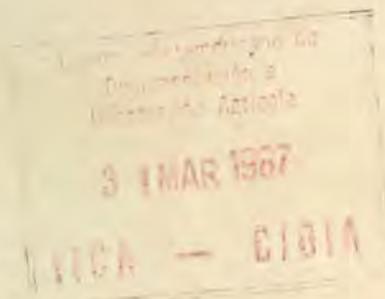


# IICA



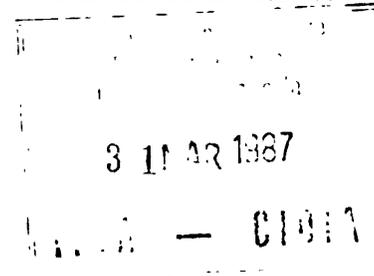
Serie Publicaciones Misceláneas  
N° AI/CR-86-006-ISSN-0534-5391



## ESTUDIOS AGROCLIMÁTICOS Y ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DE CULTIVOS: METODOLOGÍA Y RESULTADOS

ÓSCAR E. ROJAS





**ESTUDIOS AGROCLIMÁTICOS  
Y ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA  
DE CULTIVOS:  
METODOLOGÍA Y RESULTADOS**

**ÓSCAR E. ROJAS**

Ingeniero Agrónomo, D.A.A. INA París Grignon  
Especialista en Agroclimatología del IICA

**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA**

San José, Costa Rica  
1986

00008394

© Oscar E. Rojas  
© para esta edición, IICA

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

IICA  
SPM-A1/CR-86 -006 Rojas, O.E.  
Estudios agroclimáticos y zonificación  
agroecológica de cultivos: metodología y  
resultados.--San José, Costa Rica:  
IICA, 1986.  
90 p.-- (Serie publicación miscelánea  
/IICA; no. A1/CR 86-006)

ISSN 0534-5391

1. CLIMATOLOGIA. 2. ZONIFICACION.  
I. Título. II Serie

AGRIS F 24



DEWEY 352.961

## SERIE PUBLICACIONES MISCELANEAS No. A1/CR-86-006

La Serie de Publicaciones Misceláneas tiene como objetivo proporcionar información sobre temas relacionados con las acciones hemisféricas del IICA.

San José, Costa Rica  
1986

HCA  
FIP-AI/CR  
26-006  
C.1.

~~BV-000059 C.1~~  
~~BV-000062 C.2~~

~~0000674~~

## PRESENTACION

Muchos países en vías de desarrollo presentan grandes limitaciones para utilizar racional y eficientemente sus recursos naturales y lograr por medio de éstos una mejor y más efectiva contribución a sus objetivos de desarrollo.

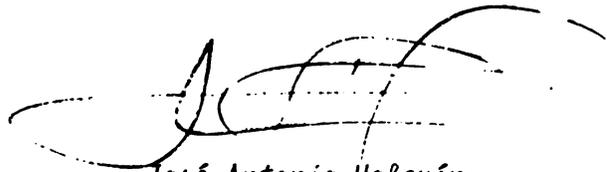
Una de estas limitantes es la escasez de metodologías, técnicas y procedimientos de trabajo que le permitan obtener la información necesaria para definir las políticas agropecuarias y preparar los planes de desarrollo para la ejecución de las políticas con ciertos grados de seguridad de que las actividades agropecuarias que se van a fomentar en las diferentes zonas del país mediante la aplicación de las tecnologías apropiadas, son las que mejor se adaptan a las condiciones del medio agroecológico de la zona, y por lo tanto, las que contribuyen más a los objetivos de los productores y del país.

El Ing. Oscar Rojas, consciente de esta limitante, ha querido presentar mediante esta publicación una Propuesta de Metodología e Instrumentos de Trabajo para la Zonificación Agroecológica de Cultivos, la cual permitirá a los planificadores nacionales y profesionales que trabajan en el campo de la planificación regional y de áreas específicas, definir con mayor precisión los potenciales productivos de las diferentes regiones de un país y los resultados esperados de las actividades agropecuarias que se consideren desarrollar en las mismas.

El trabajo está presentado en dos grandes partes. En una primera parte analiza la experiencia de varios profesionales que han trabajado en la estructuración de Metodologías de Zonificación Agropecuaria de Cultivos, y termina presentando la Estructura Metodológica en siete etapas operativas, cuyo seguimiento garantiza poder hacer las recomendaciones procedentes para la Zonificación Agroecológica de los cultivos.

*En la segunda parte se desarrollan todas las técnicas y procedimientos necesarios para la ejecución de las siete etapas operativas definidas en la primera parte, y cuya aplicación permite realizar los estudios agroclimáticos y de zonificación de los cultivos que se requieran.*

*Dada la importancia que la presente publicación tiene para los países miembros del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, y el aporte que ésta significa para dichos países en sus esfuerzos por lograr su desarrollo agrícola y bienestar rural, es para nosotros una gran satisfacción y privilegio haber recibido la invitación del Ing. Rojas para hacer esta presentación.*

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'José Antonio Holguín', written over a set of horizontal dashed lines.

*José Antonio Holguín  
Coordinador del Plan de Acción  
Oficina del IICA en Costa Rica*

## PROLOGO DEL AUTOR

El presente trabajo pretende actualizar la metodología de zonificación agroecológica de cultivos desarrollada por el IICA en los años setenta. Desde esa fecha hasta el presente, han sido muchos los estudiosos que han trabajado en la estructuración de esa metodología; sin embargo, es necesario resaltar la valiosa labor realizada por el Dr. García Benavides. Sus múltiples publicaciones, en pro de una mejor definición de los métodos cuantitativos, para la determinación de las áreas potenciales para el desarrollo agrícola, han sido de inmesurable valor. Este trabajo recoge parte de esa experiencia que se refleja, principalmente, en los dos primeros capítulos del estudio.

La Cooperación Francesa ha tenido un papel primordial en la actualización y transferencia de tecnología. El Dr. Michel Ribard ha sido el eje principal en el cual se ha cimentado esta cooperación.

El autor agradece su apoyo constante y desinteresado en los trabajos realizados por el Proyecto de Agroclimatología del IICA.

Muchas de las técnicas, de análisis de datos meteorológicos que se presentan en este documento me han sido enseñadas, por dos grandes maestros el Dr. Michel Eldin y el Dr. Jean Paul Lhomme, del Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), a quienes debo gran parte de mi formación profesional en bioclimatología; sinceramente gracias. De igual forma agradezco las enseñanzas del Dr. Alan Perrier del Instituto Nacional de Agronomía de París Grignon, de los doctores: N. Gerbier<sup>†</sup>, D. Payen y E. Choissnel del Servicio de Meteorología de Francia, y más allá en el tiempo, al cuadro de profesores de la Escuela de Economía Agrícola de la Universidad de Costa Rica.

En forma muy especial dejo constancia de mi agradecimiento al Dr. Michel Montoya, Director de la Oficina del IICA en Nicaragua, que en todo momento me alentó en mis estudios en esta ciencia y en la divulgación de los mismos.

Por último, agradezco al Lic. José A. Holguín, Coordinador del Plan de Acción de la Oficina del IICA en Costa Rica, por su excelente disposición hacia los trabajos emprendidos por el Proyecto de Agroclimatología.

El presente trabajo está compuesto por dos partes principales. La primera parte, recoge la experiencia de varios investigadores que han trabajado en la estructuración de la metodología de zonificación agroecológica de cultivos. Se plantea el problema y los objetivos del estudio. Además se presenta la estructura metodológica de zonificación con las modificaciones propuestas.

En la segunda parte del trabajo se desarrollan las metodologías necesarias para la obtención del estudio de zonificación. Por la complejidad de los métodos utilizados su presentación incluirá: introducción, antecedentes, materiales, métodos y resultados. Esta forma de presentación, facilitará y hará más asequible los resultados a los potenciales usuarios no versados en la planificación agroecológica. Asimismo, la presentación individual de cada etapa en cuanto a metodologías y resultados, permite cumplir con los objetivos específicos perseguidos, es decir, que una etapa puede ser útil no solamente para llevar a cabo una zonificación, sino para cumplir otra actividad relacionada con el estudio general u otros similares que necesiten de ella. Por ejemplo definir el riesgo de sequía en relación a una etapa fenológica de un cultivo: (floración). Con el afán de mostrar los diferentes métodos se recurrirá a estudios emprendidos por el autor en Costa Rica y Nicaragua para los cultivos de caña de azúcar y café; así como estudios específicos a nivel de regiones. Con esto se espera ilustrar al máximo las potencialidades de uso del esquema metodológico propuesto como apoyo a la programación racional de los recursos naturales.

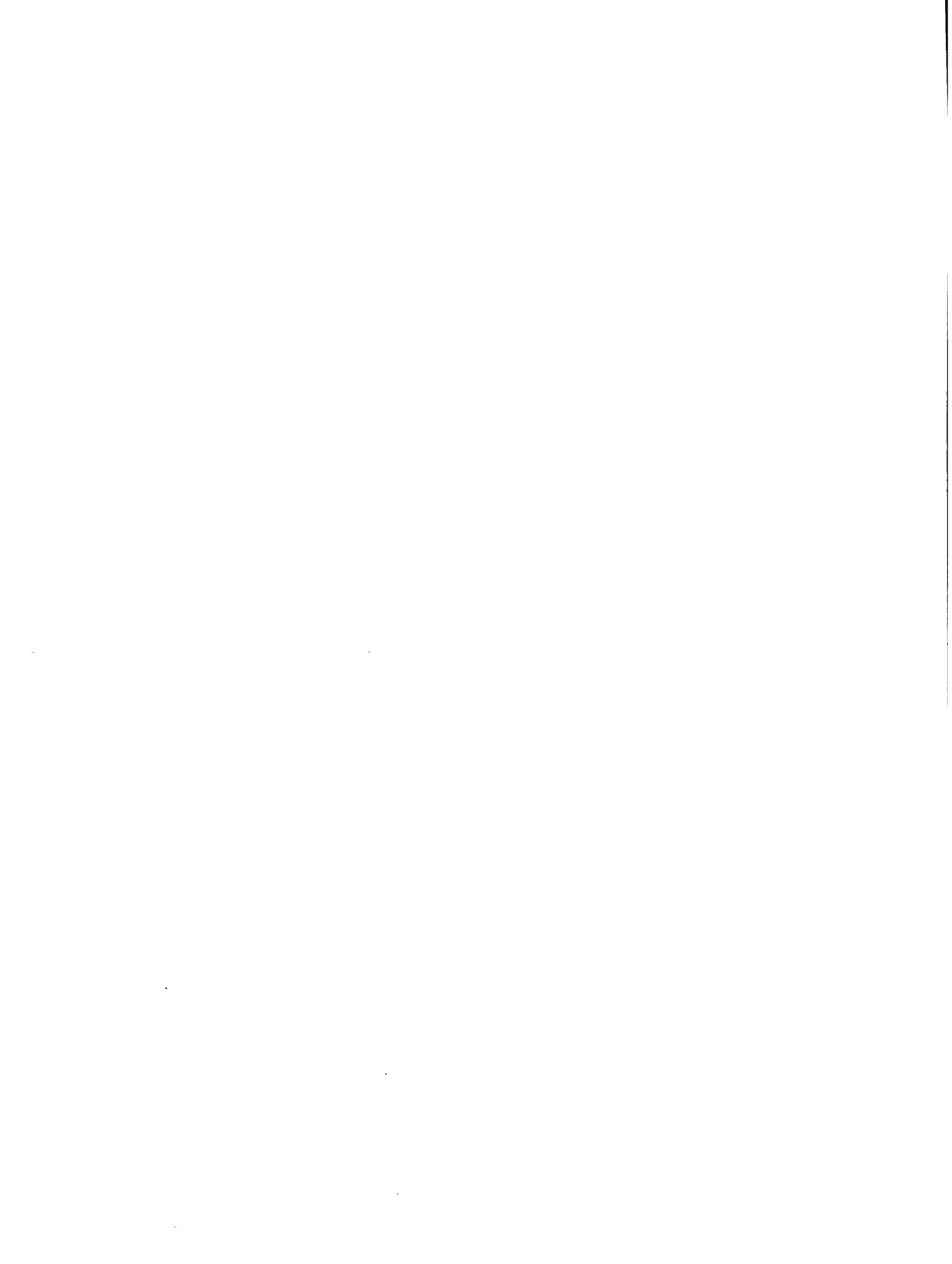


## CONTENIDO

	<u>PAGINA</u>
I. <u>PROBLEMATICA E INVESTIGACION PROPUESTA</u>	
<u>CAPITULO I</u> .....	1
ZONIFICACION AGROECOLOGICA DE CULTIVOS Y SU RELACION CON LA PLANIFICACION AGROPECUARIA .....	1
1.1 Justificación y antecedentes .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	4
1.3. Investigación propuesta .....	5
1.4. Objetivos y alcances generales y específicos .....	5
<u>CAPITULO II</u>	
ESTRUCTURA METODOLOGICA .....	9
2.1. Diseño polietápico de la estructura metodológica .....	9
2.2. Actividades y subactividades de cada etapa .....	10
2.2.1. Primera etapa. Obtención de información en fuentes secundarias .....	10
2.2.2. Segunda etapa. Constitución de un banco de datos meteorológicos y estimación de los elementos climáticos deficitarios para el área en estudio.....	12
2.2.3. Tercera etapa Estudio y análisis de las condiciones hídricas .....	13
2.2.4. Cuarta etapa Definición de los índices de producción potencial y su expresión cartográfica..	14
2.2.5 Quinta etapa Análisis de la información fisioedáfica	15
2.2.6 Sexta etapa Síntesis cartográfica sucesiva	15

2.2.7	Sétima etapa. Presentación de los resultados finales del estudio de Zonificación Agroecológica .....	15
II.	TECNICAS AGROCLIMATICAS Y ZONIFICACION AGROECOLOGICA DE CULTIVOS ...	17
	CAPITULO I .....	19
	GENERACION DE MODELOS DE ESTIMACION DE VARIABLES CLIMATICAS .....	19
1.1.	Modelos climáticos a macro y meso escalas .....	19
1.1.1.	Introducción .....	19
1.1.2.	Antecedentes .....	20
1.1.3.	Materiales y métodos .....	21
1.1.3.1.	Estimación de la temperatura .....	21
1.1.3.2.	Estimación de la radiación global .....	27
1.1.3.3.	Estimación de la evapotranspiración potencial .....	27
1.1.4.	Resultados y discusión .....	29
1.1.4.1.	Estimación temperaturas .....	29
1.1.4.2.	Estimación radiación global .....	29
1.1.4.3.	Estimación de la evapotranspiración potencial .....	33
	<u>RESUMEN</u> .....	35
	<u>CAPITULO II</u> .....	37
	METODOS DE ANALISIS PARA EL ESTUDIO DE LAS CONDICIONES HIDRICAS ...	37
1.1.	Introducción .....	37
1.2.	Técnicas agroclimáticas propuestas para el estudio de las condiciones hídricas .....	38
1.2.1.	Análisis frecuencial de lluvias .....	38

1.2.1.1. Determinación del período de cultivo .....	39
1.2.1.2. Determinación de la fecha de siembra de los cultivos anuales .....	40
1.2.2. Balance hídrico climático .....	48
1.2.3. Balance hídrico teórico .....	51
RESUMEN .....	63
CAPITULO III .....	63
DEFINICION DE LOS INDICES DE PRODUCCION POTENCIAL .....	65
1.1. Introducción .....	65
1.2. Antecedentes .....	65
1.3. Materiales y métodos .....	68
1.3.1. Descripción general del modelo de producción de biomasa ..	69
1.3.1.1. Producción neta y bruta de biomasa .....	69
1.3.1.2. Tasa máxima de producción de biomasa .....	70
1.3.1.3. Coeficiente de respiración del cultivo .....	74
1.3.2. Índice de rendimiento .....	75
<u>RESUMEN</u> .....	85
<u>CAPITULO IV</u> .....	87
ESTUDIO DE LAS CONDICIONES FISIOEDAFICAS, SINTESIS CARTOGRAFICA y PRESEN TACION DE LOS RESULTADOS FINALES .....	87
1. Introducción .....	87
2. Análisis de las variables fisioedáficas .....	87
3. Síntesis cartográfica y presentación de los resultados finales .....	89
RESUMEN .....	95
LITERATURA CITADA .....	97
ANEXO .....	103



**PARTE I**  
**PROBLEMATICA E INVESTIGACION PROPUESTA**



CAPITULO I  
ZONIFICACION AGROECOLOGICA DE CULTIVOS Y SU  
RELACION CON LA PLANIFICACION AGROPECUARIA

1.1 Justificación y Antecedentes

En los países en vías de desarrollo con una tradición agrícola más reciente, que la de los países del viejo continente, hay regiones en las cuales no se conoce su verdadero potencial agrícola. Es decir, existen áreas geográficas que no están siendo explotadas y que de serlo se ignoran, los cultivos que devengarían la mayor utilidad desde el punto de vista económico y que a la vez estén acorde con una explotación racional de los recursos naturales. Además, en otras regiones el agricultor ha introducido cultivos que no son los más apropiados al medio agroecológico, obteniendo rendimientos de medios a marginales y en muchos casos deteriorándolo.

Por otra parte, generalmente, existen en estos países abundantes estudios socioeconómicos fundamentados en la teoría macro-económica y en el análisis de oferta y demanda, cuyos resultados señalan los diferentes cultivos que tienen las mejores perspectivas de exportación. Pero a pesar de estos estudios, los planes de desarrollo trazados solamente sobre una base macroeconómica no pueden dar resultados tan satisfactorios como aquellos que integren un marco de referencia biofísico, establecedor de los potenciales productivos de las áreas o regiones sobre las cuales va a recaer el planeamiento.

En los años sesenta se dieron a la luz una serie de programas acerca del estudio de los recursos para el desarrollo. Entre estos se destaca en América Tropical, el llevado a cabo por el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas en su Centro de Enseñanza e Investigación en Turrialba, Costa Rica.

Este tipo de programas generalmente recaban un volumen grande de información de todo tipo: suelos, clima, geología, hidrología, recursos socioeconómicos, etc. El problema fundamental, según García (1980), radicaba y radica en lograr una integración de la información que genere las respuestas

necesarias para una programación agropecuaria eficiente, que descansa en el conocimiento de la vocación productiva de las tierras.

Paralelamente a este tipo de actividades, muchas veces deficientes en su organización, por falta de una metodología operativa dirigida a resolver problemas típicos en dicha planificación del desarrollo, se encuentra una falta casi delictiva de exclusión de información biofísica, base fundamental para toda actividad agropecuaria. Posteriores estudios a principios de los setenta, con cierto nivel de integración, también llevados a cabo por el IICA en Turrialba, culminaron en proyectos concretos de regionalización (Aguirre, J. A. 1970 a y b; Quirós, R. 1969; Blanco, E. A., 1971), zonificación Agropecuaria (Armuelles, R. A., 1969) y zonificación de cultivos (IICA, 1971, a y b, Montoya, M; García, J. 1971), en distintos países.

Con niveles más o menos marcados de integración en lo que respecta a la evaluación de recursos naturales básicos para una planificación agropecuaria, se ha transitado en los últimos años en América Tropical y posiblemente en otras áreas similares bajo un punto de vista agroecológico. Recientemente, surgió un renovado interés por los denominados estudios integrados, (CIAF, 1974) y nuevas metodologías y enfoques son presentados, casi todos procedentes de países desarrollados interesados al respecto. Estos estudios integrados sin embargo, no llegan a concretarse en estudios más específicos como es la zonificación agroecológica de cultivos, dirigida fundamentalmente a ubicar áreas aptas para el desarrollo de los mismos y mucho menos a conjugar metodologías que permitan predecir el potencial productivo con cierto nivel de precisión.

Los estudios integrados, y el establecimiento de un marco de referencia biofísico fundamentado en ellos, para uso en planificación se basan en una gran cantidad de conceptos metodológicos sobre aspectos climáticos, edáficos, fisiográficos, geográficos, etc., complementarios a veces, que no es fácil tratar aún extensivamente, ni indicar cuales revisten mejores condiciones en cuanto a precisión para aplicarlos en planes de desarrollo. Lo anterior se debe a que estos enfoques no se fundamentan en procedimientos cuantitativos de análisis, y menos aún pueden ser dirigidos a cultivos específicos, impidiendo la comprobación y alcance de su precisión predictiva.

Si bien, los estudios denominados integrados alcanzan aspectos socioeconómicos, se abordan aquí, solo los aspectos integrados en el marco biofísico.

Algunos de los estudios del ambiente físico dentro de los integrados se fundamentan en sistemas de paisajes. Este es el enfoque de " Land System" (Christian y Stewart, 1966), donde se dividen las áreas en paisajes característicos, los cuales deberán relacionarse con distintos esfuerzos de desarrollo. Una evaluación fotográfica del área es imprescindible; distintos patrones fotográficos identificarán diferentes paisajes, pasando a la cartografía de estos " Land System ". Si un plan de desarrollo necesita del conocimiento predictivo del potencial productivo de áreas y cultivos específicos a cierto nivel de detalle el enfoque anterior, más apto para estudios preliminares, puede ayudar poco. Sin embargo, el enfoque paisajista llevado a niveles de abstracción mayores, puede ofrecer mejores perspectivas. Así Vinogradov (1967), en la Unión Soviética, al recomendar determinar áreas claves y perfiles de paisajes concretos trata de lograr una mayor precisión al respecto.

Otro enfoque clásico dentro de los estudios integrados corresponde al Centro de Estudios Fitosociológicos y Ecológicos de Montpellier (Francia) en el cual se le da a la cartografía fitoecológica una gran importancia para el uso de la planificación de la tierra, este enfoque, por el estudio más detallado que los anteriores en lo que respecta a clima, suelo, vegetación, etc., se acerca más convenientemente a una zonificación agroecológica de cultivos donde el objetivo prioritario es la búsqueda de las áreas aptas para el desarrollo de distintos cultivos (C.E.P.E., 1967).

Henry (1967) en un amplio documento, presenta una metodología con carácter universal para la detección de áreas aptas para el desarrollo agrícola, basada en lo que se denominó analogía agrobioclimática. Sin embargo, este enfoque solo es posible si todas las variables: Clima, suelo, vegetación, etc. son codificadas para ser comparadas y buscar relaciones más complejas; por ejemplo: (Tipos de clima, tipos de paisajes)X(tipos de suelos).

Los alcances de los anteriores trabajos y enfoques, excepto en niveles de abstracción especiales, presentan deficiencias para el establecimiento de planes de desarrollo que descansen en metas específicas y niveles de precisión aceptables. Estos niveles de precisión son exigidos, cada vez más por los

planificadores, y por ello se tratan de reforzar las técnicas ya conocidas, acerca de la zonificación agroecológica de cultivos, que en su concepción general podríamos justificar al igual que en 1971 (Montoya 1971, García, 1972) sin haber perdido su vigencia en absoluto, así:

Para percibir la importancia de la zonificación agroecológica de cultivos bastará hacer un breve análisis de algunas necesidades que se encuentran en la elaboración de planes y proyectos de desarrollo agropecuario, en cualquiera de sus niveles jerárquicos: Nacional, regional o de área específica.

El punto de partida es el análisis económico de los productos agropecuarios que se encuentran deficitarios, la balanza del mercado internacional y perspectivas de exportación de los mismos. Como resultado del diagnóstico de mercados se pueden elaborar listas de productos que tienen buenas perspectivas económicas para una expansión.

Sin embargo, no basta el establecimiento de estas listas de cultivos para poder hacer planes de fomento; la primera interrogante que se plantearán los planificadores será, sobre la localización de las áreas, que tengan condiciones ecológicas, adecuadas para estos cultivos; así se podrán formular las directrices necesarias para alcanzar las metas de expansión con una mayor seguridad y, por lo tanto, garantía del retorno de las inversiones.

Un segundo caso se refiere a planes de producción en áreas específicas, a este nivel es necesario determinar cuales son los cultivos que tienen las mejores perspectivas ecológicas, en función de los recursos biofísicos disponibles en el área. De ahí la utilidad de la zonificación para los planificadores que necesitan de la lista de los cultivos ecológicamente factibles, de la determinación de los espacios geográficos con recursos ecológicos adecuados para cada uno de ellos y el costo y mercadeo de productos, etc., como elementos indispensables para la toma de decisiones relativas a qué cultivo fomentar.

## 1.2. Planteamiento del problema

El problema latente de falta de información biofísica específica (suelo-clima-cultivo) para llevar a cabo planes de desarrollo agropecuario sobre bases firmes y sólidas, se agranda al contemplar un caos metodológico y de técnicas y procedimientos que tratan de solucionar independientemente problemas parciales. La falta de una estructura metodológica que agrupe técnicas para resolver problemas típicos del planificador moderno, es evidente.

Una estructura metodológica que se considere eficiente, debe contestar las preguntas básicas: ¿ dónde sembrar? ¿ cuándo? y ¿ cuál es el rendimiento potencial ?, además de incluir los análisis de riesgos ambientales de la producción.

Un problema que viene a agrandar la dificultad de disponer de tal estructura metodológica es la desigual calidad y cantidad de información existente; que de ser la estructura rígida en metodología, impedirá su aplicación sistemática en diferentes lugares.

La estructura metodológica que lleve a contestar las preguntas básicas del marco de referencia biofísico de una planificación eficiente, presentando, las áreas aptas para el desarrollo de los cultivos, su potencial productivo y sus riesgos de producción deberá ser flexible metodológicamente hablando, para ajustarse a la heterogénea calidad y cantidad de información. Lo anterior equivale a considerar distintos alcances y niveles de precisión para solucionar el ajuste anterior. Los niveles de precisión y el alcance deseado, deberían depender entonces:

- a) Del objetivo perseguido dentro de los niveles jerárquicos de la planeación : Nacional, regional y de área específica y b) de la calidad y cantidad de información existente.

### 1.3 Investigación propuesta

La investigación a realizar propone lograr una estructura metodológica para la zonificación de cultivos que sea capaz de resolver los problemas planteados. La jerarquización y clasificación de las áreas a zonificar debería fundamentarse, en este caso, en la construcción de una o varias funciones de producción que permitan conocer las tasas de incremento de los rendimientos para cada factor y variable empleadas en la ecuación. En la zonificación se tendrá que introducir la componente estocástica de la producción, dando de esta manera solución al problema de los rendimientos en el tiempo. De la misma manera esta investigación debería centrarse en la construcción de una estructura metodológica que por su versatilidad se ajuste a la heterogeneidad de la información existente.

### 1.4 Objetivos y alcances generales y específicos

La aplicación de la estructura metodológica se orienta a evaluar el potencial de las áreas aptas para el desarrollo de los cultivos de secano o temporal.

Estas áreas aptas deberán ser clasificadas y jerarquizadas en función de un gradiente marginal-óptimo de producción y presentadas a distintas escalas de acuerdo al nivel de precisión exigido y al número de preguntas a contestar.

Debido a la cantidad de análisis a efectuarse para llevar a cabo las zonificaciones antes mencionadas, se pueden contemplar objetivos específicos de esos análisis, de tipo: Climático, edáfico, estadístico, etc. Cada uno de estos análisis puede ser empleado para contestar nuevas preguntas en la planeación, constituyendo sus objetivos específicos. El objetivo general deseado puede ser por ejemplo, detectar las áreas aptas para el cultivo del maíz en una gran región, con un alcance dado, para ello. Sin embargo, un análisis especial complementario que forma parte de la metodología general para lograr la zonificación, como puede ser la detección de probabilidades de lluvia, puede ser usado para un análisis de riesgo de sequías con fines de seguro agrícola, convirtiéndose en un objetivo específico.

En resumen, los objetivos perseguidos en la investigación se pueden sintetizar así:

#### OBJETIVOS GENERALES

Crear una estructura metodológica que se ajuste al nivel de la información existente en los países en vías de desarrollo y que integre el análisis del clima en relación con la producción agrícola.

Lograr la jerarquización y clasificación de las áreas zonificadas por el conocimiento del potencial productivo de las mismas.

Lograr una zonificación que, con base en el estudio del medio agroecológico pueda ajustarse a los planes de desarrollo a cualquiera de sus niveles jerárquicos: Nacional, regional o de área específica.

### Objetivos específicos

- 1) Crear los procedimientos y metodologías necesarias para el análisis de las variables, tanto agroclimáticas como edáficas, de múltiples usos en planeación agroecológica a macro y micro escalas.
- 2) Lograr el establecimiento de funciones de producción que con variables de fácil consecución permitan obtener una precisión aceptable en la predicción del rendimiento.
- 3) Introducir la componente estocástica del proceso productivo en la determinación de potenciales de rendimiento para conocer la distribución probabilística de los mismos en el tiempo.
- 4) Presentar ajustes y procedimientos metodológicos para la eliminación de parte de la incertidumbre en la toma de las decisiones vinculadas con el quehacer agrícola.



## CAPITULO II

### ESTRUCTURA METODOLOGICA

#### 2.1 Diseño polietápico de la estructura metodológica

Con el objeto de lograr una mejor presentación de la estructura metodológica se ha dividido ésta en etapas operativas, las cuales posteriormente serán analizadas por separado en lo que respecta a las metodologías necesarias para su elaboración y los resultados obtenidos.

Las etapas consideradas son las siguientes:

Primera etapa: Obtención de información en fuentes secundarias (definición de los requerimientos agroecológicos de los cultivos).

Segunda etapa: Constitución de un banco de datos meteorológicos y estimación de los elementos climáticos deficitarios para el área en estudio.

Tercera etapa: Estudio y análisis de las condiciones hídricas.

- a) Evapotranspiración
- b) Balance hídrico potencial (escala macroclimática)
- c) Análisis frecuencial de lluvias (escala macroclimática)
- d) Balance hídrico teórico (escala macroclimática o escala topoclimática y la posibilidad de llevar este tipo de balance al estudio del microclima, que influye sobre la incidencia de ciertos patógenos en los cultivos).

Cuarta etapa: Definición de los índices de potencialidades de producción y su expresión cartográfica.

- a) Función de producción de biomasa
- b) Índice sobre el rendimiento final

Quinta etapa: Análisis de la información fisioedáfica

Sexta etapa: Síntesis cartográfica sucesiva

Séptima etapa: Presentación de los resultados finales

El seguimiento de las siete etapas anteriores darán como resultado la zonificación agroecológica del cultivo en estudio (Figura 1)

## 2.2. Actividades y Subactividades de cada etapa

La ejecución de las distintas etapas necesitan de múltiples labores y procedimientos metodológicos que dificultan su presentación conjunta y necesitan para una mejor comprensión su realización por separado.

En las actividades se contemplan las principales labores a realizar por etapa y que se consideran imprescindibles para el buen fin de la misma. En las subactividades se contemplan los procedimientos metodológicos que hacen posible la realización de las principales labores o actividades. Algunas subactividades, pueden ser comunes para varias actividades, debiendo siempre prevalecer el criterio de seleccionar subactividades que cumplan requisitos de eficiencia, rapidez y confiabilidad.

### 2.2.1 Primera etapa. Obtención de información en fuentes secundarias

Esta etapa no contempló subdivisión en actividades principales.

Se refiere fundamentalmente a la recopilación de información para llevar a cabo la zonificación agroecológica propuesta.

En este caso todo material procede de fuentes secundarias. En general existe una gran cantidad de información dispersa en archivos de distintas instituciones que pudiera usarse para zonificaciones de cultivos a distintos niveles de precisión. Las experiencias llevadas a cabo en distintos países por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (Aguirre, J.A. 1970 a, IICA, 1971 a ) confirman lo anterior,

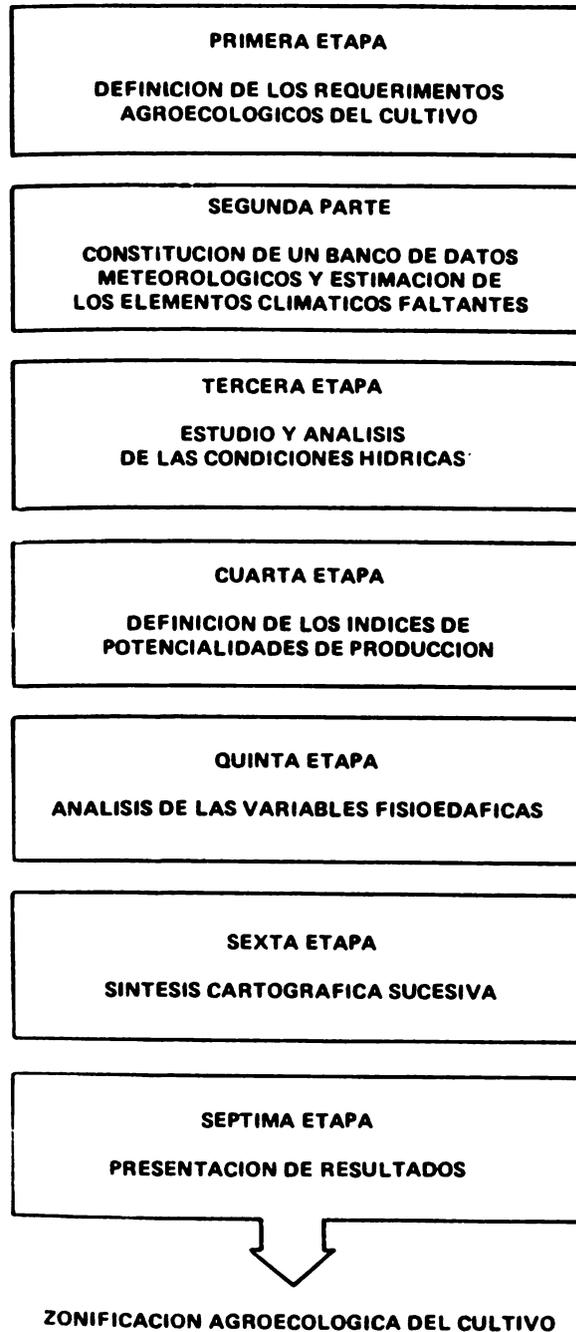


Fig. 1. Etapas del esquema metodológico necesarias para la zonificación agroecológica de cultivos.

no obstante, puede ser necesario si se quisiera elaborar un proyecto de zonificación más completo y preciso, realizar estudios fisioedáficos, fisiográficos y aún estudios mesoclimáticos para lograr mayor precisión y uniformidad interna del proyecto. En casos extremos de ausencia de información los estudios anteriores serán imprescindibles (fuentes primarias).

2.2.2 Segunda etapa. Constitución de un banco de datos meteorológicos y estimación de los elementos climáticos deficitarios para el área en estudio.

Aún cuando en la mayoría de los países en vías de desarrollo existen instituciones encargadas de recopilar la información meteorológica, ésta lamentablemente no se encuentra en forma que pueda ser directamente accesible por los medios informáticos modernos. Por esta razón, en estos casos será necesario dedicarse a la tediosa tarea de elaborar un banco de datos meteorológicos para ser usado en los estudios agroclimáticos y de zonificación de cultivos.

Otra situación real que se presenta en nuestros países es la deficiente información meteorológica disponible. Por lo general, la red de estaciones es de poca densidad y de deficiente distribución. Otro factor que obliga a recurrir a los métodos de estimación es que un alto porcentaje de las estaciones de registro son de cuarto orden, o sea, que realizan solamente mediciones de la precipitación. Por medio de diversas técnicas se deberán estimar, para las localidades con registros parciales, los otros elementos meteorológicos necesarios para los análisis agroclimáticos. Las principales actividades y subactividades contempladas en esta parte de la segunda etapa son:

#### Actividades

- 1) Recolección de la información meteorológica existente en las diferentes instituciones (Instituto Meteorológico, Universidades, instituciones privadas).
- 2) Selección de las variables climáticas (precipitación, temperaturas máximas y mínimas, velocidad del viento, radiación, etc.) según el problema planteado y el cultivo en estudio.
- 3) Estimación de las temperaturas máximas, mínimas y medias.

- 4) Estimación de la radiación
- 5) Estimación de la evapotranspiración

### Subactividades

Aplicación de metodologías para lograr:

- 1) Revisión de los datos meteorológicos
- 2) Verificación de la homogeneidad de la serie, y si es necesario, deben rellenas las lagunas que en ella existan.
- 3) Selección del mejor modelo práctico asequible
- 4) Criterios de selección de variables independientes

#### 2.2.3 Tercera etapa. Estudio y análisis de las condiciones hídricas

El factor del clima que presenta la mayor variación interanual en los países de la zona intertropical es la precipitación. Esta juega un papel importante en el nivel de la reserva hídrica del suelo y por lo tanto, influye en la cantidad de agua disponible para las plantas. Los otros factores del clima (temperatura, radiación, viento, etc.) susceptibles de intervenir en el proceso de evapotranspiración, presentan una menor variación interanual. En esta etapa se proponen tres métodos diferentes para analizar las condiciones hídricas de las distintas regiones del país. Cada método propuesto corresponde a un nivel de precisión cuyo grado estará definido por los objetivos del estudio y por la disponibilidad de información en la región bajo análisis .

Las principales actividades de la tercera etapa son:

#### Actividades

- 1) Cálculo de evapotranspiración potencial (ETP)
- 2) Estudio del balance hídrico
- 3) Determinación de las fechas de siembra y cosecha para los cultivos en régimen de secano.
- 4) Estudio del riesgo de sequía

### Subactividades

Metodologías para lograr:

- 1) Estimación del nivel de evapotranspiración real (ETR)
- 2) Análisis frecuencial de la lluvia en relación a la ETP, ETP/2 y 2ETP.
- 3) Algoritmo de un modelo de balance hídrico teórico
- 4) Algoritmos para el cálculo del número de días consecutivos secos y su frecuencia de ocurrencia.

2.2.4. Cuarta etapa. Definición de los índices de producción potencial y su expresión cartográfica.

Para la definición del potencial productivo de las diferentes regiones se empleará una función de producción que involucra las principales variables del clima con el proceso de formación de materia seca. Esto es, se introducen las leyes de la física en los procesos biológicos que rigen la producción vegetal: Fotosíntesis, respiración, evapotranspiración, etc.

Por otro lado se hará necesario, para algunos cultivos relacionar el rendimiento final (parte del cultivo con interés económico) con los factores del clima.

### Actividades

- 1) Cálculo de la función de producción potencial
- 2) Cálculo del índice de rendimiento final
- 3) Análisis e interpretación de los campos escalares (mapas de isolíneas).

### Subactividades

Aplicación de metodologías para:

- 1) Definición de las variables climáticas necesarias para la función de la producción potencial.
- 2) Selección del mejor modelo de ajuste
- 3) Selección de la escala de los mapas

- 4) Elaboración de programas de cómputo para el cálculo de los índices de producción potencial.
- 5) Elaboración de regresiones múltiples de los índices de producción con variables geográficas (altitud, latitud y longitud).

#### 2.2.5. Quinta etapa. Análisis de la información fisioedáfica

La información fisioedáfica empleada en este trabajo procede de fuentes secundarias. El análisis consiste en reclasificar en varias categorías los mapas de suelos disponibles. Estas categorías indicarán el tipo o clase de suelo en función del potencial productivo estudiado.

##### Actividades

- 1) Reclasificación de los tipos de suelo en relación al potencial productivo del cultivo analizado.

#### 2.2.6 Sexta etapa. Síntesis Cartográfica sucesiva

La síntesis cartográfica como su nombre lo indica, es la superposición y síntesis sucesiva de los mapas elaborados en las etapas anteriores. Siendo discriminadas aquellas áreas del territorio a zonificar que no son contempladas por los índices de producción potencial y por el mapa de variables fisioedáficas

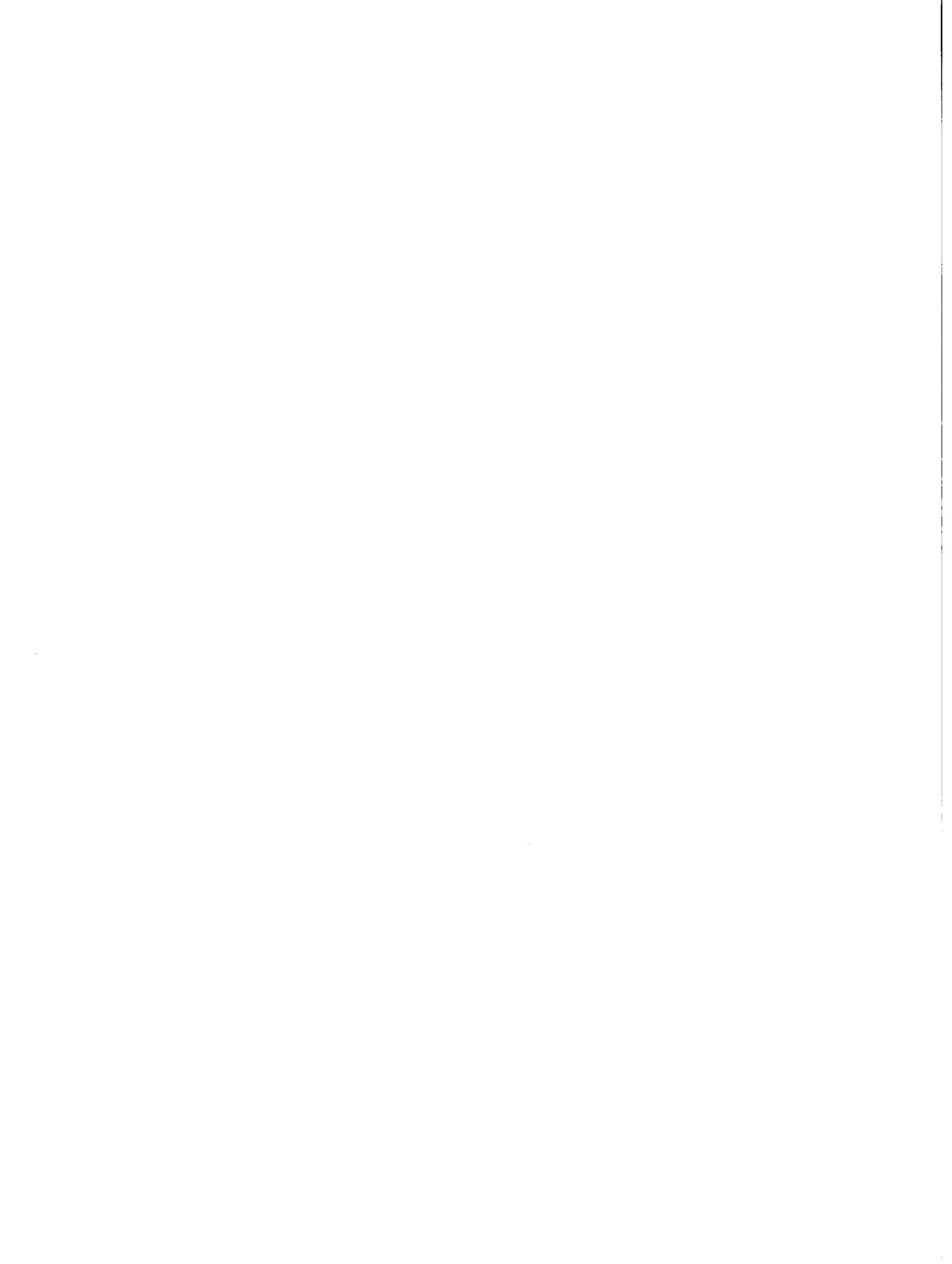
##### Actividades

- 1) Ajuste de escala de los diferentes mapas
- 2) Sobreposición manual o por algún medio computarizado de los mapas

#### 2.2.7. Séptima etapa. Presentación de los resultados finales del estudio de zonificación agroecológica.



PARTE II  
TECNICAS AGROCLIMATICAS Y ZONIFICACION AGROECOLOGICA  
DE CULTIVOS



## CAPITULO I

### GENERACION DE MODELOS DE ESTIMACION DE VARIABLES CLIMATICAS

#### 1.1. Modelos climáticos a macro y meso escalas

##### 1.1.1. Introducción

En la mayoría de las regiones tropicales de los países en vías de desarrollo, la estimación de variables climáticas es una necesidad imprescindible debido a la falta de redes suficientemente densas de estaciones meteorológicas.

A macro y meso escalas y para la información disponible, deben generarse modelos que permitan la estimación confiable de los principales elementos faltantes, en función de otros elementos y factores climáticos de sitio, manteniendo relaciones lógicas entre ellos.

Los parámetros que conformarán las variables predictoras deben ser:

- Observados en el área en estudio con suficiente densidad o,
- de fácil estimación en base a otros parámetros observados
- de alto poder discriminatorio de la respuesta
- de relación lógica con la variable de respuesta.

Aquí se hará énfasis en la estimación de elementos tales como: Temperatura media, temperatura diurna, duración de la insola-  
ción, radiación global y evapotranspiración potencial.

La extrapolación geográfica de modelos generados en otras latitudes y aún en las mismas, pero bajo situaciones de macrotiempo reinante distinto, presenta dificultades en cuanto a la baja confiabilidad obtenida. Una función empírica obtenida in situ

presentará siempre mejor ajuste entre valores observados y calculados que que otra realizada en otro ámbito de la superficie de respuesta.

El principal problema consiste en lograr extrapolabilidad confiable del modelo empírico generado in situ y para subsanar esto se debe tratar de lograr funciones empíricas generalizadas, mediante la introducción en los modelos de factores de sitio inherentes a cada lugar, que junto con los parámetros predictores permitan obtener:

- a) Un modelo generado in situ de alta confiabilidad.
- b) Un límite de extrapolabilidad geográfica amplio y ajustado a varias situaciones climáticas.

### 1.1.2 Antecedentes

Debido a la falta de elementos del clima observados se recurre con frecuencia a su estimación. La literatura universal es muy amplia al respecto, sobre todo en lo referente a la estimación de la evaporación y de la evapotranspiración (Thornthwaite, 1957, Turc, 1961, Hargreaves, 1977).

La gran mayoría de los modelos generados para estimar la evaporación presentan un verdadero caos de valores observados al efectuar comparaciones entre los mismos. Lo anterior se debe principalmente a que la mayoría son modelos empíricos encontrados a través del estudio de valores observados en un ámbito estrecho de superficie de respuesta. Su confiabilidad por lo tanto, suele ser aceptable cuando las comparaciones entre valores observados y calculados se realizan in situ, pero en la mayoría su capacidad de extrapolación es mínima. Otra causa importante que ocasiona esta variación entre cálculos parecidos de evapotranspiración potencial (ETP) es la adopción de hipótesis simplificadoras que subestiman la variación de uno u otro de los factores climáticos susceptibles de intervenir; a saber:

- la radiación neta, resultado del balance entre la radiación global solar, la radiación de la atmósfera y la de la tierra.
- La temperatura del aire: Consecuencia directa de ese balance
- El déficit de saturación ( $e_w - e$ )
- Los movimientos de aire, tanto verticales como horizontales, responsables de los cambios por conducción, convección y turbulencia.

### 1.1.3 Materiales y Métodos

Se tomó la división de Costa Rica en regiones físico-geográficas realizada por el Instituto Meteorológico Nacional, para hacer el análisis y las estimaciones de tipo agroclimático por región homogénea (Figura 2). Además, se empleó una base de tiempo del orden de diez días para estudiar cada variable climática.

El análisis de los datos se realizó en el Centro de Cómputo del IICA, el cual cuenta con un IBM-4331. Los programas de cálculo fueron escritos en FÓRTRAN IV, además, para el análisis estadístico se utilizó el paquete SAS (Statistical Analysis System). Los datos meteorológicos de entrada fueron: La precipitación diaria, temperaturas máxima y mínima y la duración de la insolación, que se encuentran en el banco de datos agroclimáticos de Costa Rica (Rojas, O.E. *et al* 1982). Dicho banco de datos contiene la información meteorológica de 101 estaciones, de las cuales 72 tienen registros diarios de la precipitación, 54 registran las temperaturas máxima y mínima diarias y 22 el brillo solar. Es importante señalar que la mayoría de las estaciones que registran la precipitación fueron seleccionadas por presentar al menos 20 años de registro y por una adecuada ubicación en el territorio nacional. Las coordenadas de dichas estaciones aparecen en el Cuadro 1.

#### 1.1.3.1. Estimación de la temperatura

Las técnicas frecuentemente empleadas para la estimación de la temperatura son:

- 1) Interpolación de isotermas reales
- 2) Cálculo de la temperatura en función de la ecuación altotérmica (modelo lineal), para un gradiente medio regional y temperatura al nivel del mar constante.

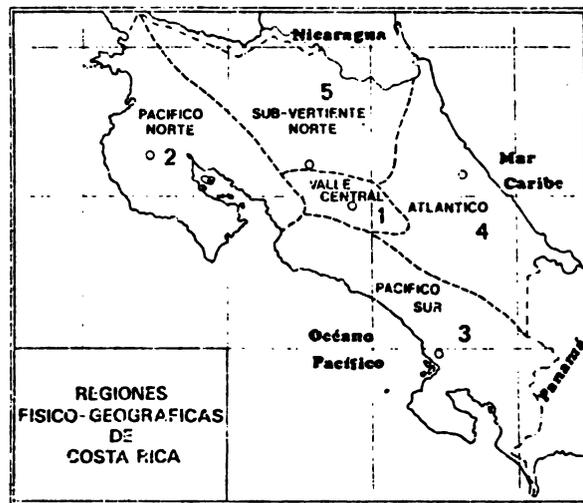


Fig.2 - División en regiones físico-geográficas de Costa Rica, Instituto Meteorológico Nacional

CUADRO 1

ESTACIONES METEOROLOGICAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO AGROCLIMATICO

CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACION	UBICACION		ELEVACION	TIPO
		LAT. NORTE	LON. OESTE		
69503	Puerto Viejo, Sarapiquí	10 28	84 01	37	6
69506	San Miguel, Sarapiquí	10 19	84 11	500	1
69508	Chilamate	10 27	84 04	60	5
69510	Ciudad Quesada	10 20	84 26	650	1
69511	Los Ensayos	10 18	84 29	1 090	1
69512	Zarcero	10 11	84 24	1 736	1
69513	Los Llanos	10 28	84 21	100	1
69514	Arenal	10 28	84 51	520	5
69515	Quebrada Azul	10 24	84 28	83	5
69528	Palmira	10 13	84 23	2 010	3
69530	La Marina, S.C.	10 22	84 23	380	1
69531	Hacienda Orosí	10 57	85 33	350	1
69533	Barra del Colorado	10 46	83 35	5	1
69535	C. Rural Metodista	10 21	84 24	600	4
69538	Upala	10 54	85 01	50	1
69551	Guatuso	10 41	84 49	50	5
72101	Nicoya	10 05	85 27	120	0
72105	Colonia Carmona	10 00	85 15	100	1
72106	Santa Rosa	10 50	85 37	315	3
72107	Lepanto, Naranjo	9 58	85 02	50	1
72114	Playa Panamá	10 35	85 40	3	5
73009	El Cairo, Siquirres	10 07	83 32	60	1
73010	Turrialba	9 53	83 38	602	0
73011	Sanatorio Durán	9 56	83 53	2 337	1
73013	Los Diamantes	10 13	83 46	249	0
73015	La Maruja	9 47	83 51	1 100	1
73018	El Guarco	9 50	83 58	1 400	2
73022	Pacayas	9 55	83 49	1 735	6
73024	Paraíso, Cartago	9 50	83 52	1 380	1
73033	Villa Mills	9 34	83 43	3 000	6
73046	Cachí	9 49	83 48	1 018	5
73078	Coliblanco	9 57	83 48	2 200	3
73080	Repetidora, C. Muerte	9 33	83 44	3 365	5
73081	Irazú	9 59	83 51	3 400	0
73082	Cobal	10 15	83 40	55	3
73091	Hacienda El Carmen	10 12	83 29	15	3
74002	Filadelfia	10 26	83 35	17	1
74003	Santa Cruz	10 16	85 35	54	2
74004	Quebrada Grande	10 51	85 30	366	1
74006	La Guinea	10 25	85 28	40	4
74020	Liberia	10 36	85 32	85	0
76002	Tilarán	10 28	84 58	562	2

.../...

CUADRO 1 (Continuación)

CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACION	UBICACION		ELEVACION	TIPO
		LAT. NORTE	LON. OESTE		
76005	Cañas, Pacífica	10 25	85 05	95	0
76008	Taboga	10 21	85 09	40	0
76011	Hacienda Guayabo	10 42	85 14	550	1
76034	Fortuna	10 41	85 12	430	5
77002	La Lola	10 06	83 23	40	0
78001	Las Juntas, Abangares	10 17	84 58	140	5
78002	Monteverde	10 20	84 50	1 380	6
78003	Puntarenas	9 58	84 50	3	0
79005	Moravia, Chirripó	9 50	83 26	1 200	1
80002	San Miguel, Barranca	10 00	84 42	140	2
81003	Limón	10 00	83 03	5	0
82002	Tivives	9 52	84 42	25	5
84001	San José	9 56	84 05	1 172	0
84003	La Argentina	10 02	84 21	760	1
84004	Atenas	9 59	84 23	696	1
84005	Avances, Tres Ríos	9 56	83 58	1 870	1
84006	Hacienda Concepción	9 55	84 00	1 320	1
84007	Coronado	9 59	84 00	1 382	1
84011	Lornessa, Santa Ana	9 56	84 11	909	1
84012	Turrúcares	9 58	84 19	639	6
84014	Palmares	10 03	84 26	1 017	1
84015	San Joaquín Flores	10 00	84 09	1 050	1
84016	B. Pilas Naranjo	10 06	84 23	1 042	1
84017	Los Andes, Orotina	9 55	84 31	224	1
84018	Rancho Redondo	9 58	83 57	1 480	1
84021	Juan Santamaría	10 00	84 12	932	0
84023	Fabio Baudrit	10 01	84 16	840	0
84024	S. Rafael Ojo de Agua	9 56	84 13	850	1
84034	La Garita	9 57	84 21	460	5
84040	Alto Ochomogo	9 54	83 57	1 546	1
84046	San Josecito, Heredia	10 02	84 02	1 450	4
84074	Pavas Aeropuerto	9 58	84 08	1 132	3
84075	Coop. Café, Naranjo	10 07	84 23	1 100	4
85001	Pandora	9 45	82 57	17	5
85004	Finca 16	9 42	82 59	30	6
86001	Herradura	9 40	84 38	3	1
88001	Puriscal	9 51	84 19	1 102	0
88004	Finca Palo Seco	9 32	84 18	15	1
88005	San Ignacio Acosta	9 48	84 10	1 095	1
88015	Playón	9 38	84 18	65	5
90001	Pocares	9 31	84 15	6	1
90003	Quepos	9 26	84 09	5	1
90005	Cerros	9 30	84 09	5	1
92001	Bartolo	9 26	84 06	10	1
92002	Llorona	9 24	84 05	10	1
98002	Palmar Sur	8 57	83 28	16	0

.../...

CUADRO 1 (Continuación)

CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACION	UBICACION		ELEVACION	TIPO
		LAT. NORTE	LON. OESTE		
98004	San Isidro General	9 22	83 42	703	1
98007	San Vito de Java	8 50	82 59	890	1
98010	Cedral	9 22	33 33	1 450	6
98011	Bolivia	9 11	83 38	950	5
98012	Potrero Grande	9 01	83 11	183	5
98013	Río Negro	8 53	82 52	955	5
98022	La Piñera	9 11	83 20	350	3
98028	Volcán Angel	9 14	83 27	450	6
100008	Finca 8	8 55	83 30	8	1
100034	Golfito	8 39	83 11	15	6
100035	Coto 47	8 36	82 59	8	1
100078	Caucho	8 27	82 56	25	1

TIPO 0 = Estaciones con registros diarios de precipitación, temperaturas y brillo solar.

TIPO 1 = Estaciones con registros diarios de la precipitación.

TIPO 2 = Estaciones con registros diarios de la precipitación y las temperaturas.

TIPO 3 = Estaciones con registros diarios de las temperaturas y el brillo solar.

TIPO 4 = Estaciones con registros diarios de las temperaturas.

TIPO 5 = Estaciones con registros mensuales de las temperaturas.

TIPO 6 = Estaciones con registros diarios de la precipitación y registros mensuales de las temperaturas.

- 3) Cálculo de la temperatura en función de un gradiente mediano y temperatura al nivel del mar variable.

En este caso se seleccionó a priori la alternativa 2, con el objetivo de tener una expresión matemática que estuviera de acorde a la metodología de zonificación.

La ecuación altotérmica es:

$$T = b_0 - b_1 AL$$

donde:  $b_1 = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta AL} = \frac{dT}{dAL}$

El gradiente térmico corresponde al coeficiente de regresión  $b_1$ , es decir, el incremento de la variable independiente,  $b_0$  corresponde entonces a la temperatura al nivel del mar (AL).

Este tipo de relación fue utilizada para estimar la temperatura diurna ( $\theta$ ) y diaria (t), que se obtiene a partir de las temperaturas máxima (tx) y mínima (tn), para cada década del año, ya que éstas son empleadas en el cálculo de la evapotranspiración potencial.

$$\theta = \frac{2 tx + tn}{3} \quad t = \frac{tx + tn}{2}$$

La misma ecuación altotérmica puede usarse para la estimación de las temperaturas máximas medias (tx) y mínimas medias (tn).

### 1.1.3.2. Estimación de la radiación global

Para la estimación de la radiación global ( $R_g$ ) la fórmula más empleada es la de tipo Black-Prescott:

$$R_g/R_{go} = a + b \left( \frac{n}{N} \right)$$

con:

$R_g$ : Radiación global diaria

$R_{go}$ : Radiación solar al tope de la atmósfera

$n$ : Duración de la insolación

$N$ : Duración astronómica del día

$a$  y  $b$ : Coeficientes empíricos específicos de la región considerada y determinados estadísticamente. Los valores escogidos para los estudios en Costa Rica.

$$a = 0.23 \text{ y } b = 0.46$$

Sin embargo, una limitante importante que se encontró es la escasez, de estaciones meteorológicas que registren la duración de la insolación o brillo solar ( $n$ ). En este caso también se hizo necesario recurrir a estimaciones relacionando la duración de insolación con otros parámetros medidos.

### 1.1.3.3. Estimación de la evapotranspiración potencial (ETP)

Ante las limitaciones anotadas con anterioridad en relación al uso de modelos empíricos para calcular la evapotranspiración, surge la necesidad de utilizar una fórmula universal basada en los conceptos físicos del fenómeno. La fórmula desarrollada por Penman (1948) es la que goza de mayor aceptación mundial. Sin embargo, esta fórmula presenta el inconveniente de utilizar una gran cantidad de información que generalmente no se encuentra disponible en varias de las estaciones meteorológicas de nuestros países. Esto último se evidencia al querer realizar estudios a gran escala como la zonificación de cultivos. Por esta razón, nos inclinamos a utilizar la fórmula propuesta por Priestley y Taylor (1972), la cual

necesita un menor número de elementos meteorológicos y al igual que la de Penman, se fundamenta en las leyes de la física. La expresión general es:

$$ETP = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$$

ETP: Evapotranspiración potencial

$\Delta$  Pendiente de la curva que da la presión máxima de vapor de agua en función de la temperatura

$\gamma$  Constante psicométrica

R<sub>n</sub>: Radiación neta

G: Flujo de calor a nivel del suelo, representa aproximadamente un 5% de R<sub>n</sub>.

El término  $\Delta / (\Delta + \gamma)$  no tiene dimensión y varía con la temperatura del aire. Para un rango de temperaturas entre 10 y 30 °C, se puede estimar por medio de la fórmula siguiente:

$$\Delta / (\Delta + \gamma) = f(\theta) = 0.430 + 0.012 \theta$$

La fórmula de Priestley-Taylor se utiliza generalmente a nivel diario, siendo en este caso  $\theta$  el promedio de la temperatura diurna y R<sub>n</sub> la radiación neta diaria.

La radiación neta a nivel diario (R<sub>n</sub>) se determina a partir de la radiación global diaria (R<sub>g</sub>); ya que el cociente R<sub>n</sub>/R<sub>g</sub> es considerado como una constante para una región determinada, esto es R<sub>n</sub>/R<sub>g</sub> = c. Se puede emplear c = 0.60 para Costa Rica.

Es necesario señalar, que en regiones donde el viento alcanza velocidades importantes la fórmula de Priestley-Taylor subestimaré el valor de la ETP; al no incluir un término advectivo asociado a las características propias de la masa de aire. Este término advectivo es considerado por Penman en su fórmula y se le conoce como el poder evaporante del aire (E<sub>a</sub>).

Sin embargo, aunque estamos sacrificando precisión en el cálculo de la ETP ganamos información al poder calcular la evapotranspiración para un mayor número de estaciones.

#### 1.1.4. Resultados y discusión

##### 1.1.4.1. Estimación temperaturas

En los Cuadros del 2 al 6 se observan las ecuaciones alto-térmicas para la estimación de las temperaturas diurna ( $\theta$ ) y diaria ( $t$ ) para cada una de las regiones físicogeográficas de Costa Rica. Los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) oscilan, en un 80%, entre 0.75 y 0.99, siendo altamente significativos.

La altura es pues, una variable independiente que en el estudio es por sí sola suficiente para lograr las estimaciones de la temperatura.

##### 1.1.4.2. Estimación radiación global ( $R_g$ )

En el Cuadro 7 aparecen las ecuaciones de regresión para estimar la duración de la insolación en Costa Rica. El análisis, al igual que con las temperaturas, se hizo por región físico geográfica. Sin embargo, algunas de éstas no presentaron suficientes datos como para obtener una ecuación por región, por lo que se calculó una ecuación general a partir de todos los datos existentes y otra por región cuando existía suficiente información. Se probaron diversos modelos con varias variables (promedio temperatura diurna, promedio temperatura diaria, promedio precipitación, altitud, longitud, etc). Como resultado se obtuvo una correlación alta entre el promedio interanual por década del brillo solar y el promedio interanual por década de la precipitación. Una década constituye una observación, por lo que por cada estación se cuenta con 37 observaciones.

El modelo de mejor ajuste fue de tipo cuadrático. A partir de estos resultados y utilizando la fórmula de Black-Prescott se calcula para cada estación la radiación global ( $R_g$ ).

CUADRO 2

RELACION ENTRE LA ALTITUD (a) Y LAS TEMPERATURAS  
DIURNA (θ) Y DIARIA (t) 1.ª DECADA  
PARA LA REGION I - VALLE CENTRAL

DECA DA	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIURNA	r <sup>2</sup>	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIARIA	r <sup>2</sup>
1	θ = 31.53 - 0.0087 x a	0.93	t = 28.64 - 0.0075 x a	0.92
2	θ = 32.12 - 0.0092 x a	0.95	t = 29.21 - 0.0080 x a	0.94
3	θ = 32.39 - 0.0091 x a	0.94	t = 29.49 - 0.0081 x a	0.93
4	θ = 32.93 - 0.0097 x a	0.95	t = 29.93 - 0.0085 x a	0.94
5	θ = 33.59 - 0.0102 x a	0.94	t = 30.49 - 0.0089 x a	0.93
6	θ = 33.67 - 0.0099 x a	0.94	t = 30.56 - 0.0087 x a	0.93
7	θ = 33.73 - 0.0096 x a	0.92	t = 30.63 - 0.0084 x a	0.90
8	θ = 34.14 - 0.0099 x a	0.94	t = 30.98 - 0.0086 x a	0.93
9	θ = 33.26 - 0.0086 x a	0.93	t = 30.23 - 0.0076 x a	0.92
10	θ = 33.44 - 0.0091 x a	0.94	t = 30.39 - 0.0079 x a	0.94
11	θ = 32.95 - 0.0083 x a	0.91	t = 30.02 - 0.0071 x a	0.89
12	θ = 31.71 - 0.0072 x a	0.91	t = 29.00 - 0.0063 x a	0.90
13	θ = 31.16 - 0.0067 x a	0.92	t = 28.60 - 0.0059 x a	0.90
14	θ = 29.63 - 0.0054 x a	0.84	t = 27.32 - 0.0047 x a	0.81
15	θ = 28.81 - 0.0049 x a	0.89	t = 26.69 - 0.0044 x a	0.87
16	θ = 29.07 - 0.0056 x a	0.93	t = 26.90 - 0.0050 x a	0.91
17	θ = 28.42 - 0.0049 x a	0.88	t = 26.43 - 0.0045 x a	0.85
18	θ = 29.00 - 0.0055 x a	0.86	t = 26.88 - 0.0049 x a	0.83
19	θ = 29.25 - 0.0057 x a	0.84	t = 27.05 - 0.0049 x a	0.80
20	θ = 29.76 - 0.0063 x a	0.91	t = 27.52 - 0.0055 x a	0.89
21	θ = 29.31 - 0.0058 x a	0.89	t = 27.09 - 0.0051 x a	0.85
22	θ = 29.46 - 0.0060 x a	0.88	t = 27.15 - 0.0052 x a	0.84
23	θ = 28.99 - 0.0054 x a	0.85	t = 26.55 - 0.0046 x a	0.81
24	θ = 28.36 - 0.0051 x a	0.84	t = 26.16 - 0.0044 x a	0.81
25	θ = 27.95 - 0.0047 x a	0.86	t = 25.87 - 0.0042 x a	0.82
26	θ = 27.71 - 0.0046 x a	0.84	t = 25.65 - 0.0040 x a	0.80
27	θ = 27.52 - 0.0044 x a	0.85	t = 25.64 - 0.0041 x a	0.84
28	θ = 27.63 - 0.0045 x a	0.87	t = 25.72 - 0.0041 x a	0.82
29	θ = 27.66 - 0.0046 x a	0.86	t = 25.91 - 0.0043 x a	0.84
30	θ = 27.88 - 0.0049 x a	0.86	t = 25.97 - 0.0043 x a	0.84
31	θ = 28.27 - 0.0053 x a	0.86	t = 26.26 - 0.0048 x a	0.83
32	θ = 28.74 - 0.0059 x a	0.85	t = 26.56 - 0.0052 x a	0.82
33	θ = 29.18 - 0.0061 x a	0.84	t = 26.82 - 0.0054 x a	0.83
34	θ = 29.80 - 0.0069 x a	0.87	t = 27.29 - 0.0059 x a	0.84
35	θ = 30.84 - 0.0079 x a	0.90	t = 28.39 - 0.0067 x a	0.85
36	θ = 31.37 - 0.0088 x a	0.94	t = 28.60 - 0.0077 x a	0.91
37	θ = 31.57 - 0.0090 x a	0.94	t = 28.70 - 0.0077 x a	0.92

u = Altitud r<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación

CUADRO 3

RELACION ENTRE LA ALTITUD (a) Y LAS TEMPERATURAS  
DIURNA (θ) Y DIARIA (t) POR DECA DA PARA  
LA REGION II - PACIFICO NORTE

DECA DA	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIURNA	r <sup>2</sup>	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIARIA	r <sup>2</sup>
1	θ = 28.98 - 0.0082 x a	0.79	t = 27.04 - 0.0067 x a	0.76
2	θ = 29.23 - 0.0087 x a	0.87	t = 27.21 - 0.0072 x a	0.85
3	θ = 29.54 - 0.0093 x a	0.85	t = 27.44 - 0.0077 x a	0.86
4	θ = 29.91 - 0.0092 x a	0.84	t = 27.92 - 0.0079 x a	0.85
5	θ = 30.18 - 0.0097 x a	0.86	t = 28.11 - 0.0083 x a	0.87
6	θ = 30.29 - 0.0095 x a	0.75	t = 28.21 - 0.0082 x a	0.79
7	θ = 30.80 - 0.0091 x a	0.75	t = 28.74 - 0.0078 x a	0.75
8	θ = 31.18 - 0.0092 x a	0.69	t = 29.15 - 0.0082 x a	0.72
9	θ = 31.24 - 0.0081 x a	0.68	t = 29.12 - 0.0072 x a	0.73
10	θ = 31.27 - 0.0085 x a	0.71	t = 29.23 - 0.0077 x a	0.75
11	θ = 31.61 - 0.0090 x a	0.71	t = 29.63 - 0.0083 x a	0.74
12	θ = 31.05 - 0.0076 x a	0.62	t = 29.09 - 0.0069 x a	0.65
13	θ = 30.70 - 0.0070 x a	0.58	t = 28.82 - 0.0063 x a	0.59
14	θ = 30.20 - 0.0065 x a	0.50	t = 28.40 - 0.0059 x a	0.53
15	θ = 29.35 - 0.0056 x a	0.57	t = 27.71 - 0.0053 x a	0.61
16	θ = 28.65 - 0.0050 x a	0.54	t = 27.14 - 0.0048 x a	0.61
17	θ = 28.77 - 0.0060 x a	0.57	t = 27.22 - 0.0056 x a	0.59
18	θ = 28.86 - 0.0066 x a	0.60	t = 27.28 - 0.0059 x a	0.61
19	θ = 28.92 - 0.0065 x a	0.59	t = 27.31 - 0.0057 x a	0.59
20	θ = 28.97 - 0.0068 x a	0.58	t = 27.36 - 0.0059 x a	0.57
21	θ = 29.00 - 0.0067 x a	0.57	t = 27.36 - 0.0058 x a	0.57
22	θ = 29.11 - 0.0068 x a	0.59	t = 27.42 - 0.0058 x a	0.58
23	θ = 29.06 - 0.0069 x a	0.61	t = 27.39 - 0.0060 x a	0.61
24	θ = 28.67 - 0.0063 x a	0.60	t = 26.96 - 0.0055 x a	0.59
25	θ = 28.30 - 0.0053 x a	0.60	t = 26.63 - 0.0046 x a	0.53
26	θ = 28.41 - 0.0063 x a	0.63	t = 26.83 - 0.0056 x a	0.64
27	θ = 28.37 - 0.0060 x a	0.59	t = 26.85 - 0.0055 x a	0.62
28	θ = 28.06 - 0.0052 x a	0.51	t = 26.56 - 0.0047 x a	0.52
29	θ = 28.13 - 0.0053 x a	0.52	t = 26.63 - 0.0049 x a	0.54
30	θ = 28.08 - 0.0059 x a	0.50	t = 26.58 - 0.0053 x a	0.52
31	θ = 28.14 - 0.0054 x a	0.48	t = 26.56 - 0.0048 x a	0.49
32	θ = 28.05 - 0.0056 x a	0.45	t = 26.46 - 0.0049 x a	0.44
33	θ = 28.25 - 0.0058 x a	0.45	t = 26.57 - 0.0049 x a	0.41
34	θ = 28.36 - 0.0064 x a	0.48	t = 26.60 - 0.0053 x a	0.44
35	θ = 28.39 - 0.0065 x a	0.47	t = 26.58 - 0.0052 x a	0.39
36	θ = 28.34 - 0.0068 x a	0.67	t = 26.42 - 0.0054 x a	0.64
37	θ = 29.05 - 0.0083 x a	0.87	t = 27.05 - 0.0066 x a	0.81

u = Altitud r<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación

CUADRO 4

RELACION ENTRE LA ALTITUD (a) Y LAS TEMPERATURAS  
DIURNA (θ) Y DIARIA (t) POR DECADA PARA  
LA REGION III - PACIFICO SUR

DECADA	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIURNA	r <sup>2</sup>	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIARIA	r <sup>2</sup>
1	θ = 29.53 - 0.0068 x a	0.97	t = 27.32 - 0.0064 x a	0.97
2	θ = 29.72 - 0.0068 x a	0.98	t = 27.39 - 0.0063 x a	0.97
3	θ = 30.08 - 0.0069 x a	0.97	t = 27.68 - 0.0065 x a	0.97
4	θ = 30.11 - 0.0069 x a	0.97	t = 27.72 - 0.0065 x a	0.96
5	θ = 30.27 - 0.0068 x a	0.95	t = 27.82 - 0.0064 x a	0.96
6	θ = 30.52 - 0.0069 x a	0.95	t = 28.04 - 0.0065 x a	0.96
7	θ = 30.57 - 0.0069 x a	0.95	t = 28.17 - 0.0065 x a	0.95
8	θ = 30.82 - 0.0068 x a	0.95	t = 28.41 - 0.0064 x a	0.96
9	θ = 30.72 - 0.0068 x a	0.96	t = 28.41 - 0.0064 x a	0.96
10	θ = 30.63 - 0.0067 x a	0.96	t = 28.39 - 0.0064 x a	0.96
11	θ = 30.59 - 0.0067 x a	0.96	t = 28.45 - 0.0064 x a	0.96
12	θ = 30.19 - 0.0066 x a	0.96	t = 28.17 - 0.0063 x a	0.96
13	θ = 30.05 - 0.0065 x a	0.96	t = 28.08 - 0.0063 x a	0.96
14	θ = 29.84 - 0.0067 x a	0.97	t = 27.98 - 0.0064 x a	0.97
15	θ = 29.46 - 0.0064 x a	0.97	t = 27.66 - 0.0062 x a	0.97
16	θ = 29.43 - 0.0064 x a	0.97	t = 27.60 - 0.0061 x a	0.97
17	θ = 29.19 - 0.0064 x a	0.97	t = 27.41 - 0.0061 x a	0.97
18	θ = 29.22 - 0.0064 x a	0.98	t = 27.44 - 0.0061 x a	0.97
19	θ = 29.17 - 0.0063 x a	0.97	t = 27.37 - 0.0061 x a	0.97
20	θ = 29.30 - 0.0065 x a	0.98	t = 27.47 - 0.0062 x a	0.97
21	θ = 29.70 - 0.0064 x a	0.98	t = 27.36 - 0.0061 x a	0.97
22	θ = 29.11 - 0.0063 x a	0.97	t = 27.27 - 0.0060 x a	0.97
23	θ = 29.02 - 0.0063 x a	0.96	t = 27.16 - 0.0059 x a	0.95
24	θ = 28.92 - 0.0063 x a	0.96	t = 27.10 - 0.0060 x a	0.96
25	θ = 28.93 - 0.0064 x a	0.97	t = 27.22 - 0.0061 x a	0.96
26	θ = 28.05 - 0.0066 x a	0.97	t = 27.27 - 0.0062 x a	0.96
27	θ = 28.85 - 0.0064 x a	0.97	t = 27.09 - 0.0061 x a	0.96
28	θ = 28.81 - 0.0064 x a	0.97	t = 27.05 - 0.0061 x a	0.96
29	θ = 28.74 - 0.0065 x a	0.97	t = 26.97 - 0.0061 x a	0.96
30	θ = 28.70 - 0.0064 x a	0.97	t = 26.94 - 0.0061 x a	0.96
31	θ = 28.82 - 0.0065 x a	0.97	t = 27.06 - 0.0062 x a	0.96
32	θ = 28.75 - 0.0065 x a	0.97	t = 27.00 - 0.0061 x a	0.96
33	θ = 29.02 - 0.0066 x a	0.97	t = 27.20 - 0.0063 x a	0.96
34	θ = 29.11 - 0.0067 x a	0.97	t = 27.27 - 0.0064 x a	0.96
35	θ = 29.20 - 0.0067 x a	0.97	t = 27.27 - 0.0064 x a	0.96
36	θ = 29.40 - 0.0068 x a	0.98	t = 27.33 - 0.0064 x a	0.97
37	θ = 29.52 - 0.0068 x a	0.98	t = 27.35 - 0.0064 x a	0.97

CUADRO 5

RELACION ENTRE LA ALTITUD (a) Y LAS TEMPERATURAS  
DIURNA (θ) Y DIARIA (t) POR DECADA PARA  
LA REGION IV - ATLANTICO

DECADA	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIURNA	r <sup>2</sup>	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIARIA	r <sup>2</sup>
1	θ = 26.22 - 0.0052 x a	0.98	t = 24.46 - 0.0051 x a	0.99
2	θ = 26.12 - 0.0052 x a	0.98	t = 24.43 - 0.0051 x a	0.99
3	θ = 26.25 - 0.0051 x a	0.98	t = 24.50 - 0.0050 x a	0.99
4	θ = 26.35 - 0.0052 x a	0.98	t = 24.58 - 0.0051 x a	0.99
5	θ = 26.16 - 0.0050 x a	0.97	t = 24.37 - 0.0049 x a	0.98
6	θ = 26.34 - 0.0050 x a	0.97	t = 24.56 - 0.0049 x a	0.98
7	θ = 26.88 - 0.0051 x a	0.98	t = 25.06 - 0.0050 x a	0.99
8	θ = 27.04 - 0.0050 x a	0.98	t = 25.30 - 0.0050 x a	0.98
9	θ = 27.28 - 0.0050 x a	0.98	t = 25.51 - 0.0050 x a	0.99
10	θ = 27.31 - 0.0050 x a	0.98	t = 25.58 - 0.0050 x a	0.99
11	θ = 27.56 - 0.0051 x a	0.98	t = 25.86 - 0.0051 x a	0.99
12	θ = 27.84 - 0.0052 x a	0.98	t = 26.09 - 0.0051 x a	0.99
13	θ = 28.16 - 0.0053 x a	0.99	t = 26.44 - 0.0052 x a	0.99
14	θ = 28.43 - 0.0054 x a	0.98	t = 26.69 - 0.0053 x a	0.99
15	θ = 28.52 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.78 - 0.0054 x a	0.99
16	θ = 28.19 - 0.0054 x a	0.99	t = 26.50 - 0.0053 x a	0.99
17	θ = 28.11 - 0.0054 x a	0.99	t = 26.43 - 0.0053 x a	0.99
18	θ = 27.81 - 0.0054 x a	0.98	t = 26.22 - 0.0053 x a	0.99
19	θ = 27.79 - 0.0054 x a	0.98	t = 26.23 - 0.0053 x a	0.99
20	θ = 27.43 - 0.0054 x a	0.98	t = 25.91 - 0.0053 x a	0.99
21	θ = 27.54 - 0.0054 x a	0.98	t = 25.97 - 0.0053 x a	0.99
22	θ = 27.38 - 0.0053 x a	0.98	t = 25.83 - 0.0052 x a	0.99
23	θ = 27.65 - 0.0054 x a	0.99	t = 26.03 - 0.0053 x a	0.99
24	θ = 27.97 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.28 - 0.0054 x a	0.99
25	θ = 28.11 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.35 - 0.0054 x a	0.99
26	θ = 27.93 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.25 - 0.0053 x a	0.99
27	θ = 28.03 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.26 - 0.0053 x a	0.99
28	θ = 28.00 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.29 - 0.0053 x a	0.99
29	θ = 27.93 - 0.0054 x a	0.99	t = 26.21 - 0.0053 x a	0.99
30	θ = 27.84 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.15 - 0.0053 x a	0.99
31	θ = 27.71 - 0.0055 x a	0.99	t = 26.01 - 0.0053 x a	0.99
32	θ = 27.26 - 0.0054 x a	0.98	t = 25.64 - 0.0053 x a	0.99
33	θ = 27.40 - 0.0055 x a	0.99	t = 25.73 - 0.0053 x a	0.99
34	θ = 27.13 - 0.0054 x a	0.99	t = 25.47 - 0.0053 x a	0.99
35	θ = 26.71 - 0.0053 x a	0.98	t = 25.08 - 0.0052 x a	0.99
36	θ = 26.39 - 0.0053 x a	0.98	t = 24.65 - 0.0052 x a	0.98
37	θ = 26.37 - 0.0052 x a	0.98	t = 24.57 - 0.0051 x a	0.99

CUADRO 6

RELACION ENTRE LA ALTITUD (a) Y LAS TEMPERATURAS  
DIURNA ( $\theta$ ) Y DIARIA (t) POR DECADA PARA  
LA REGION V - SUBVERTIENTE NORTE

DECADA	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIURNA	r <sup>2</sup>	ECUACION DE LA TEMPERATURA DIARIA	r <sup>2</sup>
1	$\theta = 26.48 - 0.0052 \times a$	0.97	$t = 24.89 - 0.0050 \times a$	0.97
2	$\theta = 26.46 - 0.0054 \times a$	0.97	$t = 24.84 - 0.0051 \times a$	0.96
3	$\theta = 26.56 - 0.0054 \times a$	0.97	$t = 24.91 - 0.0051 \times a$	0.97
4	$\theta = 26.62 - 0.0054 \times a$	0.97	$t = 24.96 - 0.0051 \times a$	0.97
5	$\theta = 26.78 - 0.0053 \times a$	0.97	$t = 25.03 - 0.0051 \times a$	0.96
6	$\theta = 27.19 - 0.0056 \times a$	0.97	$t = 25.40 - 0.0053 \times a$	0.97
7	$\theta = 27.33 - 0.0053 \times a$	0.97	$t = 25.51 - 0.0050 \times a$	0.97
8	$\theta = 27.97 - 0.0056 \times a$	0.97	$t = 26.09 - 0.0053 \times a$	0.97
9	$\theta = 28.15 - 0.0055 \times a$	0.97	$t = 26.25 - 0.0052 \times a$	0.97
10	$\theta = 28.26 - 0.0056 \times a$	0.97	$t = 26.38 - 0.0053 \times a$	0.97
11	$\theta = 28.52 - 0.0057 \times a$	0.96	$t = 26.61 - 0.0053 \times a$	0.96
12	$\theta = 28.59 - 0.0057 \times a$	0.96	$t = 26.70 - 0.0054 \times a$	0.96
13	$\theta = 28.62 - 0.0056 \times a$	0.96	$t = 26.74 - 0.0052 \times a$	0.96
14	$\theta = 28.68 - 0.0055 \times a$	0.96	$t = 26.83 - 0.0052 \times a$	0.95
15	$\theta = 28.62 - 0.0056 \times a$	0.97	$t = 26.80 - 0.0052 \times a$	0.96
16	$\theta = 28.54 - 0.0056 \times a$	0.97	$t = 26.75 - 0.0052 \times a$	0.96
17	$\theta = 28.43 - 0.0055 \times a$	0.97	$t = 26.72 - 0.0051 \times a$	0.98
18	$\theta = 28.21 - 0.0056 \times a$	0.97	$t = 26.58 - 0.0052 \times a$	0.98
19	$\theta = 28.19 - 0.0056 \times a$	0.98	$t = 26.58 - 0.0052 \times a$	0.98
20	$\theta = 27.82 - 0.0055 \times a$	0.98	$t = 26.35 - 0.0052 \times a$	0.99
21	$\theta = 27.86 - 0.0054 \times a$	0.98	$t = 26.32 - 0.0051 \times a$	0.98
22	$\theta = 27.89 - 0.0056 \times a$	0.98	$t = 26.35 - 0.0053 \times a$	0.98
23	$\theta = 28.00 - 0.0055 \times a$	0.97	$t = 26.36 - 0.0052 \times a$	0.96
24	$\theta = 28.05 - 0.0055 \times a$	0.96	$t = 26.36 - 0.0052 \times a$	0.95
25	$\theta = 28.16 - 0.0057 \times a$	0.96	$t = 26.43 - 0.0053 \times a$	0.96
26	$\theta = 28.20 - 0.0057 \times a$	0.96	$t = 26.43 - 0.0053 \times a$	0.95
27	$\theta = 28.12 - 0.0057 \times a$	0.95	$t = 26.37 - 0.0053 \times a$	0.94
28	$\theta = 28.09 - 0.0057 \times a$	0.95	$t = 26.33 - 0.0053 \times a$	0.94
29	$\theta = 27.92 - 0.0055 \times a$	0.94	$t = 26.20 - 0.0052 \times a$	0.93
30	$\theta = 27.69 - 0.0056 \times a$	0.96	$t = 26.02 - 0.0052 \times a$	0.95
31	$\theta = 27.54 - 0.0053 \times a$	0.96	$t = 25.91 - 0.0050 \times a$	0.95
32	$\theta = 27.12 - 0.0056 \times a$	0.97	$t = 25.59 - 0.0052 \times a$	0.97
33	$\theta = 26.93 - 0.0051 \times a$	0.98	$t = 25.37 - 0.0048 \times a$	0.97
34	$\theta = 26.83 - 0.0052 \times a$	0.97	$t = 25.26 - 0.0049 \times a$	0.96
35	$\theta = 26.53 - 0.0053 \times a$	0.98	$t = 24.94 - 0.0050 \times a$	0.97
36	$\theta = 26.46 - 0.0054 \times a$	0.97	$t = 24.86 - 0.0051 \times a$	0.96
37	$\theta = 26.45 - 0.0054 \times a$	0.97	$t = 24.84 - 0.0051 \times a$	0.96

a = Altitud

r<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación

CUADRO 7

RELACION ENTRE EL PROMEDIO INTERANUAL POR DECADA DE LA  
PRECIPITACION Y EL BRILLO SOLAR POR REGION CLIMATICA

REGION	ECUACION DE REGRESION	r
Valle Central	$bs = 8.4799 - 0.077975 \times p + 0.00039392 p^2$	0.8490
Pacífico Norte	$bs = 8.9524 - 0.068464 \times p + 0.00027891 p^2$	0.8835
Pacífico Sur	$bs = 9.1104 - 0.05636 \times p + 0.000163090 p^2$	0.8431
Costa Rica	$bs = 8.6388 - 0.06344 \times p + 0.000226110 p^2$	0.8428

bs = Brillo solar

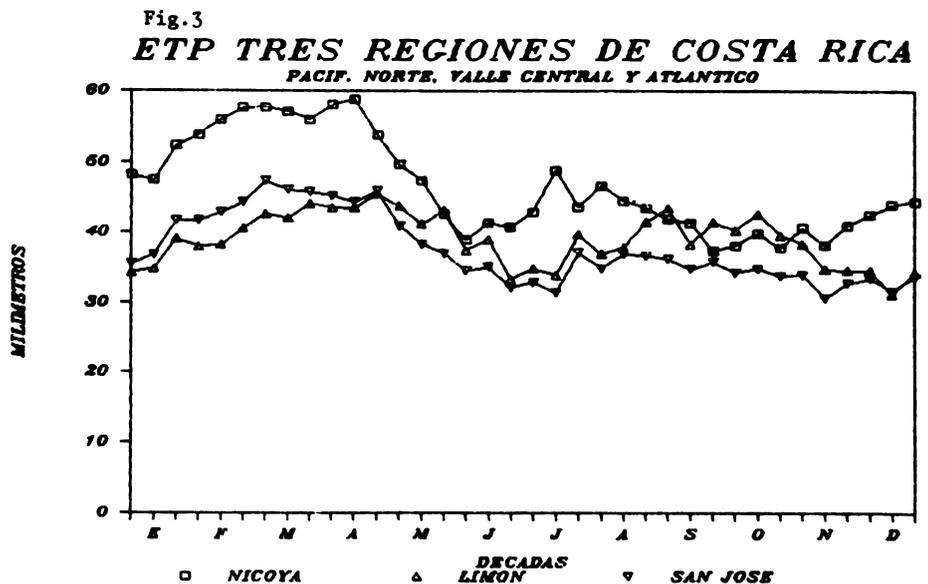
p = Promedio interanual por década de la precipitación

r = Coeficiente de correlación

La radiación solar al tope de la atmósfera (Rgo) y la duración astronómica del día (N) aparecen en tablas (Anexo A)

1.1.4.3. Estimación de la evapotranspiración potencial (ETP)  
En la Figura 3 se presentan, para tres regiones físico-geográficas de Costa Rica bien diferentes: Pacífico Norte, Valle Central y Atlántico. Se aprecia que los valores mayores para la ETP se obtienen en el Pacífico Norte, mientras que los menores se ubican en la región Atlántica del país, durante los primeros meses del año, y en el Valle Central a partir del mes de mayo. Además, la fluctuación en el transcurso del año no es muy significativa, siendo el máximo de variación de 20 mm por década, lo que representa, aproximadamente 2 mm, entre el día de mayor evapotranspiración y el menor.

Se debe sin embargo, señalar que el valor de la ETP, en los meses de julio y agosto en el Pacífico Norte, debería ser mayor al calculado; a causa de una intensificación de los vientos Alisios en la región, lo que provoca un aumento en el coeficiente de intercambio (h (v)) no contemplado por la fórmula empleada.





## RESUMEN

En este capítulo se demostró la factibilidad de estimar algunos de los datos meteorológicos que generalmente se encuentran deficitarios en las estaciones meteorológicas de los países en vías de desarrollo y que son indispensables para realizar estudios agroclimáticos. La altura resultó ser una variable con suficiente poder explicatorio de las temperaturas, el promedio por década de la precipitación de la duración de la insolación; siendo entonces posible estimar la radiación global del lugar en estudio.

El empleo de la fórmula de Priestley y Taylor permite una mayor aplicación por involucrar un menor número de parámetros meteorológicos en su cálculo que la fórmula propuesta por Penman. La misma conserva un carácter universal y además por fundamentarse en la formulación física de los fenómenos que intervienen, es preferible a cualquier modelo empírico generado para el cálculo de la evapotranspiración potencial.



## CAPITULO II

### METODOS DE ANALISIS PARA EL ESTUDIO DE LAS CONDICIONES HIDRICAS

#### 1.1 Introducción

La lluvia, en los países de la zona intertropical, es de los factores del clima el que con mayor frecuencia se vuelve limitante para el desarrollo de los cultivos anuales. Su repartición en el transcurso del año es muy desigual (alternancia, estación seca-estación lluviosa) y su variabilidad interanual es sumamente grande. Por el contrario, la temperatura y la duración del día varían muy poco y casi nunca constituyen un impedimento para el desarrollo de los cultivos.

Por esta razón, es necesario que los estudios orientados al análisis de la precipitación se fundamenten en series largas de registro 30 años o más; para conocer no solamente el clima promedio, sino su variabilidad. Para que estos resultados sean útiles en la programación y planificación agropecuaria, se hace necesario que superemos la climatología clásica que se contenta con caracterizar los estados promedios del clima, y que nos orientemos hacia un enfoque frecuencial de los fenómenos climáticos que afectan la agricultura.

En esta parte del estudio de zonificación donde se analizan las condiciones hídricas de las diferentes regiones, se proponen tres técnicas de análisis agroclimático: Balance hídrico climático, análisis frecuencial de lluvias y balance hídrico teórico.

Cada una de estas técnicas tienen alcances diferentes y su uso dependerá de los objetivos propuestos y de la calidad y cantidad de información meteorológica, edáfica y del cultivo disponible.

## 1.2 Técnicas agroclimáticas propuestas para el estudio de las condiciones hídricas.

### 1.2.1. Análisis frecuencial de lluvias

Una de las metodologías propuestas para el estudio de las condiciones hídricas de los cultivos se basa en el análisis frecuencial de la precipitación, a lo largo del año, por períodos elementales de una duración de diez días. Este tipo de análisis permite definir, a un nivel de riesgo determinado, el período de cultivo, esto es la fecha de inicio y fin de la época de siembra, siendo ésto, a la vez un criterio determinante en la elección de los cultivos que mejor se adapten a las condiciones agroclimáticas imperantes en la región analizada.

#### Principio del análisis

Para evaluar el aspecto aleatorio del fenómeno y determinar el riesgo climático causado por la fluctuación interanual de la precipitación, el año es dividido en períodos elementales de diez días, denominados décadas. Para cada década se determina la frecuencia de que la lluvia sobrepase la mitad de evapotranspiración potencial (ETP/2). Esta frecuencia se calcula directamente a partir de la muestra de las lluvias diarias, sin ser ajustada a una ley teórica de probabilidad.

Un período elemental de diez días representa una duración estándar que toma en cuenta la capacidad de almacenamiento del agua por parte del suelo. Por ejemplo, si se considera un suelo con una capacidad máxima de almacenamiento de 50 mm (reserva útil) y una evaporación máxima de  $5 \text{ mm día}^{-1}$ , este suelo podrá ceder agua a las plantas durante diez días, sin que exista la necesidad de una nueva lluvia. Sin embargo, ésto es un caso extremo, ya que generalmente la reserva útil del suelo es mayor y la evapotranspiración menor a la del ejemplo.

La evapotranspiración potencial (ETP) representa aproximadamente el requisito óptimo en agua de un cultivo bien desarrollado y cubriendo bien el suelo. Se puede considerar que la mitad de la evapotranspiración potencial (ETP/2), representa el requisito mínimo para obtener un rendimiento satisfactorio (pero no necesariamente óptimo). Esto constituye evidentemente una aproximación necesaria para simplificar el problema.

Los resultados, es decir, las frecuencias para cada década, son representados por un gráfico, cuya abscisa representa una escala de tiempo que abarca todo el año y graduada en décadas (36 décadas) y la ordenada una escala de frecuencia graduada de 0 a 1.

#### 1.2.1.1. Determinación del período de cultivo

Las curvas obtenidas pueden ser utilizadas para determinar la época de cultivo (inicio, duración y fin), a un cierto nivel de probabilidad. Se escoge generalmente el valor de 0.75, que significa una frecuencia de ocurrencia del fenómeno de 3 años cada 4 y que corresponde a un riesgo aceptable en agricultura.

El período de cultivo comienza con la primera década, donde la frecuencia sobrepasa el valor de 0.75 y termina con la primera década con una frecuencia inferior a 0.75.

Si una década con una frecuencia inferior a 0.75 se encuentra entre dos décadas, con valor superior a 0.75, se considera que no hay interrupción del período de cultivo. Pueden aparecer evidentemente varios períodos de cultivo (generalmente no más de dos)

Para cada estación analizada se obtiene así la duración de la época de cultivo (o épocas de cultivo) y la fecha de inicio de esa época (o épocas). Si la red de estaciones es lo suficientemente densa, se pueden representar los resultados en un mapa por medio de un trazado de iso líneas.

## Resultados y discusión

A manera de ejemplo se presenta en la Figura 4 los resultados del análisis frecuencial de lluvias para la estación de Santa Cruz en el Pacífico Norte de Costa Rica. Para esta estación se determinaron dos períodos de cultivo a la probabilidad 0.75. De igual forma, se calcula la duración en días del período de cultivo, para 72 estaciones meteorológicas de Costa Rica, resultados a los cuales se les da expresión cartográfica (Mapa 1).

Se señala que la escala original del mapa es de 1:500.000 y además que varios períodos de cultivo resultan de la suma de dos períodos elementales como sucede en algunas estaciones del Pacífico Norte.

### 1.2.1.2. Determinación de la fecha de siembra de los cultivos anuales.

Debido a la gran variación interanual que presenta la lluvia en el medio tropical uno de los principales problemas, que afronta el agrónomo es el de seleccionar la fecha más adecuada, que tome en cuenta las posibles restricciones climáticas y las exigencias del cultivo. En estas condiciones parece evidente, que esta fecha debería determinarse utilizando un criterio hídrico.

Los cultivos anuales tienen necesidades de agua que varían en el curso de su ciclo de desarrollo. Ciertas fases fenológicas son en particular más sensibles que otras a la falta de agua en el suelo; una sequía durante estas fases, puede provocar una disminución importante en el rendimiento y a veces la pérdida total de la cosecha. Por medio del análisis frecuencial de lluvias y conociendo las necesidades hídricas por fase fenológica del cultivo, se po-

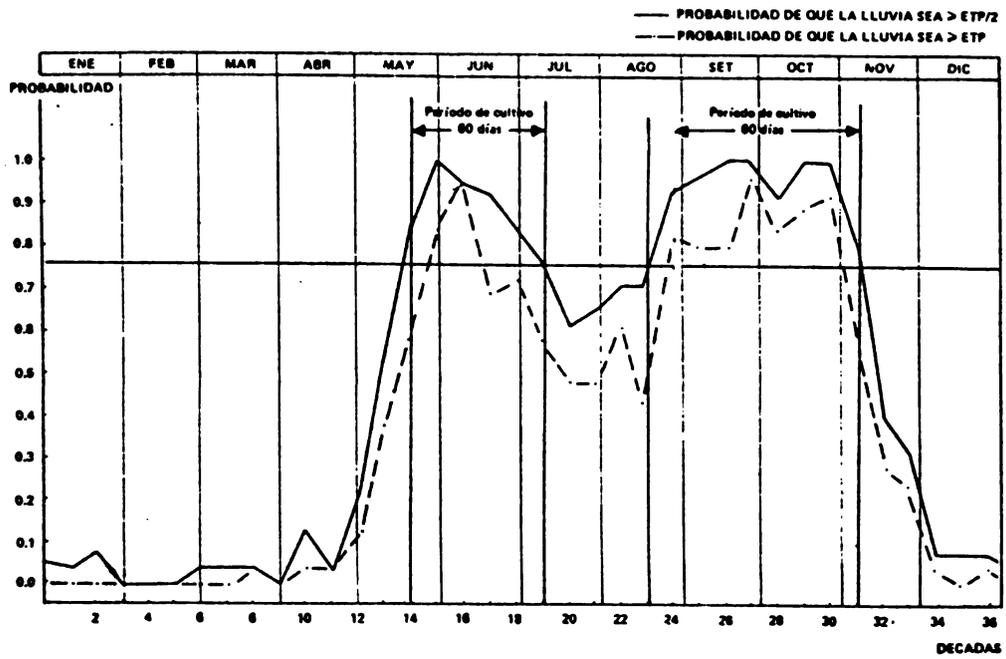
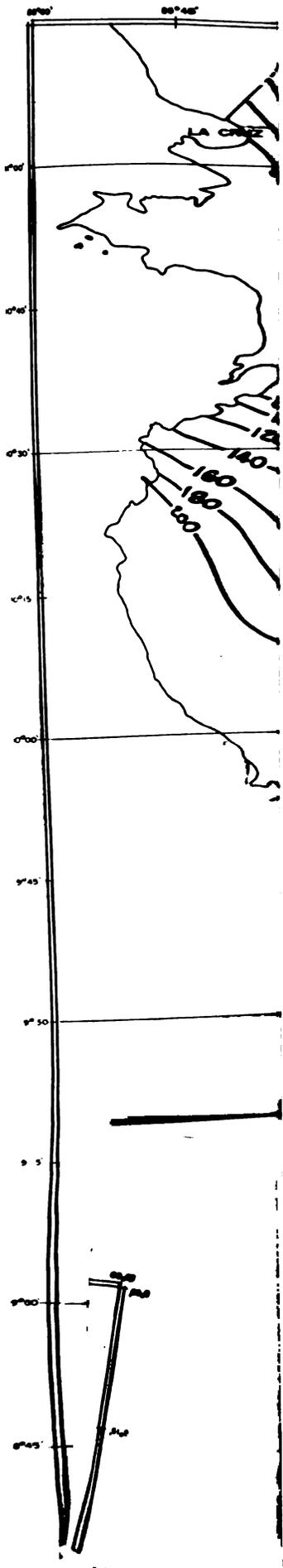


Fig. 4 Análisis frecuencial de lluvias para la estación Santa Cruz.







drá definir la fecha más adecuada para la siembra.

Se trata por lo tanto, de escoger la fecha de siembra para la cual las necesidades coincidan con el máximo de probabilidad de ser satisfechas (Eldin, 1983, Franquín, 1973; Lhomme; Rojas, 1983).

Para cada localidad la oferta climática de agua la constituye los datos pluviométricos diarios registrados en el curso de los diferentes años. Las necesidades del cultivo deben ser definidas, por un lado, dividiendo el ciclo del cultivo en fases de acuerdo a su requerimiento hídrico, y por otro, cuantificando para cada fase, ese requerimiento en agua.

Ciertas fases necesitan agua abundante, otras, por el contrario como la maduración de varios cultivos (algodón, maní) no soportan lluvias importantes.

En términos agroclimáticos, estos ciclos se componen de varios períodos articulados de manera diferente:

- períodos donde el cultivo necesita una disponibilidad de agua inferior a la mitad de la evapotranspiración potencial (ETP). En general la germinación y la maduración.
- períodos donde el cultivo exige una disponibilidad de agua superior a la mitad de la ETP, pero inferior a 0.9 ETP.
- períodos donde el cultivo necesita satisfacer en forma plena sus requerimientos hídricos ( más de 0.9 ETP).

### Aplicación

Para ilustrar este otro aspecto de la utilización del análisis frecuencial se considera nuevamente la estación de Santa Cruz (10°16' Latitud Norte, 85°35' Longitud oeste y 54 msnm de altitud) la cual cuenta con 30 años de registros pluviométricos.

El clima en esta región se caracteriza por presentar dos estaciones bien definidas: La estación seca y la estación lluviosa. La estación lluviosa presenta la característica de tener dos máximos, separados por una disminución de la intensidad de la lluvia, en los meses de julio y agosto, debido a una conjugación de factores meteorológicos denominada "canícula " o "veranillo ".

Los cultivos seleccionados para el ejemplo fueron: algodón (Gossipium hirsutum), arroz (Oryza sativa), maíz (Zea mays) y maní (Arachis hypogaea).

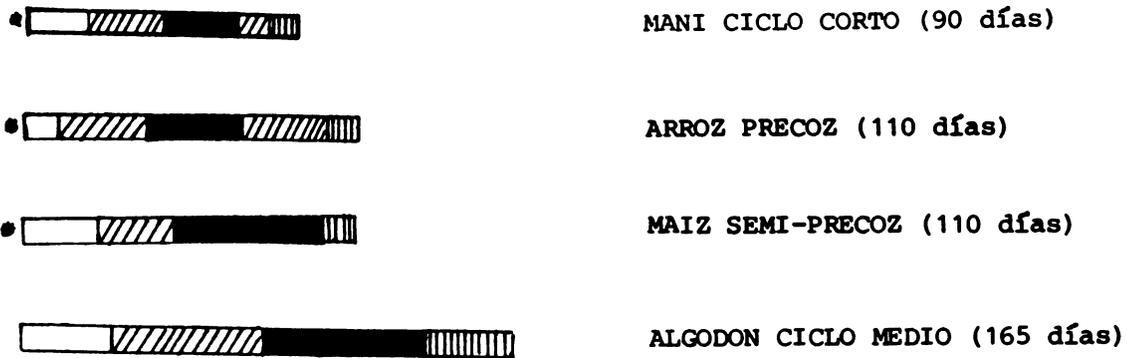
Los ciclos de estos cultivos y su división según las necesidades hídricas de cada fase fenológica se presentan en forma de esquemas en la Figura 5.

En esta parte, se intenta confrontar las diferentes necesidades hídricas de cada fase fenológica del cultivo con el aporte natural de agua. Los períodos más sensibles a la sequía deberán coincidir con las frecuencias más altas de que la lluvia supere el valor de la ETP (Rojas, 1985).

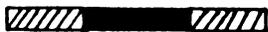
### Resultados y discusión

Un primer ejemplo podría ser sembrar, durante el primer período de cultivo en la región de Santa Cruz, una variedad precoz de maní (90 días), la cual, sin embargo, necesitaría de una lluvia, previa a la siembra de unos 15 ó 20 mm, o en su defecto ( que es lo más probable que suceda) se deberá recurrir al riego. Además, a partir

CICLOS VEGETATIVOS



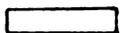
LEYENDA:



Porción del ciclo vegetativo que debe coincidir con un período húmedo, donde:



Período de mayor sensibilidad a la sequía (floración, en general)



Porción del ciclo vegetativo que puede soportar períodos semi-húmedos (germinación, crecimiento)



Porción del ciclo vegetativo que puede soportar períodos semi-húmedos o secos (maduración)



La siembra del maíz y del maní debe ser precedida de una lluvia de 15-20 mm y la del arroz de una lluvia de 25-30 mm

FIGURA 5 Duración de los ciclos vegetativos y la sensibilidad de cada fase a la sequía.

de la década 22, se podría sembrar una variedad de maíz de 110 días. Esto se ilustra en la Figura 6.

Si el problema fuera encontrar la mejor época de cultivo para el maní en Santa Cruz, sería más adecuado el segundo período de cultivo. Esto porque, como se aprecia en la Figura 7, a partir de la década 17 dentro del primer período de cultivo (o sea, a mediados de junio), las frecuencias de que la lluvia sea superior a la ETP disminuyen y esta disminución coincide con un período de alta sensibilidad a la sequía. Por esta razón es más conveniente el segundo período de cultivo, el cual se adapta mejor a las necesidades hídricas del maní (Fig. 7)

Otro ejemplo sería que resultados de estudios económicos indicaran como cultivos más rentables para la región al algodón (165 días) y a una variedad precoz de arroz (110 días) siendo indispensable, en este caso, contar con riego complementario, tanto al inicio de la siembra (en el caso del arroz), como a mediados (en el caso del algodón), esto debido a una conjugación de factores meteorológicos, conocida popularmente como "canícula" o "veranillo", que tiene lugar durante los meses de julio y agosto y que provoca una disminución de las precipitaciones (Figuras 8 y 9).

### 1.2.2. Balance hídrico climático

Este tipo de balance climático es el análisis clásico, donde se compara la precipitación con el valor de la evapotranspiración potencial. Los resultados son presentados en forma gráfica donde las diferencias positivas entre la precipitación y la ETP representan excesos hídricos y las diferencias negativas déficits. Sin embargo, se introducen dos modificaciones importantes para el estudio de las condiciones hídricas de los cultivos. Una es, que el período de análisis lo constituye la década en lugar del mes. Esto evita que se enmascaren ciertos déficits hídricos que podrían suceder en el transcurso del mes al

### ESTACION SANTA CRUZ ANALISIS FRECUENCIAL DE LLUVIAS

Fig. 6

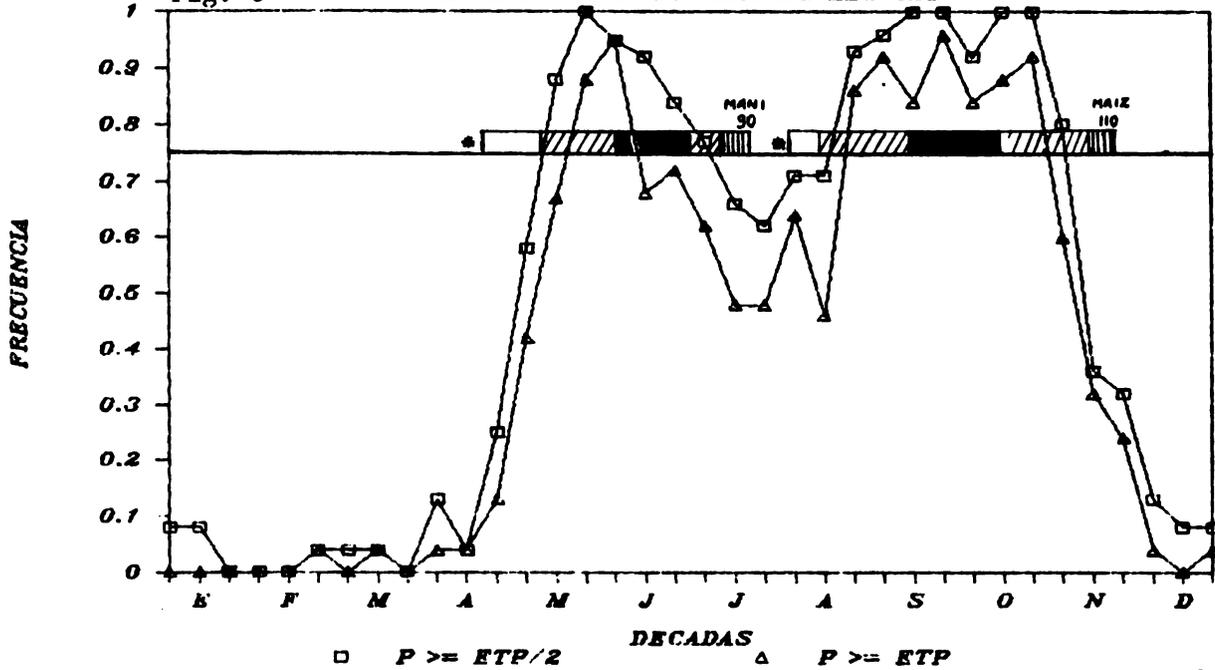


Fig. 7

### ESTACION SANTA CRUZ ANALISIS FRECUENCIAL DE LLUVIAS

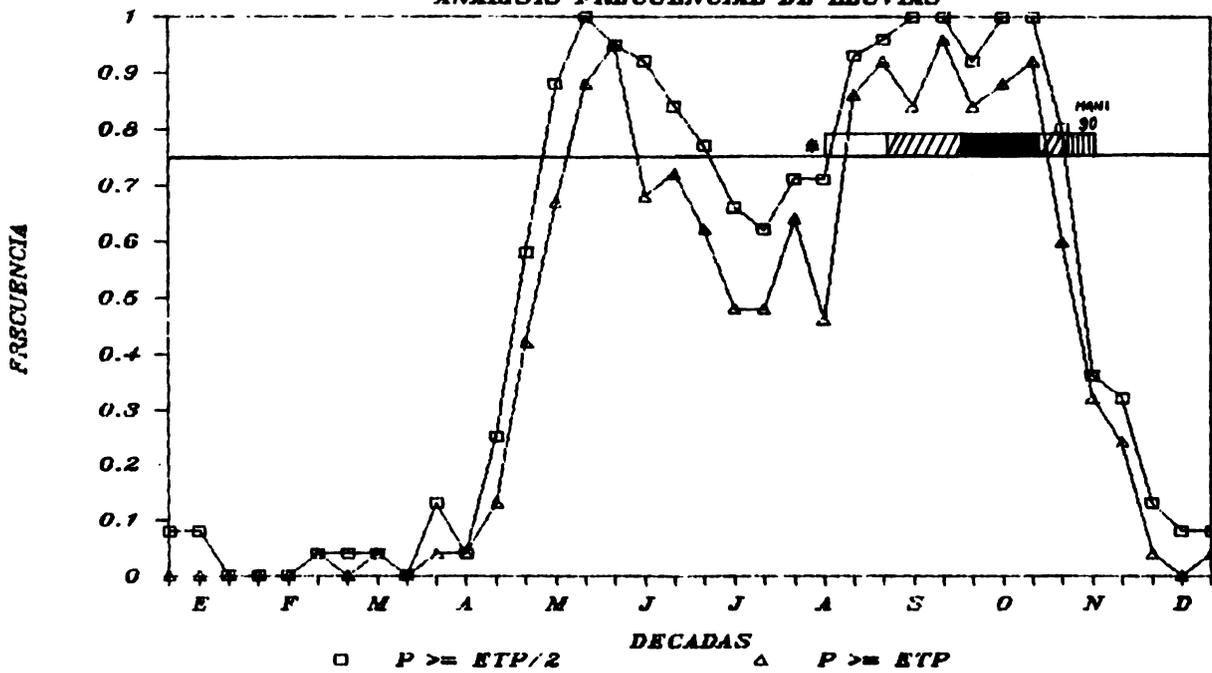


Fig.8

### ESTACION SANTA CRUZ ANALISIS FRECUENCIAL DE LLUVIAS

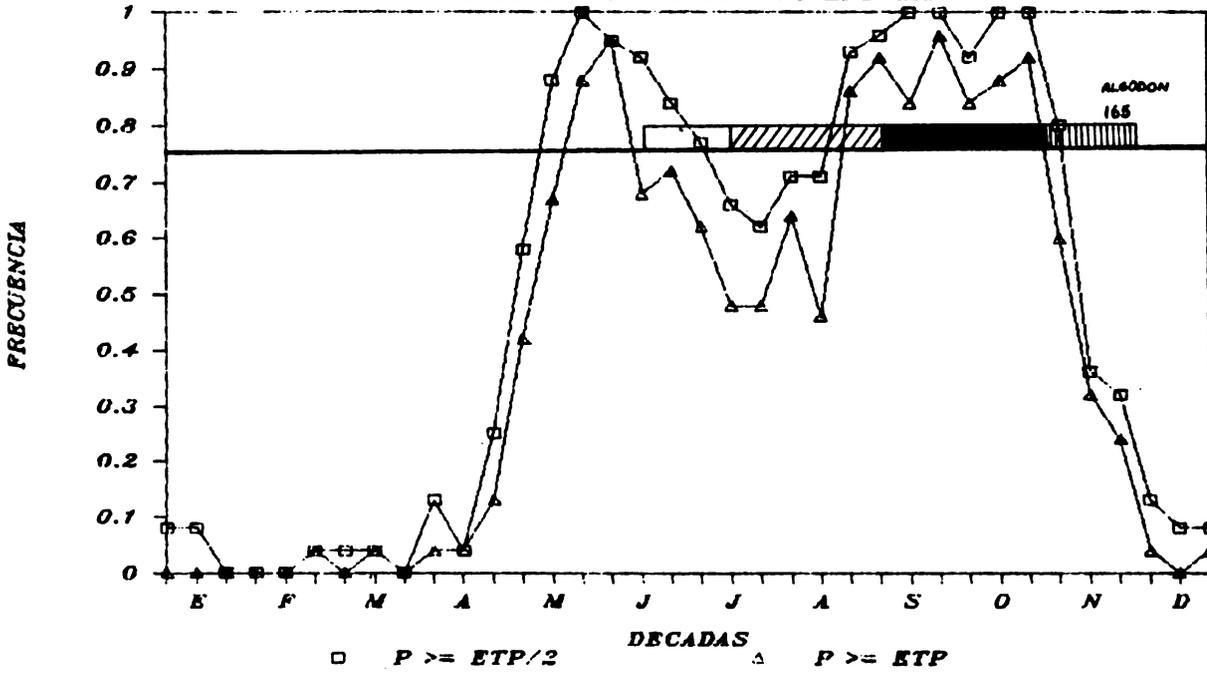
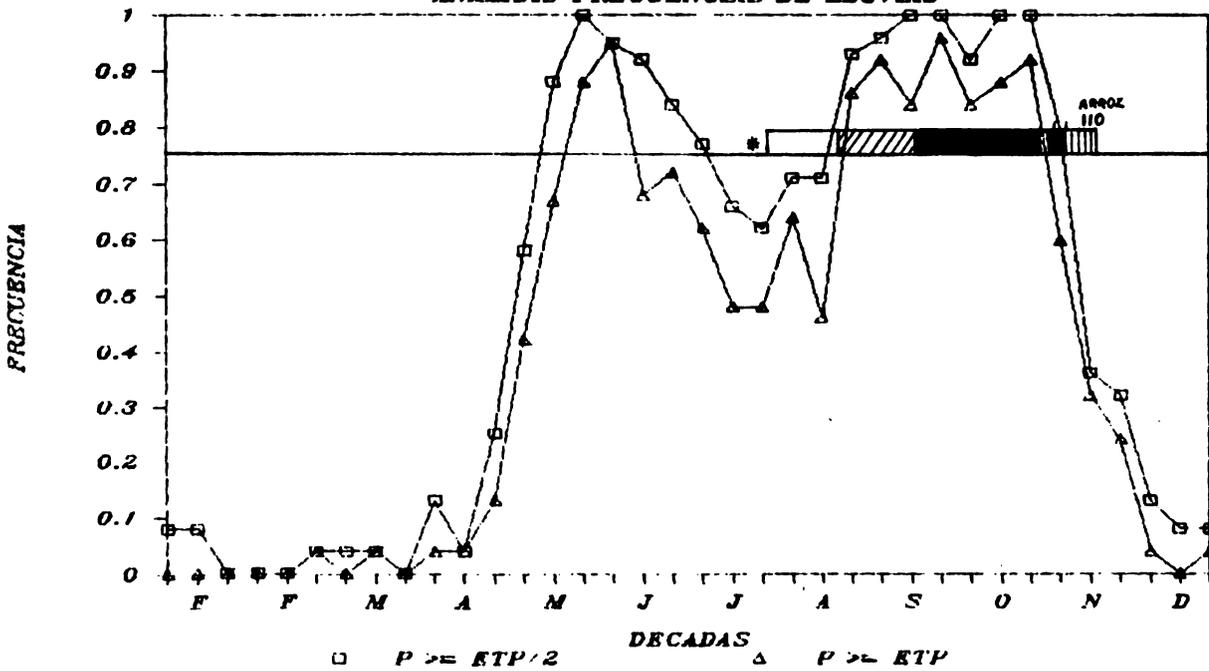


Fig.9

### ESTACION SANTA CRUZ ANALISIS FRECUENCIAL DE LLUVIAS



ser compensados por los excesos. La segunda modificación, de igual importancia, es utilizar en lugar de la precipitación promedio que carece de verdadero significado al presentarse una variación interanual sumamente grande, los siguientes parámetros estadísticos: el primer y cuarto quintil y la mediana.

### Resultados y discusión

Para ilustrar este tipo de análisis se emplearon los datos meteorológicos de la estación San Antonio ubicada en el departamento de Chinandega en Nicaragua ( $12^{\circ}08'$  Latitud Norte,  $86^{\circ}32'$  Longitud Oeste y 105 m.s.n.m. de altitud). Los resultados se presentan en la Figura 10. Se aprecia un déficit hídrico importante que se produce en medio de la estación lluviosa en los meses de junio, julio y agosto. En términos de la mediana este déficit puede alcanzar el valor de 40 mm por década.

#### 1.2.3. Balance hídrico teórico

Esta tercera técnica de análisis agroclimático, permite obtener una mejor aproximación a la realidad de las transferencias de agua que se dan entre el suelo, el cultivo y la atmósfera (Lhomme, JP. et al 1984, Rojas. O, 1984).

Se integran parámetros de ajustes de tipo edáfico (reserva útil) y del cultivo (coeficiente de cultivo), además el modelo simula la evolución de la reserva hídrica del suelo a nivel diario y es recurrente.

Este tipo de análisis deberá usarse cuando exista buena información meteorológica y cuando al problema abordado así lo requiera. Esto último por ejemplo, podría suceder al querer estudiar el papel del déficit hídrico en la anthesis del café.

Se debe señalar que el modelo propuesto podría ser mejorado (Choisnel, 1977), pero se ha querido conservarlo en su forma general con el afán de que pueda ser utilizado universalmente ya que se requieren pocos parámetros de

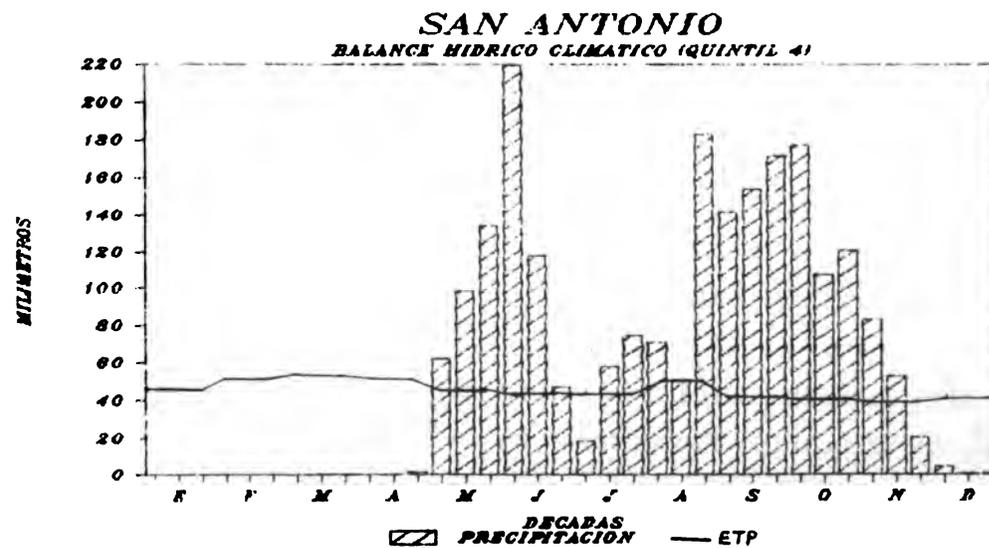
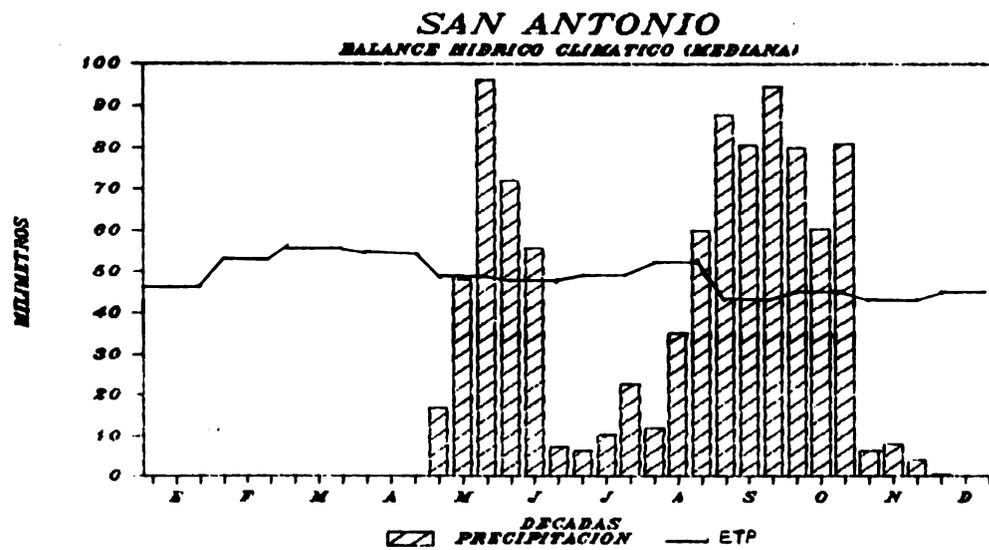
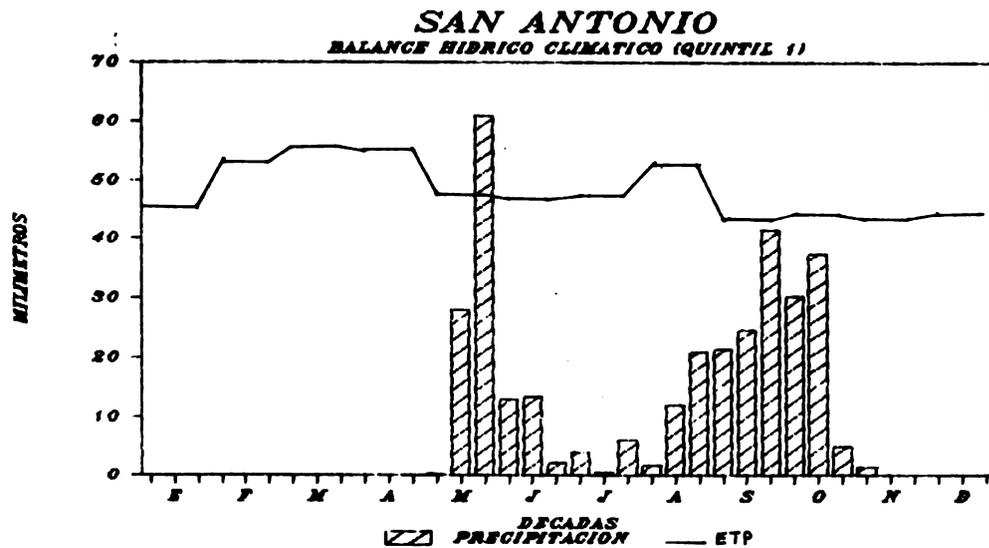


Figura 10. Balance hídrico climático para la estación San Antonio

ajuste. De esta forma el mismo puede ser empleado en países con características diferentes.

## PRESENTACION DEL MODELO

### Reserva útil del suelo

La reserva hídrica del suelo representada por RH, constituye la cantidad de agua almacenada en el suelo y disponible para las plantas. Es un número positivo, en milímetros, que varía entre 0 y la reserva útil RU. La reserva útil, anteriormente definida, evoluciona en función de la profundidad de las raíces, que depende a su vez del estadio de desarrollo del cultivo. Para simplificar el problema, vamos a considerar un cultivo perenne cuyo sistema radical es aproximadamente constante - en el transcurso del tiempo. De esta manera, supondremos que la reserva útil es constante.

### Lluvia eficaz

Admitiremos que una lluvia demasiado débil, ( $P < P_n$ ) se evapora inmediatamente sin que logre contribuir a la reconstitución de la reserva hídrica. Si  $P_j$  designa la lluvia registrada el día j y  $PE_j$  la lluvia eficaz, escribiremos pues:

$$PE_j = \begin{cases} P_j, & \text{si } P_j \geq P_n \\ 0, & \text{si } P_j < P_n \end{cases}$$

En lo que se refiere a la escorrentía consideraremos un suelo horizontal de tal manera que podamos anularla. De este modo, si la intensidad de la lluvia es superior a la capacidad de infiltración del suelo, el agua que no se infiltra inmediatamente se quedará en el mismo lugar en estado libre hasta el momento que se evapore o se infiltre. Tampoco habrá transferencias laterales de agua dentro del suelo.

### Drenaje

Si la cantidad de lluvia que cae el día  $j$  es superior a la capacidad de retención del suelo, habrá drenaje, es decir, una pérdida de agua por salida subterránea. La capacidad de retención del suelo el día  $j$ , representada por  $CR_j$ , corresponde a la diferencia entre la reserva útil  $RU$  y la reserva hídrica del día anterior  $RH_{j-1}$

$$CR_j = RU - RH_{j-1}$$

La cantidad de agua perdida por drenaje se escribe:

$$DR_j = \begin{cases} P_j - CR_j, & \text{si } P_j > CR_j \\ 0 & \text{si } P_j \leq CR_j \end{cases}$$

### Evapotranspiración real

La evapotranspiración máxima  $ETM$  evoluciona, respecto a la  $ETP$ , en función del estado de recubrimiento del suelo por el follaje. En el caso de un cultivo cuyo follaje cubre totalmente el suelo, se puede admitir que la  $ETM$  iguala a la  $ETP$ . Así, siempre para simplificar el problema, vamos a considerar un cultivo perenne que cubre totalmente el suelo.

En cuanto a la evapotranspiración real,  $ETR$ , ella evoluciona, respecto a la  $ETM$ , en función del estado de la reserva hídrica del suelo. Como se ha visto, los conceptos clásicos sobre la utilización del agua del suelo por las plantas tienen en cuenta una reserva fácilmente utilizable,  $RFU$ , que representa la fracción de la reserva útil utilizable por las plantas sin dificultad, es decir, sin que eso provoque un cierre de estomas, y así una reducción de la evapotranspiración respecto a la  $ETM$ . Debajo de este umbral, la  $ETR$ , decrece, conforme el agua disponi-

ble disminuye, y eso hasta el punto de marchitez permanente donde se anula. El punto crítico que constituye el umbral de regulación, varía según el tipo de suelo y el desarrollo de las raíces.

Pondremos:  $RFU = c \cdot RU$ , siendo  $c$  un coeficiente de ajuste ( $0 < c < 1$ ).

De este modo se encuentra definida también una reserva difícilmente utilizable RDU que es el complemento de la RFU; esto es:

$$RU = RFU + RDU.$$

Supondremos que el cociente  $ETR/ETM$  aumenta linealmente de 0 a 1 en función de la reserva hídrica  $RH$  del suelo, cuando ella pasa del valor 0 al valor RDU, y se mantiene en este valor cuando la reserva fluctúa entre RDU y RU. Representando  $RH_{j-1}$  el estado de la reserva hídrica al fin del día  $j-1$  y por consiguiente al inicio del día  $j$ , escribiremos:

$$ETR_j/ETM_j = \begin{cases} 1 & , \text{ si } RH_{j-1} \geq RDU \\ RH_{j-1}/RDU & , \text{ si } RH_{j-1} < RDU \end{cases}$$

El déficit hídrico diario a nivel del cultivo se encuentra definido por la relación:

$$DH_j = ETM_j - ETR_j$$

A partir de eso se definirá un déficit hídrico acumulado sobre el período de cultivo o sobre una fase particular del ciclo (estado crítico por ejemplo):

$$DHC = \sum_{j=J1}^{J2} DH_j$$

### Ecuación del balance hídrico

La ecuación que traduce el balance hídrico se escribe sobre una base diaria:

$$RH_j = RH_{j-1} + PE_j - ETR_j - D$$

Esta ecuación va a servir como relación recurrente para calcular las reservas hídricas diarias sucesivas. A menos de que se tenga una manera particular de conocer la reserva hídrica al inicio del proceso recurrente,  $RH_0$ , se puede basar en las consideraciones siguientes para iniciar el proceso: si el día 1 se encuentra en plena estación seca, se escoge  $RH_0 = 0$ , y si se encuentra en plena estación lluviosa,  $RH_0 = RU$ ; de lo contrario, se toma un valor promedio  $RH_0 = RU/2$ .

### Aplicaciones del modelo

#### Estudios de los riesgos de sequía y de exceso de agua

Para el análisis de los riesgos de sequía se utiliza la matriz con los datos de las reservas hídricas diarias. Se define un día seco como un día con una reserva hídrica inferior a la reserva difícilmente utilizable (RDU). A partir de esto se calcula la ocurrencia de 5, 10, 15 ...n días consecutivos secos, cuyos resultados pueden ser representados en forma gráfica por década.

Si el interés del estudio fuera evaluar la duración del período seco, se calcula para cada año de registro el número máximo de días consecutivos secos y se procede a calcular su frecuencia de ocurrencia interanual.

De igual forma, se puede estudiar los excesos hídricos utilizando para esto la matriz con los valores diarios del drenaje.

## Resultados y discusión

En la Figura 11, se presentan los resultados por década, de obtener 5 y 10 días consecutivos secos para el Cantón de Acosta en el Pacífico Central de Costa Rica. Se aprecia un pequeño aumento de las frecuencias en los meses de julio y agosto pertenecientes a la época lluviosa, lo cual podría incidir negativamente en el desarrollo de algunos cultivos de la región, por ejemplo el maíz que se encuentra entre los principales. En relación a la duración del período seco se presentan los resultados de nueve estaciones meteorológicas ubicadas en el Pacífico Norte de Costa Rica; se aprecia en el Cuadro 8 que en promedio se pueden esperar para la región como mínimo, 127 días consecutivos secos ( $RH < RDU$ ) en Tilarán y como máximo 170 días en Filadelfia.

Con una probabilidad de 80% que ocurran al menos 104 días consecutivos secos en Tilarán y 155 en Filadelfia. Por otra parte si se analizan los resultados del Cuadro 9, donde se presentan los parámetros estadísticos de los días consecutivos secos que se dan en medio de la época lluviosa por efecto de la canícula, se aprecia que pueden ocurrir 7 días secos consecutivos en Tilarán y 21 días como máximo en Cañas (zona más afectada por este fenómeno meteorológico).

## Estudio de la diferencia de evapotranspiración

A partir de la matriz que contiene los valores diarios de la diferencia entre EIM y ETR, que pueden considerarse como un déficit hídrico a nivel del cultivo, se estudia el impacto de la sequía sobre el rendimiento esperado. Esta diferencia de evapotranspiración se considera como un índice de sequía por la relación estrecha que guarda con la producción de materia seca, (Figura 12).

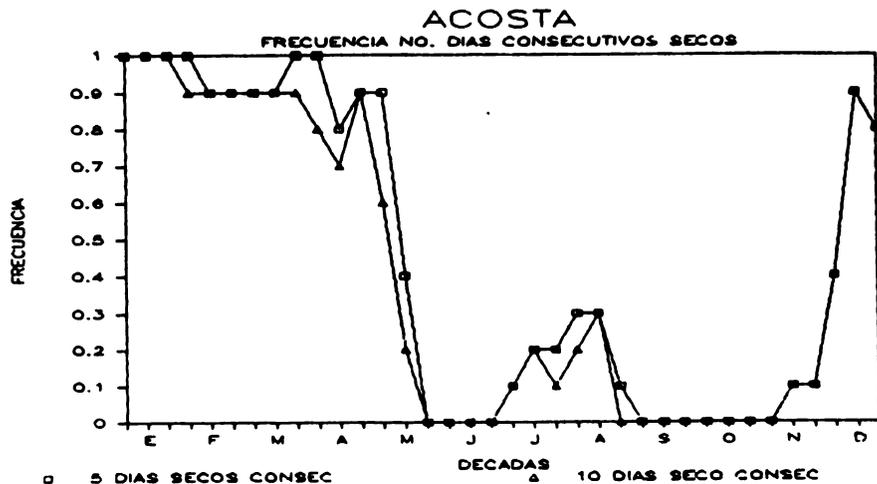


Figura 11. Frecuencia del número de días consecutivos secos para la estación Acosta.

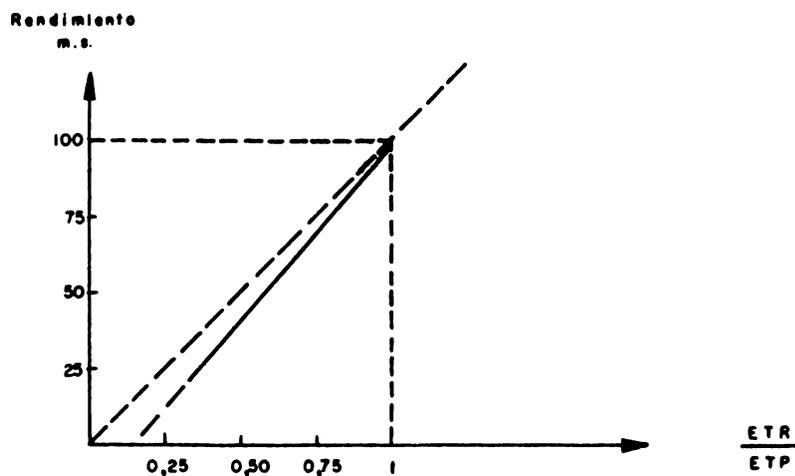


Fig.12 - Relación entre el rendimiento en materia seca y la relación ETR/ETP (Robelin, 1967).

Cuadro 8

Parámetros estadísticos del número de días consecutivos secos  
para la región del Pacífico Norte

ESTACION	MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	77	154	169	188	195	166	29	0,18
Filadelfia	133	155	174	186	200	170	19	0,11
Liberia	120	137	174	187	202	165	26	0,16
Nicoya	85	121	152	164	171	145	23	0,16
Puntarenas	96	132	170	182	192	158	28	0,18
Quebrada Grande	89	135	155	174	281	158	37	0,23
Santa Cruz	90	131	169	175	200	159	27	0,17
Taboga	88	109	147	171	177	142	29	0,21
Tilarán	70	104	131	153	169	127	27	0,21

Cuadro 9

Parámetros estadísticos del número de días consecutivos secos  
dentro del "veranillo" para la región del Pacífico Norte

ESTACION	MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	0	0	22	38	46	21	16	0,77
Filadelfia	0	4	13	20	33	12	9	0,76
Liberia	0	7	14	18	66	17	17	1,01
Nicoya	0	0	2	9	26	5	7	1,38
Puntarenas	0	5	18	29	56	19	14	0,74
Quebrada Grande	0	0	9	19	75	14	21	1,47
Santa Cruz	0	0	13	25	54	15	14	0,92
Taboga	3	3	13	36	39	18	14	0,78
Tilarán	0	0	3	19	23	7	9	1,23

Cuando el suelo se encuentra insuficientemente provisionado de agua, o la planta es fisiológicamente incapaz de asegurar el gasto de agua resultante de la demanda climática, el régimen de evapotranspiración máxima (ETM) no se alcanza y la planta se encuentra en régimen de evapotranspiración real ( ETR) que es menor que ETM (ETR < ETM).

El cierre parcial de los estomas reduce el intercambio gaseoso de la planta con la atmósfera y frena su actividad fotosintética. Se admite generalmente que para una especie dada la reducción de los flujos de vapor de agua y de gas carbónico es sensiblemente la misma, resulta pues que los fenómenos de evapotranspiración y de fotosíntesis aparecen como proporcionales, esto es:

$$\frac{MS_o - MS}{MS_o} = \frac{ETM - ETR}{ETM}$$

con:

$MS_o$  producción de materia seca a nivel de ETM

MS producción de materia seca a nivel de ETR

Por esto se justifica el interés de estudiar esta diferencia de evapotranspiración tanto en forma absoluta (ETM-ETR), como relativa en porcentaje (ETM-ETR)/ETM X 100.

### Resultados y discusión

Los resultados de la diferencia de evapotranspiración pueden presentarse en forma de cuadros, (Cuadro 10) ó en forma gráfica.

En la Figura 13 se aprecia que en términos del cuarto quintil, en medio de la estación lluviosa en Acosta, puede ocurrir una reducción de hasta un 20% en la producción de materia seca debido al cierre estomático provocado por la disminución de las precipitaciones.

CUADRO 10 PARAMETROS ESTADISTICOS DE LA DIFERENCIA ABSOLUTA DE EVAPOTRANSPIRACION (ETM - ETR) POR DECADA PARA LA ESTACION CASAS CON RU = 100 mm

MINI	AN	QNT1	MEAN	QNT4	MAXI	AN	MEAN	E-T	CO-VA
133	60	369	410	424	427	70	327	71	0.18
34	60	423	475	480	480	69	424	72	0.09
48	60	475	510	510	510	68	475	73	0.08
75	60	490	510	510	510	78	490	74	0.18
87	60	423	510	510	510	78	423	75	0.27
85	60	423	510	510	510	78	423	76	0.20
101	60	423	510	510	510	78	423	77	0.22
374	60	423	510	510	510	78	423	78	0.09
453	60	423	510	510	510	78	423	79	0.15
308	60	423	510	510	510	78	423	80	0.05
0	60	423	510	510	510	78	423	81	0.15
131	60	257	423	423	418	74	257	82	0.24
0	60	195	423	423	418	74	195	83	0.18
0	60	0	0	0	0	68	0	84	0.02
0	60	0	0	0	0	66	0	85	0.05
0	60	0	0	0	0	71	0	86	0.23
0	60	0	0	0	0	72	0	87	0.33
0	60	0	0	0	0	72	0	88	0.85
0	60	0	0	0	0	69	0	89	0.76
0	60	0	0	0	0	73	0	90	1.62
0	60	0	0	0	0	73	0	91	1.33
0	60	0	0	0	0	70	0	92	0.98
0	60	0	0	0	0	59	0	93	1.35
0	60	0	0	0	0	68	0	94	1.68
0	60	0	0	0	0	73	0	95	2.34
0	60	0	0	0	0	74	0	96	***
0	60	0	0	0	0	74	0	97	***
0	60	0	0	0	0	68	0	98	3.78
0	60	0	0	0	0	73	0	99	2.20
0	60	0	0	0	0	74	0	100	1.90
0	60	0	0	0	0	74	0	101	0.05
9	64	120	228	306	186	74	120	102	0.49
145	60	253	297	358	231	74	253	103	0.21
237	60	315	389	373	376	74	315	104	0.11
208	60	374	410	418	393	74	374	105	0.13
					424	74			

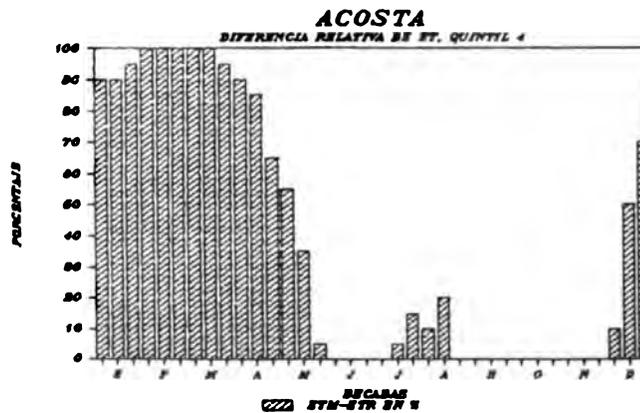
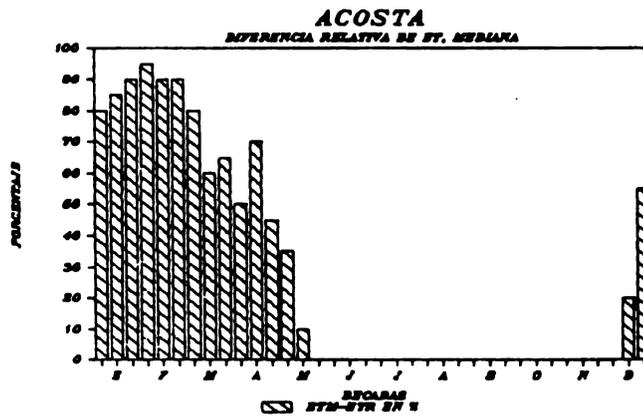
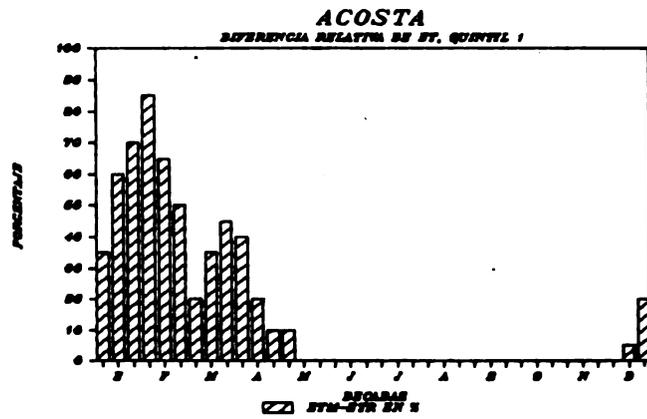


Figura 13. Diferencia relativa de evapotranspiración para la estación de Acosta.

## RESUMEN

En este capítulo se presentaron tres técnicas de análisis para evaluar las condiciones hídricas.

El uso de cada una de ellas dependerá de la información meteorológica y edáfica existente, así como de la cantidad y la calidad de la misma.

El análisis frecuencial de lluvias, introduce una noción de riesgo de interés en agricultura; además permite una mejor definición, desde un punto de vista agroclimático, de las zonas homogéneas, dentro del país o región en estudio.

El balance hídrico climático, con las modificaciones introducidas, es una excelente herramienta para evaluar el potencial hídrico de las regiones .

Por último, la técnica que nos acerca con mayor rigurosidad a simular las transferencias de agua que se dan entre el suelo, la planta y la atmósfera es el balance hídrico teórico. Este integra parámetros propios del cultivo y de la reserva hídrica del suelo. Con suficiente información meteorológica este modelo puede llevarse a un paso de tiempo horario; esto permitiría simular el microclima necesario para que se den cierto tipo de patógenos o circunstancias adversas a los cultivos.



### CAPITULO III

#### DEFINICION DE LOS INDICES DE PRODUCCION POTENCIAL

##### 1.1. Introducción

La investigación básica de las relaciones cultivo/clima, durante las dos últimas décadas, ha aportado un conocimiento elemental para establecer modelos de las respuestas de los cultivos en su medio bajo una amplia variedad de suelos, climas y patrones agronómicos. Con la disponibilidad de modernos medios de computación y las nuevas necesidades de interpretación del tiempo y el clima en términos del comportamiento del cultivo, los modelos agroclimáticos se han desarrollado rápidamente pasando de una herramienta de investigación a ser componente esencial para los sistemas operacionales.

Las necesidades de información de modelos agroclimáticos de los países en desarrollo son diferentes a las de los países desarrollados. La mayoría de los países en desarrollo se encuentran situados en regiones tropicales y semitropicales, donde la variabilidad de la precipitación en el espacio y en el tiempo es usualmente mayor que la experimentada en la mayoría de los países desarrollados. Este fenómeno climático, conjuntamente con otras características de los países en desarrollo, en relación con la población, actividades económicas, y el hombre, explica su necesidad de interpretaciones climáticas para el respaldo de la planificación económica a largo plazo. Los modelos agroclimáticos pueden suministrar información útil relativa al potencial para la producción de cultivos y ganadería, requerimientos de agua para riego de las fincas, patrones de aprovechamiento de la tierra, expectativas de variación en la distribución de los alimentos, y la planificación agroeconómica.

##### 1.2. Antecedentes

Los modelos agroclimáticos se definen como técnicas para la interpretación de la información climatológica ( y otra información físico-biológica) en apoyo a la investigación, desarrollo y servicios agrícolas.

Estas técnicas van desde índices bastantes simples (por ejemplo: Grados día) hasta modelos complejos suelo-cultivo-clima ( por ejemplo: Modelo Potencial de Productividad de Cultivo de la FAO).

Aún cuando esta amplia definición comprende muchas clases de modelos, es posible clasificarlos en dos o tres categorías, Baier (1979) propuso un sistema de clasificación basado en : el enfoque, escala de tiempo, fuente de información, objetivo y aplicación de modelos cultivo/clima; obteniendo tres clases:

- 1) Simuladores de tipo mecánico de crecimiento del cultivo.
- 2) Modelos de análisis cultivo/clima basados en estadísticas.
- 3) Modelos de rendimiento basados en el análisis de regresión múltiple.

#### Simuladores de tipo mecánico de crecimiento del cultivo

Se asume que el impacto de las variables meteorológicas (radiación, temperatura, viento, humedad, etc), sobre los procesos específicos tales como la fotosíntesis, transpiración, o respiración pueden ser simulados adecuadamente por medio de un conjunto de ecuaciones matemáticas resultantes de la experimentación o del conocimiento disponible sobre el proceso particular.

Algunos ejemplos típicos son: Simulación de modelos ELCROS (Simulador Elemental de Crecimiento de Cultivos) desarrollado por de Wit et al (1971); SPAM (Modelo suelo/ planta/atmósfera) por Shawcroft et al (1974); SIMED (Simulador para el alfalfa) por Holt et al (1975); SORGF (Modelo para el Sorgo) por Arkin et al (1976), y CORNF (Modelo para el maíz) por Stapper y Arkin (1980).

Estos simuladores de crecimiento de cultivo, a este nivel de detalle, son sumamente útiles en la investigación, tanto en su formulación como en su uso en análisis de sensibilidad. La formulación matemática de los procesos fisiológicos claves, tales como la fotosíntesis y el equilibrio agua-suelo-planta, contribuyen a una mejor comprensión del crecimiento de los cultivos y la producción.

Sin embargo, muchos de estos modelos por su complejidad y por necesitar datos muy finos, queda su uso limitado a la investigación.

### Modelos de análisis cultivo/clima basados en datos estadísticos

Estos modelos, emplean frecuentemente la humedad edáfica, evapotranspiración, y otros datos derivados u observados diariamente, y los relacionan con información sobre el desarrollo morfológico, crecimiento vegetativo o el rendimiento de los cultivos. Frecuentemente se incorpora el llamado reloj biológico o submodelo para vigilar el estado de desarrollo de la ma durez de los cultivos. Los datos climáticos estándar son utilizados como ingrediente básico, algunos procesos o funciones de respuestas de los cul tivos, tales como la distribución de la humedad del suelo o la respuesta a fertilizantes, son preprogramados; sin embargo, las técnicas estadísticas convencionales (por ejemplo, regresión múltiple) se utilizan para evaluar los coeficientes más importantes en las ecuaciones finales.

Durante los últimos años se ha propuesto un gran número de estos modelos, por ejemplo, el modelo de rendimiento para el trigo de Robertson (1974), y de Baier (1973), un modelo de rendimiento para timothy, de Baier et al (1980); un simulador basado en la humedad del suelo para los rendimientos estacionales del trigo de invierno y de primavera, de Feyerherm (1979); el modelo de rendimiento para soya, de Ravelo (1978), el modelo de rendimiento para el maíz de Runge y Benci (1975) y las predicciones de rendimiento basadas en el clima para racimos de fruta fresca de aceite de palma de Robertson y Foong (1976).

### Modelos de rendimiento basados en análisis de regresión múltiple

Estos modelos han sido desarrollados a partir de una muestra de datos de rendimiento para un área (por ejemplo, campo experimental, distrito de cultivo o región) y una muestra de datos de tiempo y suelo para la misma área, para producir estimados de coeficientes por medio de un cierto tipo de técnicas de regresión.

La validez y aplicación potencial de tales modelos depende de la representatividad de la información suministrada, la selección de las variables y el diseño del modelo. Este enfoque no lleva fácilmente a una explicación de la relación causa y efecto, pero es un procedimiento factible utilizando los datos disponibles de rendimiento y clima.

Ejemplos típicos son los modelos de rendimiento por estado desarrollados por Thompson para trigo (1969), maíz (1969) soya (1970). Los modelos de Thompson fueron modificados por McQuigg y sus colaboradores en el Centro de Evaluación Ambiental y Climática (CCEA), Columbia, Missouri. Ellos introdujeron en las ecuaciones nuevas variables derivadas, así como el concepto de modelos truncados, usando solamente variables hasta una determinada fecha (McQuigg, 1975), y los llamados Modelos de la Segunda Generación CCEA (LeDuc, 1979).

Otros modelos bien conocidos de este tipo son los desarrollados por Haig (1977) para producción de maíz, soya, trigo de invierno y de primavera en lugares seleccionados de los Estados Unidos; los desarrollados por Williams para las praderas del Canadá (Williams, 1979, Williams, et al., 1975).

### 1.3. Materiales y métodos

Para la definición de las potencialidades de producción se seleccionó, según la clasificación Baier (1979) un simulador de tipo mecánico de crecimiento de cultivo, este modelo introduce las leyes de la física en los procesos biológicos que rigen la producción vegetal: Fotosíntesis, respiración, evapotranspiración, crecimiento, etc. El modelo ha sido desarrollado por de Wit y utilizado en un trabajo de zonificación realizado por FAO (1981). El mismo, es una función de producción que integra las variables del clima y permite estimar la producción máxima agrícola bajo el supuesto de que los otros factores limitantes de la producción, tales como suelo, drenaje, abonos, prácticas culturales, etc., no inciden negativamente. En síntesis, la función relaciona las variables del clima más impor-

tantes (radiación solar y la temperatura del aire) con los procesos biológicos determinantes en la producción neta de biomasa (fotosíntesis y respiración ).

La producción neta de biomasa y el rendimiento de los cultivos se define, según el modelo, como el total de materia seca de la planta y la porción de esta materia seca que es utilizada con fines económicos y que puede ser producida por los cultivos sanos bajo el supuesto de buen abastecimiento de agua y nutrientes.

### 1.3.1. Descripción general del modelo de producción de biomasa

#### 1.3.1.1. Producción neta y bruta de biomasa

Para el cálculo de la producción neta de biomasa ( $B_n$ ) del cultivo, se requiere estimar la producción bruta de biomasa ( $B_g$ ) y la pérdida por el proceso de respiración ( $R$ ); esto se representa en la siguiente ecuación:

$$B_n = B_g - R \quad (1)$$

La ecuación que relaciona la tasa de producción neta de biomasa ( $b_n$ ) con la tasa de producción bruta de biomasa ( $b_g$ ) y con la tasa de respiración ( $r$ ) es:

$$b_n = b_g - r \quad (2)$$

La tasa máxima de producción neta de biomasa ( $b_{nm}$ ) se alcanza cuando el cultivo cubre completamente la superficie del suelo. La curva de crecimiento (acumulativo) tiene forma sigmoidea, por lo tanto,  $b_{nm}$  es el punto de inflexión de dicha curva de crecimiento, (Figura 14) es igual a la primera derivada del crecimiento neto durante el período de crecimiento. Si la primera derivada del crecimiento es dibujada a través del tiempo, la curva resultante tendrá la forma de una distribución normal (Figura 15).

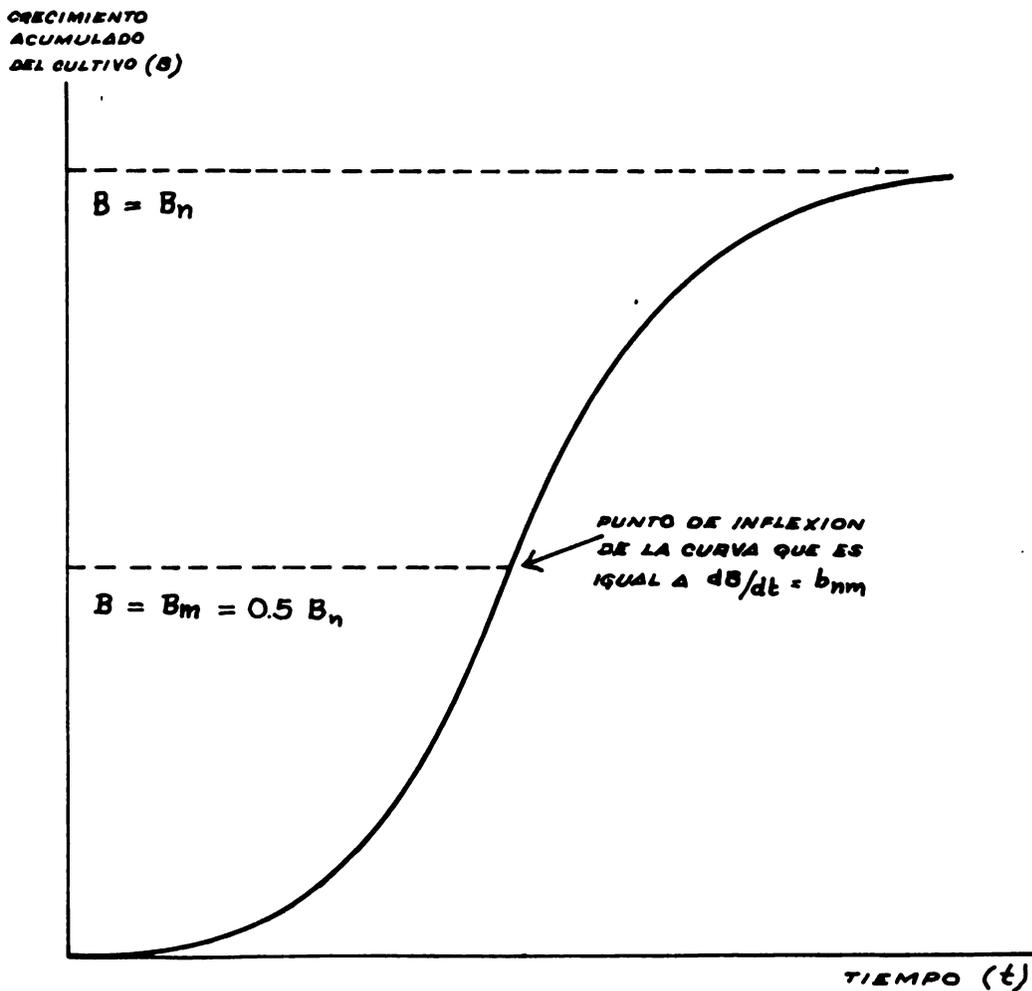
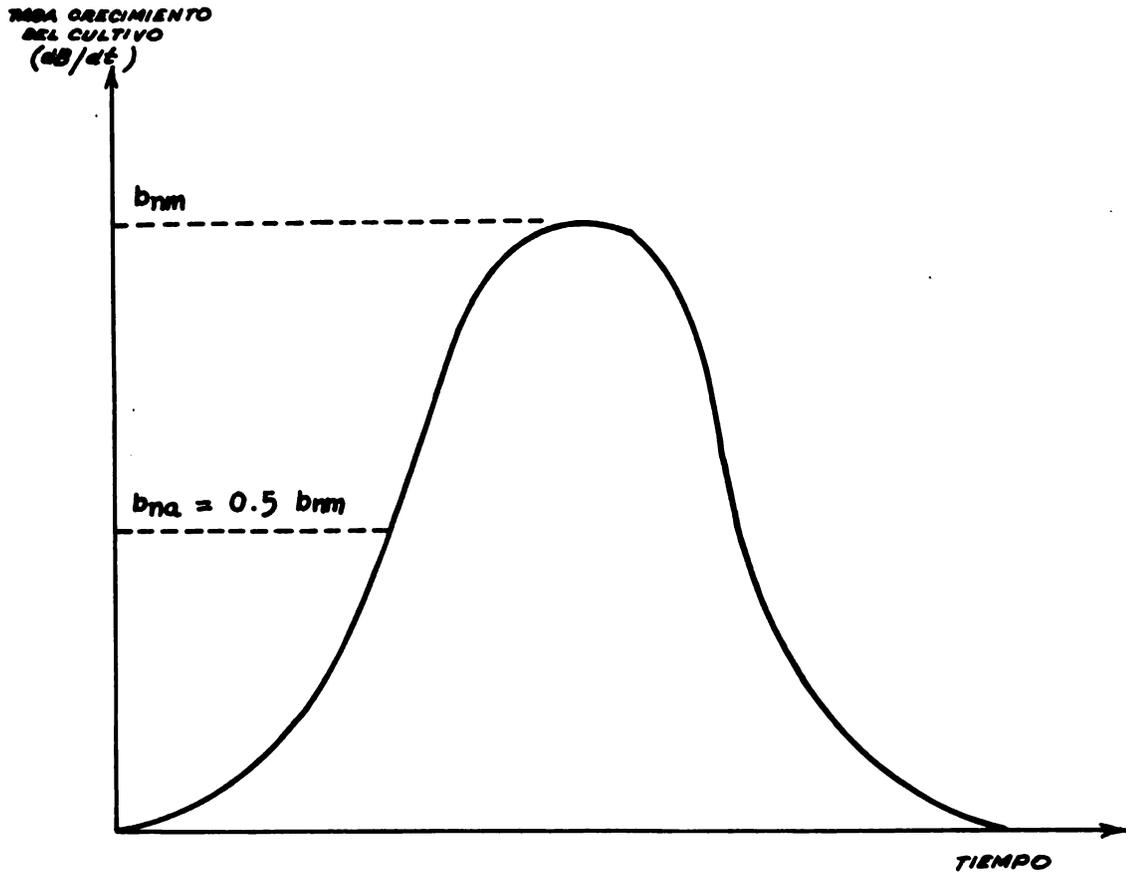


Figura 14. CURVA TIPICA DEL CRECIMIENTO ACUMULATIVO DEL CULTIVO, MOSTRANDO EL PUNTO DE INFLEXION DURANTE EL PERIODO DE MAXIMO CRECIMIENTO CUANDO LA PENDIENTE  $dB/dt$  ES EQUIVALENTE A LA TASA MAXIMA DE PRODUCCION NETA DE BIOMASA



**Figura 15 . LA FORMA NORMAL DE LA CURVA DE LA TASA DE CRECIMIENTO DE UN CULTIVO SIENDO LA VARIABLE INDEPENDIENTE EL TIEMPO MOSTRANDO LA TASA DE CRECIMIENTO PROMEDIO DEL CULTIVO ( $b_{nq}$ ) = 0.5  $b_{nm}$**

El modelo asume que la tasa porcentual de aclimatación de la producción neta (bna) es la mitad de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, esto es, 0.5 brm. La producción neta de biomasa para un cultivo de N días es entonces:

$$bn = 0.5 brm \cdot N \quad (3)$$

Si brm puede calcularse, Bn se obtiene mediante la ecuación 3 usando el valor apropiado para N. Para calcular brm se necesita conocer la tasa máxima de producción bruta de biomasa (bgm) y la tasa de respiración (r).

$$brm = \frac{0.72 bgm}{1 + 0.25 c_t \cdot N} \quad (4)$$

donde:

bgm    tasa máxima de producción bruta de biomasa  
 $c_t$     coeficiente de respiración del cultivo  
 N      período de cultivo

#### 1.3.1.2. Tasa máxima de producción bruta de biomasa (bgm)

El valor de bgm depende de la tasa máxima (Pm) de fotosíntesis de las hojas del cultivo en condición de saturación por la luz.

En la Figura 16 se presentan las variaciones de Pm en relación a la temperatura promedio diurna para los diferentes grupos de cultivos: C<sub>3</sub>, C<sub>3</sub> especial, C<sub>4</sub> y C<sub>4</sub> especial.

La tasa máxima de producción bruta de biomasa (bgm) está relacionada con Pm en la siguiente forma:

$$\text{Si } Pm \gg 20 \text{ kg. CH}_2\text{O ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$bgm = F \cdot bo \cdot (0.8 + 0.01 Pm) + (1 - F) \cdot bc \cdot (0.5 + 0.025 Pm)$$

$$\text{Si } Pm \leq 20 \text{ Kg. CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

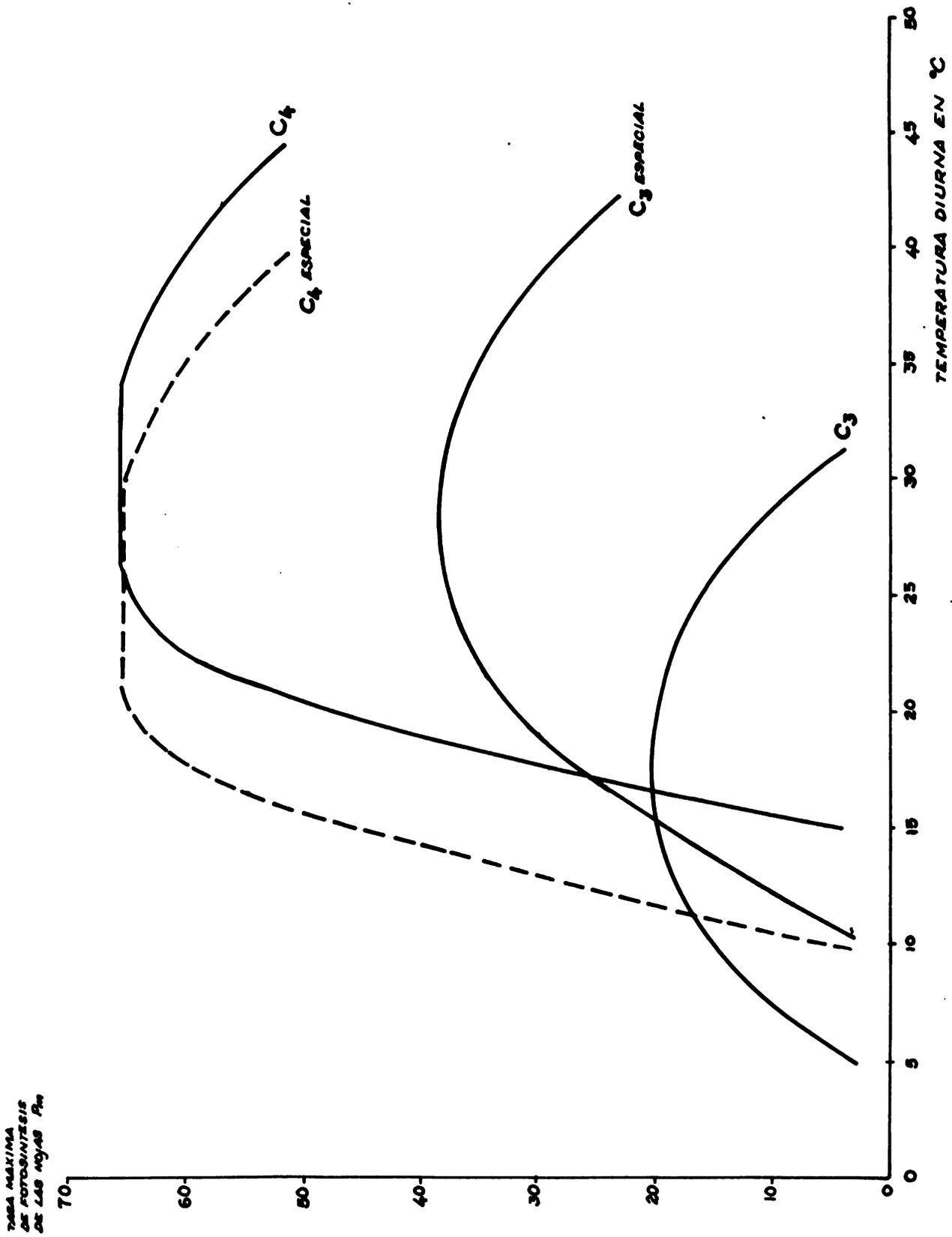


Figura 16 . VARIACIONES PROMEDIO CON LA TEMPERATURA DIURNA PROMEDIO DE LAS TASAS MÁXIMAS DE FOTOSÍNTESIS DE LAS HOJAS DE PLANTAS QUE PERTENECEN A GRUPOS CON METABOLISMO DE TIPO C<sub>3</sub>, C<sub>3</sub> ESPECIAL, C<sub>4</sub> Y C<sub>4</sub> ESPECIAL (EN CONDICION DE SATURACION POR LA LUZ.)

$$b_{gm} = F \cdot b_o \cdot (0.5 + 0.025 P_m) + (1-F) \cdot b_c \cdot (0.05 P_m)$$

donde:

F es la fracción del día, entre el amanecer y el anoecer, durante la cual el cielo está cubierto por nubes.

$$F = \frac{Ac - 0.5 G}{0.8 Ac}$$

G es la radiación global promedio durante el período considerado (en  $\text{cal. cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ )

Ac es el promedio durante el período considerado la radiación fotosintéticamente activa (en  $\text{cal. cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ). Se calcula a partir de la fecha del día y de la latitud del lugar considerado.

$b_o$  y  $b_c$  son las tasas diarias máximas de fotosíntesis bruta de un cultivo durante un día perfectamente claro y durante un día nublado respectivamente. Se calculan a partir de la fecha del día y de la latitud del lugar en estudio.

Los valores Ac,  $b_o$  y  $b_c$  para diferentes latitudes fueron calculados por de Wit para un  $P_m$  de  $20 \text{ kg. CH}_2\text{O ha}^{-1}, \text{ h}^{-1}$ .

#### 1.3.1.3. Coeficiente de respiración del cultivo ( $c_t$ )

El coeficiente de respiración del cultivo ( $c_t$ ) se expresa a partir de la temperatura promedio t, por:

$$c_t = c_{30} (0.044 + 0.0019 t + 0.001 t^2)$$

donde:  $c_{30}$  es el coeficiente de respiración del cultivo para  $t = 30^\circ\text{C}$

Se ha determinado que  $c_{30} = 0.0283$  para las leguminosas y  $c_{30} = 0.0108$  para los cultivos no leguminosos.

Considerando las ecuaciones 3 y 4 se puede obtener la expresión matemática de la función de producción potencial:

$$B_n = \frac{0.36 \text{ bgm}}{1/N + 0.25 c_t} \quad (5)$$

$B_n$  producción neta de biomasa del cultivo durante los  $N$  días del ciclo y expresada en toneladas por hectárea.

$\text{bgm}$  tasa máxima de producción bruta de biomasa del cultivo

$N$  ciclo del cultivo expresado en días

$c_t$  coeficiente de respiración del cultivo

### 1.3.2. Índice de rendimiento final

El tipo de modelos más utilizados en este caso, son los modelos de rendimiento que se basan en el análisis de regresión múltiple. Esto se justifica porque en la actualidad se desconoce como se distribuyen los diferentes productos de la fotosíntesis en las distintas partes de la planta (raíces, tallos, frutos, hojas, etc)

Estos modelos se obtienen como se indicó anteriormente, de relacionar los datos de rendimiento de una región determinada con datos del clima y suelo por medio de técnicas de regresión.

Como ilustración, se presenta el modelo desarrollado por Martínez (1972) en el ingenio de Xicoténcatl en Tamps, México. El cual nos permitirá continuar con el ejemplo de zonificación de la caña de azúcar. Este investigador comprobó que la variación diurna entre las temperaturas máxima y mínima, un mes antes de la cosecha de la caña, produce un efecto positivo sobre los rendimientos de fábrica; en tanto que las lluvias registradas en el lapso de dos meses, previo a la cosecha, tien

den a reducir los rendimientos.

Los resultados anteriores le sugirieron un método para el pronóstico de la mejor época de zafra que ha sido modificado por Rojas y Eldin (1983).

Quedando, el índice climático de madurez, definido por la siguiente relación.

$$I_i = \frac{A_i}{P_i}$$

donde:

$I_i$ : Índice climático de madurez, cuyo número de orden se representa por la letra  $i$ .

$P_i$ : Suma de seis probabilidades, para las cuales la precipitación durante la década sea mayor o igual a la mitad de la evapotranspiración potencial, cuyo número de orden se representa por la letra  $i$ .

$A_i$ : Promedio para tres décadas consecutivas de sus respectivas amplitudes de temperaturas.

Para todos los posibles períodos de  $t$  décadas consecutivas, donde  $t$  es la duración probable de la zafra en décadas, se obtiene la suma de los  $t$  valores correspondientes a  $I_i$ . El intervalo de  $t$  décadas, para el cual la suma de los  $I_i$  es máxima, será el más apropiado para realizar la zafra desde el punto de vista climático.

#### Resultados y discusión

-----

La función de producción potencial descrita se utilizó en 100 estaciones meteorológicas de Costa Rica (Quadro 1) para el estudio de dos cultivos : Café, Coffea arabica ( con metabolismo  $c_3$ ) y caña de azúcar

Saccharum spp (con metabolismo  $c_4$  especial). Para cada una de estas estaciones se calculó el valor del índice de producción potencial, el cual se expresa en toneladas de materia seca por hectárea. A partir de estos resultados se trazaron los mapas de isolíneas del índice para el cafeto (Mapa 2) y la caña de azúcar (Mapa 3).

Se aprecia en términos generales que el valor del índice aumenta cuando la duración en días del período de cultivos aumenta. Esto último se evidencia, en el caso de la caña de azúcar en la región atlántica del país donde se pueden alcanzar períodos de cultivo de hasta 365 días. Sin embargo, esto no sucede igual para el cafeto, ya que en la zona atlántica se dan temperaturas un tanto altas para este cultivo. Temperaturas que se alejan del rango óptimo térmico para el café; provocando un aumento del nivel de la tasa de respiración que ocasiona una disminución en la producción de biomasa neta.

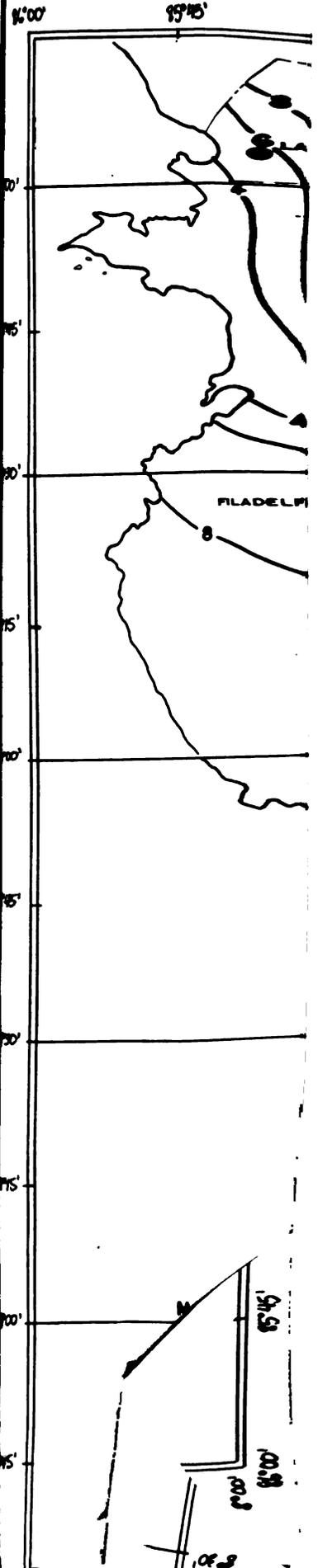
En los mapas se aprecia las diferencias en potenciales de producción de materia seca para cada uno de estos cultivos en las distintas regiones de Costa Rica.

Para el caso de la caña de azúcar se agregó al análisis agroclimático de definición de potenciales en biomasa el índice de rendimiento final.

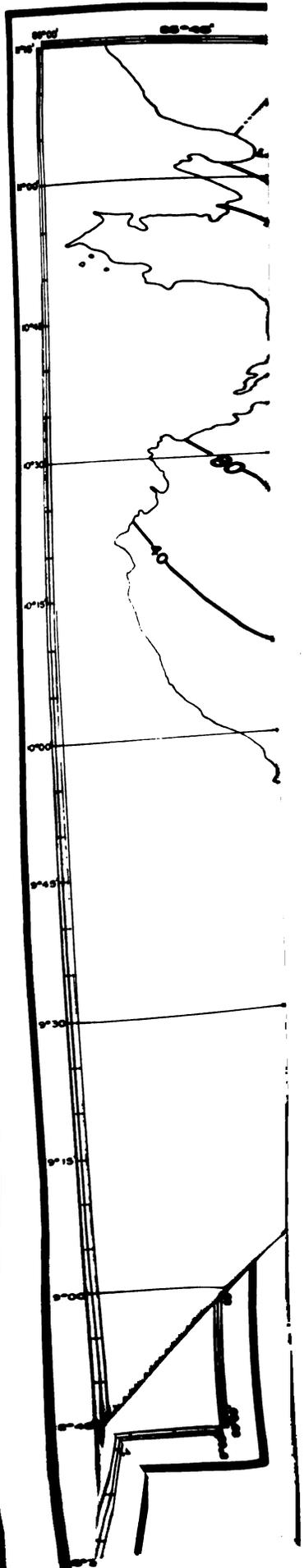
Del resultado por estación se pasó a la expresión cartográfica (Mapa 4). Se nota que los valores más bajos para el índice (ICM) se obtienen en la región costera atlántica; indicando esto que esta región no tiene condiciones climáticas adecuadas para la acumulación de sacarosa en la planta. El caso contrario ocurre en el Pacífico Norte, donde el clima juega un papel favorable en el proceso de acumulación y formación de sacarosa.

En el caso de zonificación del café no se ilustra este aspecto, sin embargo, sería conveniente buscar una relación entre el clima y la formación del grano. Para esto sería interesante utilizar el balance hídrico teórico que se presentó en el segundo capítulo de este trabajo; debido a la importancia que tiene el déficit hídrico en la antesis del cafeto.











## RESUMEN

En este capítulo se presentó una función de producción potencial que relaciona el clima con los procesos biológicos determinantes en la producción neta de biomasa (fotosíntesis y respiración). Esta función integra los principales parámetros climáticos (temperaturas del aire, radiación solar) y sus resultados se expresan en toneladas de materia seca por hectárea.

Para pasar de la cantidad de biomasa al rendimiento final (parte de la planta con interés económico) se propone buscar una relación por medio de métodos estadísticos de regresión, entre el clima y el rendimiento. Algunos autores han utilizado un promedio de los porcentajes para realizar este pasaje según el cultivo en estudio.

Esto es, han determinado que porcentaje de la producción neta de biomasa corresponde a la parte con interés económico (hojas, frutos, granos, raíces, etc.) Sin embargo, para algunos cultivos esta proporcionalidad, depende en realidad del clima en el momento de la "maduración económica" del cultivo. Esto último se ilustró con el caso de la caña de azúcar donde el porcentaje de sacarosa está fuertemente influenciado por las condiciones climáticas previas a la zafra, cometiendo un error si este porcentaje se considera como una constante.

Por estas razones, nos parece más apropiado buscar por los medios estadísticos una ecuación que relacione el clima con el rendimiento final; en espera que los fisiólogos puedan modelizar la distribución de los productos de la fotosíntesis en las distintas partes de la planta.

Se señala, que el valor de estos índices debe ser considerado, ante todo como un valor relativo y se recuerda que su propósito principal es permitir la definición y comparación de zonas geográficas diferentes desde el punto de vista de las potencialidades climáticas de producción agrícola.



## CAPITULO IV

### ESTUDIO DE LAS CONDICIONES FISIOEDAFICAS, SINTESIS CARTOGRAFICA Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS FINALES

#### 1. Introducción

La capacidad de un área para producir puede definirse en función de atributos de orden climático y edáfico que en conjunto configuren una estructura clasificada y jerarquizada para establecer sus bondades productivas (García, J., 1980).

Un método tradicional y corrientemente empleado en el estudio de la capacidad productiva de áreas y su zonificación, es aquel donde se interrelacionan estudios agroclimáticos y unidades de clasificación de suelos. La síntesis cartográfica es entonces un paso integrador clima-suelo. El principal problema en cuanto a la información edáfica es que la mayoría de los estudios de suelos, tendientes a una cartografía de los mismos y realizados por las clasificaciones convencionales, necesitan de una transformación interpretativa, para poderlos aplicar a la zonificación de cultivos específicos.

En esta transformación se debe considerar, además, el material parental y los procesos pedogenéticos que determinan las características ecológicas de los suelos y por ende su potencial de rendimiento. Es por ello que este breve capítulo se refiere al análisis de la información fisioedáfica disponible y a su interpretación para clasificar los mismos en función de un gradiente edáfico marginal-óptimo de producción.

#### 2. Análisis de las variables fisioedáficas

A partir del conocimiento de los requerimientos edáficos de los cultivos, determinados en la primera etapa y del conocimiento de las prácticas culturales más aconsejables (riego, mecanización, etc.) para el cultivo, se

analiza la información disponible sobre aspectos topográficos y edáficos del territorio a zonificar.

En condiciones óptimas, el tipo de documentos cartográficos más empleados, son los mapas de capacidad de uso de la tierra o de uso potencial.

Algunos estudios de suelos presentan al describir sus unidades mapeadas la potencialidad agrícola de los mismos en una escala cualitativa indicando: Suelos con alto, medio, bajo, etc. potencial agrícola o suelos con características deseables para un excelente, bueno, regular, etc. aprovechamiento agrícola. En otros estudios, es necesario avocarse a la jerarquización de las unidades mapeadas en función de su vocación productiva y referidas a los requerimientos fisioedáficos de los cultivos en estudio.

Los requerimientos fisioedáficos de un cultivo o sus tipos fisioedáficos pueden establecerse de manera similar a los tipos agroclimáticos del mismo; sin embargo, la variabilidad, entre cultivos, de sus tipos fisioedáficos es mucho menor que entre los correspondientes agroclimáticos, ya que la gran mayoría de los cultivos tienden a adaptarse muy bien en un suelo ideal o patrón universal de suelo bueno, profundo, permeable, con buena capacidad de retención de agua fértil y con alto contenido de materia orgánica. En contraposición, entre los óptimos climáticos para un conjunto de cultivos se puede encontrar una fuerte dispersión por sus distintas necesidades climáticas.

El criterio de selección y clasificación de las unidades edáficas a ser usadas en la zonificación se fundamenta en la selección y jerarquización de variables derivadas de propiedades ecopedológicas, entre las que se citarán: Textura, desarrollo, profundidad, posibilidad de enraizamiento, forma de sedimentación, etc. incluyendo si es posible, contenido de carbono total, capacidad de intercambio y saturación de bases, contenido de nutrientes, permeabilidad, tamaño

de las partículas, etc. Cada una de estas variables se jerarquiza individualmente de mejor a peor en una escala cualitativa que puede ser suficiente en tres o cuatro categorías (García, J; Araque, R. 1971; IICA, 1971 a ; Pedaherrera, M., 1971), en las cuales se deben considerar cinco variables como:

- 1) Profundidad efectiva
- 2) Fertilidad
- 3) Capacidad de retención de humedad
- 4) Drenaje
- 5) Topografía

En el Mapa 5 se muestra un ejemplo de reclasificación de las variables fisioedáficas según su aptitud para el cultivo de la caña de azúcar. En esta oportunidad se utilizó el mapa de asociaciones de sub-grupos de suelos de Costa Rica, elaborado por la Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria. Se designaron tres categorías: Muy buena, buena, regular. Además, como información adicional, se indicó el tipo de restricción de cada unidad: (a) acidez, (p) pendiente, (t) textura, (d) drenaje, (f) fertilidad, (o) profundidad, (i) inundaciones, (r) fragmentos rocosos.

### 3. Síntesis cartográfica y presentación de los resultados finales.

En esta etapa del proceso de zonificación, se realiza una síntesis con los mapas de componentes elaborados en las etapas precedentes. El método más simple de llevar a cabo esta etapa, es mediante el uso de una técnica empleada frecuentemente en las ciencias geográficas, la que se denomina síntesis cartográfica sucesiva. Esta síntesis cartográfica puede realizarse por métodos manuales o por métodos de síntesis modernos con la ayuda de computadoras.

La síntesis cartográfica sucesiva consiste, como su nombre lo indica, en la superposición y síntesis sucesiva de los mapas de componentes.

Por lo general en el esquema metodológico propuesto se trabaja en



ESTUDIO APROXIMATIVO DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

**MAPA 5.**

**SUELOS DE COSTA RICA SEGUN APTITUD PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

<b>CLASE</b>	<b>LIMITANTES FISIODIÁFICAS</b>	
10 MUY BUENA	A ADOZ	F FERTILIDAD
9 BUENA	P PENDIENTE	o PROFUNDIDAD
8 MARGINAL	T TEXTURA	I INUNDACIONES
	A DRENAJE	T HABILIDAD MUNDOS

MADE 1. 1940 600

AUTOR: RAFAEL ROJAS      DIBUJO: ROBERTO RODRIGUEZ

dos fases: la primera conduce a la síntesis de mapas factoriales agroclimáticos, que dará como resultado la definición de las áreas agroclimáticas para el cultivo (potenciales de producción) y la segunda que corresponde a la adición a esta síntesis agroclimática, de las variables fisioedáficas, obteniéndose de esta manera la definición de las unidades de zonificación agroecológica del cultivo.

En relación a la presentación de los resultados finales, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura con la experiencia obtenida en los proyectos de zonificación ha adoptado algunas pautas para la presentación de los mapas finales.

Las unidades delimitadas en el mapa final de zonificación son caracterizadas por un número fraccionario, en cuyo numerador aparecen dos números enteros; el primero representa la categoría del índice de producción potencial y el segundo la del índice de rendimiento final. En el denominador aparece un número acompañado por una letra, el número representa la categoría fisioedáfica y la letra las posibles limitantes en relación al suelo.

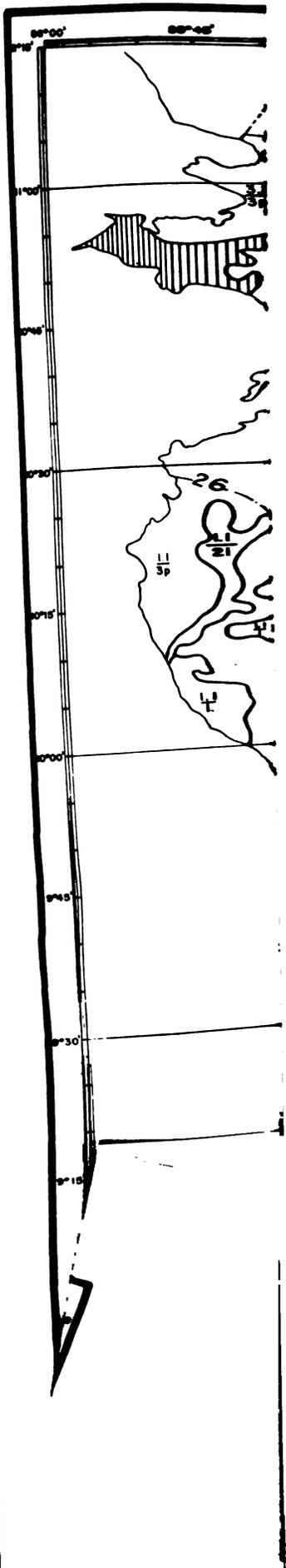
Con la finalidad de hacer más accesible la interpretación a los utilizadores de la zonificación agroecológica, se hace una jerarquización de las diversas unidades. Las categorías indican el margen de probabilidad para la obtención de rendimientos.

- 1) Muy alta probabilidad de obtener buenos rendimientos.
- 2) Alta probabilidad de obtener buenos rendimientos.
- 3) Regular probabilidad de obtener buenos rendimientos.
- 4) Baja probabilidad de obtener buenos rendimientos

5) Muy baja probabilidad de obtener buenos rendimientos.

El Mapa 6 constituye un ejemplo de zonificación, en este caso para el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica. Esta zonificación agroecológica se obtuvo mediante la sobreposición de tres mapas anteriormente descritos (Escala 1:500 000).

El número fraccionario tiene en este ejemplo la siguiente interpretación: El primer número del numerador representa la clasificación del índice de producción potencial; esto es, se señala si es posible esperar un buen rendimiento en el tonelaje de caña por hectárea. El segundo número representa la categoría del índice climático de madurez (rendimiento final) e indica cómo son las condiciones del clima con respecto a la acumulación de la sacarosa en la caña. El número en el denominador representa, como se indicó la categoría fisioedáfica y la letra las posibles limitantes que deben ser consideradas para el manejo eficiente del suelo.





## RESUMEN

La estructura metodológica de zonificación agroecológica de cultivos expuesta en este trabajo, constituye una herramienta esencial en la planificación agropecuaria. Los resultados son complemento indispensable de los estudios socioeconómicos. Todo planificador o economista agrario necesita, a la hora de formular políticas de desarrollo agrícola del conocimiento biofísico de las regiones en las cuales va a recaer el planeamiento.

Los métodos presentados permiten una mejor comprensión del medio agroecológico en el cual se van a desarrollar los cultivos; además proporcionan las indicaciones necesarias para la selección de variedades y fechas apropiadas de siembra, desde un punto de vista agroclimático.

Se demostró la factibilidad de estimar algunos datos meteorológicos (temperaturas máxima y mínima, duración de la insolación, radiación, etc.) que generalmente no se encuentran en las estaciones meteorológicas de los países en vías de desarrollo. Se presentó una fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial que por involucrar un menor número de parámetros meteorológicos permite una mayor área de aplicación.

De igual forma se introducen técnicas de análisis agroclimático para el estudio de las transferencias de agua que se dan entre el suelo, el cultivo y la atmósfera. Se integran parámetros propios de la planta (coeficiente de cultivo) y de la reserva hídrica del suelo.

Para la definición de los potenciales productivos de las diferentes regiones se propone el uso de una función de producción que relaciona el clima con los procesos biológicos determinantes en la producción neta de biomasa (fotosíntesis y respiración); así como el empleo de los métodos de regresión para obtener una ecuación que relacione los parámetros meteorológicos con el rendimiento final, en espera que los fisiólogos puedan modelizar la distribución de los productos de la fotosíntesis en las distintas partes de la planta. Al análisis agroclimático anterior se suma el estudio de los variables fisioedáficas y por último se realiza la síntesis cartográfica para determinar las áreas para el desarrollo agrícola.



## LITERATURA CITADA

1. AGUIRRE, J.A. Proyecto de regionalización agropecuaria del Istmo Centroamericano. Documento de trabajo. Turrialba, Costa Rica. IICA. 5 p. 1970.
2. \_\_\_\_\_. Regionalización agrícola de Guatemala, Honduras y Nicaragua. Documento de trabajo. Turrialba, Costa Rica. IICA. 30 p. 1970.
3. ARMUELLES, R. A. La zonificación agropecuaria de Panamá. Turrialba, Costa Rica. 231 p. 1969.
4. ARKIN, G.F.; VANDERLIP, R.L.; RITCHIE, J.T. A dynamic grain sorghum model. Trans of the ASAE 19(4): 622-26, 630. 1976.
5. BAIER, W. Crop weather analysis model, 1. Summary. Int. J. Biometeorol. 17(4): 313-320. 1973.
6. \_\_\_\_\_. Note on the terminology of crop weather models. Agric. Meteorol. 20:137-145. 1979.
7. \_\_\_\_\_. St. PIERRE, J.C. LOVERING, J.H. Analysis of environmental factors affecting timothy yields. Agric. Meteorol. 22:319-339 1980.
8. BLANCO, E. A. Regionalización agrícola de Nicaragua. Turrialba, Costa Rica. 514 p. 1971.
9. CENTRE D' ETUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ECOLOGIQUES. Ecologie végétal et développement du territoire. Centre National de la Recherche Scientifique. CEPE, Montpellier. France. 1967.
10. CENTRO INTERAMERICANO DE FOTOINTERPRETACION. Actas del VII Simposio Internacional sobre levantamientos integrados para el desarrollo regional. Bogotá, Colombia. 1974.
11. CHOISNEL, E. Le bilan d' énergie et le bilan hydrique du sol. La Meteorologie Vème série 11:103-159 pp. 1977.
12. CHRISTIAN, C.; STEWART, G. Methodology of integrated surveys. Aerial surveys and interpreted studies. Proc. UNESCO. Toulouse 233-280 pp. 1967.
13. DE WIT, C.T., et al. A dynamic model of plant and crop growth. In potential crop production. A case study, eds. P.P. Wareing and J.R. Cooper (London, Heinemann Educational Books). 117-142 P P. 1971
14. ELDIN, M. A system of agroclimatic zoning to evaluate climatic potential for crop production. In. Cusack, D.F. (Ed). Agroclimatic information for development. Reviving the Green Revolution. Boulder, Colorado, Westview. 83-91 pp. 1983.

15. FEYERHERM, A.M. Estimation of wheat yields from meteorological and agronomic observations. Final Report: Contract NAS 9-14533. (Manhattan, Kansas, Kansas State University). 1979.
16. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Report on the agro-ecological zones project. Vol. 3. Methodology and results for South and Central América. World Soil Resources Report. No. 48. FAO. Rome. 251 p. 1981.
17. FRANQUIN, P. Analyse agroclimatique en régions tropicales: Méthode des intersections et périodes fréquentielle de végétation. L' Agronomie Tropicale 28 No. 6-7. 1973.
18. GARCIA, J.; ARAQUE R. Zonificación de la producción frutícola. I Parte: Región Capital. Estudio de los marcos de referencia biofísico y socioeconómico tentativo. 346 p. 1971.
19. \_\_\_\_\_. Una contribución a la metodología de la zonificación ecológica de cultivos anuales. Tesis, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 155 p. 1972.
20. \_\_\_\_\_. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Universidad Experimental Francisco de Miranda. Venezuela. 451 p. 1980.
21. HAIG, P.A. Separating the effects of weather and management on crop production. (Columbia, Missouri, Charles F. Kettering Fundation), ST. 77-4, 93p. 1977.
22. HARGREAVES, GH. World Water for Agriculture. Utah State University. 1977.
23. HENRY, J.M. Cahiers de la Recherche en Analogie Agrobioclimatique CIDAT Belgique. 1976.
24. HOLT, D.A., et al. Environmental physiology, modeling and simulation of alfalfa growth, 1. Conceptual development of SIMED. Agricultural Experiment Station. Purdue University, West Lafayette, Indiana, in cooperation with the ARS, USDA, Research Bulletin, 907. 1975.
25. INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS. Informe sobre el proyecto de zonificación ecológica de cultivos de consumo básico y tradicionales de exportación para los países del Mercado Común Centroamericano. Turrialba, Costa Rica. CIEI. 59 p. 1971.

26. \_\_\_\_\_. Informe sobre el proyecto de zonificación ecológica de cultivos de consumo básico y tradicionales de exportación para la República de Panamá. Turrialba, Costa Rica. CTEI. 51 p. 1971.
27. Le DUC, S. K. CCEA. Second Generation Model. In Proc. Crop Modeling Workshop. Columbia, Missouri. October 1977 (Washington, D.C., U. S. Dept. of Commerce, NOAA, Env: Data and Infor. Ser.). 1979.
28. LHOMME, J.P.; ROJAS, O.E. Análisis de los riesgos climáticos para la agricultura en el Departamento de la Paz, Bolivia: Metodología y resultados. Costa Rica: IICA-ORSTOM. 43 p. 1983.
29. \_\_\_\_\_.; GOMEZ, L.; JARAMILLO, A. Modelo matemático del balance hídrico. Turrialba 34(4) 503-507 pp. 1984.
30. MARTINEZ, A. Diseño y análisis de experimentos con caña de azúcar. México: Colegio de Post-graduados, Escuela Nacional de Agricultura. 203 p. 1972.
31. McQUIGG, J.D. Economic impacts of weather variability. Univ. of Missouri, Columbia, Dept. of Atmospheric S i. 256 p. 1975.
32. MONTOYA, J.M. Informe sobre el proyecto zonificación ecológica de cultivos de consumo básico y tradicionales de exportación para los países del Mercado Común Centroamericano. Turrialba, Costa Rica. IICA (100 mapas: 1:500 000) 59 p. 1971.
33. \_\_\_\_\_.; GARCIA, J. Metodología para la zonificación ecológica del frijol (*Phaseolus Vulgaris*) en Centroamérica In. Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos Alimenticios. Panamá. 31 p. 1971.
34. OFICINA PLANIFICACION SECTORIAL AGROPECUARIA. Manual descriptivo del mapa de asociaciones de sub-grupos de suelos de Costa Rica. San José. 236 p. 1979.
35. PEDAHERRERA, M. Influencia de los factores biofísicos y socioeconómicos en la producción del café en el Ecuador. Turrialba, Costa Rica, IICA. 119 p. 1971.
36. PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, base soil and grass. Royal Soc., London Proc. Ser. A. 193:120-146 p.p. 1948.
37. PRIESTLEY, C.; TAYLOR, P.A. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Monthly weather Review. 100:81-92 pp. 1972.
38. QUIROZ, R. La regionalización agrícola en Centroamérica y Panamá. In Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Décimo Cuarta Reunión del Consejo Técnico Consultivo del IICA. Quito, IICA. 24 p. 1969.

39. RAVELO, A. C. Modeling soybean yields from environmental data. Ph. D. thesis, University Of Missouri, Columbia. 83 p. 1978.
40. ROBÉLIN, M. Etude de la sensibilité du maïs á la sécheresse. Periode critique de sensibilité. C.R. Acad. Agric. 1967.
41. ROBERTSON, G.W. Wheat yields for 50 years swift current, saskatchewan in relation to weather. Can J. plant Sci. 54:626-50.
42. \_\_\_\_\_. FOONG, S. F. Weather based yield forecast for oil palm fresh bunches. Proc. Malaysian Inter. Agric. Oil Palm Conf., 14-19 june 1976, kuala Lumpur. 1976.
43. ROJAS, O. E.; ELDIN M.; LHOMME, J.P. Información del banco de datos agroclimáticos de Costa Rica. IICA-ORSTOM-IMN. Costa Rica 7 vols. 1982
44. \_\_\_\_\_. ELDIN, M. 1983. Zonificación Agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar (Saccharum sp) en Costa Rica: LAICA-IICA. Serie Publicaciones Misceláneas No. 398. 120 p. 1983.
45. \_\_\_\_\_. Etude Agrométéorologique du bilan hydrique théorique et essai de modélesation d' irrigation dans le Sud Ouest de la France. INA-París-Grignon. France 74 p.
46. \_\_\_\_\_. Estudio Agroclimático de Costa Rica. IICA. Serie Publicaciones Misceláneas No. 617. 178 p. 1985.
47. \_\_\_\_\_. Estudio de las condiciones hídricas para los cantones: Esparza, Acosta, San Mateo, Atenas, Orotina, Garabito, Turubares Puriscal, Acosta, Mora y Aserrí, Costa Rica: IICA-Proyecto CEE Serie Publicaciones Misceláneas No. 616. 93 p. 1985.
48. RUNGE, E.C.; BENCI, J.F. Modeling corn production- estimating production under variable soil and climatic conditions. Proc. 13 th. Annual corn and Sorghum Res. Conf. 195-214. 1975.
49. SHAWCROFT, R.W., et al. The soil plant atmosphere model and some of its predictions. Agric. Meteorol. 14 (1/2): 287-307 pp. 1974.
50. STAPPER, M.; ARKIN, G.F. CORNF: A dinamic growth and development model for maize (Zea mays L.). Program and Model Documentation No. 80-2 (Temple Blackland Res. Cen., Texas Agr. Exp. Sta., Texas A & M University System). 1980.
51. THOMPSON, L.M. Weather and technology in the production of corn in the U. S. corn belt. Agron. J. 61: 453-56. 1969.

52. \_\_\_\_\_ Weather and technology in the production of wheat in the United States. *J. Soil Water Conserv.* 24: 219-227.
53. THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology. *Publications in Climatology. Publications in* 10 (2): 189-311.
54. TURC, L. Evaluation des besoins en eau d' irrigation, evapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques.* Paris, France. 1961.
55. WILLIAMS. G.D.V. Canadian Prairie cereal crop production 1962-1977. In *Proc. Crop Modeling Workshop, D. C., U. S. Dept. of Commerce NOAA. Env. Data and Infor, Serv.* 1979.
56. \_\_\_\_\_ ; JOYNT, M.I.; McCORMICK, P.A. Regression analysis of Canadian Prairie crop district cereal yields; 1961-1972 in relation to weather soil and trend. *Can J. of soil Sci.* 55:43-55 1975.
57. VINOGRADOV, B. The landscape concept and its use in the study of grassland territories. Publication on the ITC. UNESCO. Centre for Integrated Surveys. 1967.



**ANEXO A**



Cuadro 11 LA RADIACION EXTRATERRESTRE R<sub>e</sub> EXPRESADA EN EQUIVALENTE DE EVAPORACION, EN MM/DIA

Hemisferio Norte												Hemisferio Sur												
En.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Lat	En.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ar.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.4	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30	17.8	16.4	14.0	11.1	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0	15.0	15.2	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8







111 00000





**ANEXO A**



Cuadro 11 LA RADIACION EXTRATERRESTRE R<sub>e</sub> EXPRESADA EN EQUIVALENTE DE EVAPORACION, EN MM/DIA

Hemisferio Norte												Hemisferio Sur												
En.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Lat	En.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.4	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
6.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.9	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0	15.0	15.2	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8







111 0211



