-taya” “Akagare tipo II” }		
				Alto en calcio y bajo en potasio	Deficiencia de potasio asociada con calcio alto
				Alto en sodio	{ Problema de salinidad Deficiencia de hierro Toxicidad de boro }

durante períodos de escasez de agua. Aunque la solubilidad del hierro es alta, aparentemente la cristalinidad de las formas y la escasez misma de agua pueden inducir deficiencia de hierro. No todos los suelos calcáreos provocan deficiencia de hierro en el arroz. En suelos calcáreos de la costa de Perú, con pH de 8,3 y con prominentes revestimientos de hierro en las raíces, este autor no ha observado síntomas de deficiencia de hierro.

Los síntomas de clorosis de hierro pueden aparecer en las etapas iniciales del crecimiento y desaparecer posteriormente cuando ha habido un aumento de Fe^{2+} a causa de la inundación. La deficiencia puede corregirse aplicando sulfato férrico, sulfato ferroso y óxidos de hierro al agua estancada o incorporándolos en el suelo (Patrick y Mikklesen, 1971). El ácido sulfúrico que se aplica a ciertos suelos calcáreos y sódicos para bajar el pH también elimina la deficiencia de hierro. Se han identificado diferencias varietales en la tolerancia de deficiencias de hierro (Ponnamperuma y Castro, 1972; IRRI, 1971, 1972).

TOXICIDAD DE HIERRO

Cuando ciertos Oxisoles, Ultisoles y Sulfaquepts altamente meteorizados, están inundados se presenta toxicidad de hierro. El aumento en la concentración de iones ferrosos en la solución del suelo puede alcanzar niveles tóxicos de 300 ppm de Fe o más en las plantas de arroz. Recientemente se ha identificado la deficiencia de hierro como la causa de la enfermedad de "bronceamiento" en Sri Lanka y otras partes del sureste de Asia y como la causa principal del desorden "anaranjamiento" en Colombia (Tanaka y Yoshida, 1970; CIAT, 1971, 1972). En la enfermedad "akagare tipo I" de Japón hay interacción entre la deficiencia de potasio y la toxicidad de hierro (Tanaka y Tadano, 1972).

La única solución para la toxicidad de hierro incluye el drenaje del suelo para reoxidar el hierro ferroso. En suelos en que hay un pico marcado de Fe^{2+} seguido por una disminución, la toxicidad de hierro puede evitarse por medio de preinundación del suelo un mes más o menos antes de la siembra de las semillas o del transplante. Sin embargo en Sulfaquepts con toxicidad de hierro la reoxidación es perjudicial porque provoca toxicidad de aluminio. En tales suelos la mejor alternativa es una combinación de encalado y aplicaciones de dióxido de manganeso, sumersión prolongada, y lixiviación para evitar acumulación de Fe^{2+} y para reducir la toxicidad de aluminio (Nhung y Ponnamperuma, 1966; IRRI, 1972). En un Oxisol de Colombia encalado a pH 6,5, y evitando adiciones de materia orgánica, se rebajó la toxicidad de hierro. La solución más práctica para este suelo es el cultivo de arroz de secano.

También hay diferencias varietales con respecto a la toxicidad de hierro. Algunas variedades mejoradas, como IR8 son muy suscepti-

bles, mientras que las variedades locales de porte alto y algunas de porte bajo son menos sensitivas a niveles altos de Fe^{2+} (IRRI, 1972; CIAT, 1972).

DEFICIENCIA DE POTASIO

En arroz inundado las respuestas al potasio son raras. La mayoría de los suelos de arroz inundado por lo general son suficientemente altos en potasio intercambiable. Además reciben nuevos suministros de potasio y otras bases con el agua de inundación todos los años. En algunos suelos calcáreos hay respuesta al potasio debido a desequilibrios de Ca:K. Una enfermedad común del arroz, la mancha foliar causada por *Helminthosporium oryzae*, se acentúa con la deficiencia de potasio y se atenúa con fertilización potásica. Cuando se presentan deficiencias se les puede corregir con dosis de unos 40 kg/ha de K (Tanaka y Yoshida, 1970). Algunos suelos de arroz de secano son bajos en potasio y responden a este elemento de igual manera que cualquier otro cultivo (Kemmler, 1971; Kass et al, 1973). Los análisis de suelo son una buena herramienta para estimar la deficiencia de potasio en los suelos para arroz.

OTROS PROBLEMAS DE NUTRICION

En suelos arenosos altos en sulfatos y bajos en hierro, H_2S se puede acumular a niveles tóxicos y matar las plantas. Los síntomas de "akiochi" que se observan en Japón son una consecuencia de la toxicidad de H_2S . Su presencia en los trópicos no ha sido documentada (Tanaka y Yoshida, 1970). Los agricultores japoneses frecuentemente agregan suelo rico en hierro traído de tierras altas a los campos afectados. Esta práctica extrema produce precipitación de H_2S como FeS .

La toxicidad de aluminio y la de manganeso son comunes en arroz de secano en suelos ácidos; el mal se remedia con encalado y con el uso de variedades tolerantes. La toxicidad de manganeso pocas veces se presenta en campos inundados porque el arroz es muy tolerante a este elemento (hasta 2500 ppm en los tejidos). Del sureste de Asia se ha informado ocasionalmente de deficiencias de manganeso.

Anhídrido carbónico y ácidos orgánicos se acumulan algunas veces a niveles tóxicos en algunos suelos inundados, generalmente en espacios reducidos. La solución es el drenaje.

Se ha informado de deficiencia de silicio en Japón y Corea, pero no en los trópicos (Okuda y Takahashi, 1965). El arroz tiene una necesidad grande de sílice (Tanaka y Park, 1966).

La salinidad es un problema muy importante en áreas desérticas irrigadas, donde el potencial de rendimiento del arroz es, de otra manera, muy alto. El arroz inundado puede sufrir por salinidad a

conductividades eléctricas de 4 mmho/cm o más. El hecho de que el secamiento temporal aumente el daño por salinidad al arroz crea un problema muy serio en las áreas de inundación intermitente. El drenaje constituye la mejor práctica. Existen diferencias varietales en tolerancia a la salinidad. IR8 se considera relativamente tolerante (Tanaka y Yoshida, 1970).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El arroz, cultivo número uno de los trópicos generalmente se cultiva bajo un único grupo de condiciones de suelo resultantes de los cambios físicos y químicos derivados de la inundación. La inundación *per se* hace que el aire atrapado explote en los poros del suelo, disminuyendo la permeabilidad y estabilidad de los agregados del suelo. La magnitud de estos cambios varía de acuerdo con las propiedades del suelo.
2. El fangueo, proceso intencional para destruir los agregados del suelo y formar un lodo uniforme, es una práctica común en el cultivo de arroz inundado. El fangueo causa la destrucción casi completa de los agregados, destrucción de macroporos, aumentos en microporos llenos de agua, aumento en la retención de agua con tensiones de humedad del suelo con un ámbito de 0 a 10 bares, disminución en las pérdidas por evaporación y percolación, e induce reducción química en ausencia de inundación. La disminución en pérdidas por percolación se considera como la razón principal por la que los agricultores practican el fangueo. El fangueo no es un proceso irreversible; se puede recobrar la estructura original por medio de mojado y secado alternos, y con labranza a un nivel de humedad correcta. La magnitud de estos cambios, así como la facilidad de regeneración dependen de las propiedades del suelo. Suelos con mineralogía de silicatos laminares requieren menos esfuerzo para el fangueo, alcanzan un mayor grado de destrucción de agregados y requieren largos períodos de tiempo para regenerarse. Suelos con mineralogía oxídica o con revestimientos de óxidos, (Oxisoles, Ultisoles, Andepts) son más difíciles de fangueo completo, pero la regeneración estructural es bastante simple.
3. La consecuencia química superior de la inundación es la transformación microbiológica de un suelo oxidado a uno reducido. No todo el perfil de un suelo inundado está reducido; una delgada capa cercana a la superficie, así como la rizosfera de raíces de crecimiento rápido permanecen oxidadas. El proceso de reducción comienza con los nitratos, seguidos por los óxidos e hidróxidos mangánicos y férricos productos intermedios de la des-

composición de la materia orgánica, y en ciertos casos los sulfatos. La intensidad de la reducción generalmente es función del contenido de materia orgánica del suelo y puede medirse como Eh (potencial de oxidación-reducción). Las consecuencias principales de la reducción del suelo son el cambio del pH del suelo a entre 6 y 7 indiferentemente del pH original, desnitrificación de nitratos y acumulación de amonio y aumento en la solubilidad de hierro, manganeso y en ciertos casos, fósforo. La magnitud de estos cambios también varía de acuerdo con las propiedades del suelo, siendo desde altamente beneficiosos a neutrales y luego a altamente tóxicos para las plantas de arroz. Con el secamiento, estos procesos también son reversibles.

4. En los trópicos el arroz se cultiva de acuerdo con cinco sistemas principales: inundado dependiente de la lluvia, que comprende el 46% del área; inundado con irrigación, 19%; de secano, 25%; arroz flotante, 9%; y siembra directa e irrigada, 1%. Las consecuencias físicas y químicas de anegamiento varían de acuerdo con el tipo de manejo del agua. La química de la inundación intermitente es considerablemente diferente de la de inundación permanente.
5. El arroz es capaz de crecer en condiciones de anegamiento debido a su habilidad para oxidar su propia rizosfera. Las necesidades de agua de la planta de arroz *per se* no son distintas de las de otros cultivos de duración comparable del crecimiento. La susceptibilidad a la escasez de agua la asegura contra este fenómeno por medio de la inundación. La preparación del suelo en húmedo también consume una cantidad adicional de agua. El consumo de agua de un campo promedio de arroz inundado es del orden de dos veces la cantidad de un campo de maíz. El ámbito de humedad disponible para el arroz en suelos arcillosos es del orden de 0 a 0,3 bares y no el convencional de 0,3 a 15 bares. Se presentan diferencias varietales significativas en susceptibilidad a la succión del agua pero no están relacionadas con el tipo de planta. Por lo general el arroz produce menos condiciones de inundación debido a la eliminación del agua, control más fácil de las malezas, y en ciertos casos, los beneficios químicos de la reducción del suelo.
6. El arroz responde a las aplicaciones de nitrógeno casi universalmente, excepto en terrenos recién desmontados o en situaciones que otros factores limitan severamente el crecimiento. La magnitud de estas respuestas es sin embargo mínima y a menudo negativa cuando se usan variedades de porte alto, debido a su susceptibilidad al encame. Con el advenimiento y diseminación amplia de las variedades de porte bajo, resistentes al encame, las

respuestas son más pronunciadas y a menudo altamente lucrativas. Además de las propiedades del suelo, otros factores tales como el tipo de planta, la radiación solar, la temperatura y el manejo del agua afectan la forma de la curva de respuesta al nitrógeno. Las fuentes más efectivas de nitrógeno son las amoniacales, especialmente sulfato de amonio y urea. Bajo condiciones de inundación intermitentes las fuentes de liberación lenta, tales como urea revestida con azufre, han demostrado ser más eficientes, pero no ofrecen ventajas en suelos bajo anegamiento constante. El mejor método de aplicación de los fertilizantes amoniacales convencionales es la incorporación de una dosis básica dentro del suelo antes de la siembra de las semillas o del trasplante, seguida por una aplicación superficial en la etapa de iniciación de las panículas. La demora de la primera aplicación hasta la etapa de macollaje parece ser una práctica más eficiente en sistemas de inundación intermitente y de secano. La eficiencia en la utilización del nitrógeno es menor en arroz que en otros cultivos, y mucho más baja con inundación intermitente que permanente.

7. La respuesta del arroz a la aplicación de fósforo es menos frecuente que la de otros cultivos en el mismo suelo, debido al aumento en la disponibilidad de este elemento con la inundación. Las respuestas son comunes en condiciones de secano. Existen diferencias varietales en tolerancia a contenidos bajos de fósforo. Los superfosfatos y los fosfatos amoniacales son excelentes fuentes de fósforo para el arroz. En suelos muy ácidos las rocas fosfatadas se comportan muy bien. No se han desarrollado pruebas de suelo bien adecuadas para estimar la disponibilidad de fósforo en arroz inundado.
8. En las regiones arroceras de los trópicos se encuentran otros problemas de nutrición. Quizá la deficiencia de zinc es la más extendida. También se encuentran deficiencia de hierro, toxicidad de hierro, deficiencia de potasio, y problemas causados por concentraciones excesivas de productos reducidos.

REFERENCIAS

- AHMAD, N. The effect of evolution of gases and reducing conditions in a submerged soil and its subsequent physical status. *Trop. Agr. (Trinidad)* 40:205-209. 1963.
- AICRIP. All India coordinated rice improvement project. Progress report Kharif. Vol. 2. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi, 1969.

- ALBERDA, T. Growth and root development of lowland rice and its relation to oxygen supply. *Plant and Soil* 5:1-28. 1953.
- ALLISON, L. E. Effects of microorganisms on the permeability of soils under prolonged submergence. *Soil Sci.* 63:439-450. 1947.
- BARKER, R. The economic consequences of the green revolution in Asia. In *Rice, science and man*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 115-126.
- BHATTACHARYYA, A. K. Mechanism of the formation of exchangeable ammonium nitrogen immediately after waterlogging rice soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 19:209-213. 1971.
- BODMAN, G. B., y RUBIN, J. Soil puddling. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 13:27-36. 1948.
- BREAZEALE, J. F., y McGEORGE, W. T. Studies on soil structure: some nitrogen transformations in puddled soils. *Arizona Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 69. 1937.
- BROADBENT, F. E., y MIKKLESEN, D. S. Influence of placement on the uptake of tagged nitrogen by rice. *Agron. J.* 60:674-677. 1968.
- BROESHART, H. y BRUNNER, H. The efficiency of phosphate and nitrogen fertilization in rice cultivation. *Trans. 8th Int. Contg. Soil Sci. (Adelaide)* 4:209-218. 1964.
- CHANG, S. C. Phosphorus and potassium tests for soils. In *Symposium on the mineral nutrition of the rice plant*, International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 373-381.
- CHANG, T. T., LORESTO, G. C., y TAGUMPAY, O. Agronomic and growth characteristics, of upland and lowland rice varieties. In *Rice breeding*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 645-661.
- CHO, D. Y., y PONNAMPERUMA, F. N. Influence of soil temperature on the chemical kinetics of flooded soils and the growth of rice. *Soil Sci.* 112:184-194. 1971.
- CHANDRASEKARAN, S. y YOSHIDA, T. Effect of organic acid transformation in submerged soils on the growth of the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 19:39-45. 1973.
- CHAUDHARY, T. N., y GHILDYAL, P. B. Aggregate stability of puddled soil during rice growth. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 17:261-265. 1969.
- CIAT. Annual Reports. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1971, 1972.
- _____. Políticas arroceras en América Latina. Información básica y antecedentes. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1972.
- CORDERO, A. y ROMERO, A. Estudios de fertilización nitrogenada del arroz en el Pacífico húmedo de Costa Rica. Departamento de Agronomía, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica, 1972. 14 p.
- COSTA, A. S., y SOUZA, D. M. de. Clorose do arroz devida a deficiência de ferro em solo Latosol Roxo de Campinas. Instituto Agrônômico de Campinas, São Paulo, Brasil, 1972.
- CRONEY, D. y COLEMAN, J. D. Soil structure in relation to soil suction (pF). *J. Soil Sci.* 5:75-84. 1954.
- DAS GUPTA, D. K. Effects of levels and time of nitrogen application and interaction between phosphorus and nitrogen on grain yield of rice varieties under tidal mangrove swamp cultivation in Sierra Leone. *Afr. Soils* 16:59-67. 1971.

- DAVIDE, J. G. The time and methods of phosphate fertilizer applications. In Symposium on the mineral nutrition of the rice plant, International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 255-268.
- DeDATTA, S. K., MOOMAW, J. C., RACHO, V. V., y SIMSIMAN, G. V. Phosphorus supplying capacity of lowland rice soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30:613-617. 1966.
- _____, MAGNAYE, C. P., y MOOMAW, J. C. Efficiency of fertilizer nitrogen (N^{15} labelled) for flooded rice. *Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci. (Adelaide)* 4:67-76. 1968a.
- _____, TAURO, A. C., y BALAOING, S. N. Effects of plant type and nitrogen level on the growth characteristics and grain yield of indica rice in the tropics. *Agron. J.* 60:643-647. 1968b.
- _____, MAGNAYE, C. F. A survey of forms and sources of fertilizer nitrogen for flooded rice. *Soil and Fertilizers* 32:103-109. 1969.
- _____, MAGNAYE, C. P., y MAGBANUA, J. T. Response of rice varieties to time of nitrogen application in the tropics. *Trop. Agr. Res. Ser.* 3:73-88. Ministry of Agriculture and Forestry, Tokyo, Japan, 1969.
- _____. Fertilizer and soil amendments for tropical rice. In *Rice production manual*, 2nd ed. University of the Philippines at Los Baños, 1970. pp. 106-145.
- _____, y ZARATE, P. M. Environmental conditions affecting growth characteristics, nitrogen response and yield of tropical rice. *Biometeorology* 4:71-89. 1970.
- _____, y BEACHELL, H. M. Varietal response to some factors affecting production of upland rice. In *Rice breeding*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 685-700.
- _____, KRUPP, H. K., ALVAREZ, E. I., y MODGAL, S. C. Water management practices in flooded tropical rice. In *Water management in Philippine irrigation systems: research and operations*, International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines, 1973a. pp. 1-18.
- _____, ABILAY, W. P., y NALWAR, G. N. Water stress effects in tropical rice. In *Water management in Philippine irrigation systems: research and operations*, International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines, 1973b. pp. 19-36.
- _____, ARAGON, E. L., y MALABUYOC, J. A. Varietal differences in and cultural practices for upland rice. Unpublished paper. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1973c. 63 p.
- _____, y KERIM, M. S. A. A. Water and nitrogen economy on rainfed rice on puddled and non-puddled soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:515-518. 1974.
- _____, FAYE, F. G., y MALLICK, R. N. Soil-water relations in upland rice. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 168-185.
- DELAUNE, R. D., y PATRICK, Jr., W. H. Urea conversion to ammonia in water-logged soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:603-607. 1970.
- DeSOUZA, D. M., y HIROCE, R. Diagnóstico e tratamento de deficiência de zinco em solos com pH abaixo de 7. *Bragantia* 29:91-103. 1970.
- ENGLESTAD, O. P., GETSINGER, J. T., y STANGEL, P. J. Tailoring fertilizers for rice. Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Ala, 1972. 56 p.
- _____, JUGSUIJINDA, A., y DeDATTA, S. K. Response by flooded rice to phosphate rocks varying in citrate solubility. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:524-529. 1974.

- EVATT, N. S. The timing of nitrogenous fertilizer application on rice. In Symposium on the mineral nutrition of the rice plant, International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 243-254.
- FAO. Production yearbook. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1970.
- FENG, M. P., y SALDAÑA, J. L. The response of two paddy rice varieties to potash in the Dominican Republic. *Potash Rev.* 16:63. 1975. 5 p.
- GUPTA, R. K., SINGH, T. A., y GHILDYAL, B. P. Fate of native and applied phosphorus under saturated and non-saturated soil moisture conditions. *Agrochimia* 16:548-555. 1972.
- HADDAD, G. y SEGUY, L. Le riz pluvial dans le Sénégal Meridional. *Agron. Tropicale (France)* 21:419-461. 1972.
- HOSSNER, L. R., FREEOUF, J. A., y FOLSOM, B. L. Solution phosphorus concentration and growth of rice in flooded soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:405-408. 1973.
- IAEA. Rice fertilization. Tech. Repts. Ser. 108. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1970.
- IRRI. Annual reports. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1963-1973.
- ISHIZUKA, Y. Nutrient uptake at different stages of growth. In The mineral nutrition of the rice plant, International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 192-218.
- _____. Physiology of the rice plant. *Adv. Agron.* 23:241-315. 1971.
- JAGGI, I. K., y RUSSELL, M. B. Effect of moisture regimes and green manuring on ferrous iron concentration in soil and growth and yield of paddy. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 21:71-76. 1973.
- JAMISON, V. C. Changes in air-water relationships due to structural improvement of soils. *Soil Sci.* 76:143-151. 1953.
- JANA, R. K., y DeDATTA, S. K. Effects of solar energy and soil moisture tension on the nitrogen response of upland rice. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:487-497. 1971.
- _____, y GHILDYAL, B. P. Effect of varying soil water regimes during the different growth phases on the yield of winter rice. *II Riso* 21:93-95. 1972.
- KAMPEN, J. y LEVINE, G. Water losses and water balance studies in Philippine lowland rice irrigations. *Philipp. Agr.* 54:283-301. 1970.
- KAR, S. y VARADE, S. B. Influence of mechanical impedance on rice seedling root growth. *Agron. J.* 64:80-82. 1972.
- FREITAS, J. A. C. de, BRAGA, J. M., BRANDAO, S. S., y GOMES, F. B. Adubação mineral (NPK) de arroz em solos da região do Maranhão. *Experientiae* 15:291-313. 1973.
- GHILDYAL, B. P. Soil and water management for increased water and fertilizer use efficiency for rice production. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:499-509. 1971.
- GIORDANO, P. M., y MORDVEDT, J. J. Rice response to zinc in flooded and non-flooded soil. *Agron. J.* 64:521-523. 1972.
- _____, _____. Zinc sources and methods of application for rice. *Agron. J.* 65:51-53. 1973.
- KASS, D. L., FURLAN, J., PACE, J. B., COUTO, W. S., y CRUZ, E. de S. Adubação de arroz de sequeiro em Latosol amarelo na Zona Bragantina. Instituto de Pesquisas Agropecuarias do Norte, Belém, Pará, Brasil, 1973. 25 p.

- KASS, D. L., DaPONTE, N. T., FURLAN, J. et al. Some agronomic and economic aspects of rice culture in the Brazilian Amazon. Instituto de Pesquisas Agropecuarias do Norte, Belém, Pará, Brasil, 1974. 24 p.
- KAWAGUCHI, K., KITA, K., y KYUMA, K. A soil core sampler for paddy soils and some physical properties of the soil under waterlogged conditions. *Soil Plant Food* 2:92-95. 1956.
- _____, y KITA, K. Mechanical and chemical constituents of water-stable aggregates of paddy soils in relationship to aggregate size. *Soil Plant Food* 3:22-28. 1957.
- _____, y KAWACHI, T. Cation exchange reactions in submerged soil. *J. Sci. Soil Manure (Japan)* 40:89-95. 1969.
- KAWANO, K., SANCHEZ, P. A., NUREÑA, M. A., y VELEZ, J. R. Upland rice in the Peruvian Jungle. In *Rice breeding*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 637-643.
- KELLEY, O. J. Requirement and availability of soil water. *Adv. Agron.* 6:67-94. 1954.
- KEMMLER, G. Response of high yielding paddy varieties to potassium, experimental results from various rice growing countries. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:391-406. 1971.
- KITA, K. y KAWAGUCHI, K. The effects of both the reduction of the soil under water-logged conditions and the dehydration of the reduced soil upon soil structure. *J. Sci. Soil Manure (Japan)* 31:355-379, 495-498. 1960.
- KOENIGS, F. F. R. The mechanical stability of clay soils as influenced by moisture conditions and some other factors. Centre for Agricultural Publications and Documentation no. 67.7, Wageningen, Netherlands, 1961. 71 p.
- _____. The puddling of clay soils. *Netherl. J. Agr. Sci.* 11:145-156. 1963.
- KOYAMA, T. y CHAMMEK, C. Soil-plant nutrition studies on tropical rice. I. Studies on varietal differences in absorbing phosphorus from soils low in available phosphorus. *Soil Sci. Plant Nutr.* 17:115-126. 1971.
- KRUPP, H. K., ABILAY, W. P., y ALVAREZ, E. I. Some water stress effects on rice. In *Rice breeding*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 663-675.
- KUMAR, V., MAHAJAN, K. T., VARADE, S. B., et al. Growth responses of rice to submergence, soil aeration and soil strength. *Indian J. Agr. Sci.* 41:527-534. 1971.
- KUNG, P., ATTHAYODHIN, C., y KRUTHABANDHI, S. Determining water requirement of rice by field measurement in Thailand. *Int. Rice Comm. Newsletter* 19(4):5-18. 1965.
- LAL, R., y MOOMAW, J. C. Effect of different soil moisture regime on the growth and development of rice. International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, 1972.
- LUXMOORE, R. J., y STOLZY, L. H. Oxygen diffusion in the soil-plant system. VI. A synopsis with commentary. *Agron. J.* 64:725-729. 1972.
- MacRAE, I. C., ANCAJAS, R. R., y SALANDANAN, S. The fate of nitrogen in some tropical soils following submergence. *Soil Sci.* 105:327-334. 1968.
- MAHAPATRA, I. C., y PATRICK, Jr., W. H. Evaluation of phosphate fertility in water-logged soils. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:53-61. 1971.
- MANDAL, L. N., y KHAN, S. K. Release of phosphorus from insoluble phosphatic materials in acidic lowland rice soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 20:19-25. 1972.

- MATSUSHIMA, S. Nutrient requirements at different stages of growth. In *The mineral nutrition of the rice plant*, International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 219-242.
- MIKKLESEN, D. S., y FINFROCK, D. C. Availability of ammoniacal nitrogen to lowland rice as influenced by fertilizer placement. *Agron. J.* 49:296-300. 1957.
- _____, y PATRICK, Jr., W. H. Fertilizer use on rice. In *Changing patterns in fertilizer use*. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1968. pp. 403-432.
- NAPHADE, J. D., y GHILDYAL, B. P. Influence of puddling and water regimes on soil characteristics, ion uptake and rice growth. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:511-517. 1971.
- NHUNG, M. T., y PONNAMPERUMA, F. N. Effect of calcium carbonate, manganese dioxide and ferric hydroxide on chemical and electrochemical changes and the growth of rice on a flooded acid sulphate soil. *Soil Sci.* 102:29-41. 1966.
- NICOU, R., SEGUY, L., y HADDAD, G. Comparision de l'enracinement de quatre varietes du riz pluvial en presence on absence de travail du sol. *Agron. Tropicale (France)* 8:639-659. 1970.
- NOJIMA, K. Irrigation and drainage. In K. Matsubayashi et al. (eds.). *Theory and practice of growing rice*. Japan Ministry of Agriculture and Forestry, Tokyo, 1963. pp. 399-423.
- NOVAIS, R. F., y DEFELIPO, B. V. Níveis ótimos de NPK na adubação de arroz de sequeiro em um solo de cerrado de Patos de Minas. *Experientiae* 11:281-296. 1971.
- OKAJIMA, H., MANNIKAR, N. D., y RAO, M. J. Iron chlorosis of rice seedlings in calcareous soils under upland conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 16:128-132. 1970.
- OKUDA, A. y TAKAHASHI, E. The role of silicon. In *The mineral nutrition of the rice plant*, International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 123-146.
- PANDE, H. K., y ADAK, N. K. Leaching loss of nitrogen in submerged rice cultivation. *Exptal. Agr.* 7:329-336. 1971.
- _____, y MITTRA, B. N. Effects of depth of submergence, fertilization and cultivation on water requirement and yield of rice. *Exptal. Agr.* 7:241-248. 1971.
- PATNAIK, S. y BROADBENT, F. E. Utilization of tracer N by rice in relation to the time of application. *Agron. J.* 59:287-288. 1967.
- PATRICK, W. H., Jr., y WYATT, R. Soil nitrogen loss as a result of alternate submergence and drying. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:647-653. 1964.
- _____, y MAHAPATRA, I. C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Adv. Agron.* 20:323-359. 1968.
- _____, y MIKKLESEN, D. S. Plant nutrient behavior in flooded soil. In R. A. Olsen (ed.). *Fertilizer technology and use*, 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisc., 1971. pp. 187-215.
- _____, y DELAUNE, R. D. Characterization of the oxidized and reduced zones in flooded soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:573-576. 1972.
- _____, y TUSNEEM, M. E. Nitrogen loss from flooded soil. *Ecology* 53:735-737. 1972.
- _____, y KHALID, R. A. Phosphate release and sorption by soils and sediments: effect of aerobic and anaerobic conditions. *Science* 186:53-55. 1974.

- PEARSON, G. A., y AYRES, A. D. Rice as a crop for salt-affected soils in process of reclamation. U.S. Dept. Agr. Res. Service, Production Res. Rept. 43. 1960.
- PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils in relation to the growth and yield of rice. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y. 1955, 414 p.
- _____. Dynamic aspects of flooded soils and the nutrition of the rice plant. In *The mineral nutrition of the rice plant*, International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1965. pp. 295-328.
- _____. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24:29-96. 1972.
- _____, y CASTRO, R. U. Varietal differences in resistance to adverse soil conditions. In *Rice breeding*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 677-684.
- RACHO, V. V., y DeDATTA, S. K. Nitrogen economy of cropped and uncropped flooded soil under field conditions. *Soil Sci.* 105:417-427. 1968.
- ROBINSON, D. O., y PAGE, J. P. Soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 15:25-29. 1951.
- SALINAS, J. G., y SANCHEZ, P. A. Soil-plant relationships affecting varietal and species differences in tolerance to low available soil phosphorus. *Ciência é Cultura (Brazil)* 28:156-168. 1976.
- SANCHEZ, P. A. Rice performance under puddled and granulated soil cropping systems in Southeast Asia. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y., 1968. 381 p.
- _____, y CALDERON, M. V. Timing of nitrogen applications for rice grown under intermittent flooding in the Coast of Peru. *Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. (New Delhi)* 1:595-602. 1971.
- _____. Nitrogen fertilization and management of tropical rice. *North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 213. 1972a.
- _____. Técnicas agronómicas para optimizar el potencial productivo de las nuevas variedades de arroz en América Latina. In *Políticas arroceras en América Latina*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1972b. pp. 27-43.
- _____, y NUREÑA, M. A. Upland rice improvement under shifting cultivation systems in the Amazon Basin of Peru. *North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 210. 1972.
- _____. Puddling tropical rice soils. I. Growth and nutritional aspects. II. Effects of water losses. *Soil Sci.* 115:149-158, 303-308. 1973.
- _____, y BRIONES, A. M. Phosphorus availability of some Philippine rice soils as affected by soil and water management practices. *Agron. J.* 65:266-278. 1973.
- _____, RAMIREZ, G. E., y CALDERON, M. B. de. Rice response to nitrogen under high solar radiation and intermittent flooding in Peru. *Agron. J.* 65:523-529. 1973a.
- _____, GAVIDIA, A., RAMIREZ, G. E., VERGARA, R., y MINGUILLO, F. Performance of sulfur-coated urea under intermittently flooded rice culture in Peru. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:789-792. 1973b.
- _____, RAMIREZ, G. E., y PEREZ, C. Influence of solar radiation on the varietal response of rice to nitrogen in the coast of Peru. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 246-257.

- SAVANT, N. K., y KIBE, M. M. Influence of continuous submergence on pH, exchange acidity and pH-dependent acidity in rice soils. *Plant and Soil* 32:205-208. 1971.
- _____, y KIBE, M. M. Influence of added calcium hidroxide in submerged and subsequently acid lateritic rice soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:529-531. 1972.
- SIMS, S. L., HALL, V. L., y JOHNSTON, T. H. Timing of nitrogen fertilization of rice. I. Effects of application near midseason and varietal performance. *Agron. J.* 59:63-66. 1967.
- SINGLACHAR, M. A., y SAMANIEGO, R. Effect of flooding and cropping on the changes in the inorganic phosphate fractions in rice soils. *Plant and Soil* 39:351-360. 1973.
- SREENIVASAN, P. S., y BANERJEE, J. R. The influence of rainfall on the yield of rainfed rice at Karjat. *Agr. Meteorol.* 11:285-292. 1973.
- STOUT, B. A. Equipment for rice production. *FAO Agr. Dev. Paper* 84. 1966. 169 p.
- TANAKA, A., NAVASERO, S. A., GARCIA, C. V., PARAO, F. T., y RAMIREZ, E. Growth habit of the rice plant in the tropics and its effect on nitrogen response. *IRRI Tech. Bull.* 3. 1964.
- _____, GARCIA, C. V., y DIEM, N. T. Studies on the relationship between tillering and nitrogen uptake by the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 11:9-13. 1965.
- _____, KAWANO, K., y YAMAGUCHI, J. Photosynthesis, respiration, and plant type of the tropical rice plant. *IRRI Tech. Bull.* 7. 1966.
- _____, y NAVASERO, S. A. Interaction between iron and manganese in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 12:197-201. 1966.
- _____, y PARK, Y. D. Significance of the adsorption and distribution of silica in the growth of the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 12:191-195. 1966.
- _____. Physiological basis for fertilizer response of rice varieties. *Japan Min. Agr. For. Trop. Agr. Res. Ser.* 3:37-43. 1969.
- _____, y YOSHIDA, S. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. *IRRI Tech. Bull.* 10. 1970.
- _____, y TADANO, T. Potassium in relation to iron toxicity of the rice plant. *Potash Rev. Sub.* 9 (Suite 20) 1972. pp. 1-2.
- TAYLOR, H. M. Effect of dryng on water retention of a puddled soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:972-973. 1972.
- TURNER, F. T., y GILLIAM, J. W. Diffusion as a factor affecting the availability of phosphorus in flooded soils. *Plant and Soil*, 1976. (In press).
- TUSNEEM, M. E. Availability and transformation of phosphorus fertilizers in submerged and non-submerged soils. M.S. Thesis, University of the Philippines, Los Baños, 1967. 151 p.
- _____, y PATRICK, Jr., W. H. Nitrogen transformation in water-logged soils. *Louisiana Agr. Exp. Sta. Bull.* 657. 1971.
- WESTFALL, D. G. The efficiency of applied N in rice-producing soils. *Rice J.* 72(7):66-67. 1969.
- WICKHAM, T. H. Water management in the humid tropics: a farm-level analysis. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y., 1971. 269 p.
- WILLIAMS, B. C., y PATRICK, Jr., W. H. Dissolution of complex ferric phosphates under controlled Eh and pH conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:33-36. 1973.
- YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of soil erosion losses. *J. Amer. Soc. Agr.* 20:337-351. 1936.

- YOSHIDA, S. Some problems of iron nutrition in higher plants. Unpublished seminar presented at the Soils Department, College of Agriculture, University of the Philippines, March 15, 1967, 1967. 7 p.
- _____, McLEAN, G. W., SHAFI, M., y MUELLER, K. E. Effects of different methods of zinc application on growth and yields of rice in a calcareous soil. West Pakistan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 16:147-149. 1970.
- _____, y FORNO, D. A. Zinc deficiency of the rice plant on calcareous and neutral soils in the Philippines. *Soil Sci. Plant Nutr.* 17:83-87. 1971.
- YOSHIDA, T. y ANCAJAS, R. R. Nitrogen fixing activity in upland and flooded rice fields. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:42-46. 1973.

CAPITULO 12

MANEJO DEL SUELO EN SISTEMAS DE CULTIVOS MULTIPLES

Los cultivos múltiples, o sea la producción de dos o más cultivos en el mismo terreno durante un año, es una forma común de agricultura en los trópicos. Durante siglos los agricultores han aprovechado la ventaja de altas temperaturas y radiación solar durante todo el año, así como la disponibilidad de agua en los regímenes údicos de humedad del suelo. Los cultivos múltiples también se emplean en áreas ústicas y arídicas durante la estación lluviosa o durante todo el año con irrigación.

Los investigadores agrícolas han considerado las mezclas de cultivos hechos al azar como primitivos y desordenados (Jolly, 1958; Grimes, 1963). Algunos de estos sistemas son tan diametralmente opuestos a los monocultivos en hileras espaciadas uniformemente que los agrónomos no familiarizados con ellos tienden inmediatamente a reemplazar las mezclas con cultivos puros. En una revisión sobre los sistemas de cultivo en los trópicos, Wood (1934) reconoció que en un campo de pequeños agricultores, predominan las mezclas de cultivos. Los cultivos múltiples también reflejan la naturaleza, ya que es raro encontrar una sola especie en la vegetación natural (Trowse, 1975). Wood informó que muchas mezclas de cultivos usadas por pequeños agricultores son más productivas debido a una mejor utilización del espacio y del tiempo. Sin embargo, las dificultades para mecanizar las operaciones constituyen un factor limitante importante. La teoría de Wood es que las mezclas de cultivos pueden haber sido la forma original de agricultura, pero la cosecha con guadañas y luego con combinadas favorecieron el cambio hacia monocultivos. El establecimiento de una sucesión definida de monocultivos condujo eventualmente a la rotación de cultivos, principio básico de producción agrícola en la zona templada.

A pesar de algunos estudios antiguos subrayando la importancia de los cultivos múltiples (Aiyer, 1949; Anderson, 1950; Iso, 1954; Abeyratne, 1956), agrónomos investigadores ignoran los cultivos múltiples hasta que el trabajo de Bradfield (1964, 1969, 1970, 1972) en Filipinas atrajo atención internacional. Desde entonces una verda-

dera explosión de investigación se ha llevado a cabo a través de los trópicos y aún en Estados Unidos. Aprovechando la menor duración del crecimiento y la insensibilidad al fotoperiodismo de las nuevas variedades de trigo y arroz de la "revolución verde", áreas de India que sólo sembraban un cultivo por año están sembrando ahora dos o tres (Kanwar y Krishnamoorthy, 1971; IARI, 1972). Los sistemas más complejos de cultivos intercalados están siendo estudiados y mejorados en muchas instituciones de investigación.

El manejo del suelo es distinto con cultivos múltiples que con monocultivos. Este capítulo hace un examen de lo que se sabe acerca del manejo del suelo en diversas formas de los sistemas de cultivos múltiples y su relación con las operaciones agrícolas en pequeña escala. Se describen detalladamente las distintas formas de cultivos múltiples para aclarar sus diferencias y las consecuencias del manejo respectivo.

SISTEMAS DE CULTIVOS MÚLTIPLES Y DE PEQUEÑA AGRICULTURA

Hardwood y Price (1976) mostraron que la extensión e importancia de los cultivos múltiples crece conforme el tamaño de las fincas disminuye. Además, cuanto más pequeña es la finca, tanto más complicada es la combinación de cultivos. Por lo tanto, un examen del concepto de "sistemas de pequeña agricultura" es oportuno.

SISTEMAS DE PEQUEÑA AGRICULTURA

Una finca pequeña puede definirse como una operación agrícola basada principalmente en la mano de obra familiar o tracción animal, en que una gran proporción de lo producido es consumido por la familia, pero una parte es vendida o permutada en los mercados cercanos. Esta definición tiene tres componentes claves: primero, la mayor parte del trabajo no es mecanizado, aún cuando puede haber cierto grado de mecanización, como por ejemplo, el contrato de un tractor para arar o el uso de tractores de mano, que en parte reemplazan la fuerza animal; segundo, una proporción de lo que se produce se vende en el mercado. (Este autor aún no ha visto una verdadera finca de subsistencia en los trópicos en que la familia consuma únicamente lo que cultiva y no haga permutas ni compras. Por otra parte, las fincas en que apenas una pequeña parte de su producción es para el consumo de la familia, no se ajusta a esta definición cualquiera que sea su tamaño); tercero, la presencia de mercados cercanos a donde se pueden llevar los productos a pie o con tracción animal. Esto excluye a grandes fincas ganaderas en áreas relativamente aisladas como los Llanos Orientales de Colombia, que de otra manera se ajustarían a esta definición. Por lo tanto, los sistemas de pequeña agricultura se

definen no por el tamaño específico de las fincas sino por la naturaleza de las operaciones.

Con excepción de las áreas arroceras de Asia, la contribución de los sistemas de pequeña agricultura a la producción nacional de alimentos se ha considerado marginal. Las fincas comerciales más visibles tradicionalmente se han considerado como las mayores productoras de alimentos. Muchas fincas comerciales producen productos de exportación o productos no alimenticios de lujo como cacao y algodón, principalmente como fuentes de divisas extranjeras o de materias primas. Sin embargo, estudios llevados a cabo en Colombia y América Central, muestran que alrededor del 70% de los alimentos consumidos en esos países es producido en pequeñas fincas (CATIE, 1974; Pinchinat et al, 1976).

El tipo de fincas pequeñas es el más numeroso en los trópicos. En Asia tropical, el 75% de las fincas son menores de 2 ha. (Harwood y Price, 1976), y en América Central, el 69% son menores de 5 ha, según cálculos con datos presentados por CATIE (1974). El tamaño promedio de las fincas de 20 países africanos tropicales que presentaron datos en el "Production Yearbook" de FAO de 1973, era de 5,4 ha.

El número de combinaciones de cultivos múltiples en uso actual en los trópicos debe ser enorme. Muchos de ellos han sido descritos por Blencowe y Blencowe (1970) de Malasia; IARI (1972) de India; ASPAC (1974) de Taiwán; IRRI (1975) y Harwood y Price (1976) de Asia tropical; Pinchinat et al, (1976) de América tropical; Okigbo y Greenland (1976) de África tropical; y Dalrymple (1971), Hart (1974), y Andrews y Kassan (1976) en base mundial. Los cultivos anuales se combinan con otros también anuales y con perennes. Generalmente un cultivo alimenticio dominante o principal está bien definido para regiones agro ecológicas. Puede ser arroz, yuca, o cacao en tierras bajas údicas, maíz para tierras bajas ústicas o de altura moderada, trigo en las tierras altas más frescas, y sorgo o mijo en las áreas áridicas. Diariamente los pequeños agricultores están haciendo decisiones muy complejas y refinadas, que pueden ser analizadas por programación lineal (Harwood y Price, 1976).

CLASIFICACION DE SISTEMAS DE CULTIVOS MULTIPLES

La esencia de los cultivos múltiples es la intensificación de la producción de cosechas en una tercera y una cuarta dimensión (la primera dimensión: área en producción; la segunda: rendimiento por unidad de área). Los cultivos múltiples introducen el tiempo como una tercera dimensión, y el espacio como una cuarta, cuando dos cultivos comparten una misma área de tierra al mismo tiempo. Los sistemas de cultivos múltiples se pueden clasificar de acuerdo con el grado de

intensificación en tiempo y espacio. El Cuadro 12.1 muestra un sistema de clasificación propuesto. Se hace una distinción importante entre cultivos intercalados, en que dos o más cultivos crecen simultáneamente y cultivos secuenciales en que dos o más cultivos se siembran uno después de otro durante el año. Estas diferencias son suficientemente fundamentales para necesitar discusiones separadas. El Cuadro 12.2 define algunos términos adicionales que se usan en relación con los sistemas de cultivos múltiples.

CUADRO No. 12.1. Definición de los patrones principales de cultivos múltiples. (Fuente: Andrews y Kassam, 1976).

Tipos de cultivo	Definición
Cultivos múltiples:	La intensificación de los cultivos en dimensiones de tiempo y espacio. Dos o más cultivos se siembran en el mismo campo al año.
Cultivos intercalados:	siembra de dos o más cultivos simultáneamente en el mismo campo al año. La intensificación del cultivo es tanto en dimensiones de tiempo como de espacio. Hay competencia entre cultivos durante parte o todo el período de crecimiento. Los agricultores manejan más de un cultivo a la vez en el mismo campo.
Cultivos intercalados mixtos:	siembra de dos o más cultivos simultáneamente sin arreglo en hileras.
Cultivos intercalados por hileras:	siembra de dos o más cultivos simultáneamente con uno o varios cultivos en hileras.
Cultivos intercalados por franjas:	siembra de dos o más cultivos simultáneamente en diferentes franjas lo suficiente anchas para que permitan cultivo independiente, pero lo bastante angostas para que permitan que los cultivos interactúen agrónomicamente.
Cultivos intercalados de relevo:	siembra de dos o más cultivos simultáneamente durante parte del ciclo de vida de cada uno. Un segundo cultivo se siembra una vez que el primero ha llegado a su etapa reproductiva de crecimiento, pero antes de que esté listo para cosechas.

CUADRO No. 12.1. Cont.

Tipos de cultivo	Definición
Cultivos secuenciales:	siembra de dos o más cultivos en secuencia en el mismo campo por año. El cultivo subsiguiente se siembra una vez que el anterior se haya cosechado. La intensificación de cultivo es sólo en la dimensión tiempo. No hay competencia, como en cultivos intercalados. Los agricultores manejan solamente un cultivo a la vez en cada campo.
Cultivo doble:	siembra de dos cultivos al año en secuencia.
Cultivo triple:	siembra de tres cultivos al año en secuencia.
Cultivo cuádruple:	siembra de cuatro cultivos al año en secuencia.
Cultivo de retoños (o seca):	cultivo de los retoños del cultivo después de la cosecha, aunque no necesariamente para cosechar granos.

CUADRO No. 12.2. Terminología usada en sistemas de cultivos múltiples. (Fuente: adaptado de Andrews y Kassam, 1976).

Términos	Definición
Cultivo puro:	siembra de una sola especie con densidad normal. Sinónimo de "plantación sólida", "cultivo único". Contrario a cultivos múltiples.
Monocultivo:	la siembra repetida del mismo cultivo en el mismo terreno.
Rotación:	la siembra repetida de dos o más cultivos puros o combinaciones de cultivos múltiples en el mismo terreno.

Continúa en página siguiente

CUADRO No. 12.2. Cont.

Términos	Definición
Patrón de cultivo:	la secuencia anual y el arreglo especial de cultivos o cultivos y barbechos en una área dada.
Sistema de cultivo:	patrones de cultivo usados en una finca y sus interacciones con otros recursos de la finca, otras empresas agrícolas y tecnología disponible que determina el conjunto.
Cultivo mixto:	sistemas de cultivo que incluyen cultivos y animales.
Índice de cultivo:	número de cultivos sembrados por año en una área dada de tierra x 100.
Rendimiento relativo Total (RRT):	suma de rendimientos de cultivos intercalados dividida por el rendimiento de cultivos puros. El mismo concepto que la razón de equivalencia de la tierra. El rendimiento puede medirse como producción de materia seca, cantidad de granos, absorción de nutrientes, producción de energía o de proteínas, así como por el valor de las cosechas en el mercado.
Razón de equivalencia de la tierra (RET):	razón del área necesaria con un cultivo puro a la necesaria con cultivos múltiples para obtener cantidades iguales de rendimiento con los mismos niveles de manejo. Es la suma de las fracciones de los rendimientos de los cultivos intercalados relativos a los correspondientes rendimientos de los cultivos puros.
Razón de equivalencia del ingreso (REI):	razón del área necesaria con un sólo cultivo para producir el mismo ingreso bruto que se obtiene de una hectárea de intercultivos con el mismo nivel de manejo. La REI es la conversión de la RET a términos económicos.

SISTEMAS DE CULTIVOS INTERCALADOS

Los cultivos intercalados, consisten en la siembra simultánea de dos o más cultivos en el mismo campo y al mismo tiempo. A diferencia de cultivos secuenciales, en que la intensificación es en la dimensión del tiempo, los cultivos intercalados involucran intensificación tanto en espacio como en tiempo. Los agricultores emplean los cultivos intercalados cuando pueden obtener mayor rendimiento sembrando una mezcla de cultivos que el que obtendrían dividiendo el área en cultivos puros separados.

CONCEPTOS BASICOS DE COMPETENCIA EN CULTIVOS INTERCALADOS

Un examen de algunos de los conceptos sobre cómo reaccionan las plantas en mezclas es un primer paso en la comprensión de cultivos intercalados. Los botánicos definen "interferencia de las plantas" como la respuesta de una planta individual o una especie a su medio ambiente modificado por la presencia de otra planta individual u otra especie (Hall, 1974a, b; Trenbath, 1974). Tal interferencia puede ser no competitiva, competitiva o complementaria. La interferencia no competitiva ocurre cuando distintas plantas comparten un factor de crecimiento (luz, agua, nutrimentos) que está presente en cantidad suficiente para no ser limitante. Los rendimientos de las plantas no se afectan con este tipo de interferencia. Interferencia competitiva o simplemente competencia, es cuando uno o más factores de crecimiento son limitantes. En tales casos la planta o especie mejor equipada para utilizar un factor de crecimiento, aumenta su rendimiento a expensas de la otra planta o especie, la cual sufre una disminución de rendimiento. Interferencia complementaria ocurre cuando una planta ayuda a otra, como en el caso de leguminosas que suplen nitrógeno a los pastos por vía de fijación simbiótica. En sistemas de intercultivos ocurre interferencia entre plantas de la misma especie en cultivo puro y entre plantas de la misma y de diferente especie en sistemas intercalados.

La comprensión de la interferencia de las plantas se ha desarrollado principalmente por medio del estudio de las pasturas con gramíneas y leguminosas y mezclas varietales de especies cultivables. Revisiones de Hall (1974a,b), Hart (1974) y Trenbath (1974) proporcionan ideas sobre los cultivos intercalados. Trenbath compiló los resultados de 572 comparaciones de mezclas varietales o de especies con cultivos puros en que no se incluían mezclas con leguminosas. Sus resultados, que se presentan en la Fig. 12.1, indican que dos terceras partes de los casos tuvieron rendimiento relativo total (RRT) en producción de materia seca alrededor de 1,0, lo que sugiere que no hubo ventaja con las mezclas. La Fig. 12.1 también muestra que el 20% de las mezclas tuvo valores de RRT con un ámbito de 1,1 a 1,7,

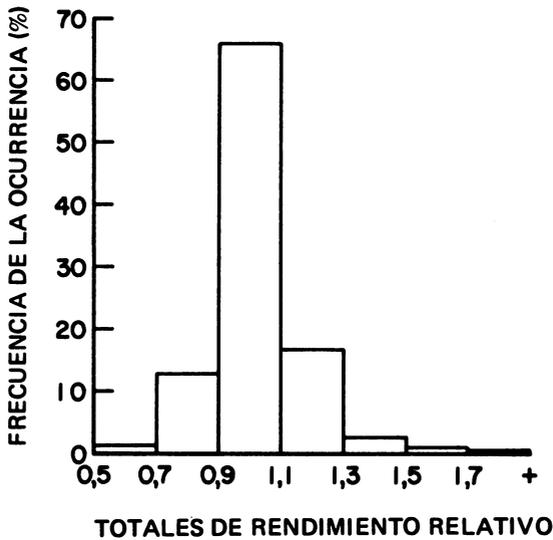


Fig. 12.1. Distribución de los totales de rendimientos relativos de mezclas, con base en la producción de materia seca de 572 experimentos publicados; se excluyen las mezclas de leguminosas y pastos. (Fuente: adaptado de Trenbath, 1974).

que indica ventajas de intercalar y que el 14% tuvo valores de RRT menores de 0,9, indicando desventajas claras. Esta es casi una distribución normal de frecuencia, con la gran mayoría de casos con poca o ninguna ventaja de los cultivos intercalados.

Los agricultores han seleccionado combinaciones en el extremo más alto de esta distribución de frecuencia. Una revisión de Andrews y Kassam (1976) muestra que los valores de RRT obtenidos en los campos de los agricultores con mezclas de dos cultivos, medidas en términos de rendimientos de valor económico (no como materia seca total), tuvieron un ámbito de 1,2 a 1,6. En estaciones experimentales se han obtenido valores de RRT tan altos como 2,4. En el Cuadro 12.3 se resumen algunos ejemplos de combinaciones satisfactorias de cultivos intercalados, en que los valores de RRT se expresan en términos de rendimientos (RET) y de ingreso bruto (REI). Estos ejemplos ponen de manifiesto que una hectárea de cultivos intercalados puede producir del 24 al 82% más de rendimiento total que dos medias hectáreas de cultivos puros, y aumentos similares en ingreso bruto. Cuando tres o cuatro cultivos se intercalan, los valores de RRT aumentan todavía más (Soria et al, 1975).

Las ventajas de rendimiento de buenos sistemas intercalados están probablemente relacionadas con la minimización de la competencia interespecífica por luz, agua y nutrimentos. Algunas mezclas de cultivos permanentes de porte alto con cultivos bajos amantes de la

CUADRO No. 12.3. Ejemplos del efecto de cultivos intercalados en varias localidades. (Fuente: Lépiz (1971), Evans (1960), Cordero y MacCollum (sin publicar), IIRI (1972), Krutman (1968), Dalal (1974) y Hunter y Camacho (1961).

Tipo	Cultivos A-B	Lugar	Rendimientos (ton/ha)				Razón de equivalencia de la tierra (RET)	Razón de equivalencia del ingreso (REI)
			Cultivos puros		Cultivos intercalados			
			Cultivo A	Cultivo B	Cultivo A	Cultivo B		
Relevo	Maíz-frijoles	México	2,05	0,84	1,53	0,48	1,33	1,34
Mixto	Maíz-maní	Tanzania	1,73	0,83	1,68	0,42	1,48	—
Hileras	Maíz-frijol mungo	Filipinas	2,43	1,17	1,85	0,90	1,53	1,45
Hileras	Maíz-soya	Carolina del Norte, E.U.A.	6,77	2,69	5,27	1,69	1,40	1,34
Hileras	Caña de azúcar-caupí	Brasil	1,41	1,36	1,41	1,35	2,00	—
Hileras	Maíz-algodón	Kenia	3,05	1,51	2,65	0,56	1,24	1,06
Hileras	Maíz-gandul	Trinidad	3,13	1,87	2,61	1,85	1,82	—
Mixto	Cacao-caucho	Costa Rica	—	1,28	0,93	0,69	—	1,35



Fig. 12.2. Cultivos intercalados de ñame, yuca, maíz y algunas legumbres en las cercanías de Ibadán, Nigeria.

sombra, tales como caucho sobre café, probablemente se aproxima a este ideal por cuanto no compiten por luz y aparentemente tampoco por agua y nutrimentos en forma significativa. Hart (1974) cita varios ejemplos en que los valores de RRT sobrepasaron 2,0.

Sin embargo la situación más común involucra cierto grado de competencia entre especies, la que resulta en una disminución del rendimiento por hectárea de ambos cultivos con relación a cultivos puros, aunque los valores de RRT sean superiores a 1,0. La competencia se minimiza mediante el uso de especies compatibles y manipulando la época de siembra, la población, el espaciamiento y otras variables en las diferentes formas de intercultivos, que se discuten en la sección siguiente.

CULTIVOS INTERCALADOS MIXTOS

Los cultivos intercalados mixtos comprenden un conjunto amplio de arreglos aparentemente al azar de varios cultivos en un mismo campo. El término “aparentemente” merece énfasis por cuanto tales diseños realmente reflejan la experiencia de los agricultores, y en muchos casos conceptos refinados de espaciamiento de plantas. Los cultivos intercalados mixtos son comunes cuando cereales, leguminosas de grano, y cultivos de raíces se siembran juntos, sin hacer labranza del suelo. Por ejemplo, en la región amazónica los agricultores

siembran simultáneamente arroz de secano, yuca y plátanos. El arroz, que se cosecha de primero, se siembra a intervalos de aproximadamente 50 cm que es el espaciamiento correcto para variedades de arroz alto susceptible a la tumbada. Legumbres más precoces pueden plantarse a menor distancia y cosecharse aún antes del arroz. La yuca se siembra con un espaciamiento de 1 a 2 cm, el cual permite un desarrollo satisfactorio del follaje después que el arroz ha sido cosechado. Los plátanos se siembran a distancias de 3 a 5 m, dando por resultado un dosel adecuado de los plátanos después de la cosecha de la yuca. Legumbres o leguminosas de grano tolerantes a la sombra pueden sembrarse después del arroz o la yuca para utilizar el espacio disponible bajo los cultivos más altos.

Las diferencias en el tamaño de las plantas y la duración del crecimiento probablemente disminuyen la competencia por radiación solar. El follaje del arroz se desarrolla con poca interferencia de la yuca y los plátanos que crecen lentamente. Después de cosechado el arroz, la yuca se torna dominante; después de que ésta se cosecha los plátanos toman posesión. En esencia este sistema imita las sucesiones naturales del recrecimiento del bosque. La competencia por agua y nutrimentos también se reducen al mínimo al sembrar el cultivo más exigente (arroz primero). Cuando la disponibilidad de algún nutrimento es baja, los agricultores aumentan el espaciamiento entre plantas para reducir la competencia. Hart (1974) trabajando con un sistema mixto de frijol, maíz y yuca en Costa Rica, obtuvo valores de



Fig. 12.3. Intersiembras por hileras de maíz, algodón e higerilla en las cercanías de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

RRT de 1,37 en los rendimientos y de 1,30 en ingreso neto, en comparación con la siembra de los tres cultivos solos.

En algunas partes de Africa Occidental los cultivos mixtos se ponen en montículos o en lomos de suelo hechos con azadones. Varios cultivos se siembran en diferentes partes de los montones (Okigbo y Greenland, 1976). Se cree que el amontonamiento de la tierra es beneficioso por cuanto aumenta el volumen de suelo disponible para los cultivos de raíces en Alfisoles, en los que el subsuelo es a menudo cascajoso o plintítico. La yuca y el ñame se siembran en la parte superior del montón; el maíz y otros cultivos que requieren buen drenaje se siembran en los lados, mientras que el arroz que prospera con drenaje deficiente, ocupa los espacios entre los montones en los que el agua tiende a acumularse. Aunque existen pocos datos cuantitativos sobre tales sistemas, estos arreglos siguen los conceptos de minimizar la competencia y de alterar los ambientes de las raíces de la manera más favorable para los diversos cultivos.

CULTIVOS INTERCALADOS EN HILERAS

Esto se presenta cuando dos o más cultivos se siembran más o menos al mismo tiempo en hileras cercanas unas a otras. La inter-siembra por hileras es común en áreas con labranza y es quizás el concepto central de los cultivos intercalados. La competencia entre especies por luz, agua y nutrimentos es en base a hileras, excepto cuando en una misma hilera se siembran dos cultivos. Maíz y arroz de secano se siembran corrientemente de esta manera en tierras bajas de Asia y de América Central. En tierras altas de Guatemala se siembran maíz y trigo intercalados en hileras en terrazas; sorgo y maní en áreas ústicas y áridicas de Africa.

La inter-siembra por hileras es más ventajosa cuando se pone un cultivo de porte alto y uno de porte bajo, y cuando los cultivos tienen diferente duración de crecimiento. La competencia por luz se reduce al mínimo cuando los cultivos tienen diferentes arreglos de follaje, particularmente cuando los cultivos altos tienen un hábito de hojas más erectas y el cultivo bajo ángulos foliares más abiertos (Trenbath, 1974). Estas mezclas interceptan más radiación solar en un tiempo dado y por lo tanto su potencial fotosintético es mayor que el de cultivos puros (Alvim y Alvim, 1969; Bantilan et al, 1974). El Cuadro 12.4 muestra la mayor intercepción lumínica de las combinaciones de cultivos altos y bajos, cuando el cultivo bajo se siembra en poblaciones compactas y el cultivo alto (maíz) se pone en hileras a diferentes espaciamientos. Además de la ventaja de interceptar más radiación solar para la fotosíntesis, hay menos luz disponible para el crecimiento de malas hierbas (Bantilan et al, 1974).

Cuando los cultivos tienen diferente duración de crecimiento, las ventajas de la inter-siembra por hileras aumentan aún más. Las etapas

CUADRO No. 12.4. Intercepción de la luz por los doseles de intersembras por hileras en comparación con cultivos puros 44 días después de la siembra, en los Baños, Filipinas. (Fuente: adaptado de Bantilan et al, 1974).

Cultivo	Intercepción de la luz (%)		
	Cultivo puro	Intersiembras en hileras con maíz a	
		1 m	2 m
Maíz		68*	43*
Camote	55	83	89
Maní	79	89	92
Frijol mungo	78	94	90

(*) Cultivo puro de maíz, en hileras espaciadas 1 y 2 m.

de demanda máxima de luz, agua y nutrimentos se presentan en diferentes momentos aunque ambos cultivos se siembren al mismo tiempo. Un ejemplo clásico es la intersiembra de maíz y frijol mungo en Filipinas (IRRI, 1973). El frijol mungo (*Phaseolus aureus*) alcanza su etapa de floración unos 35 días después de sembrado, antes de que el maíz le dé sombra. Se cosecha a los 60 días, cuando las exigencias del maíz están en su punto máximo. En la etapa de plántulas de cualquiera de estos cultivos hay poco sombreado, lo que constituye una ventaja por cuanto ambos son muy susceptibles a falta de luz. Una situación similar ocurre cuando un cultivo alto se cosecha primero como en intersiembra de maíz dulce y arroz de secano o cuando se ponen dos cultivos altos de duración de crecimiento muy diferente. Ejemplos del último tipo son la intersiembra de maíz de 128 días con gandul, de 168 días en Trinidad (Dalal, 1974), o mijo de 75 días con sorgo, de 195 días en Nigeria (Andrews, 1974). En tales casos el cultivo más tardío debe ser tolerante a la sombra y tener necesidades limitadas de nutrimentos en los períodos pico del crecimiento del primer cultivo.

La intersiembra por hileras de cultivos anuales bajo cultivos perennes es muy común. Cultivos de porte alto, como maíz, yuca y banana se siembran en plantaciones jóvenes de café o caucho para que den sombra y produzcan un ingreso mientras el cultivo permanente se desarrolla (Pushparajah y Wong, 1970; Pushparajah y Tang, 1970). La misma situación se presenta con caña de azúcar cuando simultáneamente se siembra maíz, frijoles, soya, maní, camote, arroz de secano, y hasta tabaco y se cosechan antes de que la caña de azúcar desarrolle un follaje completo (Chang, 1965; Bains et al, 1970; Streeter, 1974). Con espaciamientos y densidades de siembra normales, los rendimientos de caupí y caña de azúcar intercalados fueron

idénticos a los de monocultivos ($RRT=2,0$) en el noreste de Brasil (Krutman, 1968), y en Taiwán, la reducción en el rendimiento de caña de azúcar tuvo un ámbito de 0 a 10% cuando la caña de azúcar se intercaló con diversas especies (Chang, 1965).

Cultivos permanentes en pleno desarrollo corrientemente se intersembran con cultivos tolerantes a la sombra. El cacao, que es tolerante a la sombra, se cultiva bajo cacho (Hunter y Camacho, 1961; Elencowe y Templeton, 1970). Bajo cultivos permanentes de doseles más abiertos, como cocoteros, se pueden poner muchos cultivos (Nelliatt et al, 1974). Pasturas permanentes de gramíneas y leguminosas bajo cocoteros soportan una industria ganadera próspera en algunas partes de Asia sin que disminuya la producción de cocos (Santhirasegaram, 1967; MacEvoy, 1974). Variedades de especies de pastura han sido seleccionadas y mejoradas para este propósito (DeGuzmán, 1974; Javier, 1974). Una de las más refinadas intersembras por hileras que este autor haya observado es una combinación de tres doseles de piña, papaya y cocoteros en suelos volcánicos cerca del Lago Taal en Filipinas.

CULTIVOS INTERCALADOS EN RELEVO

En los dos sistemas discutidos antes, los cultivos se siembran aproximadamente al mismo tiempo pero se cosechan en distintas fechas debido a las diferencias en la duración del crecimiento. Cuando se siembra un segundo cultivo después de que el primero ha llegado a su fase de reproducción pero antes de su cosecha, el sistema se llama "intercalado de relevo". Un ejemplo muy común es el del sistema maíz y frijol (*Phaseolus vulgaris*) que se encuentra en casi toda la América Central así como en gran parte de América del Sur tropical. El maíz se siembra en hileras, generalmente a principios de la estación lluviosa, y aún antes en algunas partes de Guatemala. Las variedades de maíz alto y sensitivas al fotoperíodo requieren de 6 a 10 meses para madurar. Cuando las mazorcas están bien formadas pero no maduras (33 a 55% de humedad en los granos), los agricultores doblan los tallos justamente debajo de la mazorca y siembran variedades de frijoles trepadores. El maíz madura normalmente y no sufre daños fisiológicos importantes en términos de rendimiento de granos o de germinación si se cosecha hasta unas 10 semanas después de doblar los tallos (Byrd, 1967). Esto es en efecto una forma de almacenamiento en la que las mazorcas de maíz están protegidas contra la lluvia, el moho y enfermedades, al estar colgando hacia abajo. Los frijoles crecen rápidamente y aumentan su área foliar al subir por los tallos doblados del maíz. Los frijoles maduran cuando el tiempo es más seco y hay menor ataque de patógenos. Los agricultores cosechan entonces ambos cultivos a principios de la estación seca.

Las intersembras de relevo son también muy corrientes en sistemas basados en arroz en Taiwan (Shen, 1964; ASPAC, 1974). Se



Fig. 12.4. Cultivo alternado de maíz y frijoles *Phaseolus vulgaris*, en Turrialba, Costa Rica. Los tallos del maíz están doblados.

pueden cosechar hasta cinco cultivos por año mediante dos sucesiones de relevo: arroz y melones, seguidos por arroz otra vez y sembrando repollo y maíz en relevos. Un sistema de relevo muy intensivo con siete cultivos por año ha sido desarrollado por Hildebrand (1976) y lo practican pequeños agricultores salvadoreños.

A menudo se establecen pasturas bajo cereales. Esta práctica es corriente en áreas boscosas recién desmontadas donde la mayor disponibilidad de nutrimentos después de la quema se aprovecha con un cultivo comercial durante el proceso de establecimiento de la pastura. Shelton y Humphreys (1975) tuvieron éxito en el establecimiento de *Stylosanthes guianensis* bajo un cultivo de arroz de secano en pleno crecimiento sin que disminuyera el rendimiento del arroz. La interseembra de relevo en pasturas con maíz es una práctica común en la selva amazónica y en Africa Oriental (Poultney, 1963).

En las interseembras de relevo la competencia se reduce al mínimo acortando el tiempo durante el cual los dos cultivos crecen juntos. Para el buen éxito de este sistema, el cultivo que se siembra durante la fase reproductiva del anterior debe ser tolerante a la sombra del primer cultivo. La Fig. 12.5 muestra que algunos cultivos, como por ejemplo maíz, frijol mungo y soya, son muy sensibles al sombreado en sus etapas iniciales del crecimiento, mientras que otros como el sorgo y el caupí, son menos sensibles. Experimentos en Costa Rica han puesto de manifiesto que el frijol *Phaseolus vulgaris*

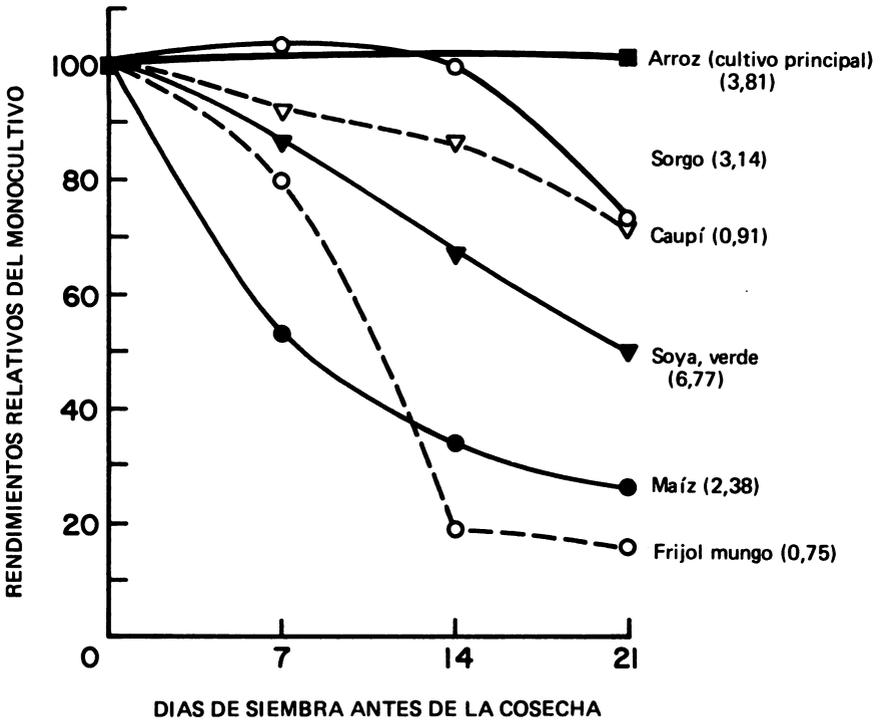


Fig. 12.5. Tolerancia relativa al sobreamiento durante el crecimiento inicial de 5 cultivos en relación con el tiempo de la siembra de relevo con arroz, en Los Baños, Filipinas. Las cifras entre paréntesis indican el rendimiento (ton/ha) cuando se sembraron como cultivos puros. (Fuente: calculado de datos de Herrera y Harwood, 1973).

realmente se beneficia con el sobreamiento en las etapas tempranas de su crecimiento (Sanabria, 1975).

Debido al menor período de competencia, las intersembras de relevo generalmente pueden dar rendimientos relativos totales mayores que las intersembras mixtas o de hileras. Herrera y Harwood (1975) obtuvieron mayores valores de RRT con intersembras de relevo de maíz y camote con un período de sobreposición de 35 días que con la siembra de ambos al mismo tiempo que resultaba en un período de sobreposición de 95 días.

CULTIVOS INTERCALADOS EN FRANJAS

Este patrón se presenta cuando cultivos individuales se siembran en el mismo campo pero en franjas lo suficiente anchas para que permitan labranza independiente, pero suficientemente cerca para que haya interacción agronómica. Esta práctica es más común en la

región templada donde se usan plantas altas, principalmente como barreras para reducir la velocidad del viento y mejorar la conservación del agua (Radke y Hagstrom, 1976). Hay poca competencia entre cultivos, excepto en las hileras borde, pero los beneficios provenientes de la protección contra el viento y de la conservación del agua pueden dar valores positivos de RRT. La Fig. 12.6 presenta ejemplos de efecto negativo de una intersembra de franjas de maíz y arroz de secano en contraste con efecto positivo de ciertas combinaciones de intersembra en hileras.

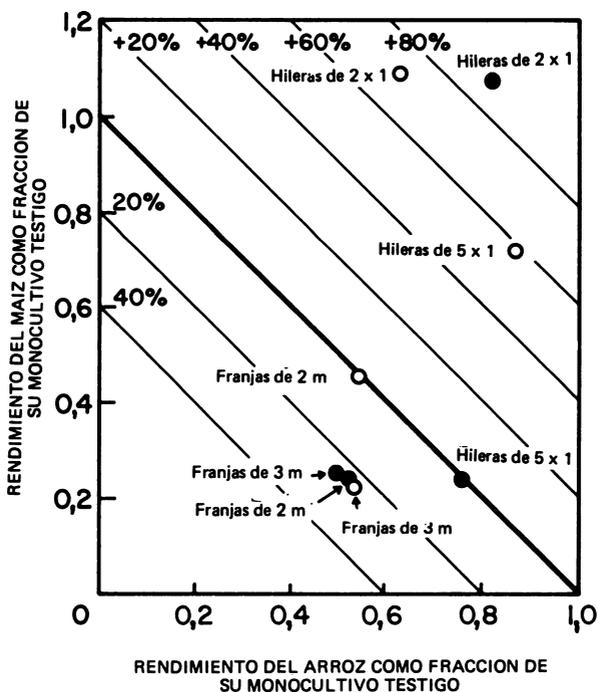


Fig. 12.6. Efecto del arreglo de hileras en la producción de una intersembra de maíz y arroz (No. de hileras de arroz x No. de hileras de maíz). Densidad del maíz: 60.000 plantas/ha (puntos blancos) y 15.000 plantas/ha (puntos negros). (Fuente: Herrera y Harwood, 1974; y IIRI, 1973).

ARREGLO DE HILERAS Y DENSIDAD DE SIEMBRA

Muchos estudios se han llevado a cabo sobre diferentes patrones de siembra, espaciamiento y densidad de siembra en un intento por comprender el comportamiento superior de los sistemas de cultivos intercalados en los campos de los agricultores y además para mejorar

su productividad. Aunque parezca increíble, en la literatura disponible solamente se ha encontrado una comparación entre intersembras mixta y por hileras. Dalal (1974) informó que la intersembranza por hileras de maíz y gandul producían un mayor RRT (1,82), en comparación con un cultivo mixto en que RRT fue de 1,57. La mayor parte de la información disponible consiste en la comparación de diferentes patrones de intersembranza por hileras o de relevo.

Trabajo experimental llevado a cabo en condiciones de buena fertilización sugiere que la productividad de los cultivos intercalados aumenta conforme aumentan las densidades de siembra de los diversos cultivos. La Fig. 12.6 presenta este efecto con arroz de secano y maíz. Cuando ambos cultivos se sembraron en franjas de 2 ó 3 m de ancho los valores fueron menores de 1,0, indicando un efecto negativo de la siembra en franjas. Conforme los cultivos se sembraron más cerca uno del otro, los valores de RRT aumentaron, hasta alcanzar niveles muy altos mayores de 1,7 cuando 2 hileras de arroz fueron intersembradas entre una de maíz con un espaciamiento de 1,4 m. Estudios en Filipinas y Nigeria también han mostrado que saltando hileras de los cultivos altos o ampliando su espaciamiento dentro de ciertos límites no disminuye su rendimiento (IRRI, 1972; Andrews, 1974). El mayor rendimiento por planta se debe al efecto de borde y compensa la disminución en la población. Cambiando el espaciamiento de las hileras de maíz de 1 a 2 m no varió el RET de intersembranzas en hileras de maíz y soya que se presentan en la Fig. 12.7.

Esta figura también subraya una limitación de RET u otros totales del rendimiento relativo; confunde las proporciones de cada cultivo. Con un espaciamiento de 1 m entre hileras el rendimiento del maíz fue casi idéntico con el de cultivos puros de maíz, mientras que el de la soya disminuyó a la mitad. Con un espaciamiento de 2 m el rendimiento del maíz fue alrededor del 70% de los valores de cultivo puro y el de soya del 80%. Ambos valores de RET fueron 1,5, pero la proporción de los cultivos varió significativamente. Resultados semejantes han sido obtenidos con otras combinaciones de cultivos intercalados por Osiru y Willey (1972), Willey y Osiru (1972), Pinchinat y Oelsigle (1974), y Francis et al, (1976).

La Fig. 12.7 muestra las ventajas de algunas combinaciones en intersembranza de relevo. En este ejemplo la soya floreció unos 30 días después de la siembra. Por lo tanto en los relevos de 20 y de 40 días, el maíz se sembró una vez que la soya entró en su fase reproductiva. La Fig. 12.7 muestra que con el relevo de maíz 20 días después de la siembra de la soya los valores de RET aumentaron hasta 1,9, pero el relevo a 40 días no fue productivo. Francis et al, (1976), en Colombia, encontraron que los valores de RET de maíz-frijoles aumentaron de 1,3 a 1,7 conforme la siembra de maíz se demoró de 0 a 15 días después de la siembra de los frijoles. Sin embargo, cuando la siembra de los frijoles se demoró de 0 a 15 días después de la siembra del maíz, el RET descendió de 1,3 a 1,1. Estos resultados sugieren

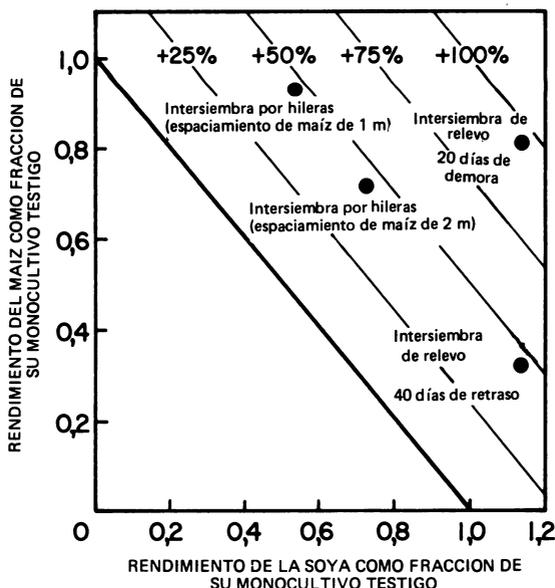


Fig. 12.7. Efecto de la intersemebra de maíz y soja con diferentes espaciamientos entre hileras y distintas demoras en la siembra de arroz dentro de la soja ya establecida. (Fuente: IRRI, 1973).

que la combinación de las fechas óptimas debe determinarse localmente.

Comparaciones entre hileras alternas, una mezcla de ambos cultivos en la misma hilera y doble hilera, sugieren que poca ventaja se logra con arreglos más complicados que el de hileras alternas (Evans, 1960; Krutman, 1968; Pinchinat y Oelsligle, 1974; Francis et al, 1976). Sin embargo, cuando se usa un cultivo como soporte de otro, como en el caso de maíz y frijoles trepadores, es beneficioso un arreglo especial de hileras diseñado para proporcionar soporte máximo, tal como el de doble hilera o a tres bolillos (Hildebrand, 1976).

Al comparar combinaciones de cultivos intercalados con cultivos puros la elección de la densidad de las plantas afectará el resultado. Cuando se usa la misma densidad de siembra los resultados pueden estar prejuiciados en favor del cultivo puro si se usa la densidad normal del cultivo puro o en favor de los tratamientos intersembrados si los cultivos puros se siembran a densidades mayores o menores de la óptima. Un ejemplo del último caso aparece en el trabajo de Soria et al (1975), en que se obtuvieron valores muy altos de RRT cuando los cultivos puros se sembraron con densidades más bajas o altas de las normales. Las comparaciones más prácticas son aquellas en que el cultivo puro y la combinación intercalada se siembran con

sus densidades y espaciamentos óptimos. Si estos parámetros no se conocen, es necesario llevar a cabo investigación para determinarlos.

Toda la información anterior se ha recolectado bajo condiciones controladas en que se cree que se elimina la competencia por agua y nutrimentos por medio de suficiente fertilización y/o irrigación. Se dispone de pocos estudios en que se comparen diversos aumentos en densidad de plantas bajo condiciones menores que las óptimas. Uno de estos trabajos, hecho en México, que se presenta en el Cuadro 12.5 muestra que triplicando la densidad de los frijoles trepadores y aumentando la del maíz en un 50% más de lo que acostumbra el agricultor, aumentó los valores de RET y casi triplicó el ingreso bruto.

CUADRO No. 12.5. Influencia del hábito de crecimiento del frijol en el comportamiento de sistemas de intersembras de maíz y frijol en Chapingo, México. (Fuente: adaptado de Lepiz, 1971).

Población de plantas (1000 pls/ha)		Tipo de frijol	Rendimiento en granos (ton/ha)		Razón de equivalencia de la tierra (RET)	Ingreso bruto (EUAS\$/ha)
Maíz	Frijol		Maíz	Frijol		
40	0		2,45	—		74
0	110	Trepador	—	1,46		90
20	20*	Trepador	1,67	0,95	1,33	124
20	60	Trepador	1,47	1,20	1,42	149
20	90	Trepador	1,40	1,30	1,46	158
30	90	Trepador	1,86	1,27	1,62	189
0	110	Arbustivo	—	1,17	1,00	53
20	20	Arbustivo	1,69	0,35	0,98	55
20	60	Arbustivo	1,86	0,55	1,23	91
20	90	Arbustivo	1,85	0,71	1,35	112
30	90	Arbustivo	2,41	0,71	1,58	139
D.M.S. _{0,05}			0,41	0,16		33

(*) Práctica del agricultor.

IMPORTANCIA DE LAS VARIEDADES

El uso de variedades de tipos de plantas ampliamente diferentes puede afectar la productividad de los sistemas de cultivos intercalados. El tipo de frijol trepador fue más productivo que el tipo arbustivo con niveles bajos de fertilidad del suelo en el ejemplo que se presenta en el Cuadro 12.5. Por otra parte, en Palmira, Colombia, con un nivel alto de fertilidad, el frijol de tipo arbustivo fue superior al trepador, quizás debido a que el primero compete menos con el maíz (Francis et al, 1976). En el Cuadro 12.6 se muestran los efectos

CUADRO No. 12.6. Efecto del cambio de tipo de planta de variedades de maíz y de frijol en la productividad de intersembra por hileras en Palmira, Colombia. (Fuente: adaptado de Francis et al, 1976).

Maíz tipo de planta	Frijol tipo de planta	Maíz rendimiento en granos (ton/ha)	Frijoles rendimiento en granos (ton/ha)	RET
Normal	Arbustivo	7,6	0,84	1,65
Braquítico	Arbustivo	8,8	0,67	1,44
Normal	Trepador	7,3	0,43	1,30
Braquítico	Trepador	8,1	0,22	1,08

de cambiar el tipo de planta de frijol y/o de maíz. La mejor combinación fue el maíz normal de porte alto con frijoles arbustivos. Otras combinaciones de maíz enano con frijoles trepadores dio un rendimiento menor de los frijoles presumiblemente debido a menor distancia entre los dos doseles y por lo tanto, mayor competencia.

Las variedades cultivables tradicionalmente han sido seleccionadas y mejoradas para cultivos puros. Programas de hibridación cuya meta específica es el desarrollo de variedades mejoradas para los sistemas de cultivos intercalados se han iniciado en Filipinas (IRRI, 1972), Tanzania (Finlay, 1974), Colombia (Francis et al, 1976) y Nigeria (Andrews, 1974; Okigbo y Greenland, 1976). Los objetivos específicos de estos programas, tal como están esbozados en el trabajo de Francis son los siguientes: hojas más erectas de los cultivos altos para reducir la competencia, madurez más temprana, insensibilidad al fotoperíodo, y flexibilidad de respuesta a diferentes poblaciones de plantas. La existencia de estos programas es muy alentadora y puede tener un gran impacto en el mejoramiento de la productividad de los sistemas de cultivos intercalados.

RELACIONES PLANTA-SUELO EN SISTEMAS INTERCALADOS

La sección anterior mostró cómo minimizar la competencia por luz por medio de selecciones correctas de combinaciones de cultivos, fechas de siembra, densidad de siembra y arreglo de hileras. Se sabe menos acerca de las relaciones bajo el suelo, aunque existe consenso de que la competencia por agua y nutrimentos es más frecuente y severa que la competencia por luz (Hall, 1974; Trenbath, 1974). La experiencia agronómica también indica que en los trópicos el agua y

los nutrimentos son generalmente más limitantes que la radiación solar. Gran parte del trabajo experimental descrito antes se llevó a cabo bajo circunstancias en que el agua y los nutrimentos no eran limitantes, por lo tanto en aparente ausencia de competencia bajo el suelo.

La competencia de debajo del suelo y la de sobre el suelo se afectan mutuamente. Una planta muy sombreada desarrollará un sistema radical débil que absorbe menos agua y nutrimentos que una planta saturada de luz. Al contrario, un sistema radical desarrollado deficientemente por la presencia de toxicidad de aluminio u otros factores limitantes, producirá un follaje débil.

Muy poco es lo que se sabe del desarrollo radical cuando hay dos o más cultivos que crecen juntos. Nelliatt et al (1974) observaron que las raíces de cocoteros, cacao, canela y piña que crecían en sistemas de intersembras mixtas en el sur de India ocupaban diferentes volúmenes de suelo. Estos cultivos estaban suficientemente espaciados por lo que había poca sobreposición de raíces. En sistemas de intersembras en hileras con espaciamientos convencionales, probablemente la situación sea diferente. Estudios con cultivos y malezas (Pavlychenko, 1937) muestran que partes de los sistemas radiculares de diferentes especies tienden a evitarse unos a otros, particularmente a profundidades más bajas, pero que se entremezclan cerca de la superficie del suelo. Estudios con cultivos puros en hileras muestran un grado similar de rechazo mutuo entre hileras pero no dentro de la hilera (Kurtz et al, 1952; Raper y Barber, 1970; Baldwin y Tinker, 1972). Esta separación a menudo se relaciona con compactación del suelo en los surcos según Trowse (1975). Las intersembras con especies con configuración del sistema radical muy diferente, pueden dar por resultado una estratificación de los dos sistemas radicales a diferentes profundidades. Harwood y sus colegas en IRRI (1972) observaron este efecto en siembras intercaladas de maíz y maní en hileras. Las raíces del maní se concentraron en las capas superficiales del suelo, mientras que las de maíz se desarrollaron a mayor profundidad. Trenbath (1974) menciona que tal estratificación de los sistemas radicales puede ser una expresión de autorechazo de las raíces, lo cual obliga al sistema radical que se desarrolla más tardíamente, a usar mayores profundidades del suelo.

La posibilidad de estratificación vertical u horizontal de los sistemas radicales sugiere que ésta puede ser otra ventaja fundamental de los cultivos intercalados. Con las raíces en diferentes capas del suelo, la absorción de agua y nutrimentos puede aumentar en comparación con cultivos puros. Trabajos iniciales en Illinois, Estados Unidos (Kurtz et al, 1947, 1952; Bray, 1954) sugirieron que cuando el agua y los nutrimentos móviles, tales como nitrato o sulfato están presentes en suficientes cantidades, la competencia entre sistemas radicales será mínima; pero si estos elementos son limitantes, la competencia por ellos puede ser grande. Trowse (1975) informó que las raíces

de maíz y de soya se desarrollaban libremente cerca unas de otras, en suelos bien aireados y suficientemente provistos de agua y nutrimentos, pero cuando el suelo es compacto, los sistemas radicales se tornan restringidos y la competencia es intensa.

El sistema intercalado en relevo también tiene la ventaja de separar los sistemas radicales en términos de tiempo. La mayoría de los sistemas radicales detienen su desarrollo después de la floración y la absorción de agua y nutrimentos disminuye desde ese momento hasta la cosecha (Trowse, 1975). Un segundo cultivo que desarrolla su sistema radical mientras el primero reduce esencialmente sus actividades, es una manera lógica de disminuir la competencia.

ABSORCION DE NUTRIMENTOS

Varios estudios han comparado combinaciones de cultivos intercalados puros con términos de rendimiento, materia seca y absorción de nutrimentos; Ibrahim y Kabesh (1971) en Egipto; Kassam y Stockinger, (1973) en Nigeria; IRRI (1973, 1974), Palada y Harwood (1974), y Liboon y Harwood (1975) en Filipinas; Dalal (1974) en Trinidad; y North Carolina State University (1974) y Oelsgle et al, (1976) en Costa Rica. El hallazgo unánime es que las mezclas de intersembras extraen más nutrimentos del suelo que los cultivos puros por unidad de superficie. Los datos más completos los obtuvo Dalal (1974), quien comparó maíz y gandul (*Cajanus cajan*) en cultivos puros, cultivos intercalados mixtos y en hileras. El maíz y el gandul tenían diferente duración de crecimiento; el maíz se cosechó a los 112 días después de la siembra y el gandul a los 168 días. La Fig. 12.8 presenta los patrones de acumulación de materia seca y de nutrimentos, indicando que la diferencia en duración de crecimiento tendió a minimizar la competencia y produjo curvas sigmoideas de crecimiento de la mezcla de intersembras. Los datos de rendimiento y de absorción de nutrimentos (Cuadro 12.7) indican que una hectárea del sistema intercalado mixto acumuló de 30 a 63% más nutrimentos que dos medias hectáreas de cultivos puros. El sistema intercalado en hileras fue más eficiente que el mixto, con valores de RRT para el rendimiento de materia seca, absorción de nitrógeno, fósforo y potasio del orden de 1,8 en comparación con valores de RRT del orden de 1,5 para los mismos parámetros en la intersiembra mixta. Resultados semejantes para la absorción de nitrógeno obtuvieron Kassam y Stockinger (1963) en una intersiembra mixta por hilera de un millo de maduración precoz y un sorgo de maduración tardía en el norte de Nigeria.

También se ha informado de mayor absorción de nitrógeno en intersembras mixtas por hileras con similar duración de crecimiento, tales como maíz con arroz de secano, maíz con soya, maíz con frijoles, y trigo con habas en Filipinas, Costa Rica y Egipto. Palada y

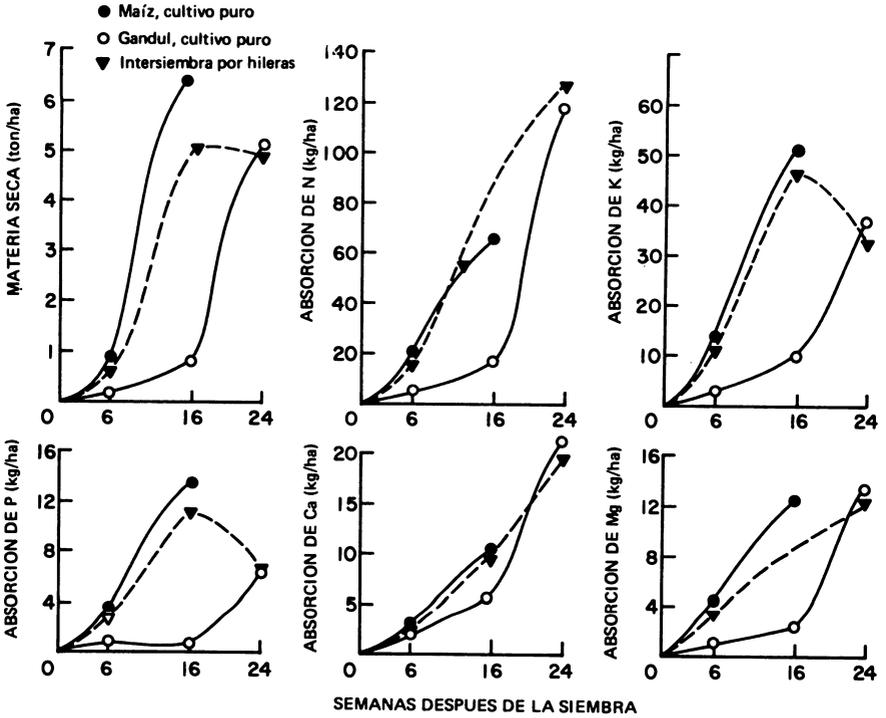


Fig. 12.8. Patrones de crecimiento y absorción de nutrimentos de maíz y gandul en monocultivos y en intersembras por hileras en Trinidad. (Fuente: adaptado de Dalal, 1974).

CUADRO No. 12.7. Efectos de cultivos intercalados mixtos y en hileras en el rendimiento y absorción de nutrimentos de maíz y gandul en River Estate Loam (pH 5,2), en St. Augustine, Trinidad. (Fuente: adaptado de Dalal, 1974).

Parámetro	Cultivo puro		Intersiembra mixta			Intersiembra por hileras		
	maíz	gandul	maíz	gandul	RRT	maíz	gandul	RRT
Rendimiento en granos (ton/ha)	3,1	1,9	2,0	1,7	1,54	2,6	1,8	1,78
Materia seca total (ton/ha)	6,4	5,1	4,2	3,8	1,40	5,0	4,9	1,74
Absorción de N (kg/ha)	66	119	48	100	1,56	54	127	1,88
Absorción de P (kg/ha)	13	6	9	5	1,52	11	7	2,01
Absorción de K (kg/ha)	51	37	32	32	1,59	46	33	1,79
Absorción de Ca (kg/ha)	10	22	10	15	1,68	9	19	1,76
Absorción de Mg (kg/ha)	12	14	9	8	1,32	9	12	1,61

Harwood (1974); IRRI (1973) observaron que no podían correlacionar el aumento de absorción de nitrógeno de una mezcla de maíz y arroz de secano con la mayor intercepción de luz, debido a que la intercepción de luz era similar a la del arroz en cultivo puro. Esto sugiere que el aumento en la absorción de nutrimentos de las mezclas puede deberse a una interacción favorable de los sistemas radiculares. Los cultivos mixtos pueden extraer nutrimentos de un volumen de suelo mayor que los cultivos puros debido a algún grado de rechazo mutuo de los sistemas radiculares o quizás por mayor contacto de raíces y suelo en el mismo volumen de suelo. Si tal es el caso, la mayor eficiencia de los nutrimentos con gran movilidad, como los nitratos, podrían ser los responsables del desarrollo de raíces a mayor profundidad, las cuales podrían rescatar nutrimentos que de otra manera serían lixiviados.

Como muchos subsuelos de los trópicos presentan limitaciones en su capacidad de retención de agua, altos niveles de aluminio intercambiable y niveles bajos de fósforo disponible, las mezclas de cultivos con diversos grados de tolerancia a estos factores pueden aumentar aún más la eficiencia en la absorción de nutrimentos. Hace falta investigación a este respecto.

El aumento de eficiencia en la absorción de nutrimentos es aproximadamente la misma para nutrimentos "móviles" y "menos móviles". Los resultados de Dalal en el Cuadro 12.7, así como los de Ibrahim y Kabesh (1971), indican valores similares de RRT para los nutrimentos más móviles como nitrógeno y potasio y para los elementos menos móviles como fósforo, calcio y magnesio. Aunque en todos los casos hubo competencia, tal como indica la disminución de rendimiento en ambas especies en las mezclas, esta falta de diferencia da aún más apoyo a la teoría de que diferentes sistemas radiculares explotan diferentes volúmenes de suelo, como se expresa en los conceptos de movilidad-competencia de Bray (1954) y Kurtz et al, (1947, 1952).

CULTIVOS INTERCALADOS CON LEGUMINOSAS

El valor de los cultivos intercalados mixtos de gramínea y leguminosas forrajeras es bien conocido (véase el Capítulo 13) y conduce a la suposición de que un efecto beneficioso similar puede obtenerse al intercalar cereales o otras gramíneas con leguminosas de grano o forrajeras. Sin embargo, estudios sobre este tema indican que los cultivos intercalados con leguminosas pueden ser provechosos o dañinos, esto depende de la capacidad de fijación de nitrógeno de la leguminosa, el grado de compatibilidad o de competencia entre las especies, la manera de sembrar, si simultáneamente o en relevo, y el nivel de fertilidad del suelo.

Estos efectos pueden comprenderse mejor por medio de la evaluación de datos de pasturas mixtas en términos de valores de RRT de los diferentes componentes. Hall (1974a) analizó los resultados de Vallis et al (1967) de mezclas de *Chloris gayana* y *Stylosanthes humilis* con diferentes proporciones de plantas (Cuadro 12.8). Cuando la proporción de gramínea leguminosa fue de 85:15 los valores de RRT fueron muy bajos, señalando poco o ningún efecto beneficioso de la mezcla. Cuando las especies se sembraron en igual proporción los valores de RRT para la materia seca y para la absorción de nitrógeno aumentaron a aproximadamente 1,2. Cuando el 85% de las plantas eran leguminosas se obtuvieron valores máximos de RRT para estos dos parámetros. En esta proporción la leguminosa suministraba considerable cantidad de nitrógeno fijado, que produjo los efectos máximos de la interseembra en términos de materia seca y contenido de proteína. Los valores de RRT de la absorción de nitrógeno derivado del suelo (usando ^{15}N) sugiere una fuerte competencia por este factor a diferencia del nitrógeno total, por el cual hubo poca competencia ya que la leguminosa estaba utilizando nitrógeno atmosférico. El coeficiente de intensidad relativa da una medida del grado de competencia general. Cuanto más grande es este parámetro, menor competencia hay por los diversos factores. Por lo tanto, hubo una fuerte competencia por nitrógeno del suelo ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) pero menos competencia por absorción de nitrógeno total debido a la fijación simbiótica y en consecuencia, menos competencia en términos de producción de materia seca.

CUADRO No. 12.8. Efectos de diferentes proporciones de una mezcla de gramíneas (*Chloris gayana*) y una leguminosa (*Stylosanthes humilis*) en la materia seca, absorción de nitrógeno del suelo medido con ^{15}N . (Fuente: adaptado de Hall, 1974a).

Parámetro	Proporción de plantas de pastos y leguminosas (RRT)			Coeficiente de intensidad relativa de siembra (K)
	85:15	50:50	15:85	
Materia seca	1,05	1,20	1,32	3,5
Absorción de N total	1,05	1,24	1,45	7,8
Absorción de N del suelo	1,01	1,05	1,12	1,5

Un segundo estudio de Hall (1974b) muestra la interacción entre dos especies de pastura en relación con el suministro de otro nutriente. Se cultivaron la gramínea *Setaria anceps* y la leguminosa *Desmodium intortum* con y sin fertilización potásica en un suelo muy deficiente en potasio. Los resultados presentados en el Cuadro 12.9, se ofrecen en las proporciones máximas de ambas especies.

CUADRO No. 12.9. Efectos de la deficiencia o suficiencia de potasio en el crecimiento de una gramínea (*Setaria anceps*) y una leguminosa (*Desmodium intortum*) en una mezcla en proporción de 15:85. (Fuente: adaptado de Hall, 1974b).

Parámetro	Rendimiento relativo total (RRT)		Producto del coeficiente de	
	Deficiencia de K	Suficiencia de K	Deficiencia de K	Suficiencia de K
Materia seca	1,04	1,40	1,1	5,3
Absorción de N	1,26	1,44	2,7	6,8
Absorción de P	1,06	1,30	1,3	4,0
Absorción de K	0,98	1,38	0,9	4,7

Cuando el potasio era limitante, los valores de RRT de la materia seca y absorción de nutrimentos fueron bajos, excepto para el nitrógeno debido a la simbiosis de la leguminosa. En presencia de suficiente cantidad de potasio todos los valores de RRT aumentaron a aproximadamente 1,4. Los "coeficientes de intensidad relativa" de Hall muestran que la competencia por todos los factores disminuyó cuando el suministro de potasio fue adecuado. Estos estudios indican que para que una leguminosa resulte beneficiosa debe estar en proporción adecuada y en presencia de suficientes nutrimentos disponibles para ambos cultivos.

Con estos conceptos en mente, se pueden aclarar las contradicciones aparentes en la literatura sobre intersembras con leguminosas. En el medio oeste de Estados Unidos se estudió la posibilidad de intersembrar tréboles, alfalfa y otras leguminosas con maíz, y se descartó. Triplett (1962) encontró poco provecho al intercalar estas leguminosas en maíz continuo o rotaciones de maíz y soya en Ohio. Con niveles bajos de nitrógeno, el cultivo de maíz intercalado con alfalfa aumentó el rendimiento, en contraposición a cultivos puros de maíz. Sin embargo estos aumentos no fueron suficientes para alcanzar el nivel de rendimiento deseado de 100 bushels por acre (6 ton/ha) de maíz, el cual se logró fácilmente con una fuerte fertilización nitrogenada. La intersembrado de maíz y alfalfa produjo la mitad de los rendimientos que la rotación maíz-trigo alfalfa usada en el área. Trabajando en Illinois, Kurtz et al, (1947) observaron efectos similares al intercalar maíz con trébol. Estos eran casos en que la demanda de nitrógeno para lograr rendimientos altos del maíz no se podía satisfacer por medio del cultivo de una leguminosa durante el corto período de crecimiento en estas regiones templadas.

En contraste marcado, un experimento llevado a cabo durante cuatro estaciones en Alfisoles údicos de Ife, Nigeria, por Agboola y Fayemi (1971, 1972) mostró aumentos sostenidos de maíz cuando

leguminosas tolerantes a la sombra, como *Calopogonium mucunoides*, caupí y frijol mungo, fueron intercalados con maíz e incorporadas al suelo después de la cosecha del maíz y de las leguminosas de grano. En la Fig. 12.9 se presentan los resultados con *Calopogonium* donde se comparó una aplicación de 55-10-55 kg de NPK/ha por cultivo con la intersemebra de leguminosas. El tratamiento intercalado produjo niveles de rendimiento que no fueron significativamente diferentes de los obtenidos en los cultivos puros fertilizados de maíz. De esa manera los agricultores pudieron economizar la inversión en fertilizante, al menos durante las cuatro cosechas de maíz. Los valores de RRT de los rendimientos de granos durante la cuarta siembra – 3,1 sin fertilización y 1,6 con fertilización – sugieren poca competencia entre maíz y el *Calopogonium* y las otras leguminosas tolerantes al sombreado. Agboola y Fayemi también compararon otras leguminosas (*Mucuna utilis* y *Phaseolus lunatus*) pero éstas compitieron agresivamente con el maíz.

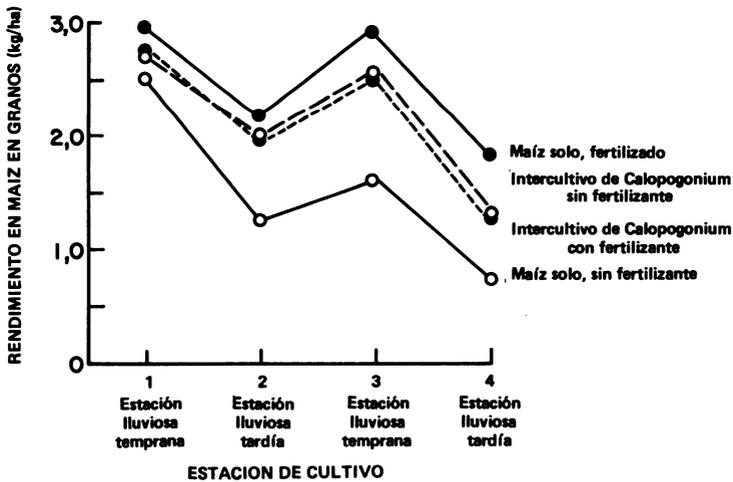


Fig. 12.9. Efecto de la intersemebra de leguminosas en el rendimiento de maíz en cuatro estaciones consecutivas en un Alfisol de Ife, Nigeria. (Fertilización: 55 kg/ha de N, 10 kg/ha de P, 55 kg/ha de K). (Fuente: adaptado de Agboola y Fayemi, 1972).

En esta región de Africa los investigadores han recomendado el uso de *Mucuna* como abono verde entre siembras de maíz para estabilizar los rendimientos (Vine, 1953). Sin embargo, los agricultores no adoptaron esta práctica porque no les interesa un cultivo que no representa un ingreso directo en efectivo. Las siembras intercaladas son una mejor solución por cuanto no se pierde tiempo. Agboola y Fayemi (1971) compararon secuencias de maíz y abonos verdes con siembra

intercalada y encontraron beneficios de rendimiento en ambos, pero solamente dos cultivos de maíz podían hacerse en secuencia; en comparación con cuatro siembras intercaladas durante los dos años del estudio.

En regímenes ústicos de humedad en que no pueden sembrarse dos cultivos de cereales en secuencia, intercalar maíz con abonos verdes ha demostrado ser aún más beneficiosa. En estas regiones intercalar en relevo es la forma predominante en práctica, para disminuir la competencia desde temprano y permitir que la leguminosa prolongue su crecimiento hasta la estación seca utilizando la humedad residual. Viegas et al, (1960), llevaron a cabo cuatro experimentos de larga duración (de 6 a 10 años) en São Paulo, Brasil, con maíz y frijol terciopelo (*Stizolobium* sp.) en relevo, en presencia y ausencia de fósforo, potasio y cal, pero sin aplicaciones de fertilizante nitrogenado. Ellos observaron ventajas positivas del frijol terciopelo, particularmente con fertilización con fósforo y potasio, en el rendimiento general del maíz en tres de los cuatro casos. El resultado negativo correspondió a una área que estaba anteriormente en pasturas de gramíneas y leguminosas, que probablemente tenía un suministro adecuado de nitrógeno disponible.

En otro experimento de intercalar leguminosas en relevo llevado a cabo en tierras altas de México por Peregrina (1965), se estimó la contribución de las leguminosas intercaladas en términos de nitrógeno. Tres leguminosas de los géneros *Melilotus* y *Vicia* fueron sembradas en maíz cuando éste tenía 2 meses de edad y se les dejó que crecieran con la humedad residual después de la cosecha del maíz durante la estación seca. Inmediatamente antes de las lluvias las leguminosas se incorporaron al suelo y se sembró la cosecha siguiente de maíz. Peregrina comparó estos tratamientos con la fertilización nitrogenada anual. Sus resultados aparecen en la Fig. 12.10 en que el rendimiento del maíz intercalado con leguminosas fue graficado a lo largo de las curvas de respuesta del nitrógeno. Intercalando maíz con *Melilotus alta* o *Vicia villosa* se obtuvo rendimientos similares a los obtenidos con dosis de 170 y 194 kg/ha de N al siguiente cultivo de maíz. Aunque no puede asegurarse si esto fue un efecto directo de la contribución de nitrógeno de las leguminosas, se obtuvieron resultados excelentes. La importancia de la selección de especies está subrayada por el comportamiento deficiente de *Melilotus indica*, que produjo aumentos de rendimiento del maíz equivalentes a los obtenidos con sólo 35 kg/ha de N en forma de sulfato de amonio. Efectos similares observaron Pathak et al, (1968), en India, donde una siembra intercalada de maíz y frijol mungo produjo rendimientos del maíz mayores que los de una dosis de 90 kg/ha de N.

Intercalando e incorporando *Crotalaria juncea* como abono verde en hileras de caña de azúcar produjo rendimientos de azúcar y calidad del jugo tan altos como con una dosis de 168 kg/ha de N en

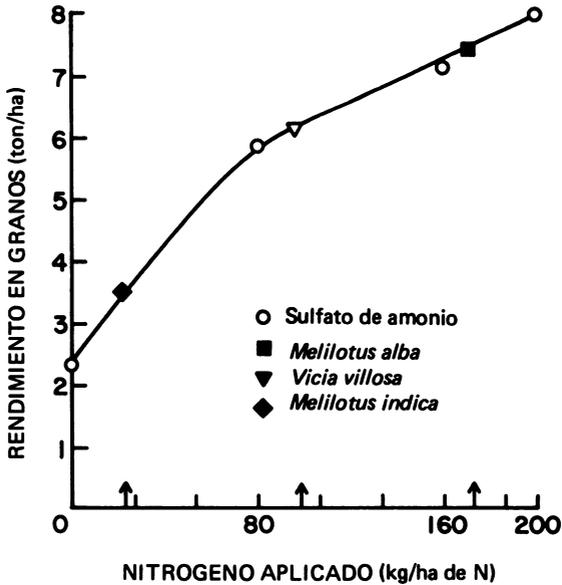


Fig. 12.10. Efectos de intersembra de relevo de tres leguminosas anuales y su incorporación en el rendimiento del cultivo siguiente de maíz, en comparación con aplicaciones anuales de nitrógeno en La Piedad, Michoacán, México. Las flechas indican la contribución de las leguminosas, expresadas en dosis equivalentes de sulfato de amonio. (Fuente: adaptado de Peregrina, 1965).

forma de sulfato de amonio en Madras, India (Gowda y Mariakulandai, 1972).

En resumen, intercalando leguminosas con cereales pueden beneficiar en términos de crecimiento y absorción de nitrógeno si la especie leguminosa no compite seriamente con el cereal, como aquellas tolerantes a la sombra en intersembra por hileras, u otras en relevo. También es importante que el período de crecimiento de la leguminosa sea suficientemente largo para que acumule cantidades considerables de nitrógeno fijado de la atmósfera. En algunos casos la contribución aparente de nitrógeno es suficiente para rendimientos altos de los cultivos; en otros ejemplos la intersembra sólo tuvo éxito en niveles de rendimiento relativamente bajos. La respuesta es específica del sitio e involucra selección de cultivos, de fechas de siembra y expectativas de rendimiento.

RESPUESTAS A APLICACIONES DE FERTILIZANTES

¿Resulta más eficiente la fertilización en sistemas intercalados? Los pocos estudios diseñados para contestar esta pregunta sugieren que la

utilización del fertilizante nitrogenado es más eficiente en sistemas intercalados en hileras que en cultivos puros comparables. Sin embargo la ventaja comparativa de los sistemas intercalados varía de acuerdo con las distintas dosis de nutrientes aplicados. La Fig. 12.11 presenta un ejemplo de intercalado en hileras con maíz y arroz de secano en Filipinas, en el que los beneficios de intercalar aumentaron al incrementar las dosis de nitrógeno aplicado. Con una dosis de 180 kg/ha de N los valores de RRT subieron a 1,5 y la utilidad por dólar invertido en nitrógeno también alcanzó un nivel mucho más alto que en los cultivos puros.

Otros casos muestran descenso en los valores RRT al aumentar la dosis de nitrógeno. La Fig. 12.11 ilustra esta situación con frijoles

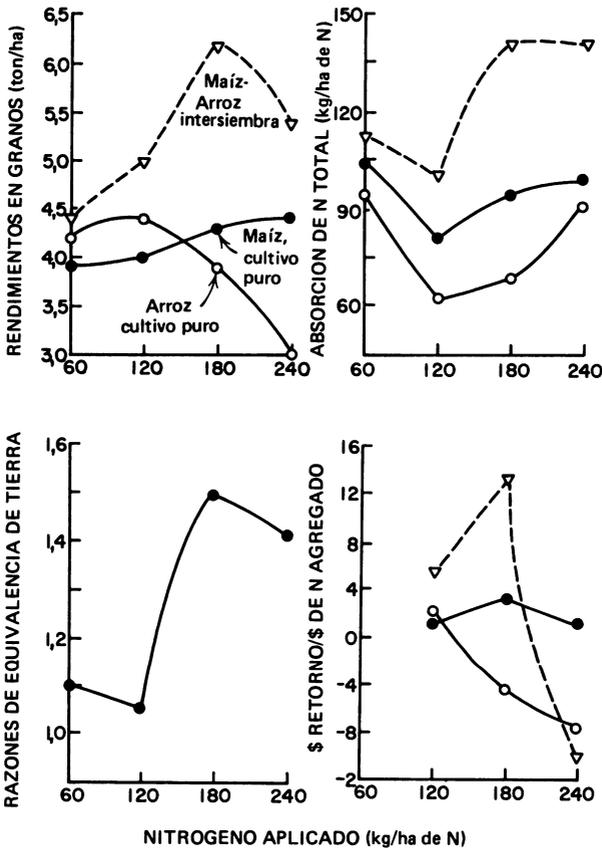


Fig. 12.11. Comparación de rendimientos, absorción de nitrógeno y respuesta a nitrógenos de una intersembra de arroz de secano y maíz, y cultivos puros, en Los Baños, Filipinas. (Fuente: adaptado de Palada y Harwood, 1974).

intercalados con maíz en hileras a 2 m, pero no en hileras a 1 m, en Costa Rica. Cuando el espaciamento entre hileras de maíz se redujo a 1 m los valores RRT aumentaron al aumentar la dosis de nitrógeno. Sin embargo el mayor provecho de la fertilización se obtuvo intercalando en hileras de 2 m. Este ejemplo muestra que la forma de la curva de RRT-nitrógeno depende de las configuraciones del espaciamento y probablemente de otros factores tales como variedad y densidad de siembra. La productividad de los sistemas dependerá de la relación beneficio:costo de ambos cultivos, así como de sus rendimientos relativos. Por lo tanto los valores de RET u otros valores físicos de RRT pueden dar información equivocada. La interpretación económica basada en las prácticas actuales de cultivos y fertilización es probablemente la mejor guía para tomar decisiones. Un valor más alto de RRT con cierta dosis de nitrógeno puede no ser tan productivo como la aplicación de la misma cantidad de nitrógeno a diferentes dosis a cultivos puros, como es el caso del maíz en la Fig. 12.12.

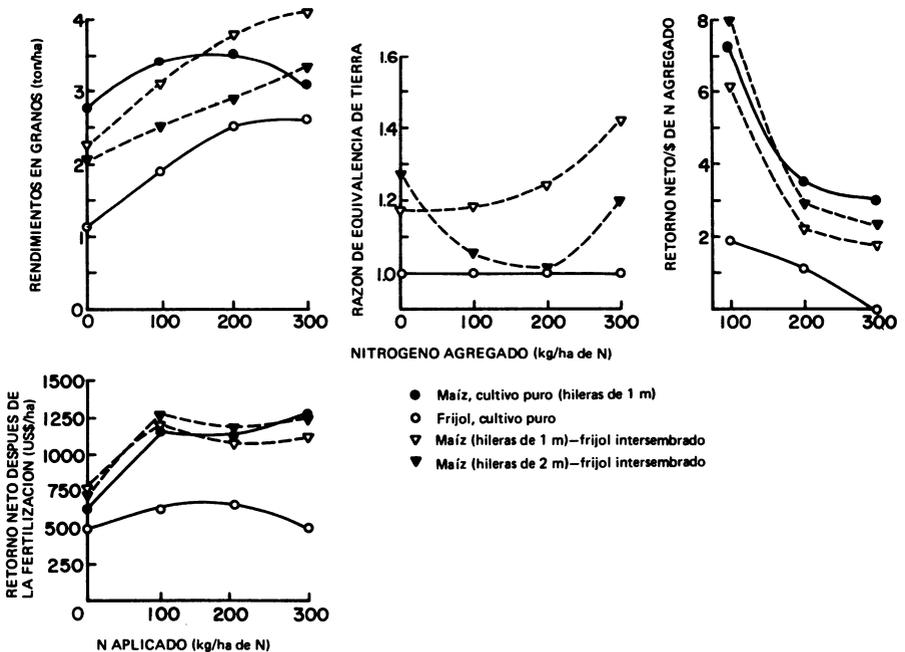


Fig. 12.12. Respuesta al nitrógeno de una interseembra en hileras de maíz y frijoles (*Phaseolus vulgaris*) en un Dystrandept en Turrialba, Costa Rica. (Fuente: adaptado de Oelsligle y Pinchinat, 1973; y North Carolina State University, 1974).

La respuesta al nitrógeno de mezclas intercaladas de cultivos que responden fuertemente al nitrógeno es probable que dé valores decrecientes de fertilizantes. Liboon y Harwood (1975); IRRI (1974), encontraron que el valor de RRT de una intersiembra en hileras de maíz y soya era muy alto sin nitrógeno (1,47) pero bajó a aproximadamente 1,10 cuando se aplicó nitrógeno. Los datos de absorción de nitrógeno indicaban que la soya fijaba alrededor de 125 kg/ha de N cuando no se agregaba este elemento. Una aplicación de 60 kg/ha de N detuvo la fijación de nitrógeno, dando por resultado valores más bajos de RET. Una depresión similar en el crecimiento de leguminosas observaron Pathak et al, (1968), en India y Bantilan et al, (1974), en Filipinas. Sin embargo esta situación no se presentó en el ejemplo de la Fig. 12.12 con maíz y frijoles. Por cuanto *Phaseolus vulgaris* es un mal fijador simbiótico de nitrógeno en América Latina.

Muy poco trabajo se ha llevado a cabo con nutrimentos distintos al nitrógeno. Un experimento de enclamiento de intersembras de maíz y caupí en Ultisoles ácidos de la selva amazónica del Perú dio valores de RRT ascendentes con dosis de cal hasta el nivel aparentemente óptimo de 3 ton/ha y decrecientes de ahí en adelante (Cuadro 12.10). En este caso no hubo beneficio con la intersiembra sin enclado, pero sí un beneficio considerable con la dosis óptima de cal.

La literatura es demasiado limitada para determinar las razones por las cuales la fertilización aumenta o disminuye el afecto de intercalar. Hay que incrementar la investigación que compara la respuesta a los fertilizantes de cultivos puros versus intercalados. Sin embargo, los datos limitados con que se cuenta indican que los beneficios de los cultivos intercalados no se restringen a los niveles bajos de fertilización.

CUADRO No. 12.10. Efectos del enclamiento en la productividad de maíz y caupí intercalados en hileras en Ultisoles ácidos de Yurimaguas, Perú. (Fuente: North Carolina State University, 1974).

Dosis de cal (ton/ha)	Rendimiento de granos (ton/ha)				RRT
	Cultivos puros		Intercalados		
	Maíz	Caupí	Maíz	Caupí	
0	0,02	0,36	0,01	0,17	0,93
1	1,26	1,07	0,47	0,63	0,96
2	2,24	1,20	0,89	0,69	0,92
3	1,99	1,16	1,47	0,73	1,37
4	2,41	1,40	1,28	0,72	1,11

DETERMINACION DE DOSIS DE APLICACION DE FERTILIZANTES

Oelsligle et al, (1976), revisaron la literatura sobre este tema y no encontraron métodos adecuados para determinar las dosis óptimas de fertilizantes para sistemas intercalados. El problema es de simple falta de información. Ellos encontraron que muchos investigadores recomiendan que se aplique la suma de las dosis recomendadas de fertilizantes de los cultivos individuales, con base a respuestas de cultivos puros. Es probable que esta práctica promueva buen crecimiento, pero también es probable que resulte en una fertilización ineficiente. En México y Guatemala se han hecho determinaciones empíricas de fertilización para maíz y frijoles intercalados. Las cantidades recomendadas varían de 50 a 120 kg/ha de N y de 0 a 80 kg/ha de P_2O_5 , dependiendo del suelo. En Guatemala los ensayos se hicieron en sistema intercalado en hileras (Del Valle, 1975). Desafortunadamente los agricultores de esta área usan el sistema de relevo, que probablemente de resultados diferentes. Observaciones en Costa Rica indican que las respuestas a fertilizantes de frijoles y maíz en siembras intercaladas en relevo son casi idénticas a las de los cultivos puros (Oelsligle et al, 1976). La falta de suficiente información en este tópico es una de las brechas más importantes en la comprensión del manejo de suelos tropicales.

Quando cultivos de corta duración se intercalan en cultivos de plantación como caña de azúcar o caucho, para que produzcan alimentos para los trabajadores, la economía de la plantación exige que si hay reducción en el rendimiento de la plantación, ésta sea muy pequeña. En realidad se necesita un RRT alrededor de 2. Esto puede lograrse con cultivos que difieren bastante en hábitos de crecimiento y en duración. El procedimiento que se usa es determinar cuanto fertilizante o nutrimento adicional se necesita para eliminar la competencia por completo. Bhoj y Kapoor (1970) informaron que la intersiembra de caña de azúcar con maíz no era recomendada en algunas partes de India porque disminuía el rendimiento de la caña. Ellos encontraron que con una cantidad adicional de 112 kg/ha de N y un riego extra la intersiembra de caña y maíz producía el mismo rendimiento de la caña de azúcar y la misma calidad del jugo, y aumentaba la ganancia neta en un 41% debido al valor de la cosecha de maíz.

En Malasia, en plantaciones jóvenes de caucho las recomendaciones de fertilizantes para maíz y maní sembrados entre los árboles de caucho son las mismas que para maíz y maní en cultivo puro (Pushparajah y Wong, 1970). Hay poca competencia entre los árboles que crecen lentamente y los cultivos alimenticios.

FUENTES, EPOCAS Y COLOCACION DE FERTILIZANTES

Hay muy poca información acerca de cómo manejar los fertilizantes en sistemas de cultivos intercalados. Hace falta determinar las fuentes apropiadas de los fertilizantes, las fechas de aplicación, colocación y conocimientos relativos a la forma de interacción entre los sistemas radiculares. Este autor sólo pudo encontrar un trabajo en que se estudiaba el efecto de la colocación del fertilizante. Chang et al, (1969), colocaron abonos marcados con ^{32}P y ^{86}Rb en bandas bajo cultivos intercalados en hileras dobles en un suelo arenoso ácido de Chianam, Taiwán. En el sistema caña de azúcar-camote cuando los fertilizantes se colocaron bajo un cultivo, el otro se benefició muy poco con ellos (Cuadro 12.11). Sin embargo, en el sistema caña de azúcar-maní se presentó una situación distinta. Indiferentemente de si los fertilizantes se colocaban bajo las hileras de caña o de maní, la caña de azúcar absorbió varias veces más ^{32}P y ^{86}Rb que el maní. Estos resultados sugieren poca competencia para los fertilizantes de fósforo y potasio colocados en combinaciones de caña de azúcar y camote, y un efecto abrumador de la caña sobre el maní. Los autores observaron un caso claro de estratificación de raíces en el caso de caña de azúcar y camote, con las raíces del camote en la parte superficial, pero no ofrecieron observaciones de esa clase para comparar

CUADRO No. 12.11. Efectos de la colocación de los fertilizantes ^{32}P y ^{86}Rb en la absorción de caña de azúcar-camote y caña de azúcar-maní a los 60 días después de la siembra en un suelo arenoso (pH 5,3) de Taiwan. (Fuente: adaptado de Chang et al, 1969).

Dos hileras de caña de azúcar alternando con dos hileras de camote y cuatro de maní.

Elemento	Colocado bajo hileras de:	^{32}P o ^{86}Rb en la materia seca (%)	
		Caña de azúcar (2 hileras)	Camote (2 hileras) o maní (4 hileras)
^{32}P	Caña de azúcar	0,035	0,008
	Camote	0,002	0,027
^{86}Rb	Caña de azúcar	0,168	0,026
	Camote	0,009	0,171
^{32}P	Caña de azúcar	0,069	0,012
	Maní	0,042	0,015
^{86}Rb	Caña de azúcar	0,032	0,005
	Maní	0,025	0,016

con caña de azúcar y maní. El último experimento se llevó a cabo durante una estación más caliente que la del primero. El tiempo frío puede haber limitado el desarrollo radicular y por lo tanto la competencia en el experimento de caña de azúcar y camote. La colocación localizada puede ser de valor al fertilizar un cultivo de preferencia a otro cuando los sistemas radiculares no compiten, pero es probable que esta práctica no de buen resultado cuando uno de los cultivos es capaz de utilizar en forma efectiva los fertilizantes colocados directamente debajo del cultivo acompañante.

El sentido común aconseja que las aplicaciones de fertilizantes se coloquen de manera que haya una disponibilidad adecuada del nutriente en los períodos en que se espera una demanda alta. La revisión de Oelsigle et al, (1976), no menciona investigaciones sobre este tema. Los investigadores han estado haciendo conjeturas en cuanto a programación adecuada, tales como aplicar nitrógeno después de la recolección del cultivo precoz para estimular el desarrollo del cultivo tardío, el cual no tiene competencia. Cuando se intercalan leguminosas con cereales, la práctica es aplicar la mayor parte del nitrógeno a lo largo de las hileras de los cereales para no inhibir la fijación simbiótica del nitrógeno por las leguminosas.

El sentido común también indica que las aplicaciones de fósforo o cal con un considerable efecto residual pueden incorporarse antes de la siembra. Sin embargo, con los nutrimentos que pueden lixiviarse fácilmente, como nitrógeno y potasio, deben hacerse aplicaciones superficiales.

Una reflexión cuidadosa en los conceptos básicos de la fertilización de cultivos puros, pueden hacer que el lector se sienta inconforme con las generalizaciones anteriores. ¿Qué sucede cuando un cultivo es sensitivo a la toxicidad de aluminio, mientras su acompañante es tolerante? ¿Cómo debe aplicarse el nitrógeno a una combinación de cereales y tuberosas tales como maíz y camote, en que la dosis adecuada para el maíz disminuirá la razón tubérculo:tallo del camote? ¿Podría evitarse este problema con intercalar en relevo? Los fertilizantes fosfatados aplicados en bandas a suelos muy deficientes en fósforo provocan proliferación de las raíces solamente alrededor de la banda; ¿aumentará o disminuirá esto la competencia? ¿Podría aumentarse aún más el rendimiento mezclando especies con diferentes grados de tolerancia a un factor limitante? ¿Cuál es la función de los fertilizantes de liberación lenta?

Estas interrogaciones no pueden contestarse extrapolando los conocimientos sobre las respuestas a la fertilización por cultivos puros. Las interacciones que ocurren cuando dos o más cultivos crecen juntos son lo suficientemente diferentes para que las respuestas sólo puedan obtenerse haciendo investigación en los sistemas en consideración. La analogía con los sistemas de pasturas mixtas es obvia. Si se hubiera reunido todos los conocimientos sobre cómo fertilizar pasturas de gramíneas y pasturas de leguminosas separadamente no sólo

con nitrógeno sino también con otros nutrimentos, y luego se hubiera tratado de adivinar el comportamiento de los sistemas mixtos, los resultados hubieran estado bastante alejados de la realidad.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS CULTIVOS INTERCALADOS

Esta discusión ha mostrado que ciertos sistemas intercalados son más productivos que los cultivos puros con una área igual, por cuanto son capaces de utilizar más eficientemente la radiación solar y los nutrimentos disponibles en el suelo. Además, los cultivos intercalados presentan menos problemas de control de malezas, insectos y enfermedades. Trabajos llevados a cabo en Filipinas ponen de manifiesto que ciertas combinaciones intercaladas repelen insectos que atacan uno de los cultivos (IRRI, 1973, 1974). También se cree que las intersembras disminuyen los picos de demanda de mano de obra al aumentar el ingreso y mejorar la dieta nutritiva de la familia rural (Andrews y Kassam, 1976; Harwood y Price, 1976; Okigbo y Greenland, 1976).

Una de las principales razones para la intersiembra es reducir el riesgo del fracaso total de una siembra. Si un cultivo falla, el agricultor tendrá dos o tres cultivos más para cosechar. Estudios en Filipinas confirman que este es el caso cuando ocurren fracasos de cultivos en las etapas iniciales. El cultivo que queda actúa como un cultivo puro. Sin embargo, si un cultivo fracasa en etapas avanzadas del desarrollo, debido al ataque de una enfermedad después de la floración, el rendimiento del cultivo acompañante no es capaz de aumentar por cuanto la competencia ha reducido ya su potencial (IRRI, 1974).

La principal desventaja de intercalar es la dificultad para la mecanización. Esto puede restringir su uso en sistemas agrícolas en gran escala. Sin embargo la intersiembra de relevo presenta menos problemas que la intersiembra por hileras. Cierta grado de mecanización, principalmente con tractores pequeños de usos múltiples parece factible, como complemento, pero no como sustitución del trabajo manual. Sin embargo, los ingenieros agrícolas no han pensado en serio en lo que puede hacerse. Ellos han diseñado máquinas que cosechan tabaco, tomates y uvas; habría que ser muy pesimista para suponer que los sistemas de cultivos intercalados no pueden también mecanizarse completamente.

La intensificación de cultivos tiene sus límites. Los sistemas más complejos, con 5 ó 6 cultivos por año requieren tanta mano de obra que los pequeños agricultores sólo los pueden poner en práctica en una parte de su tierra (Hildebrand, 1976). Además los sistemas más intensivos pueden no ser los más productivos (IRRI, 1974).

SISTEMA DE CULTIVOS EN SECUENCIA

CULTIVOS DOBLES, TRIPLES Y CUADRUPLÉS

Los cultivos secuenciales constituyen la forma más simple de cultivos múltiples: un cultivo se siembra una vez que el anterior ha sido cosechado. El número de cultivos por año define las diversas formas tales como cultivos dobles, triples y cuádruples. Sin embargo, la definición de un año calendario no siempre es adecuada. En un sistema secuencial común en algunas áreas tropicales de Asia donde se siembra arroz anegado con irrigación, en dos años se hacen cinco cultivos.

Los cultivos secuenciales se practican en las fincas más comercializadas, particularmente las que cuentan con irrigación, aún cuando muchas se ajustan a la definición de fincas pequeñas. Los cultivos secuenciales se han introducido recientemente en fincas grandes del sur de Estados Unidos, en donde actualmente se cosechan dos cultivos por año, en tierras que anteriormente sólo producían una cosecha (Lewis y Phillips, 1976). En regiones tropicales donde el trigo crece bien durante la estación más fresca y hay suficiente lluvia o irrigación para otros cultivos se hacen cultivos dobles o triples de papas con maíz y leguminosas de grano (Dalrymple, 1971; IARI, 1972). El arroz inundado se siembra corrientemente en cultivo doble con trigo en las márgenes de Asia tropical en suelos francos o arenosos, en donde es factible la transformación de un suelo fangueado a uno bien estructurado en estado aeróbico rápidamente (Harwood y Price, 1976). Muchas secuencias dobles o triples también se practican en América tropical en regímenes údicos o en regímenes ústicos o áridos con riego. Bernal (1972) y Pinchinat et al, (1976), mencionan varias combinaciones de cultivos dobles tales como maíz-maíz, y maíz-soya, que se practican en Colombia. El cultivo triple de arroz de secano-maíz-soya, parece ser la secuencia más promisoría de los sistemas de cultivos múltiples para áreas anteriormente en agricultura migratoria en la selva amazónica del Perú (North Carolina State University, 1974). En fincas de arroz inundado con riego en todos los trópicos, en donde ni la temperatura ni el agua son limitantes, se practica el cultivo doble o triple de arroz transplantado. Tales sistemas permiten la utilización de mayor radiación solar durante la estación seca.

El precepto básico del cultivo secuencial es que el agricultor maneja sólo un cultivo a un tiempo. Desde el punto de vista de manejo del suelo, la experiencia de los cultivos puros no es completamente aplicable a sistemas de cultivos secuenciales debido a la influencia del cultivo anterior en las propiedades físicas del suelo, del agua y en la disponibilidad de los nutrimentos al cultivo siguiente. Las prácticas de manejo de suelo deben dirigirse hacia la secuencia o a la rotación de cultivos más que a los cultivos individuales.

PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

Cuanto mayor sea el número de meses que un suelo está protegido por el dosel de un cultivo, tanto menor será la necesidad de operaciones de labranza. La labranza está destinada a mejorar la estructura del suelo y a controlar las malezas. Estudios en la cercanía de Nueva Delhi, India, mostraron que manteniendo continuamente un dosel de cultivos durante el año con siembras triples, se mejoraba la estructura del suelo. El Cuadro 12.12 indica los efectos del aumento en el número de cultivos por año en las tasas de infiltración de suelos aluviales lentamente permeables. Estudios en IARI (1972), también mostraron que el número de operaciones necesarias de labranza disminuía conforme aumentaba el número de cultivos sembrados durante el año. Los efectos del aumento de la intensidad de cultivo en la estructura del suelo dependerá de las propiedades y manejo del suelo. En suelos bien agregados como Oxisoles, estos efectos pueden ser de menor importancia que en suelos deficientemente agregados, tales como suelos aluviales bajos en materia orgánica del Cuadro 12.12. La calidad del manejo también ejercerá una marcada influencia.

CUADRO No. 12.12. Efectos del aumento en el número de cultivos por año en las tasas de infiltración de un suelo aluvial cerca de Nueva Delhi, India. (Fuente: IARI, 1972).

Cultivos por año	Tasa de infiltración (cm/hr)
2: Maíz y trigo (con labranza)	0,6
3: Frijol mungo, maíz, trigo (con labranza)	1,2
3: Frijol mungo, maíz trigo (sin labranza adicional)	1,7
4: Frijol mungo, maíz, <i>Brassica campestris</i> , trigo (intercalado en relevo, sin labranza adicional)	2,7

Otra ventaja del aumento del número de cultivos por año es la disminución en la infestación de malas hierbas, las cuales tienen menos tiempo para crecer y competir cuando el tiempo entre cosecha y la siembra siguiente se reduce al mínimo. En sistemas de cultivos dobles se había practicado ventajosamente un mínimo de labranza o ausencia completa de ella. Sanford et al, (1973), trabajando en un Mollisol de Mississippi, encontraron que sembrando sorgo o soya después de trigo con una herramienta que sólo labraba una faja de suelo de 5 cm de ancho y 10 cm de profundidad por hilera, obtenían

rendimientos de todos los cultivos similares o mejores que los obtenidos con labranza convencional siempre que el control de malezas fuera adecuado. Los herbicidas de contacto con períodos cortos de actividad y sin efectos residuales se usan satisfactoriamente en sistemas sin labranza (Lewis y Phillips, 1976). Sin embargo los sistemas sin labranza probablemente fracasen aún en ausencia de malas hierbas si la máquina cosechadora de la primera cosecha compacta el suelo severamente (Trouse, 1975). En tales casos se necesita labranza adicional.

Los cultivos secuenciales en áreas en que el segundo cultivo depende casi por completo de la humedad residual del suelo también se benefician del menor número de operaciones de labranza. En suelos franco-arenosos calcáreos de Punjab, India, el cultivo de una leguminosa antes de algodón es beneficioso, pero incorporando los residuos de las leguminosas como abono verde resultó perjudicial debido a la cantidad de humedad que se perdía en el proceso. Gautman et al, (1964), recomendaban que se cortara el cultivo y los residuos se usaran en otros campos en donde la humedad no fuera limitante. Singh (1967), encontró más práctico aplicar más nitrógeno para compensar el efecto de la incorporación de abonos verdes que arar otra vez el suelo y perder así.

Cuando la secuencia de cultivos incluyen una cosecha de arroz inundado, el manejo de las propiedades físicas consiste en destruir la agregación durante el proceso de fangueo y regenerar la estructura antes de sembrar otros cultivos. La escogencia de los cultivos que deben seguir al arroz inundado en sistemas de cultivo doble depende de su tolerancia relativa a la aireación deficiente causada por el fangueo, así como de la textura y mineralogía del suelo. Harwood (1975), desarrolló un sistema de clasificación de suelos que define los potenciales de cultivos múltiples de los suelos de arroz inundado. El Cuadro 12.13 muestra que el aumento en densidad aparente con el fangueo es un parámetro útil para determinar el potencial de los suelos para cultivos dobles. El maní y el maíz pueden usarse en cultivo doble después de arroz inundado solamente en suelos de textura gruesa, mientras que soya, frijol mungo y caupí pueden tolerar un ámbito más amplio de condiciones físicas deficientes de suelo. Cultivos rastreros como sandía y calabaza son los más tolerantes cuando se transplantan a suelos fangueados en montones de tierra alrededor de cada planta para mejorar la aireación del suelo.

RENDIMIENTO Y PROPIEDADES QUIMICAS DEL SUELO

En el Cuadro 12.14 se presenta un ejemplo de cultivo secuencial intensivo basado en el trabajo de Nair y Singh (1971) y Nair et al, (1973a, b), en el norte de la India. Se hicieron tres cultivos por año con poco tiempo entre cultivos. El hecho de que se observara muy

CUADRO No. 12.13. Categorías de clasificación de suelos que indican el potencial de cultivos múltiples en suelos previamente fangueado e inundados. (Fuente: Harwood, 1975).

	Clase textura de suelo			
	1	2	3	4
(Arcilla tipo 2:1)	Franco-arenoso	Franco-limoso	Franco-arcilloso	Arcilla
(Arcilla tipo 1:1)	Franco-limoso	Franco-arcilloso	Arcilla	
	Aumento en densidad aparente con fangueo (%)			
	< 4	4,1-8	8,1-12	> 12
	Potencial de cultivo* después de arroz anegado (sujeto a disponibilidad de agua)			
Maní	_____	-----		
Maíz	_____	-----		
Sorgo	_____		-----	
Soya	_____		-----	-----
Arroz (transplantado)			_____	
Frijol mungo	_____			-----
Caupí	_____			-----
Legumbres intensivas	_____			-----
Cultivos trepadores	_____			-----

(*) _____ crece bien; ----- crece con dificultad.

poca diferencia entre sistemas con arroz de secano y con arroz inundado indica un cambio eficiente en la estructura del suelo después de la cosecha de arroz. Estimaciones de la eficiencia fotosintética (cantidad real de radiación solar utilizada en fotosíntesis) fueron del orden del 2%, similares a los niveles obtenidos en los mejores sistemas de cultivo puro en la región templada. Nair y sus colaboradores obtuvieron este nivel con tres cultivos por año en lugar de uno. A pesar de la remoción de grandes cantidades de nutrientes no hubo cambios apreciables en el carbono orgánico del suelo, nitrógeno total ni en fósforo y potasio disponibles. Nair et al, (1973a), atribuyen los niveles estables de materia orgánica a adiciones anuales de 4 a 6 ton/ha de raíces y rastrojos. Tal como lo indica el Cuadro 12.14, las dosis anuales de fertilización fueron bastante altas, pero estuvieron estrechamente balanceadas por la remoción de nitrógeno y fósforo por el cultivo. Esto fue posible debido a la baja capacidad de fijación de fósforo de este suelo. En el caso del potasio, la remoción del cultivo excedió las adiciones anuales, pero la tasa de liberación de potasio no

CUADRO No. 12.14. Producción anual y uso de radiación solar en sistemas de cultivos triples con fertilización abundante, en un Mollisol de Pantnagar, U. P., India: cifras promedio de 2 años. (Fuente: adaptado de Nair et al, 1973a, b).

Los datos de nutrimentos son el promedio de sistemas de arroz inundado y de secano.

Secuencia de cultivos	Rendimiento de granos o tubérculos (ton/ha)			Duración total del cultivo (días)		N (kg/ha)		P (kg/ha)		K (kg/ha)	
	1	2	3	Cultivo	Cultivo	Fertilización agregada	Remoción del cultivo	Fertilización agregada	Remoción del cultivo	Fertilización agregada	Remoción del cultivo
	Cultivo	Cultivo	Cultivo	del cultivo	del cultivo	del cultivo agregado	del cultivo agregado	del cultivo agregado	del cultivo agregado	del cultivo agregado	del cultivo agregado
Arroz de secano—trigo-mijo	5,1	6,4	1,3	339	310	323	74	84	98	296	296
Arroz inundado—trigo-mijo	4,8	6,2	1,5	343	337	401	94	89	83	290	290
Arroz de secano—trigo-frijol mungo	5,2	5,7	1,3	342	360	383	96	98	150	342	342
Arroz inundado—trigo-frijol mungo	5,2	5,6	1,4	345	360	383	96	98	150	342	342
Arroz de secano—papa-trigo	5,4	11,7	4,5	311	360	383	96	98	150	342	342
Arroz inundado—papa-trigo	4,9	18,5	4,4	315	360	383	96	98	150	342	342

intercambiable en formas aprovechables es probablemente alta en este Mollisol.

El ejemplo anterior ilustra condiciones casi ideales en términos de suelos excelentes, buen manejo a juzgar por la eficiencia fotosintética y uso intensivo de fertilizantes. Un estudio mucho más largo en un suelo aluvial de textura liviana de Taiwan presenta resultados similares con un nivel más bajo de manejo. El Cuadro 12.15 resume los datos de Lin et al, (1973), del doble cultivo de arroz inundado en Taiwan por 48 años con 88 cosechas (no hubo cultivos durante la segunda guerra mundial). Los rendimientos promedio del arroz fueron similares entre los tratamientos con fertilidad, con la adición de la misma cantidad de nitrógeno. El efecto en las propiedades químicas del suelo fue también similar y sugiere un nivel de equilibrio sin mayores diferencias entre tratamientos. Hay poca duda de que sistemas secuenciales manejados adecuadamente puedan mantener una producción casi indefinidamente.

CUADRO No. 12.15. Efectos de cultivos dobles continuos de arroz inundado durante 48 años en suelos aluviales de Taiwan sobre las propiedades químicas del suelo. (Fuente: adaptado de Lin et al, 1973).

1 Tratamiento de fertilidad*	Rendimiento promedio de arroz por cultivo (1924-1972) (ton/ha)	Propiedades de la capa arable en 1972					
		pH	C orgánico (%)	N total (%)	N mineralizado en 10 semanas (ppm)	P Bray 1 (ppm)	K intercam- biable (ppm)
Testigo	1,63	5,2	2,1	0,15	143	34	36
NPK	2,55	5,3	2,2	0,17	156	102	48
NPK + cal	2,70	5,8	2,3	0,15	157	81	42
Estiércol	2,75	5,3	2,4	0,20	181	55	39
Estiércol + P	2,85	5,4	2,6	0,21	182	97	43
Abono verde	2,56	5,2	2,3	0,11	190	40	40
Abono verde + P	2,59	5,4	2,8	0,19	157	81	42
D.M.S. _{0,05}	0,15						

(*) 95 kg/ha de N, 41,5 kg/ha de P, 79 kg/ha de K por cultivo. Los contenidos de nitrógeno en estiércol y abono verde fueron también de 95 kg/ha de N por cultivo.

Por otra parte, secuencias de cultivos dobles o triples incluyendo camote, taro (*Colocasia esculenta*), maní, sorgo y caupí, llevadas a cabo en la isla de New Britain, en suelos aluviales volcánicos, mostraron disminuciones progresivas de rendimiento con el tiempo, Bourke (1974) informó que estas disminuciones estaban relacionadas con descensos en parámetros de fertilidad del suelo. No se usaron fertilizantes, pero cuando el cultivo fue alternado con 1.5 años de abono

verde de leguminosas, el descenso de la fertilidad se demoró. Un cultivo intensivo de esta naturaleza requiere fertilización para mantener la siembra secuencial por largo plazo.

EFFECTOS RESIDUALES DE LA FERTILIZACION

En sistemas de cultivos secuenciales la naturaleza del cultivo número uno y los fertilizantes que se le aplican probablemente afectarán el comportamiento del cultivo siguiente. Raheja et al, (1971), compilaron los efectos residuales a largo plazo de ensayos uniformes de cultivos dobles de maíz y trigo llevados a cabo en toda la India. Aproximadamente una tercera parte de los 66 kg/ha de N aplicados al maíz fue utilizada por el cultivo siguiente de trigo. En un cultivo triple de trigo, frijol mungo y maíz en secuencia, cerca de Nueva Delhi, Oza y Subbiah (1973) encontraron por medio del uso de ^{15}N que el trigo recuperaba aproximadamente el 40% del nitrógeno agregado, pero que los cultivos siguientes de frijol mungo y maíz recuperaban solamente alrededor del 1% del nitrógeno agregado al trigo. El estudio de estos investigadores sugiere que el nitrógeno restante permaneció en el suelo como nitrógeno orgánico inmovilizado. Reddi et al, (1973), informan de un tercer ejemplo en India sobre los efectos residuales de aplicaciones de nitrógeno al arroz en un cultivo siguiente de soya, en un suelo arenoso de Tirupati. Mostraron que el rendimiento de la soya subió de 1,3 a 1,9 ton/ha cuando las aplicaciones de nitrógeno al cultivo anterior aumentaron de 0 a 180 kg/ha de N. Sin embargo el efecto residual del fertilizante nitrogenado disminuyó la nodulación de la soya, aún cuando el efecto general fue positivo: 40% de incremento en el rendimiento.

Estos tres ejemplos sugieren que el efecto residual de la fertilización nitrogenada está afectado por muchas variables y es por lo tanto específico del sitio. La dosis de nitrógeno aplicado, la recuperación del fertilizante agregado por el primer cultivo, la lixiviación, la inmovilización, la denitrificación y el patrón de pluviosidad es probable que afecten la magnitud del efecto residual. Sin embargo, parece que se pueden esperar algunos efectos residuales y deberían tomarse en consideración en la fertilización del cultivo siguiente.

Es probable que los efectos residuales de otros nutrientes móviles sean tan variados como los del nitrógeno, pero los efectos residuales de la cal y del fósforo pueden predecirse con una precisión razonable con base en las discusiones de los Capítulos 7 y 8. Por ejemplo, experimentos de cultivos secuenciales dobles y triples en un Ultisol ácido de Yurimaguas, Perú, mostró que las aplicaciones iniciales de 60 kg/ha de K_2O duraron alrededor de un año, después del cual una deficiencia extrema de potasio redujo drásticamente los rendimientos del arroz, el maíz y la soya. En contraste, aplicaciones iniciales de 4 ton/ha de cal o 172 kg/ha de P tuvieron un efecto residual completo

durante las 6 ó 7 primeras cosechas consecutivas (North Carolina State University, 1974).

EFFECTOS DEL CULTIVO ANTERIOR

El cultivo anterior *per se* puede tener efecto beneficioso o dañino en el comportamiento del cultivo siguiente. Los efectos provechosos bien conocidos de un cultivo leguminoso anterior en un cultivo de cereales, también se observan en estas formas de cultivos múltiples, pero la magnitud de los efectos varía de acuerdo con la manera en que las leguminosas se cosechan y con las especies que se siembran.

En una revisión sobre investigación en leguminosas en Colombia, Bernal (1972) informó de los resultados de dos experimentos de cultivos secuenciales llevados a cabo en un suelo aluvial cerca de Medellín y en un Mollisol del Valle del Cauca. En la Fig. 12.13 se presentan los rendimientos promedio del experimento de Medellín, en que se compara doble cultivo de maíz con maíz y soja (recolectados por sus granos), y maíz y *Dolichos lablab*, leguminosa incorporada como abono verde antes de su floración. El maíz en monocultivo respondió positivamente a las aplicaciones de nitrógeno. El maíz

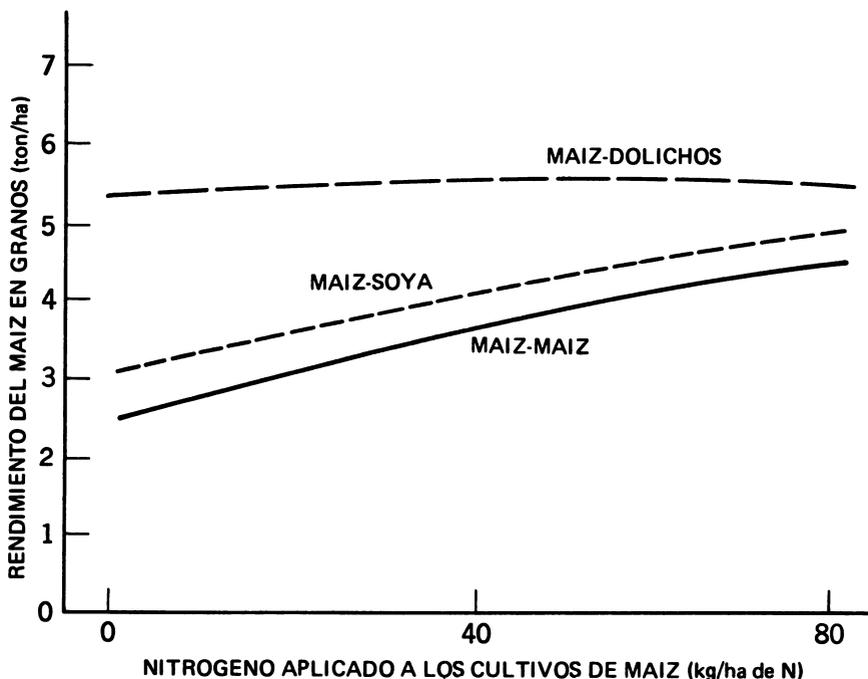


Fig. 12.13. Efecto del cultivo anterior (maíz, soja o *Dolichos lablab* como abono verde) en la respuesta al nitrógeno de maíz en un suelo aluvial de Medellín, Colombia. (Medias de nueve años). (Fuente: Bernal, 1972).

precedido por soya dio un rendimiento aproximado de 0,5 a 1,0 ton/ha más que el maíz precedido por maíz, y también respondió positivamente a las aplicaciones de nitrógeno. El maíz precedido por la incorporación de un abono verde dio los rendimientos promedios más altos sin ninguna aplicación de fertilizante nitrogenado. Este es un buen ejemplo del efecto de la aplicación de abono verde, el que en este caso parece ser equivalente a 100 kg/ha de N aplicados al maíz. Sin embargo, la economía de nitrógeno debe ser evaluada considerando la utilidad de sembrar un segundo cultivo de maíz o de soya.

El efecto temporal de la incorporación del abono verde, tal como en el ejemplo del *Dolichos lablab* debe subrayarse. En una revisión completa del efecto de los abonos verdes en Sur Africa, Haylett (1961) llegó a la conclusión de que el efecto beneficioso dura apenas para uno o dos cultivos siguientes.

En los experimentos del Valle del Cauca, se evaluaron los efectos de los cultivos de soya o alfalfa en el primero y segundo cultivos sucesivos de maíz fertilizado con 0 a 120 kg/ha de N en un suelo en que sólo había deficiencia de nitrógeno. Los resultados que se presentan en la Fig. 12.14 indican un descenso pronunciado de rendimiento en el monocultivo doble de maíz sin fertilización durante los dos primeros años y una nivelación a un rendimiento de 2,8 ton/ha de ahí en adelante. Cuando hubo una secuencia de maíz-soya o maíz-alfalfa (cosechada para heno) los rendimientos del maíz sin nitrógeno tuvieron un promedio de 5,4 ton/ha, casi idénticos a los de los monocultivos de maíz fertilizado con 120 kg/ha de N por cultivo (Cuadro

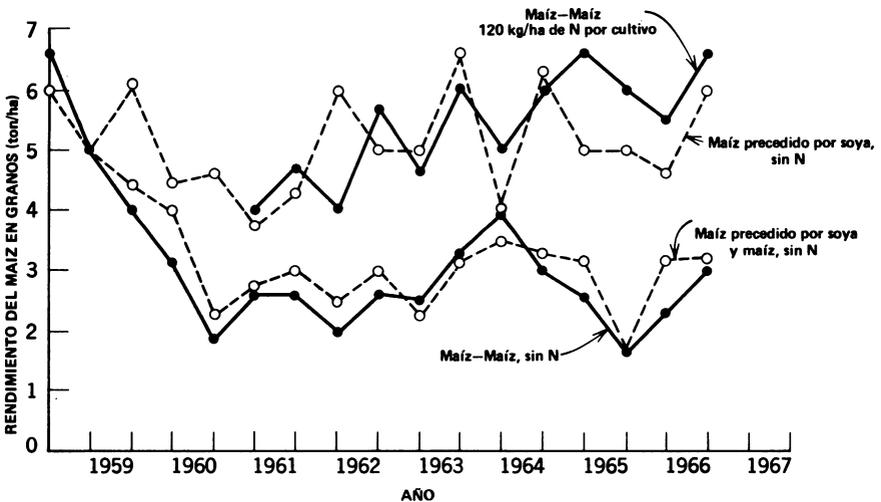


Fig. 12.14. Efectos de larga duración de los cultivos anteriores y de aplicaciones de nitrógeno en el rendimiento de un cultivo doble de maíz en un suelo con un nivel alto de bases en el Valle del Cauca, Colombia. (Fuente: Bernal, 1972).

12.16). Cuando hubo dos cultivos consecutivos de maíz, desapareció el efecto del cultivo de soya, pero el de la alfalfa fue todavía evidente, aunque a un nivel menor de rendimiento. El informe de Bernal muestra que la descomposición del residuo de la soya puede suministrar el equivalente de 120 kg/ha de fertilizante nitrogenado a uno, pero no a dos cultivos siguientes, mientras que el efecto de la alfalfa puede durar por más tiempo, pero faltó la ventaja de un cultivo comercial como la soya.

CUADRO No. 12.16. Efectos del cultivo precedente y la fertilización nitrogenada en rendimientos de maíz en experimentos de cultivos dobles llevados a cabo durante 9 años en Mollisoles del Valle del Cauca en Colombia. (Fuente: Bernal, 1972, y Gómez, 1968).

Cultivo(s) precedente(s)	Rendimiento promedio del maíz (ton/ha)	
	0 kg/ha de N agregados a cada cultivo	120 kg/ha de N agregados a cada cultivo
Maíz	2,8	5,7
Soya	5,3	6,5
Soya y maíz	3,0	5,2
Alfalfa	5,5	6,1
Alfalfa y maíz	4,5	6,4

Los efectos de los cultivos precedentes no se limitan a sistemas de cultivos múltiples secuenciales. Jones (1974) observó grandes diferencias en Samaru, Nigeria, donde solamente es posible un cultivo por año debido al severo régimen ústico de humedad del suelo. El Cuadro 12.17 presenta los rendimientos de maíz con tres dosis de nitrógeno, afectados de acuerdo con el cultivo de la estación lluviosa anterior que podía ser maní, caupí o sorgo. El rendimiento del maíz fue más alto cuando estuvo precedido por maní que por caupí, y también más alto cuando estuvo precedido por caupí que por sorgo. Las diferencias fueron mayores sin aplicaciones de nitrógeno y disminuyeron con la aplicación del nivel aparentemente óptimo de 84 kg/ha de N. El Cuadro 12.18 muestra que el cultivo precedente de maní dio por resultado una mayor absorción de nitrógeno por el maíz, que estuvo relacionada con tasas más altas de mineralización del nitrógeno del suelo, debido supuestamente a la descomposición de residuos. La diferencia entre maní y caupí probablemente está relacionada con la mayor cantidad de residuos de raíz en el cultivo anterior. Diferencias semejantes se han observado en experimentos en el IITA,

CUADRO No. 12.17. Efectos del cultivo previo en el rendimiento y respuesta de maíz al nitrógeno, en Ustalfs de Samaru, Nigeria. (Fuente: adaptado de Jones, 1974).

Cultivo sembrado durante la estación lluviosa anterior	Rendimiento del maíz (ton/ha)		
	Nitrógeno aplicado al maíz (kg/ha)		
	0	84	168
Maní	3,4	5,4	5,2
Caupí	2,7	5,2	4,1
Sorgo	2,4	4,9	4,0

CUADRO No. 12.18. Absorción de nitrógeno por maíz a las 12 semanas de crecimiento y nitrógeno del suelo mineralizado después de 5 semanas de incubación en los tratamientos con cero nitrógeno del Cuadro 12.17. (Fuente: adaptado de Jones, 1974).

Cultivo sembrado durante la estación lluviosa anterior	Absorción de N por las plantas (kg/ha)	N del suelo mineralizado (kg/ha)
Maní	78	62
Caupí	50	50
Sorgo	48	40

en que el efecto provechoso del cultivo precedente de una leguminosa de grano es función de la cantidad de residuos que quedan después de cosechar los granos.

El efecto del cultivo precedente puede ser negativo cuando se trata de una gramínea de crecimiento rápido que agota el nitrógeno orgánico del suelo o consume las reservas de humedad del suelo. También se han observado efectos dañinos con leguminosas de granos. Harwood y sus colaboradores en Filipinas observaron que los agricultores pocas veces sembraban maíz o caupí después de frijol mungo o aún un segundo cultivo de este frijol. Los experimentos demostraron que el frijol mungo tiene un efecto depresivo en el rendimiento, particularmente con niveles bajos de nitrógeno (IRRI, 1973; Herrera y Harwood, 1975). Los resultados se presentan en la Fig. 12.12. Aparentemente el frijol mungo secreta ciertas toxinas aún no identificadas que deprimen el crecimiento. Muchas de estas relaciones son

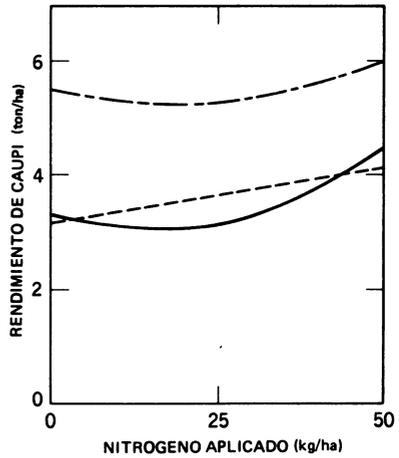
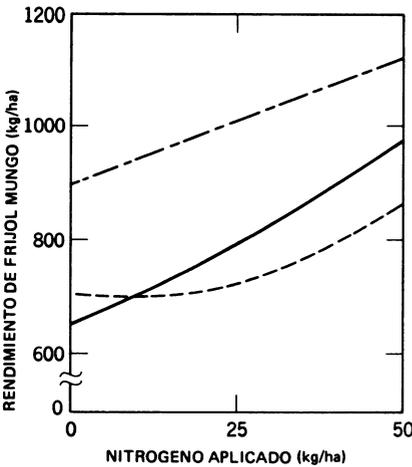
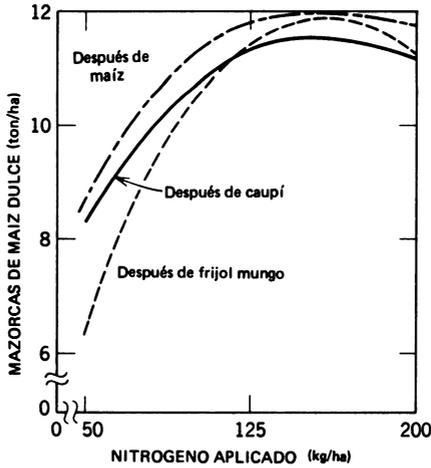


Fig. 12.15. Rendimientos de camote, frijol mungo y caupí, influenciados por el nivel de nitrógeno y por el cultivo anterior. (Fuente: IRRI, 1973).

conocidas por los agricultores, pero las razones deberían ser cuantificadas por los investigadores.

CULTIVOS DE RETOÑOS

El cultivo de retoños (soca) es otra forma de siembra secuencial. Consiste en el cultivo de los rebrotes o retoños de un cultivo previamente cosechado, por lo tanto no se necesita preparación adicional

del terreno y los retoños aprovechan parcial o totalmente el sistema radicular existente. Plucknett et al, (1970) han hecho una revisión completa de este sistema. La rebrotación se origina en yemas basales en el tallo o corona y es estimulada por cortes a ciertas alturas, irrigación y fertilización nitrogenada. Aunque el cultivo de caña de azúcar, piña, y hasta banano, se basa en este principio, el cultivo de retoños basales se ajusta al concepto de cultivos múltiples en el caso de cultivos de corta duración tales como sorgo; arroz, mijo y algodón los cuales se pueden cultivar más de una vez en un año.

En el caso del arroz, un cultivo de retoños después de un primer cultivo vigoroso produce normalmente las dos terceras partes del rendimiento de la primera cosecha en las dos terceras partes del tiempo aproximadamente.

El corte de la paja del cultivo original a ras del suelo, su remoción, ya sea sacándola o ordenándola a lo largo de las hileras, es esencial para el buen éxito en el desarrollo de los retoños. La fertilización nitrogenada antes o poco después del corte también es esencial para obtener buen rendimiento del arroz de retoños, ya que el período de tiempo entre la brotación de las yemas y la iniciación de panículas es muy corto.

El éxito de los cultivos de retoños depende de una temperatura y un régimen de humedad adecuados seguidamente de la cosecha del cultivo original, la forma de cosecha, y en la mayoría de los casos del grado de control de insectos, enfermedades y malas hierbas del primer cultivo. Los problemas de insectos, enfermedades y malezas se complican mucho en los cultivos de retoños.

El potencial del cultivo de retoños en los trópicos puede visualizarse a través del trabajo de Bradfield (1970), en un ensayo llevado a cabo en un campo de arroz inundado en un suelo montmorilonítico fértil en Los Baños, Filipinas. Bradfield cosechó cuatro cultivos por año por medio de la siembra de arroz inundado sin fanguear el suelo al principio de la estación lluviosa, seguida por la siembra de un sorgo granero híbrido, del cual obtuvo una cosecha principal y dos cosechas de retoños con riego durante la estación seca. Las cuatro cosechas tuvieron una producción total de 22 ton/ha/año de granos. Los cultivos de retoños de sorgo maduraron de 10 a 15 días más temprano que el cultivo original. Hasta donde este autor sabe, esta cifra de producción anual de granos sólo ha sido sobrepasada una vez con un rendimiento de 28 ton/ha por año de un cultivo cuádruple de arroz irrigado, también en la misma localidad (IRRI, 1969).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El grueso de los alimentos que se consumen en la mayoría de los países tropicales se producen en sistemas de pequeña agricultura caracterizados por fincas de unas pocas hectáreas, mecanización

limitada y una gran variedad de sistemas de cultivos múltiples en los que varios cultivos con frecuencia crecen simultáneamente en el mismo campo y se cosechan dentro de un mismo año.

2. Los sistemas de cultivos múltiples se dividen en simultáneos y secuenciales. Se definen como simultáneos cuando la intensificación de la siembra es en tiempo y espacio. Las cuatro formas principales de cultivos intercalados son: mixto, en hileras, en relevo y en franjas. Los sistemas de cultivos secuenciales incluyen intensificación en tiempo: dobles, triples, cuádruples, y de retoños.
3. Muchos sistemas intercalados son más productivos que los cultivos puros por cuanto se obtienen rendimientos más altos por hectárea que con dos medias hectáreas de cultivos puros. La suma de los rendimientos relativos determina la ventaja o desventaja relativa de los sistemas intercalados. Los sistemas intercalados que han tenido éxito son más eficientes por: 1) la mejor utilización de la radiación solar disponible; 2) la mayor eficiencia en la utilización de nutrientes del suelo o de los fertilizantes aplicados debido a razones desconocidas que incluyen competencia de raíces versus complementación; 3) menos problemas con control de malas hierbas, insectos y enfermedades; y 4) mejor uso de la mano de obra manual y otras tecnologías de baja energía. Estos sistemas satisfactorios han sido seleccionados por los agricultores de una gran variedad de combinaciones, la mayoría de los cuales no son más productivos que los cultivos puros. La principal limitación de los cultivos intercalados es la dificultad de mecanización.
4. Cuando se siembra más de un cultivo, simultáneamente la relación suelo-planta no se comprende bien. La evidencia limitada de que se dispone sugiere una mayor absorción de nutrientes cuando hay dos sistemas radiculares separados explotando diferentes áreas del suelo o no compiten agresivamente entre ellos por nutrientes. La competencia por nutrientes que se movilizan fácilmente, como el nitrato, se cree que es más crítica que por nutrientes como fósforo. La siembra intercalada de abonos verdes con cultivos de cereales parece una manera efectiva de usar abonos verdes al mismo tiempo que un cultivo comercial. Las interacciones entre cultivos con diferentes exigencias de nutrición no están bien comprendidas. Se sabe poco y hay que aprender mucho sobre cómo fertilizar en forma efectiva los sistemas de cultivos intercalados.
5. Los sistemas secuenciales de cultivo también hacen mejor uso de la energía solar disponible, de las temperaturas altas, y de la

humedad disponible en las áreas tropicales, al haber dos o más cultivos por año, uno después del otro. La mayor parte de los conocimientos básicos obtenidos de cultivos puros es aplicable a los cultivos individuales, pero los efectos del cultivo precedente y el corto intervalo de tiempo entre la cosecha de uno y la próxima siembra del otro afectan las prácticas de manejo del suelo.

6. El número de operaciones de labranza necesarias para promover la buena estructura del suelo y controlar las malas hierbas disminuye conforme aumenta el número de días que el suelo está protegido por el dosel de cultivos. En el caso de arroz inundado, las clases de cultivos que pueden sembrarse sucesivamente dependen del grado de regeneración de la estructura del suelo, y de la tolerancia del cultivo a la aireación deficiente del suelo.
7. Los efectos de las secuencias intensivas en las propiedades químicas del suelo son por lo general beneficiosos cuando los cultivos se fertilizan correctamente. El efecto residual de la fertilización nitrogenada del cultivo anterior varía de acuerdo con la especie, las propiedades del suelo, y el manejo.
8. Alternando un cereal con una leguminosa de grano se obtienen resultados positivos y una considerable economía en fertilizantes nitrogenados en sistemas de cultivos dobles. El efecto provechoso de los residuos de las leguminosas después de cosechar sus granos, es generalmente limitado para el cultivo siguiente. Hay algunas sucesiones incompatibles, asociadas con toxinas secretadas por algunas leguminosas de grano, tales como el frijol mungo.

REFERENCIAS

- ABEYRATNE, E. L. F. Dryland farming in Ceylon. *Trop. Agriculturalist* 112:191-229. 1956.
- AGBOOLA, A. A., y FAYEMI, A. A. Preliminary trials on the intercropping of maize with different tropical legumes in Western Nigeria. *J. Agr. Sci.* 77:219-225. 1971a.
- _____, y FAYEMI, A. A. Effects of interplanted legumes and fertilizer treatments on the major soil nutrients. *Int. Symp. Soil Fert. Eval. Proc. (New Delhi)* 1:529-540. 1971b.
- _____, y FAYEMI, A. A. Effects of soil management on corn yields and soil nutrients in the rainforest zone of Western Nigeria. *Agron. J.* 64:641-644. 1972.
- AIYER, A. K. Y. N. Mixed cropping in India. *Indian J. Agr. Sci.* 19:439-543. 1949.

- ALVIM, R. y ALVIM, P. T. Efeito da densidade de plantio no aproveitamento de energia luminosa pelo milho (*Zea mays*) e pelo feijão (*Phaseolus vulgaris*) em culturas exclusivas e consorciadas. Turrialba 19:383-393. 1969.
- ANDERSON, E. An indian garden in Santa Lucía, Guatemala. Ceiba 1:97-103. 1950.
- _____, y WILLIAMS, L. O. Maize and sorghum as a mixed crop in Honduras. Ann. Missouri Bot. Garden 41:213-215. 1954.
- _____. Intercropping with sorghum in Nigeria. Exptal. Agr. 8:139-150. 1972.
- _____. Responses of sorghum varieties to intercropping. Exptal. Agr. 10:57-63. 1974.
- _____, y KASSAM, A. H. The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. In R. I. Pappendick et al. (eds.). Multiple cropping symposium. American Society of Agronomy, 1976. (In press).
- ASPAC. Multiple cropping systems in Taiwan. ASPAC and Food Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan, 1974. 77 p.
- BAINS, S., DAYANAND, S., y SINGH, K. N. A note on the relative performance of different intercrops in sugarcane. Indian J. Agron. 15:86. 1970.
- BALDWIN, J. P., y TINKER, P. B. A method for estimating the lengths and spatial patterns of two interpenetrating root systems. Plant and Soil 37:209-213. 1972.
- BANTILAN, R. T., PALADA, M. C., y HARWOOD, R. R. Integrated weed management. 1. Key factor affecting crop-weed balance. Weed Sci. Bull. Philip, 1974. (In press).
- BERNAL, J. Las leguminosas como fuentes de nitrógeno en pastos y rotaciones. Suelos Ecuatoriales 4:175-194. 1972.
- BHOJ, R. L., y KAPOOR, P. C. Intercropping of maize in spring planted sugarcane gives high profits with adequate nitrogen use. Indian J. Agron. 15:242-246. 1970.
- BLENCOWE, E. K., y BLENCOWE, J. W. (eds.). Crop diversification in Malaysia. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 1970. 300 p.
- _____, y TEMPLETON, J. K. Establishing cocoa under rubber. In E. K. Blencowe y J. W. Blencowe (eds.). Crop diversification in Malaysia. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 1970. pp. 286-295.
- BOURKE, R. M. A long term rotation trial in New Britain, Papua, New Guinea. Unpublished paper. Lowlands Agricultural Experiment Station, Keravat, East New Britain, Papua, New Guinea, 1974. 18 p.
- BRADFIELD, R. Some unconventional views of rice culture in Southeast Asia. Unpublished seminar paper. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1964. 25 p.
- _____. Training agronomists for increasing food production in the humid tropics. ASA Spec. Publ. 15:45-64. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1969.
- _____. Increasing food production in the tropics by multiple cropping. In D. G. Aldrich (ed.), research for the world food crisis. American Association for the Advancement of Science, Washington, 1970. pp. 229-242.
- _____. Maximizing food production through multiple cropping systems centered on rice. In Rice, science and man. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 143-163.
- BRAY, R. H. A nutrient mobility concept of soil-plant relationships. Soil Sci. 78:9-22. 1954.

- BYRD, H. W. Effects of breaking over corn plants in Brazil on dry matter accumulation, germination and vigor of kernels. *Fitotecnia Latinoamerica*, 4:109-123. 1967.
- CATIE. Conferencia sobre sistemas de producción agrícola para el trópico. Informe final. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica, 1974.
- CHANG, H. Rotations and intercropping systems of sugarcane in Taiwan. *Taiwan Sugar* 12:1-6. 1965.
- _____, CHANG, C. H., y HO, F. W. Competition between sugarcane and intercrops for fertilizer tagged with P^{32} and Rb^{86} . *J. Agr. Assoc. China* 63:43-49. 1969.
- _____. Relationships between net radiation, soil temperature and sugarcane growth in an intercropped field. *Taiwan Agr. Quart.* 7:123-138. 1971.
- CHUNDAWAT, G. S. Note on the effect of phosphate fertilization and legume, non-legume component on nitrogen reserve of soil. *Indian J. Agr. Res.* 6:167-168. 1972.
- CORDERO, A. y McCOLLUM, R. E. Unpublished data. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh.
- DALAL, R. C. Effects of intercropping maize with pigeon peas on grain yields and nutrient uptake. *Exptal. Agr.* 10:219-224. 1974.
- DALRYMPLE, D. G. Survey of multiple cropping in less developed nations. U.S. Dept. Agr. Foreign Economic Devel. Service FEDR 12. Washington, 1971.
- DeGUZMAN, M. R. Pasture and fodder production under coconuts. *ASPAC Ext. Bull.* 45. Taipei, Taiwan, 1974. 29 p.
- DelVALLE, R. Efecto de fertilización con NPK en el sistema maíz-frijol asociado bajo condiciones del Valle de Monjas. Tesis Ing. Agr. Universidad de San Carlos, Guatemala, 1975. 41 p.
- ENYI, B. A. C. Effects of intercropping maize or sorghum with cowpeas, pigeon peas and beans. *Exptal. Agr.* 9:83-90. 1973.
- EVANS, A. C. Studies of intercropping. I. Maize or sorghum with groundnuts. *East Afr. Agr. For. J.* 26:1-10. 1960.
- FAO. Production yearbook. P. 8. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1973.
- FINLAY, R. C. Intercropping research and the small farmer in Tanzania. In *Field Staff Symposium. International Research and Development Centre, Ottawa*, 1974.
- FRANCIS, C. A., FLOR, C. A., y TEMPLE, S. R. Adapting varieties for intercropping systems in the tropics. In R. I. Pappendick et al. (eds.). *Multiple cropping symposium. American Society of Agronomy*, 1976. (In press).
- GAUTAM, O. P., SHAH, V. H., y NAIR, K. P. M. Agronomic investigations with hybrid maize. II. Studies of intercropping, row spacing and method of phosphorus application with hybrid maize. *Indian J. Agron.* 9:247-254. 1964.
- GEHRKE, M. R. Distribution of absorbing roots of coffee and rubber in mixed plantings in two ecological zones of Costa Rica. M.S. Thesis, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Turrialba, Costa Rica, 1962. 105 p.
- GOMEZ, J. Rotación y rendimiento de maíz. *Agr. Tropical (Colombia)* 24:204-220. 1968.
- GOWDA, B. K. L., y MARIAKULANDAI, A. Intercropped green manures vs. green leaf manuring on sugarcane yields. *Madras Agr. J.* 59:312-317. 1972.
- GRIMES, R. C. Intercropping and alternate row cropping of cotton and maize. *East. Afr. Agr. For. J.* 28:161-163. 1963.

- HALL, R. L. Analysis of the nature of interference between plants and species. I. Concepts and extension of the DeWit analysis to examine effects. *Aust. J. Agr. Res.* 25:739-747. 1974a.
- _____. Analysis of the nature of interference between plants and species. II. Nutrient relations in a Nandi *Setaria* and Greenleaf *Desmodium* association with particular reference to potassium. *Aust. J. Agr. Res.* 25:749-756. 1974b.
- HART, R. D. The design and evaluation of a bean, corn and manioc polyculture cropping system for the humid tropics. Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, 1974. 158 p.
- _____. A bean, corn and manioc polyculture cropping system. I. The effect of interspecific competition on crop yield. *Turrialba* 25:294-301. 1975.
- HARWOOD, R. R. Farmer-oriented research aimed at crop intensification. In *Proceedings of the cropping systems workshop*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1975. pp. 12-32.
- _____, y PRICE, E. C. Multiple cropping in tropical Asia. In R. I. Pappendick et al (eds.). *Multiple Cropping Symposium*. American Society of Agronomy, 1976.
- HAYLETT, D. G. Green manuring and soil fertility. *South Afr. J. Agr. Sci.* 4:363-378. 1961.
- HERRERA, W. A. T., y HARWOOD, R. R. Crop interrelationships in intensive cropping systems. Saturday Seminar. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1973. 26 p.
- _____, y HARWOOD, R. R. Effect of plant density and row arrangement on productivity of corn-rice intercrop. Unpublished paper. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1974. 7 p.
- _____, y HARWOOD, R. R. Agronomic results in the intensive upland rice area in Batangas. Saturday Seminar. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1975. 40 p.
- HILDEBRAND, P. E., y FRENCH, E. C. Un sistema salvadoreño de multicultivos: su potencial y sus problemas. Departamento de Economía Agrícola, CENTA, Santa Tecla, El Salvador, 1974. 23 p.
- _____. Multiple cropping makes "dollars and sense" agronomy. In R. I. Pappendick et al (eds.). *Multiple Cropping symposium*. American Society of Agronomy, 1976. (In press).
- HUNTER, J. R., y CAMACHO, C. Some observations on permanent mixed cropping in the humid tropics. *Turrialba* 11:26-33. 1961.
- IARI. Recent research on multiple cropping. *Indian agr. Res. Inst. Res. Bull.* 8. (New Series), 1972.
- IBRAHIM, N. E., y KABESH, M. O. Effect of associated growth on the yield and nutrition of legume and grass plants. I. Wheat and horsebeans mixed for grain production. *United Arab Republic J. Soil Sci.* 11:271-283. 1971.
- IICA. Bibliografía sobre sistemas de agricultura tropical. IICA-CIDIA Documentación e Información Agrícola no. 27. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Turrialba, Costa Rica, 1974.
- IRRI. Agronomy section. Annual Report. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1969. 109 p.
- _____. Multiple cropping. Annual Report. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1972. pp. 21-35.
- _____. Multiple cropping. Annual Report. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1973. pp. 14-34.
- _____. Multiple cropping. Annual Report. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1974.

- IRRI. Proceedings of the cropping systems workshop. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1975. 396 p.
- ISO, E. Rice and crops in its rotation in subtropical zones. Japan FAO Association, Tokyo, 1954. 611 p.
- JAVIER, E. Q. Improved varieties of pastures under coconuts. ASPAC Ext. Bull. 37. Tapei, Taiwan, 1974.
- JOLLY, A. J. Mixed farming in the tropics. Turrialba 8:52-54. 1958.
- JONES, M. J. Effects of previous crop on yield and nitrogen response of maize at Samaru, Nigeria. Exptal. Agr. 10:273-279. 1974.
- KAMATH, M. B., y SUBBIAH, B. V. Phosphorus uptake pattern by crops from different depths. Int. Symp. Soil Fert. Eval. Proc. (New Delhi) 1:281-291. 1971.
- KANWAR, J. S., y KRISHNAMOORTHY, C. Arid soils-multiple cropping and soil fertility problems in India. FAO World Soil Resources Rept. 41. 1971. pp. 60-67.
- KASHIRAD, A. y MARSCHNER, H. Iron nutrition of sunflower and corn plants in mono and mixed culture. Plant and Soil 41:91-101. 1974.
- KASSAM, A. H., y STOCKINGER, K. Growth and nitrogen uptake of sorghum and millet in mixed cropping. Samaru Agr. Newsletter 15:28-33. 1973.
- KOLI, S. E. Agronomy on cereal crops. Afr. Soils 15:157-164. 1970.
- KOREGAVE, B. A. Effect of mixed cropping on the growth and yield of suram (Elephant yam, *Amorphallus campanulatus* B.). Indian J. Agron. 9:255-260. 1964.
- KRUTMAN, S. Cultura consorciada cana x feijoeiro; primeros resultados. Pesq. Agropec. Bras. 3:127-134. 1968.
- KURTZ, T., APPLEMAN, M. D., y BRAY, R. H. Preliminary trials with intercropping corn and clover. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 11:349-355. 1947.
- _____, MELSTED, S. W., y BRAY, R. H. The importance of water and nitrogen in reducing competition between intercrops and corn. Agron. J. 44:13-17. 1952.
- LEPIZ, I. R. Asociación de cultivos maíz-frijol. Agr. Técnica (México) 3:98-101. 1971.
- LEWIS, W. y PHILLIPS, J. A. Double cropping in Southern United States. In R. I. Pappendick et al. Multiple cropping symposium. American Society of Agronomy, 1976. (In press).
- LIBOON, S. P., y HARWOOD, R. R. Nitrogen response in corn-soybean intercropping. Unpublished paper. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1975. 12 p.
- LIN, C. F., LEE WANG, T. S., CHANG, A. H., y CHENG, C. Y. Effects of some long-term fertilizer treatments on the chemical properties of soil and yield of rice. J. Taiwan Agr. Res. 22:241-262. 1973.
- MacEVOY, M. G. Establishment and management of pastures in coconut plantation. ASPAC Ext. Bull. 38. Tapei, Taiwan, 1974. 17 p.
- MAHAPATRA, I. C., y SADANANDAN, N. Effects of multiple cropping on some of the physical and chemical properties of upland alluvial rice soils. Int. Rice Comm. Newsletter 22:26-34. 1973.
- NAIR, P. K. R., y SINGH, A. Production potential, economic feasibilities and input requirements of five high intensity crop rotations. Indian J. Agr. Sci. 41:805-815. 1971.
- _____, SINGH, A., y MODGAL, S. C. Maintenance of soil fertility under intensive cropping in northern India. Indian J. Agr. Sci. 43:250-255. 1973a.

- NAIR, P. K. R., SINGH, A., y MOGDAL, S. C. Harvest of solar energy through intensive multiple cropping. *Indian J. Agr. Sci.* 43:983-988. 1973b.
- NELLIAT, E. V., BAVAPPA, K. V., y NAIR, P. K. R. Multi-storeyed cropping—a new dimension in multiple cropping for coconut plantations. *World Crops*, November-December 1974:260-265. 1974.
- NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Agronomic-economic research on tropical soils. Annual Report. Soil Science Department, North Carolina State University. Raleigh, 1973. 190 p.
- _____. Agronomic-economic research on tropical soils. Annual Report. Soil Science Department, North Carolina State University. Raleigh, 1974. 240 p.
- OELSLIGLE, D. D., y PINCHINAT, A. M. Effect of varying nitrogen levels on grain yields, energy and protein production and economic returns of corn and beans when grown alone and in different combinations. Unpublished paper. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1975. 16 p.
- _____, McCOLLUM, R. E., y KANG, B. T. Soil fertility management in multiple cropping systems in the tropics. In R. I. Pappendick et al. (eds.). *Multiple cropping, symposium*, American Society of Agronomy, 1976. (In press).
- OKIGBO, B. D., y GREENLAND, D. J. Intercropping systems in tropical Africa. In R. I. Pappendick et al. (eds.). *Multiple cropping symposium*. American Society of Agronomy, 1976. (In press).
- OSIRU, D. S. O., y WILLEY, R. W. Studies of mixtures of dwarf sorghum and beans with particular reference to plant population. *J. Agr. Sci.* 71:531-540. 1972.
- OZA, A. M., y SUBBIAH, B. V. Residual fertilizer nitrogen in the soil under multiple cropping conditions using nitrogen-15. *Indian Soc. Nucl. Tech. Agr. Biol. Newsletter* 2:55-56. 1973.
- PALADA, M. C., y HARWOOD, R. R. The relative return of corn-rice intercropping and monoculture on nitrogen application. Unpublished paper. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 1974. 7 p.
- PAN, Y. C., SUN, T. T., y LIN, K. C. The nitrogen requirement for interplanting tobacco with sugarcane. *Soils Fert. Taiwan* 1962:74. 1963.
- PATHAK, R. D., GHOSH, T. K., y SRIVATSAVA, V. C. Response of inter-seeding legumes in maize to different dates and nitrogen levels. *Ranchi Univ. J. Agr. Res.* 3:4-6. 1968.
- PAVLYCHENKO, T. K. Qualitative study of the entire root system of weed and plants under field conditions. *Ecology* 18:62-79. 1937.
- PEREGRINA, R. P. La magnitud de la aportación de nitrógeno por diferentes leguminosas en siembras asociadas con maíz. II. Congreso Sociedad Mexicana de Ciencia de Suelo 1:135-141. 1965.
- PINCHINAT, A. M., y OELSLIGLE, D. D. Combining corn and soybeans for increased production in the tropics. *Agron. Abs.* 1974:46. 1974.
- _____, SORIA, J., y BAZAN, R. Multiple cropping in tropical America. In R. I. Pappendick et al. (eds.). *Multiple Cropping Symposium*. American Society of Agronomy, 1976. (In press).
- PLUCKNETT, D. L., EVENSON, J. P., y SANFORD, W. G. Ratoon cropping. *Adv. Agron.* 22:205-326. 1970.
- POULTNEY, R. G. A comparison of direct seeding and undersowing on the establishment of grass and the effect on the cover crop. *East. Afr. Agr. For. J.* 29:26-30. 1963.

- PUSHPARAJAH, E. y TANG, S. Y. Tapioca as an intercrop in rubber. In E. K. y J. W. Blencowe (eds.). Crop diversification in Malaysia. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 1970. pp. 128-138.
- _____, y WONG, P. W. Cultivation of groundnuts and maize as intercrops in rubber. In E. K. y J. M. Blencowe (eds.). Crop diversification in Malaysia. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 1970. pp. 53-65.
- RADKE, J. K., y HAGSTROM, R. T. Intercropping for wind protection. In R. I. Pappendick et al. (eds.). Multiple cropping symposium. American Society of Agronomy, 1976. (In press).
- RAHEJA, S. K., PRASAD, R., y JAIN, H. C. Long-term fertilizer studies in crop rotations. Int. Symp. Soil Fert. Eval. Proc. (New Delhi) 1:881-903. 1971.
- RAPER, C. D., y BARBER, S. A. Rooting systems of soybeans. I. Differences in root morphology among varieties. Agron. J. 62:581-584. 1970.
- REDDI, G. H. S., RAO, Y. Y., y RAO, Y. P. Residual effect of N, P and K applied to IR8 rice on succeeding soybean crop. Indian J. Agr. Res. 7:177-187. 1973.
- SADANANDAN, N. y MAHAPATRA, I. C. The influence of multiple cropping on the bulk density of upland alluvial rice soils. Agr. Res. J. Kerala 8:98-100. 1970.
- _____, y MAHAPATRA, I. C. Study on the soil available phosphorus as affected by multiple cropping. J. Indian Soc. Sci. 20:371-374. 1972.
- _____, y MAHAPATRA, I. C. A study of the nitrogen status of the soil as affected by multiple cropping. J. Soc. Soil Sci. 21:173-175. 1973.
- SANABRIA, E. Producción de biomasa, nutrición mineral y absorción de agua en la asociación frijol-maíz cultivada en solución nutritiva. M.S. Thesis, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 1975. 74 p.
- SANFORD, J. O., MYHRE, D. L., y MERWINE, N. C. Double cropping systems involving no tillage and conventional tillage. Agron. J. 65:978-982. 1973.
- SANTHIRASEGARAM, K. Intercropping of coconuts with special reference to food production. Ceylon Coconut Planters Rev. 5:12-24. 1967.
- SARMA, V. y PATIL, R. V. Residual effect of sorghum and maize fertilization on succeeding crop of groundnut. J. Indian Soc. Soil Sci. 19:313-316. 1971.
- SHARMA, B. M., y DEB, D. L. Copper status of soils of the Union Territory of Delhi with special reference to cropping sequence. J. Indian Soc. Soil Sci. 22:145-150. 1974.
- SHELTON, H. M., y HUMPHREYS, L. R. Undersowing rice (*Oryza sativa*) with *Stylosanthes guyanensis*. Exptal. Agr. 11:89-112. 1975.
- SHEN, T. H. Agricultural development in Taiwan since world war II. Comstock, New York, 1964. pp. 155-164.
- SINGH, S. Cotton yield as influenced by the preceding legumes raised with and without phosphorus in combination with nitrogen application to cotton. Indian J. Agr. Sci. 37:57-68. 1967.
- _____, MISRA, D. K., VYAS, D. L., y DAVLAY, H. S. Fodder production in association with different legumes under different levels of nitrogen. Indian J. Agr. Sci. 41:172-176. 1971.
- SORÍA, J., BAZAN, R., PINCHINAT, A. M., PAEZ, G., MATEO, N., MORENO, R., FARGAS, J., y FORSYTHE, W. Investigación sobre sistemas de producción agrícola para el pequeño agricultor del trópico. Turrialba 25:283-293. 1975.
- STREETER, C. P. Reaching the developing world's small farmers. Rockefeller Foundation, New York, 1974. pp. 63-68.

- TRENBATH, B. R. Biomass productivity of mixtures. *Adv. Agron.* 24:177-210. 1974.
- TRIPLETT, G. B., Jr. Intercrops in corn and soybean cropping systems. *Agron. J.* 54:106-109. 1962.
- TROUSE, A. C. Below-ground reactions in multiple cropping systems. Unpublished paper. USDA-ARS, Auburn, Alabama, 1975.
- VALLIS, I., HAYDOCK, K. P., ROSS, P. J., y HENZELL, E. F. Isotopic studies on the uptake of nitrogen by pasture plants. 3. The uptake of small additions of N^{15} labeled fertilizers by Rhodes grass and Townsville Lucerne. *Aust. J. Agr. Res.* 18:865-877. 1967.
- VAN PARIJS, A. Rotations des plantes vivrières dan la region de Nioka (Haut-Ituri). *Bull. Agr. Congo Belgue* 48:1515-1544. 1957.
- VIEGAS, G. P., FREIRE, E. S., y FRAGA, C. G. Adubação do milho XIV. Ensaio com múcuna intercalada e adubos minerais. *Bragantia* 19:909-941. 1960.
- VINE, H. Experiments on the maintenance of soil fertility at Ibadan, Nigeria 1922-1951. *Emp. J. Exptal. Agr.* 21:65-85. 1953.
- WILLEY, R. W., y OSIRU, D. S. O. Studies of mixtures of maize and beans (*Phaseolus vulgaris*) with particular reference to plant population. *J. Agr. Sci.* 79:519-529. 1972.
- WOOD, R. C. Rotations in the tropics. *Trop. Agr. (Trinidad)* 11:44-46. 1934.

CAPITULO 13

MANEJO DEL SUELO PARA LA PRODUCCION DE PASTURAS TROPICALES

La producción de carne y leche proveniente de animales que consumen forraje es un componente muy importante de la agricultura tropical. Aproximadamente la mitad de las pasturas permanentes del mundo y la mitad de la población de ganado están localizadas en los trópicos (Cuadro 13.1). Sin embargo, de acuerdo con los estándares establecidos en los climas templados, la productividad de la ganadería tropical es baja. Solamente una tercera parte de la carne del mundo y una sexta parte de los productos derivados de la leche se producen en esta región (Jones, 1972).

La baja productividad en los trópicos de los animales que consumen forrajes se ha atribuido a varios factores tales como el efecto del calor y la salud animal. Aunque la producción animal incluye muchos aspectos complejos, la mayoría de los científicos zootecnistas concuerdan en que el suministro de alimentos es un factor limitante de mayor importancia que los aspectos ambientales o de salud

CUADRO No. 13.1. Importancia de los rumiantes en los trópicos (millones). (Fuente: basado en cifras de 1973 de FAO).

REGION	Hectáreas en pasturas permanentes	Bovinos	Ovejas	Cabras	Búfalos	Unidades* animales	Animales por hectárea de pastura
América Tropical	297	179	62	33	—	214	0,9
África Tropical	642	130	73	94	—	170	0,3
Asia Tropical	33	230	47	91	76	321	9,7
Australia y Oceanía**	455	29	137	—	—	57	0,1
Total	1427	568	319	218	76	762	0,5
Porcentaje del mundo	47	49	31	55	61	57	—

(*) Expresado en unidades de equivalentes de animales según cálculos de Russel et al (1974): 1 = ganado = 0,8 = búfalos, caballos y camellos; 0,2 = ovejas y cabras.

(**) Incluye la parte templada de Australia.

(McDowell, 1972). Muchos de los factores que limitan la producción de las pasturas están relacionados con limitaciones de los suelos.

A diferencia de los cultivos, las pasturas son una etapa intermedia hacia la producción deseada: carne, leche, fibra, o trabajo. Los resultados de prácticas de manejo del suelo para producción de pasturas debe medirse en términos de producción animal. Sin embargo, la investigación de suelos con mediciones de animales, son muy caras debido a las grandes extensiones de terreno que se necesitan, así como el gran número de animales necesarios para que la variabilidad animal quede debidamente considerada. El procedimiento común es hacer una selección preliminar de un número grande de tratamientos en experimentos de corte en parcelas pequeñas y luego seleccionar las combinaciones más prometedoras para ensayos en parcelas más grandes con pastoreo de animales.

Desde el punto de vista de manejo del suelo, se pueden identificar tres sistemas principales de producción de pasturas: pastoreo extensivo en sabanas naturales; pastoreo extensivo en pasturas mejoradas de mezclas de gramíneas y leguminosas; y producción intensiva de forraje o pasturas basadas en la fertilización de gramíneas. Aunque esto es una simplificación, cada una de estas categorías representa distintos sistemas de manejo del suelo. Los animales también se alimentan mediante el pastoreo nómada en áreas áridas, pero en este caso, la pradera más que el suelo, es el objetivo del manejo. En fincas pequeñas especialmente en Asia, la producción animal depende en gran parte de los residuos de los cultivos, pero en este caso los suelos se manejan con propósitos de producción de cultivos.

El ámbito de producción entre estos tres sistemas de manejo de suelo representa diferentes órdenes de magnitud. La producción de carne vacuna en sabanas naturales resulta en aumentos de peso vivo anual del orden de 20 a 50 kg/ha. En mezclas mejoradas de gramíneas y leguminosas con dosis mínimas de fertilizantes, los aumentos de peso vivo son del orden de 100 a 300 kg/ha por año. Las gramíneas con fertilización intensiva pueden producir de 500 a 1000 kg/ha de aumento de peso vivo por año.

En la mayor parte de los trópicos los animales no compiten con los humanos en el consumo de granos. La controversia sobre el lujo del consumo de carne a costa del uso de granos para alimentar los animales no es muy pertinente en los trópicos. La carne se produce a menudo en suelos que tienen serias limitaciones para la producción de cultivos debido a su bajo nivel de fertilidad natural, laderas escarpadas, o malas vías de comunicación. La producción de leche basada en suplementación con granos tiene más posibilidades de ser rentable que el uso de granos en la producción de carne. También permite un uso más intensivo de la mano de obra y del capital si hay disponibilidad de animales de leche genéticamente superiores y si también se cuenta con prácticas de manejo correctas. Sin embargo, aún con animales lecheros pocas veces se hace mucho uso de suplementación

con granos para alimentación de ganado en los trópicos. Subproductos tales como melaza y torta de algodón son más comunes en los complementos para alimentación de ganado lechero.

En ciertos valles intermontanos de América Central y del Sur se encuentra una excepción de estas generalizaciones; allí tierras de primera clase en la parte baja de los valles se dedica al pastoreo de ganado, mientras que laderas escarpadas de la vecindad se dedican a la siembra de cultivos intercalados. Esto es causa de los patrones de tenencia de la tierra que permite que los finqueros ricos compren las mejores tierras a los pequeños agricultores, quienes recurren a las laderas.

Con propósitos de simplicidad en este capítulo se usan datos de producción de carne por medio de animales machos en engorde. Los científicos zootecnistas pueden hacer los ajustes necesarios para otras especies, producción de leche o animales vacunos de otras edades. El término "pasturas" denota el consumo directo por los mismos animales, mientras que "forraje" se usa cuando el pasto se corta y se lleva a los animales alejados del campo en que se produjo.

PASTURAS NATURALES

La gran mayoría de las pasturas permanentes de los trópicos son naturales, principalmente en las sabanas. En las partes tropicales de América del Sur, Australia y Africa, las pasturas naturales cubren más del 90% de las áreas de pasturas permanentes (Crowder, 1974; Jones, 1972; McIlroy, 1972). La producción animal es baja; una unidad animal requiere del orden de 5 a 25 ha de pastura para su alimentación. Las especies naturales dominantes son gramíneas bien adaptadas de los géneros *Themeda*, *Trachypogon*, *Heteropogon*, *Paspalum*, *Axonopus*, *Hyparrhenia* y en algunos lugares altos, *Pennisetum*. Con excepción de América tropical y ciertas tierras altas de Africa Oriental, pocas leguminosas naturales se encuentran en las pasturas naturales.

FACTORES LIMITANTES

Los dos factores principales responsables de la baja productividad animal en las pasturas naturales son falta de humedad y la baja fertilidad natural de los suelos. La mayoría de estas áreas tienen regímenes ústicos de humedad del suelo caracterizados por una fuerte estación seca. En algunas partes de Australia y Africa las tierras de pasturas naturales tienen régimen arídico de humedad del suelo.

La interacción entre estos dos factores limitantes ha sido descrita correctamente por Crowder (1974) y puede parafrasearse de la manera siguiente: "la pastura generalmente es abundante durante la estación lluviosa, durante la cual los nuevos brotes o las plántulas se desarrollan y crecen rápidamente. Ese material foliar se consume en

grandes cantidades y es más digerible que las plantas adultas. La proteína cruda de algunas especies nativas jóvenes pueden llegar de 8 al 10%; de ahí que el ganado generalmente gane peso durante la estación lluviosa. Domina el tipo de gramíneas de hábito erecto y la elongación de los tallos y la floración comienzan antes de que principie la estación seca. Conforme se acerca la madurez fisiológica la razón hoja:tallo disminuye y en consecuencia baja el valor nutritivo. Las plantas se tornan progresivamente más bajas en proteína, minerales y carbohidratos solubles, y más altas en fibra y lignina. Estos cambios disminuyen la palatabilidad, el consumo y la digestibilidad de las plantas, dando por resultado un descenso en el consumo de energía y proteína. En los pastos tropicales adultos la proteína cruda puede descender a valores críticos del 3 al 5%. Una deficiencia de ciertos minerales en el pasto, particularmente fósforo y calcio, pueden acentuar el problema aún más. Durante la estación seca la digestibilidad disminuye aún más, debido a que los minerales solubles, la energía y la proteína se pierden a través de la respiración de las plantas, la lixiviación y la fermentación microbiana. Con una disminución en el consumo y en la digestibilidad de pastos deteriorados, especialmente durante las sequías, el ganado sufre de hambre durante largos períodos. El nivel nutritivo desciende a un nivel menor del necesario para el mantenimiento; el ganado pierde peso, la concepción se demora, la fertilidad animal disminuye y la madurez se prolonga hasta el punto de que los animales se sacrifican desde los 6 a los 7 años de edad. Las limitaciones nutritivas a menudo rompen los ciclos de cría, bajan indebidamente la producción de terneros, hacen difícil mantener los reemplazos del hato y disponen de animales para matadero.

El resultado es un patrón en zigzag de aumento y disminución del peso vivo. La Fig. 13.1 ilustra este patrón, de acuerdo con mediciones en el Territorio Norte de Australia. El ganado gana peso rápidamente durante la estación lluviosa, pero pierde una buena proporción de esos aumentos durante la estación seca. Bajo tales circunstancias se necesitan de 4 a 5 años para alcanzar el tamaño con el peso para el mercado de 400 a 450 kg. Según McDowel (1972) en las partes más secas de Africa se necesitan hasta 10 años para alcanzar dicho tamaño. Sin estos factores limitantes el ganado debería estar listo para el matadero en 2 años.

LAS QUEMAS COMO HERRAMIENTA DE MANEJO

La quema periódica es una práctica de manejo casi universal para la cría de ganado en sabanas naturales, y las quemas diseminadas constituyen un rasgo corriente del paisaje durante la estación seca. Aunque tales quemas pueden ser provocadas por los rayos o por colillas de cigarrillos en las orillas de los caminos, los propietarios de sabanas naturales las queman intencionalmente. Esto es condenado

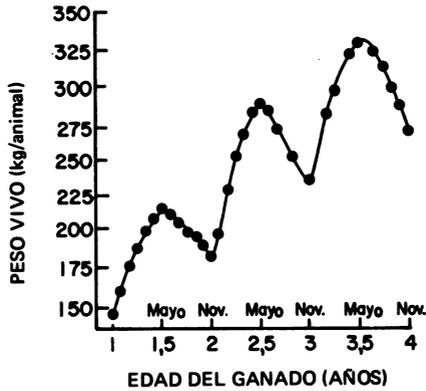


Fig. 13.1. Fluctuaciones estacionales en el peso de ganado como función de estaciones lluviosas y secas en pasturas naturales de Katherine, N.T. Australia. (Fuente: adaptado de Norman, 1966).

por personas que no conocen el sistema, quienes alegan daño ecológico con esta práctica. Sin embargo, un examen de los datos disponibles indica que la quema periódica es esencial para mantener la población y la productividad de muchas pasturas naturales, y que la frecuencia y época de las operaciones de quema son parámetros importantes del manejo.

La razón primaria para la quema es la destrucción de los pastos secos y no palatables y estimular el crecimiento de brotes jóvenes y más palatables. La quema también destruye insectos y otras plagas que atacan tanto a la pastura como a los animales y suministran cantidades moderadas de fósforo y bases al suelo. La mayor parte del contenido de carbono, de nitrógeno y de azufre de la vegetación se pierden en la atmósfera. La quema es un proceso rápido: una cortina de fuego viaja rápidamente a través de la sabana. Por lo tanto, es probable que sus efectos en las propiedades del suelo sean menos marcados que los de las quemas en las áreas de agricultura migratoria. Las gramíneas nativas de los géneros *Andropogon*, *Paspalum*, *Hyparrhenia*, *Trachypogon*, *Themeda* y otras, están bien adaptadas a la quema. Algunas especies de gramíneas introducidas, como guinea (*Panicum maximum*) toleran la quema.

Un experimento de largo plazo llevado a cabo por Van Rensburg (1952) en Alfisoles óxicos de las tierras altas de Tanzania mostró que cuando los pastos nativos se protegen contra el fuego desarrollan propiedades muy deficientes para el pastoreo. La pastura tenía poco vigor y grandes cantidades de material muerto impedían nuevo crecimiento. Sin embargo, cuando hubo quemas periódicas hubo un recrecimiento vigoroso durante la estación lluviosa. Edwards (1942) observó en Ngong, Kenia, que la especie de pasto nativo dominante

Themeda trianda desapareció de una área que fue protegida contra las quemas por 8 años, después de los cuales ocurrió un violento incendio. Una especie indeseable, *Digitaria abyssinica* ocupó su lugar. Edwards observó que las quemas anuales mantenían poblaciones estables de *Themeda* en buena condición para el pastoreo.

La época en que se quema durante el año puede producir cambios en la composición botánica. Ramsay y Rose-Innes (1963) compararon quemas a principio y fines de la estación seca en sabanas del norte de Ghana durante 11 años. Encontraron que cuando las pasturas se quemaban al principio de la estación seca mientras algunas hojas todavía estaban verdes se estimulaba el recrecimiento de la gramínea palatable *Andropogon gayanus*. Sin embargo, la quema tardía durante la estación seca, daba por resultado un fuego muy caliente y hacía que el pasto de mal sabor, *Loudetia acuminata*, dominara la sabana. Los ganaderos de estas áreas queman a principios de la estación seca. Van Rensburg (1952) obtuvo resultados semejantes en Tanzania. Sin embargo, en áreas más áridas están a favor de las quemas tardías en la estación seca. Norman (1963) encontró la quema tardía superior en Katherine, Australia, probablemente porque la acumulación de materia orgánica puede ser insuficiente para causar mucho daño. También observó que la quema temprana y frecuente en la estación seca seguida por pastoreo es una buena manera de eliminar los pastos nativos antes de sembrar los mejorados.

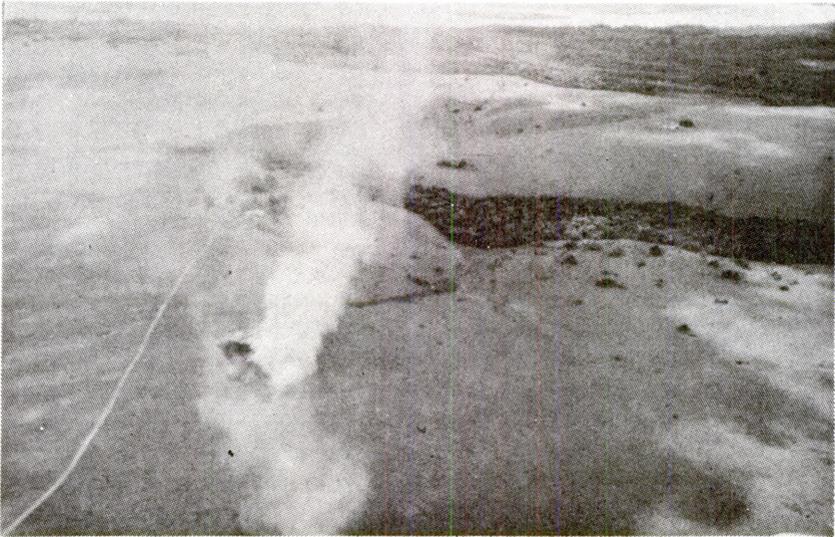


Fig. 13.2. Quema anual de sabanas en los Llanos Orientales, Colombia.

La frecuencia óptima de quema parece estar relacionada al suministro de humedad durante la estación lluviosa. En áreas con una precipitación pluvial mayor de 1200 mm durante la estación lluviosa, el crecimiento del pasto es abundante y da origen a una cantidad considerable de material seco que es necesario eliminar durante la estación seca. La quema anual es indicada para áreas con este régimen de pluviosidad, tales como los Llanos de Colombia, el Cerrado de Brasil, la sabana "Guinea", y sabana derivada de Africa Occidental. En áreas con menor pluviosidad durante la estación lluviosa, tales como en partes de Africa Oriental y el norte de Australia, se encontró que la quema cada dos años era mejor (Edwards, 1942; Van Rensburg, 1952; Norman, 1963). Aparentemente hay menos material muerto que eliminar.

Los intentos por mejorar la productividad de las pasturas tropicales nativas pueden agruparse en tres categorías principales: prácticas mejoradas de quema y pastoreo, fertilización y sobre siembra de leguminosas con fertilización. En las siguientes secciones se hace un examen de estos tres procedimientos.

MANEJO DE QUEMA Y PASTOREO

Una serie de experimentos llevados a cabo por CIAT (1972, 1973) en un Oxisol de Carimagua, Colombia, ilustra varios intentos de mejorar la productividad de una sabana dominada por los pastos naturales *Trachypogon vestitus* y *Paspalum pectenatum*. Con el simple aumento de la tasa de carga de 0,18 a 0,31 animales/ha el incremento anual de peso vivo aumentó de 5 a 12 kg/ha. Cuando el pastoreo rotacional se comparó con el pastoreo continuo tradicional, los aumentos de peso vivo disminuyeron moderadamente (CIAT, 1972). En el año siguiente la quema a principios de la estación seca se comparó con una quema secuencial de distintos potreros cada 2 meses. El aumento anual en peso vivo subió de 18 a 24 kg/ha con quema secuencial con una carga de 0,2 animales/ha. Cuando la carga se subió a 0,35 animales/ha, la quema anual tradicional produjo 33 kg/ha de aumento de peso vivo, mientras que la quema secuencial produjo 39. Estas cifras son muy bajas y reflejan la baja productividad de las sabanas naturales en Oxisoles, incluyendo las pérdidas de peso durante la estación seca. Aunque toda la producción es baja queda claro que la producción puede aumentarse significativamente dentro de estos ámbitos.

FERTILIZACION DE LAS PASTURAS NATURALES

La segunda alternativa, fertilización directa de las pasturas naturales, ha dado resultados dudosos. La investigación en este tópico muestra que el contenido de materia seca anual aumenta de dos a

cuatro veces con aplicaciones anuales de 60 a 150 kg/ha de nitrógeno, fósforo o potasio (Norman, 1962; Lotero et al, 1965; Walker, 1969; Keya, 1973; Olsen, 1974; Olsen y Santos, 1975). En el único experimento de este grupo que midió los aumentos de peso anuales (el de Walker en Uganda) los resultados fueron función de aumentos de materia seca. Sin embargo Walker concluyó que la fertilización era muy cara para que fuera económica. Parece que las gramíneas nativas están bien adaptadas a la baja fertilidad del suelo, y que son ineficientes para recuperar fertilizantes nitrogenados y fosfatados y transferir estos elementos a los animales que pastorean. Por ejemplo, Norman (1962) observó que la recuperación aparente de nitrógeno fue de menos del 10% en ensayos de pasturas nativas de *Themeda* en el norte de Australia, en comparación con especies de gramíneas mejoradas que recuperan del 40 al 70% del nitrógeno aplicado.

SOBRESIEMBRA DE LEGUMINOSAS

La mayoría de las pasturas naturales de los trópicos son bajas en nitrógeno disponible y unas pocas contienen cantidades significativas de especies de leguminosas. La forma más satisfactoria de mejorar la productividad de pasturas naturales sin eliminarlas, ha sido sembrando leguminosas en ellas.

En una proporción considerable de las pasturas del norte de Australia, la productividad se ha incrementado por medio de sobresiembra de *Stylosanthes humilis*, una leguminosa anual que se resiembraba por sí misma y es tolerante a la sequía, y a niveles bajos de fósforo disponible. Los suelos de las áreas (Alfisoles) son muy deficientes en nitrógeno, fósforo, azufre y molibdeno, pero no son altos en aluminio intercambiable. La sabana nativa de *Heteropogon contortus* se quema durante la estación seca. Semillas de *Stylosanthes* se mezclan con superfosfato sencillo enriquecido con molibdeno y se siembran en surcos o al voleo y luego se incorporan dentro del suelo con una rastra de discos. La siembra se hace cuando se esperan lluvias fuertes. Después de que las lluvias comienzan la pastura se pastorea fuertemente para reprimir el crecimiento del pasto natural y dejar que entre más luz para la leguminosa que crece lentamente. En su fase de plántulas el *Stylosanthes guianensis* es de sabor desagradable y el ganado lo deja crecer. Buenas pasturas mixtas adecuadas de gramínea y leguminosa se establecen en un año.

La investigación australiana indica que la fertilización es indispensable para el establecimiento y persistencia de *Stylosanthes humilis*. El superfosfato sencillo enriquecido con molibdeno se aplica en dosis del orden de 220 kg/ha que suple 22 kg de P, 22 kg de S y 1 kg de Mo/ha. El superfosfato triple no se usa porque no proporciona el azufre que estos suelos necesitan. Una aplicación de mantenimiento de la mitad o una cuarta parte de la dosis de establecimiento se agrega anualmente al comienzo de la estación lluviosa.

En el Cuadro 13.2 se presentan los resultados de esta práctica. Aunque la sola siembra del *Stylosanthes guianensis* duplicó la capacidad de carga y aumentó el peso vivo por hectárea, el uso de superfosfato incrementó aún más la producción, especialmente durante un año muy seco (1964-1965) y durante un año muy húmedo (1968-1969). Graham y Meyer (1972) también encontraron que un número mayor de novillos alcanzaron el peso deseado de mercado en 2,5 años cuando se alimentaron con la pastura de gramíneas y leguminosa fertilizada. Se necesitó un año más para que los animales que pastorearon con otros tratamientos alcanzaran el peso de mercado. Además, el valor de los novillos comercializados fue también más alto cuando se alimentaron con la pastura fertilizada de gramíneas y leguminosa. Estas prácticas han demostrado ser muy lucrativas.

CUADRO No. 13.2. Efectos de introducir *Stylosanthes humilis* en una sabana natural de *Heteropogon contortus* en la producción de carne durante 4 años en Marlborough, Queensland, Australia. (Fuente: Graham y Mayer, 1972).

Tratamiento	Tasa de carga (animales/ha)	Aumento de peso vivo (kg/ha)					Valor en el mercado de novillos individuales con 2 1/2 años (\$ Aust.)
		1964-65	65-66	67-68	68-69	Media	
Sabana natural	0,05	26	38	37	34	34	81
<i>Stylosanthes guianensis</i> sin fertilizar	0,10	40	78	76	63	64	93
<i>Stylosanthes guianensis</i> + superfosfato*	0,10	50	127	90	68	84	120

(*) 220 kg/ha de superfosfato sencillo con molibdeno inicialmente, más 110 kg/ha de mantenimiento anualmente.

Una investigación llevada a cabo por Keya y sus colaboradores en Alfisoles de Kitale, Kenia, mostraron que las leguminosas pueden establecerse satisfactoriamente en pasturas naturales de *Hyparrhenia* por medio de voleo sin incorporación con maquinaria. Sus resultados, presentados en el Cuadro 13.3, indican que una leguminosa bien adaptada, *Desmodium uncinatum* no aumentó la materia seca del forraje o la producción de proteína sin aplicaciones de superfosfato. Cuando se agregó 50 kg/ha de P como superfosfato, la proporción de leguminosas en la pastura aumentó del 12 al 54%, la materia seca total se duplicó y la producción de proteína se triplicó. Otro estudio

CUADRO No. 13.3. Efectos de la sobresiembra de leguminosas y fertilización fosfatada en la pomposición botánica, materia seca y producción de proteína en pasturas de *Hyparrhenia* en Kitale, Kenia, 16 meses después de la siembra. (Fuente: Keya et al, 1971a).

Suelo franco rojo (Alfisol) con pH 5,7.

Leguminosa sembrada al voleo	Superfosfato aplicado (kg/ha)	Materia seca total (ton/ha)	Proporción de leguminosas en la materia seca (%)	Producción total de proteínas (kg/ha)
Ninguna	0	3,6	—	266
	500	4,4	—	325
<i>Desmodium uncinatum</i>	0	4,1	12	270
	500	8,2	54	840

(Keya et al, 1972) no mostró diferencias entre métodos en la introducción de *Desmodium uncinatum* en la pastura natural. La quema, pastoreo, labranza y rastreado previos, no afectaron la población ni el rendimiento. En otro estudio de este grupo, Keya y Kalangi (1973) encontraron que la dosis de superfosfato podía reducirse a 25 kg/ha de P sin que disminuyera el rendimiento. También encontraron que la siembra al voleo de especies mejoradas de gramíneas, tales como *Chloris gayana* no era satisfactoria, mientras que la mayoría de las leguminosas se establecían fácilmente.

Experiencias del CIAT, en los Llanos Orientales de Colombia, y en el Cerrado de Brasil, indican la necesidad de que la superficie del suelo esté mullida para que las pequeñas semillas de leguminosas germinen bien.

PASTURAS MEJORADAS CON BASE EN MEZCLAS DE GRAMINEAS Y LEGUMINOSAS

El mejoramiento de las pasturas naturales está limitado por la baja productividad de las especies nativas de gramíneas. Para aumentar la producción de carne o la carga en uno o más animales por hectárea, en la mayoría de los casos es necesario reemplazar el pasto nativo por especies mejoradas. El establecimiento de pasturas en áreas distintas a las praderas naturales, tales como bosques o tierras de cultivos, también requiere la siembra de especies mejoradas de pastos. En los trópicos se ha llevado a cabo una cantidad de investigación considerable sobre la selección de especies, el establecimiento y mantenimiento de pasturas mejoradas.

SELECCION DE ESPECIES Y ADAPTACION A LIMITACIONES DEL SUELO

Los científicos australianos han trabajado bajo la premisa de que a pesar de las limitaciones del clima, de la baja productividad de las especies y la inherente baja fertilidad del suelo de la mayoría de tierras de pasturas tropicales, el clima debe permitir mayor producción de la pastura. El mejoramiento de pasturas se ha basado en el cambio de especies conjuntamente con el uso de fertilizantes para aumentar la fertilidad del suelo (Davies y Shaw, 1964; Shaw y Norman, 1970). Debido al alto costo de los fertilizantes en relación con el precio de la carne en la mayor parte de Australia tropical, se usa una mezcla de gramíneas y leguminosas adaptadas, siendo la leguminosa la fuente principal de nitrógeno para el sistema. Las aplicaciones de otros fertilizantes se mantienen al mínimo mediante el uso de especies y variedades bien adaptadas a los regímenes específicos de humedad del suelo y a ciertas limitaciones de fertilidad del suelo, tales como alto contenido de aluminio intercambiable, poco calcio intercambiable y poco fósforo disponible. Por lo tanto, la selección apropiada de la mezcla de gramínea y leguminosa es específica para cada región.

Las características de las especies de gramíneas y leguminosas para pasturas mejoradas de mayor uso han sido descritas en varios artículos de revisiones de Williams (1967), Davies y Hutton (1970), Hutton (1970), Williams y Andrews (1970), Jones (1972), McIlroy (1972), y Crowder (1974). Aunque las propiedades botánicas y agronómicas de estas especies están más allá de la esfera de este libro, su adaptación a las condiciones del suelo constituyen un componente muy importante del manejo del suelo. Mucho se ha aprendido de Andrew y sus colegas, en Australia y de Spain, en Colombia, acerca de la manera en que las especies difieren en su tolerancia a condiciones adversas de suelo.

Gramíneas tropicales. En el Cuadro 13.4 se presenta una lista provisional que resume la adaptación de las principales especies de gramíneas a ciertas limitaciones de suelo. Los muchos espacios en blanco reflejan el limitado conocimiento acerca de ciertas especies. En general estas gramíneas pueden agruparse de acuerdo con su adaptabilidad a tierras bajas ústicas, tierras bajas údicas, tierras altas frescas y regímenes ácuicos de humedad del suelo.

Entre las especies bien adaptadas a regímenes ústicos de humedad del suelo, *Brachiaria decumbens*, *Andropogon gayanus*, *Melinis minutiflora*, *Paspalum plicatulum* y *Brachiaria humidicola* se consideran tolerantes a condiciones de acidez del suelo (Spain, 1975; Spain et al, 1975) y a poco fósforo disponible en el suelo (Andrew y Robins, 1971a). El término "tolerante" indica que la especie puede responder a dosis más bajas de cal o fósforo que las gramíneas "susceptibles",

CUADRO No. 13.4. Lista de especies mejoradas de gramíneas tropicales usadas corrientemente y su adaptabilidad general a condiciones de suelo.

Nombre científico	Nombre común	Régimen de humedad de suelo preferido	Temperatura ¹ preferida	Tolerancia ^{2,3}		
				Acidez del suelo	Poco disponible	Fuego
<i>Andropogon gayanus</i>	Andropogon, Bamba, Carimagua	Ústico	Caliente	T	T	T
<i>Hyparrhenia rufa</i>	Jaragua, Puntero, Faragua	Ústico	Caliente	S	T	T
<i>Melinis minutiflora</i>	Chopin, Gordura, Melao	Ústico	Caliente	T	T	S
<i>Paspalum dilatatum</i>	Dalis	Ústico	Caliente	T	S	T
<i>Paspalum plicatulum</i>	Pasto negro	Ústico	Caliente, fresca	T	T	T
<i>Setaria sphacelata</i>	Nandi ⁴	Ústico	Caliente, fresca	S	T	?
<i>Brachiaria decumbens</i>	Braquiaria	Ústico, údico	Caliente	T	T	?
<i>Digitaria decumbens</i>	Pangola	Údico, ústico	Caliente	Mt	T	?
<i>Panicum maximum</i>	Guinea, Castilla, Colonião ⁴	Údico, ústico	Caliente	T	Mt	T
<i>Cynodon plectostachyum</i>	Estrella	Údico	Caliente, fresca	Mt	S	?
<i>Pennisetum purpureum</i>	Elefante, Napier, Merker ⁴	Údico	Caliente, fresca	T	S	?
<i>Paspalum notatum</i>	Bahía	Údico, ústico	Fresca	T	S	?
<i>Cynodon dactylon</i>	Bermuda	Údico	Fresca	?	S	?
<i>Chloris gayana</i>	Rhodes	Ústico, arídico	Fresca	?	S	?
<i>Cenchrus ciliaris</i>	Bufel	Ústico, arídico	Fresca	S	S	?
<i>Pennisetum clandestinum</i>	Kikuyo	Ústico, údico	Fresca	T	S	?
<i>Sorghum almum</i>	Sorgo negro	Arídico, ústico	Caliente	T	Mt	?
<i>Brachiaria mutica</i>	Para	Acuico	Caliente	T	S	?
<i>Brachiaria humidicola</i>	Humidicola	Ústico, údico	Caliente	T	T	?

(1) "Caliente" se refiere a tierras bajas isohipertermicas; "Fresca" a tierras altas o sus bordes en los trópicos.
 (2) Adaptado de Andrew y Robins (1971), Spain (1975), Spain et al, (1975) y observaciones personales.
 (3) T = tolerante; S = susceptible; Mt = moderadamente tolerante.
 (4) nombres de variedades de uso común.

los que generalmente requieren niveles menores de aluminio intercambiable y niveles más altos de fósforo disponible para dar rendimientos máximos. Otras gramíneas adaptadas a regímenes ústicos o arídicos de humedad del suelo no toleran niveles altos de aluminio intercambiable (por ejemplo, *Hyparrhenia nifa*, *Sorghum almum*) o poco fósforo disponible (*Paspalum dilatatum*).

Estas tolerancias o susceptibilidades pueden estar relacionadas con las propiedades del suelo de regiones en donde las especies evolucionaron originalmente.

Varias especies mejoradas están bien adaptadas a regímenes údicos de humedad del suelo. Algunas de ellas, como *Panicum maximum* y *Digitaria decumbens* también son tolerantes a la acidez del suelo y a poca disponibilidad de fósforo. Otras, como *Pennisetum purpureum* aunque tolerantes al aluminio, requieren altas cantidades de otros nutrimentos, particularmente nitrógeno y potasio. El uso de estas gramíneas generalmente está restringido a suelos de fertilidad un poco mayor que los apropiados para especies tolerantes al aluminio y adaptados a regímenes ústicos de humedad del suelo.

El Cuadro 13.4 también anota varias especies que prefieren las tierras altas tropicales o las áreas frescas en los bordes de los trópicos. Muchas de ellas son menos tolerantes a la baja disponibilidad de fósforo que aquellas que son las mejores adaptadas a las tierras bajas ústicas o údicas. Finalmente, ciertas especies, tales como *Brachiaria mutica* prefieren el régimen ácuico de humedad del suelo y están restringidas a los suelos de drenaje deficiente.

Leguminosas tropicales. En el Cuadro 13.5 se presenta una lista de las leguminosas tropicales de mayor uso. Las especies de leguminosas también pueden agruparse de acuerdo con su adaptación a tierras bajas ústicas, tierras bajas údicas, tierras altas frescas y regímenes ácuicos de humedad del suelo. Varias especies parecen igualmente bien adaptadas a ambos regímenes de humedad del suelo, údico y ústico. Las necesidades nutritivas de las leguminosas tropicales están mucho mejor comprendidas que las de las gramíneas tropicales.

Varias especies de leguminosas de la lista del Cuadro 13.5, están muy bien adaptadas a condiciones de suelos ácidos e infértiles. La mayoría de ellas entran en simbiosis con el tipo de *Rhizobium* del caupí, de crecimiento lento, que se encuentra en la mayoría de los suelos ácidos tropicales y por lo tanto, no se requiere inoculación. Según Norris (1967) las cepas de *Rhizobium* de crecimiento lento liberan sustancias alcalinas, mientras que las estirpes de crecimiento rápido típicas de las leguminosas de la zona templada liberan sustancias ácidas. Las leguminosas que poseen el mecanismo liberador de álcali incluyen a *Stylosanthes* sp. y *Desmodium* spp, *Pueraria phaseoloides*, *Centrosema pubescens*, *Calopogonium muconoides*, *Macroptilium lathyroides*, *Macroptilium atropurpureus* y *Lotononis bainesii*. Según Andrew et al, (1973), Andrew y Vanden Berg (1973) y Spain (1975), todas son tolerantes a niveles altos de aluminio en la

CUADRO No. 13.5. Lista de especies mejoradas de leguminosas tropicales de uso común, su adaptabilidad general a condiciones de suelo, y a los tipos de *Rhizobium* usados.

Nombre científico	Nombre común	Régimen de humedad o temperatura ¹ preferido	Tolerancia ^{2,3}				
			Alto	Mn alto	Ca + Mg bajo	P bajo	K bajo
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Stylo	Ustico-údic	T	T	T	T	?
<i>Stylosanthes capitata</i>	Capitata	Ustico	T	T	T	T	T
<i>Stylosanthes humilis</i>	Townsville Stylo	Ustico-arídico	T	T	T	T	T
<i>Pueraria phaseoloides</i>	Kudzú	Udico	T	T	T	T	?
<i>Centrosema pubescens</i>	Centro	Udico-ústico, ácuico	T	T	T	T	T
<i>Zornia latifolia</i>	Zornia	Ustico	T	T	T	T	T
<i>Desmodium ovalifolium</i>		Ustico	T	T	T	T	T
<i>Desmodium intortum</i>	Pega-pega	Udico-ústico	T	Mt	T	S	Mt
<i>Desmodium uncinatum</i>	Silverleaf	Udico- (más fresco)	T	S	T	S	T
<i>Calopogonium muconoides</i>	Calopo	Udico-ústico	T	T	T	T	?
<i>Macropitium lathyroides</i>		Ustico	T	Mt	T	S	T
<i>Lotononis bainesii</i>		Ustico	T	T	T	T	S
<i>Macropitium atropurpureus</i>	Siratro	Ustico (más fresco)	T	S	?	T	T
<i>Leucaena leucocephala</i>	Leucaena, ipil-ipil	Ustico	S	S	?	?	?
<i>Glycine wightii</i>	Soya perenne	Ustico	S	S	?	S	Mt
<i>Trifolium repens</i> ⁴	Trébol blanco	Tierras altas	S	S	?	S	S
<i>Medicago sativa</i> ⁴	Alfalfa	Tierras altas	S	S	?	S	S

(1) De tierra baja (isohiptérmica) a menos que se especifique de otra manera.

(2) Basado en Andrew y Robin (1969, 1971), Andrew y Hegarty (1969), Andrew y Vander Berg (1973), Spain et al, (1974) y experiencia personal.

(3) T = tolerante; S = susceptible; Mt = moderadamente tolerante.

(4) También adaptada a climas templados.



Fig. 13.3. Cultivo puro de *Stylosanthes guyanensis* cultivado para producción de semillas en Oxisoles de Matão, São Paulo, Brasil.

solución del suelo. Sin embargo, algunas especies son susceptibles a niveles altos de manganeso intercambiable, limitando así su adaptabilidad a suelos ácidos altos en este elemento. De acuerdo con Andrew y Hegarty (1969), *Desmodium uncinatum* y *Macroptilium atropurpureus* son sensitivos a niveles altos de manganeso mientras siguen siendo aún tolerantes al aluminio. Todas las especies de este grupo tolerante al aluminio tienen requisitos de calcio y magnesio considerablemente menores que las susceptibles al aluminio. Se usan pequeñas cantidades de cal para suministrar calcio y magnesio más que para neutralizar el aluminio intercambiable.

Entre las leguminosas tolerantes a los factores de acidez del suelo, algunas también toleran niveles bajos de fósforo disponible en el suelo. El Cuadro 13.5 presenta la lista de especies con un contenido crítico de fósforo en la planta del 0,18% de P o menos como "tolerantes", y las que tienen más del 0,20% de P como susceptibles, como sugiere el trabajo de Andrew y Robins (1971). Las siguientes especies combinan tolerancia a altos contenidos de aluminio y manganeso intercambiables con tolerancia a niveles bajos de calcio, magnesio y fósforo: *Stylosanthes guyanensis*, *Capitata humilis*, *Pueraria phaseoloides*, *Desmodium ovalifolium*, *Zorna latifolia*, *Centrosema pubescens* y *Calopogonium muconoides*. Un estudio similar de Andrew y Robins (1969) con potasio, estableció niveles críticos para

este elemento. *Stylosanthes humilis*, *Centrosema pubescens* y *Desmodium uncinatum* tienen niveles críticos menores del 0,8% de K en los tejidos de la planta, mientras que las agrupadas como “susceptibles” tienen niveles críticos de 1,0% de K o más. Se han observado diferencias varietales en tolerancia a niveles bajos de fósforo y potasio en *Stylosanthes guianensis* por Jones (1974) y Brolmann y Sonoda (1975).

En contraste con el grupo anterior, el Cuadro 13.5 anota varias especies de leguminosas susceptibles a la mayoría de los factores asociados con la acidez del suelo: *Macroptilium atropurpureum*, *Leucaena leucocephala*, *Glycine wightii*, *Trifolium* spp. y *Medicago sativa*. Estas especies se desarrollaron en suelos con un nivel alto de bases y están mejor adaptadas a los mismos. Estas especies prosperan en esta clase de suelos en los trópicos, particularmente los tréboles y la alfalfa en suelos calcáreos con temperatura fresca. Aunque *Centrosema pubescens* está bien adaptada a regímenes údicos y ústicos, tolera condiciones de suelos muy húmedos y a menudo crece conjuntamente con *Brachiaria mutica*.

Mezclas de gramíneas y leguminosas. Tal como se dijo, la mayoría de los sistemas de pasturas mejoradas confían en mezclas de gramíneas y leguminosas más que en cultivos puros de gramíneas o leguminosas. La función de las leguminosas en tales mezclas es contribuir con nitrógeno para las gramíneas y mejorar el contenido nutritivo general de la pastura, especialmente con proteína, fósforo y calcio. Se espera que las gramíneas proporcionen el grueso de la energía al ganado debido a su mayor producción de materia seca.

La compatibilidad de las especies de gramíneas y de leguminosas está relacionada con sus hábitos de crecimiento y con una adaptación similar a regímenes específicos de clima, humedad y fertilidad del suelo. Las gramíneas de portes altos que macollan, tales como *Hyparrhenia rufa*, *Panicum maximum* y *Pennisetum purpureum*, son compatibles con leguminosas de porte bajo o rastreras, tales como el género *Stylosanthes*, *Centrosema pubescens* y *Pueraria phaseoloides*. Las especies de gramíneas rastreras que cubren el suelo con una alfombra gruesa (por ejemplo, *Brachiaria decumbens*) tienden a sobrecompetir con las leguminosas a menos que se controle el crecimiento por medio del manejo. Algunas especies de leguminosas, como *Stylosanthes guianensis* tienen la ventaja de ser muy poco palatables por el ganado en sus etapas iniciales de crecimiento. Esto favorece su establecimiento y permite su consumo en etapas posteriores cuando se tornan más apetecibles.

Por lo tanto la combinación correcta de gramínea y leguminosa es específica para cada localidad. Tales combinaciones reflejan la adaptación a diferencias climáticas o edáficas más finas que las presentadas en los Cuadros 13.4 y 13.5. En el Cuadro 13.6 se presentan algunos ejemplos. En los Oxisoles ácidos o infértiles de los Llanos de

CUADRO No. 13.6. Ejemplos de mezclas satisfactorias de gramíneas y leguminosas que se usan en los trópicos. (Fuente: Spain (1975), Davies y Hutton (1970), MacIlroy (1972), Bryan (1970) e informes del CIAT).

Lugar	Suelo	Especies de gramíneas	Especies de leguminosas
Colombia	Ustox	<i>Andropogon gayana</i>	<i>Stylosanthes capitata</i>
Perú	Udults	<i>Panicum maximum</i>	<i>Pueraria phaseoloides</i>
Australia	Ustalfs	<i>Setaria sphacelata</i>	<i>Macroptilium atropurpureum</i>
Kenia	Udalfs	<i>Pennisetum clandestinum</i>	<i>Desmodium uncinatum</i>
Australia	Suelos ácuicos	<i>Brachiaria mutica</i>	<i>Centrosema pubescens</i>

Colombia, la mezcla de *Andropogon gayanus* y *Stylosanthes capitata* es prometedora. Ambas especies toleran las diversas limitaciones de fertilidad del suelo y están adaptadas al régimen ústico de humedad. En la selva peruana caracterizada por un ambiente údico y Ultisoles ácidos e infértiles, una mezcla de *Panicum maximum* y *Pueraria phaseoloides* resulta satisfactoria, debido a la adaptabilidad de ambas especies a la alta pluviosidad y baja fertilidad. En Alfisoles ústicos con niveles altos de bases del norte de Australia se usan dos especies que requieren niveles un poco más altos de fertilidad natural: *Setaria sphacelata* y *Macroptilium atropurpureum* (cultivar siratro). Para tierras altas de Kenia, con Alfisoles, se mezclan dos especies adaptadas a mayor fertilidad y climas frescos, *Pennisetum clandestinum* y *Desmodium uncinatum*. Finalmente, en suelos mal drenados de Queensland, Australia, se mezclan dos especies tolerantes al mal drenaje, *Brachiaria mutica* y *Centrosema pubescens*. Estos son algunos ejemplos de asociaciones viables. Muchos otros se describen en la literatura y los usan los ganaderos.

ESTABLECIMIENTO DE PASTURAS MEJORADAS

Las prácticas de manejo de suelo pueden dividirse en aquellas para el establecimiento de la pastura, y las destinadas al mantenimiento de la pastura después del establecimiento.

El método de establecimiento depende de la vegetación original: bosque, tierra de cultivos, sabana natural o un potrero viejo deteriorado e improductivo. En esta sección se examinan algunos de los métodos corrientes.

Bosques. El desmonte de bosques tropicales para establecer pasturas se está llevando a cabo rápidamente en la selva amazónica. Más de un millón de hectáreas de pasturas se sembraron en la última década en la selva amazónica de Brasil, Perú y Colombia (Serrao y Neto, 1975; Santhirasegaram, 1975). La inmensa mayoría del área se ha



Fig. 13.4. Pastura de pasto guinea de 20 años de edad que nunca se ha fertilizado, en Ultisoles de Yurimaguas, Perú. Hay abundancia de leguminosas nativas entre las macollas del pasto. Con un manejo adecuado esta pastura tiene una capacidad de carga de 1 animal/ha.

sembrado con cuatro especies de gramíneas: guinea (*Panicum maximum*), *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria humidicola* en las áreas de mayor pluviosidad, y jaragua (*Hyparrhenia rufa*) en las áreas con regímenes ústicos o cercanos a dichos regímenes. En Australia áreas más pequeñas de bosques pluviales se han desmontado y sembrado con gramíneas y leguminosas para engorde de ganado. El procedimiento en Australia consiste en tumar y quemar el bosque durante la estación seca. Semillas de *Panicum maximum* mezcladas con semillas de *Stylosanthes humilis*, *Centrosema pubescens* o *Pueraria phaseoloides* simplemente se siembran en las cenizas (Bryan, 1970). La mezcla se fertiliza con superfosfato simple enriquecido con molibdeno en dosis del orden de 37 kg/ha de P, seguidas con aplicaciones de mantenimiento. Generalmente se logra un mejor establecimiento sembrando la semilla en surcos con maquinaria especial para las condiciones del terreno, y que puede operar alrededor de los tocones y raíces.

En la mayor parte del Amazonas las gramíneas se siembran inmediatamente después de la quema, usando semilla sexual o más comúnmente propagación vegetativa. A diferencia de la práctica en Australia, no se siembran leguminosas y pocas veces se usa fertilizante. Después de unos pocos años el pasto guinea o jaragua es reemplazado por

especies ústicas duras y de bajo valor forrajero, tales como *Paspalum conjugatum* y *Axonopus compressus*, conjuntamente con leguminosas espontáneas tales como *Centrosema pubescens*, *Desmodium intortum* y *Calopogonium muconoides*. En áreas ústicas, en las que el desmonte incluye quema y hay buenas prácticas de manejo de ganado, las pasturas de guinea persisten por más de 20 años con una capacidad de carga de 1 animal/ha (Sánchez, 1973; Serrao y Neto, 1975). La presencia de leguminosas espontáneas, tales como *Centrosema pubescens* proporciona gran parte del nitrógeno, mientras buenas prácticas de manejo del pastoreo permitan persistencia.

En áreas ústicas desmontadas mecánicamente las pasturas de jaragua se degeneran después de 4 a 5 años. Santhirasegaram (1975) atribuyó esta declinación a agotamiento de la fertilidad del suelo y a problemas de compactación en Ultisoles de Pucallpa, Perú. Los campos se abandonan con el tiempo para que crezca nuevamente el bosque secundario. Sin embargo la siembra de leguminosas adaptadas tales como *Stylosanthes guianensis*, *Centrosema pubescens* y kudzú en pasturas establecidas de jaragua, con aplicaciones anuales de 10 a 50 kg/ha de P como superfosfato simple ha cambiado la situación en Pucallpa. Santhirasegaram ha mostrado que tales prácticas más suplementación minerales al ganado, duplican la tasa de carga y de producción de terneros, triplican el aumento anual de peso vivo y reducen a la mitad la edad a la cual los animales alcanzan el peso para el mercado. Cuando las pasturas alcanzan equilibrio, contienen del 25 al 33% de la materia seca proveniente de leguminosas. El Cuadro 13.7 resume algunos de los resultados obtenidos durante el primer año de

CUADRO No. 13.7. Efectos de diferentes métodos de establecimiento de pasturas en áreas de selvas en el aumento inicial anual en peso vivo de novillos Nellore pastoreando con una tasa de carga de 2 animales/ha en un Ultisol de Pucallpa, Perú. (Fuente: adaptado de Santhirasegaram, 1975).

Tratamiento	Aumento anual de peso vivo (kg/ha)	Novillas preñadas (%)
Jaragua solo	79	—
Jaragua + kudzú	120	25
Jaragua + kudzú + 100 kg/ha de superfosfato simple	159	38
Jaragua + kudzú + suplemento mineral	321	88
Jaragua + kudzú + 100 kg/ha de superfosfato + suplemento mineral	352	88

la introducción de leguminosas. El mantenimiento de un nivel comparable a través del tiempo es otra cosa.

El aumento en la fertilidad del suelo ocasionado por la ceniza después de la quema de bosques tropicales se ha usado provechosamente. Los ganaderos australianos siembran *Melinos minutiflora* inmediatamente después de la quema, y lo pastorean fuertemente por un año. Cuando su productividad comienza a bajar, lo queman juntamente con los troncos y tocones restantes. Luego se siembra una mezcla de gramínea y leguminosa y se aplica superfosfato. Algunos ganaderos de la región amazónica del Perú generalmente siembran antes un cultivo comercial como arroz o maíz, y después de la última desyerba intercalan plántulas de guinea; cuando se cosecha el cultivo, el pasto ya está establecido. Una práctica similar se ha introducido en el norte de Tailandia por Shelton y Humphreys (1975), quienes establecieron pasturas de *Stylosanthes guianensis* distribuyendo la semilla de la leguminosa al voleo en campos de arroz de secano. Cuando se distribuyeron 2 kg/ha de semillas de esta especie al voleo 10 días después de la siembra de arroz, se obtuvieron 3 ton/ha de materia seca de dicha especie después de la cosecha del arroz, sin que el rendimiento de éste sufriera una reducción apreciable.

Motooka et al (1968), usaron con buen éxito un método más costoso en las selvas de Hawaii. Se aplicaron arboricidas por avioneta en grandes extensiones y subsecuentemente fueron quemadas. Luego se mezclaron semillas de guinea en *Desmodium intortum* y superfosfato triple granulado y se distribuyeron al voleo por avioneta.

Sabanas. El establecimiento de pasturas mejoradas en sabanas naturales incluye quemas fuertes al final de la estación seca, seguida por arado con rastra de discos para incorporar las cenizas, los fertilizantes y siembra con sembradoras mecánicas. El voleo de semillas sin rastrear produce resultados poco confiables, particularmente tratándose de leguminosas. Si el pasto natural no se elimina con fuego y rastreo, se recomiendan tasas altas de carga después de la siembra para suprimir el rebrote. Con el uso de esta técnica, Winks (1973), cambió una pastura que consistía de un 90% de pasto natural a una con 90% de leguminosas mejoradas en 3 años.

La transformación de sabanas naturales en pasturas mejoradas pueden dar por resultado dramáticos aumentos en la producción de carne. Cuando Oxisoles de Colombia fueron sembrados de *Melinos minutiflora* sin fertilizar, la tasa de carga aumentó de 0,2 a 1 animal/ha y el incremento anual de peso vivo subió de 8 a 64 kg/ha (CIAT, 1972; Spain, 1975). Sin embargo, esta gramínea sola, con o sin fertilización de fósforo y potasio, no evitó las serias pérdidas de peso durante la estación seca (CIAT, 1973).

En sabanas de Africa Oriental se practican técnicas tradicionales de establecimiento que incluyen la siembra de un cultivo para compensar los costos del desmonte, especialmente en áreas con mayor preci-

pitación pluvial. Poultney (1963) observó que cuando se sembraba *Melinis minutiflora* y otras especies dentro de maíz después de la última desyerba, el rendimiento del maíz no se afectaba, y que la producción de materia seca y proteína del pasto eran iguales a cuando el pasto se sembraba sin maíz. Los resultados se presentan en el Cuadro 13.8 y reflejan las mejores combinaciones que se encontraron.

CUADRO No. 13.8. Ejemplo de una práctica satisfactoria de intercalar pasto en un cultivo de maíz en áreas de sabanas de alta pluviosidad en la cercanía de Kitale, Kenia: media de 3 estaciones (ton/ha). (Fuente: adaptado de Poultney, 1963).

Sistema	Rendimiento de granos de maíz	<i>Melinis minutiflora</i>	
		Materia seca	Proteína
Maíz solo	6,0	—	—
Maíz y <i>Melinis minutiflora</i>	5,9	23,8	2,16
<i>Melinis minutiflora</i> solo	—	24,1	2,10

Pasturas degradadas. La regeneración de pasturas deterioradas requiere prácticas similares. La siembra de leguminosas con superfosfato ha tenido buen éxito en Australia (Bryan, 1967), excepto cuando hay sequías prolongadas (Grof et al, 1970). Normalmente se necesitan aplicaciones moderadas de nitrógeno para que la mezcla de gramínea y leguminosa recién sembrada tenga un buen arranque. Muchas de estas pasturas están severamente compactadas por el pisoteo de los animales. Pereira y Beckley (1953) informan que fue necesario el cultivo a contorno para el establecimiento satisfactorio del pasto estrella (*Cynodon plectostachyum*) en áreas de Kenia sobrepastoreadas. Esta práctica duplicó las tasas de infiltración del agua dentro del suelo y permitió un adecuado crecimiento del pasto.

La necesidad de algún grado de remoción del suelo está ilustrada en el Cuadro 13.9, el cual muestra el efecto beneficioso típico de esta práctica. La profundidad de la incorporación del fertilizante es superficial, generalmente menos de 10 cm.

INOCULACION DE LEGUMINOSAS

Un método común de establecer especies de leguminosas en suelos ácidos en la región templada es inocular la semilla con la estirpe de *Rhizobium* compatible y formar una especie de perdigón alrededor de la semilla con el inóculo, usando cal y fósforo como agente adhesivo. Esta práctica se considera satisfactoria porque estimula la nodu-

CUADRO No. 13.9. Efectos de la preparación de la tierra y adiciones de superfosfato corriente en el establecimiento de *Stylosanthes guianensis* después de un fuerte pastoreo en *Hyparrhenia rufa* establecida en Ultisoles de Pucallpa, Perú. (Rendimiento en ton/ha de materia seca 24 semanas después de la siembra de la leguminosa). (Fuente: Santhirasegaram, 1975).

Preparación del suelo	Superfosfato agregado (kg/ha)	<i>Stylosanthes guianensis</i>	<i>Hyparrhenia rufa</i>
Ninguna	0	0,64	0,96
	200	1,24	1,07
Rastreo lijero con discos	0	2,04	1,19
	200	2,51	1,35

lación, protege la semilla y al inóculo contra la acidez del suelo, suministra nutrientes cercanos a la semilla y reduce los costos de fertilización. Sin embargo, el valor de los perdigones de esta clase en áreas tropicales ha sido puesto en duda por Norris (1967); esto a su vez ha provocado una considerable controversia entre los microbiólogos tropicales de suelo (Graham y Hubbell, 1975a, b).

La mayoría de las especies de leguminosas tolerantes a la acidez del suelo y bajos niveles de fósforo disponible, entran en simbiosis con las estirpes de *Rhizobium* de crecimiento lento del tipo caupí. Trabajos extensivos llevados a cabo en Australia en suelos con valores de pH de 5,2 a 5,9 indican que no es necesario inocular especies tales como *Stylosanthes guianensis*, *Pueraria phaseoloides* y *Calopogonium muconoides* (Norris, 1967). En los suelos más ácidos de Colombia, con pH de 4,3 y 77% de saturación de aluminio la población de *Rhizobium* del tipo caupí es muy baja y la inoculación de *Stylosanthes guianensis* ha resultado efectiva (Morales et al, 1973). Graham y Hubbell (1975a) atribuyeron este efecto a la extrema acidez y altas temperaturas de tales suelos. También notaron diferencias significativas entre variedades de *Stylosanthes guianensis* y entre estirpes del tipo caupí. No se observó la necesidad de inocular kudzú y *Calopogonium muconoides*, contrariamente a *S. guianensis*, aparentemente porque los primeros son capaces de establecer simbiosis efectiva bajo tales condiciones extremas.

Sin embargo, la inoculación es definitivamente necesaria para las especies tolerantes al aluminio que requieren estirpes específicas, tales como *Stylosanthes capitata*, *Desmodium ovalifolium*, *Centrosema pubescens*, *Desmodium intortum*, *Desmodium uncinatum* y

Lotonis bainesii, así como dos variedades mejoradas de *Stylosanthes guianensis*: Oxley de tallo fino y IRI 1022. Aunque según Graham y Hubell (1975a) se observa nodulación sin inoculación, estos nódulos con frecuencia no son efectivos. La inoculación es casi necesaria universalmente en especies sensibles al aluminio, tales como alfalfa, tréboles, *Glycine wightii* y *Leucaena leucocephala*. El uso de estirpes locales de *Rhizobium* a menudo da por resultado una nodulación deficiente (López et al, 1971).

En unos pocos países tropicales se producen inoculantes comerciales, como Australia y Brasil. La importación desde otros países con frecuencia torna el inóculo inactivo a causa de las grandes demoras en el envío y en los trámites aduaneros. Aunque las sustancias adhesivas relativamente costosas, tal como goma arábiga pueden reemplazarse con productos baratos, que se consiguen en la mayoría de los países en desarrollo (Graham et al, 1974), casi no hay duda de que la falta de inoculantes comerciales constituye un factor limitante, particularmente en países con grandes áreas de pastos en suelos ácidos.

Los perdigones de cal parecen atractivos aún para especies bastante tolerantes al aluminio intercambiable debido a su respuesta a niveles bajos de fertilización con calcio y magnesio. Trabajos de Norris (1971, 1972) han mostrado poco efecto beneficioso de los perdigones de cal en la nodulación, debido a que el *Rhizobium* tipo caupí secreta sustancias alcalinas alrededor de su ambiente inmediato. Corrientemente se observan respuestas negativas a los perdigones de cal. En contraste marcado, los perdigones de cal son extremadamente beneficiosos en el establecimiento de especies sensitivas al aluminio, tales como alfalfa, tréboles y *Leucaena leucocephala* en suelos ácidos (Norris, 1967, 1973). Las estirpes de *Rhizobium* asociadas con estas especies exudan sustancias ácidas que agravan aún más la situación. En alfalfa y tréboles los perdigones de cal también alargan la viabilidad del inóculo en almacenamiento. Tal efecto no se ha observado en especies de leguminosas tolerantes a la acidez (Norris, 1971, 1972), excepto cuando el suelo contiene niveles tóxicos de manganeso. Döbereiner y Abramovitch (1965) observaron mejor nodulación de *Centrosema pubescens* con perdigones de cal en un suelo con toxicidad de manganeso. Aparentemente la cal precipitó el exceso de manganeso alrededor de la semilla sin alterar el pH del suelo.

La práctica de aperdigonar superfosfato o roca fosfatada tiene ventajas notables y es recomendada por Norris (1967, 1971, 1972) y Graham y Hubbell (1975a, b) para leguminosas tropicales tolerantes a la acidez. Muchas de estas especies tienen mayores necesidades iniciales internas de fósforo para el establecimiento que para el crecimiento subsiguiente. En el Cuadro 8.6 se presenta un ejemplo de Fox et al, (1974), de esta situación. La elaboración de perdigones debe hacerse poco antes de la siembra debido a posibles efectos dañinos de las sales o acidez extrema bajo almacenamiento. Los superfosfatos sencillos también proporcionarán un poco de calcio y azufre que ayudan a

estimular el establecimiento. El uso de polvo de roca fosfatada es quizás una alternativa más prometedora porque puede mezclarse y almacenarse sin peligro. La adición de óxido de molibdeno a los perdigones ha mostrado resultados prometedores, pero el molibdato de amonio y sodio causan daño (CIAT, 1973).

La adaptabilidad de algunas especies de gramíneas y leguminosas a poca disponibilidad de fósforo puede tener relación con la presencia de micorrizas vesicular-arbuscular en sus raíces. Mosse et al (1973) encontraron que raíces de *Centrosema pubescens* y *Paspalum notatum* infectadas con micorrizas utilizaron fósforo en concentración sumamente baja en la solución del suelo, que raíces no infectadas no fueron capaces de utilizar. Las inoculaciones con micorriza han aumentado el crecimiento de Siratro en Colombia (CIAT, 1973), y el crecimiento y nodulación de *Stylosanthes guianensis* y *Centrosema pubescens* en Australia (Crush, 1974). La inoculación con micorriza tal vez sea una práctica económica viable en el futuro.

Mucho falta por hacer en cuanto a cuantificar las relaciones entre *Rhizobium*, micorrizas, especies de pasturas tropicales, y condiciones de suelos comunes de las pasturas tropicales. Estas consideraciones, conjuntamente con la posibilidad de fijación de nitrógeno en ciertas gramíneas tropicales observada por Döbereiner y Day (1974) y discutida en el Capítulo 6, han hecho de la microbiología de suelos tropicales una área muy interesante de investigación.

SUMINISTRO DE NITROGENO DE LAS LEGUMINOSAS EN PASTURAS MIXTAS

Se cree que el ámbito en fijación anual de nitrógeno por leguminosas de pastura en los trópicos es similar al de la región templada. De acuerdo con revisiones de Henzell y Norris (1962) y Jones (1972), la fijación de *Rhizobium* es de 100 a 300 kg/ha de N por año. Sin embargo, una compilación más reciente de Whitney (1975) señala un ámbito de 47 a 905 kg/ha de N; esta última cifra se obtuvo en cultivos puros de una variedad mejorada de *Leucaena leucocephala* en Hawaii. Esto significa que el límite superior de la fijación de nitrógeno en los trópicos excede el valor de 603 kg/ha de N por año de la región templada, según informan Henzell y Norris (1962). Las altas temperaturas y precipitaciones durante todo el año en regímenes údicos explicarían la razón por la cual en los trópicos es posible obtener mayor fijación de nitrógeno.

Se ha establecido que la cantidad de nitrógeno fijado por leguminosas está altamente correlacionado con el contenido de la materia seca de la parte aérea de las leguminosas. La Fig. 13.5 presenta dos ejemplos compilados por Jones (1972). En el ambiente údico altamente productivo del ejemplo hawaiano, el nitrógeno total fijado y el rendimiento de materia seca fueron altos. Se necesitaron aproximadamente 4 ton/ha de materia seca de leguminosa para fijar 100 kg/ha de

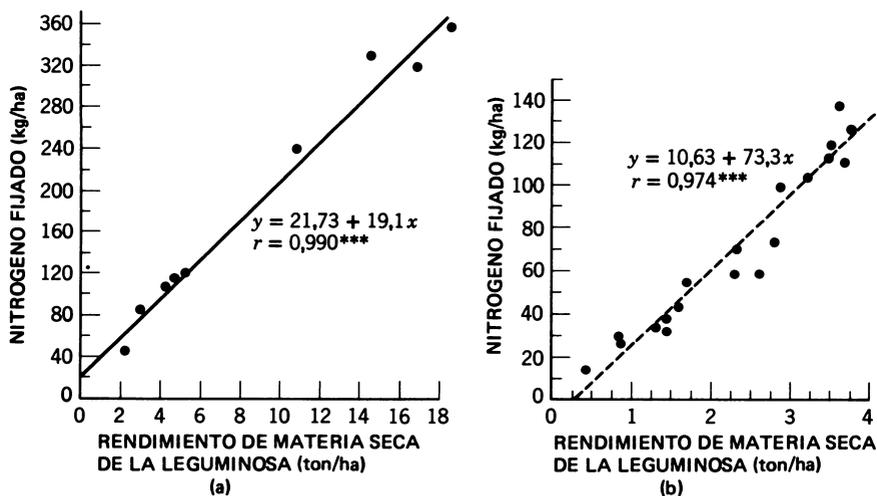


Fig. 13.5. Relación entre fijación de nitrógeno y rendimiento de la parte aérea de la leguminosa en dos experimentos. Fuente: compilado por Jones (1972). (a) Waikea, Hawaii (ústico): 1 unidad de N/52 unidades de materia seca. Fuente: Whitney et al (1967). (b) Samford, Queensland (ústico): 1 unidad de N/27 unidades de materia seca. (Fuente: Jones et al, 1967).

N por año. En el régimen ústico de Queensland tanto la materia seca como el nitrógeno fijado fueron menores, pero sólo se necesitaron 3 ton/ha de materia seca de leguminosas para fijar 100 kg/ha de N por año. Sin embargo estas diferencias pueden deberse a diferencias de métodos para calcular la fijación de nitrógeno con base en datos de absorción de nitrógeno. Jones (1972) encontró que las diferencias entre especies adaptadas dentro de un ambiente específico estaban estrechamente relacionadas con la producción de materia seca. Esto sugiere que hay poca diferencia en la capacidad de las leguminosas para fijar nitrógeno siempre que estén adaptadas al ambiente. Los factores que afectan la producción de materia seca, tales como retención de humedad o de nutrientes, radiación solar, enfermedades, compatibilidad con las especies de gramíneas y manejo del pastoreo también afectarán la fijación de nitrógeno.

La transferencia directa del nitrógeno fijado por las leguminosas a las especies de gramíneas asociadas, tienen un ámbito de 0 a 53%, calculado por las diferencias en la absorción de nitrógeno de las gramíneas en presencia o ausencia de leguminosas. (Jones et al, 1967; Vallis et al, 1967; Whitney et al, 1967; Whitney, 1970). Los supuestos mecanismos son la caída de hojas de la leguminosa y la descomposición de raíces y nódulos. Los mayores valores de que se informó, 53% en una mezcla de *Digitaria decumbens* y *Desmodium intortum* (Whitney, 1970), y 43% en una mezcla de *Paspalum plicatum* y

Macroptilium atropurpureus (Jones et al, 1967), se obtuvieron con intervalos de corte más largos, y mayor altura de corte y después de 3 años del establecimiento. Estos factores aumentan la descomposición de las raíces y la parte aérea de la leguminosa. La transferencia indirecta por vía de la orina y las heces de los animales en pastoreo es probablemente más importante ya que alrededor del 80% del nitrógeno ingerido por el ganado adulto es devuelto al campo como excremento (Vicente-Chandler et al, 1974).

PRODUCTIVIDAD DE MEZCLAS MEJORADAS DE GRAMINEAS Y LEGUMINOSAS

La productividad de mezclas debidamente seleccionadas y establecidas están bien documentada durante el periodo inicial del establecimiento y los 2 primeros años. La producción de carne normalmente aumenta por un factor de dos a cuatro veces (Jones, 1972). La duda que surge inmediatamente es si estos aumentos pueden sostenerse con el tiempo. Pocos experimentos proporcionan datos confiables de larga duración sobre este aspecto. La Fig. 13.6 muestra los cambios en producción de carne durante 7 años como resultado del establecimiento de una leguminosa con y sin fertilización en Queensland, Australia. A pesar de la fluctuación de un año a otro, ocasionada

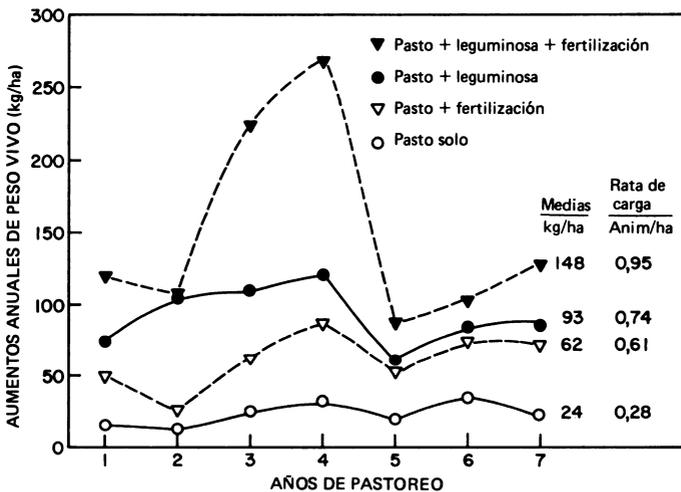


Fig. 13.6. Efectos de largo plazo de una especie de leguminosa (*Stylosanthes humilis*) y fertilización anual (10 kg/ha de P como superfosfato sencillo, 36 kg/ha de K y 0,04 kg/ha de Mo) en la producción de carne y en la capacidad de carga en pasturas de *Heteropogon contortus* en suelos solódicos (¿Alfisoles?) en Rodd's Bay, Queensland, Australia. (Fuente: adaptado de Shaw y Mannetje, 1970).

principalmente por la variabilidad de las lluvias, la introducción de *Stylosanthes humilis* sin fertilización aumentó el promedio anual de incremento de peso vivo de 24 a 93 kg/ha y dobló la capacidad de carga de 0,3 a 0,7 animales/ha. Cuando la pastura mixta recibió aplicaciones modestas anuales de 10 kg/ha de P como superfosfato simple y 40 kg/ha de K más molibdeno, el promedio de incremento anual de peso vivo alcanzó a 148 kg/ha, con una tasa de carga de 0,95 animales/ha. Los tratamientos fertilizados mostraron fluctuaciones anuales mucho mayores en producción de carne, probablemente por las marcadas respuestas durante los años de precipitación pluvial adecuada y respuestas mínimas en años con escasez o exceso de precipitación. Con la aplicación de las mismas dosis de fertilización, potreros con gramíneas puras produjeron menos de la mitad de carne por hectárea que la pastura mixta fertilizada.

Existe una relación directa entre la proporción de leguminosa en la mezcla y la producción de carne. Esto se ilustra en la Fig. 13.7 que muestra aumentos progresivos en peso vivo conforme aumentó el porcentaje de leguminosas de 13 a 30%. El 30% de leguminosas en la mezcla aproximó los niveles de producción a los de una dosis anual alta de nitrógeno. Sin embargo, aumentando la proporción de leguminosas mucho más allá del 50% es probable que baje la producción de carne, por cuanto el ganado depende del consumo de la gramínea para el grueso de sus necesidades de energía. Sin embargo, cultivos puros de leguminosas bien manejados pueden también satisfacer estas necesidades de energía.

La distribución de las lluvias afectará el consumo relativo de gramíneas o leguminosas por los animales a través del año. Durante la estación lluviosa cuando el crecimiento es más vigoroso y la pastura de buena calidad, el ganado come mucho más gramíneas que leguminosas. Durante la estación seca sucede lo contrario, ya que las gramíneas son menos palatables y la mayoría de las leguminosas mantienen un mayor contenido de proteína y mejor calidad nutritiva durante la estación seca.

CALIDAD NUTRITIVA DE ESPECIES MEJORADAS

La calidad nutritiva de las pasturas es función de muchos factores, algunos relacionados con las plantas y otros con los animales. Los factores relativos a las plantas pueden resumirse bajo los títulos de concentración de nutrimentos (composición química), capacidad de consumo por el animal (relativa a contenido de fibra no digerible, así como a sabor), y grado de utilización del material consumido por el animal (digestibilidad de la materia seca). El principal factor relativo al animal es el nivel de productividad del animal en consideración. Por ejemplo, un forraje incapaz de sustentar niveles altos de producción de leche y que consecuentemente es de bajo valor nutritivo para

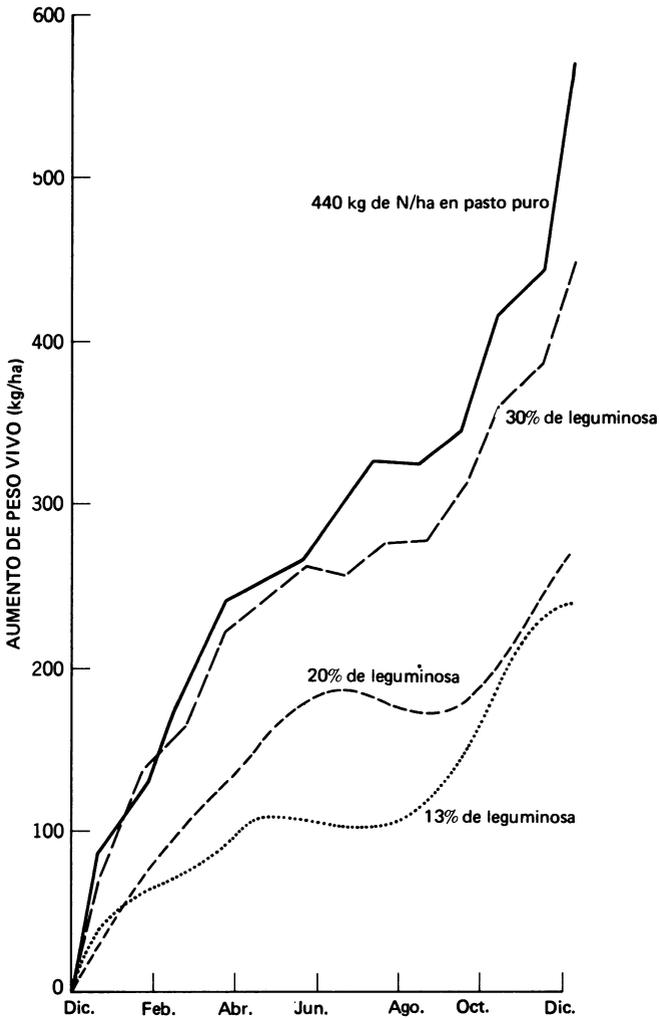


Fig. 13.7. Efecto del contenido de leguminosa en pasturas tropicales en los aumentos acumulativos de peso vivo de ganado de carne en Beerwah, Queensland, Australia. Medias de 2 a 7 años. (Fuente: Bryan, 1970).

una vaca lechera de alto rendimiento, puede ser perfectamente adecuado para el mantenimiento de ganado adulto para carne.

En el Cuadro 13.10 se presenta el efecto de la etapa de crecimiento (intervalo de cosecha) sobre unas pocas medidas comunes del valor nutritivo de los pastos guinea y pangola, y en el Cuadro 13.11, de kikuyo versus una mezcla de kikuyo, y un trébol rojo. Estos cuadros son un resumen de los datos compilados por McDowell et al (1974),

CUADRO No. 13.10. Efecto de la etapa de crecimiento de pastos guinea (*Panicum maximum*) y pangola (*Digitaria decumbens*) en su calidad nutritiva para producción de ganado. (Fuente: adaptado de McDowell et al, 1974).

Días después del corte	Guinea				Pangola					
	Energía digerible (Mcal/kg)	Proteína digerible (%)	Digestibilidad <i>in vitro</i> (%)	P (%)	Ca (%)	Energía digerible (Mcal/kg)	Proteína digerible (%)	Digestibilidad <i>in vitro</i> (%)	P (%)	Ca (%)
1-14	2,41	11,2	-	0,31	0,69	2,70	10,5	83	-	-
15-28	2,61	7,8	81	0,36	0,86	2,74	8,1	77	0,22	0,43
29-42	2,28	6,2	54	0,32	0,84	2,28	8,2	76	-	-
43-56	1,91	3,8	47	0,28	0,72	2,01	4,6	74	0,25	0,63
57-70	2,35	5,6	58	0,22	0,78	2,55	3,6	72	0,18	0,34
71-84	2,18	6,3	-	-	-	1,94	3,3	68	0,28	0,35

CUADRO No. 13.11. Efecto de una leguminosa (*Trifolium pratense*) en el mantenimiento de la calidad nutritiva de pasturas para ganado de pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). (Fuente: adaptado de McDowell et al, 1974).

Días después del corte	Kikuyo solo		Kikuyo + trébol rojo	
	Energía digerible (Mcal/kg)	Proteína digerible (%)	Energía digerible (Mcal/kg)	Proteína digerible (%)
15-28	2,14	15,5	2,59	16,9
29-42	2,31	11,5	2,49	11,3
43-56	2,00	6,1	2,37	8,7

quienes demostraron que la variación debida a las etapas fisiológicas de crecimiento es generalmente mucho mayor que la variación entre las especies de uso común.

El contenido de energía digerible en las etapas tempranas del crecimiento vegetativo oscilan entre 2,18 y 2,68 Mcal/kg de materia seca en las gramíneas y entre 2,40 y 2,76 Mcal/kg en las leguminosas de acuerdo con otros cálculos de McDowell et al. Este ámbito algo estrecho probablemente resulta de la selección de estas especies por palatabilidad y valor nutritivo. El contenido de proteína digerible en etapas iniciales de crecimiento vegetativo varía, del 7 al 12% entre las gramíneas y del 13 al 22% en las leguminosas, según las tablas latinoamericanas de alimentos (McDowell et al, 1974).

La calidad nutritiva de las gramíneas varía más con el manejo que entre especies. Conforme las plantas tienen más edad, disminuye la proporción de las hojas, aumenta el contenido de lignina y disminuyen los contenidos de proteína, calcio y fósforo. En el Cuadro 13.10 se ilustra el efecto de estos factores en la energía y digestibilidad de la proteína por el ganado en los pastos guinea y pangola. Los contenidos de energía digerible y proteína digerible disminuyen con la edad de la planta o edad después del corte. Datos de digestibilidad *in vitro* muestran la misma tendencia. Existe descenso en las concentraciones de fósforo y calcio pero éstos son menos marcados.

La declinación en la calidad nutritiva de las leguminosas tropicales, a diferencia de las gramíneas, es pequeña durante períodos similares de tiempo. Jones (1972) ha resumido datos que muestran que la digestibilidad y los contenidos de proteína y fósforo de *Centrosema pubescens*, *Desmodium intortum*, *Glycine wightii* y *Macroptilium atropurpureus* permanecen esencialmente constantes durante un período de 3 a 4 meses.

En pasturas mixtas de gramíneas y leguminosas la situación es intermedia. El Cuadro 13.11 presenta un ejemplo con kikuyo sólo y kikuyo mezclado con trébol rojo. Aunque la energía digerible y la proteína disminuyeron con la edad, la disminución fue menos marcada en la mezcla de gramínea y leguminosa.

El uso de especies tolerantes a poco fósforo disponible resulta en una concentración menor de este elemento en la pastura. Cuando se siembra una combinación de gramínea y leguminosa tolerantes, tales como *Melinis minutiflora* y *Stylosanthes humilis*, ambos con un contenido crítico de fósforo en la planta de cerca de 0,18%, el total de fósforo disponible para el ganado es menor que el contenido que se obtiene con una mezcla de dos especies con contenidos críticos altos de fósforo, tales como *Chloris gayana* y *Clycine wightii*, ambos con 0,23% de P (como indica el Cuadro 8.7). El suplemento directo de fósforo al ganado puede ser necesario en casos en que se usan mezclas tolerantes al fósforo (CIAT, 1973; Santhirasegaram, 1975). La misma relación puede ser válida para calcio y magnesio, y se han documentado para nitrógeno (Minson, 1971).

La fertilización afecta marcadamente el valor nutritivo de las gramíneas. En estudios de Vicente-Chandler et al (1974), en Puerto Rico, aplicaciones abundantes de nitrógeno, fósforo, potasio y cal aumentaron considerablemente los contenidos de materia seca digerible, proteína, fósforo, y calcio de las gramíneas. Estos investigadores también observaron que la calidad nutritiva de dichas especies puede ser afectada adversamente por el contenido de silicio en el suelo. Altos contenidos de sílice en los pastos bajan su digestibilidad. Una pastura de pangola de 60 días de edad en un Inceptisol joven tenía el 3,3% de Si, mientras que la misma especie, cosechada al mismo tiempo contenía 0,7% en un Oxisol con un contenido menor de silicio disponible por razón de un grado más avanzado de meteorización.

MANEJO DE PASTURAS MIXTAS

Para mantener la productividad, las pasturas tropicales mixtas pueden requerir diferente presión de pastoreo en diferentes épocas del año. También se necesitan prácticas adecuadas de control de malezas. Hay un aspecto, tolerancia a la defoliación frecuente, en que varias leguminosas tropicales difieren significativamente de la alfalfa y de los tréboles. Varias de las especies rastreras son muy sensitivas a la frecuente defoliación y necesitan más tiempo para recuperarse por completo del pastoreo que la alfalfa (Jones, 1972). Otras especies, como *Stylosanthes humilis* soportan un pastoreo fuerte. Los efectos de éstas y otras prácticas de manejo pueden apreciarse con los datos del Cuadro 13.12. El total de materia seca y la producción de proteína disminuyeron marcadamente cuando las mezclas de pangola y *Desmodium* se cortaron con frecuencia o a poca altura del suelo. La

CUADRO No. 13.12. Efectos del intervalo de cosecha, altura de corte y fertilización nitrogenada en la productividad y la fijación de nitrógeno de mezclas de pasto pangola y *Desmodium intortum* en un Inceptisol de Hawaii. (Fuente: Whitney, 1970).

Especies	Fertilizante N (kg/ha)	Intervalo de corte (semanas)	Altura de corte (cm)	Producción de materia seca		Producción de proteína cruda		N fijado por la leguminosa (kg/ha)
				Total (ton/ha)	Leguminosa (%)	Total (ton/ha)	Leguminosa (%)	
Gramínea sola	0	10	5	5,4	—	0,4	—	—
	410	10	5	22,8	—	2,3	—	—
	410	5	5	14,3	—	1,8	—	—
Gramínea leguminosa	0	5	5	6,2	40	0,9	58	85
	0	5	13	7,2	50	1,2	66	125
	0	10	5	13,7	55	2,3	67	275
	0	10	13	14,7	58	2,4	69	313
Gramínea leguminosa	410	5	5	16,4	4	2,2	7	39
	410	5	13	14,6	6	2,0	9	34
	410	10	5	23,0	9	2,8	15	84
	410	10	13	22,0	12	2,7	18	98

fijación anual de nitrógeno por la leguminosa disminuyó de 313 a 85 kg/ha de N cuando se llevó a cabo un corte intensivo y frecuente.

Jones (1972) observó que los efectos del aumento en la presión de pastoreo varían con la sensibilidad de la leguminosa a la defoliación. Cuando una pastura de *Setaria sphacelata* y *Macroptilium atropurpureum* (variedad Siratro) que producía aumentos máximos de peso vivo con una tasa de carga de 2,4 animales/ha, se pastoreó con 3 animales por hectárea, la producción de carne bajó marcadamente y el componente leguminoso de la pastura cayó del 25 al 12%. Por otra parte, intensificando la presión de pastoreo de 1,2 a 2,5 animales/ha en una pastura de *Urochloa mozambicensis* y *Stylosanthes humilis* duplicó el aumento de peso vivo y la composición de la leguminosa en la pastura. El Siratro es sensitivo a defoliación frecuente, pero *Stylosanthes humilis* no lo es.

En todos estos casos el efecto del manejo del pastoreo en la producción de carne puede estar relacionado con el aumento de materia seca de la leguminosa presente en la pastura, que está bien correlacionada con la fijación de nitrógeno. La proporción óptima de la leguminosa dependerá de la productividad de la gramínea asociada.

FERTILIZACION DE MANTENIMIENTO DE PASTURAS MIXTAS

Después de la fase de establecimiento, las pasturas mixtas entran en un ciclaje de nutrimentos bastante eficiente a través del pastoreo animal. Más del 80% del nitrógeno, fósforo y potasio consumido por los animales es excretado en su orina y heces y está bastante bien distribuido si la carga animal es alta y si se permite a los animales moverse libremente en la pastura (Vicente-Chandler et al, 1974, Mott, 1974). Pérdidas netas de nutrimentos tienen lugar cuando animales en crecimiento se sacan de la pastura o se deben a volatilización de urea de las heces o a lixiviación a través del suelo. La estrategia de fertilización tiene como objetivo reponer esas pérdidas para mantener un ciclo estable de nutrimentos suelo-planta-animal.

Nitrógeno. En la mayoría de los casos la fijación de nitrógeno por las leguminosas supe suficiente nitrógeno para compensar las pérdidas anuales con un manejo apropiado de pastoreo. La fertilización con nitrógeno inorgánico generalmente resulta en una marcada disminución en la fijación de nitrógeno por la leguminosa por cuanto la gramínea sobrepasa en crecimiento a la leguminosa, sombreándola y reduciendo drásticamente su presencia. El Cuadro 13.12 muestra estos efectos: la leguminosa descendió de más del 40% a menos del 12% cuando la pastura fue fertilizada con 410 kg/ha de N por año. Sin embargo, pequeñas aplicaciones iniciales de nitrógeno pueden tener un efecto impulsador en el comienzo del crecimiento, pero si se

continúan, el componente leguminoso puede reducirse o hasta eliminarse (Chaverra et al, 1967; Caro y Vicente-Chandler, 1963).

Fósforo. El mantenimiento de las necesidades de fósforo depende de los requerimientos nutritivos de las mezclas de gramínea y leguminosa, la capacidad de fijación de fósforo del suelo, y las cantidades añadidas durante el proceso de establecimiento. En la mayor parte de Australia se agregan cantidades muy pequeñas de fósforo. Aplicaciones iniciales del orden de 10 a 35 kg/ha de P son seguidas por aplicaciones anuales de mantenimiento de 5 a 10 kg/ha de P. Estas bajas dosis resultan del uso de especies tolerantes a niveles bajos de fósforo disponible en el suelo y de la baja capacidad de fijación de fósforo de la mayoría de estos Alfisoles. Estas modestas aplicaciones de mantenimiento, aplicadas al voleo sobre la superficie de las pasturas han sido tan efectivas como las grandes aplicaciones iniciales en suelos de baja capacidad de fijación de Australia (Jones, 1964; Fisher y Campbell, 1972; Bruce, 1972).

En suelos con alta capacidad de fijación de fósforo, la aplicación inicial puede ser de mayor magnitud. Experimentos en Ultisoles y Oxisoles de Hawaii con una alta capacidad de fijación de fósforo, indican dosis iniciales más bajas en el orden de 335 kg/ha de P (Younge et al, 1964, Younge y Plucknett, 1965). Aplicaciones iniciales altas de 602 kg/ha de P mantuvieron rendimientos máximos de una mezcla de gramínea y leguminosa en un Oxisol de Hawaii por 11 años sin aplicaciones anuales de mantenimiento. (Los resultados se presentaron en la Fig. 8.5).

Parece dudoso que aplicaciones iniciales altas de fósforo sean económicas para pasturas en suelos con alta capacidad de fijación de fósforo, aunque las mismas hayan sido lucrativas cuando los fertilizantes tenían precios bajos. En vista del tiempo necesario para recuperar la inversión en fertilizantes por medio de la producción de carne, parece más razonable el uso de especies tolerantes más aplicaciones modestas iniciales y anuales, aún en Oxisoles. Datos recientes del CIAT han confirmado esta suposición.

El costo de la fertilización con fósforo puede reducirse aplicando fuentes más baratas como roca fosfatada, particularmente en suelos ácidos. Este procedimiento parece promisorio para Oxisoles de Brasil con capacidad de fijación de fósforo sumamente alta (North Carolina State University, 1974). Algunas diferencias entre especies en su respuesta relativa a superfosfato versus roca fosfatada han sido observadas por Bryan y Andrew (1971). *Stylosanthes guianensis* y *Lotononis bainesii* fueron capaces de extraer más fósforo de roca fosfatada que *Desmodium uncinatum* y *Macroptilium lathyroides*. No se conocen las causas de este comportamiento. Sin embargo, en la mayoría de los casos una aplicación inicial de una fuente altamente soluble como superfosfato, es razonable debido a la baja disponibilidad de la roca fosfatada y a la necesidad inicial más alta de fósforo de

muchas leguminosas tropicales. Es probable que tales aplicaciones sean más efectivas si se incorporan unos 15 cm.

Encalado. Cuando ambas especies, de gramínea y de leguminosa son tolerantes a la acidez, responden a pequeñas cantidades de cal, generalmente del orden de 0,15 a 1,0 ton/ha de CaCO_3 , en suelos que normalmente requieren de 4 a 6 ton/ha para neutralizar el aluminio intercambiable y subir el pH a 5,5 (Jones y Freitas, 1970; Spain, 1975). La Fig. 13.8 presenta algunos ejemplos de los Llanos Orientales de Colombia. Las especies de gramíneas y leguminosas tolerantes a la acidez, sembradas en mezclas, sólo respondieron a fertilización con calcio o magnesio debido a que los 150 kg/ha de cal era

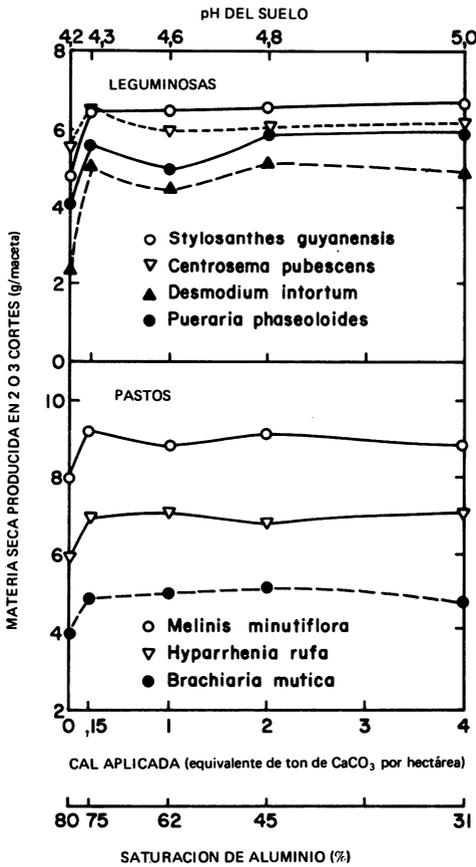


Fig. 13.8. Respuesta a la cal de varias especies de pastos y leguminosas tolerantes a la acidez cultivadas en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. (Fuente: compilado de CIAT, 1973).

muy poco para afectar las propiedades del suelo. El efecto residual de esas pequeñas aplicaciones no se ha determinado, ni se sabe si las necesidades de mantenimiento son diferentes a las necesidades del establecimiento. Las aplicaciones de superfosfato de mantenimiento mencionadas en la sección precedente, probablemente son suficientes para satisfacer las necesidades de calcio de estas leguminosas.

Las necesidades de cal de leguminosas susceptibles a la acidez, como *Leucaena leucocephala* y *Glycine wightii* son completamente diferentes (Jones y Freitas, 1970; Hill, 1971; Lee y Wilson, 1972). Para obtener rendimientos máximos fueron necesarias dosis de 10 ton/ha de cal para *Leucaena leucocephala* en suelos ácidos de Nueva Guinea (Hill, 1970).

La gran mayoría de ensayos de encalamiento en pasturas tropicales se han hecho con dosis que pasan por alto el efecto que se muestra en la Fig. 13.8 en leguminosas tolerantes a la acidez. Una compilación de los trabajos en Colombia por Lotero et al (1971), muestra que la mayoría de los experimentos comenzaron con dosis de 2 a 4 ton/ha y por lo tanto, las especies tolerantes a la acidez con esos niveles tuvieron rendimientos casi máximos. Hay una necesidad considerable de trabajos a nivel de campo sobre las necesidades de cal para el mantenimiento de las mezclas de gramíneas y leguminosas adaptadas a suelos ácidos. Pocas veces se toma en cuenta la profundidad del encalamiento; es correcto suponer que la cal se incorpore a menos profundidad en las pasturas que en los cultivos.

Potasio. Aunque hay una diferenciación importante entre las leguminosas tropicales con respecto a si requieren niveles altos o bajos de potasio para un crecimiento máximo (Andrew y Robins, 1969b), lo que se sabe sobre la necesidad de potasio para el establecimiento y mantenimiento de pasturas de gramíneas y leguminosas adaptadas es muy poco. La respuesta a potasio en la mayoría de los trabajos australianos ha sido esporádica o inexistente (Shaw y Mannelje, 1970, Teitzel, 1969, Bryan y Evans, 1973), así como en Brasil (Jones y Freitas, 1970). Aún en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico, que se sabe que son bajos en este elemento no se recomiendan aplicaciones de potasio para mezclas de kudzú y *Melinis minutiflora* (Vicente-Chandler et al, 1964). Ante la falta de información definitiva de investigación, los valores obtenidos mediante análisis de suelo y de plantas pueden indicar si este elemento debería aplicarse o no. En Florida, Brolmann y Sonoda (1975) encontraron que el nivel crítico de potasio en tejidos de *Stylosanthes guianensis* era del 0,8% en los tejidos. Como alrededor del 80% del potasio que los animales consumen vuelve al suelo por medio de las excreciones en los sistemas de pastoreo es probable que la necesidad de aplicaciones de mantenimiento sea menor. Un problema que se presenta es la práctica corriente de agregar cantidades generosas de potasio en experimentos diseñados para evaluar los efectos de otros nutrimentos. Tomando en cuenta la

extrema deficiencia de potasio en muchos Oxisoles, Ultisoles y muchos suelos arenosos, se nota la seria necesidad de investigación en esta área.

Azufre. Las respuestas al azufre en pasturas mixtas de Australia tropical están bien documentadas (Jones et al, 1971; Robinson y Jones, 1972). La razón para usar superfosfato simple en vez de superfosfato triple en esta región es su contenido de azufre. Las respuestas a azufre también son comunes en Oxisoles de Brasil. Jones y Quagliato (1973) observaron que *Stylosanthes guianensis* respondía inmediatamente al azufre después del establecimiento, mientras que *Centrosema pubescens* y *Glycine wightii* no respondían sino hasta el tercer corte. La alfalfa presentó la respuesta más alta. La necesidad verdadera parece ser del orden de 20 a 40 kg/ha de S, según McClung y Quinn (1959).

Microelementos. La presencia de deficiencias de microelementos depende de las propiedades del suelo. El ejemplo clásico es la deficiencia muy extendida de molibdeno que se observa en Australia, que condujo al uso casi universal de superfosfato simple enriquecido con molibdeno tanto para aplicaciones de establecimiento como de mantenimiento (Moore, 1970). La dosis que se recomienda es menor de 1 kg/ha. Se ha informado de deficiencias de hierro en kudzú cultivado en suelos calcáreos de Puerto Rico (Vicente-Chandler et al, 1964) y deficiencias de boro y molibdeno se han observado en las mismas especies en la selva amazónica peruana (North Carolina State University, 1973). Adiciones de sílice han eliminado la toxicidad de manganeso en *Sorghum sudanense* en Hawaii (Bowen, 1972). La presencia de deficiencia de elementos secundarios y de microelementos se identifica mejor por medio de análisis de suelos, plantas y animales. Beeson et al (1972), y Suttmoller et al (1966), han hecho estudios de esta clase en la selva amazónica de Perú y Brasil; Moody (1974), Teitzel y Bruce (1972, 1973), y muchos otros en Australia, han demostrado el valor de llevar a cabo estudios de evaluación de la fertilidad del suelo en invernadero antes de abrir nuevas áreas para producción de pasturas.

EFEECTO DE LAS LEGUMINOSAS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

A las leguminosas se les considera como “mejoradoras del suelo”. Sin embargo la evidencia de que se dispone indica que los aumentos de nitrógeno total no son apreciables sino hasta que la leguminosa está bien establecida. Crack (1972) informó que no hubo cambios en nitrógeno total del suelo o de nitrógeno inorgánico durante los dos primeros años después de la sobresiembra de *Stylosanthes humilis* en sabanas naturales de Australia. Después del tercer año se observaron

aumentos netos de nitrógeno orgánico en la capa arable con aplicaciones generosas de superfosfato. El nitrógeno en forma de nitrato aumentó en forma similar. Los niveles de nitrato en la capa arable durante la estación seca y durante los “incrementos repentinos” a principios de la estación lluviosa aumentaron varias veces en presencia de leguminosas. Cuando la leguminosa se fertilizó con superfosfato, los niveles de nitrato del suelo subieron aún más. Estos resultados, presentados en el Cuadro 13.13 sugieren mineralización del aumento de nitrógeno orgánico.

Los aumentos en nitrógeno orgánico del suelo tuvieron un ámbito de 44 a 90 kg/ha en áreas de sabanas de Queensland. Vallis (1972) informó que durante los años secos no hubo aumento o disminución real en nitrógeno total del suelo. En áreas údicas con suelos con niveles relativamente altos de bases en el norte de Queensland, Bruce (1965) comparó cambios de largo plazo en carbono y nitrógeno orgánico en pasturas de guinea y de mezclas de guinea y *Centrosema pubescens* sin fertilizar. En la Fig. 13.12 se presenta la comparación de pasturas de edad conocida muestreadas al mismo tiempo. Las pasturas puras de guinea sufrieron una disminución en nitrógeno y carbono pero se aproximaron a un nuevo equilibrio a los 8 años de pastoreo. Por otra parte, la pastura mixta de gramínea y leguminosa mantuvo niveles de materia orgánica del suelo cercanos a los existentes antes del desmonte. Se calculó la diferencia entre los dos y se consideró como incremento anual de materia orgánica en la capa arable 103 kg/ha de N, que constituye la contribución de la leguminosa.

CUADRO No. 13.13. Efectos de la introducción de *Stylosanthes humilis* en sabanas naturales de *Heteropogon contortus* y aplicaciones de superfosfato corriente en los cambios de los 7,5 cm superiores de un suelo solódico cerca de Townsville, Australia. (Porcentaje inicial de N=0,08). (Fuente: adaptado de Crack, 1972).

Manejo	Cambios en N orgánico (kg/ha de N)		NO ₃ -N (ppm)	
	0-2 años	0-4 años	Final de la estación seca	Incremento repentino a principios de la estación lluviosa
Pasto natural	-18	+ 10	+ 2	+ 2
Pasto natural + leguminosa	-19	+ 68	+ 4	+ 8
Pasto natural + leguminosa + 18 kg P ₂ O ₅ /ha por año	+ 3	+179	+10	+14

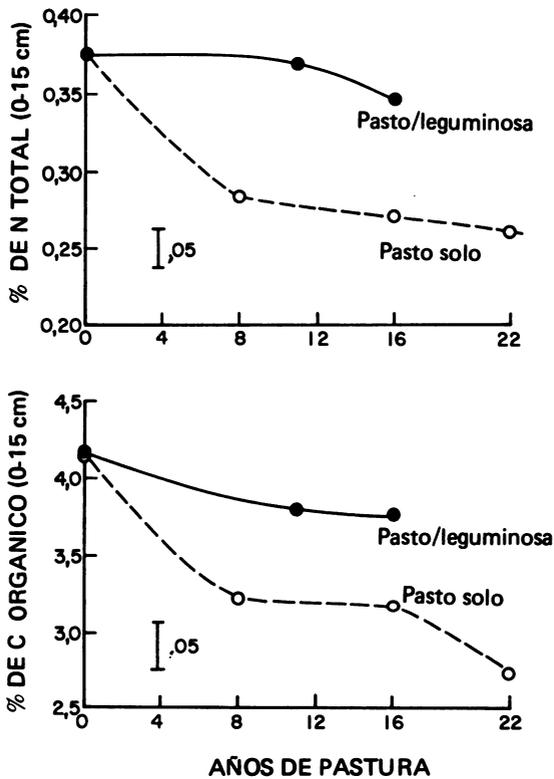


Fig. 13.9. Efectos de largo plazo de pasturas de pasto guinea (*Panicum maximum*) sin fertilizar, con y sin *Centrosema pubescens*, en la materia orgánica de la capa arable de un Alfisol con pH 5,7 después de la corta de un bosque pluvial en South Johnstone, Australia. (Fuente: adaptado de Bruce, 1965).

El establecimiento y mantenimiento de tales niveles de equilibrio de nitrógeno y carbono orgánico del suelo es extraordinario. Con cultivos, el agotamiento de la materia orgánica del suelo es mucho más pronunciado que con pastoreo. El retorno a las pasturas de una gran proporción de los nutrientes consumidos por los animales por medio de las excreciones es una razón muy importante de este equilibrio. La Fig. 13.9 puede explicar la razón por la cual las pasturas de guinea sin fertilizar permanecen productivas por muchos años en ambientes údicos. La función de la leguminosa de mantener niveles de carbono y nitrógeno orgánicos similares a los que había antes del desmonte del bosque, da aún más apoyo a su importante contribución al mantenimiento de propiedades químicas deseables del suelo.

Cuando la introducción de leguminosas va acompañada de una fertilización anual adecuada, las propiedades del suelo en realidad mejoran. En el ejemplo que se presenta en el Cuadro 13.14, después

CUADRO No. 13.14. Cambios en las propiedades de la capa arable de un Ultisol después de 8 años de pasturas de *Chloris gayana*, *Desmodium uncinatum* y *Lotononis bainesii* en el sureste de Queensland, Australia. (Fuente: adaptado de Bryan y Evans, 1973).

Tratamiento	pH	C orgánico (%)	N total (%)	P disponible (ppm)	Intercambiables (meq/100 g)			CIC ^a	pH 7
					Ca	Mg	K		
Suelo virgen	5,4	0,56	0,035	3	0,75	0,44	0,38	3,4	
Pastura + 125 kg/ha por año de superfosfato corriente y KCl	5,4	1,99	0,053	33	1,80	0,44	0,92	5,4	

de 8 años de pastoreo se registraron aumentos significativos en carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio intercambiable, calcio intercambiable y capacidad total de intercambio catiónico. La pastura mejorada de gramínea y leguminosa de este ejemplo se fertilizó anualmente con 12 kg/ha de P como superfosfato simple y 10 kg/ha de K como KCL.

PRODUCCION DE PASTURA Y FORRAJE BASADA EN FERTILIZACION INTENSIVA DE GRAMINEAS

La tercera gran división de los sistemas de manejo del suelo para producción animal incluye el uso intensivo de fertilizantes en ausencia de leguminosas. El fundamento es que las leguminosas pocas veces pueden suministrar suficiente nitrógeno para que las gramíneas alcancen su rendimiento máximo potencial. Una producción anual de materia seca de 45 ton/ha se ha logrado comercialmente con fertilización intensiva de pasto elefante o guinea en Puerto Rico (Vicente-Chandler et al, 1964, 1974). Tal producción soporta una carga hasta de 10 animales/ha con forraje cortado o 5 animales/ha bajo pastoreo, lo que representa más de 1000 kg/ha de producción anual de carne, o 7400 kg de leche por vaca por año en Ultisoles y Oxisoles escarpados, siendo las raciones de los animales de solamente pasto. Las mezclas de gramíneas y leguminosas no producen suficiente nitrógeno para suplir esas cantidades de pasto tan altas.

La fertilización intensiva de gramíneas es económicamente viable en áreas con razón baja entre el costo de los fertilizantes y el precio de los productos derivados del animal. Este es el caso de muchas operaciones de la industria lechera, así como de la producción de carne cerca de áreas urbanas con altas demandas de carne. Algunas veces hay pequeñas áreas irrigadas con una fertilización intensa para el suministro de forraje de alta calidad durante la estación seca o con propósitos de engorde.

FERTILIZACION SEMIINTENSIVA DE PASTURAS

En áreas en las que no ha habido una introducción satisfactoria de leguminosas y la razón precio:costo no justifica inversiones fuertes en fertilizantes, se practica un sistema semiintensivo. En la Fig. 13.10 se presenta un ejemplo adaptado del trabajo llevado a cabo por el IRI, São Paulo, Brasil (Quinn et al, 1961, 1962, Mott et al 1970, Mott, 1974). La variedad mejorada de *Panicum maximum*, Colonião, recibió una aplicación anual de 200 kg/ha de N durante 8 años consecutivos y 86 kg/ha de P y 60 kg/ha de S durante los dos primeros años. Esto más que duplicó el rendimiento anual de energía digerible y aumentó los incrementos anuales de peso vivo de 300 a 700 kg/ha. La utilidad económica producida por la fertilización nitrogenada fue

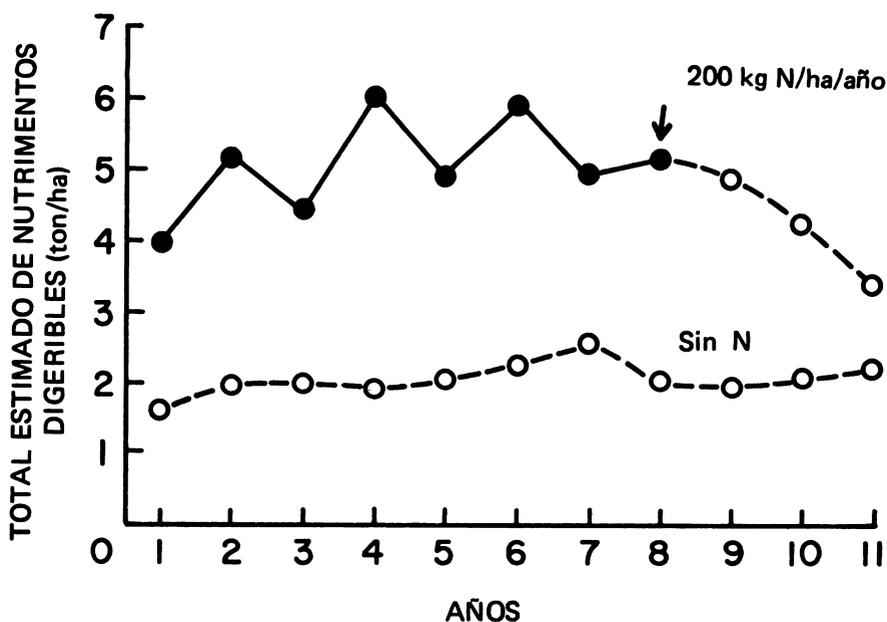


Fig. 13.10. Efecto de aplicaciones anuales de nitrógeno durante ocho años en pasturas de pasto guinea en los totales estimados de nutrientes digeribles consumidos por novillos en pastoreo, y el efecto residual durante tres años en un Alfisol arenoso, (pH 6) en Araçatuba, São Paulo, Brasil. Ambos tratamientos incluían aplicaciones de 200 kg/ha de P_2O_5 y 60 kg/ha de S durante los dos primeros años. (Fuente: adaptado de Mott, 1974).

de US\$ 42 por año con los precios de 1963. Aunque las aplicaciones de fósforo y azufre se suspendieron en el segundo año, la estabilidad de las cifras de producción sugiere un fuerte efecto residual de estos elementos. Las aplicaciones anuales de nitrógeno se terminaron en el octavo año, después del cual la producción declinó apreciablemente pero aún se mantuvo superior a los niveles del testigo. Esto sugiere un fuerte efecto residual del nitrógeno que Mott (1974) atribuyó al eficiente reciclaje entre suelo, plantas y animales.

PASTOREO VERSUS FORRAJE CORTADO

Entre los sistemas intensivos existe una división fundamental: aquellos en que los animales pastorean y aquellos en que el pasto se corta y se da a los animales en otro lugar. En la práctica los sistemas más intensivos de manejo incluyen una combinación de ambos, pero para propósitos de manejo las diferencias son críticas.

Con pastoreo el animal retorna la mayoría de los nutrientes al suelo y por eso la necesidad de fertilizantes de mantenimiento es

menor. Vicente-Chandler et al (1974), calcularon que con un manejo intensivo de pastoreo los animales devolvían al suelo anualmente 176 kg/ha de N, 20 kg/ha de P y 115 kg/ha de K por medio de las excreciones. La distribución de las heces no es uniforme y en sitios de acumulación de estiércol puede haber un excesivo crecimiento que puede hacer ajustes. Sin embargo, en pasturas fertilizadas abundantemente esto no es problema porque el pasto crece cerca de su potencial máximo.

La experiencia de Puerto Rico indica que las necesidades de fertilización de las pasturas para forraje son el doble de las de pasturas para pastoreo. Vicente-Chandler et al (1974), recomiendan aplicaciones anuales de 370 kg/ha de N, 53 kg/ha de P y 197 kg/ha de K para pasturas de corta, pero sólo la mitad de esas cantidades para pasturas de pastoreo en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico. La diferencia de estas dos dosis recomendadas corresponde muy de cerca a las cantidades calculadas de nutrimentos que vuelven al suelo mediante las excreciones. Stephens (1967) comparó corte versus pastoreo de pasto elefante en Uganda y encontró una mayor extracción de nitrógeno con el corte que con el pastoreo. También observó marcadas respuestas a aplicaciones de potasio y magnesio en forraje de corte, pero no en pasturas de pastoreo en el mismo suelo.

Además, los animales en pastoreo producen cambios en las propiedades del suelo, principalmente compactación por el pisoteo cuando el suelo está mojado, y erosión a lo largo de los trillos que el ganado hace. Además los animales seleccionan las partes más nutritivas de las plantas y rechazan los tallos viejos y ciertas especies.

En sistemas de corte no hay reciclaje de nutrimentos a través de los animales. El estiércol se acumula en establos u otros lugares y puede ser devuelto o no al mismo campo, según el manejo. Hay poca compactación o pisoteo. Se produce y consume mayor cantidad de materia seca con menos contenido de proteína por cuanto los animales no tienen oportunidad de seleccionar partes de las plantas o especies. En términos de productividad los forrajes cortados producen más materia seca y producto animal por hectárea por año que los sistemas de pastoreo de intervalos similares de cosecha, pero a un costo mucho más alto.

Los dos boletines de revisiones del trabajo en Puerto Rico (Vicente-Chandler et al, 1964, 1974) ofrecen excelentes comparaciones de los dos sistemas, incluyendo las consecuencias económicas a escala de manejo de fincas. En el Cuadro 13.15 se presenta un resumen de estas comparaciones en términos de producción animal y de pasto. Los valores promedio indican que el pastoreo produjo solamente cerca del 60% de la energía total digerible que se obtuvo con el forraje cortado. Sin embargo las pasturas de pastoreo contenían más del doble del porcentaje de proteína cruda que el forraje cortado debido a la alimentación selectiva de los animales y a la mayor frecuencia del pastoreo.

CUADRO No. 13.15. Comparación de la productividad anual de Ultisoles y Oxisoles manejados intensivamente en la región údica de Puerto Rico con manejo de forraje y pastoreo (F = forraje cortado, P = bajo pastoreadas). (Fuente: adaptado de Vicente-Chandler et al, 1974).

Los forrajes recibieron aplicaciones anuales de 370 kg/ha de N, 53 kg/ha de P y 197 kg/ha de K y fueron encalados a pH 6,0; las pasturas para pastoreo recibieron la mitad de esas aplicaciones.

Especies de gramíneas	Producción de materia seca (ton/ha)		Materia seca total consumida por el ganado (ton/ha)		Proteína cruda (%)		Capacidad de carga de novillos de 270 kg (animales/ha)		Aumento de peso vivo (kg/ha)	
	F	P	F*	P	F	P	F ¹	P	F	P
Elefante	37	13	14	8	7,2	16,0	10,0	5,4	1232	
Guinea	30	13	12	8	7,7	17,4	8,3	5,4	1232	
Pangola	28	12	11	7	7,4	16,0	7,6	5,0	1008	
Gordura**	14	7	6	4	8,9	—	3,9	2,7	616	

(*) Un novillo de 270 kg necesita 1425 kg de materia seca por año = 3600 kg de forraje cortado por año, suponiendo un 20% de desperdicio en la alimentación y 50% de digestibilidad del forraje consumido.

(**) Especie no recomendada.

FERTILIZACION NITROGENADA

Dosis. En la misma forma en que las especies de gramíneas varían en su tolerancia a la acidez del suelo y a la poca disponibilidad de fósforo, también difieren en su respuesta a aplicaciones de nitrógeno. Las especies de gramíneas pueden agruparse en categoría respuesta alta al nitrógeno y categoría de respuesta baja. Las especies de respuesta alta incluyen pastos elefante (*Pennisetum purpureum*), y guinea (*Panicum maximum*), pangola (*Digitaria decumbens*), estrella (*Cynodon plectostachyum*), pará (*Brachiaria mutica*), congo (*Brachiaria ruziziensis*), kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), nandí (*Setaria sphacelata*), rhodes (*Chloris gayana*) y dalis *Paspalum dilatatum*. Estas especies requieren aplicaciones anuales de nitrógeno de 400 a 900 kg/ha para alcanzar rendimiento máximo como forraje cortado, según estudios llevados a cabo en suelos ampliamente diferentes en todos los trópicos (Vicente-Chandler et al, 1964, 1974, Crowder et al, 1964, Herrera et al, 1967, Lotero et al, 1968, Whitney y Green, 1969, Evans, 1969, Olsen, 1975). En el patrón típico de respuesta que se presenta en la Fig. 13.11, el pasto elefante produjo 44 ton/ha por año de materia seca con 880 kg/ha de N, mientras que algunas otras de las especies mencionadas se aproximaron al rendimiento máximo de materia seca de 30 ton/ha por año con 440 kg/ha de N. La literatura está llena de experimentos que muestran una respuesta lineal a las aplicaciones de nitrógeno de pastos cuando las dosis más altas que se usaron fueron menores de 600 a 800 kg/ha de N. Esta alta necesidad de nitrógeno confirma el concepto de que la producción máxima de estas gramíneas no pueden lograrse por medio de mezclas con leguminosas, por cuanto la contribución máxima de las leguminosas en tales mezclas es del orden de 100 a 300 kg/ha de N por año (Henzell, 1968).

Las especies de gramíneas que sólo responden a aplicaciones moderadas de nitrógeno incluyen el pasto gordura (*Melinis minutiflora*), jaragua (*Hyparrhenia rufa*), bahía (*Paspalum notatum*) y especies nativas, tales como *Heteropogon contortum*, *Paspalum plicatum*, según estudios de Vicente-Chandler et al, (1964, 1974), Bastidas et al, (1967), Pérez (1970) y Manetje y Shaw (1972). Los últimos autores demostraron que estas especies son menos eficientes en el uso del nitrógeno aplicado: 20 kg de materia seca por 1 kg de N con la dosis inicial, en contraste con 40 a 50 kg de materia seca por 1 kg de N con una dosis similar de las gramíneas que más responden al nitrógeno. La Fig. 13.8 incluye el pasto gordura (*Melinis minutiflora*) como ejemplo de especie de respuesta moderada. El máximo de rendimiento de materia seca de cerca de 15 ton/ha por año se obtuvo con la aplicación óptima anual de 200 kg/ha de N. No es simple coincidencia que tales especies se usen en mezclas. Ellas probablemente se aproximan a su respuesta máxima potencial al nitrógeno con la dosis que puede proporcionar una leguminosa (100 a 300 kg/ha de N por

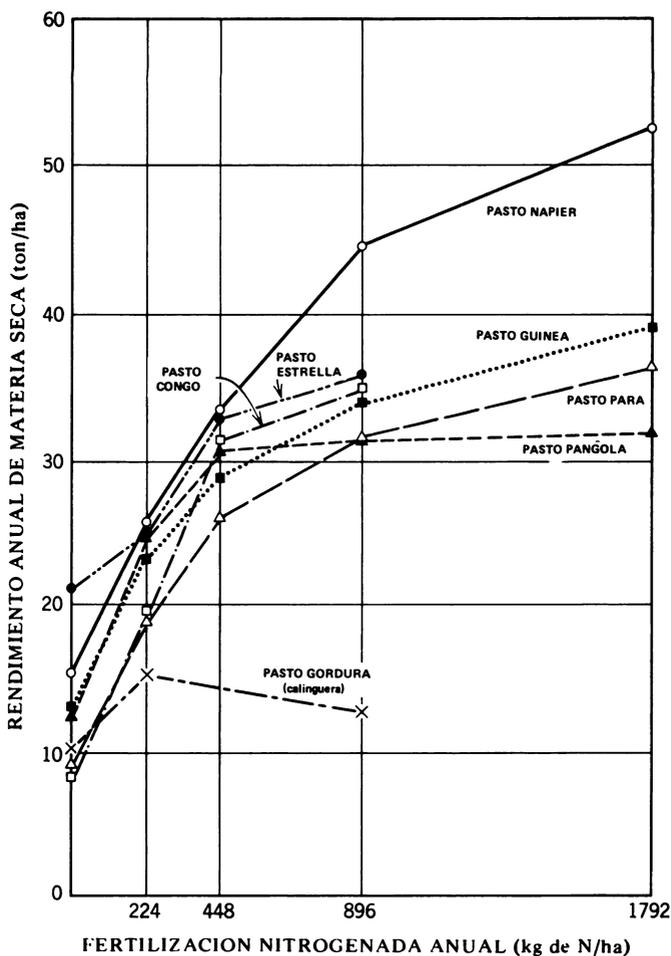


Fig. 13.11. Respuesta de la materia orgánica a la fertilización nitrogenada de pastos tropicales cortados para forraje en Ultisoles de las regiones montañosas údicas de Puerto Rico. (Fuente: Vicente-Chandler et al, 1974).

año) en mezclas. Por lo tanto estas especies de gramínea pocas veces se usan en sistemas de fertilización intensiva.

Las aplicaciones de 400 a 800 kg/ha de N generalmente requieren fósforo y potasio adicionales, más encalamiento para neutralizar la alta acidez residual cuando se usan fuentes amoniacales de nitrógeno. Las consideraciones económicas generalmente reducen las dosis óptimas de aplicación a cerca de 400 kg/ha de N por año para pasturas de corte, tal como se ilustra en el Cuadro 13.15. Cuando estas pasturas fertilizadas intensivamente se pastorean en vez de cortarlas para fo-

rraje, la repetición del ciclo de nutrientes rebaja la aplicación óptima de nitrógeno a la mitad, pero la capacidad de carga se reduce correspondientemente (Vicente-Chandler et al, 1974). Un ejemplo de la relación entre dosis de nitrógeno, aumentos de peso vivo y capacidad de carga se presenta en la Fig. 13.12 de un ensayo llevado a cabo en condiciones casi ideales con pangola bajo riego en Mollisoles del Valle del Cauca, Colombia. En este caso el nivel óptimo era de 500 kg/ha de N, el cual produjo aumentos de peso vivo de 1000 kg/ha con una capacidad de carga de 6,7 animales/ha. Las dosis óptimas de nitrógeno también dependerán de las condiciones de suelo, las pérdidas estimadas por lixiviación, el manejo del pastoreo y muchos otros factores. La invasión de malas hierbas y de especies de zacate menos deseables es un problema menor con dosis altas de nitrógeno que con dosis bajas por razón de la competencia (Gartner, 1967, 1969).

La respuesta de las gramíneas a la fertilización nitrogenada no es uniforme durante todo el año. La producción mayor de materia seca

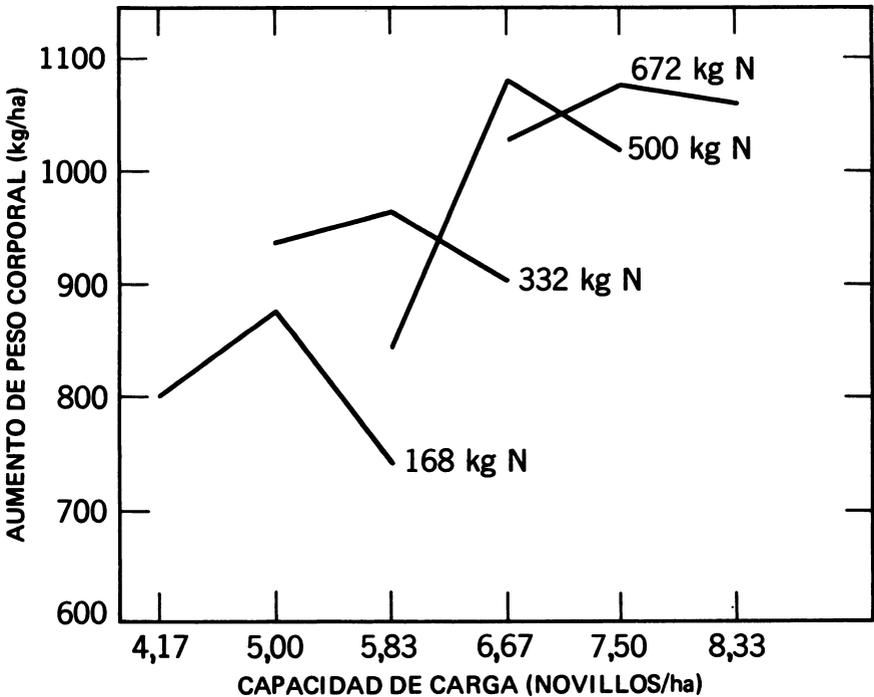


Fig. 13.12. Relación entre aplicaciones anuales de nitrógeno, capacidad de carga, y aumento anual de peso vivo en pasto pangola irrigado, en un Mollisol con alto nivel de bases, en Palmira, Colombia. (Fuente: CIAT, 1973).

se alcanza durante períodos de temperatura alta y abundante pluviosidad. La mayoría de las gramíneas que responden al nitrógeno son bastante susceptibles a temperaturas bajas (Vicente-Chandler et al, 1964, 1974; Wollner, 1968; Whitney y Green, 1969) y a la falta de agua (Oakes, 1967; Guerrero et al, 1970). Mannetje y Shaw (1972) correlacionaron la respuesta al nitrógeno y la eficiencia en la utilización del fertilizante directamente con la precipitación pluvial. La mayoría de las gramíneas fertilizadas intensivamente se cultivan en ambientes údicos o con irrigación suplementaria durante la estación seca.

Como la producción deseada de materia seca y de proteína pueden controlarse razonablemente bien con aplicaciones de nitrógeno, una manera de regular la producción en diferentes épocas del año es aumentar o disminuir las dosis de nitrógeno, además de la influencia de la temperatura y las lluvias.

Fuentes. Una revisión de la literatura latinoamericana sobre fertilización de pasturas no proporcionó diferencias en la eficiencia entre las fuentes comerciales de nitrógeno (Sánchez, 1973). La urea se recomienda generalmente por su menor costo por unidad y por su efecto acidificante moderado, excepto cuando hay condiciones que favorecen las pérdidas por volatilización. Cuando aparecen deficiencias de azufre, se recomienda sulfato de amonio a menos que las necesidades de azufre se puedan llenar con superfosfato simple. Aunque se ha encontrado que la urea revestida con azufre es más efectiva para fertilizar gramíneas en condiciones de mucha lixiviación en la zona templada (Allen y Mays, 1974) se sabe poco sobre su efecto bajo condiciones tropicales. Resultados iniciales en Ultisoles de la selva amazónica peruana indican promesa de esta fuente de liberación lenta. El forraje de guinea alcanzó la misma producción de materia seca con una dosis anual de 400 kg/ha de N que urea dividida en aplicaciones que con 100 kg/ha de N por año de urea revestida con azufre en dos aplicaciones (North Carolina State University, 1974).

Épocas de aplicación. Los estudios sobre épocas de aplicación indican que se pueden lograr mejores resultados dividiendo la dosis anual en cantidades iguales que se aplican después de cada corta o período de pastoreo, que generalmente es de 4 a 8 veces por año (Crowder et al, 1967; Herrera et al, 1967; Vicente Chandler et al, 1964, 1974). Se pueden derivar algunos beneficios aplicando dosis menores durante períodos esperados de tiempo fresco o de falta de agua. Sin embargo una mejor programación es después de cada corta o de pastoreo si este es rotativo. Cosechando cada 90 días se obtiene más materia seca anual que cosechando cada 40 días, pero el contenido de proteína es mucho más alto con intervalos de 40 días que de 90 días (Vicente-Chandler et al, 1974). Cuando se consideran ambas,

la demanda de energía y la de proteína, la época óptima está probablemente entre estos dos puntos. Corrientemente se recomienda que se aplique nitrógeno después de cada corta o pastoreo.

Generalmente el nitrógeno se aplica al voleo. Lotero et al (1968), observó en Colombia que no había beneficios de la aplicación de nitrógeno en bandas, o concentrándolo alrededor de los macollos de pasto elefante, en comparación con aplicación al voleo sobre toda el área. Las aplicaciones foliares por aspersión son inefectivas (Uribe y Grisales, 1960; Crespo, 1972).

Recuperación del fertilizante. Por la importancia de estimar el contenido de proteína, las investigaciones con pasturas se acompañan de análisis de nitrógeno que permiten calcular la recuperación aparente del nitrógeno agregado por medio de las diferencias de asimilación de este elemento. Las gramíneas forrajeras tropicales son más eficientes en la recuperación de nitrógeno agregado que la mayoría de otros cultivos. Con las dosis recomendadas de nitrógeno, las recuperaciones aparentes varían del 43 al 75% en Puerto Rico, Colombia y Australia (Henzell, 1971; Sánchez, 1973). En Australia la recuperación ha sido tan alta, como del 77 al 83% cuando se calculó mediante el uso ^{15}N (Vallis et al, 1973). En pasturas sería razonable suponer una recuperación más alta debido al reciclaje de nitrógeno. Sin embargo, Henzell (1972) trabajando en un Ultisol de Queensland, sólo pudo dar cuenta del 40% del total de 374 kg/ha de N aplicados por año, midiendo la cantidad usada por el ganado, la cantidad acumulada en el pasto en pie, y la cantidad presente en los 75 cm superiores del suelo. La recuperación de nitrógeno aplicado a pasturas de cortadas disminuye con los aumentos de las dosis de aplicación (Henzell, 1971; Vicente-Chandler et al, 1974), pero la magnitud de estas disminuciones es mucho menor que en cultivos. Los verdaderos valores de recuperación dependen de las propiedades del suelo y el manejo. Se obtiene mayor recuperación de fertilizantes con especies que responden a altas dosis de nitrógeno.

FERTILIZACION CON FOSFORO

Las necesidades de fósforo en pastos con fertilización intensiva, a diferencia de las de nitrógeno, dependen mayormente de las propiedades del suelo que de las especies de gramíneas presentes. Aunque algunas de las especies que responden fuertemente al nitrógeno se consideran como tolerantes a poco fósforo disponible en el suelo (Cuadro 13.4), su alta tasa de crecimiento a causa de la fuerte fertilización nitrogenada, aumenta su necesidad de fósforo. Según Vicente-Chandler et al (1974), estos pastos extraen alrededor de 53 a 72 kg/ha de P anualmente (Cuadro 13.16). Los niveles óptimos en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico son del orden de 75 kg/ha de P por

CUADRO No. 13.16. Extracción anual de nutrientes por forraje de corte fertilizados intensivamente, en un Ultisol de Puerto Rico (la misma fertilización que indica el Cuadro 13.15). (Fuente: adaptado de Vicente-Chandler et al, 1974).

Especies	Producción de materia seca (ton/ha)	Nutrientes asimilados (kg/ha)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Elefante	28	338	72	565	107	71	84
Guinea	25	322	50	406	167	110	50
Pangola	26	335	53	401	122	75	50

año, excepto con pangola que requiere menos fósforo. La Fig. 13.13 presenta una respuesta típica. Una revisión de la literatura colombiana sobre este tema de Michelin et al (1974), informa de dosis óptimas de 43 kg/ha de P por año para pastos elefante y pangola en suelos volcánicos y aluviales de tierras altas de ese país. Debido a la

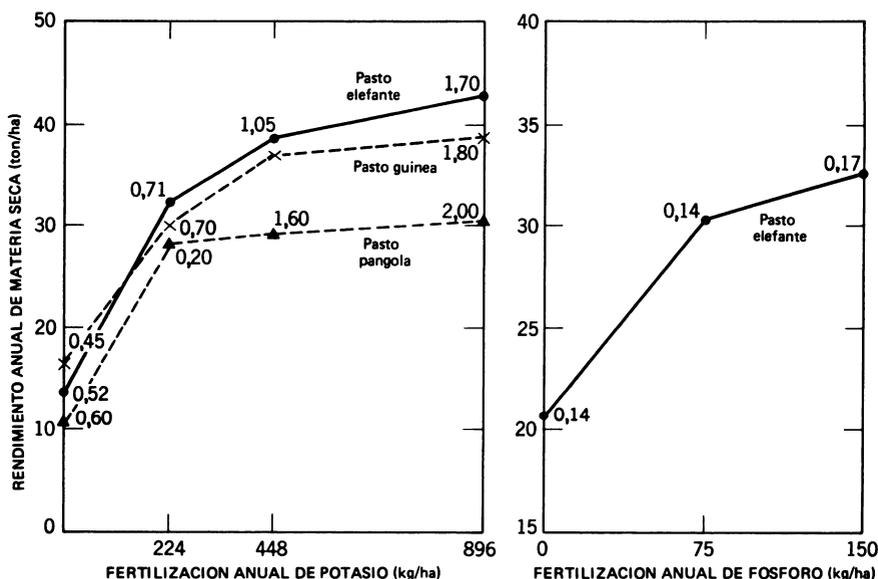


Fig. 13.13. Respuestas de pastos tropicales a fertilización con fósforo y potasio en un Ultisol típico de Puerto Rico. Los números indican el contenido en porcentaje de potasio y fósforo del forraje en base al peso seco. (Fuente: Vicente-Chandler et al, 1974).

mayor producción anual de materia seca y a la remoción de fósforo en pastos fertilizados intensivamente, las dosis recomendadas para las aplicaciones anuales son considerablemente mayores que las que se usan para forraje cortado en la región templada (Kamprath, 1973).

Los estudios de fuentes de fósforo indican una mayor recuperación de superfosfato que de roca fosfatada (Michelin et al, 1974). Tomando en cuenta el menor costo de la roca fosfatada, Werner et al (1968), recomendaron una mezcla de ambas fuentes para pasturas de Brasil. Los aspectos relativos a la fijación de fósforo y efectos residuales discutidos en la sección sobre pasturas basadas en leguminosas son aplicables a la producción intensiva de forrajes. Como se mencionó anteriormente, las necesidades de fósforo en sistemas de pastoreo se pueden reducir a la mitad debido al reciclaje de nutrimentos.

FERTILIZACION CON POTASIO

Las gramíneas forrajeras con manejo intensivo extraen enormes cantidades de potasio del suelo. El Cuadro 13.16 muestra un ámbito anual de 401 a 565 kg/ha de K para tres especies. El rápido crecimiento a consecuencia de la fuerte fertilización nitrogenada requiere dosis correspondientes de potasio. La Fig. 13.13 muestra que dosis anuales de 225 a 450 kg/ha de K son suficientes para aproximarse al rendimiento máximo. La dosis óptima parece estar relacionada con un contenido de 1,0% de potasio en la materia seca; dosis más altas pueden resultar en el clásico consumo de lujo de este elemento. Vicente-Chandler et al (1974), observaron poca respuesta al potasio durante los dos primeros años después del establecimiento en cerca de 50 suelos de Puerto Rico. Después de dos años, el promedio de potasio disponible por año fue de 60 kg/ha (medido mediante la absorción de nutrimentos), solamente con pequeñas diferencias entre distintos tipos de suelo. En Puerto Rico no se observaron diferencias entre KCl y K_2SO_4 . El KCl con revestimiento de azufre, de liberación lenta, no ha sido probado bajo estas condiciones.

El potasio debe aplicarse juntamente con el nitrógeno después de cada corta o pastoreo. Considerando un 75% de recuperación, Vicente-Chandler et al (1974), recomendaron una dosis de aplicación anual de 200 kg/ha de K en Oxisoles y Ultisoles para forrajes de corte. Niveles semejantes se han recomendado para pangola de corte en Nigeria (Cheda et al, 1973). Para pastoreo, las cantidades recomendadas en Puerto Rico se reducen a la mitad debido al reciclaje de nutrimentos.

ENCALADO

Muchas de las gramíneas forrajeras tropicales que responden a nitrógeno son tolerantes a niveles relativamente altos de aluminio intercambiable. El encalamiento se usa principalmente para contrarrestar

la acidez residual de altas dosis de aplicación de nitrógeno. En el proceso se corrige cualquier deficiencia de calcio o magnesio que haya, beneficio importante si se consideran los altos valores anuales de extracción de estos dos elementos (107 a 167 kg/ha de Ca y 71 a 110 kg/ha de Mg en los ejemplos del Cuadro 13.16). Cuando se usa cal calcítica deben hacerse adiciones separadas de magnesio si el suelo es deficiente en este elemento.

La acidez residual de aplicaciones altas de nitrógeno a forrajes tropicales es una de las mayores que se registran. Aplicaciones anuales de 400 a 500 kg/ha de N bajaron el pH de 5,4 a 4,2 en 5 años en Andepts de Colombia (Villamizar y Lotero, 1967). Las aplicaciones fuertes de nitrógeno también bajan el pH y la saturación de bases en el subsuelo; en la Fig. 6.9 se presenta un ejemplo basado en el trabajo de Abruña et al, (1958). En Puerto Rico se recomienda una tonelada de cal por hectárea para contrarrestar la acidez producida por la dosis recomendada de 1 ton/ha de fertilizante 15-5-10 que contiene sulfato de amonio a razón de 370 kg/ha de N. Según Vicente-Chandler et al (1974) la cal puede ser tan efectiva cuando se aplica al voleo sobre la superficie del suelo, como cuando se incorpora a 15 cm de profundidad. El efecto residual de tales aplicaciones de cal se presenta en la Fig. 7.14. En sistemas de pastoreo la necesidad de cal se reduce a la mitad por cuanto la aplicación de fertilizante nitrogenado se reduce al 50%.

AZUFRE Y MICRONUTRIMENTOS

Los pastos intensamente fertilizados extraen grandes cantidades de azufre (50 a 84 kg/ha de S en el ejemplo del Cuadro 13.16). Cuando se usa sulfato de amonio o superfosfato sencillo, generalmente se satisface esta necesidad. Sin embargo, con otras fuentes de fertilizantes las deficiencias de azufre son comunes y para su corrección se requieren aplicaciones anuales de yeso (McClung y Quinn, 1959; Fig. 8.10).

En pasturas bien manejadas y fertilizadas intensivamente por lo general no se encuentran deficiencias de micronutrientos. Una de las razones puede ser la presencia de impurezas en las aplicaciones abundantes de fertilizantes y cal. Vicente-Chandler et al (1974), han informado de niveles adecuados de zinc, hierro, manganeso y cobre en pastos fertilizados intensivamente. Si surgen deficiencias de micronutrientos, probablemente resulte económico, tomando en cuenta el alto nivel de la inversión, suministrar los elementos faltantes. Estos problemas se pueden detectar mejor por medio de pruebas de suelos y análisis de plantas.

CALIDAD NUTRITIVA DE PASTURAS CON FERTILIZACION INTENSIVA

Los valores nutritivos de las gramíneas forrajeras tropicales se consideran más bajos que las de la zona templada. Minson y McLeod (1970) compilaron datos de un gran número de estudios de digestibilidad de materia seca *in vivo* y obtuvieron valores medios de 52% en los pastos tropicales y 70% en los de la región templada. Como principales razones para esta diferencia se citan las altas temperaturas y las altas tasas de evaporación, y la cosecha en etapas de mayor madurez. El problema puede intensificarse por una disminución voluntaria de los animales en su consumo. El Cuadro 13.10 muestra como el mayor tiempo transcurrido después del corte afecta severamente la calidad nutritiva. En los pastos sin fertilización el descenso en digestibilidad es marcado después de 13 semanas de crecimiento. Las aplicaciones anuales de nitrógeno de 200 kg/ha no afectaron notoriamente la digestibilidad de la materia seca de varios pastos de Brasil (Gomide et al, 1969).

La fertilización nitrogenada intensiva da por resultado un valor nutritivo mejorado, principalmente con respecto al contenido de proteína cruda. El rendimiento de proteína por unidad de superficie de gramíneas fertilizadas intensivamente con nitrógeno a menudo sobrepasa el que se obtiene en combinaciones de gramíneas y leguminosas. En Puerto Rico, con las dosis recomendadas de fertilizantes, la producción anual de proteína osciló entre 1,9 y 2,6 ton/ha, ya fuera forraje cortado o pasturas consumidas en pastoreo. Vicente-Chandler et al (1974), observaron que una mezcla de kudzú y pasto elefante que recibía una fertilización idéntica, excepto que no incluía nitrógeno, producía solamente 1,1 ton/ha por año de proteína, o alrededor de la mitad de la cantidad producida por gramíneas fertilizadas intensivamente (Fig. 13.14). La producción anual de materia seca era de solamente 13 ton/ha con la mezcla de gramínea y leguminosa, o sea, menos de la mitad de la obtenida con la gramínea sola, como indica el Cuadro 13.15.

Estudios llevados a cabo en varios países indican que aplicaciones de nitrógeno mayores de las necesarias para producir un contenido de proteína del 6% no aumentan ni disminuyen la digestibilidad o el consumo voluntario (Chicco et al, 1971; Ford y Williams, 1973; Minson, 1973). También hay poca diferencia entre especies adaptadas a fertilización abundante. El principal factor que afecta la digestibilidad es el intervalo entre los cortes o los pastoreos. La Fig. 13.15 muestra que la digestibilidad *in vitro* disminuyó con una tasa aproximada de 0,5% por día de 1 a 9 semanas de crecimiento. Con los intervalos recomendados de 6 a 8 semanas la digestibilidad *in vitro* osciló entre el 62 y el 75%, que está dentro del ámbito normal de

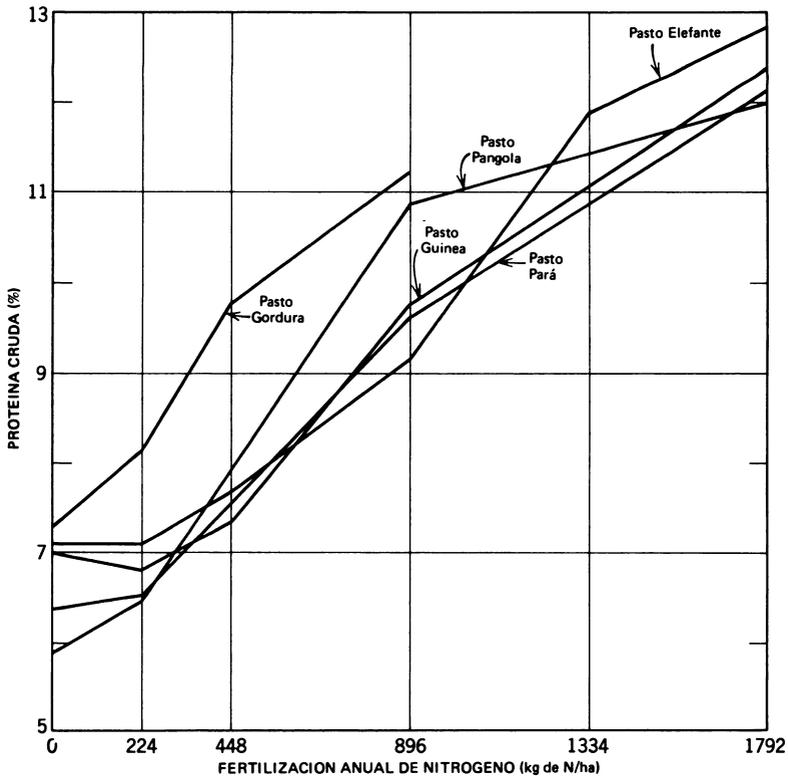


Fig. 13.14. Efecto de fertilización nitrogenada intensiva en los contenidos de proteína de varios pastos tropicales cortados cada 60 días. (Fuente: Vicente-Chandler et al, 1974).

gramíneas de la región templada determinada por Minson y McLeod (1970).

Los contenidos de fósforo y calcio en pastos bien fertilizados oscilan entre el 0,18 y 0,22% de P y de 0,28 y 0,78% de Ca en forrajes cortados a intervalos de 60 días (Vicente-Chandler, 1975). Estos niveles son suficientes para satisfacer las necesidades del ganado con altas tasas de carga que se acostumbran. Las cifras de producción de carne se obtuvieron con alimentación con pasto exclusivamente; no fueron necesarios concentrados ni suplementos minerales. La producción de leche con raciones de sólo pasto tuvieron un promedio mayor de 10 litros por día, con un contenido de grasa del 3,8%, para un total de 3000 litros por lactancia, un intervalo en la producción de terneros de 13,5 meses durante 5 años (Vicente-Chandler, 1975).

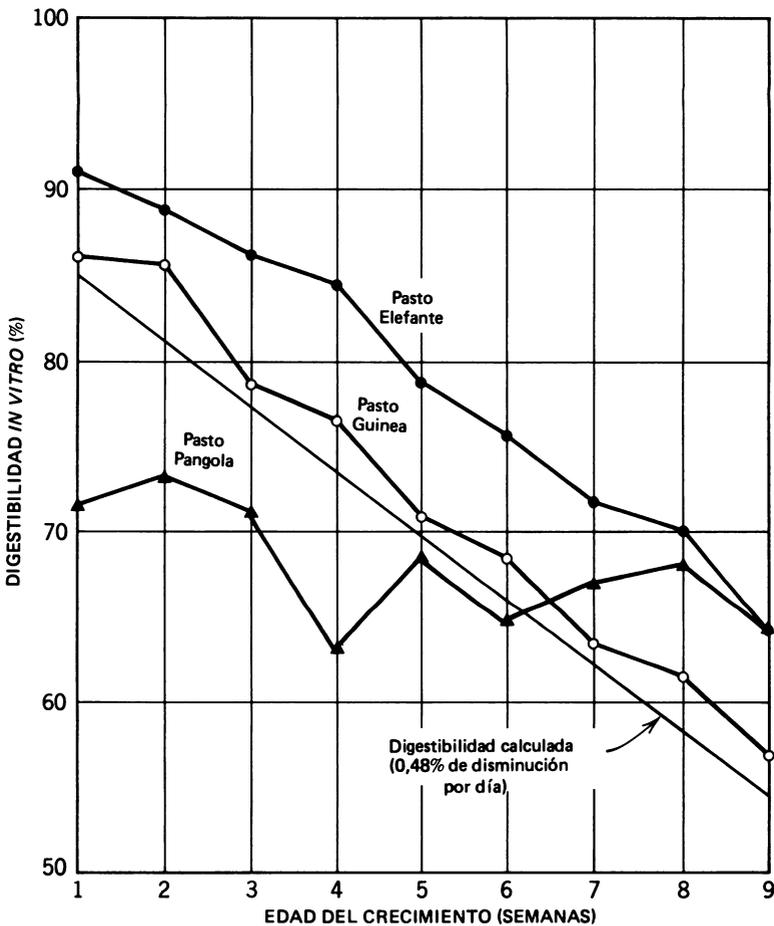


Fig. 13.15. Digestibilidad de pastos fertilizados intensivamente en Puerto Rico como función del intervalo de corta. (Fuente: Vicente-Chandler et al, 1974).

EFFECTOS DE LA PRODUCCION DE PASTOS FERTILIZADOS INTENSIVAMENTE EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Sería de esperar que las altas presiones de pastoreo que se usan en las pasturas fertilizadas intensivamente causen una severa compactación del suelo. Estudios en Puerto Rico han demostrado que este efecto depende de las propiedades del suelo. Vicente-Chandler y Silva (1970) observaron poca compactación en un Ultisol arcilloso, aún entre las macollas de guinea con una tasa de pastoreo de 6 animales por hectárea durante 4 años. No hubo respuestas a la labranza y sus

cambios en porosidad y densidad relativa. El grupo portorriqueño ha observado una excelente permeabilidad en los Oxisoles y Ultisoles, pero en los Vertisoles con manejo intensivo hubo una severa compactación del suelo (Vicente-Chandler et al, 1974). Problemas similares pueden esperarse en Ultisoles de textura arenosa y en otros suelos susceptibles a la compactación.

La fertilización intensiva ha mejorado las propiedades químicas del suelo. En el ejemplo presentado en el Cuadro 13.17 la materia orgánica y el nitrógeno total del suelo aumentaron significativamente después de 5 años. Esto sugiere que una considerable proporción del nitrógeno aplicado que no fue recuperado por el cultivo puede convertirse en nitrógeno del suelo. La fertilización abundante y el enclamiento mejoraron el nivel de bases de los 45 cm superiores de estos Ultisoles tal como indica el Cuadro 13.18.

CUADRO No. 13.17. Recuperación de fertilizante nitrogenado por pasto guinea y efectos de 5 años de fertilización abundante con nitrógeno en la capa arable de un Ultisol de Puerto Rico. (Fuente: adaptado de Vicente-Chandler, 1964).

Cantidad anual de N (kg/ha)	Recuperación del fertilizante (%)	Materia orgánica del suelo (%)	N orgánico del suelo (%)
0	—	3,0	0,17
800	46	3,4	0,21

CUADRO No. 13.18. Efecto de cuatro años de fertilización abundante (900-80-670 kg/ha de NPK) y enclamiento (10 ton/ha) en las propiedades del perfil de un Ultisol de Puerto Rico (el mismo del Cuadro 13.17). (Fuente: adaptado de Vicente-Chandler, 1974).

Profundidad del suelo (cm)	Sin enclamar			Enclado (10 ton/ha por año)		
	pH	Ca + Mg intercambiables (meq/100 g)	Saturación de Al (%)	pH	Ca + Mg intercambiables (meq/100 g)	Saturación de Al (%)
0-8	3,9	1,9	77	5,4	11,2	4
8-15	4,2	1,6	78	4,6	5,0	31
15-30	4,4	2,7	65	4,6	4,2	38
30-45	4,6	3,0	62	4,8	5,0	39

Quizás el efecto más dramático es el aspecto de conservación del suelo de estos sistemas. Las pérdidas anuales por erosión de suelo en

estos Ultisoles y Oxisoles escarpados se redujeron de 27 ton/ha con cultivos a 1,5 ton/ha en pasturas fertilizadas abundantemente (Vicente-Chandler et al, 1974). En sistemas menos intensivos de pasturas la erosión del suelo sería un peligro muy importante, pero con la excelente cobertura del pasto durante todo el año la erosión prácticamente se elimina.

ALTERNATIVAS PARA PRODUCIR PASTOS DURANTE LA ESTACION SECA

Casi no hay duda de que uno de los factores que más seriamente afectan la producción de carne en áreas ústicas es la escasez de alimento durante la estación seca. Este problema podría solucionarse mediante el almacenamiento del exceso de pasto producido durante la estación lluviosa, como heno o ensilaje, alimentos con suplementación energética y proteica, o por medio del traslado de los animales a áreas que no tienen limitaciones de humedad. Corrientemente en los trópicos no se produce mucho heno de las pasturas de gramíneas o gramínea y leguminosa fertilizadas intensivamente por los problemas de curar el heno en el campo durante la estación lluviosa y la baja calidad nutritiva cuando estas gramíneas se cosechan en etapas avanzadas de crecimiento (McDowell, 1972, Blue y Tergas, 1969). Además es difícil que especies de tallos gruesos se deshidraten con la rapidez suficiente para evitar daños de moho y hongos.

Cultivos puros de leguminosas tales como *Stylosanthes humilis* se han cosechado como heno y se han almacenado satisfactoriamente durante la estación seca en el norte de Australia (Wright, 1971). Esta especie no pierde su calidad nutritiva y puede cosecharse al principio de la estación seca tan pronto como la semilla madura. Otra alternativa es el ensilaje de maíz o sorgo fertilizados intensivamente. McDowell (1972) considera que la preparación de ensilaje tiene limitaciones en los trópicos debido a la razón desfavorable de los carbohidratos solubles con la proteína que tienen los forrajes tropicales, especialmente con niveles altos de fertilización nitrogenada la que causa una clase de fermentación desfavorable. Sin embargo, el almacenamiento de sorgo forrajero fuertemente fertilizado, cultivado durante la estación lluviosa en silos de trincheras de bajo costo, está siendo adoptado como una solución viable por propietarios de pequeñas industrias lecheras en el norte de El Salvador (North Carolina State University, 1972).

Se han hecho intentos por mejorar la calidad nutritiva de las gramíneas durante la estación seca mediante una aplicación tardía de nitrógeno al final de la estación lluviosa. Una aplicación de 75 y 150 kg/ha de N a *Hyparrhenia rufa* un mes antes de la estación seca mantuvo la producción de materia seca y proteína, y el contenido de fósforo a niveles adecuados por 1 ó 2 meses de la estación seca en

Guanacaste, Costa Rica (Tergas y Blue, 1971; Tergas et al, 1971). El decrecimiento del pasto en la siguiente estación lluviosa fue estimulado por estas aplicaciones, sugiriendo un fuerte efecto residual. Resultados positivos similares han sido observados en Brasil (Werner, 1970), pero los resultados negativos obtenidos en Venezuela (Chacón et al, 1971) dan a entender que el éxito de esta práctica puede depender de condiciones locales. Si durante la estación seca se cultivan pastos fuertemente fertilizados, puede haber un efecto positivo residual similar.

Otra posibilidad desde el punto de vista del manejo de suelo es la combinación del sistema extensivo basado en leguminosas en grandes áreas y fertilización intensiva en áreas pequeñas. El sistema intensivo podría establecerse en suelos más fértiles que mejor pueden retener humedad durante la estación seca. El exceso de producción durante la estación lluviosa se podría usar para heno si las condiciones lo permiten. En el Cerrado de Brasil, donde las consideraciones económicas sugieren el uso de sistemas extensivos basados en leguminosas, alrededor del 5% al 10% del área podría irrigarse durante todo el año por sistemas de gravedad relativamente poco costosos (North Carolina State University, 1974). Las áreas fertilizadas intensivamente podrían mantener una capacidad de carga persistente hasta 5 a 10 veces más alta que la de áreas extensivas, a juzgar por los datos revisados en este capítulo. Dedicando estas pequeñas áreas irrigadas a gramíneas fertilizadas intensivamente, se podrían eliminar las pérdidas anuales de peso, sin tener que recurrir al uso de concentrados caros.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. La producción animal es un componente de gran importancia de la agricultura tropical. Se considera que el principal factor que impide una producción alta de carne y de leche en los trópicos es el bajo consumo de energía y proteína de los animales en pastoreo. La producción de las pasturas está fuertemente afectada por limitaciones en humedad y fertilidad del suelo. Las pasturas tropicales se producen bajo tres distintos sistemas de manejo de suelo: pastoreo en praderas naturales, pasturas mejoradas de gramíneas y leguminosas y gramíneas fertilizadas intensivamente para cortar forraje o para pastoreo.
2. Más del 90% del área de pasturas en los trópicos usadas para producción animal consisten en pasturas naturales. El ganado gana peso durante la estación lluviosa pero sufre severas pérdidas durante la estación seca. El patrón en zigzag de los aumentos de peso retarda el mercadeo a una edad promedio de 4 a 10 años, disminuye la tasa de fertilidad de los animales y da por

resultado aumentos anuales de peso vivo del orden de 20 a 50 kg/ha con tasas de carga de solamente 0,05 a 0,3 animales/ha.

3. La quema periódica es esencial para mantener la productividad de las pasturas naturales aún a esos niveles tan bajos. La quema anual es necesaria en áreas con una estación lluviosa muy fuerte para eliminar los pastos sin valor nutritivo y no palatables y estimular nuevas brotaciones. En áreas en que la estación lluviosa tiene menos lluvias la quema cada 2 ó 3 años es más efectiva. La fertilización de pasturas naturales pocas veces es provechosa por cuanto las gramíneas nativas no responden eficientemente a las aplicaciones de nutrimentos. La mejor alternativa que se conoce dentro de la tecnología actual es sobresembrar leguminosas con fertilización moderada.
4. Especies mejoradas de gramíneas y leguminosas pueden sembrarse en tierras de pasturas naturales, bosques recién desmontados y/o tierras de cultivos que es deseable transformar a pasturas. Algunas especies de gramíneas y de leguminosas están bien adaptadas a falta de humedad así como a altos niveles de aluminio y manganeso intercambiables, y a bajos contenidos de fósforo, potasio, calcio y magnesio. Muchas de las especies de leguminosas tropicales tolerantes a estas limitaciones de fertilidad del suelo entran en simbiosis con razas de *Rhizobium* del "tipo caupí" de crecimiento lento, que también están adaptadas a estas limitaciones químicas, y de esta manera se logra buena nodulación. En contraste, otras especies de leguminosas y ciertas razas específicas de *Rhizobium* son muy sensitivas a estos factores limitantes. La inoculación con ciertas especies tolerantes a la acidez puede ser necesaria y el aperdigonamiento con roca fosfatada, pero no con cal, a menudo es beneficiosa.
5. En sistemas de gramíneas y leguminosas mixtas se espera que la gramínea supla la mayor parte de las necesidades de energía, mientras que la leguminosa suple una parte muy importante de la proteína y produce nitrógeno que al circular a través del animal fertiliza la gramínea. El nivel de fijación anual de nitrógeno por las leguminosas tropicales es comparable a la cantidad fijada por leguminosas de la región templada, y a veces la supera. La contribución anual de nitrógeno por las leguminosas a la pastura está directamente correlacionada con el contenido de materia seca de la parte aérea de las leguminosas, cuando se usan especies adaptadas y reciben un buen manejo. Muchas leguminosas tropicales son muy sensitivas a la defoliación y requieren intervalos de pastoreo más largos para fijar cantidades de nitrógeno. La fertilización nitrogenada reduce la fijación de nitróge-

no por las leguminosas, así como su proporción relativa en pasto. Las necesidades de otros nutrimentos distintos al nitrógeno en las pasturas con gramíneas y leguminosas son moderadas debido a la eficiente repetición del ciclo de nutrimentos por medio de los animales, excepto en suelos con alta capacidad de fijación de fósforo. Pasturas mejoradas de gramíneas y leguminosas con una fertilización modesta producen alrededor de 100 a 300 kg/ha de incremento anual de peso vivo con tasas de carga de 0,5 a 1 animal/ha.

6. Pasturas de gramíneas con fertilización intensiva se cultivan donde la razón costo:precio justifica inversiones relativamente altas por unidad de terreno. No se usan leguminosas porque las gramíneas requieren dosis de nitrógeno de 400 a 900 kg/ha de N por año, que están más allá de la contribución potencial de las leguminosas. Solamente se usan especies que tienen una alta capacidad de respuesta al nitrógeno y que son capaces de utilizarlo eficientemente. Las necesidades de fertilización para corte de forrajes son de 400-50-200 kg NPK/ha por año, más una tonelada de cal/ha para contrarrestar la acidez residual de los fertilizantes nitrogenados. Con pastoreo esas dosis se reducen a la mitad debido a la recirculación de nutrimentos a través de los animales. La producción de proteína de pastos fertilizados intensivamente y su digestibilidad son altas en tanto que se corten a intervalos apropiados. Pasturas de gramíneas manejadas intensivamente producen incrementos anuales de peso vivo de 500 a más de 1000 kg/ha con tasas de carga del orden de 5 a 10 animales/ha.
7. El problema básico de suministro de alimentación durante la estación seca en áreas ústicas puede resolverse almacenando el exceso de producción durante la estación lluviosa como heno o ensilaje, aunque ambos sistemas involucran problemas de manejo. Una alternativa en regiones en que existe una pequeña parte de cantidad de tierra que puede irrigarse, es el cultivo de gramíneas con fertilización intensiva para suplementar las pasturas mixtas cultivadas en la mayor parte del área.
8. La escogencia entre los tres sistemas de manejo o sus combinaciones, es por lo tanto materia de determinar cuál es más ventajoso en comparación con los otros, de acuerdo con la relación de costo y precio reinantes en la localidad.

REFERENCIAS

- ABRUÑA, F., PEARSON, R. W., y ELKINS, C. Qualitative evaluation of soil reaction and base status changes from field applications of residually acid forming nitrogen fertilizers. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 22:539-542. 1958.
- ALLEN, S. E., y MAYS, D. A. Coated and other slow-release fertilizers for forages. In D. A. Mays (ed.). *Forage fertilization*. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1974. pp. 559-582.
- ANDREW, C. S., y HEGARTY, M. P. Comparative responses to manganese excess of eight tropical and four temperate pasture species. *Aust. J. Agr. Res.* 20:687-696. 1969.
- _____, y ROBINS, M. F. The effect of potassium on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. *Aust. J. Agr. Res.* 20:999-1021. 1969.
- _____, y PIETERS, W. H. J. Effect of potassium on the growth and chemical composition of some pasture legumes. 3. Deficiency symptoms of 10 tropical pasture legumes. CSIRO Tech. Paper Div. *Trop. Pastures* 5:2-11. 1970.
- _____, y ROBINS, M. F. Effects of phosphorus on the growth, chemical composition and critical phosphorus percentages of some tropical pasture grasses. *Aust. J. Agr. Res.* 22:693-706. 1971.
- _____, JOHNSON, A. D., y SANDLAND, R. L. Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. *Aust. J. Agr. Res.* 24:325-339. 1973.
- _____, y VANDEN BERG, P. J. The influence of aluminum on phosphate sorption by whole plants and exised roots of some pasture legumes. *Aust. J. Agr. Res.* 24:341-351. 1973.
- BASTIDAS, A., BERNAL, J., LOTERO, J. et al. Frecuencia de corte y aplicación de nitrógeno a cuatro gramíneas en climas calientes. *Agr. Tropical (Colombia)* 23:747-756. 1967.
- BEESON, K. C., GOYTENDIA, A., y GOMEZ, G. G. Selection of soils for pastures using common chemical measures. *Agron. J.* 64:58-59. 1972.
- BERNAL, J. Las leguminosas como fuentes de nitrógeno en pastos y rotaciones. *Suelos Ecuatoriales* 4:175-194. 1972.
- BLUE, W. G., ANDRADE, L., REY, E., RAMIREZ, M. T., et al. Investigations on the potential for pasture development in the Atlantic zone of Costa Rica. *Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla.* 23:208-221. 1963.
- _____, y TERGAS, L. E. Dry season deterioration of forage quality in the wet-dry tropics. *Proc. Soil Crop. Sci. Fla.* 29:224-238. 1969.
- BOUGHEY, A. S., MUNRO, P. E., MIEKLEJOHN, J., STRANG, R. M., y SWIFT, M. J. Antibiotic reactions between African savanna species. *Nature* 203:1302-1303.
- BOWEN, J. E. Manganese-silicon interaction and its effect on growth of sudan grass. *Plant and Soil* 37:577-588. 1972.
- BROLMANN, J. B., y SONODA, R. M. Differential response of three *Stylosanthes guyanensis* varieties to three levels of potassium. *Trop. Agr. (Trinidad)* 52:139-142. 1975.
- BRUCE, R. C. Effect of *Centrosema pubescens* on soil fertility in the humid tropics. *Queensl. J. Agr. Anim. Sci.* 22:221-226. 1965.
- _____. The effect of topdressed superphosphate on the yield and botanical composition on a *Stylosanthes guyanensis* pasture. *Trop. Grassl.* 6:135-140. 1972.

- BRUCE, R. C., y BRUCE, I. J. Correlation of soil phosphorus analysis with response of tropical pastures to superphosphate on some North Queensland soils. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 12:188-194. 1972.
- BRYAN, W. Botanical changes following application of fertilizer and seed on run-down paspalum, kikuyo and matgrass pastures on scrub soil at Mateny. Southeast Queensland. *Trop. Grassl.* 1:167-170. 1967.
- BRYAN, W. W. Tropical and subtropical forests and heaths. In R. M. Moore (ed.). *Australian Grasslands*. Australian National University Press, Canberra, 1970. pp. 101-111.
- _____, y ANDREW, C. S. Value of Nauru rock phosphate as a source of phosphorus for some tropical pasture legumes. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 11:532-535. 1971.
- _____, y EVANS, T. R. Effects of soils, fertilizers and stocking rates on pastures and beef production on the Wallum of southeast Queensland. 1. Botanical composition and chemical effects on plants and soils. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 13:516-529. 1973.
- CARÓ, R., VICENTE-CHANDLER, J., y FIGARELLA, J. The yield and composition of five grasses growing in the humid mountains of Puerto Rico as affected by nitrogen fertilization, season and harvest procedure. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 44:107-120. 1960.
- _____, y _____. Effect of fertilization on carrying capacity and beef produced by Napier grass. *Agron. J.* 53:204-205. 1961.
- _____, y _____. Effect of liming and fertilization on productivity and species balance of tropical kudzu-molasses grass pasture under grazing management. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 47:236-241. 1963.
- _____, _____, y FIGARELLA, J. Productivity of intensively managed pastures on five grasses on steep slopes in the humid mountains of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 49:99-111. 1965.
- _____, ABRUÑA, F., y VICENTE-CHANDLER, J. Comparison of heavily fertilized pangola and stargrass pastures in terms of beef production and carrying capacity in the humid mountain region of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:104-109. 1972a.
- _____, _____, y FIGARELLA, J. Effect of nitrogen rates harvesting interval and cutting heights on yield and composition of stargrass in Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:267-279. 1972b.
- _____, VICENTE-CHANDLER, J., y ABRUÑA, F. Effect of four levels of fertilization on beef production and carrying capacity of pangola grass pastures in the humid mountain region of Puerto Rico. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:219-222. 1972c.
- _____, _____. Effect of heavy rates of fertilization on beef production and carrying capacity of Napier grass pastures over five consecutive years of grazing under humid tropical conditions. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:223-227. 1972.
- _____, ABRUÑA, F., y VICENTE-CHANDLER, J. Comparison of heavily fertilized pangola grass and stargrass pastures under humid tropical conditions. *Agron. J.* 65:132-133. 1973.
- _____, y VICENTE-CHANDLER, J. Milk production of young Holstein cows fed only grass from steep, intensively managed tropical grass pasture over three successive lactations. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 58:18-26. 1974.
- CASSADY, J. T. The effect of rainfall, soil moisture and harvesting intensity on grass production in two rangeland sites in Kenya. *East. Afr. Agr. For. J.* 39:26-36. 1973.

- CASSIDY, G. J. Response of a mat-grass-paspalum sward to fertilizer applications. *Trop. Grassl.* 5:11-22. 1971.
- CHACON, E., RODRIGUEZ, S., y CHICCO, C. F. Efecto de la fertilización tardía con nitrógeno sobre el valor nutritivo del pasto pangola. *Agron. Tropical (Venezuela)* 21:503-509. 1971.
- CHAVERRA, H., ECHEVERRI, S., y CROWDER, L. V. Aplicación de nitrógeno a mezcla de gramíneas y leguminosas. *Agr. Tropical (Colombia)* 23:226-232. 1967.
- CHHEDA, H. R., y AKINOLA, J. O. Effects of cutting frequency and level of applied nitrogen on crude protein production and nitrogen recovery by three *Cynodon* strains. *West. Afr. J. Biol. Appl. Chem.* 14:31-38. 1971.
- _____, SALEEM, M., y MOHAMED, M. A. Effects of nitrogen and potassium fertilizers on *Cynodon* IB.8 and on soil potassium in southern Nigeria. *Exptal. Agr.* 7:249-255. 1973.
- CHESNEY, H. A. D. Fertilizer studies with pangola-grass on Tiwiid fine sand, Guyana. *Agr. Res. Guyana* 3:136-138. 1969.
- _____. Yield response to pangola-grass grown on Tiwiid fine sand to magnesium and fitted micronutrients. *Agron. J.* 64:152-154. 1972.
- CHICCO, C. F., RODRIGUEZ, S., y FUENMAYOR, C. E. Efecto de la fertilización con nitrógeno sobre el rendimiento, consumo y digestibilidad del heno de pangola. *Agron. Tropical (Venezuela)* 21:215-227. 1971.
- CIAT. Annual Reports. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Palmira, Colombia, 1972, 1973.
- COALDRAKE, J. E. The Brigalow. In R. P. Moore (ed.), *Australian Grasslands*. Australian National University Press, Canberra, 1970. pp. 123-140.
- COLMAN, R. L. Factors affecting the response to nitrogen of temperate and tropical grasses. *J. Aust. Inst. Agr. Sci.* 38:225-226. 1972.
- CORTES, H. Niveles y frecuencia de aplicación de nitrógeno al pasto pangola. *Acta Agron. (Colombia)* 16:101-131. 1966.
- CRACK, B. J. Changes in soil nitrogen following different establishment procedures for Townsville Stylo on a solodic soil in northeastern Queensland. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 12:274-280. 1972.
- CRESPO, G. Efectos de tres niveles de urea y dos sistemas de aplicación en el rendimiento y contenido de nitrógeno de pasto pangola. *Rev. Cubana Cienc. Agr.* 6:235-244. 1972.
- CROWDER, L. V. Pasture and forage research in tropical America. *Cornell Int. Agr. Bull.* 28. 1974.
- _____, y RIVEROS. Resumen de las investigaciones en pastos y forrajes. *Agr. Tropical (Colombia)* 15:35-51. 1962.
- _____, LOTERO, J., y MICHELIN, A. et al. Fertilización de gramíneas tropicales y subtropicales en Colombia. *Div. Inv. Agrop. Bol. Divulg.* 12. 1963.
- CROWDER, L. A., MICHELIN, A., BASTIDAS, A. The response of pangola grass to rate and time of nitrogen application in Colombia. *Trop. Agr. (Trinidad)* 41:21-29. 1964.
- CRUSH, J. R. Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza. 7. Growth and nodulation of some herbage legumes. *New Phytol.* 73:743-749. 1974.
- DAVIES, J. G., y SHAW, N. H. General objectives and concepts. *Commonwealth Bur. Pastures Field Crops. Bull.* 47:1-49. 1964.
- _____, y HUTTON, E. M. Tropical and subtropical pasture species. In R. P. Moore (ed.), *Australian Grasslands*. Australian National University Press, Canberra, 1970. pp. 273-302.

- DAVILA, V. y ECHEVERRI, S. Aplicación de nitrógeno y riego en pasto kikuyo. *Agr. Tropical (Colombia)* 23:744-746. 1967.
- DEINUM, B. y DIRVEN, J. G. P. Climate, nitrogen and grass. 6. Comparison of yield and chemical composition of some temperate and tropical grass species grown at different temperatures. *Netherl. J. Agr. Sci.* 23:69-82. 1975.
- DIRVEN, J. G. P. Yield increase in tropical grasslands by fertilization. *Proc. Ninth Congr. Int. Potash Inst.* 1970. pp. 403-409.
- DOBEREINER, J. y ABRAMOVITCH, S. Efeito da calagem e da temperatura do solo la fixação do nitrogênio de *Centrosema pubescens* em un solo com toxides de manganés. *Proc. Ninth Int. Grassl. Congr. (São Paulo)* 2:1121-1124. 1965.
- _____, DAY, J. M., y DART, P. J. Fixação de nitrogênio na rizofera de *Paspalum notatum* e da cana-de-açucar. *Pesq. Agropec. Bras.* 8:153-157. 1973.
- _____, y DAY, J. M. Associative symbiosis in tropical grasses: caracterização de microorganisms and nitrogen-fixing sites. Instituto de Pesquisa Agropecuaria do Centro Sul. EMBRAPA, Rio de Janeiro, 1974.
- DOWNES, R. W. Establishment of legume in pastures of savanna woodlands in north Queensland. *Queensl. J. Agr. Anim. Sci.* 24:23-29. 1967.
- EDWARDS, D. C. Grass burning. *Emp. J. Exptal. Agr.* 10:219-231. 1942.
- ESCOBAR, L., RAMIREZ, A., y LOTERO, J. Dosis y frecuencias de aplicaciones de nitrógeno en tres gramíneas tropicales. *Agr. Tropical (Colombia)* 23:726-737. 1967.
- _____, RAMIREZ, A., y LOTERO, J. Dosis y frecuencia de aplicación de nitrógeno al pasto bermuda de costa. *Rev. Inst. Colomb. Agropec.* 4:269-276. 1969.
- EVANS, T. R. Beef production from nitrogen fertilized pangola grass on the coastal lowlands of southern Queensland. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 9:282-286. 1969.
- FAO. Production yearbook. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1973.
- FALADE, J. Effect of phosphorus on the growth and mineral composition of four tropical forage legumes. *J. Sci. Food Agr.* 24:795-802. 1973.
- FALVEY, L. Effect of mowing frequency and height of Townsville Stylo pastures on cleared Blain soil. *Trop. Agr. (Trinidad)* 52:143-148. 1975.
- FERNANDES, A. P. M., GOMIDE, J. A., y BRAGA, J. M. Efeito da adubação potássica sobre a produção e valor nutritivo de algumas gramíneas forrageiras tropicais. *Experientiae* 10:185-208. 1970.
- FIGARELLA, J., ABRUÑA, F., y VICENTE-CHANDLER, J. Effect of five nitrogen sources applied at four rates to pangola grass under humid tropical conditions. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 56:410-416. 1972.
- FISHER, M. J. The effects of superphosphate on the growth and development of Townsville Stylo in pure ungrazed swards at Katherine, N.T. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 10:716-724. 1970.
- _____, y CAMPBELL, N. A. The initial and residual responses of phosphorus fertilizers of Townsville Stylo in pure ungrazed swards at Katherine, N. T. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 12:488-494. 1972.
- FORD, C. W., y WILLIAMS, W. T. *In vitro* digestibility and carbohydrate composition of *Digitaria decumbens* and *Setaria anceps* grown at different levels of nitrogenous fertilizers. *Aust. J. Agr. Res.* 24:309-316. 1973.
- FOX, R. L., HASSAN, S. M., y JONES, R. C. Phosphate and sulfate sorption by Latosols. *Int. Symp. Soil Fert. Eval. Proc. (New Delhi)* 1:857-864. 1971.

- FOX, R. L., HASHIMOTO, R. K., THOMPSON, J. R., y PEÑA, R. S. de la. Comparative external phosphorus requirements of plants growing in tropical soils. Tenth Int. Congr. Soil Sci. (Moscow) 4:232-239. 1974.
- FRANCA, G. E. de, y CARVALHO, M. M. de. Ensaio exploratório de fertilização de cinco leguminosas tropicais em um solo de Cerrado. Pesq. Agropec. Bras. 5:147-153. 1970.
- FREITAS, L. M. M. de, McCLUNG, A. C., y LOTT, W. L. Field studies of fertility problems in two Brazilian campos cerrados, 1958-59. IBEC Res. Inst. Bull. 21. 1960.
- GARTNER, J. A. The effects of different rates of fertilizer nitrogen on the growth, nitrogen uptake and botanical composition of tropical grass swards. Proc. 10th int. Grassl. Congr. 1966. pp. 223-227.
- _____. Fertilizer response of green panic on the Atherton Tableland, Queensland. Queensl. J. Agr. Anim. Sci. 24:345-352. 1967.
- _____. Effect of fertilizer nitrogen on a dense sward of kikuyu, paspalum and carpet grass. 1. Botanical composition, growth and nitrogen uptake. Queensl. J. Agr. Anim. Sci. 26:21-33. 1969.
- GATES, C. T. Nodule and plant development in *Stylosanthes humilis*: symbiotic response to phosphorus and sulfur. Aust. J. Bot. 22:45-55. 1974.
- _____, y WILSON, J. R. The interaction of nitrogen and phosphorus on the growth, nutrient status and nodulation of *Stylosanthes humilis*. Plant and Soil 41:325-333. 1974.
- GIBSON, T. A., y HUMPHREYS, L. R. The influence of nitrogen nutrition of *Desmodium uncinatum* on seed production. Aust. J. Agr. Res. 24:667-676. 1973.
- GOMEZ, G., AGUILAR, T., y BEESON, K. C. Interrelaciones suelo-planta-nutrición. 2. Calidad nutritiva de los forrajes del valle del Huallaga Central. Anal. Cient. (Perú) 4:147-161. 1966.
- GOMIDE, J. A., NOLLER, C. H., MOTT, G. O., CONRAD, J. H., y HILL, D. L. Effect of plant age and nitrogen fertilization on the chemical composition and *in vitro* cellulose digestibility of tropical grasses. Agron. J. 61:116-123. 1969.
- GRAHAM, T. G., y MEYER, B. G. Effect of method of establishment of Townsville Stylo and the application of superphosphate on the growth of steers. Queensl. J. Agr. Anim. Sci. 29:289-296. 1972.
- GRAHAM, P. H., MORALES, V. M., y CAVALLO, R. Materiales exipientes y pegantes de posible uso en nodulación de leguminosas en Colombia. Turrialba 24:47-50. 1974.
- _____, y HUBBELL, D. H. Interacciones suelo-planta-*Rhizobium* en agricultura tropical. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). Manejo de suelos en America tropical. North Carolina State University, Raleigh, 1975a. pp. 211-235.
- _____, y HUBBELL, D. H. Legume-*Rhizobium* relationships in tropical agriculture. In E. C. Doll y G. O. Mott (eds.). Tropical forages in livestock production systems. ASA Spec. Publ. 24. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1975b. pp. 9-21.
- GRÖF, B., COURTICE, J., y CAMERON, D. G. Effect of renovation and nitrogen fertilization on an old stand of buffelgrass in subcoastal Central Queensland. Queensl. J. Agr. Anim. Sci. 26:359-364. 1970.
- _____, y HARDING, W., A. T. Dry matter yields and animal production of guinea grass on the humid tropical coast of north Queensland. Trop. Grassl. 4:85-95. 1970.

- GUERRERO, R., FASSBENDER, H. W., y BLYDENSTEIN, J. Fertilización del pasto Elefante en Turrialba, Costa Rica. 1 y 2. Turrialba 20:53-63. 1970.
- HAGGAR, R. J. A guide to the management and use of stylo (*Stylosanthes gracilis*). Samaru Agr. Newsletter (Nigeria) 11:63-66. 1969.
- HARDING, W. A. T., y CAMERON, D. G. New pasture legumes for the wet tropics. Queensl. Agr. J. 98:394-406. 1972.
- HARTY, R. L. Effect of superphosphate on the germination of Townsville Lucerne. Queensl. J. Agr. Anim. Sci. 24:235-236. 1967.
- HENDY, K. Response of a pangola grass pasture near Darwin to the wet season application of nitrogen. Trop. Grassl. 6:25-32. 1972.
- HENZELL, E. F. Sources of nitrogen for Queensland pastures. Trop. Grassl. 2:1-17. 1968.
- _____. Use of nitrogenous fertilizers on subtropical pasture in Queensland. J. Aust. Inst. Agr. Sci. 36:206-213. 1970.
- _____. Recovery of nitrogen from four fertilizers applied to Rhodes grass in small plots. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 11:420-430. 1971.
- _____. Loss of nitrogen from a nitrogen fertilized pasture. J. Aust. Inst. Agr. Sci. 38:309-310. 1972.
- _____, y NORRIS, D. O. The use of nitrogen fertilizers on pastures in the subtropics and tropics. Commonwealth Agr. Bur. Bull. 46:161-172. 1962.
- HERRERA, G., LOTERO, J., y CROWDER, L. V. Influencia del nitrógeno y frecuencia de aplicación en la producción de forraje y proteína del pasto pangola. Agr. Tropical (Colombia) 23:297-312. 1967.
- _____, RAMIREZ, A., y LOTERO, J. Dosis de nitrógeno y frecuencia de aplicación en sorgo forrajero. Agr. Tropical (Colombia) 24:675-680. 1968.
- HILL, G. D. Studies on the growth of *Leucaena leucocephala*. 1. Effect of clean weeding and nitrogen fertilizer on early establishment. 2. Effect of lime at sowing production from a low calcium status soils of the Sogeri Plateau. Papua New Guinea Agr. J. 22:29-30, 69-71. 1970.
- HUTTON, E. M. Tropical pastures. Adv. Agron. 22:1-73. 1970.
- JARAMILLO, R., CHAVERRA, H., y OÑORO, C. P. Frecuencia de aplicación y dosis de nitrógeno para *Festuca alta* y *F. media*. Rev. Inst. Colomb. Agropec. 3:179-193. 1968.
- JONES, M. B., y FREITAS, L. M. M. de. Respostas de quatro leguminosas a fósforo, potássio e calcário num Latossolo Vermelho-Amarelo de Campo Cerrado. Pesq. Agrop. Bras. 5:91-99. 1970.
- _____, QUAGLIATO, J. L., y FREITAS, L. M. M. de. Respostas de alfalfa e algumas leguminosas tropicais a aplicações de nutrientes minerais, em tres solos de Campo Cerrado. Pesq. Agrop. Bras. 5:209-214. 1970.
- _____, y QUAGLIATO, J. L. Response of four tropical legumes and alfalfa to varying levels of sulphur. Sulphur Inst. J. 9:6-9. 1973.
- JONES, R. J. The place of legumes in tropical pastures. ASPAC Tech. Bull. 9. Taipei, Taiwan, 1972. 69 p.
- _____, DAVIES, J. G., y WAITE, R. B. The contribution of some tropical legumes to pasture yields of dry matter and nitrogen at Samford, southeastern Queensland. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 7:57-65. 1967.
- JONES, R. K. Initial and residual effects of superphosphate on a Townsville Lucerne pasture in northeastern Queensland. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 8:521-527. 1968.
- _____. Deep sandy soils in Cape York Peninsula, North Queensland. 2. Plant nutrient status. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 13:89-97. 1973.

- JONES, R. K. Phosphorus responses of a wide range of accessions from the genus *Stylosanthes*. Aust. J. Agr. Res. 26:847-862. 1974.
- _____, ROBINSON, P. J., HAYDOCK, K. P., et al. Sulphur-nitrogen relationships in the tropical legume *Stylosanthes humilis*. Aust. J. Agr. Res. 22:885-894. 1971.
- JONES, R. M. Sulfur deficiency of dryland lucerne in the eastern Darling Downs of Queensland. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 10:749-754. 1970.
- KALMA, J. D. The annual course of air temperature and near surface soil temperature in a tropical savannah environment. Agr. Met. 8:292-303. 1971.
- KAMP RATH, E. J. Phosphorus. In P. A. Sánchez (ed.). A review of soils research in tropical Latin America. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 138-161.
- KERRIDGE, P. C., ANDREW, C. S., y MURTHA, G. G. Plant nutrient status of soils of the Atherton Tableland, north Queensland. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 12:618-627. 1972.
- KEYA, N. C. O. The effect of N P fertilizers on the productivity of *Hyparrhenia* grassland. East Afr. Agr. For. J. 39:195-200. 1973.
- _____. Grass-legume pastures in western Kenya. I. A comparison of the productivity of cut and grazed swards. 2. Legume performance at Kitale, Kisii and Kakamega. East Afr. Agr. For. J. 39:240-258. 1975.
- _____, OLSEN, P. J., y HOLLIDAY, R. The role of superphosphate in the establishment of oversown tropical legumes in natural grasslands of western Kenya. Trop. Grassl. 5:109-116. 1971a.
- _____, _____, y _____. Oversowing improved pasture legumes in natural grasslands of the medium altitudes of western Kenya. East. Afr. Agr. For. J. 37:148-155. 1971b.
- _____, _____, y _____. Comparison of seedbeds for oversowing a *Chloris gayana* *Desmodium uncinatum* mixture in *Hyparrhenia* grasslands. East Afr. Agr. For. J. 37:286-293. 1972.
- _____, y KALANG, D. W. The seeding and superphosphate rates for the establishment of *Desmodium uncinatum*. Trop. Grassl. 7:319-325. 1973.
- KLEINSCHMIDT, F. H. The influence of nitrogen and water on pastures green panic, lucerne and glycine at Lawes, southeastern Queensland. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 7:441-446. 1967.
- LANDRAU, P., SAMUELS, G., y RODRIGUEZ, P. Influence of fertilizers, minor elements and soil pH on the growth and protein content of tropical kudzu. J. Agr. Univ. Puerto Rico 37:81-95. 1953.
- LEE, M. T., y WILSON, G. L. The calcium and pH components of lime responses in tropical legumes. Aust. J. Agr. Res. 23:257-265. 1972.
- LOPES, E. S., LOVADINI, L. A. C., GARGANTINI, H., MIYASAKA, S., y LEON, J. C. Capacidade fixadora de nitrogênio de *Rhizobium* autóctone associado com soja perenne e siratro, em dois solos do Estado de São Paulo. Bragantia 30:145-154. 1971.
- LOTERO, J., HERRERA, G., y CROWDER, L. V. Respuesta de una pradera natural a la aplicación de fertilizantes. Agr. Tropical (Colombia) 21:229-232. 1965.
- _____, BERNAL, J., y HERRERA, G. Distancia de siembra y aplicación de nitrógeno en pasto elefante. Rev. Inst. Colomb. Agropec. 2:123-133. 1967.
- _____, RAMÍREZ, A., y HERRERA, G. Fuentes, dosis y métodos de aplicación de nitrógeno en pasto elefante. Rev. Inst. Colomb. Agropec. 3:113-121. 1968.

- LOTERO, J., HERRERA, G., y RAMIREZ, A. Distanciamiento y dosis de nitrógeno en pasto *Axonopus scoparius*. Rev. Inst. Colomb. Agropec. 4:147-157. 1969.
- _____, MONSALVE, S., RAMIREZ, A., y VILLAMIZAR, F. Respuestas al encalado de gramíneas y leguminosas forrajeras. Suelos Ecuatoriales 3:210-239. 1971.
- MANNETJE, L't., y SHAW, N. H. Nitrogen fertilizer responses of a *Heteropogon contortus* and a *Paspalum plicatum* pasture in relation to rainfall in central coastal Queensland. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 12:28-35. 1972.
- MATHIEU, P. Activités zootechniques au Burundi de 1952 à 1962. Boll. Inf. INEAC 11:403-438. 1962.
- McCLUNG, A. C., FREITAS, L. M. M., de GALLO, T. R., et al. Preliminary fertility studies on Campo Cerrado soils of Brazil. IBEC Res. Inst. Bull. 13. 1957.
- _____, y QUINN, L. R. Sulfur and phosphorus response of batatais grass (*Paspalum notatum*). IBEC Res. Inst. Bull. 18. 1959.
- McDOWELL, L. R., CONRAD, J. H., THOMAS, J. E., y HARRIS, L. E. Latin American tables of feed composition. University of Florida, Gainesville, 1974.
- _____. Improvement of livestock production in warm climates. Freeman, San Francisco, 1972. 709 p.
- McILROY, R. J. An introduction to tropical grassland husbandry, 2nd ed. Oxford University Press, London, 1972. 160 p.
- MICHELIN, A., LEON, L. A., y RAMIREZ, A. Uso eficiente de fertilizantes en la producción de pastos en suelos ácidos. Suelos Ecuatoriales 6:265-287. 1974.
- MICHELL, T. E., BRYAN, W. W., y EVANS, T. R. Budgetary comparison between pangola grass/legume pasture and nitrogen fertilized pangola grass for beef production in the southern Wallum. Trop. Grassl. 6:177-190. 1972.
- MILLER, S. F., QUINN, L. R., y MOTT, G. O. Análise econômica de experimentos com forrageiras e gado realizados no Estado de São Paulo. Pesq. Agrop. Bras. 5:101-116.
- MINSON, D. J. The nutritive value of tropical pastures. J. Aust. Inst. Agr. Sci. 37:255-263. 1971.
- _____. Effect of fertilizer nitrogen in digestibility and voluntary intake of *Chloris gayana*, *Digitaria decumbens* and *Pennisetum clandestinum*. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 13:153-157. 1973.
- _____, y McLEOD, M. N. The digestibility of temperate and tropical grasses. In Proc. 11th int. Grassl. Congr. (Australia), 1970. pp. 719-722.
- MOODY, P. W. Nutritional problems of northern Australian soils. Northern Territory Anim. Ind. Agr. Branch Tech. Bull. 12. 1974. 11 p.
- MOORE, R. M. (ed.). Australian grasslands. Australian National University Press, Canberra, 1970. 455 p.
- MORALES, V. M., GRAHAM, P. H., y CAVALLO, R. Efecto del método de inoculación y encalado en la nodulación de leguminosas en un suelo de Carimagua, Colombia. Turrialba 23:52-55. 1973.
- MOSSE, B., HAYMAN, D. S., y ARNOLD, D. J. Plant responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza. 5. Phosphate uptake by three plant species from P-deficient soils labelled with P^{32} . New Phytol. 72:809-815. 1973.
- MOTOOKA, P. S., et al. New role for an old jungle. World Farming 10:26-29. 1968.

- MOTOOKA, P. S. et al. Pasture establishment in tropical brushlands by aerial herbicide and seeding treatments on Kauai. Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Progr. Rept. 165-3-18. 1969.
- MOTT, G. O. Nutrient recycling in pastures. In D. A. Mays (ed.). Forage fertilization. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1974. pp. 323-329.
- _____, QUINN, L. R., y BISCHOFF, W. V. A. The retention of nitrogen in a soil plant-animal system in guinea grass (*Panicum maximum*) pastures in Brazil. In Proc. 11th. Int. Grassl. Congr. (Australia), 1970. pp. 414-416.
- NORMAN, M. J. T. Response of native pasture to nitrogen and phosphate fertilizer at Katherine, N. T. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 2:27-34. 1962.
- _____. The short-term effects of time and frequency of burning on native pastures at Katherine, N. T. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 3:26-29. 1963.
- _____. Katherine Research Station, 1956-65: a review of published work. CSIRO Div. Land. Res. Tech. Paper 28. 1966.
- _____, y STEWART, G. A. Investigation on the feeding of beef cattle in the Katherine region. J. Aust. Inst. Agr. Sci. 30:39-46. 1964.
- NORRIS, D. O. The intelligent use of inoculants and lime pelleting for tropical pastures. Trop. Grassl. 1:107-121. 1967.
- _____. Nodulation of pasture legumes. In R. P. Moore (ed.). Australian grasslands. Australian National University Press, Canberra, 1970. pp. 339-348.
- _____. Seed pelleting to improve nodulation of tropical and subtropical legumes. 1, 2, 3. Austr. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 11:194-201, 282-289, 677-683. 1971.
- _____. Seed pelleting to improve nodulation of tropical and subtropical legumes. 4. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 12:152-158. 1972.
- _____. Seed pelleting to improve nodulation of tropical and subtropical legumes. 5, 6. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 13:98-101; 700-704. 1973.
- NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Agronomic-economic research on tropical soils. Annual Report. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1973. 190 p.
- _____. Agronomic-economic research on tropical soils. Annual Report. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 1974. 220 p.
- OAKES. Effect of nitrogen fertilization and plant spacing on yield and composition of napier grass in the dry tropics. Trop. Agr. (Trinidad) 44:77-82. 1967.
- OKORIE, I. I., HILL, D. H., y McILROY, R. J. The productivity and nutritive value of tropical grass-legume pastures rotationally grazed by N'Dama cattle at Ibadan, Nigeria. J. Agr. Sci. 64:235-245. 1965.
- OLSEN, F. J. Effects of fertilization and cutting management on the yield and botanical composition of permanent pastures. East. Afr. Agr. For. J. 39:391-396. 1974.
- _____. Effect of large applications of nitrogen fertilizer on the productivity and protein content of four tropical grasses in Uganda. Trop. Agr. (Trinidad) 49:251-260. 1975.
- _____, y MOE, P. G. The effect of phosphate and lime on the establishment, productivity, nodulation and persistence of *Desmodium intortum*, *Medicago sativa* and *Stylosanthes gracilis*. East. Afr. For. J. 37:29-37. 1971.
- _____, y SANTOS, G. L. Effects of lime and fertilizers on natural pastures in Brazil. Exptal. Agr. 11:173-176. 1975.
- PEARSON, R. W., ABRUÑA, F., y VICENTE-CHANDLER, J. Effect of lime and nitrogen applications on the downwards movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. Soil Sci. 93:77-82. 1962.

- PEREIRA, H. C., y BECKLEY, V. R. S. Grass establishment on eroded soil in a semi-arid African reserve. *Emp. J. Exptal. Agr.* 21:1-14. 1953.
- PEREZ, F. Efecto del intervalo del corte y fertilización con nitrógeno en la productividad de ocho gramíneas. *Rev. Cubana Cienc. Agr.* 4:137-142. 1970.
- PLOWES, D. C. H. The seasonal variation of crude protein in twenty common veld grasses at Matopos, Southern Rhodesia and related observations. *Rhodesia Agr. J.* 54:33-55.
- POULTNEY, R. G. A comparison of direct seeding and undersowing on the establishment of grass and the effect on the effect on the cover crop. *East Afr. Agr. For. J.* 29:26-30. 1963.
- QUINN, L. R., MOTT, G. O., y BISSCHOFF, W. V. A. Fertilization of colonial guinea grass pasture and beef production with Zebu steers. *IBEC Res. Inst. Bull.* 24. 1961.
- _____, MOTT, G. O., BISSCHOFF, W. V. A., y ROCHA, G. L. da. Beef production of six tropical grasses. *IBEC Res. Inst. Bull.* 28. 1962.
- RAMIREZ, A. y LOTERO, J. Efectos de la frecuencia de aplicación de nitrógeno y la dosis en la fertilidad y propiedades químicas del suelo. *Rev. Inst. Colomb. Agropec.* 4:227-254. 1969.
- RAMSAY, J. M., y ROSE-INNES, R. Some quantitative observations on the effect of fire on the Guinea savanna vegetation of northern Ghana over a period of eleven years. *Afri. Soils* 8:41-85. 1963.
- RICKERT, K. G. Establishment of green panic as influenced by type, amount, and placement of vegetative mulch. *Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb.* 13:268-274. 1973.
- RIVERA-BRENES, L., MARCHAN, F. J., y CABRERA, J. I. The utilization of grass, legumes and other forage crops for cattle feeding in Puerto Rico. III. Comparison of fertilized guinea grass, para grass, tropical kudzu and guinea grass-tropical kudzu. *J. Agr. Univ. Puerto Rico* 36:108-114. 1952.
- ROBINSON, P. J., y JONES, R. K. Effect of phosphorus and sulfur fertilization on the growth and distribution of dry matter, nitrogen, phosphorus and sulfur in Townsville Stylo. *Aust. J. Agr. Res.* 23:633-640. 1972.
- ROWLAND, J. W. The need for fertilizers in crop and ley rotations. *Rhodesia Agr. J.* 52:171-179. 1955.
- RUSSEL, D. A., FREE, W. J., y McCUNE, D. L. Potential for fertilizer usage on tropical forages. In D. A. Mays (ed.). *Forage fertilization*. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1974. pp. 39-65.
- RUSSELL, J. S. Plant growth on a low calcium status solodic soil in a subtropical environment. I. Legume species, calcium carbonate, zinc and other minor element interactions. *Aust. J. Agr. Res.* 17:673-686. 1966.
- SAMUELS, G. y LANDRAU, P. The effects of fertilizer applications on the yields and nodulation of tropical kudzu. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 16:154-155. 1952.
- SANCHEZ, P. A. Nitrogen fertilization. In P. A. Sanchez (ed.). *A review of soils research in tropical Latin America*. North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219. 1973. pp. 90-125.
- SANTHIRASEGARAM, K. Manejo de praderas de praderas de leguminosas y gramíneas en un ecosistema de selva lluviosa tropical en Perú. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). *Manejo de suelos en la América tropical*. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 445-466.
- _____, MORALES, V., PINEDO, L., DIEZ, J. et al. Pasture development in the Pucallpa region. Interim Report. Instituto Veterinario de Investigación

- para el Trópico y de Altura. Univ. Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 1972. 134 p.
- SERRAO, E. S., y SIMAO NETO, M. The adaptation of tropical forages in the Amazon region. In E. C. Doll y G. O. Mott (eds.). Tropical forages in livestock production systems. ASA Spec. Publ. 24. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1975. pp. 31-52.
- SHAW, N. H., y MANNETJE, L. Studies of a speargrass pasture in central Queensland, the effect of fertilizers, stocking rate and oversowing with *Stylosanthes humilis* on beef production and botanical composition. Trop. Grassl. 4:43-56. 1970.
- _____, y NORMAN, M. J. T. Tropical and subtropical woodlands and grasslands. In R. M. Moore (ed.). Australian grasslands. Australian National University Press, Canberra, 1970. pp. 112-122.
- SHELTON, H. M., y HUMPHREYS, L. R. Effect of variation in density and phosphate supply on seed production of *Stylosanthes humilis*. J. Agr. Sci. 76:325-328. 1971.
- _____, y HUMPHREYS, L. R. Undersowing rice with *Stylosanthes guayanaensis*. Exptal. Agr. 11:89-112. 1975.
- SILVA, A. de F. O kudzu, a planta de três aplicações. Gaz. Agr. Moçambique 15:367-369. 1963.
- SILVEY, M. W., y CARLISLE, V. W. Influence of Zn, P, and Ca on yield and chemical composition of hairy indigo in eastern Panama. Soil Crop. Sci. Soc. Fla. Proc. 31:26-31. 1971.
- SOUTO, E. M., y DOBEREINER, J. Toxídés de manganés em quatro leguminosas forrageiras. Pesq. Agropec. Bras. 4:129-138. 1969.
- SOUTO, M. S., y FRANCO, A. A. Sintomatología de deficiencia de macronutrientes en *Centrosema pubescens* and *Phaseolus atropurpureus*. Pesq. Agropec. Bras. 7:23-27. 1972.
- SPAIN, J. M. El problema de la acidez en suelos de los Llanos Orientales: posibles soluciones. Suelos Ecuatoriales 3:206-209. 1971.
- _____. El manejo de Oxisoles en el Oriente de Colombia. IV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (Maracay), 1972. (In press).
- _____. The forage potential of allitic soils of the humid lowland tropics of Latin America. In E. C. Doll y G. O. Mott (eds.). Tropical forages in livestock production systems. ASA Spec. Publ. 24. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1975. pp. 1-8.
- _____, FRANCIS, C. A., HOWELER, R. H., y CALVO, F. Diferencias entre especies y variedades de cultivos y pastos tropicales en su tolerancia a la acidez del suelo. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.). Manejo de suelos en la América Tropical. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 313-335.
- STEPHENS, D. Effects of fertilizers on grazed and cut elephant grass leys at Kawanda Research Station, Uganda. East. Afr. Agr. For. J. 32:383-392. 1967.
- STOBBS, T. H. Beef production from Uganda pastures containing *Stylosanthes gracilis* and *Centrosema pubescens*. Proc. 9th Int. Grassl. Congr. (São Paulo) 2:939-942. 1965.
- _____. The value of *Centrosema pubescens* for increasing animal production and improving soil fertility in northern Uganda. East. Afr. Agr. For. J. 35:197-202. 1970.
- STRACHAM, R. T., LAMBERT, F. C., y FINLAY, M. A way to establish Townsville Lucerne. Queensl. Agr. J. 93:110-112. 1967.

- SUTMOLLER, P., ABREU, A. B., VANDERGRIFT, J., y SOMBROEK, W. G. Mineral imbalances in cattle in the Amazon Valley. Royal Trop. Inst. Dept. Agr. Res. Commun. 53. 1966. 85 p.
- TANG, C. N., y LONG, P. W. Study on the nutrition of a tropical pasture legume on lateritic soil. Taiwan Livestock Res. 3:98-105. 1970.
- _____, HENZELL, E. F., MARTIN, A. E., y ROSS, P. J. Isotopic studies on the uptake of nitrogen by pasture plants. 5. N^{15} balance experiments in field microplots. Aust. J. Agr. Res. 24:693-702. 1973.
- TEITZEL, J. K. Responses to phosphorus, copper and potassium on a granite loam on the wet tropical coast of Queensland. Trop. Grassl. 3:43-48. 1969a.
- _____. Pastures for the wet tropical coast. 1. Queensl. Agr. J. 95:304-311. 1969b.
- _____, y BRUCE, R. C. Pasture fertilizers for the wet tropics. Queensl. Agr. J. 98:13-22. 1972a.
- _____, y BRUCE, R. C. Fertility of pasture soils in the wet tropical coast of Queensland. 3. Basaltic soils. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 12:49-54. 1972b.
- _____, y BRUCE, R. C. Fertility of pasture soils in the wet tropical coast of Queensland. 5. Mixed alluvial soils. 6. Soils derived from beach sand. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 13:306-318. 1973.
- TENNESSEE VALLEY AUTHORITY. Nutrition for tropical and subtropical pastures. TVA Bull. Y-66. National Fertilizer Development Center. (Bibliography of abstracts), 1973.
- TERGAS, L. E., y BLUE, W. G. Nitrogen and phosphorus in jaragua grass during the dry season in a tropical savanna as affected by nitrogen fertilization. Agron. J. 63:6-9. 1971.
- _____, BLUE, W. G., y MOORE, J. E. Nutritive value of fertilized jaragua grass in the wet-dry Pacific region of Costa Rica. Trop. Agr. (Trinidad) 48:1-8. 1971.
- TEWARI, G. P. Responses of grasses and legumes to fertilizer treatments in Nigeria. Exptal. Agr. 4:87-91. 1968.
- THAIRU, D. M. The contribution of *Desmodium uncinatum* to the yield of *Setaria sphacelata*. East Afr. Agr. For. J. 37:215-219. 1972.
- TIHARUHONDI, E. R., OLSEN, F. J., y MUSANGI, R. J. Application of nitrogen and irrigation to pasture to enhance cattle production during the dry season in Uganda. East Afr. Agr. For. J. 38:383-393. 1973.
- URIBE, A. y GRISALES, A. Efecto de la fertilización nitrogenada en el pasto pangola. Cenicafé (Colombia) 17:99-107. 1966.
- VALLIS, I., HAYDOCK, K. P., ROSS, P. J., y HENZELL, E. F. Isotopic studies on the uptake of nitrogen by pasture plants. 3. The uptake of small additions of N^{15} labelled fertilizers by rhodes grass and Townsville lucerne. Aust. J. Agr. Res. 18:865-877. 1967.
- _____. Soil nitrogen changes under continuously grazed grass-legume pastures in subtropical coastal Queensland. Aust. J. Exptal. Agr. Anim. Husb. 12:495-501. 1972.
- _____, y JONES, R. J. Net mineralization of nitrogen in leaves and leaf litter of *Desmodium intortum* and *Phaseolus atropurpureus* mixed with soil. Soil Biol. Biochem. 5:391-398. 1973.
- VAN RENSBURG, H. J. Grass burning experiments on the Msima river stock farm, southern highlands, Tanganyika. East. Afr. Agr. J. 17:119-129. 1952.

- VASCONCELOS, C. N., ASSIS, A. G., SOUZA, R. M. de, VILLACA, H. A., et al. Valor nutritivo e productividade de cinco leguminosas tropicais en zona de mata, Estado de Minas Gerais. Rev. Soc. Brasil. Zotec. 3:30-53. 1974.
- VASQUEZ, R. Effect of irrigation and nitrogen levels on the yields of guinea grass (*Panicum maximum*), para grass (*Panicum purpurascens*) and guinea grass kudzu (*Pueraria javanica*) and para grass-kudzu mixtures in the Lajas Valley. J. Agr. Univ. Puerto Rico 49:389-412. 1965.
- _____, HESS, E., y MARTINEZ-LUCIANO, M. J. Response of native white sorghum to irrigation under different nitrogen-fertility levels and seeding rates in Lajas Valley, Puerto Rico. J. Agr. Univ. Puerto Rico 50:92-112. 1966.
- VICENTE-CHANDLER, J. The role of fertilizers in hot and humid tropical pastures. Soil Crop. Sci. Soc. Fla. Proc. 26:328-349. 1966.
- _____. Intensive pasture production. In K. L. Turk y L. V. Crowder. Rural development in tropical Latin America. Cornell University, Ithaca, N.Y., 1967. pp. 272-295.
- _____. Fertilization of humid tropical grasslands. In D. A. Mays (ed.). Forage fertilization. American Society of Agronomy, Madison, Wisc., 1974. pp. 277-300.
- _____. Manejo intensivo de pastos y forrajes en Puerto Rico. In E. Borne-miza y A. Alvarado (eds.). Manejo de suelos en la America Tropical. North Carolina State University, Raleigh, 1975. pp. 418-444.
- _____, y CARO-COSTAS, R. The effect of two heights of cutting and three fertility levels on the yield, protein content and species composition of a tropical kudzu-molasses grass pasture. Agron. J. 45:397-400. 1953.
- _____, y FIGARELLA, J. Growth characteristics of guinea grass on the semiarid south coast of Puerto Rico and the effect of nitrogen. J. Agr. Univ. Puerto Rico 42:151-160. 1958.
- _____, SILVA, S., y FIGARELLA, J. The effect of nitrogen fertilization and frequency of cutting on the yield and composition of three tropical grasses. Agron. J. 51:202-206. 1959a.
- _____, _____, y _____. Effect of nitrogen fertilization and frequency of cutting on the yield and composition of Napier grass in Puerto Rico. J. Agr. Univ. Puerto Rico 43:215-227. 1959b.
- _____, _____, y _____. Effects of nitrogen fertilization and frequency of cutting on the yield and composition of guinea grass in Puerto Rico. J. Agr. Univ. Puerto Rico 43:228-239. 1959c.
- _____, _____, y _____. Effects of nitrogen fertilization and frequency of cutting on the yield and composition of para grass in Puerto Rico. J. Agr. Univ. Puerto Rico 43:240-248. 1959d.
- _____, y PEARSON, R. W. Nitrogen fertilization in hot climate grasses. Soil Conserv. Mag. 25:269-272. 1960.
- _____, y SILVA, S. The effect of nitrogen fertilization and grass species on soil physical conditions in some tropical pastures. J. Agr. Univ. Puerto Rico 44:77-86. 1960.
- _____, FIGARELLA, J., y SILVA, S. Effects of nitrogen fertilization and frequency of cutting on the yield and composition of pangola grass in Puerto Rico. J. Agr. Univ. Puerto Rico 45:37-45. 1961.
- _____, y FIGARELLA, J. Effects of five nitrogen sources on yield and composition of Napier grass. J. Agr. Univ. Puerto Rico 46:102-106. 1962.
- _____, SILVA, S., y FIGARELLA, J. Effect of frequency of application on response of guinea grass to nitrogen fertilization. J. Agr. Univ. Puerto Rico 46:342-349. 1962.

- VICENTE-CHANDLER, J., CARO-COSTAS, R., PEARSON, R. W., ABRUÑA, F., FIGARELLA, J., y SILVA, S. The intensive management of tropical forages in Puerto Rico Univ. Puerto Rico. Bull 187 (published in Spanish in 1967 as Bull. 202). 1964.
- _____, RIVERA, E., BONETA, R., et al. The management and utilization of the forage crops of Puerto Rico. Univ. Puerto Rico Agr. Exp. Sta. Bull. 116. 1973. 90 p.
- _____, ABRUÑA, F., CARO-COSTAS, R., FIGARELLA, J., SILVA, S., y PEARSON, R. W. Intensive grasslands management in the humid tropics of Puerto Rico. Univ. Puerto Rico Agr. Exp. Sta. Bull. 223. 1974.
- VILLACHICA, H., BORNEMISZA, E., y ARCA, M. Effect of lime and phosphate treatments on yield and macronutrient content of pangola grass grown on a soil from Pucallpa, Peru. *Agrochimia* 18:344-353. 1974.
- VILLAMIZAR, F., y LÓTERO, J. Respuesta del pasto pangola a diferentes fuentes y dosis de nitrógeno. *Rev. Inst. Colomb. Agropec.* 2:57-70. 1967.
- WALKER, B. Effect of nitrogen fertilizer on natural pastures in western Tanzania. *Exptal. Agr.* 5:215-222. 1969.
- WENDT, W. B. Response to pasture species in eastern Uganda to phosphorus, sulfur and potassium. *East. Afr. Agr. For. J.* 36:211-219. 1970.
- WERNER, J. C., PEDREIRA, J. V. S., y CARELLI, E. L. Estudos de parcelamento e níveis de adubação nitrogenada em capim pangola. *Bol. Ind. Anim. (Brasil)* 24:147-154. 1967.
- _____, GOMES, F. P., y KALIL, E. A. Fertilização nitrogenada e os seus efeitos na produção de forragem. *Bol. Ind. Anim. (Brasil)* 25:151-159. 1968.
- _____, et al. Comparação de diferentes adubos fosfatados. *Bol. Ind. Anim. (Brasil)* 25:139-149. 1968.
- _____. Estudo de épocas de adubação nitrogenada em capim Colômbia para aumento de produção de forragem nas secas. *Bol. Ind. Anim. (Brasil)* 27-28:361-367. 1970.
- _____, y HAAG, H. P. Nutrição mineral de gramíneas forrageiras. *Bol. Ind. Anim. (Brasil)* 29:191-245. 1972.
- WHITNEY, A. S. Effect of harvesting interval, height of cut and nitrogen fertilization on the performance of *Desmodium intortum* mixtures in Hawaii. In *Proc. 11th Int. Grassl. Congr. (Australia)*, 1970. pp. 632-636.
- _____. Growth of kikuyu grass under clipping, 1, 2. *Agron. J.* 66:281-287, 763-767. 1974.
- _____. Symbiotic and non-symbiotic nitrogen fixation as viewed by an agronomist. In *Proceedings of the Soil And Water Management Workshop*. U.S. Agency for International Development, Washington, 1975. pp. 51-75.
- _____, KANEHIRO, Y., y SHERMAN, G. D. Nitrogen relationships of three tropical forage legumes in pure stands and in grass mixtures. *Agron. J.* 59:47-50. 1967.
- _____, y GREEN, R. E. Pangola grass performance under different levels of nitrogen fertilization in Hawaii. *Agron. J.* 61:577-581. 1969.
- WILLIAMS, C. H., y ANDREW, C. S. Mineral nutrition of pastures. In R. P. Moore (ed.). *Australian grassland*. Australian National University Press, Canberra, 1970. pp. 321-328.
- WILLIAMS, W. A. The role of the legumes in pasture and soil improvement in the neotropics. *Trop. Agr. (Trinidad)* 44:103-115. 1967.
- WINKS, L. Townsville stylo research at Swan's Lagoon. *Trop. Grassl.* 7:201-208. 1973.

- WILSON, J. R. Influence of temperature and nitrogen on growth, photosynthesis and accumulation of non-structural carbohydrates in a tropical grass, *Panicum maximum* var. *tricholegume*. Netherl. J. Agr. Sci. 23:48-61. 1975.
- _____, y HAYDOCK, K. P. The comparative response of tropical and temperate grasses to varying levels of nitrogen and phosphorus nutrition. Aust. J. Agr. Res. 22:573-587. 1971.
- WOLLNER, H. Influencia de la fertilización con nitrógeno en el rendimiento de pasto pangola. Beitr. Trop. Subtrop. Landwirt. Tropenveterinarmed. 6:27-31. 1968.
- WRIGHT, J. W. Townsville stylo for hay in the Peninsula. Queensl. Agr. J. 97:473-478. 1971.
- YOUNGE, O. R., PLUCKNETT, D. L., y ROTAR, P. R. Culture and yield performance of *Desmodium intortum* and *Desmodium canum* in Hawaii. Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 59. 1964.
- _____, y PLUCKNETT, D. L. Beef production with heavy phosphorus fertilization in infertile wet lands of Hawaii. Proc. 9th Int. Grassl. Congr. (São Paulo) 2:959-963. 1965.

INDICE DE MATERIAS

A

- Abonos verdes**, 14, 180, 183, 409, 518-520, 533-537
- Absorción de nutrimentos**, 202-204, 330-332, 513-515
en sistemas de cultivos intercalados, 513-515
como herramienta de predicción, 330-332 de cultivos tropicales, 202-204
- Acioa barteri*, 394
- Africa occidental**, 12, 81, 108-109, 121, 124, 127, 333, 404, 405, 502
- Africa oriental (general)**, 20, 76, 389, 396, 555
- Africa tropical**, 9-10, 12, 18, 23-24, 29-30, 35, 37, 38, 39, 41-42, 71, 73, 81, 125, 180, 550
- Agricultura de corta y quema**, 356, 400
- Agricultura de subsistencia**, distribución geográfica, 34
- Agricultura nómada**, 39-40, 354-421
composición de la ceniza después de la quema, 372
fósforo disponible, 380-382
cambios en capacidad de intercambio catiónico, 379-380
en acidez del suelo, 373-374
en el nivel de nutrimentos, 371-382
cambio a agricultura continua, 397-412
sistema corredor, 390-391
deterioro de propiedades físicas del suelo, 387-388
erosión, 370-371
bases intercambiables, 375-376
período de barbecho, 392
distribución geográfica, 39-40
mejoramiento de producción de cultivos, alternativas, 389-396
población microbiana, 382
nitrógeno orgánico, 376-379
cultivos permanentes, 411-412
insectos y enfermedades, 388
fósforo, 380-382, 400
potasio, 375-376, 400, 405
escorrentía y erosión, 370-371
costumbres sociales, 388-389
agotamiento de la fertilidad del suelo, 386
materia orgánica del suelo, 376-379
humedad del suelo, 369
estructura del suelo, 369-370
temperatura del suelo, 367-368
sistemas, 354-357
malezas, 387
descensos de rendimiento, 382-389
- Agricultura tropical**, 31-50
- Agua**, 111-116, 451-456
disponible, 113-114
manejo para arroz, 451-456
movimiento en los suelos, 114-116
retención en los suelos, 111-114
escasez, tensión, 453-456
arroz, 451-456
- Alcalinidad**, pruebas de suelo para, 310
- Alfalfa**, 238, 271, 537
susceptibilidad a acidez del suelo, 238
- Alfisoles**, 58, 63, 72-83, 101, 108, 121, 122, 128, 146, 149, 161, 168, 194-195, 230, 232, 233, 260, 365-367, 374, 383-386, 394, 405
niveles de acidez, 231-232
definición y subdivisiones, 58
distribución geográfica, 72-76
posiciones en el paisaje, 76-83
estructura de, 101-102, 104
- Algodón**, 205, 312, 319, 383, 406, 499
remoción de nutrimentos por las semillas, 205
- Almacenamiento de nutrimentos en suelos de bosque**, 362-363
- Aluminio como criterio para encalar**, 243
tolerancia varietal y de cultivos, 236-242
intercambiable, 226-229
relación con acidez del suelo, 234-236
saturación, 226-229, 230
en la solución del suelo, 229-230
toxicidad, 234
- Ambientes údicos**, asociaciones de suelo, 76-80
- Ambientes ústicos**, asociaciones de suelo, 80-82
- Ambitos de agua disponible**, 113-116
- América Central (general)**, 12, 18, 20, 25, 28, 41, 45, 265, 504
- América tropical**, 9-10, 21, 23, 28-29, 34-35, 37-39, 42-43, 75-76, 99, 550
- Amoníaco**, pérdidas por volatilización, 199-200
- Análisis de plantas**, 328-330
- Andepts**, 67-68, 83-87, 104, 121, 122, 147, 155, 216, 226-230, 248-249, 365-367, 429, 436
definición y subdivisiones, 67-68
posición en el paisaje, 83-87
estructura, 104
- Andosoles**, (véase Andepts)
- Andropogon* spp, 20, 396, 555, 561, 594
- Andropogon gayanus*, 566
- Aqualfs**, 67, 120
definiciones y subdivisiones, 67
- Aquepts**, definición y subdivisiones, 68
- Aquepts**, 68, 85, 115, 155, 429, 478-479
definición y subdivisión, 68

Aquods, definición y subdivisiones, 70
 Aquolls, definición y subdivisiones, 69
 Aquouls, definición y subdivisiones, 65
 Aquults, definición y subdivisiones, 66
Arachis hypogaea (véase maní)
 Areas volcánicas, asociaciones de suelo en, 83-87
 Argids, definición y subdivisión, 67
 Aridisoles, 67, 72-76, 87, 106, 288
 definición y subdivisiones, 67
 distribución geográfica, 72-76
 estructura, 106
 Arroz, 42, 202, 206, 208, 212, 239-242, 269, 273, 280, 325, 330, 383, 404, 422-490, 506-508, 521
 niveles críticos en tejidos, 330, 476
 sistemas de cultivo, 447-451
 agua profunda, 450-451
 siembra directa, 451
 duración del crecimiento y respuesta a nitrógeno, 466-467
 deficiencia de hierro, 473, 477-478
 toxicidad de hierro, 478-479
 inundado con irrigación, 448-449
 micronutrientes, 473-480
 necesidad de inundación, 457-458
 necesidad de fangueo, 458-460
 nitrógeno, 201-205, 330-332, 460-471
 manejo, (460-471); colocación, (468-469); recomendaciones, (330-332)
 recuperación (471); necesidades (202-206); fuentes (467-469)
 programación de aplicaciones (469-471)
 absorción de nutrientes, 203
 sistemas inundados, 448-450
 desórdenes nutritivos en Asia, 474-475
 tipo de planta, relaciones de nitrógeno, 461-463
 fósforo, 471-473
 manejo de, 471-473
 colocación de, 472
 respuesta a, 471-472
 problema de pruebas de suelo, 472-473
 fuentes, 471
 programación de aplicaciones, 472
 potasio, deficiencia de, 479
 inundado, con agua de lluvia, 449-450
 clasificación de la capacidad del suelo, 339
 respuestas a radiación solar y nitrógeno, 463-464
 respuesta a temperatura y nitrógeno, 466-467
 de secano, 450
 diferencias varietales a enclamiento, 239-240
 en respuesta al fósforo, 472
 manejo del agua, 451-460
 nitrógeno, 460-461
 necesidades de agua, 452-453
 susceptibilidad a escasez de agua, 453-455
 deficiencia de zinc, 476-477
 Arveja, 45
 Asia tropical, 9, 10, 20, 25, 30, 34-35, 37-38, 39, 41, 42-44, 73-75, 550

Asociaciones de suelo en el paisaje, 76-87
 Australia, 12, 20, 24, 39, 42, 200-201, 242, 247, 550, 552, 554, 555, 556, 566, 570, 571, 572-573, 587-588, 589, 606
 Avena, 452
Axonopus compressus, 568
 Azotobacter, 188
 Azufre, 286-292, 309, 444
 contenido en los suelos, 286-289
 necesidades de los cultivos, 291
 deficiencia, 286
 fertilización, 291-292
 formas en los suelos, 286-289
 inorgánico, 187-188
 orgánico, 286-287
 liberación, 289-290
 pruebas de suelo, 304
 fijación, 289-290
 transformación en suelos anegados, 444

B

Banano, 45, 205, 207
 extracción de nutrientes por, 205
 Bangladesh, 308
 Barbecho arbustivo "Bush-fallowing", 354
 Bejierinckia, 188
 Biomasa, 24-25, 358
 bosques adultos, 358
 productividad en los trópicos, 24-25
 Bolivia, 14, 28, 318, 322, 323-324, 384, 399
 Boro, 252, 310, 445, 475-476
 efecto del anegamiento, 445
 efecto del sobreencalamiento, 252
 pruebas de suelo, 310
 toxicidad en arroz, 476
 Bosque, 23-24, 357-366
 biomasa, 359
 deciduo y semideciduo, 23-24
 ciclos de nutrientes del suelo, 357-366
 Bosques pluviales, 11-13
Brachiaria decumbens, 560-561, 565
Brachiaria mutica, (véase pasto Pará)
Brachiaria ruziziensis, 594
 Brasil, 12-14, 23-24, 28, 38, 39-41, 44, 75, 77-78, 103, 107, 116, 117, 124-125, 146-148, 149, 167-168, 169-170, 171-172, 214, 230-231, 241-242, 244, 250, 266-267, 278, 281, 286, 291-292, 308, 313, 315-316, 326, 370, 373, 448, 450, 477, 499, 529, 590, 606-607
Brassica campestris, 524
 Burma, 24, 28

C

Cacahuete (véase maní)
 Cacao, 205, 499, 504
 extracción de nutrientes por las almen-
 dras. 205

- Café, 205, 245-246, 292
 toxicidad de manganeso, 245-246
 remoción de nutrimentos, 205
 respuesta a saturación de aluminio, 246
- Cajanus cajan*, (véase gandul)
- Calcio, 234-236, 247-250, 309, 374, 375, 400, 445
 cambios en agricultura nómada, 374, 375, 400
 deficiencia, 234-236
 movimiento descendente, 247-250
 en suelos anegados, 445
 pruebas de suelo, 309
- Calíngero, 237, 272, 560-561, 569, 580, 584, 594
 respuesta al nitrógeno, 594
 tolerancia a acidez del suelo, 237, 560-561
- Calopogonium muconoides*, 237, 518, 562
- Camote, 42-44, 46-47, 203, 215, 271, 383, 503, 525
 absorción de nutrimentos, 203
- Caña de azúcar, 204, 208, 313, 330, 332, 499, 524, 525
 niveles críticos en los tejidos, 330
 absorción de nutrimentos, 204
- Caolinita, 141
- Capacidad de intercambio aniónico, 142, 144, 153-159
- Capacidad de intercambio catiónico, 140, 145-160
 manejo de, 159-160
 problema de medición, 154-155
 niveles, 153-154
 relaciones de pH, 140-160
- Carbohidratos, producción por principales cultivos tropicales, 47-48
- Carbonatos, 142
- Carbono orgánico (véase materia orgánica)
- Cargas negativas netas en los suelos, 148-149
- Cargas positivas netas en los suelos, 148-149
- Caribe (general), 24, 28, 41
- Casuarina* spp., 189, 394
- Cat clay (véase suelos ácidos sulfatados)
- Catena, 76-87
- Caucho, 204, 499, 524
- Caupí, 45, 47-48, 239, 499, 506, 523, 531, 538-539
- Cebada, 241
- Centrosema pubescens*, 237, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 571, 572, 573
- Chile, 14, 146
- Chloris gayana*, 272, 513, 559, 561, 589, 594
- Cicer arietum* (véase garbanzo)
- Citrus, 240
- Clasificación de suelos ORSTOM, 59-61
- Clasificación de suelos del Soviet, 56
- Clasificación de suelos de USDA, 56-58
 modificación de Hawaii, 57
- Climas estacionales, 11-12, 14
- Climas lluviosos, 13-14
- Climas tropicales áridos, 12-14
- Climas tropicales, 12-14
- Clorita, 141
- Cobre, 305, 445
 en suelos inundados, 445
 pruebas de suelo, 305
- Cocoteros, 205, 504
- Colocasia esculenta* (véase malanga)
- Colombia, 3, 12, 14, 20, 24, 122, 148, 155, 171, 216, 231-232, 238, 263, 268, 269, 370, 378, 477, 510-511, 535, 537, 556, 566, 571-573, 585, 696
- Compactación del suelo, 369, 387-388, 401-402
- Composición de la ceniza después de la quema, 372-373
- Concepto de zonality, 54
- Conuco, 354
- Costa de Marfil, 121-122, 370, 378
- Costa Rica, 14, 122, 232, 248-249, 522, 528, 607
- Cuba, 12, 20, 75, 78, 230
- Cubiertas protectoras, 394-395, 406, 409-410
- Cuenca amazónica, 12, 21, 28-29, 39, 73, 76, 78, 500, 566-567
- Cultivos alimenticios, tropicales, 41-50
 importancia por continentes, 43
 valor nutritivo, 45-50
- Cultivos continuos, 397-410
 fertilización, 403-407
 desmonte, 378-403
 abonos, 407-409
 cubiertas protectoras, 409-410
- Cultivo cuádruple, 528
- Cultivo doble, 528
- Cultivo de arroz inundado con irrigación, 448-449
- Cultivos de legumbres, 271, 531
- Cultivos de retoños, 539-540
- Cultivos múltiples, 491-542
 clasificación, 493-497
 definiciones, 492-493
 sistemas de fincas pequeñas, 492-493
 terminología, 494-496
- Cultivos secuenciales, 528-540
 efectos de cultivos anteriores, 535-539
 efectos de fertilizantes, 534-535
 propiedades químicas del suelo, 530-534
 propiedades físicas del suelo, 529-530
 sistemas, 528-540
 rendimientos, 530-534
- Cultivos semipermanentes, 396-397
- Cultivos triples, 528
- Cynodon dactylon*, (véase pasto Bermuda)
- Cynodon plectostachyum* (véase pasto estrella)

D

- Denitrificación, 194, 431, 434, 436-437, 446-447
- Densidad aparente del suelo, 108-111, 400-401, 428, 529-530
- Desiertos tropicales, 13, 14, 24, 75, 87
- Desmodium aparines*, 271

Desmodium intortum, 236, 252, 272, 274, 516, 563, 564, 566, 568, 569, 571, 574, 579, 584
Desmodium spp, 237, 562, 580-582
Desmodium uncinatum, 238, 274, 557, 561, 577, 584
 Desmonte, 398-403
Digitaria abyssiniica, 555
Digitaria decumbens, (véase pasto pangola)
Dioscorea spp. (véase ñame)
 Distribución geográfica de los suelos, 72-76
Dolichos lablab, 535

E

Ecuador, 14, 28
 Efectos residuales, 49-52, 75-79, 215-218, 534-536
 de fertilizantes en rotación, 534-536
 de encalamiento, 49-52
 de aplicación de fósforo, 75-79
 de aplicaciones de nitrógeno, 215-218
Eleusine, 405
 El Salvador, 505, 606
 Encalado, 243-250
 aluminio como criterio, 244-246
 profundidad de incorporación, 246-247
 en suelos inundados, 435-436
 sistemas de intersembras, 523
 sobreencalamiento, 250-252
 pasturas, 584-585, 600-601
 aperdigonamiento, 584-586
 interacciones del fósforo, 281-284
 dosis de aplicación, 244-246
 efecto residual, 249-250
 necesidad, 244-246, 309
 fuentes, 246-247
 Entisoles, 68-76, 171, 260, 383-384, 399, 428
 definición y subdivisiones, 68
 distribución geográfica, 68-76
 Erosión, 124-126, 370-371, 606
 en pasturas, 606
 en agricultura nómada, 370-371
 superficies de, 81, 82
 Escorrentía, 122-224, 370-371
 Espodosoles, definición y subdivisiones, 70
 Estabilidad de los agregados, 100-108, 424
 efecto de la inundación, 423
 efecto del fangueo, 426
 Estaciones, distribución de estaciones lluviosa y seca, 10
 Estación seca, 8-11, 606-607
 distribución geográfica, 8-11
 producción de pasturas, 606-607
 Etiopía, 12, 28
 Estiércoles y abonos, 179-182, 406, 407-409, 518-520, 530, 533-535
 animal, 179-181, 406, 407-409, 518-520, 530, 533-535
 efecto en propiedades del suelo, 180
 abono verde, 180-182, 406, 407-409, 518-520, 530, 533-535

Estructura del suelo, 100-111
 cambios con la labranza, 106-108, 369-370
 definición, 100
 medición, 100
 de órdenes de suelos, 101

F

Fangueo, 425, 430
 destrucción de agregados, 427-428
 cambios en densidad aparente en porosidad, 428
 definición, 425
 efectos en cultivos aeróbicos en, 525-526
 rendimiento de arroz, 458-460
 relaciones de humedad, 428-430
 procesos de, 425-427
 reducción del suelo, 430
 regeneración de la estructura, 430
 FAO, ensayos de fertilizantes simples, 334-330
 leyenda del mapa mundial de suelos, 63-64
 Fertilización nitrogenada, 208-218, 470-471
 cambios en propiedades del suelo, 216-218
 eficiencia en la utilización, 214, 470-471
 efectos residuales, 215-218
 Fertilizante nitrogenado, 194-202, 208-216
 manejo del, 208-216
 reacciones en los suelos, 197-202
 uso en los trópicos, 197-198
 Fertilizantes (véase nutrimentos individuales o cultivos)
 Fertilizantes orgánicos (véase estiércoles y abonos verdes)
 Ferrasoles, definiciones, 60
 Fijación simbiótica, 188
 Fijación simbiótica del nitrógeno, 189-190, 516-526, 570-575
 Filipinas, 7, 12, 15, 22, 30, 115, 121, 273, 336, 429, 433, 441, 445, 448, 455-456, 459-463, 499, 503, 506-508, 511, 521, 527, 540
 Fincas ganaderas, distribución geográfica, 39
 Fluvents, definición y subdivisiones, 68
 Forraje, 590-607
 sistemas intensivos de producción, 590-607
 distinción del pastoreo, 591-592
 Fósforo, 259-284, 307-308, 380-382, 440-441, 471-473, 561-565, 583, 598-600
 disponibilidad en suelos anegados, 440-444
 al voleo versus aplicación en bandas, 275-279
 cambios en agricultura nómada, 380-382, 400
 contenido en suelos tropicales, 259-262
 manejos de fertilizantes, 275-284
 fijación, 263-268, 441
 efectos de la inundación, 441
 magnitud de, 265-266
 procesos, 263-265
 fracciones inorgánicas, 262

Fósforo, Cont.
 orgánico, 260-261
 fertilización de pasturas, 556, 598-606
 dosis de aplicación, 275
 liberación, 266-268
 necesidades de los cultivos, 268-271
 efectos residuales, 275-279
 fertilización de arroz, 471-473
 en la solución del suelo, 266-268
 pruebas de suelo, 307-308
 fuentes de, 279-281
 total, 259-260
 absorción por los cultivos, 268-269
 diferencias varietales y de especies en tolerancia a niveles bajos, 54-75, 269-274
 Fotoperíodo, 7, 8
 Frijoles (*Phaseolus vulgaris*), 42, 43, 45, 46, 189, 204, 208, 215, 233, 239-240, 407, 501, 504-505, 510-511, 522
 necesidad de nitrógeno, 208
 extracción de nutrimentos, 204
 tolerancia varietal al aluminio, 239-240
 Frijol mungo, 499, 503, 506, 529, 531-532, 539

G

Ganado, importancia en los trópicos, 550
 Gandul, 45, 239, 396, 499, 513-514
 Ghana, 175-177, 191, 193, 261, 358, 361, 364, 365, 369-370, 373, 376, 382, 385, 404, 555
 Garbanzo, 45
 Geología, de los trópicos, 25-36
Glycine max (véase soya)
Glycine wightii, 237-238, 242, 272-274, 562, 572, 579, 581, 585-596
 susceptibilidad a acidez del suelo, 237-238
Gmelina arborea, 411
 Guatemala, 14, 171, 358, 364, 368, 369, 370, 377, 378, 379, 381, 383, 386, 524-526
 Guyana, 28, 88, 171, 239

H

Haloisita, 141
 Hawaii, 30, 103, 104, 111, 114, 130, 147-149, 159, 215, 229, 250, 251, 265-266, 275-277, 283, 285, 288, 332, 573, 574, 575, 581
Heteropogon contortus, 552, 557-558, 587, 594
 Hidrólisis de la úrea, 198
 Hierro, 141, 309-310, 372, 438-440, 475-479
 cambios en suelos inundados, 438-440
 deficiencia, 372, 438-440
 óxidos e hidróxidos, 141
 pruebas de suelo para, 309-310
 toxicidad, 475-479
 Histosoles, definición y subdivisiones, 70
 Holdridge, zonas de vida, 25

Humods, definición, 70
 Humox, definición y subdivisión, 65
 Humults, definición y subdivisiones, 66
Hyparrhenia rufa, 20, 552, 554, 558, 561, 562, 571, 584, 606

I

Ilita, 141
Imperata cylindrica, 21, 394-395
 Inceptisoles, 67-68, 69-73, 114, 123, 149, 171, 230-233, 265, 429
 niveles de acidez, 232
 definición y subdivisiones, 67-68
 distribución geográfica, 68-76
 estructura, 101
 India, 5, 12, 23-25, 38, 44, 75, 179-180, 181, 191, 212, 520, 528-531
 Indonesia, 12, 21-23, 30, 41, 84, 191
 Infertilidad de suelos ácidos, causas, 233, 234-236
 Infiltración, tasas de, 101, 251, 400, 429, 453-454, 529
 efecto de encalamiento excesivo, 251
 en suelos anegados, 429, 453-454
 en agricultura nómada, 400
Ipomea batatas, (véase camote)
 intercambio catiónico (véase elementos individuales)
 Intersiembrá (cultivos intercalados), 493-528
 ventaja, 527-528
 competencia, 497-500
 definición, 492
 efecto, 499
 colocación del fertilizante, 525-526
 dosis de fertilizante, 524-525
 respuesta al fertilizante, 520-525
 épocas de aplicación, 525-526
 fuentes de fertilizantes, 525-526
 leguminosa, 515-520
 limitaciones de, 527
 mixtas, 500-502
 absorción de nutrimentos, 513-515
 densidad de siembra, 507-510
 relevo, 504-506
 por hileras, 502-504
 arreglo de hileras, 507-510
 relaciones suelo-planta, 511-513
 en franjas, 506-507
 sistemas, 497-511
 efecto varietal en, 510-511
 Inundación, efecto en la estabilidad de agregados, 424
 saturación de aluminio, 435-436
 calcio, 445-446
 propiedades químicas, 430-447
 compuestos de hierro, 438-440
 compuestos de manganeso, 438-440
 disponibilidad de micronutrimentos, 445-446
 dinámica del nitrógeno, 434
 materia orgánica, 437-438
 permeabilidad, 423

- Inundación, efecto en la estab. de agr., Cont.
 pH, 435-436
 fósforo, 440-444
 propiedades físicas, 422-423
 potasio, 445
 reversibilidad, 446
 rendimiento de arroz, 457-458
 disponibilidad de silicio, 445-446
 azufre, 444
 hinchamiento de arcillas, 425
 Inundación intermitente, 446-447
 Islas del Pacífico (excepto Hawaii), 12, 18, 383
- J**
- Japón, 31, 42, 424, 479
- K**
- Kaolisoles, definición, 59
 Kenia, 14, 28, 83, 105, 153-154, 382, 499, 554, 558, 559, 566, 570
 Kudzú, 237, 394, 395, 564-566, 584
 tolerancia a acidez del suelo, 237
- L**
- Laterita, 54, 55
 Latosol, definición, 54-55, 58
 Latosol ferruginoso húmico, definición, 57
 Latosoles húmicos, definición, 57
 Latosol húmico bajo, definición, 57
 Latosol hydrol húmico, definición, 58
 Lavado pluvial, aumento en la composición de los nutrimentos, 363, 365
 Leguminosas de granos, 203, 236-238, 557
 diferencias en tolerancia a la acidez, 236-238
 absorción de nutrimentos, 203
 pasturas, 557-590
 efecto en propiedades del suelo, 586-590
 tolerancia a tensión del suelo, 562-566
 Lenteja, 45
Leucaena leucocephala, 565, 572, 573, 585
 Liberia, 176, 379
 Lixiviación, pérdidas por, 121-122, 195-198
 Llanos aluviales, asociaciones de suelo en 87
Lotononis bainesii, 562, 563, 572, 583, 589
Loudetia acuminata, 555
- M**
- Macroptilium lathyroides*, 562, 563, 583
 Madagascar, 191
 Magnesio, 234-236, 247-249, 309-310, 445
 deficiencias, 234-236
 movimiento descendente, 247-249
 en suelos anegados, 445
 pruebas de suelo, 309-310
 Maíz, 42, 43, 44, 46, 203-206, 209, 213, 234, 240, 244-245, 269, 315-316, 326, 330-333, 383-385, 404, 406, 408, 452, 499, 503, 510-511, 513-515, 521-522, 523, 529, 531, 535-537
- Maíz, Cont.
 niveles críticos en los tejidos, 330
 recomendaciones sobre nitrógeno, 330-333
 necesidades de nitrógeno, 203
 absorción de nutrimentos, 203-206
 Malanga, 44, 205-207
 necesidad de nitrógeno, 205-207
 Malasia, 12, 22, 41, 524
 Manganoso, 236, 252, 310, 438-440, 479
 cambios en suelos inundados, 438-440
 deficiencia, 236, 252, 479
 pruebas de suelo, 310
 toxicidad, 236, 479
 Mango, 240
 Mani, 45-48, 203, 383, 385, 406, 499, 503, 525, 531, 538
 absorción de nutrimentos, 203
Manihot esculenta, (véase yuca)
 Materia orgánica (del suelo), 167-183, 367, 376-379, 400, 411, 437-438, 530-534, 586-590, 604-615
 adiciones, 172-174
 efectos beneficiosos, 178-179
 cambios en agricultura nómada, 376-379, 400, 411
 contenido en suelos tropicales, 167-171
 descomposición, 172-174
 efecto de la labranza, 174-178, 376-379
 del anegamiento, 437-438
 de pastos con fertilización intensiva, 604-605
 de cultivos a largo plazo, 530-534
 de leguminosas de pastura, 586-590
 como prueba de suelo, 307
 transformación en suelos anegados, 437-438
Medicago sativa (véase alfalfa)
Melilotus alba, 520
Melinis minutiflora (véase calingero)
 Método de correlación Cate-Nelson, 313-322
 México, 12, 14, 20, 24, 28, 44, 75, 210, 211, 268, 499, 520
 Micronutrimentos, 309-310, 438-440, 445-446, 476-479
 en suelos de arroz inundado, 438-440, 445-446, 476-479
 pruebas de suelo, 309-310
 véase también nutrimentos individuales
 Mijo, 43, 203, 385, 404, 532
 absorción de nutrimentos, 203
 Milpa, 354
 Minerales de arcilla, 140-156
 características de carga, 142
 Minerales de óxidos, 137
 Minerales de silicatos, 142
 Mineralogía de suelos tropicales, 142-144
 Modelo de respuesta lineal y plateau, 321
 Molibdeno, 309-310, 330, 445
 niveles críticos en los tejidos, 330
 deficiencias en pasturas, 557
 en suelos inundados, 445
 pruebas de suelo, 309-310

Mollisoles, 69, 73-76, 83-84, 106, 168, 170, 260, 291, 384
 definición y subdivisiones, 69
 distribución geográfica, 73-76
 posición en el paisaje, 83-84
 estructura, 106
 Montmorilonita, 141
Musa paradisiaca (véase plátano)
Musa sapientum (véase banano)
Mucuna spp, 518

N

Nicaragua, 448
 Nigeria, 82, 105, 118, 127-128, 149, 160, 195, 232, 368, 369, 370, 383, 385, 394, 404, 408-412, 511, 517, 537-538
 Nitrato, acumulación en los perfiles, 193-197
 Nitrificación, 199-202
 de sulfato de amonio, 199-200
 de nitrógeno en bandas, 200-202
 Nitrógeno, 187-224, 330-332, 376-379, 400, 403-407, 436-437, 446-447, 460-471, 513-527, 581-590
 dosis de aplicación, 208-209
 contenido en perfiles tropicales, 169-171
 en suelos anegados, 434, 436-437, 446-447
 brotes repentinos, 194
 inorgánico, 215-216
 en sistemas de cultivos intercalados, 513-514
 pérdidas en estación lluviosa, 194-195
 en fertilización de pasturas, 594-599
 en lluvia y polvo, 187-188
 recomendaciones, 330-332
 necesidades en cultivos tropicales, 202-208
 respuestas de cereales, 204-210, 460-471
 respuestas de leguminosas de grano, 215
 respuestas de cultivos de raíces, 214-215
 fertilización de arroz, 460-471
 en agricultura nómada, 376-379, 400, 403-407
 orgánico del suelo, 187
 pruebas de suelo, 202-204
 fuentes, 211-213
 fechas de aplicación y colocación, 213-214
 Nitrógeno inorgánico, fluctuaciones estacionales, 192
 Nitrógeno orgánico, del suelo, incrementos anuales, 191
 cambios en agricultura nómada, 376-379, 400, 411
 (véase también materia orgánica)
 Niveles críticos, 311-317, 328-330
 Niveles de acidez en suelos tropicales, 231-232
 y encalamiento, 226-254, 373-374, 435, 523, 560-566, 584-585, 600-601
 naturaleza del suelo, 226-230
 Nutrimientos, 279, 361-364, 366
 contenido en la biomasa de bosques adultos, 361-364

Nutrimientos, Cont.

pérdidas en los bosques, 366
 circulación a través de los animales en pastoreo, 279
 necesidades de cereales, de frutales, 202-204
 de leguminosas de grano, de pastos, 207
 de cultivos de raíces, 206
 Nutrimientos disponibles (véase el elemento individual)

Ñ

Ñame, 44-48, 208, 213, 404

O

Orthents, definición y subdivisión, 69
 Orthids, definición y subdivisión, 67
 Orthods, 70
 Orthox, definición y subdivisiones, 63
Oryza sativa (véase arroz)
 Oxisoles, 65, 72, 80, 84-85, 101-104, 107, 111-113, 116, 117-118, 126, 145, 148, 168, 169, 180, 213, 215, 226-230, 260, 263, 267, 269, 276, 278, 281, 282, 284, 285, 288, 291, 377-378, 382-383, 406, 430
 definición y subdivisiones, 65
 distribución geográfica, 72-74
 posición en el paisaje, 74-80, 84-85
 curva de retención de humedad, 111-113
 niveles de acidez del suelo, 230
 estructura de, 101-104

P

Palma de aceite, 204, 412
 Panamá, 227, 282, 359, 361
Panicum maximum (véase pasto guinea)
 Papa, 44-48, 203, 206, 215, 240, 324, 532
 Papua, Nueva Guinea, 22, 28, 39
Paspalum conjugatum, 568
Paspalum dilatatum, 272, 561
Paspalum notatum (véase pasto Bahía)
Paspalum pectenatum, 556
Paspalum plicatulum, 561, 574, 595
 Pasto Bahía, 188-189, 291, 561, 573
 Pasto Bermuda, 561
 Pasto calinguero (véase calinguero)
 Pasto elefante, 204, 245, 561-564, 576
 respuesta al nitrógeno, 594-595
 absorción de nutrimentos, 204
 respuesta a saturación de aluminio, 245
 tolerancia a tensión del suelo, 561-564
 Pasto estrella, 394-395, 562, 569, 571
 Pasto guinea, 204, 237, 272, 273, 554, 561, 578, 590, 594
 respuesta a nitrógeno, 596
 remoción de nutrimentos, 204
 tolerancia a tensión del suelo, 239, 562-564
 Pasto jaragua, (véase *Hyparrhenia rufa*)
 Pasto kikuyo, 272-273, 552, 561, 580, 594

- Pasto pangola, 190, 204, 216, 217, 272, 561-562, 578, 594, 595
 respuesta al nitrógeno, 595
 absorción de nutrimentos, 204
 tolerancia a tensión del suelo, 561-562
- Pasto Pará, 204, 561-562, 565, 584, 594, 595
 respuesta al nitrógeno, 595
 absorción de nutrimentos, 204
- Pasto rhodes, 272, 516, 560
- Pastoreo nómada, distribución geográfica, 39
- Pastoreo versus forraje, 591-592
- Pasturas, 550-624
 problemas de suministro de alimento en la estación seca, 552-553, 606-607
 establecimiento, 566-570
 en bosques desmontados, 566-570
 en sabanas, 570
 fertilización de mezclas de pasto-leguminosa, 582-583
 de especies de pasto, 590-606
 fertilización de pasto y propiedades del suelo, 604-606
 mezclas de pasto-leguminosa, 551-590
 especies de pasto, adaptación a condiciones de suelo, 560-562
 pastoreo versus forraje, 591-593
 importancia en los trópicos, 556
 inoculación de leguminosas, 570-573
 especies de leguminosas, adaptación a condiciones de suelo, 562-566
 encalamiento, 584-595, 600-601
 manejo de pasto-leguminosa, 580-582
 micronutrimentos, 596, 601
 como pasturas naturales, 552-557
 dosis de fertilización nitrogenada, 594-598
 fuentes de nitrógeno, 597
 nitrógeno suplido por leguminosas, 573-575
 valor nutritivo, 576-580, 602-603
 fertilización con fósforo, 583-584, 598-600
 fertilización potásica, 585, 600
 regeneración de pasturas empobrecidas, 570
 aperdigonamiento de semillas, 570-573
 fertilización semi-intensiva, 590-591
 especies más importantes en los trópicos, 560-566
 fertilización con azufre, 586, 601
- Pasturas, sabanas naturales (véase pasturas naturales)
- Pasturas de pasto-leguminosa, adaptación a suelos, 560-566
 selección de especies, 560-566
- Pasturas naturales, 552-569
 quema, 553-556
 fertilización, 556-557
 manejo del pastoreo, 556
 límites de, 552-553
 siembra de leguminosas, 557-559
- Patrones de retención de humedad, 111
- Pennisetum clandestinum* (véase kikuyo)
- Pennisetum purpureum* (véase pasto elefante)
- Pennisetum* spp. (véase mijo)
- Perú, 14, 28, 87, 119, 124, 129, 149, 170, 214, 230-232, 317, 320, 325, 370, 372, 375, 376, 380, 383, 386, 388, 390, 399-400, 402, 410, 455, 464, 468, 471, 523, 534, 566, 567-568, 571
- pH, 140-160, 373-376, 435-436
 cambios en suelos inundados, 435-436
 cambios en agricultura nómada, 373-376
 relaciones de carga, factores que las afectan, 148-150
 carga dependiente, 140-160
 en H₂O y KCl, 141-150
 pH delta, concepto y uso, 146-150
- Phaseolus atropurpureus* (véase siratro)
- Phaseolus aureus* (véase frijol mungo)
- Phaseolus limensis*, 45
- Phaseolus vulgaris* (véase frijol)
- Piña, 204, 240
- Pisum sativum* (véase arveja)
- Plátano, 45-47, 240
- Plintita, (véase laterita)
- Poder oxidante de cultivos de raíces, 452
- Podsoles (véase espodosoles)
- Potasio, 203-206, 308-309, 330, 375, 400, 404, 445, 585-586, 600
 en suelos inundados, 445
 fertilización de pasturas, 585-586, 600
 análisis de plantas, 330
 en agricultura nómada, 375, 400, 404
 pruebas de suelo, 308-309
 absorción por principales cultivos tropicales, 203-206
- Precipitación pluvial, 8-18
 relaciones de humedad del suelo, 17-18
 variabilidad, 14-16, 21-23
- Presión de población, 31-36
- Problema mundial de alimentos, 31-36
- Producción de alimentos, 31-36
 cambios *per capita*, 35
- Producción de carne, 550-609
- Producción de ganado, 550-609
- Profundidad de enraizamiento, 99-100
- Propiedades físicas del suelo, 99-134, 366-371, 422-424
 cambios en agricultura nómada, 366-371
 efectos del anegamiento, 422-424
- Proteína, producción por principales cultivos tropicales, 48
- Pruebas de suelo, 301-328
 correlación, 311-317
 modelos curvilíneos, 318-320
 modelo discontinuo, 320-326
 métodos de extracción, 305-311
 interpretación, 317-326
 organización del laboratorio, 304-305
 muestreo, 302-304
 uso de recomendaciones, 326-327
- Psamment, definición y subdivisiones, 48
- Puntero (véase *Hyparrhenia rufa*)
- Punto cero de carga, 146-151
- Pueraria phaseoloides* (véase kudzu)

Puerto Rico, 7, 77, 101, 115, 125-126, 148, 169-170, 212-213, 216-218, 228, 233-234, 236-237, 245-246, 359, 361, 363-364, 366, 580, 592-593, 595, 598-601

Q

Quema, 367-369, 370-371, 398-400, 553-556

R

Radiación solar, 4-7, 463-464
 Ray, 354
 Recomendaciones de fertilización con base en pruebas de suelo, 317-326
 Régimen ácuico de humedad del suelo, 17
 Régimen arídico de humedad del suelo, 18
 Regímenes de humedad del suelo, definiciones, 17
 Regímenes de temperatura del suelo, definiciones, 3
 Régimen údico de humedad del suelo, definición, 17
 Regímenes ústicos de humedad del suelo, definición, 17
 Registro de observaciones y actividades, 332-333
 Relaciones entre fertilidad del suelo y clasificación de suelos, 337-341
 Rendolls, definición, 69
 República Central Africana, 179-180
 República de África del Sur, 248-249
Rhizobium spp, 215, 562-563, 570-571
 Rotación de cultivos, 410-411, 491-492, 495, 528-538
 Rotación de tierras, 354

S

Sabanas, definición y distribución geográfica, 18-21
 Salinidad en suelos inundados, 479-480
 pruebas de suelos, 310
 Saturación de bases, medida de, 154-160
 Secamiento, efecto en análisis de suelo, 303-304
 Senegal, 109, 110, 121, 123, 170, 176, 404
Setaria sphacelata, 396, 517, 561, 594
 Sierra Leona, 160, 368, 370
 Silicio, 284-285, 445, 479
 aplicaciones para disminuir la fijación de fósforo, 284-285
 efectos del anegamiento, 445, 479
 Siratro, 562-563, 575, 579
 Sistemas agrícolas, 39-41
 Sistema belga de clasificación de suelos, 59-62
 Sistema brasileño de clasificación de suelos, 55, 62, 63
 Sistemas de clasificación de capacidad de la tierra, 338-339
 Sistemas de clasificación de suelos, 56, 71

Sistemas de clasificación de suelos por su capacidad-fertilidad, 339-341
 Sistemas de fertilización de cultivos intercalados, 520-524
 Sistemas de óxidos, 145
 Sistemas de pequeñas fincas, 492-493
 Sistemas de plantaciones, distribución geográfica, 39
 Sistemas de silicatos laminares, 144-145
 Sistemas de silicatos laminares con revestimientos de óxidos, 152-153
 Sistema chena, 354
 Sistema francés de clasificación de suelos, 59
 Sistema lua, 354
 Sistema taungya, 411
 Sobreencalamiento, 250-252
Solanum tuberosum (véase papa)
Sorghum alnum, 561-562, 566
Sorghum sudanense, 586
 Sorgo, 42-44, 46-48, 203, 205, 212, 234, 241, 244-245, 317, 385, 404, 452, 506, 531, 538
 absorción de nutrimentos, 203
 respuestas a saturación de aluminio, 234
 Soya, 42-45, 47-48, 239, 330, 452, 506, 531, 535
 niveles críticos de los tejidos, 330
 absorción de nutrimentos, 203
Spirillum lipoferum, 190
 Sri Lanka, 75, 77
Stylosanthes guianensis, 505, 563, 566, 568-569, 571, 573, 586
Stylosanthes humilis, 237-238, 271-272, 274, 516, 557, 563, 565, 567, 575-576, 580, 582, 586, 606
Stylosanthes spp, 237-238, 240, 242, 274
 Suelos ácidos sulfatados, 88, 279-280, 435, 478-479
 Suelos de ceniza volcánica (véase Andepts)
 Suelos de laterita, 54-58
 Suelos ferralíticos, 60-63
 Suelos ferruginosos, 58-63
 Suelos inundados, zonas oxidadas y reducidas, 433-434
 Suelos tropicales, definición, 54-55
 Suelos zonales, 55-57
 Sudán, 14, 75, 82, 170, 176, 198, 374, 406
 Sulfaquepts (véase suelos ácidos sulfatados)

T

Tabaco, 234-235
 Taiwán, 504, 525, 533
 Tanzania, 15, 499, 511, 555
 Taro, 44
 Taxonomía de suelos, 61-71
 correlación con los sistemas belgas y franceses, 61
 sistema brasileño (62-63); leyenda de FAO (71); sistema francés (60); nomenclatura antigua de USDA (58); definición simplificada de órdenes, subórdenes y grandes grupos (65-70)

Té, remoción de nutrimentos por las hojas, 204
 Teca (*Tectona grandis*), 411
 Temperatura, 2-4, 126-130, 367-368
 aire, 2-4
 suelo, 2-4, 126-130, 367-368
 Técnicas del elemento faltante, 333-334
 Tailandia, 24, 280, 367, 368, 448, 451
Themeda spp, 552, 554-555
 Tierras altas, asociaciones de suelos, 83-87
 tropicales, 14
 Toria, 529
 Torrerts, definición, 69
 Torrox, definición, 65
Trachipogon spp, 552, 554, 556
 Transferencia de nutrimentos, vegetación al suelo, 363-366
Trifolium spp, 563, 565, 579
 Trigo, 44-48, 203-207, 212, 241, 318, 331, 452, 529, 532
 recomendaciones sobre nitrógeno, 331
 necesidad de nitrógeno, 203-207
 absorción de nutrimentos, 103
 Trinidad, 176, 194, 215, 383, 424, 499, 512-513
Triticum aestivum (véase trigo)
 Tropepts, 68, 126, 155
 definición y subdivisiones, 68
 Trópicos, mapa de climas, 11
 definición, 1, 2
 mapa de sistemas agrícolas, 40
 mapa físico, 27
 mapa político, 32
 principales lenguas escritas, 32
 mapa de suelos, 74
 mapa de la vegetación, 19

U

Udalfs, definición y subdivisiones, 66
 Uderts, definición, 70
 Udufts, definición y subdivisiones, 65
 Uganda, 81, 407, 557, 592
 Ultisoles, 65, 72-80, 83-87, 101, 104, 107, 115, 121, 145, 148, 168, 169, 215, 228, 234-236, 244-245, 250-251, 264, 267, 277, 287-288, 291, 292-293, 372, 375, 383, 400, 407
 definición y subdivisiones, 65
 distribución geográfica, 72-76
 estructura, 101, 104
 posiciones en el paisaje, 76-80, 83-87
Urochloa mozambicensis, 582
 Uso de la tierra, 36-37
 Ustalfs, definición y subdivisiones, 66

Usterts, definición y subdivisión, 70
 Ustolls, definición y subdivisiones, 69
 Ustox, definición y subdivisiones, 65
 Ustults, definición y subdivisiones, 66

V

Valores nutritivos, 45-49, 576-580, 602
 de cultivos tropicales alimenticios, 45-49
 de pasturas tropicales, 576-580, 602
 Vegetación, 18-26
 clasificación, 25-26
 almacenamiento de nutrimentos en la, 358-362
 Venezuela, 5, 14, 25, 260, 371
 Vermiculita, 141
 Vertisoles, 70, 72-76, 81-84, 105, 111, 115, 148, 170-171, 179, 198, 288
 definición y subdivisiones, 70
 distribución geográfica, 72-76
 posición en el paisaje, 81-84
 estructura, 105
Vicia faba, 45
Vigna sinensis (véase caupí)
 Volta superior, 123

X

Xanthosoma maffafa (véase Taro)

Y

Yuca, 42, 43, 44, 46, 47, 204, 207-208, 214, 239-240, 383
 necesidad de nitrógeno, 207-208
 remoción de nutrimentos, 204
 diferencias varietales al encalamiento, 239-240

Z

Zaire, 3, 72, 168, 169, 175-176, 191, 358-362, 364-365, 383-384, 390, 402
 Zambia, 114
Zea mays (véase maíz)
 Zinc, 252, 309-310, 445, 476-477
 deficiencia en arroz, 476-477
 inducida por exceso de cal, 225
 interacción de fósforo en suelos anegados, 445
 pruebas de suelo, 309-310

