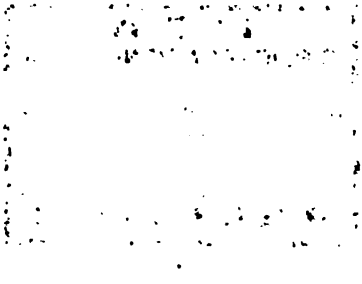
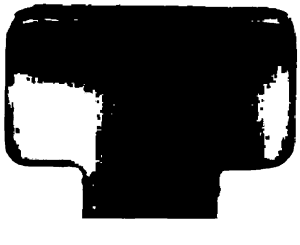




Para nuestro Representante en Chile Ariel Rivera Irías
Con el agradecimiento por hacer de este libro una realidad.
Agustín A. Mullan
21/11/97

MANEJO DE AGUA
Y
PRODUCCION AGRICOLA

IICA
BIBLIOTECA VENEZUELA
* 19 OCT. 2000 *
RECIBIDO

IICA
F06
03

00006719

AGUSTIN A. MILLAR

IICA
BIBLIOTECA VENEZUELA
* 19 OCT. 2000 *
RECIBIDO

MANEJO DE AGUA
Y
PRODUCCION AGRICOLA

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION
PARA LA AGRICULTURA
OFICINA EN CHILE

Copyright ©1998 de IICA

COMPOSICION del propio autor, en computador, utilizando el Programa MICRO-TEX Personal Typesetting Software.

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta edición puede ser utilizada o reproducida – en cualquier medio o forma, sea mecánica o electrónica, fotocopia, grabación, etc. – ni almacenada en sistema de Banco de Datos, sin la expresa autorización del IICA.

SOBRE EL AUTOR ...

El Dr. Agustín A. Millar obtuvo su título de Ingeniero Agrónomo en la Universidad de Concepción (Chillán, Chile), Master of Science en la Universidad de Dakota del Norte (Estados Unidos) y Ph.D. en Ciencias del Agua en la Universidad de Wisconsin (Estados Unidos).

Fue Profesor Titular en la Escuela de Agronomía de la Universidad de Concepción.

Durante 20 años ha prestado servicios profesionales como experto en riego y drenaje en IICA/OEA y FAO/PNUD y ha asesorado a instituciones de riego en Brasil, Chile, Uruguay, Costa Rica, República Dominicana y Haití.

Ha publicado más de 170 publicaciones técnicas en las áreas de riego, drenaje, salinidad, manejo de agua y desarrollo de la agricultura bajo riego, entre ellas el libro "Drenaje de Tierras Agrícolas: Bases Agronómicas" (McGraw Hill de Brasil).

DEDICATORIA

A mi esposa Teresita y a mi hija Claudia Giselle

PRESENTACION

Uno de los grandes temas que actualmente se debate a nivel internacional se refiere al desarrollo sustentado, el cual debe tener como base el uso y manejo racional de los recursos naturales y conservación del medio ambiente con el objetivo de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras.

En los proyectos de riego, la sustentabilidad es más crítica que en otros proyectos porque se introduce un elemento modificador del medio ambiente que es el agua, se realizan altas inversiones y se requiere de una alta intensidad de uso de la tierra e insumos, y tecnificación para su factibilidad.

Con el objetivo de propiciar el desarrollo sustentable de las áreas bajo riego, se debe dar gran importancia a todos los aspectos institucionales, técnicos y socioeconómicos de la fase de desarrollo agrícola de los proyectos. Son los resultados de esta fase que determinan la permanencia en el tiempo de los proyectos y la mantención de la calidad de los recursos naturales y de su potencial de productividad.

La introducción del insumo agua crea la necesidad de adopción de nuevas tecnologías de aprovechamiento, uso y manejo, donde el concepto de eficiencia operacional es el factor clave para evitar problemas de degradación y pérdida de los recursos de suelo y agua.

Este libro fue escrito con la finalidad de incidir sobre los aspectos de manejo de agua en la producción agrícola bajo riego como una forma de contribuir al entendimiento de los aspectos teóricos y prácticos ligados a la producción bajo riego dentro de la complejidad del sistem suelo–agua–planta–atmósfera y a mejorar la eficiencia de uso del agua de riego.

Su contenido programático fue probado y mejorado, principalmente en los cursos de postgrado realizados por el autor en varias universidades latinoamericanas y programas de capacitación del IICA, a través de un proceso iterativo donde hubo aportes y sugerencias importantes de los participantes de los cursos y usuarios de la información. A través de los diferentes capítulos se utilizan más de 200 gráficos en la explicación de los fenómenos físicos y biológicos, lo cual se hace con la filosofía de que una figura vale por mil palabras.

En su forma actual, el libro está principalmente dirigido para uso por los estudiantes avanzados de las carreras de Agronomía, Ingeniería Agrícola e Ingeniería Civil. Se pretende, también, que sea de utilidad para estudiantes

de postgrado en riego y profesionales que trabajan en agricultura bajo riego, por el contenido práctico de varios capítulos.

Varias instituciones y personas contribuyeron para hacer realidad la aparición de este libro. Entre las instituciones cabe mencionar y agradecer al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) que facilitó tiempo y recursos para desarrollarlo.

Finalmente, mis agradecimientos a todos los técnicos y secretarias que, en los diferentes países e instituciones, dieron su contribución para la preparacion de los manuscritos.

AGUSTIN A. MILLAR
SANTIAGO, CHILE
1993

INDICE

1. CONCEPTOS BASICOS 17

1.1. Terminología Termodinámica 17

1.2. Potencial de Agua 23

1.3. Consideraciones Finales 32

1.4. Referencias Bibliográficas 33

2. DETERMINACION DEL AGUA EN EL SUELO: PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS Y CALCULOS 35

2.1. Descripción de los Métodos 37

2.2. Expresión del Agua en el Suelo 67

2.3. Concepto Hidráulico del Agua en el Suelo 72

2.4. Ejemplos Conceptuales 75

2.5. Referencias Bibliográficas 77

3. MOVIMIENTO DE AGUA EN EL SUELO 81

3.1. Ecuación de Darcy 81

3.2. Gradiente Hidráulico o de Potencial de Agua 83

3.3. Ecuación de Continuidad 84

3.4. Movimiento de Agua en Suelos Saturados 87

3.5. Movimiento de Agua en Suelos no Saturados 93

3.6. Movimiento de Agua en Suelos Estratificados 97

3.7. Referencias Bibliográficas 101

4. RELACIONES HIDRICAS EN SUELOS 103

4.1. Suelos Saturados 103

4.2. Suelos no Saturados 104

4.3. Disponibilidad de Agua del Suelo para las Plantas 122

4.4. Referencias Bibliográficas 125

5. DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD CAPILAR DEL SUELO 129

5.1. Método Basado en las Propiedades del Suelo 130

5.2. Método de la Extracción del Agua (Plato Poroso) 130

5.3. Método del Flujo Constante 133

5.4. Columnas de Suelo en Proceso de Drenaje 135

5.5. Infiltración a Través de una Capa Artificial de Permeabilidad Conocida 138

5.6. Determinación "in situ" de la Conductividad Capilar 139

5.7. Referencias Bibliográficas 147

6. USO PRACTICO DE LA INFORMACION DE CONDUCTIVIDAD CAPILAR Y DIFUSIVIDAD DEL SUELO 151

6.1. Contribución de Agua a los Cultivos Desde Napas Freáticas por Alza Capilar 151

6.2. Movimiento de Agua en el Suelo Hacia las Raices de las Plantas 159

6.3. Movimiento de Nutrientes Asociados con el Movimiento de Agua 160

6.4. Movimiento y Distribución de Algunos Nutrientes en el Suelo 162

6.5. Referencias Bibliográficas 169

7. LA PLANTA COMO INDICADORA DE LA NECESIDAD DE RIEGO 173

7.1. Criterios para Seleccionar un Método de Medida del Déficit de Agua 175

7.2. Métodos de Medida del Déficit de Agua en las Plantas 176

7.3. Separación de los Componentes del Potencial de Agua 183

7.4. Referencias Bibliográficas 184

8. EL AGUA EN LA PLANTA Y EN EL SISTEMA SUELO–PLANTA 189

8.1. Relaciones Hídricas en la Planta 192

8.2. EL Agua del Suelo y Relaciones Hídricas de la Planta 203

8.3. Influencia de los Parámetros Ambientales 208

8.4. Transpiración y Control Estomático 218

8.5. Fotosíntesis y Producción 232

8.6. Referencias Bibliográficas 245

9. MOVIMIENTO DE AGUA EN EL SISTEMA SUELO–PLANTA 251

9.1. Densidad de Flujo y Gradiente de Potencial 251

9.2. Resistencia del Sistema Suelo–Planta al Flujo de Agua 255

9.3. Referencias Bibliográficas 264

10. INFORMACIONES BASICAS DE LOS CULTIVOS PARA EL MANEJO DEL RIEGO 267

10.1. Información Genérica Presentada en la Literatura 268

10.2. Procedimientos Metodológicos 271

10.3. Informaciones Básicas de los Cultivos 276

10.4. Referencias Bibliográficas 311

11. EFECTOS DEL EXCESO DE AGUA SOBRE LOS CULTIVOS 321

11.1. Aireación y Crecimiento 321

11.2. Aireación y Procesos Fisiológicos 326

11.3. Exceso de Agua y Rendimiento de los Cultivos 328

11.4. Referencias Bibliográficas 338

12. EVAPORACION DESDE SUPERFICIES 341

12.1. Factores que Afectan la Tasa de Evaporación 342

12.2. Evaporación Desde Suelos Desnudos 343

12.3. Evapotranspiración 346

12.4. Evaporación Desde una Cubierta Vegetal: Separación entre Transpiración del Cultivo y Evaporación del Suelo 354

12.5. Transpiración del Cultivo: Modelaje por Transferencia de Masa 358

12.6. Referencias Bibliográficas 364

13. DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION 367

13.1. Balance Hídrico 367

13.2. Balance de Energía 373

13.3. Lisímetros 377

13.4. Modelos 384

13.5. Tanque de Evaporación 420

13.6. Referencias Bibliográficas 427

14. FUNCIONES DE PRODUCCION 433

14.1. Producción y Tecnología 433

14.2. Producción Bajo Riego 437

14.3. Funciones de Producción para Riego 438

14.4. Referencias Bibliográficas 462

15. INVESTIGACION PRIORITARIA PARA AREAS BAJO RIEGO 467

15.1. Consideraciones Generales 467

15.2. Definiciones 468

15.3. Filosofía del Programa 470

15.4. Líneas Principales de Investigación 474

15.5. Control del Riego en Investigaciones 492

15.6. Referencias Bibliográficas 505

16. USO DE DATOS DE RIEGO EN REGIONES DE SECANO 511

16.1. Efecto de la Sequía y Tolerancia de los Cultivos 511

16.2. Tolerancia a la Sequía por Adaptación 512

16.3. Tolerancia a la Sequía por Inducción 517

16.4. Déficit Fenológico de Agua y Régimen Pluviométrico 518

16.5. Experimentos de Riego y su Uso en Secano 518

16.6. Referencias Bibliográficas 522

17. INFORMACION TECNICA PARA EXTENSION EN RIEGO 525

17.1. Consideraciones Generales 525

17.2. Tecnología a Transferir 528

17.3. Ejemplos de Adecuación de la Información Técnica 529

17.4. Referencias Bibliográficas 540

APENDICE: INFORMACIONES TABULADAS PARA CALCULOS METEOROLOGICOS 541

CAPITULO 1

CONCEPTOS BASICOS

El manejo de agua y las relaciones agua-producción tienen su base teórica en los principios que gobiernan las relaciones hídricas del contínuo suelo-planta-atmósfera.

El rápido desarrollo del conocimiento de las relaciones suelo agua planta dió como resultado la necesidad de usar una terminología más precisa y sencilla para describir el sistema.

En la década del sesenta, algunos investigadores patrocinaron la idea de unificar las terminologías usadas por los cientistas del suelo y fisiólogos vegetales (Taylor y Slatyer, 1960, 1961; Slatyer, 1962; Kramer et al., 1966; Slatyer, 1967; Corey et al., 1967; Taylor, 1968).

El uso del Déficit de Presión de Difusión (Meyer, 1945) resultó muy útil a través de muchos años, pero poco a poco se fue abandonando en favor de una terminología más básica basada en principios termodinámicos (Taylor y Slatyer, 1961).

El trabajo de Taylor y Slatyer (1961) dió como resultado el desarrollo de una terminología unificada para el uso en estudios de las relaciones suelo agua planta, la cual se basa en la Función de Energía Libre de Gibbs, la cual se presenta en este Capítulo.

1.1. Terminología Termodinámica.

En general, la termodinámica lidia con energía y sus transformaciones. Energía es la capacidad de un cuerpo o sistema para desarrollar trabajo.

Hay dos clases de energía:

a. Energía Cinética. Es la energía debida al movimiento, incluyendo velocidad de la masa, como así también el movimiento al azar de las moléculas dentro del cuerpo, movimientos atómicos y subatómicos.

b. Energía Potencial. Es la energía debida a la posición relativa en varios campos de fuerzas (gravitacional, eléctrica, magnética, etc.).

La suma de la energía cinética y energía potencial de un sistema se conoce como energía interna.

1.1.1. Primera Ley de la Termodinámica

Esta ley es también conocida como la Ley de la Conservación de la Energía, y expresa que: "el aumento de la energía interna de una substancia durante cualquier transformación es igual a la cantidad de calor suministrado menos el trabajo realizado por la substancia.

En forma finita, esta ley se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta W \tag{1.1}$$

donde ΔE es la variación en la energía interna, ΔQ es la variación en la energía introducida en el sistema y ΔW es el trabajo realizado por el sistema. Se considera el término ΔW compuesto de dos subpartes:

$$\Delta W = P\Delta V + \Delta W_m \tag{1.2}$$

donde $P\Delta V$ es el trabajo de expansión contra la presión P, siendo V el volumen del sistema, y ΔW_m considera cualquier otro trabajo realizado por el sistema (mecánico, eléctrico, etc).

Substituyendo la ecuación (1.2) en (1.1), se tiene:

$$\Delta E = \Delta Q - P\Delta V - \Delta W_m \tag{1.3}$$

La derivación anterior supone un sistema cerrado donde no hay transferencia de masa hacia dentro o fuera del sistema.

En el caso de un sistema abierto, la Primera Ley de la Termodinámica puede ser modificada para tomar en cuenta las pérdidas de energía interna.

Para un sistema abierto, la ecuación 1.5 queda de la siguiente manera:

$$\Delta E = \Delta Q - P\Delta V - \Delta W_m + \sum_i (\partial E/\partial n_i)_{S,V,n_j} \Delta n_i \tag{1.4}$$

donde n_i es la cantidad del componente i presente en el sistema y n_j representa los otros componentes, excepto n_i. La Δn_i es negativa para remoción de energía y positiva para adición de energía.

1.1.2. Segunda Ley de la Termodinámica

Esta ley , también se conoce como Ley de la Degradación de la energía o Ley de Aumento de la Entropía, y se define como: "Ningún cuerpo o substancia sin ayuda de un agente externo puede transferir calor desde un cuerpo de baja temperatura a uno de alta temperatura".

Esta ley indica la dirección de la reacción (dirección del flujo de calor) y limita la primera ley. La primera ley de la termodinámica especifica la relación cuantitativa que debe existir entre cualquier intercambio de trabajo y calor, mientras que la segunda ley especifica las condiciones bajos las cuales es posible convertir calor en trabajo.

La Segunda Ley de la Termodinámica se expresa cuantitativamente en términos del concepto de entropía, el cual es una medida de la distribución al azar de la energía. Mientras mayor es la desorganización de un sistema, mayor es su entropía.

$$\Delta S = (\Delta Q/T) \qquad (\textit{Proceso reversible}) \tag{1.5}$$

donde ΔS es la variación en entropía y T es la temperatura absoluta.

1.1.3. Función de la Energía Libre de Gibbs

La termodinámica es una ciencia empírica que se basa en propiedades fácilmente medibles de un sistema tales como presión y temperatura.

La función que describe el sistema físico en términos de temperatura y presión se llama función de Gibbs, energía libre de Gibbs, o energía libre.

La energía libre de Gibbs (G) se puede definir como:

$$G = E + PV - TS \tag{1.6}$$

donde E es la energía interna de un sistema, P es la presión externa, V es el volumen del sistema, T es la temperatura absoluta y S es la entropía del sistema.

Diferenciando la ecuación (1.6), se obtiene:

$$dG = dE + PdV + VdP - TdS - SdT \tag{1.7}$$

Escribiendo las ecuaciones (1.4) y (1.5) en términos infinitesimales, se tiene:

$$dE = dQ - PdV - dW_m + \sum_i (\partial E/\partial n_i)_{S,V,n_j} \, dn_i \qquad (1.8)$$

$$dQ = TdS \qquad (1.9)$$

Substituyendo la ecuación (1.9) en (1.8), y luego la ecuación (1.8) en (1.7) y rearreglando términos, se obtiene:

$$dG = VdP - SdT - dW_m + \sum_i (\partial E/\partial n_i)_{S,V,n_j} \, dn_i \qquad (1.10)$$

La ecuación (1.10) constituye la Función de la Energía Libre de Gibbs modificada por la primera y la segunda ley de la termodinámica.

La Función de la Energía Libre de Gibbs, también se puede escribir en términos de las variables independientes que describen el sistema, como sigue:

$$G = f(P, T, x_1 \ldots x_i, n_1 \ldots n_i) \qquad (1.11)$$

donde P es la presión y T es la temperatura absoluta. Como ejemplo de variables x se tiene: campo de fuerza gravitacional, campo de fuerza magnética, campo de fuerza eléctrica y campo de fuerza radioactiva. Como ejemplo de variables n se tiene: partículas, agua, solutos, gases y microbios.

El cambio de la Energía Libre de Gibbs se puede escribir mediante la ecuación básica de diferenciación parcial como una ecuación de las variables mencionadas (P, T, x, n), como sigue:

$$dG = (\partial G/\partial P)_{T,X,n} \, dP + (\partial G/\partial T)_{P,X,n} \, dT$$

$$+ (\partial G/\partial X_i)_{P,T,n,X_j} \, dX_i + (\partial G/\partial n_i)_{P,T,X,n_j} \, dn_i \qquad (1.12)$$

La ecuación (1.12) constituye la Energía Libre de Gibbs del sistema total. Los coeficientes parciales de la ecuación (1.12) se pueden determinar por comparación con la ecuación (1.10), resultando lo siguiente:

$$(\partial G/\partial P)_{T,X,n} = v \quad (\textit{Volumen total del sistema}) \qquad (1.13)$$

$$(\partial G/\partial T)_{P,X,n} = -s \quad (\textit{Entropía total del sistema}) \qquad (1.14)$$

$$\partial G/\partial X_i)_{T,P,n,X_j} = g \quad (En\ campo\ de\ fuerza\ gravitacional) \tag{1.15}$$

$$(\partial G/\partial n_i)_{T,P,X,n_j} = (\partial E/\partial n_i)_{S,V,n_j} \tag{1.16}$$

El último término de la ecuación (1.16) tiene un nombre especial:

$$\overline{G}_i = (\partial G/\partial n_i)_{T,P,X,n_j} \tag{1.17}$$

"Energía Libre Parcial Molar de Gibbs del componente i", "Energía Libre Parcial Específica de Gibbs del componente i", "Potencial Químico del componente i " (μ_i), "Potencial Termodinámico", etc.

El término "Potencial Químico" se usa en química donde P, T y n son las únicas variables independientes. Los campos de fuerzas gravitacionales y eléctricos no son considerados.

Hasta ahora se ha considerado la energía del sistema en general, tal como sólido, agua, soluto, aire, etc. Un valor más práctico es la Energía Libre Parcial Específica de un componente en particular, como el caso del agua ($\overline{G}_i = \overline{G}_{H_2O}$), el cual es nuestro objetivo principal en este Capítulo.

1.1.4. Energía Libre Parcial Específica de Gibbs

Sistema: Agua del suelo o planta con sus moléculas y iones.

Parcial: Significa que el agua es una parte del sistema suelo o planta.

Específica: Significa que se expresa en base a un gramo de agua.

La Energía Libre Específica (ecuación 1.17) es una función intensiva.

Intensiva: Significa energía por unidad de componente i.

Extensiva: Significa energía total, volumen total, entropía total, masa total o moles del constituyente.

Las variables intensivas se deben usar para describir funciones intensivas, luego se tiene:

$$\overline{G}_i = f(G) \tag{1.18}$$

$$G = f(P,\ T,\ x_1 \ldots x_i,\ n_1 \ldots n_i) \tag{1.19}$$

luego:

$$\overline{G}_i = f(P,\ T,\ x_1 \ldots x_i,\ n_1 \ldots n_i) \qquad (1.20)$$

donde P, T x son variables intensivas, las cuales no dependen de masa, moles o volumen, y n es una variable extensiva, la cual depende de la masa o moles de un constituyente, pero se puede hacer variable intensiva expresándose como fracción de masa o fracción molar.

Fracción molar:

$$(n_2/n_{H_2O}),\ (n_3/n_{H_2O}), \ldots\ldots, (n_i/n_{H_2O}) \qquad (1.21)$$

en que:

$$N_1 = (n_2/n_{H_2O}),\quad N_2 = (n_3/n_{H_2O}), \ldots\ldots N_{i-1} = (n_i/n_{H_2O}) \qquad (1.22)$$

donde N_1, N_2, ..., N_i son la proporción de moles de todos los constituyentes del soluto en el cuerpo de agua, excepto los iones para la capacidad de intercambio representados por campos de fuerza osmóticos debidos a partículas cargadas.

Si se necesitan i números de moles para definir la composición de un sistema, entonces i-1 fracción de moles son suficientes para definir la composición. Entonces, ahora se puede escribir:

$$\overline{G}_i = f(P,\ T,\ X,\ N) \qquad (1.23)$$

y el cambio en energía libre parcial específica de Gibbs se puede escribir por diferenciación como una función de la variables independientes P, T, X y N, como sigue:

$$d\overline{G}_i = (\partial\overline{G}/\partial P)_{T,X,N}\, dP + (\partial\overline{G}/\partial T)_{P,X,N}\, dT$$
$$+ \sum_i (\partial\overline{G}/\partial X_i)_{P,T,N,X_j}\, dX_i + \sum_i (\partial\overline{G}/\partial N_i)_{P,T,X,N_j}\, dN_i \qquad (1.24)$$

Las derivadas parciales de la energía libre específica (ecuación 1.24) se pueden evaluar en términos de las ecuaciones de la Función de Gibbs (ecuaciones 1.13 a 1.16), como sigue:

$$(\partial\overline{G}/\partial P)_{T,X,N} = \{\partial(\partial\overline{G}/\partial n_i)_{P,T,X,n_j}/\partial P\}_{T,X,N}$$

$$= \{\partial(\partial \overline{G}/\partial P)_{T,X,N}/\partial n_i\}_{P,T,X,n_j}$$

$$= (\partial V/\partial n_i)_{P,T,X,n_j} = v_i \quad (cm^3/g) \tag{1.25}$$

v_i se llama "Volumen Parcial Específico del Agua". De la misma forma:

$$(\partial \overline{G}/\partial T)_{P,X,N} = -(\partial S/\partial n_i)_{P,T,X,n_j} = -s_i \tag{1.26}$$

Finalmente, la ecuación (1.24) se puede escribir como:

$$d\overline{G}_i = v_i\, dP - s_i\, dT + \sum_i (\partial \overline{G}/\partial X_i)_{P,X,N,X_j}\, dX_i$$

$$+ \sum_i (\partial \overline{G}/\partial N_i)_{P,T,X,N_j}\, dN_i \tag{1.27}$$

la cual constituye la ecuación mas general para la Energía Libre Parcial Específica de Gibbs del agua.

1.2. Potencial de Agua.

La terminología termodinámica considera al "Potencial de Agua" como el término mas apropiado para describir el potencial químico del agua en la planta o en el suelo.

El potencial total o potencial de agua, en cualquier punto en un sistema es la cantidad de trabajo que se debe efectuar por cantidad unitaria de agua pura para transportar, reversible e isotermicamente, una infinitésima cantidad de agua desde un "pool" de agua pura a una elevación determinada a la misma temperatura y presión, hasta un punto en cuestión (Gardner, 1965).

El potencial de agua se identifica con la energía libre parcial específica parcial de Gibbs discutida anteriormente, y describe la diferencia entre el potencial químico de agua en un punto del sistema considerado (μ_w) y el potencial químico de agua pura libre a la misma temperatura, presión y elevación (μ_w^o). Esta diferencia se puede evaluar midiendo la presión de vapor del sistema en equilibrio, lo cual esta definido por la expresión siguiente:

$$\Delta\mu_w = \mu_w - \mu_w^o = RT\ ln(e/e_o) \tag{1.28}$$

donde:
$\Delta\mu_w$ = Potencial de agua (erg/mol)
μ_w = Potencial químico del agua considerada (erg/mol)

CUADRO 1.1.Potencial de agua, en bar, para diferentes valores de humedad relativa del aire a 20 °C.

Humedad relativa (%)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
90	142,0	141,0	139,0	138,0	136,0	135,0	133,0	132,0	130,0	129,0
91	127,0	126,0	124,0	123,0	121,0	120,0	118,0	116,0	115,0	114,0
92	112,0	111,0	109,0	108,0	106,0	105,0	103,0	102,0	101,0	99,4
93	98,0	96,4	95,0	93,6	92,2	90,8	89,3	87,9	86,4	84,9
94	83,5	82,1	80,6	79,2	77,8	76,4	75,0	73,5	72,1	70,7
95	69,3	67,9	66,5	65,0	63,6	62,2	60,8	59,4	57,9	56,5
96	55,2	53,3	52,4	51,0	49,5	48,1	46,7	45,3	43,9	42,5
97	41,1	39,7	38,3	37,0	35,7	34,2	32,8	31,4	30,0	28,7
98	27,2	25,9	24,5	23,1	21,7	20,4	19,0	17,6	16,3	14,9
99	13,6	12,2	11,2	9,5	8,1	6,8	5,4	4,1	2,7	1,4

μ_w^o = Potencial químico del agua pura libre (erg/mol)
R = Constante de los gases ideales (erg/mol)
T = Temperatura absoluta (°K)
e = Presión de vapor de agua en el sistema a la temperatura T
e_o = Presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura T y elevación
e/e_o = Humedad relativa

En el Cuadro 1.1 se presentan los valores de potencial de agua para diferentes valores de humedad relativa del aire, en el rango de 90 a 99 %, a 20 °C. En este rango de humedad relativa de los tejidos vegetales y del suelo es que ocurren los procesos biológicos de importancia agronómica.

El término $(\mu_w - \mu_w^o)$ tiene particular importancia en los estudios de las relaciones suelo agua planta puesto que mide la capacidad del agua de un sistema para realizar trabajo, comparado a la capacidad de trabajo del agua pura, en un punto del sistema considerado.

En la relación (1.28), el potencial de agua queda expresado en unidades de energía (erg/mol). Debido a que en estudios de las relaciones suelo agua planta se utilizan unidades de presión, se ha introducido el potencial de agua expresado en erg/cm, el cual se relaciona con la diferencia de potenciales químicos de la siguiente manera:

$$\Psi = (\mu_w - \mu_w^o)/\overline{V}_w = RT \ ln(e/e_o)/\overline{V}_w \qquad (1.29)$$

donde Ψ es el potencial de agua (erg/cm) y $\overline{V}_w$ es el volumen molal parcial del agua (cm^3/mol). Esta definición permite obtener unidades dimensionalmente equivalentes a presión, como se demuestra a continuación:

(erg/mol)/(cm^3/mol)= erg/cm^3 =(dina cm)/(cm^3)= dina/cm^2

Unidad de Presión, P = Fuerza/Area (dina/cm^2)

Debido a esto, el potencial de agua se puede expresar en las unidades tradicionales de presión, bar o atmósfera, cuyas equivalencias son

1 bar = 0,987 atmósfera = 1×10^6 dinas/cm^2

En el Cuadro 1.2 se presentan las unidades de potencial de agua y sus equivalencias a 25 °C, dependiendo de si se expresa en energía por volumen, energía por peso o energía por masa.

Considerando una temperatura de 20 °C(293 °K), R igual a 0,082 litro-atmósfera/mol °K, y utilizando logaritmo de base 10, la relación 1.28 se reduce a:

CUADRO 1.2. Unidades del potencial de agua y sus equivalencias a 25 °C (Taylor, 1968).

Energía por Volumen (Presión)			Energía por Peso	Energía por Masa		
Bar	Atm	Dina/cm^2	cm agua	Erg/g	J/g	J/kg
1	0,987	1×10^6	1019,7	1×10^6	0,1	100
1,013	1	$1,013 \times 10^6$	1033,2	$1,013 \times 10^6$	0,1013	101,3
1×10^{-6}	$0,987 \times 10^{-6}$	1	$1,02 \times 10^{-3}$	1	1×10^{-7}	10^4
$9,8 \times 10^{-4}$	$9,679 \times 10^{-4}$	$9,8 \times 10^2$	1	$9,8 \times 10^2$	$9,8 \times 10^{-5}$	0,098
10	9,87	1×10^7	10197	1×10^7	1	1000
0,01	$0,987 \times 10^{-2}$	1×10^4	10,2	1×10^4	1×10^{-3}	1

$$\Psi = 3163 \log(HR/100) \quad (bar) \tag{1.30}$$

donde HR es la humedad relativa del aire expresada en porcentaje.

El potencial de agua, también se expresa en unidades de erg/g mediante el uso de la función específica parcial de Gibbs en lugar del potencial químico (Slatyer, 1967). Estas dos funciones se relacionan simplemente, puesto que la energía libre específica parcial esta dada por:

$$(\partial G/\partial m_w)_{P,T,m_j} = (1/M_w)(\partial G/\partial n_w)_{P,T,n_j} = (1/M_w)\,\mu_w \tag{1.31}$$

donde $(\partial G/\partial m_w)$ es la energía libre específica parcial, $(\partial G/\partial n_w)$ es la energía libre molal parcial, G es la energía libre de Gibbs, m_w es la masa de agua, M_w es el peso molecular del agua y n_w es el número de moles de agua.

El potencial de agua en cualquier sistema esta influenciado por varios factores que cambian la energía libre o actividad química de las moléculas de agua. El potencial de agua disminuye con la adición de solutos, por las fuerzas de superficie (matriz) las cuales retienen el agua, con presiones negativas y por la disminución de temperatura.

Bajo condiciones de equilibrio (condiciones isotérmicas), el estado del agua del suelo o en las células de las plantas se puede describir en términos de varios componentes energéticos, como sigue:

$$\Psi = \psi_\pi + \psi_p + \psi_m \tag{1.32}$$

donde Ψ es el potencial de agua, ψ_π es el potencial osmótico, ψ_p es el potencial de presión (presión de turgencia en el caso de las plantas), y ψ_m es el potencial matricial debido a las fuerzas de superficies. En plantas, la partición de energía entre los componentes osmótico y matricial (fuerzas de superficie) es arbitraria puesto que el agua puede estar sujeta a ambos efectos, particularmente cuando el contenido de agua de las hojas es bajo (Gardner y Ehlig, 1965).

El potencial de presión (ψ_p) puede ser positivo, como en la presión de turgencia de las plantas, o negativo como en el xilema de las plantas en transpiración. El potencial osmótico (ψ_π) y el potencial matricial (ψ_m) son iguales a cero o negativo puesto que tanto los solutos como las fuerzas de superficie reducen el potencial de agua. La suma de los tres términos da origen a un valor negativo, lo cual se puede apreciar por inspección matemática de la ecuación (1.29).

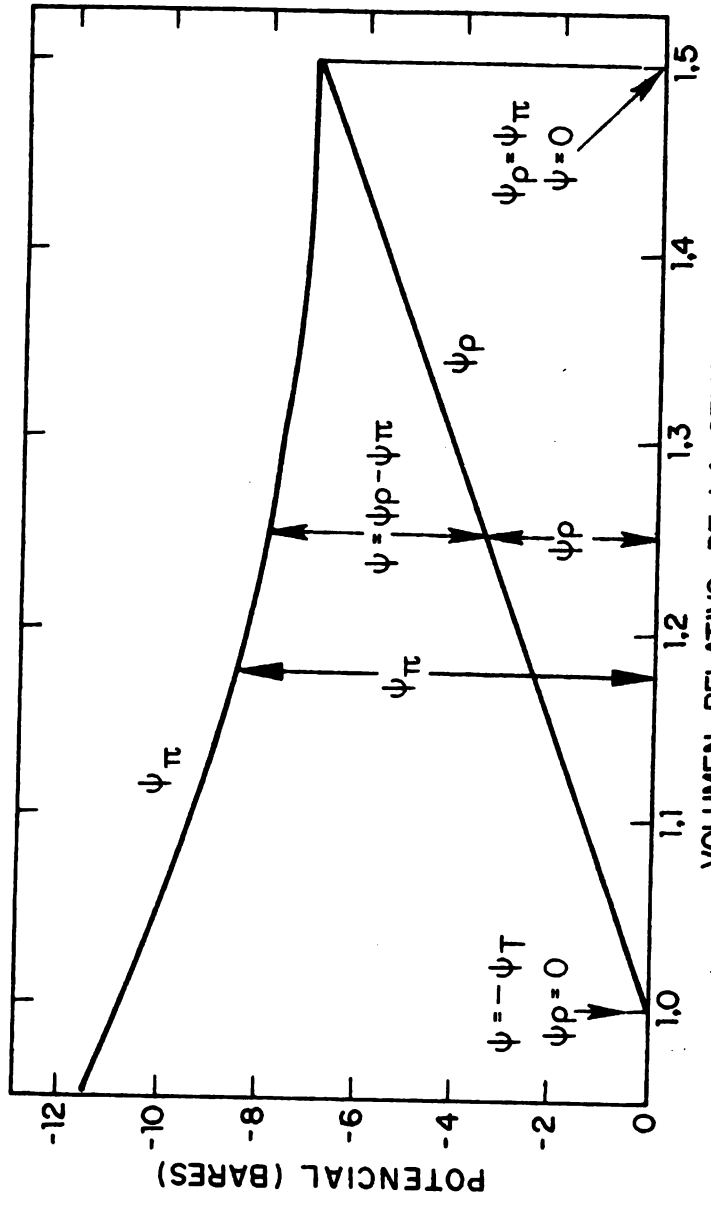


FIGURA 1.1. Relaciones entre ψ, ψ_π y ψ_ρ en una célula idealizada (Slatyer, 1967).

El potencial de agua es cero en suelos saturados y en plantas completamente turgidas y puede llegar a ser positivo en plantas exudantes o gutantes (Slatyer y Gardner, 1965).

Utilizando P para presión hidrostática (presión de turgencia), Π para presión osmótica y τ para presiones negativas de la matriz (succión), entonces se puede escribir la ecuación (1.32) de la siguiente manera:

$$\Psi = P - \Pi - \tau \qquad (1.33)$$

Esta expresión se compara con la clásica $DPD = PO - PT$ o con la usada en suelos (Slatyer y Gardner, 1965):

Succión total = Succión osmótica + Succión de la matriz

El potencial de agua definido por la ecuación (1.29) se puede relacionar a la "succión total" del suelo, al "déficit total de humedad del suelo" (DTHS) y al DPD, como sigue:

$$\Psi = (\mu_w - \mu_w^o)/\bar{V}_w = -\text{DPD} = -\text{DTHS} = -(\text{Succión total})$$

El potencial de agua del suelo o planta se puede determinar midiendo la humedad relativa del aire en equilibrio con el sistema, entre otros métodos, mediante el uso de sicrómetros de termopares (Millar, 1971) que se discuten en detalles en el Capítulo 2. Las determinaciones realizadas en muestras de suelo en platos porosos sólo indican el potencial matricial al cual el agua se encuentra retenida.

1.2.1. Relaciones Entre los Componentes del Potencial de Agua en una Célula Idealizada

La relación entre el potencial de presión (ψ_p), el potencial osmótico (ψ_π) y el potencial de agua (Ψ), en una célula idealizada se presenta en la Figura 1.1 (Slatyer, 1967).

Con una disminución en el volumen hay un aumento gradual en el potencial osmótico debido a la pérdida de agua, lo cual produce una mayor concentración de soluto, y una reducción en el potencial de presión. El potencial de agua es cero cuando la turgencia es completa ($\Psi = 0$ y $\psi_p = \psi_\pi$), y decrece progresivamente con la disminución del volumen celular.

Cuando $\psi_p = 0$, $\Psi = -\psi_\pi$, entonces la célula esta bajo condiciones de plasmólisis incipiente.

En la literatura existen muchos resultados experimentales de las relaciones entre Ψ, ψ_π y ψ_p para la mayoría de los cultivos de importancia

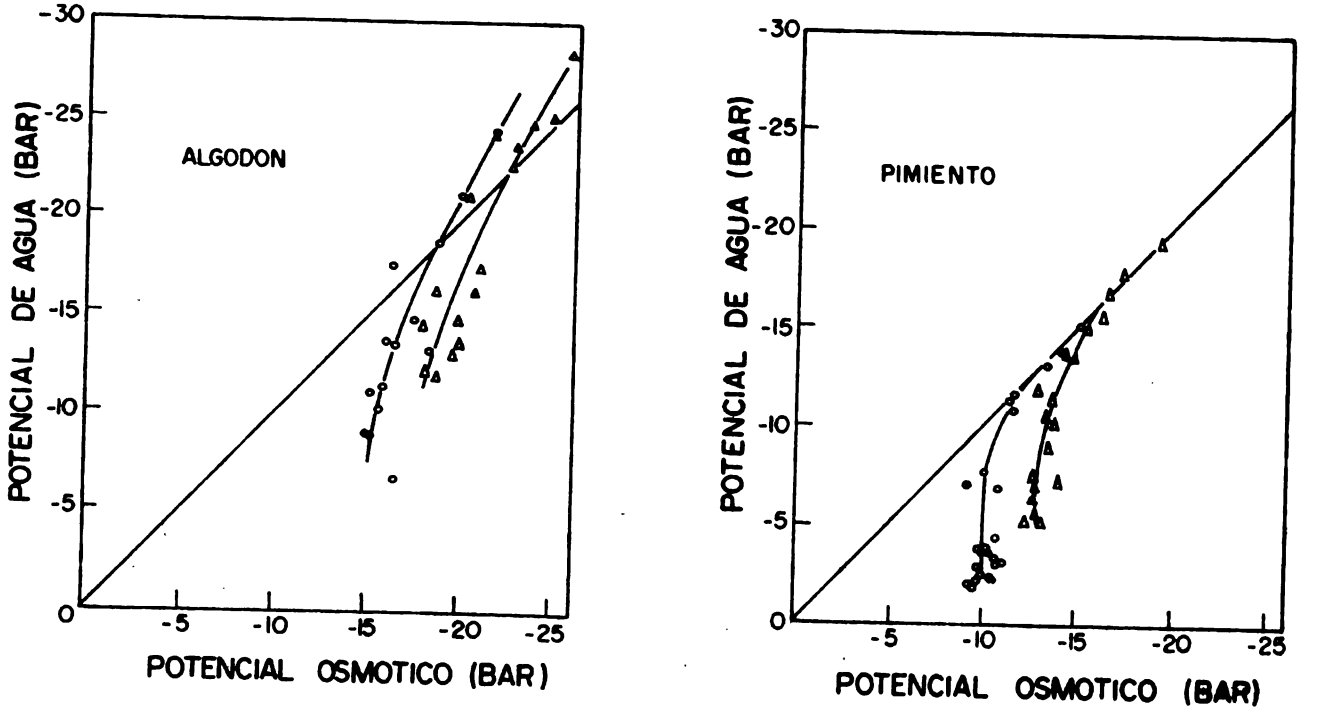


FIGURA 1.2. Relación entre el potencial de agua y el potencial osmótico para algodón y pimiento en condiciones salinas (o) y no salinas (Δ) (Gardner y Ehlig, 1964).

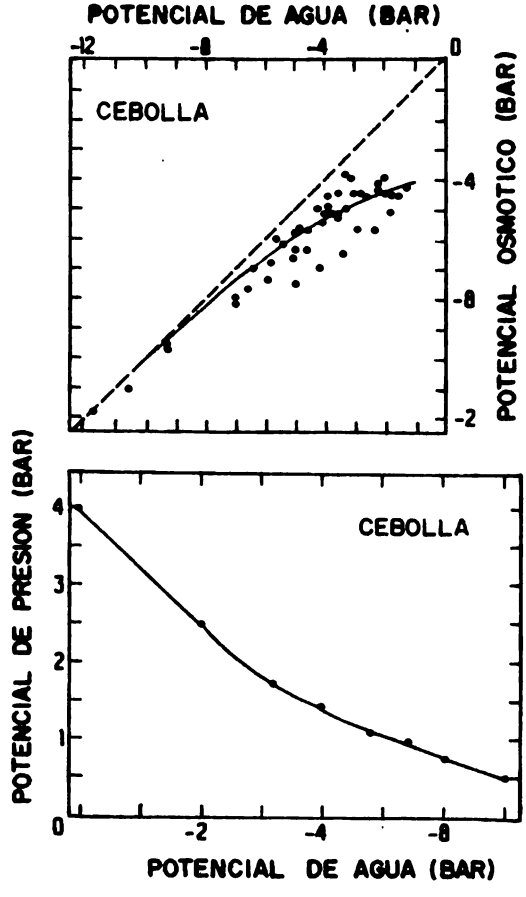


FIGURA 1.3. Relaciones entre potencial de agua, potencial osmótico y potencial de presión (turgencia) para cebolla (Millar et al., 1971).

agronómica. En las Figuras 1.2, 1.3 y 1.4 se muestran estas relaciones para algunos cultivos. Este tipo de relaciones y sus variaciones debido a características específicas de las plantas, y condiciones edáficas y ambientales se discuten en detalles en los capítulos 7 y 8.

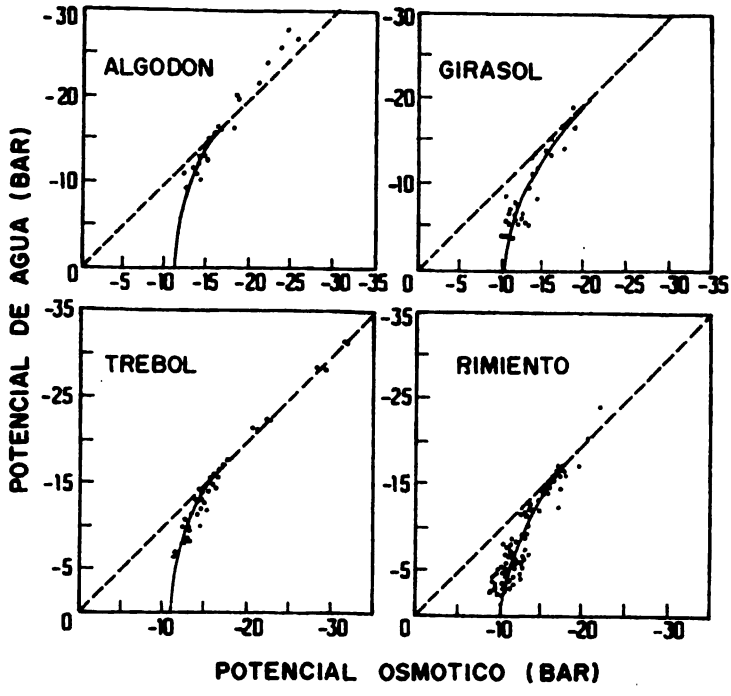


FIGURA 1.4. Relaciones entre potencial de agua, potencial osmótico y potencial de presión para algodón, maravilla, trébol y pimiento (Gardner y Ehlig, 1965).

1.3. Consideraciones Finales.

El uso de la terminología termodinámica para describir las relaciones hídricas del sistema suelo planta atmósfera presenta varias ventajas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

a. Las relaciones de agua en suelos y plantas son de naturaleza termodinámica

b. El movimiento de agua a través de suelos y plantas se atribuye a fuerzas termodinámicas

c. Las propiedades termodinámicas son fácilmente observables y medibles

d. Las relaciones son básicas y de suficiente flexibilidad como para permitir un desarrollo considerable de la ciencia mediante la ampliación de la terminología

e. Muchos de los procesos relativos al agua del sistema suelo planta atmósfera son dependientes de la energía y sensibles a la temperatura y presión.

1.4. Referencias Bibliográficas.

[1] BROYER, T. C. 1947. The movement of materials into plants: I. Osmosis and the movement of water into plants. Botany Review 13:1–58.

[2] COREY, A. T., R. O SLATYER AND W. D. KEMPER. 1967. Comparatives terminologies for water in the soil plant atmosphere system. pp. 427–445. In: R. M. Hagan et al. (eds), Irrigation of agricultural lands. Wisconsin, American Society of Agronomy.

[3] GARDNER, W. R. 1965. Dynamics aspects of soil-water availability to plants. Annual Review of Plant Physiology 16:323–341.

[4] GARDNER, W. R. AND C. F. EHLIG. 1964. Water flux from soil to plant to atmosphere. Chapter 1. In: W. R. Gardner et al. (eds.), water transfer from soil to the atmosphere as related to soil properties, plant characteristics and weather. Riverside, California, U.S. Salinity Laboratory, ARS/USDA. (Research Report 374).

[5] GARDNER, W. R. AND C. F. EHLIG. 1965. Physical aspects of the internal water relations of plant leaves. Plant Physiology 40:705–710.

[6] KRAMER, P. J., E. B. KNIPLING AND L. N. MILLER. 1966. Terminology of cell-water relations. Science 153(3738):889–890.

[7] MEYER, B. S. 1945. A critical evaluation of terminology of diffusion phenomena. Plant Physiology 20:142–164.

[8] MILLAR, A. A., M. E. DUYSEN AND E. B. NORUM. 1970. Relationships between the leaf water status of barley and soil water. Canadian Journal of Plant Science 50:363–370.

[9] MILLAR, A. A. 1971. Descripción, construcción, calibración y uso de sicrómetros de termopares para determinar el potencial de agua en el sistema suelo-planta. Anales del IV Simposio Latinoamericano de Fisiología Vegetal. Lima, Perú, Setiembre 1971. 20 p.

[10] SLATYER, R. O. 1962. Internal water relations of higher plants. Annual Review of Plant Physiology 13:351–378.

[11] SLATYER, R. O. 1967. Plant-water relationships. New York, Academic Press. 366 p.

[12] SLATYER, R. O. AND W. R. GARDNER. 1965. Overall aspects of water movement in plant and soils. Symposium Society Experimental Biology 19:113.

[13] TAYLOR, S. A. AND R. O. SLATYER. 1960. Water-soil plant relations terminology. Seventh International Congress of Soil Science (Madison, Wisconsin, USA) 1:394–403.

[14] TAYLOR, S. A. AND R. O. SLATYER. 1961. Proposals for a unified terminology in studies of plant soil water relationships. Plant water relationships in arid and semi arid conditions. Proceedings Madrid Symposium UNESCO Arid Zone Research 16:339–349.

[15] TAYLOR, S. A. 1968. Terminology in plant and soil water relations. pp. 49–72. In: T. T. Kozlowski (ed.), Water deficits and plant growth. Volume I: Development, control, and measurement. New York, Academic Press.

CAPITULO 2

DETERMINACION DEL AGUA EN EL SUELO: PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS Y CALCULOS

Para conocer la cantidad de agua presente en el suelo se puede recurrir a varios métodos. La elección del método depende de la disponibilidad de equipos y de los requisitos de precisión.

Los métodos de medición pueden clasificarse en directos e indirectos.

Métodos directos.

a. Gravimétrico
b. Tensiómetros (comercial y de investigación)

Métodos indirectos.

a. Tensiómetro osmótico
b. Bloques de resistencia
c. Radioactivo (detección de neutrones, atenuación de radiación gama).

De acuerdo a lo que se mide, los métodos se pueden agrupar de la siguiente manera:

Medida del contenido de agua del suelo

a. Método gravimétrico
b. Método de la atenuación de rayos gama
c. Método de la dispersión de neutrones
d. Conducción de calor
e. Reflectometría

Medida del potencial matricial (succión) o potencial de agua

a. Equipo de olla a presión
b. Tensiómetros
c. Tensiómetro osmótico
d. Sicrómetros
e. Punto de congelamiento.

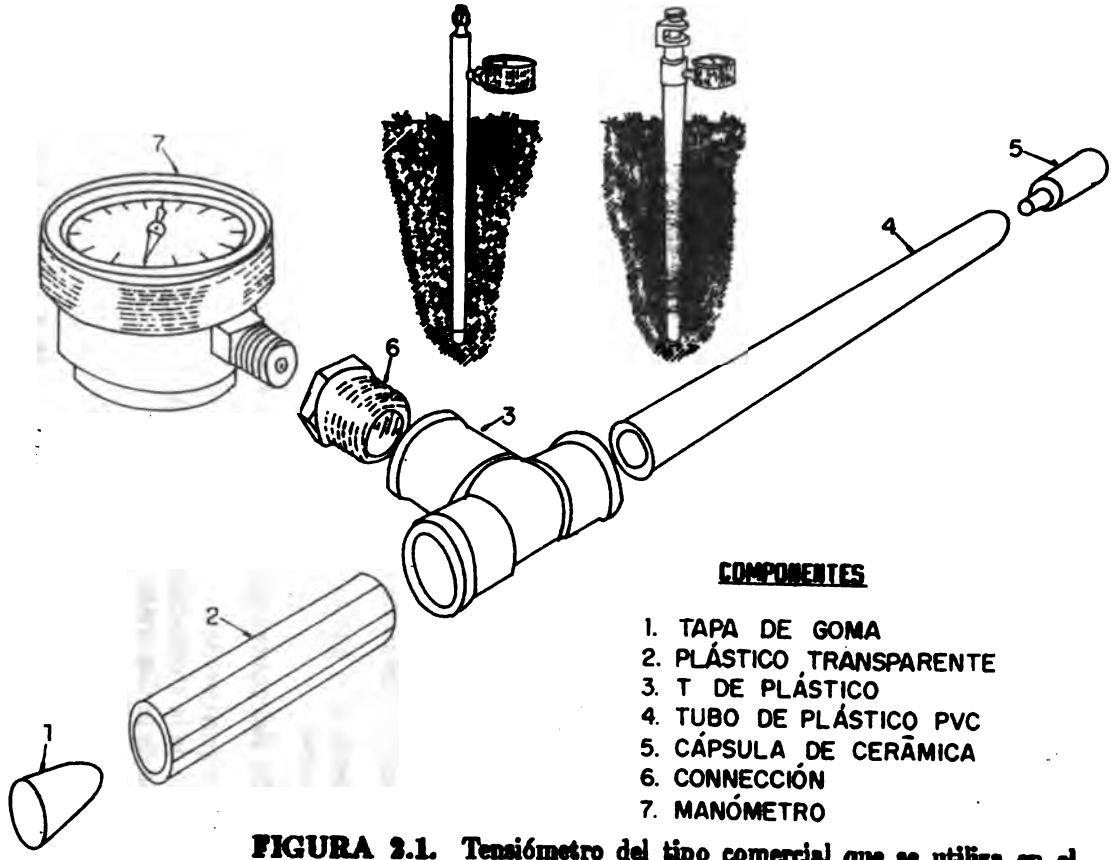


FIGURA 2.1. Tensiómetro del tipo comercial que se utiliza en el manejo del riego.

2.1. Descripción de los métodos.

2.1.1. Método Gravimétrico

Consiste en el secado de una muestra de suelo a 105 °C durante 24 horas. La pérdida de peso después de secado corresponde al agua que contiene la muestra. Los valores así obtenidos se pueden expresar en porcentaje de humedad en base seca o húmeda.

Este es un método preciso pero laborioso que requiere de mucho tiempo y muestreos. Se puede utilizar como un procedimiento standard para la calibración de algunos métodos directos.

2.1.2. Tensiómetros

Miden la tensión a la cual el agua es retenida por el suelo. Sólo son aplicables en el rango de 0 a 700 cm de agua. A mayores succiones, los gases disueltos en el agua penetran a través de la cápsula porosa interrumpiendo la columna de agua. Este instrumento cubre sólo una pequeña parte del rango de agua aprovechable de los suelos, especialmente en el caso de los suelos de textura arcillosa. Actualmente es posible medir la succión entre 0 y 15 bares con un tensiómetro osmótico como el que se describe más adelante.

En escala comercial se venden tensiómetros con vacuómetros, con escala en centibares, que son de utilidad en la programación del riego de cultivos, pero carecen de la precisión adecuada como para determinar cambios en las cargas hidráulicas tan bajas como 1 mb (Figura 2.1).

Para investigación, se requiere de tensiómetros de mayor precisión que los comerciales, los que deben ser construidos por el investigador. Este tipo de tensiómetros son de utilidad en todo tipo de estudios en que existe movimiento de agua como fenómeno preponderante como es el caso de balances de agua para conocer el flujo de agua que entra o sale de la zona radicular de los cultivos.

Un tensiómetro sensitivo consiste de una cápsula porosa, un sistema de amplificación (reducción en el diámetro de tuberías) y un manómetro.

La cápsula porosa se conecta a la superficie del suelo a través de tubería de nylon de 1/4 pulgada con un conector T que debe quedar 10 – 15 cm bajo la superficie. Del conector T debe salir 15 cm de tubería fuera de la superficie, a través de la cual se efectúa la limpieza (eliminación de aire) del tensiómetro. Desde el otro extremo del conector T se colocan 10 cm de tubería de nylon de 1/4 pulgada, al extremo del cual se coloca un conector de reducción, para pasar de tubería de 1/4 a 1/8 pulgada. Este sistema se conecta a una cubeta de mercurio a través de la tubería de 1/8 de pulgada.

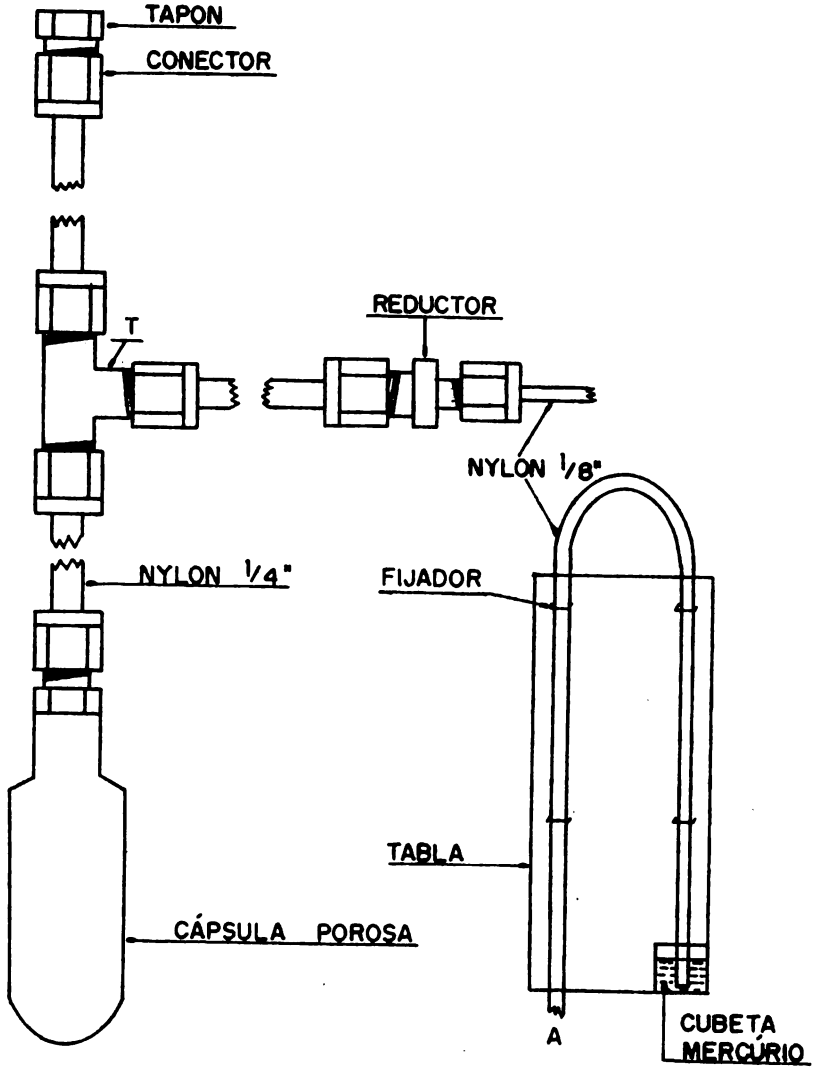


FIGURA 2.2. Componentes de un tensiómetro sensitivo para trabajos de investigación.

La ventaja de este sistema consiste en la facilidad de limpieza a través de la tubería de mayor diámetro, y el pequeño desplazamiento de agua por el alza del mercurio en la tubería de 1/8 de pulgada.

Este tipo de tensiómetro, cuando se utiliza en el campo, requiere un servicio de limpieza que se debe realizar por lo menos cada cinco días. La limpieza se realiza a través de una tubería de nylon, muy fina, que permanece en el sistema, verticalmente entre el extremo interior de la cápsula porosa y el extremo de la tubería de 1/4 de pulgada en la superficie. Al efectuar la limpieza, se requiere un sello momentáneo entre la tubería de 1/4 de pulgada y la tubería fina. El agua de lavado, que debe ser previamente hervida para no introducir aire, se coloca en el sistema mediante una jeringa hipodérmica conectada a la tubería fina, de tal manera que al introducir agua a presión en el fondo de la cápsula, el agua que desplaza las burbujas de aire burbujea en la cubeta de mercurio. Esta agua desplazada, que queda encima de la cubeta de mercurio, es fácilmente eliminada con la jeringa hipodérmica. La Figura 2.2 muestra el arreglo de los componentes de un tensiómetro del tipo anteriormente descrito. Algunas simplificaciones pueden ser hechas especialmente cuando no se dispone de material. Por ejemplo, los conectores pueden ser hechos de cobre y utilización de cola araldite para unir el nylon a la cápsula y a los conectores.

Su empleo en estudios de balances de agua para determinar el componente de drenaje desde la zona radicular de algunos cultivos ha dado excelentes resultados (Black et al., 1969; Lambert, 1970; Millar, 1971; Millar et al., 1970; Reichardt et al., 1974).

2.1.3. Tensiómetro Osmótico

Este tensiómetro fue diseñado por Peck y Rabbidge (1969) en el CSIRO, Australia, para medir el potencial matricial del suelo (Figura 2.3). El tensiómetro osmótico hace uso del principio termodinámico que tanto la presión hidrostática como los solutos afectan el potencial de agua. Así una solución confinada en contacto con agua pura libre, a través de una membrana semipermeable alcanza equilibrio estático en el cual la presión hidrostática de la solución es su presión osmótica. Cuando el agua pura libre se cambia por un suelo húmedo, la presión de la solución disminuye en una cantidad igual al potencial de agua. La membrana que separa la solución confinada y el agua del suelo es altamente impermeable al soluto confinado (glicol polietileno, peso molecular 20.000), pero permite intercambio de moléculas e iones pequeños.

Este instrumento utiliza un detector de presión (strain-gauge pressure transducer) que es uno de los brazos de un circuito de Wheatstone. Cuando

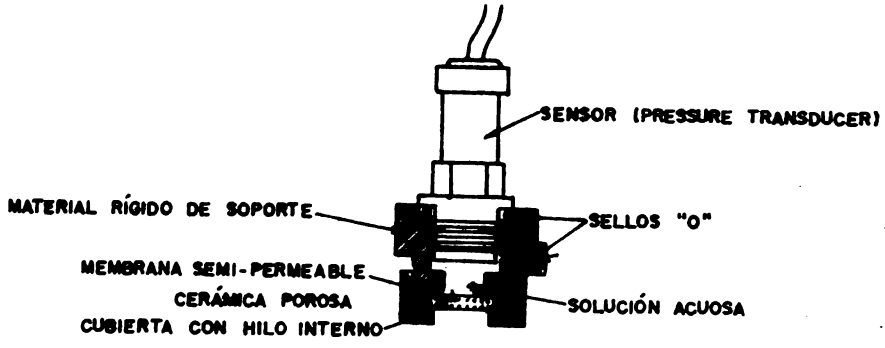


FIGURA 2.3. Esquema de tensiómetro osmótico (Peck y Rabbidge, 1966).

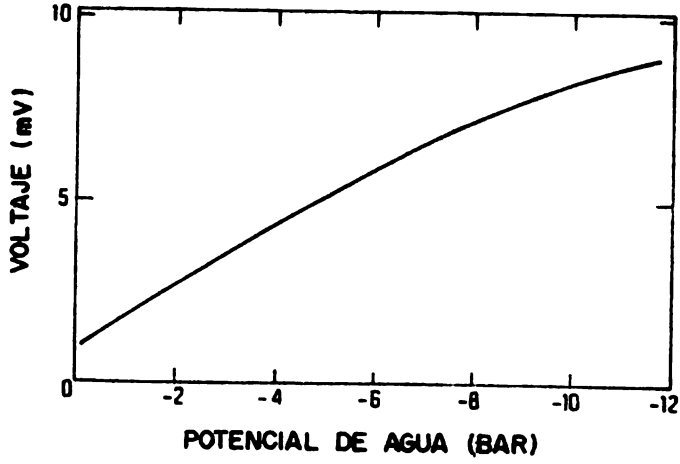


FIGURA 2.4. Curva de calibración del tensiómetro osmótico.

cambia la presión en la cámara que contiene el soluto, debido a entrada o salida de agua a través de la placa porosa, cambia la resistencia del strain-gauge lo cual se detecta en términos de milivoltaje.

Este procedimiento constituye un método indirecto ya que el tensiómetro osmótico debe ser calibrado utilizando soluciones standard de NaCl. Los tensiómetros se suspenden 0,5 cm sobre la superficie de diferentes soluciones y se obtiene la curva de calibración en términos de milivoltaje versus potencial de agua (Figura 2.4).

La ventaja de este instrumento sobre el tensiómetro convencional radica en el hecho que se puede medir el potencial de agua entre 0 y −15 bar y a partir de 10 cm de profundidad del suelo.

2.1.4. Bloques de Resistencia

Estos bloques pueden ser de varios tipos como yeso, nylon y lana de vidrio. Ellos consisten de dos electrodos cubiertos por el material antes indicado, el cual permite el flujo de agua estableciéndose un equilibrio con el suelo que lo rodea. En las Figuras 2.5 y 2.6 se muestran esquemas de los dos tipos de bloques de mayor uso y medidor portátil, respectivamente.

La resistencia entre los electrodos depende del porcentaje de humedad en el bloque. A mayor humedad hay menor resistencia eléctrica. El valor de la resistencia eléctrica depende de:

- La afinidad del suelo y material poroso por el agua
- La cantidad de agua presente
- La velocidad de transferencia del agua desde un material al otro
- La conductividad eléctrica del agua o solución que está dentro del área de influencia de los electrodos.

Los bloques deben ser calibrados para cada suelo en particular y las curvas de calibración se pueden obtener como:

- Porcentaje de humedad versus Resistencia (Ohms)
- Porcentaje de humedad versus Humedad Aprovechable.

Lo más recomendable es calibrarlos en términos de Potencial Matricial (succión) versus Resistencia, utilizando el equipo de olla a presión.

En la Figura 2.7 se muestran curvas de calibración típicas, en términos de porcentaje de humedad, entregada por la fábrica para diferentes suelos de California. En la Figura 2.8 se presentan curvas de calibración típicas, en término de potencial matricial, para diferentes tipos de bloques.

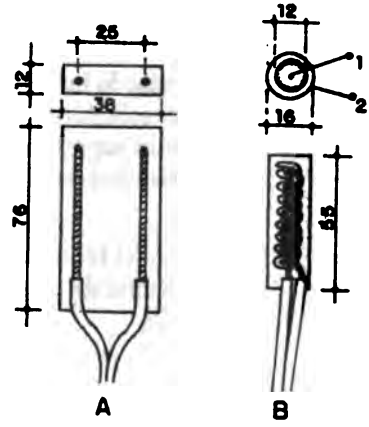


FIGURA 2.5. Tipos de bloques de yeso de mayor uso para determinar la humedad del suelo.

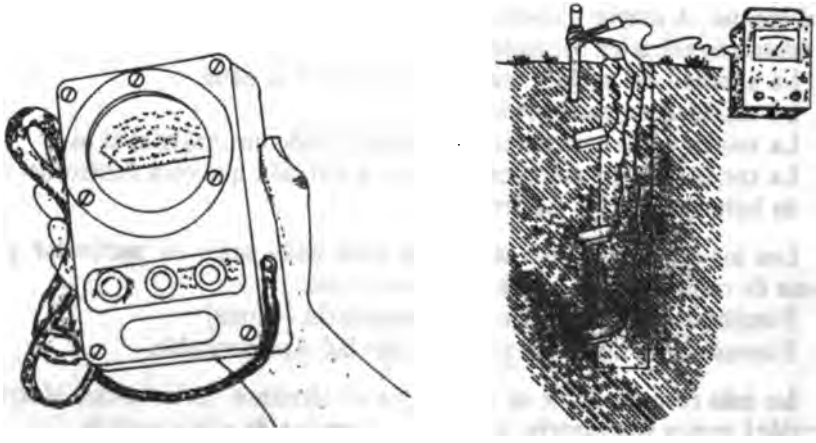


FIGURA 2.6. Medidor portátil para uso con los bloques de yeso.

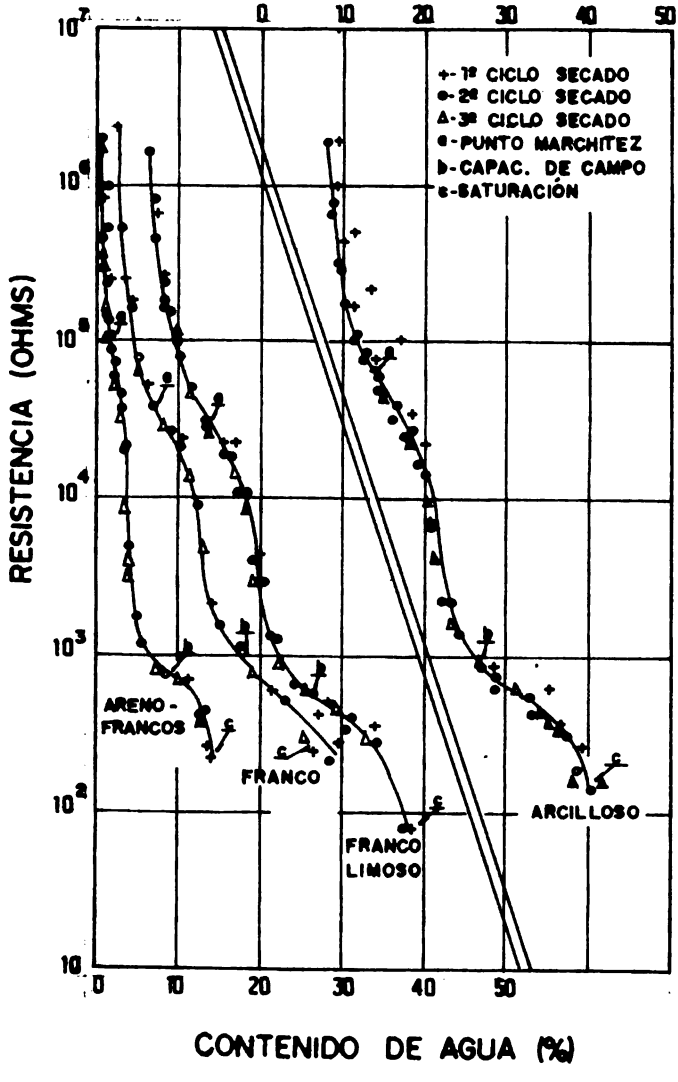


FIGURA 2.7. Curvas de calibración típicas de bloques de resistencia en términos de porcentaje de humedad, dadas por la fábrica, para 3 suelos de California.

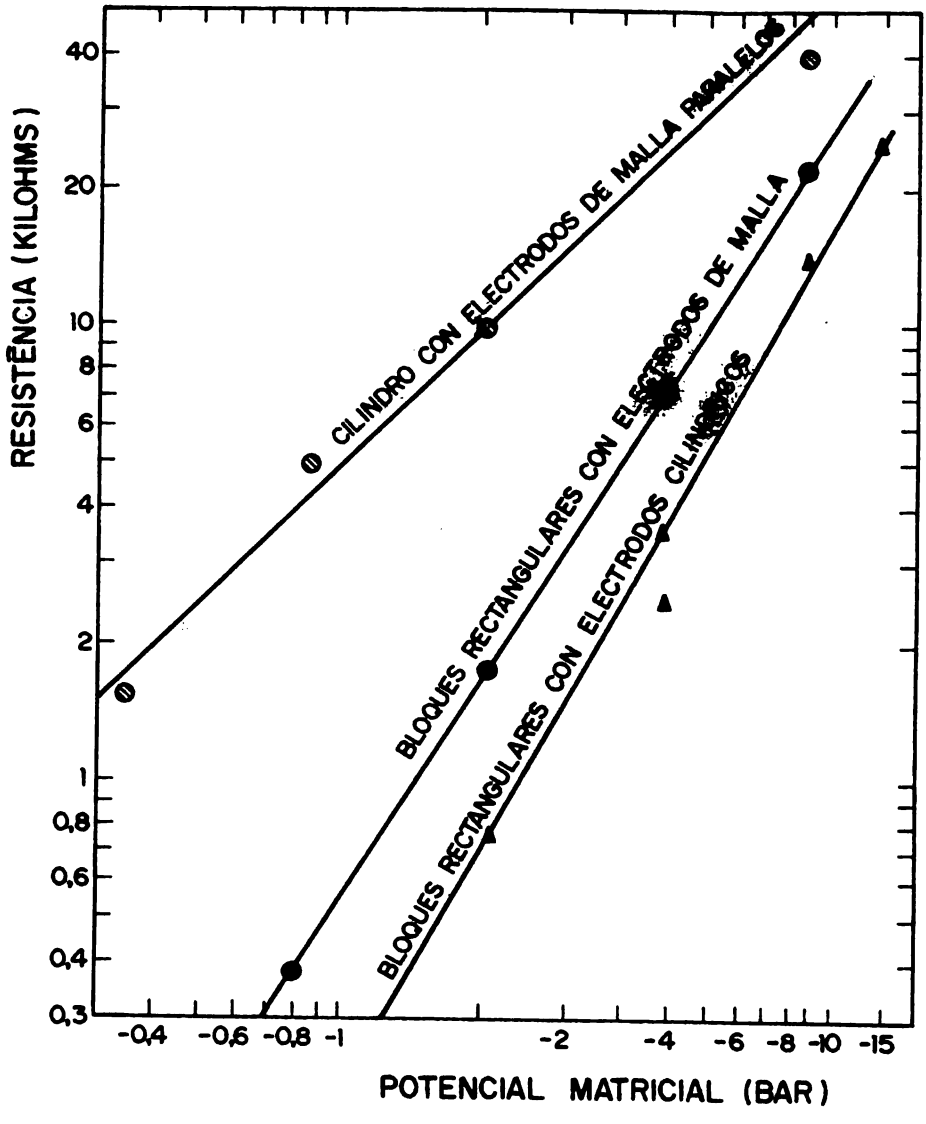


FIGURA 2.8. Calibración de diferentes tipos de bloques de resistencia en términos de potencial matricial (Taylor et al., 1961).

Ventajas

- Método que no causa destrucción y que permite medidas contínuas en el mismo punto del suelo
- Unidad de costo reducido
- Permite efectuar medidas en el rango más seco del suelo, donde no se pueden utilizar tensiómetros
- Se pueden utilizar para obtener potenciales matriciales con resultados aceptables.

Desventajas

- Sólo se pueden utilizar en suelos no salinos ya que son muy sensibles a la presencia de electrólitos
- Debido a lo anterior y también con el uso, la calibración no permanece constante
- Gran variabilidad entre unidades por lo que se requiere una calibración individual.

A pesar de las limitantes anteriormente mencionadas, si se toma el debido cuidado, los bloques de resistencia pueden servir para el control de ciertos experimentos de riego.

Taylor et al. (1961) presentan información adecuada sobre diseño, construccion y calibración de los diferentes tipos de bloques de resistencia.

2.1.5. Métodos Radioactivos

a. Detección de Neutrones

Los componentes básicos son una fuente radioactiva y un detector de la radiación. El método consiste en colocar la fuente radioactiva (Am-Be, Ra-Be) a la profundidad deseada en el perfil de suelo. La fuente emite neutrones de alta velocidad, los cuales son atenuados por los protones (iones de hidrógeno) del agua existente en el suelo. Estos neutrones son atenuados al chocar con los protones de la molécula de agua y devueltos a baja velocidad y contados por un detector.

Otras substancias que contengan protones pueden causar el mismo efecto atenuador, siendo necesaria una corrección cuando se encuentran en gran cantidad.

Para utilizar este equipo es necesario colocar tubos de acceso en el campo, los cuales pueden ser de cualquier material (aluminio, fierro galvanizado, cobre, etc) excepto aquellos que provocan absorción de los protones, como es el caso de los tubos de PVC.

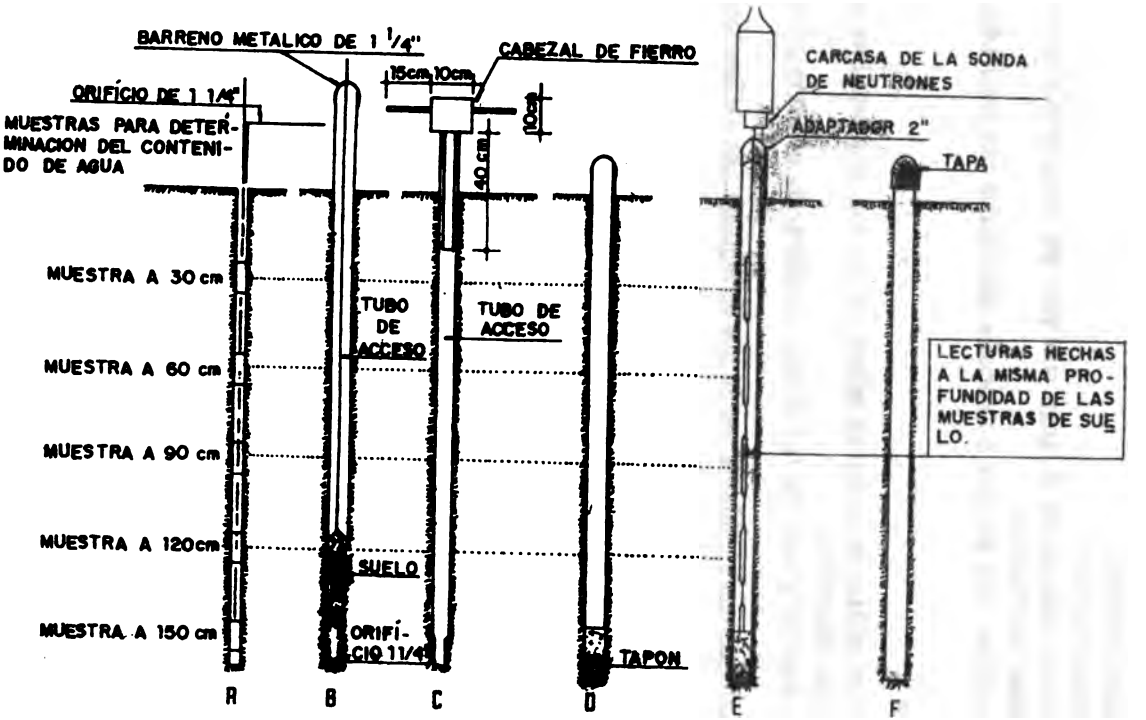


FIGURA 2.9. Diagrama esquemático de instalación de tubos de acceso, obtención de muestras de suelo y lecturas por el método de la sonda de neutrones.

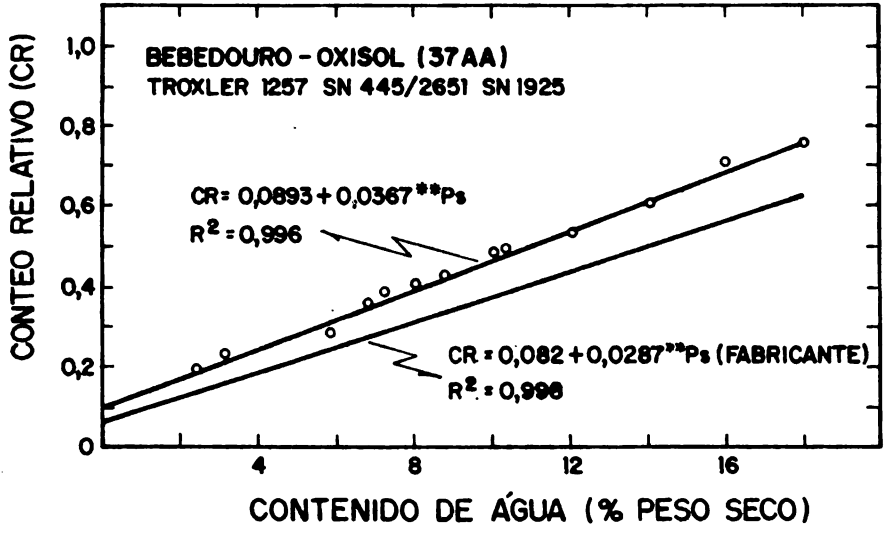


FIGURA 2.10. Curva de calibración relativa de la sonda de neutrones en un oxisol.

Es extremadamente importante que el tubo de acceso quede en íntimo contacto con el suelo, por lo cual generalmente su instalación se hace a presión, retirando con un barreno de gusano el suelo que queda en el interior. El tubo se entierra 15 cm y luego se retira el suelo del interior con el barreno. Luego se entierra otros 15 cm y se barrenea nuevamente. De esta manera, introduciendo el tubo y barreneando se continua hasta llegar a la profundidad deseada (Figura 2.9).

La compañía vendedora del instrumento provee una calibración absoluta (Número de conteo versus Contenido de agua en volumen). Para trabajo de campo, es preferible calibrar el instrumento en forma relativa para cada suelo en particular. Lo anterior implica tener un "conteo standard" y este normalmente se toma con la fuente radioactiva en su posición de almacenaje. Esta lectura se debe tomar al inicio y término de una serie de medidas, y todas las lecturas tomadas en el suelo se expresan en relación al "conteo standard". Entonces, la calibración resulta entre la relación (conteo en el suelo/conteo standard) y el contenido de humedad en volumen. Este tipo de calibración elimina cualquier error en el número de conteo debido a cambios de temperatura, humedad, poder de la fuente, u otros factores al momento

de realizar las lecturas. En la Figura 2.10 se muestran los dos tipos de curvas de calibración, del fabricante y del usuario, para un suelo arenoso, utilizando una sonda Troxler 1257.

En la Figura 2.11 se muestra una calibración absoluta obtenida con neutrómetros Troxler (McHenry and Gill, 1967). La Figura 2.12 es una curva de calibración obtenida a 76 cm de profundidad en diferentes tipos de suelos (Taylor et al., 1961), y la Figura 2.13 es una curva de calibración con dos tipos de tubos.

La curva de calibración de un suelo servirá como su standard siempre que se mantengan las mismas condiciones iniciales, es decir mismo equipo, mismo tipo de tubos de acceso, mismo método de instalación de los tubos y la misma simetría para el "conteo standard" o de referencia.

En principio, la zona de influencia de un "neutrómetro" es infinita, pero en la práctica es limitada. Existe una zona dentro de la cual ocurre el 90-95% de las interacciones de los neutrones detectados. Para un medidor neutrométrico introducido en el suelo, Van Bavel et al. (1956) sugirieron que el diámetro efectivo de la zona de influencia se podía obtener con la siguiente relación.

$$D = 30\sqrt{100/\theta} \qquad (2.1)$$

donde D es el diámetro de la esfera, en cm, cuyo centro se encuentra en la fuente radioactiva, y θ es el porcentaje de humedad en volumen.

Ventajas

- Método no destructivo que permite determinar humedad en el mismo lugar del perfil de suelo.
- Permite medir humedad a gran profundidad siendo el largo del tubo de acceso y presencia de aguas freáticas las únicas limitantes.
- Rapidez de la medición.
- Representatividad de las mediciones. Una medida con el "neutrómetro" equivale a 7 determinaciones gravimétricas.

Desventajas

- Sólo se puede usar a partir de 30 cm de profundidad
- Problemas para uso en suelos pedregosos y suelos orgánicos
- Para cada suelo es necesario hacer una curva de calibración.

Dada la rapidez de la determinación de humedad mediante la sonda de neutrones, su utilización es indispensable cuando se necesita efectuar un gran número de medidas. Su gran utilidad en trabajos de balances de agua, evapotranspiración, etc., y en trabajos de riego en general está demostrada

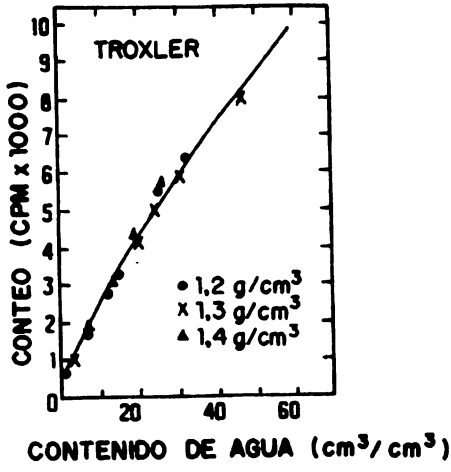


FIGURA 2.11. Calibración absoluta de un neutrómetro Troxler en un suelo franco limoso a diferentes densidades aparentes (McHenry y Gill, 1967).

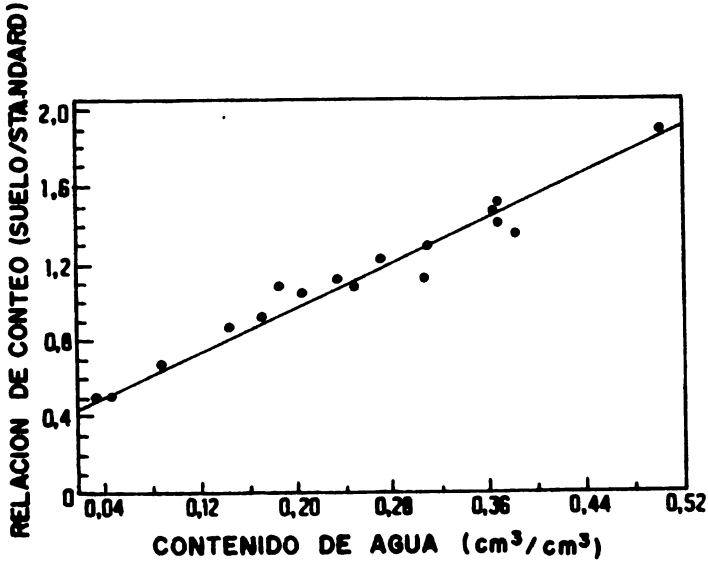


FIGURA 2.12. Calibración relativa de una sonda de neutrones obtenida a 76 cm de profundidad en diferentes tipos de suelos (Taylor et al., 1961).

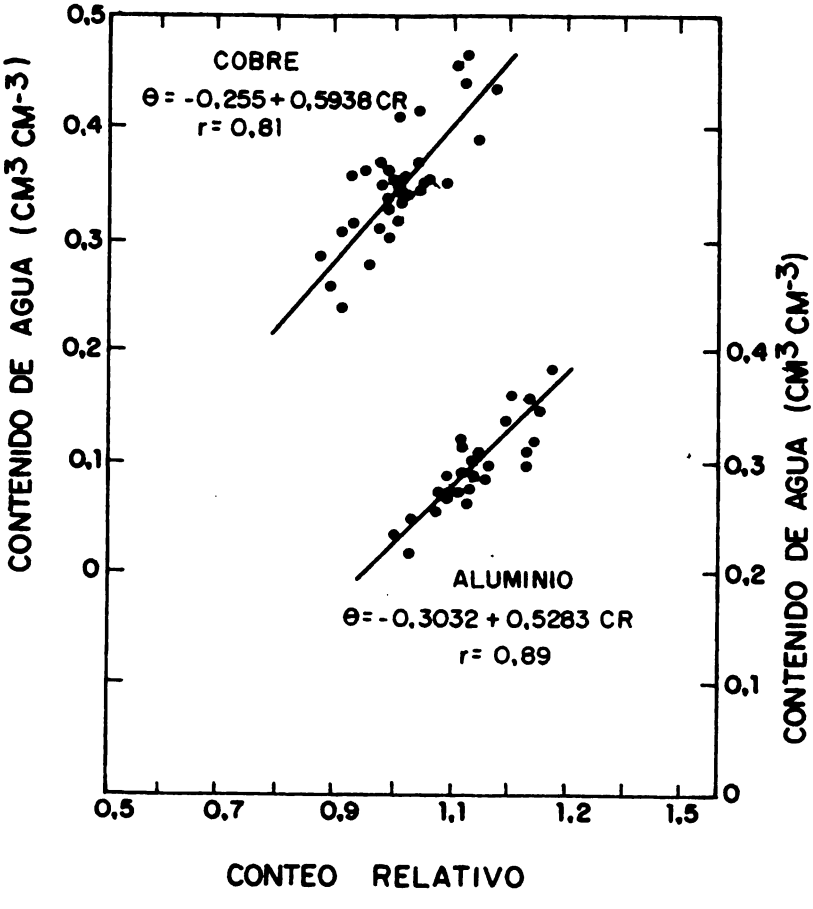


FIGURA 2.13. Curvas de calibración del equipo dispersor de neutrones en un suelo Cauquenes, usando dos tipos de tubos de acceso (Román et al., 1979).

en muchas publicaciones (Boodt et al., 1967; Lambert, 1970; Holmen et al., 1967).

b. Atenuación de rayos gama

Hasta ahora la utilización de fuentes radioactivas, que emiten rayos

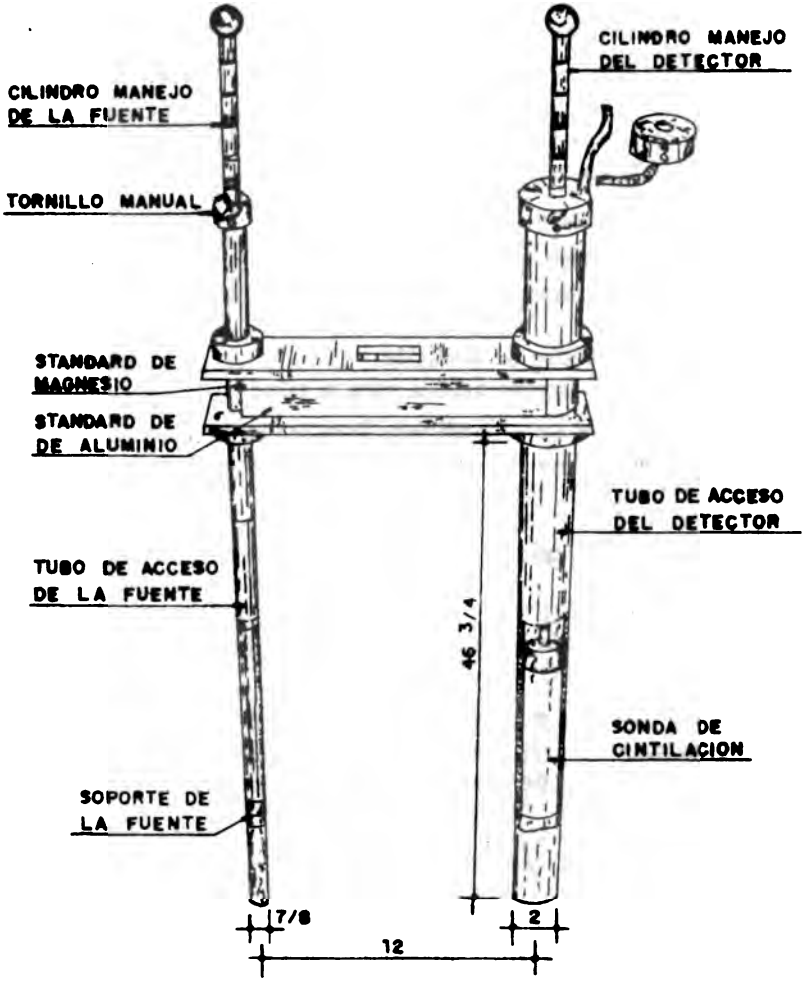


FIGURA 2.14. Equipo de radiación gamma para uso en estudios de campo (todas las dimensiones son en pulgadas) (Kirkham y Corey, 1973).

gama, en la determinación de la humedad del suelo, se ha circunscrito a trabajos de laboratorio en columnas. Su utilización en determinaciones de campo ha sido restringida. El problema principal de la radiación gama radica en el hecho que su poder de penetración es muy alto, no obstante, posee un bajo poder de ionización.

El método consiste en interponer una columna de suelo entre la fuente emisora de radiación gama y el detector (Figura 2.14).

Ventajas y Desventajas

- Método no destructivo que permite determinar la humedad en el suelo
- Por lo menos hasta ahora, sólo utilizable en columnas de suelo montadas en laboratorios.
- Requiere equipo preciso de medición
- Emite radiación altamente dañina para la salud.

Otras informaciónes sobre medidores basados en la atenuación de rayos gama se pueden obtener en las publicaciones de King (1967), y Gardner y Calissendorff (1967).

2.1.6 Conducción de calor

Este método para determinar el potencial de agua del suelo, descrito por Phene et al. (1971), se basa en que la velocidad de disipación de calor en un medio poroso es función del contenido de agua.

Según la ley de Fourier para conducción de calor, la densidad de flujo calórico es directamente proporcional a la conductividad térmica del suelo (k) y a la gradiente de temperatura (dT/dx). Esto queda expresado por:

$$f = -k(\theta)\,(dT/ds) \qquad (2.2)$$

La conductividad térmica del suelo (k) aumenta exponencialmente con el contenido de agua, y en esta propiedad se basa el método de medida.

El contenido del agua de un material poroso se puede obtener colocando una fuente generadora de energía en un punto y midiendo la variación de temperatura en el mismo punto. El instrumento consiste de un diodo de germanio (RCA 1N 2326) que se utiliza como detector de la temperatura. El diodo se cubre con alambre aislado con teflón, el cual sirve como elemento disipador de energía cuando una corriente de valor determinado circula a través de él. Entonces, básicamente el instrumento consta de un circuito que alimenta al diodo y un circuito que genera energía.

El arreglo de diodo y alambre disipador de energía se coloca en un bloque de yeso, con sus salidas para conectar al circuito correspondiente. El sensor

se calibra en términos de diferencia de voltaje, debido al aumento de temperatura que ocurre cuando el circuito generador de energía se enciende por un tiempo determinado, y potencial matricial.

Ventajas

- Medidas son independientes del contenido de sales de la solución del suelo
- Determinación del potencial matricial hasta −15 bares
- Sistema portátil
- Este sensor da simultáneamente humedad y potencial matricial
- Construcción relativamente fácil
- Costo moderado comparado con otros métodos.

2.1.7. Método basado en Reflectometría

Esto es un método desarrollado mas recientemente. Está basado en el principio de reflectometría ("time domain reflectometry") el cual usa la velocidad de propagación de voltaje para determinar la constante dieléctrica del volumen del suelo. La velocidad de propagación se determina a través de la medida del tiempo necesario para que el impulso de voltaje se propague a través de dos guías paralelas de longitud conocida.

En el rango de frecuencia de 1 MHz a 1 GHz, la constante dieléctrica del volumen de suelo es altamente sensitiva al contenido volumétrico de agua. Topp et al. (1983) encontraron que la relación entre la constante dieléctrica y el contenido volumétrico de agua es independiente del tipo de suelo, densidad, contenido de sales y temperatura.

La ecuación utilizada para calcular la constante dieléctrica a partir de la velocidad de propagación electromagnética es la siguiente (Topp et al., 1983):

$$K_a = (CT/2L)^2 \qquad (2.3)$$

donde K_a es la constante dieléctrica, T es el tiempo de propagación, C es la velocidad de la luz en vacío y L es la longitud de las guías paralelas.

La conversión de la constante dieléctrica (K_a) a contenido volumétrico de agua (Θ_v) se hace mediante la siguiente fórmula:

$$\Theta_v = -5,3\text{x}10^{-2} + 2,92\text{x}10^{-2}K_a - 5,5\text{x}10^{-4}K_a^2 + 4,3\text{x}10^{-6}K_a^3 \qquad (2.4)$$

Mayores informaciones sobre este método son dadas por Topp et al. (1983) y en el boletín de la Soil Moisture Equipment Corp (1985).

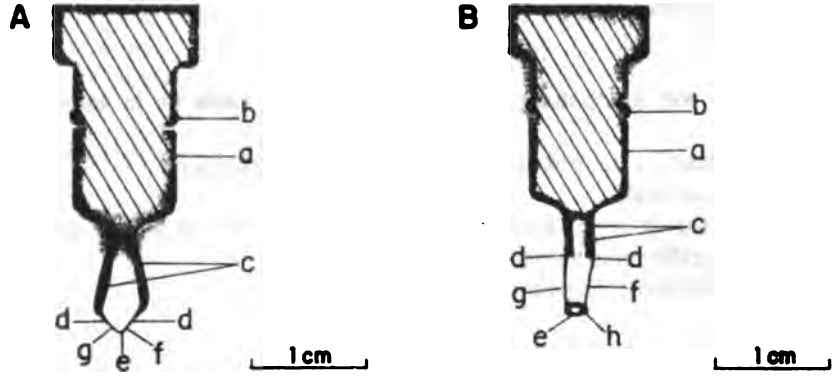


FIGURA 2.15. Siluetas de los sicrómetros de Spanner (efecto Peltier), (A), y de Richards y Ogata (B). a: material sólido de bronce o teflón, b: anillo de sello, c: alambres de cobre, d: uniones de referencia, e: unión libre, f: cromel, 25 micrones, g: constantan, 25 micrones, y h: anillo de plata.

2.1.8. Sicrómetros

La utilización de sicrómetros es de uso frecuente en investigaciones del sistema suelo-planta-atmósfera. Así, en micrometeorología se utilizan para determinar la relación de Bowen (calor sensible/calor latente), y en investigaciones del sistema suelo-planta para la determinación del potencial de agua (Ehlig, 1962; Hoffman y Splinter 1968; Hoffman y Herkelrath, 1968; Rawlins, 1966).

El potencial de agua de un sistema se define como la diferencia de energía entre el agua a una presión y temperatura dada, y el agua libre. Termodinámicamente, el potencial de agua se puede expresar en términos de presiones de vapor de la manera siguiente:

$$\Psi = (RT/\bar{V}) \ln(e/e_o) \qquad (2.5)$$

donde Ψ es el potencial de agua en bar, R es la constante universal de los gases en bar-cm^3/mol °K, T es la temperatura absoluta en grados Kelvin (K), $\bar{V}$ es el volumen molal parcial del agua en cm^3/mol, e es la

presión de vapor de agua en el sistema a temperatura absoluta en milibar y e_o es la presión de vapor saturado a temperatura absoluta en milibar. En esta ecuación, la relación e/e_o es la humedad relativa del sistema. Para determinar el potencial de agua es preciso conocer la humedad relativa del aire en equilibrio con el sistema (Monteith y Owen, 1958; Richards y Ogata, 1958). Esta medición se realiza con sicrómetros de termopares, siendo los de uso más común el sicrómetro de Peltier, basado en el efecto de Peltier y el sicrómetro de Richards (Barra, 1968, Box 1965, Dalton y Rawlins, 1968 Ehlig, 1962; Spanner, 1951).

En la Figura 2.15 se muestran las siluetas de los sicrómetros, basados en el efecto Peltier (A) y Richards (B).

El efecto Peltier se presenta toda vez que se hace pasar una corriente fría a través de un termopar; la cupla principal se enfría mientras que las cuplas de referencia se calientan. Debido a este diferencial térmico, hay una diferencia en la fuerza electromotriz (fem) que se pueden detectar fácilmente con un microvoltímetro.

El sicrómetro de Richards y Ogata (1958) utiliza un anillo de plata el cual se sumerge en agua antes de colocarlo en la cámara de equilibrio que contiene la muestra de la planta o suelo. Este anillo con agua representa la temperatura del bulbo húmedo y las uniones de referencia representan la temperatura del bulbo seco.

En las relaciones hídricas del sistema suelo-planta, el potencial de agua es una de las medidas de mayor importancia. En consideración a lo anterior, en este Capítulo se presentan las técnicas más simples y de menor costo para la confección de termopares, así como también la construcción de sicrómetros basados en el efecto de Peltier, (Millar, 1971).

a. Construcción de termopares

Los metales de mayor uso en la confección de termopares para sicrómetros son cromel y constatan que generan una fem de 60 $\mu V/°C$ en el rango de utilización de los sicrómetros.

Considerando que los alambres son muy finos (25 micrones) y que se requiere una unión esférica y sólida entre el cromel y constantan, es necesario mantenerlos juntos antes de proceder a soldarlos para formar el termopar. Esto se logra colocando los alambres en un soporte en forma de V (Figura 2.16a). Primero se coloca un alambre (cromel por ejemplo) en el soporte, un extremo del cual se pega con cinta engomada a un costado de éste y en el otro extremo se cuelga un peso de aproximadamente 2 g para mantenerlo tenso. Se hace exactamente lo mismo con el segundo alambre (constantan). Una vez

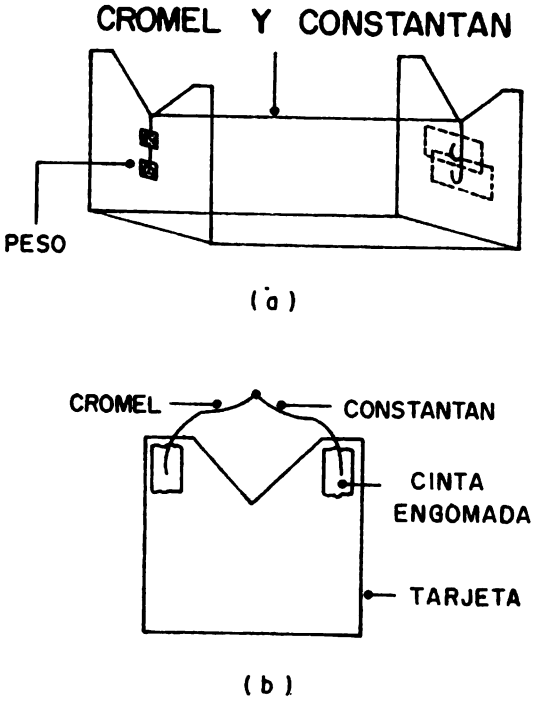


FIGURA 2.16. Soporte para mantener los alambres de cromel y constantan en contacto y fijación de los termopares.

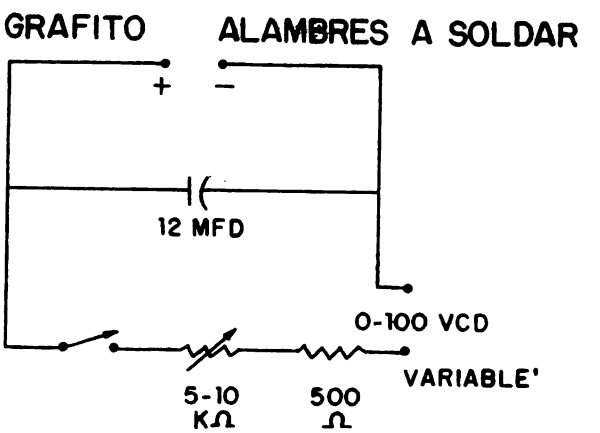


FIGURA 2.17. Circuito para soldadura mediante descarga de un condensador utilizando coriente continua.

que ambos alambres se ubican en el soporte, se ponen en estrecho contacto en el sector comprendido entre los extremos de este. Con ayuda de una lupa, se inspecciona que los alambres no estén separados en ningún sector. Para mantener cromel y constantan en contacto permanente, se utiliza barniz de uña incoloro.

La soldadura se efectúa mediante la descarga de un condensador a través de los alambres y contra una superficie plana de grafito, usando el circuito eléctrico que se describe en la Figura 2.17. Esta operación se debe realizar bajo un microscopio para controlar que los alambres estén perpendiculares al grafito antes de efectuar la descarga, así como también constatar el éxito de la soldadura.

El circuito eléctrico para efectuar la soldadura, varía de acuerdo al tipo de corriente disponible, contínua o alterna.

En la Figura 2.17 se muestra uno de los circuitos más sencillos para el caso de corriente contínua. En la eventualidad que no exista corriente contínua de a lo menos 40 V, se deberá utilizar corriente alterna. En este caso, es necesario rectificar la corriente con el objeto de polarizarla. Circuitos de rectificación son fáciles de construir y uno de los procedimientos al que se recurre con frecuencia, es el uso de diodos de silicio. Una de las propiedades de los diodos es bloquear el paso de la corriente en un sentido, permitiendo el flujo de corriente en la otra dirección. En la Figura 2.18a se presenta el circuito más adecuado para corriente alterna de 220 V. El voltaje de 220 VCA se reduce a 40 VCA mediante un reóstato y la corriente se polariza con un rectificador de 75 ma. El circuito se completa con un condensador electrolítico de 12 MFD. En el caso que se utilice corriente de mayor intensidad, es necesario usar dos diodos en paralelo precedidos de dos resistencias para obtener la polarización adecuada. Las resistencias deben ser de igual valor para evitar mayor trabajo de uno de los rectificadores, y deben producir una caída de voltaje de 1 V a través de ellas. Este último circuito se presenta en la Figura 2.18b.

Para efectuar la soldadura, se colocan los alambres en un soporte o micromanipulador que permite el desplazamiento lineal. Se carga el condensador por un instante (2 a 5 seg) y luego se desplaza el extremo con el grafito hasta que toma contacto con los alambres descargándose el condensador.

Una vez que se ha obtenido la soldadura, se cortan los alambres de un largo de 3 cm y se colocan en una cápsula petri con acetona para remover el barniz que los une. La firmeza de la termocupla se prueba colgando, mediante una pequeña tenaza, un peso de 2 a 3 g en un extremo de la cupla y levantándola con una pinza desde el otro extremo.

Para conservar las termocuplas de manera que se facilite su uso posterior en la confección de sicrómetros, es conveniente fijarlas desde los extremos con

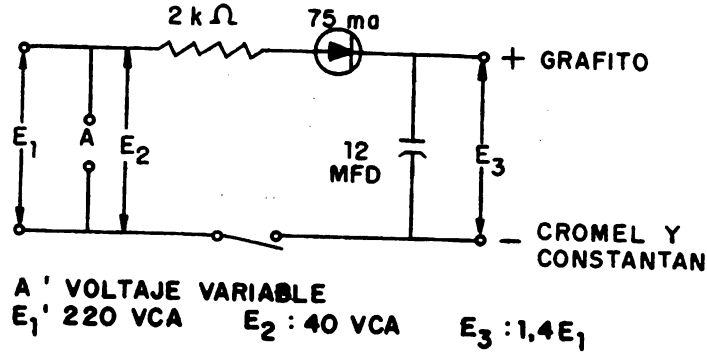


FIGURA 2.18a. Circuito para soldadura mediante descarga de un condensador utilizando corriente alterna rectificada (media onda).

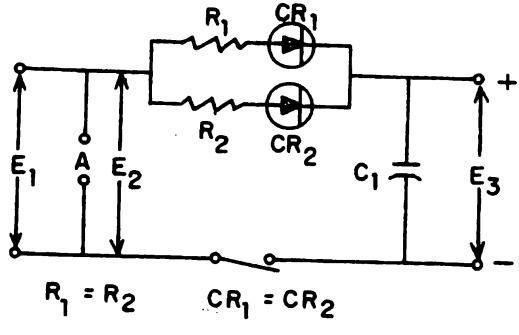


FIGURA 2.18b. Circuito para rectificación de corriente alterna de una mayor intensidad.

una cinta engomada a un pequeño trozo de cartulina en forma de V (Figura 16b).

b. Construcción de los sicrómetros

La construcción de la parte básica de los sicrómetros para material vegetal o suelo, es idéntica. Sin embargo, los sicrómetros para tejido vegetal requieren de una cámara o receptáculo donde colocar la muestra (Figura 2.19). En cambio los sicrómetros para uso en el suelo están dotados de una cápsula porosa o una malla de acero inoxidable muy fina que rodea el termopar (Figura 2.20).

En la construcción de los componentes básicos de un sicrómetro, puede usarse acero inoxidable, cobre, acrílicos, etc., sin embargo, el material de uso más corriente es el teflón por ser fácilmente trabajable en el torno y no absorver agua (Merrill, 1968).

Una barra de teflón 1,5 cm de diámetro se monta en un torno y se perfora un orificio central de 1 cm de diámetro y 3 cm de largo. A 3 mm de este extremo se corta la barra, obteniéndose un cilindro con una abertura sólo en un extremo. El extremo cerrado se pule y se le abren dos orificios pequeños con un alfiler y luego se hace pasar por ellos sendos alambres de cobres de 1 mm de diámetro (22 ga), tal como lo indica la secuencia de la Figura 2.21. A estos alambres se le sueldan cables de cobre aislado, los cuales servirán de extensión hasta la caja distribuidora de corriente fría. El lugar de la soldadura se debe aislar ya sea con tubería plástica o con huincha aisladora. Los alambres de cobre (22 ga) se desplazan hasta que la soldadura con la cubierta aisladora impiden mayor movimiento. Estos alambres se cortan a una altura de 6 mm y el corte se lija o lima suavemente hasta obtener una superficie plana.

A partir de este instante, todo el proceso de construcción posterior se realiza bajo el microscopio. Con una hoja de rasurar se hace una ranura en la superficie plana. La profundidad del corte deberá ser de 0,5 mm para que permita el desplazamiento de los alambres de la cupla previamente preparada.

Los extremos de la cupla se colocan en las ranuras y con la ayuda de un alicate pequeño se aprieta el alambre de cobre para hacer un contacto mecánico. Con una hoja de rasurar se elimina el excedente de alambre de la cupla.

La parte básica del sicrómetro está finalizada pero es conveniente darle mayor maniobrabilidad, lo cual se consigue con un trozo de tubería de teflón, cobre o madera de un diámetro externo adecuado a la cavidad central. A esta parte se le adapta una cámara para uso con muestras vegetales o una cápsula cerámica para uso en el suelo. (Figuras 2.19 y 2.20). La cámara o

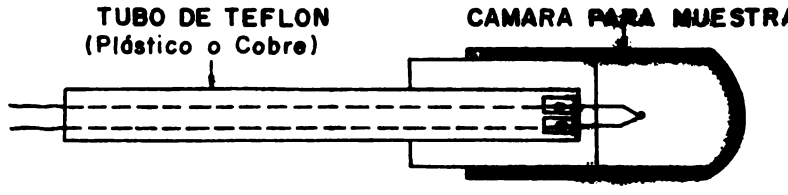


FIGURA 2.19. Sicrómetro para determinar el potencial de agua en muestras vegetales o de suelo (Millar, 1971).

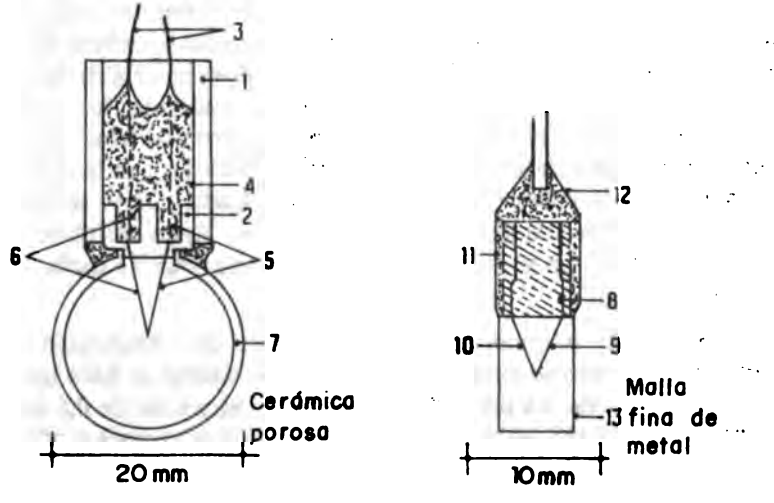


FIGURA 2.20. Sicrómetros para determinar in situ el potencial de agua en el suelo (Dalton y Rawlins, 1967).

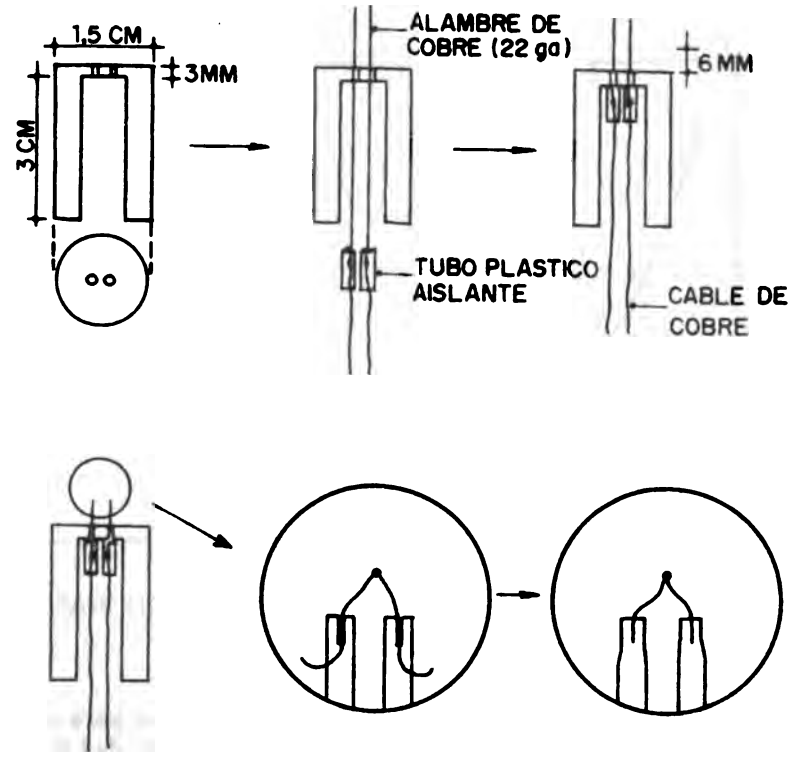


FIGURA 2.21. Secuencia de la construcción y armado de un sicrómetro del tipo de Peltier (Millar, 1971).

receptáculo para muestras vegetales deben ser de aproximadamente 2,5 cm^3 de capacidad y puede hacerse de teflón o acero inoxidable. Este último ha dado buenos resultados, pero existen dificultades en su construcción (Barra, 1968).

Para eliminar la presencia de materiales extraños que se puedan haber adherido a la cupla se recomienda la limpieza primero con agua hirviendo, luego con acetona y finalmente con agua destilada. El exceso de agua se elimina con corriente de aire seco.

c. Calibración

Para calibrar los sicrómetros es necesario recubrir las paredes internas

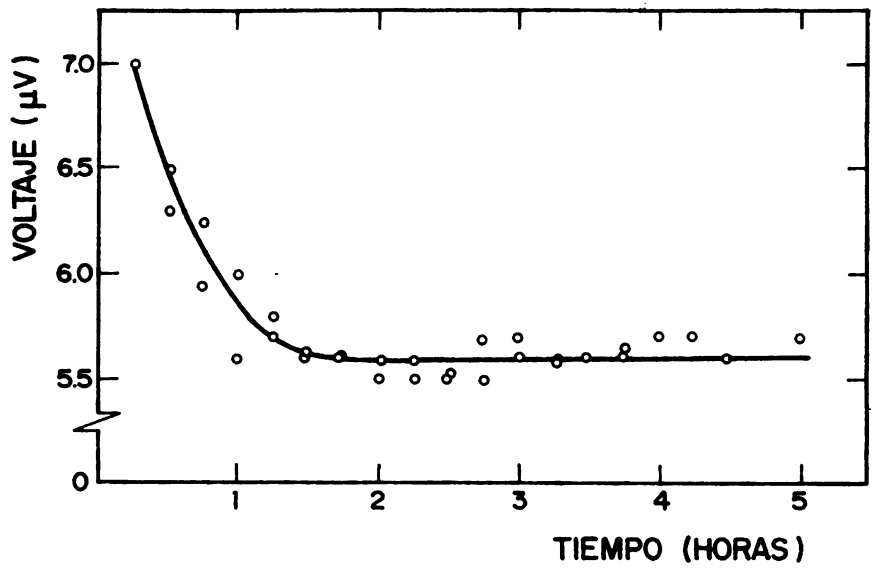


FIGURA 2.22. Fuerza electromotriz en función del tiempo para un sicrómetro Spanner, tipo Peltier, cuando usado con muestras de hojas de cebada (Millar, 1967).

de la cámara con papel filtro. Para ello se coloca un pedazo rectangular en su manto y otro circular en la base. El papel filtro se imbibe con 4 ó 5 gotas de una solución de NaCl de molalidad conocida. En el Cuadro 2.1 se presenta una lista de potenciales de agua a diferentes temperaturas para soluciones de NaCl de diferentes molalidades (Lang, 1967). En la calibración de sicrómetros se utiliza comunmente soluciones de NaCl de molalidades 0,05; 0,1; 0,3 y 0,5. A la temperatura de 25 °C, los potenciales de agua de estas soluciones son −2,34; −4,62; −13,68 y −22,8 bar, respectivamente (Cuadro 2.1). Cada sicrómetro debe calibrarse a una misma temperatura con cada una de las soluciones. Una vez que los sicrómetros se han preparado con una solución molal determinada, se colocan en un baño a temperatura constante. Generalmente después de 2 a 2,5 horas, se establece el equilibrio y se pueden tomar las lecturas. En la Figura 2.22 se muestra la variación de la fem en función del tiempo para un sicrómetro con muestra vegetal (Millar, 1967).

CUADRO 2.1. Potencial de agua de soluciones de NaCl, en Joules/kg (1 bar = 100 Joules/kg).

	Temperatura (C)								
Molalidad	0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
0.05	-214.4	-218.4	-222.5	-226.2	-230.1	-233.9	-237.7	-241.6	-245.4
0.1	-423.0	-431.0	-439.0	-447.0	-454.0	-462.0	-470.0	-477.0	-485.0
0.2	-836.0	-852.0	-868.0	-884.0	-900.0	-915.0	-930.0	-946.0	-961.0
0.3	-1247.0	-1272.0	-1297.0	-1321.0	-1344.0	-1368.0	-1391.0	-1415.0	-1437.0
0.4	-1658.0	-1693.0	-1727.0	-1759.0	-1791.0	-1823.0	-1855.0	-1886.0	-1917.0
0.5	-2070.0	-2115.0	-2158.0	-2200.0	-2241.0	-2281.0	-2322.0	-2362.0	-2402.0
0.6	-2484.0	-2539.0	-2593.0	-2644.0	-2694.0	-2744.0	-2794.0	-2843.0	-2891.0
0.7	-2901.0	-2967.0	-3030.0	-3091.0	-3151.0	-3210.0	-3270.0	-3328.0	-3385.0
0.8	-3320.0	-3398.0	-3472.0	-3543.0	-3612.0	-3682.0	-3751.0	-3818.0	-3885.0
0.9	-3743.0	-3832.0	-3917.0	-3998.0	-4079.0	-4158.0	-4237.0	-4314.0	-4390.0
1.0	-4169.0	-4270.0	-4366.0	-4459.0	-4550.0	-4640.0	-4729.0	-4815.0	-4901.0
1.1	-4599.0	-4713.0	-4820.0	-4924.0	-5026.0	-5127.0	-5226.0	-5322.0	-5418.0
1.2	-5032.0	-5160.0	-5278.0	-5394.0	-5507.0	-5620.0	-5730.0	-5835.0	-5941.0
1.3	-5470.0	-5611.0	-5742.0	-5869.0	-5994.0	-6119.0	-6239.0	-6354.0	-6471.0
1.4	-5912.0	-6068.0	-6210.0	-6350.0	-6487.0	-6623.0	-6754.0	-6880.0	-7006.0
1.5	-6359.0	-6529.0	-6684.0	-6837.0	-6986.0	-7134.0	-7276.0	-7411.0	-7548.0
1.6	-6811.0	-6996.0	-7163.0	-7330.0	-7491.0	-7652.0	-7805.0	-7950.0	-8097.0
1.7	-7260.0	-7460.0	-7640.0	-7820.0	-8000.0	-8170.0	-8330.0	-8490.0	-8650.0
1.8	-7730.0	-7940.0	-8130.0	-8330.0	-8520.0	-8700.0	-8880.0	-9040.0	-9210.0
1.9	-8190.0	-8430.0	-8630.0	-8840.0	-9040.0	-9240.0	-9430.0	-9600.0	-9780.0
2.0	-8670.0	-8920.0	-9130.0	-9360.0	-9570.0	-9780.0	-9980.0	-10160.0	-10350.0

Para cada sicrómetro se confecciona un gráfico en términos de microvoltios versus potencial de agua de la solución (Figura 2.23). Los potenciales de agua para las respectivas molalidades y temperatura de trabajo se obtienen del Cuadro 2.1. En la Figura 2.24 se muestran curvas de calibración a diferentes temperaturas (Millar et al., 1969).

d. Circuito eléctrico y lecturas

El circuito eléctrico que se requiere para pasar la corriente fría a los sicrómetros, se presenta en la Figura 2.25. Los componentes de este circuito están a la venta en cualquier establecimiento de material electrónico.

Las características del sicrómetro determinan la intensidad de la corriente fría que se debe usar. Para el sicrómetro descrito en este capítulo, se debe utilizar una corriente de 3 ma. Cuando el sicrómetro está conectado al circuito se hace pasar corriente por la cupla y se regula la intensidad (3 ma), utilizando el potenciómetro variable R-2 (Figura 2.25).

Cuando se trata de sicrómetro de diferente diseño, se debe investigar la intensidad de la corriente más adecuada a él (Dalton y Rawlins, 1968). Para ello, se conectan los sicrómetros, con las cámaras limpias y secas a la caja distribuidora de corriente y utilizando el potenciómetro variable (R-2), se regula una corriente de 2 ma, la cual debe pasar durante 15 segundos. Al término de este tiempo, se deben tomar las lecturas siguiendo los pasos indicados más adelante. Se hace lo mismo para corrientes de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, y 10 ma. Para cada sicrómetro se confecciona un gráfico de la fuerza electromotriz en función de la intensidad de la corriente. En general la fem aumenta con la intensidad de la corriente hasta alcanzar un máximo y luego disminuye (Hoffman y Herkerirath, 1968). La primera etapa de esta curva corresponde al efecto de Peltier (enfriamiento de la cupla) y la segunda etapa al efecto Joule (calentamiento de la cupla). La corriente más adecuada para el sicrómetro es aquella obtenida antes de alcanzar el máximo de la curva fem versus intensidad de la corriente.

Para tomar las lecturas de los sicrómetros se requiere de un voltímetro de gran sensibilidad, debido a que la fem generada por los termopares es del orden de microvoltios. Este microvoltímetro deberá tener un mecanismo para ubicar el voltaje cero y poseer a lo menos de dos rangos de voltaje, 10-0-10 μV y 30-0-30 μV. Los microvoltímetros de mayor uso son los modelos 148 y 150B de la compañía Keithley y el microvoltímetro MJ- 55 de la Wescor que ya viene con el circuito para producir el efecto Peltier.

Previo a tomar las lecturas, es necesario constatar si los sicrómetros tienen la polaridad adecuada para recibir la corriente. Los sicrómetros se deben conectar de tal manera que la corriente pase primero por el alambre

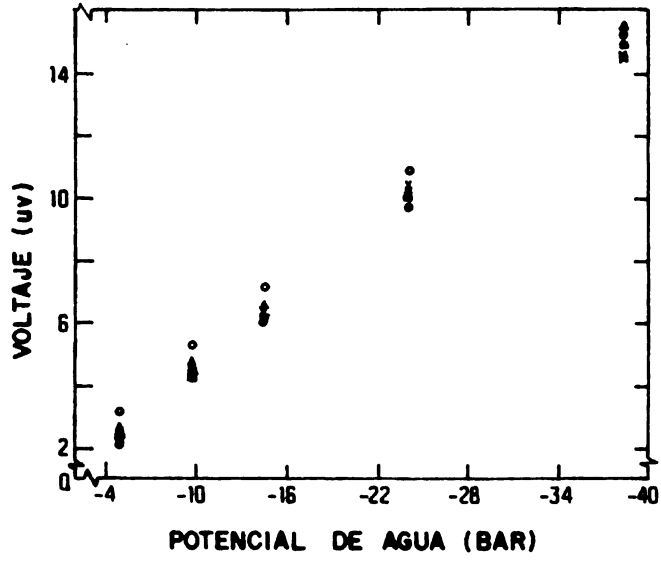


FIGURA 2.23. Calibración de varios sicrómetros Spanner usando soluciones de KCl (Millar, 1967).

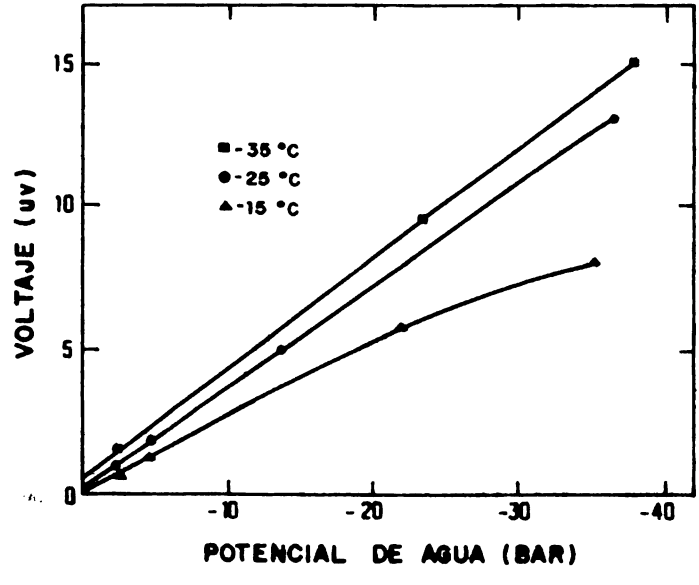


FIGURA 2.24. Curvas de calibración de un sicrómetro Spanner, tipo Peltier, a 15, 25 y 35 °C (Millar, Lang y Gardner, 1969).

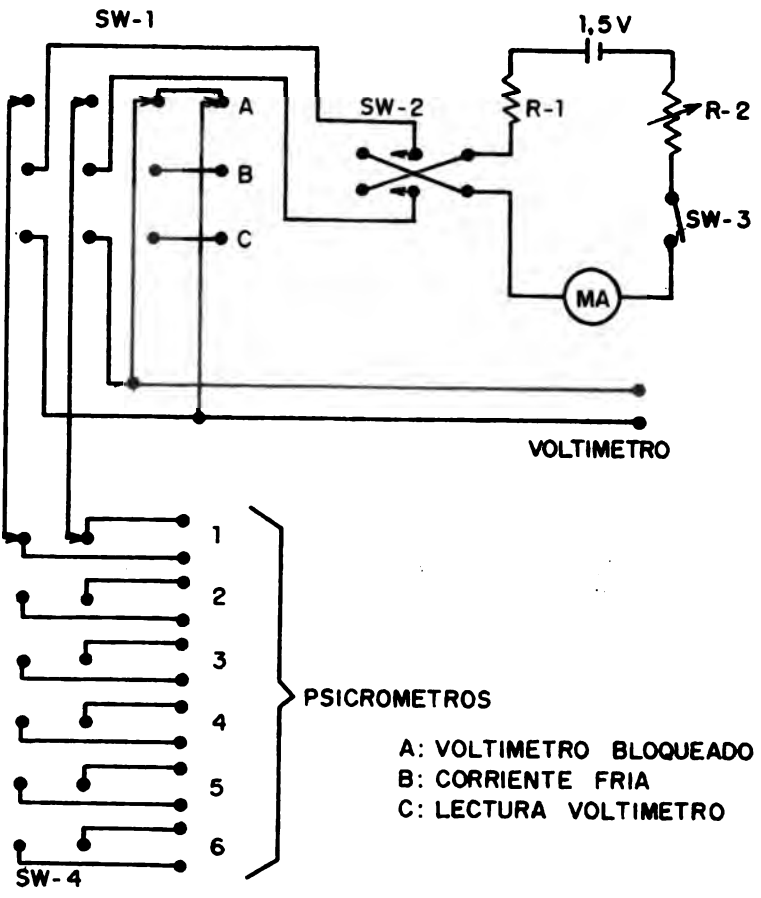


FIGURA 2.25. Circuito eléctrico para aplicar corriente fría a sicrómetros de termocuplas (Millar, 1967).

de constantan y luego por el de cromel. Si la corriente pasa en sentido inverso se obtiene calentamiento de la cupla en vez de enfriamiento. La polaridad es fácil de predecir para aquellos sicrómetros construídos con termopares obtenidos comercialmente, puesto que los alambres vienen señalados.

La situación se complica cuando se confeccionan termocuplas en el laboratorio, ya que no es posible la marcación de los alambres. En general, los sicrómetros basados en el efecto de Peltier tienen una sensibilidad entre −0,3

y −0,4 μV/bar (Rawlins, 1966). Esta información se utiliza como referencia para determinar la polaridad de los sicrómetros mediante el uso de ellos con una solución de NaCl de molalidad conocida.

Cuando se trabaja con material vegetal, éste debe ponerse en la cámara del sicrómetro de la misma forma como se colocó el papel filtro para calibrarlos. En este caso la lectura en microvoltios se utiliza para obtener el potencial de agua de la muestra mediante la curva de calibración.

Cuando se usan sicrómetros en el suelo se recomienda la utilización de un termopar adicional de cobre y constantan en el mismo lugar, con el objeto de obtener el potencial de agua a la temperatura del suelo. Esto requiere que los sicrómetros sean calibrados por lo menos a tres temperaturas (15, 30, y 45 °C).

Es muy probable que las temperaturas del suelo nunca coincidan con las temperaturas de calibración, y en este caso, es necesario interpolar entre las curvas de calibración para obtener el potencial de agua del suelo.

Se han desarrollado nuevas técnicas para la determinación del potencial de agua en condiciones de campo que vienen usándose en forma extensiva en estudio de las relaciones hídricas del sistema suelo-planta (Hoffman y Splinter, 1968; Manohar, 1966; Millar et al, 1969; Rawlins y Dalton, 1967; Millar, 1971; Neuman y Thurtell, 1972; Neuman et al., 1974).

2.2 Expresión del Agua del Suelo.

2.2.1 Porcentaje en Base Seca

$$P_s = \frac{\textit{Peso del agua}}{\textit{Peso del suelo seco}} \times 100 \qquad (2.6)$$

También,

$$P_s = \frac{(M_{sh} - M_{ss})}{M_{ss}} \times 100 \qquad (2.7)$$

donde P_s es el porcentaje de agua en base seca, M_{sh} es el peso del suelo húmedo y M_{ss} es el peso del suelo seco.

2.2.2 Contenido de Humedad en Volumen

$$\theta = \frac{Volumen\ de\ agua}{Volumen\ de\ suelo} = \frac{V_{agua}}{V_s} \tag{2.8}$$

$$d_s = \frac{M_{ss}}{V_s}$$

$$V_s = \frac{M_{ss}}{d_s} \tag{2.9}$$

De la ecuación 2.7, tenemos:

$$P_s = \frac{M_{agua}}{M_{ss}}$$

$$M_{ss} = \frac{M_{agua}}{P_s} \tag{2.10}$$

Reemplazando la ecuación 2.10 en 2.9, se obtiene:

$$V_s = \frac{M_{agua}}{P_s\ d_s} \tag{2.11}$$

Reemplazando la ecuación 2.11 en 2.8, se obtiene:

$$\theta = \frac{V_{agua}}{(M_{agua}/P_s\ d_s)} = \frac{V_{agua}}{M_{agua}}\ P_s\ d_s$$

$$\frac{V_{agua}}{M_{agua}} = \frac{1}{d_{agua}}$$

$$\theta = P_s\ \frac{d_s}{d_{agua}} \tag{2.12}$$

La expresión 2.12 para el contenido volumétrico de agua es una fracción que puede expresarse como porcentaje, y más propiamente como fracción volumétrica cm^3/cm^3 lo cual indica un volumen de agua en un volumen de suelo.

Normalmente, la expresión 2.10 se escribe como $\Theta = P_g\ d_s$, en consideración a que la densidad del agua cambia relativamente poco con la temperatura, por lo que se supone igual a la unidad.

2.2.3 Altura o Lámina de Agua

En balances de agua y estudios de riego es necesario trabajar con láminas de agua. Esta se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$h = \Theta\ z = \frac{P_g}{100}\ d_s\ Z \qquad (2.13)$$

donde Θ es la fracción volumétrica de agua, Z es la profundidad u horizonte considerado, P_g es el porcentaje de humedad en base seca y d_s es la densidad aparente del suelo.

2.2.4. Lámina de Riego

Esta se refiere a la lámina de reposición, la cual depende sólo de las características físico-hídricas del suelo, o la lámina bruta o de aplicación, la cual depende de las características del suelo y de la eficiencia del método de aplicación del agua.

La lámina de riego es una altura de agua y el cálculo se basa en el uso de la ecuación 2.13

Se calcula el agua retenida por el suelo entre dos niveles de retención que son conocidos como capacidad de campo y punto de marchitez, entre los cuales el agua está disponible para uso por las plantas. La definición y factores que afectan estos niveles extremos de aprovechamiento por las plantas se discuten en el Capítulo 4.

Así, la lámina de agua aprovechable por las plantas se calcula por la expresión siguiente:

$$h = \frac{(Ps_{cc} - Ps_{pm})}{100}\ d_s\ Z \qquad (2.14)$$

donde Ps_{cc} es el porcentaje de humedad en base seca retenida a capacidad de campo (1/10 atm para suelos arenosos y 1/3 atm para suelos arcillosos) y Ps_{pm} es el porcentaje de humedad en base seca retenida en el punto de marchitez permanente (15 atm). La lámina de reposición (L_r) se obtiene de:

$$L_r = f\ s\ h \qquad (2.15)$$

donde f es el nivel de reposición elegido de acuerdo al efecto de la humedad en la productividad del cultivo. Así, f asume, normalmente, valores entre 1 (el suelo está a nivel del punto de marchitez) y 0,6, es decir, se restituye 60% de la lámina de agua retenida entre capacidad de campo y punto de marchitez.

La lámina bruta o de aplicación (L_b) se obtiene por la expresión:

$$L_b = L_r / E_a \qquad (2.16)$$

donde E_a es la eficiencia de aplicación.

2.2.5. Ejemplos

La información físico-hídrica de un suelo arenoso es la siguiente:

Profundidad (cm)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Retención de Agua (%) 1/10 atm	15 atm
0-30	1,56	9,0	2,44
30-60	1,52	9,48	3,71
60-100	1,53	10,32	3,89
100-120	1,54	10,32	4,48

Usando esta información, calcular lo siguiente:

a. Contenido volumétrico de agua a capacidad de campo de la camada 60-90 cm.
b. Lámina de agua retenida por el suelo a 15 atm en la camada 0-30 cm.
c. Lámina de agua retenida por el perfil del suelo de 120 cm de profundidad entre 1/10 y 15 atm.
d. Lámina de reposición cuando el suelo llega a 6,5% de humedad en base seca para un cultivo de 60 cm de profundidad efectiva del sistema radicular.
e. Lámina bruta de riego para un cultivo de 30 cm de profundidad radicular, cuando el suelo llega al nivel de 60% del agua disponible y se riega con una eficiencia de 45%.

Cálculos:

a. Usando la ecuación 2.12, se obtiene

$\Theta = 10{,}32 \times 1{,}53/1 = 15{,}8\ \%$ ó $0{,}158\ cm^3/cm^3$

b. Usando la ecuación 2.13, se obtiene

$$h = (2{,}44/100) \times 1{,}56 \times 30 = 1{,}14\ cm\ (11{,}4\ mm)$$

c. Se usa la ecuación 2.13, donde

$$P_e = Ps_{1/10} - Ps_{15}$$

$$h_{0-30} = \frac{(9 - 2{,}44)}{100} \times 1{,}56 \times 30 = 3{,}07\ cm$$

$$h_{30-60} = \frac{(9{,}48 - 3{,}71)}{100} \times 1{,}52 \times 30 = 2{,}63$$

$$h_{60-100} = \frac{(10{,}32 - 3{,}89)}{100} \times 1{,}53 \times 40 = 3{,}94\ cm$$

$$h_{100-120} = \frac{(10{,}32 - 4{,}48)}{100} \times 1{,}54 \times 20 = 1{,}80\ cm$$

$$h_{0-120} = 3{,}07 + 2{,}63 + 3{,}94 + 1{,}80 = 11{,}44\ cm$$

d. Se usa la ecuación 2.13 y valores medios de retención a 1/10 atm para la camada de 60 cm.

$$L_r = \frac{(9{,}24 - 6{,}5)}{100} \times 1{,}54 \times 60 = 2{,}53\ cm\ (25{,}3\ mm)$$

donde:
Retención media a 1/10 atm = $(9 + 9{,}48)/2 = 9{,}24\ \%$
Densidad aparente media = $(1{,}56 + 1{,}52)/2 = 1{,}54\ g/cm^3$

e. Se usa la ecuación 2.14 para calcular la lámina retenida y la ecuación 2.15 para calcular la lámina de reposición.

$$h = \frac{(9 - 2{,}44)}{100} \times 1{,}56 \times 30 = 3{,}07\ cm$$

$$L_r = 0{,}4 \times 3{,}07 = 1{,}23\ cm$$

$$L_s = 1,23/0,45 = 2,73 \text{ cm } (27,3 \text{ mm})$$

2.3. Concepto Hidráulico del Agua en el Suelo.

En el Capítulo 1 se discutieron los aspectos termodinámicos del agua en el sistema suelo-planta. De dicho análisis se obtuvo que el concepto termodinámico que describe el nivel de energía del agua del suelo era el potencial de agua.

Desde el punto de vista hidráulico, el nivel de energía del agua en cierto punto de un perfil de suelo se expresa en términos de carga hidráulica. El suelo es un material poroso compuesto de capilares de diferentes diámetros y longitud. Considerando la situación hidráulica de los conductos capilares en forma similar a las tuberías, se puede aplicar el teorema de Bernouilli, el cual establece:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + H \qquad (2.17)$$

donde Z_1 y Z_2 es la altura geométrica o de elevación, $P_1/\rho g$ y $P_2/\rho g$ es la altura piezométrica o de presión, $V_1^2/2g$ y $V_2^2/2g$ es la altura debida a la velocidad y H es la altura que representa las pérdidas de carga (Figura 2.26).

En el caso del flujo de agua en el suelo, la velocidad del agua es muy baja siendo insignificantes los valores de la taquicarga ($V^2/2g$).

Despreciando el término $V^2/2g$, la ecuación 2.17 se reduce a:

$$H = (\frac{P_1}{\rho g} + Z_1) - (\frac{P_2}{\rho g} + Z_2) \qquad (2.18)$$

$$H = (\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}) + (Z_1 - Z_2) \qquad (2.19)$$

En forma mas general, se puede escribir:

$$H = h_g + h_p \qquad (2.20)$$

donde:

H = carga hidráulica
h_g = carga gravitacional o de posición
h_p = carga de presión

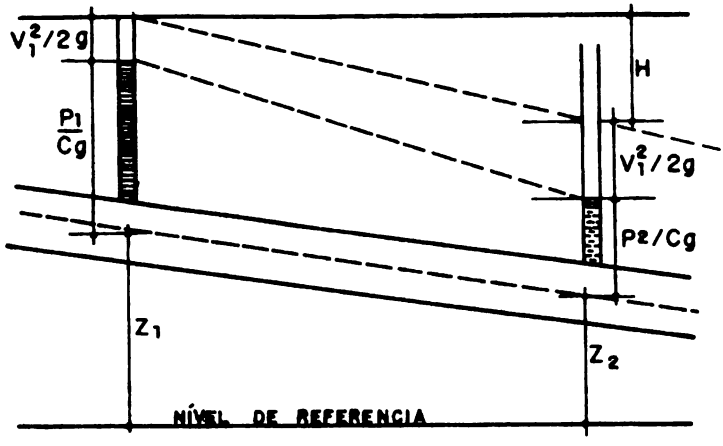


FIGURA 2.26. Esquema que muestra los términos del teorema de Bernouilli aplicado al flujo de agua en una tubería.

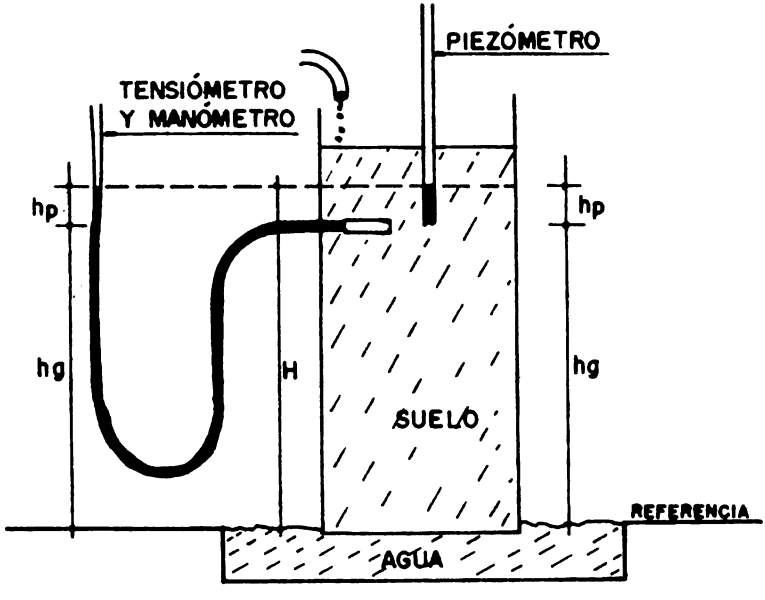


FIGURA 2.27. Esquema que muestra los componentes de la carga hidráulica en el caso del piezómetro y del tensiómetro.

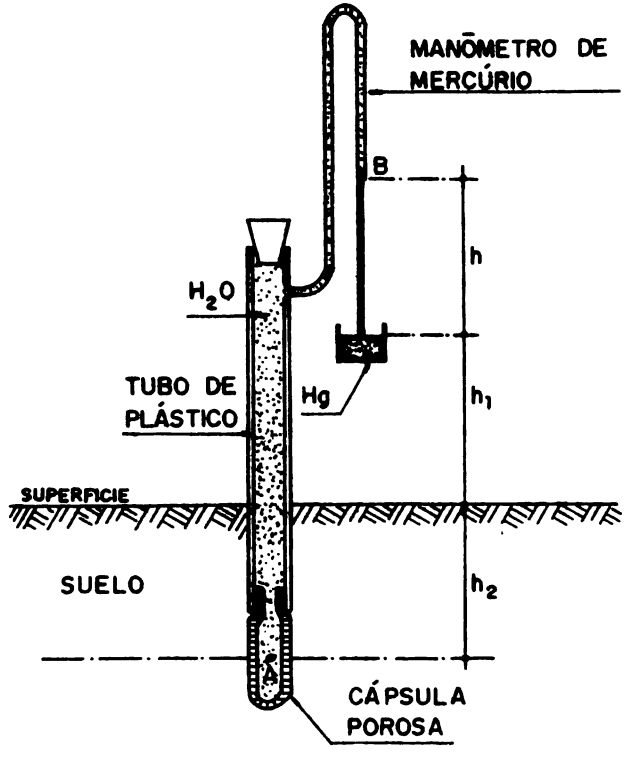


FIGURA 2.28. Esquema de un tensiómetro de investigación.

La definición de estos conceptos, de acuerdo a la Figura 2.27 es la siguiente:

Carga hidráulica (H): elevación de agua en una cañería abierta la cual se conecta a un punto en el sistema suelo-agua. Se mide en cm.

Carga gravitacional (h_g): altura del punto en cuestión, sobre la referencia. Se mide en cm.

Carga de presión (h_p): altura de agua en la cañería abierta sobre el punto en cuestión. Se mide en cm.

2.4. Ejemplos Conceptuales.

2.4.1. Carga Hidráulica en un Tensiómetro de Investigación

En la Figura 2.28 se muestra un esquema del tensiómetro de investigación como instalado en el campo.

El potencial matricial en el suelo (Punto A), en unidades de carga hidráulica, está dado por:

$$\Psi_{mA} = -[13,6\,h - (h + h_1 + h_2)] \qquad (2.21)$$

donde:

Ψ_{mA} = potencial matricial en el punto A (cm de agua)
h = altura en cm de mercurio
h_1 = distancia de la referencia (superficie del suelo) a la superficie del mercurio en la cubeta.
h_2 = profundidad de instalación de la cápsula porosa.

Véase que estamos interesados en la tensión que corresponde al punto A. Puesto que la lectura de altura de Hg corresponde a la tensión en el punto B, para obtener la tensión en A, se debe descontar la carga correspondiente a la columna de agua entre B y A, es decir, $(h + h_1 + h_2)$.

Considerando que la carga hidráulica se puede describir por la expresión $H = h_p + h_g$, entonces, en el caso del tensiómetro se reduce a:

$$H = -(13,6\,h - h - h_1 - h_2) - h_2$$

$$H = -12,6\,h + h_1 + h_2 - h_2$$

$$H = -12,6\,h + h_1$$

2.4.2. Cargas Hidráulicas en Tensiómetros Comerciales

Usando el esquema de la Figura 2.29, calcular las cargas hidráulicas de los tensiómetros A y B, y la diferencia de carga entre los mismos, usando como referencia la superficie del suelo y luego el extremo del tensiómetro A. En este caso las lecturas de los vacuómetros corresponden al potencial matricial o carga de presión (succión).

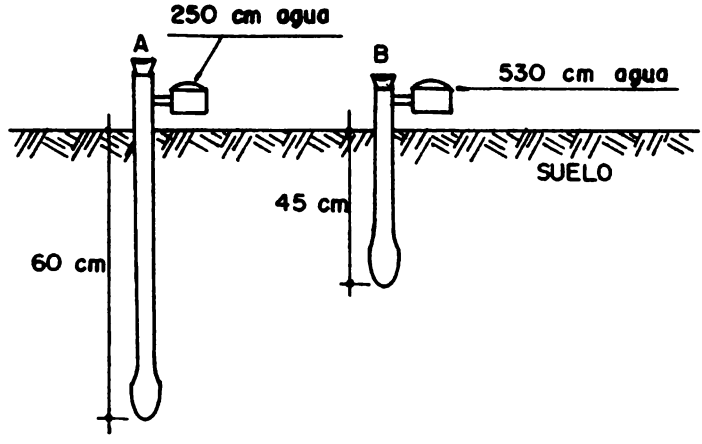


FIGURA 2.20. Esquema de una batería de tensiómetros normalmente instalada en el suelo para el manejo de riego de un cultivo.

Referencia: Superficie del suelo

$h_{gA} = -60$ cm $\quad h_{gB} = -45$ cm
$h_{pA} = -250$ cm $\quad h_{pB} = -530$ cm
$H_A = -310$ cm $\quad H_B = -575$ cm

$$\Delta H = H_B - H_A = -575 + 310 = -265\ cm$$

Referencia: Extremo del Tensiómetro A

$h_{gA} = 0$ $\quad h_{gB} = 15$ cm
$h_p = -250$ cm $\quad h_p = -530$ cm
$H_A = -250$ cm $\quad H_B = -515$ cm

$$\Delta H = H_B - H_A = -515 + 250 = -265\ cm$$

De este ejemplo se concluye que la posición de la referencia es arbitraria, pudiéndose utilizar cualquier punto como tal, con la observación de utilizar

la misma referencia cuando se pretende comparar datos o hacer cálculos sucesivos en el mismo sistema.

2.5. Referencias Bibliográficas.

[1] BARRS, H. D. 1968. Determination of Water deficits in plant tissues, p. 235–368. IN:T. Kozlowski (ed.) Water deficits and plant growth. I. Developement, control and measurement. Academic Press, New York.

[2] BLACK, T.A., W.R. GARDNER AND G.W. THURTELL. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. Agronomy Journal 33 (5):655–660.

[3] BOODT. M. DE, R. HARTMANN AND P. DE MEESTER. 1967. Determination of soil- moisture meter and air-purged tensiometers. IAEA (ed.) Publication. pp 147–160. Vienna, IAEA.

[4] BOX, J.E. Jr. 1965. Design and calibration of a thermocouple psycrometer which uses the Peltier effect. IN: A. Wexler (ed.) Humidity and moisture. Reinhold Publishing Corp., New York p. 110–121.

[5] CAMPBELL, G.S., J.W. TRULL, AND W. H. GARDNER. 1968. A welding technique for Peltier thermocouple psychrometers. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32 (6):887–889.

[6] DALTON, F.N. AND S. L. RAWLINS, 1968. Design criteria for Peltier-effect thermocouple psychrometers. Soil Sci. 105 (1):12–17.

[7] EHLIG, C.F. 1962. Measurement of energy status of water in plants with a thermocouple psychrometer. Plant Phys. 37 (3):288–290.

[8] GARDNER, W.H. 1965. Water content. IN: C. A. Black et al.(ed.), Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling. Madison. Wis., American Society of Agronomy. pp. 82–127.

[9] GARDNER, W. H. AND C. CALISSENDORFF. 1967. Gamma-ray and neutron attenuation in measurement of soil bulk density and water content. IN: IAEA (ed.), Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. pp 101–113. Vienna, International Atomic Energy Agency.

[10] HOFFMAN, G. J. AND W. E. SPLINTER. 1968. Instrumentation for measuring water potential of an intact plant-soil system. Trans. Amer. Soc. Agr. Engrs. 11:38–40.

[11] HOFFMAN, G. J. AND W. N. HERKELRATH. 1968. Design feature of intact leaf thermocouple psychrometer for measuring water potential. Trans. Amer. Soc. Agr. Engrs. 11:631–634.

[12] HOMES, J. W., S. A. TAYLOR AND S. J. RICHARDS. 1967. Measurement of soil water. pp 275–303. IN: R. M. Hagan et al. (ed.) Irrigation of Agricultural Lands. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. (Monograph 11).

[13] KING, L. G. 1967. Gamma-ray attenuation for soil-water content measurements using 241 Am. IN: IAEA (ed.), Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. pp. 17–29, Vienna, International Atomic Energy Agency.

[14] KIRKHAM, D. AND J. C. COREY. 1973. Recent progress in the design of radiation equipment and its practical implications. pp. 17–39. IN: IAEA, (ed.), Soil-Moisture and Irrigation Studies II, Proceedings of a panel held in Vienna, 1973.

[15] LAMBERT, JOHN. 1970. Studies of water removal by weeds from pine plantations. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 90 p. (Ph.D. Thesis).

[16] LANG, A. R. G. 1967. Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40 °C. Aust. J. Chem. 20:2017–2023.

[17] MANOHAR, M. G. 1966. Measurement of the water potential of intact plant tissues. I. Design of a microthermocouple psychrometer. J. Exp. Bot. 17(50):44–50.

[18] McHENRY, J. R. AND A. C. GILL. 1967. The influence of bulk density, slow neutron absorbers, and time on the calibration of neutron-moisture probes. IN: IAEA (ed.), Isotope and irrigation studies. pp. 83–99. Vienna. International Atomic Energy Agency.

[19] MERRIL, S. D. 1968. Details of construction of a multipurpose thermocouple psychometer. Research report No. 115 U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California. 9 p.

[20] MILLAR, A. A. 1967. Internal water balance of barley in relation to moisture stress and environmental conditions. Fargo, North Dakota, North Dakota State University. 104 p. (M.S. Thesis)

[21] MILLAR, A. A., A. R. G. LANG AND W. R. GARDNER. 1969. Four-terminal Peltier type thermocouple psychrometer for measuring water potential in nonisothermal systems. Agron. J.62:705–708.

[22] MILLAR, A. A. 1971. Water balance of a natural site in the Lake Wingra Basin, Report to the International Biological Program, National Science Foundation. Madison, Wisconsin, Dept of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 11 p. (Biome Abstract 2 (1):423, 1972).

[23] MILLAR, A. A., W. R. GARDNER AND G. WEISS. 1970. Water regime of a sandy soil under row crops. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 11 p. (Chapter I, Ph.D. Thesis of A. A. Millar).

[24] MILLAR, A. A. 1971. Descripción, construcción calibración y uso de sicrómetros de termocuplas para determinar el potencial de agua en el sistema suelo-planta, Lima, Perú. Anales del IV Simposio Latinoamericano de Fisiología Vegetal 20 p.

[25] MILLAR, B. D. 1971. Improved thermocouple psychrometer for the measurement of plant and soil water potential. I. Thermocouple psychrometer and an improved instrument design. J. Exp. Bot 22:875–891.

[26] MONTEITH, J. L. AND P. C. OWEN. 1958. A thermocouple method for measuring relative humidity in the range 95–100%. J. Sci. Instrum. 35: 433–446.

[27] NEUMAN, H. H. AND G. W. THURTELL. 1972. A Peltier cooled thermocouple dew- point hygrometer for in situ measurements of water potential. IN: R. W. Brown and B. P. Van Haveren, eds. Psychrometry in water relations research. Utah Agr. Exp. Sta., Utah State University, Logan Utah.

[28] NEUMAN, H. H., G. W. THURTELL, K. R. STEVENSON AND C. L. BEADLE, 1974. Leaf Water content and potential in corn, sorghum, soybean, and sunflower. Can. J. Plant Sci. 54:185–195.

[29] PECK, A. J. AND R. M. RABBIDGE. 1969. Design and performance of an Osmotic tensiometer for measuring capillary potential. Soil Science Society of America. Proceedings 33(2):196–202.

[30] PHENE, C. J., G. J. HOFFMAN AND S. L. RAWLINS, 1971. Measuring soil metric potential "in situ" by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. Soil Science Society of America Proceedings 35 (1):27–33.

[31] RAWLINS, S. L. AND F. N. DALTON. 1967. Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31(3):297–301.

[32] RAWLINS, S. L. 1966. Theory for thermocouple psychrometers used to measure water potential in soil and plant samples. Ag. Meteorol. 3:293–310.

[33] REICHARDT, K., P. L. LIBARDI AND J. M. SANTOS. 1974. An analysis of soil- water movement in the field:II. Water balance in a snap

bean crop. São Paulo, CENA/ESALQ/USP. 19 p. (Boletim Científico No. 22).

[34] RICHARDS, L. A. AND G. OGATA. 1958. Thermocouple for vapor pressure measurements in biological and soil systems at high humidity. Science 128(3331):1089–1090.

[35] ROMAN, C., B. FERNANDEZ y A. A. MILLAR. 1979. Evapotranspiración de viñedos de secano sometidos a dos sistemas de manejo. Ciencia e Investigación Agraria (Chile).

[36] SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORP. 1985. IRAMS system for soil moisture measurement. Santa Barbara, California, Soil Moisture Equipment corp. 16p.

[37] SPANNER, D. C. 1951. The Peltier effect and its use in measurement of suction pressure. J. Exp. Bot. 2:145–168.

[38] TAYLOR, S. A., D. D. EVANS AND W. D. KEMPER. 1961. Evaluation soil water. Logan, Utah Agricultural Experiment Station. 67 p. (Bulletin 426).

[39] TOPP et al. 1983. Use of IRAMS systems analyzer in soils. Water Resource Research 16:574–583.

[40] VAN BAVEL, C. H. M., N. UNDERWOOD AND R. W. SWANSON. 1956. Soil moisture measurement by neutron moderation. Soil Science 82(1):29–41.

CAPITULO 3

MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

3.1. Ecuación de Darcy.

El agua se mueve en el suelo en forma líquida o de vapor.

Para que el agua se mueva en el suelo se necesitan dos condiciones: una fuerza conductora que la haga moverse (gradiente hidráulico) y un medio adecuado donde el agua se pueda mover (poros conductores).

Darcy (1856) derivó una ecuación en base a sus observaciones sobre el movimiento del agua a través de estratas de arena. Darcy encontró la siguiente relación general:

$$q = Q/A = -K\,i \qquad (3.1)$$

donde:
q = Densidad de flujo del agua ($L\,T^{-1}$)
Q = Flujo de agua ($L^3\,T^{-1}$)
A = Sección transversal de área (L^2)
K = Conductividad del medio ($L\,T^{-1}$)
i = Gradiente o fuerza conductora (adimensional)

Es conveniente diferenciar adecuadamente el significado de los términos de "flujo" y "densidad de flujo" ya que continuamente se utilizarán en los diferentes capítulos de este libro.

Flujo(Gasto, Caudal): es el volumen de agua que pasa por una cañería, canal, suelo, material poroso, etc., en un tiempo determinado.

Flujo = Volumen de agua/Tiempo (Q = V/T)

Unidades: l/s, cm^3/s, $m^3/hora$, $[L^3\,T^{-1}]$

Ejemplo: Caudal de un río, gasto de un canal, etc.

Densidad de flujo= Flujo/Area

= Volumen de agua/(Area x Tiempo)

$q = Q/A = V/AT$

Unidades: cm/s, cm/hora, cm/día, mm/día, $[L\ T^{-1}]$

Ejemplos: Conductividad hidráulica, conductividad capilar, evapotranspiración, infiltración, coeficiente de drenaje, etc.

El término de densidad de flujo tiene las mismas dimensiones de velocidad, pero no representa la velocidad con que el agua se mueve en el suelo. La velocidad real (v) del agua en el suelo es el volumen de agua (V) que pasa por la sección transversal de los poros por unidad de tiempo.

Para un suelo saturado, la sección transversal de los poros es el producto del area efectiva (A) por la porosidad del suelo (P). De acuerdo con esto, tenemos que la velocidad del agua es:

$$v = V/APT \quad [L\ T^{-1}] \tag{3.2}$$

de donde se obtiene que:

$$v = q/P \tag{3.3}$$

En el caso de un suelo no saturado el agua disponible al flujo es $A\Theta$, donde Θ es el contenido volumétrico de agua en el suelo (ecuación 2.9). Luego, usando la ecuación 3.1, se tiene que:

$$v = q/\Theta \tag{3.4}$$

Debido a las variaciones de la forma de los poros del suelo, el recorrido de una molécula de agua sigue un trayecto tortuoso y no en línea recta. Se define tortuosidad de un medio poroso al cuadrado de la relación entre la distancia real (Dr) recorrida por una molécula de agua y la distancia en linea recta (D1), $\alpha = (D_r/D_1)^2$. Este parámetro de tortuosidad, α, es adimensional y varía generalmente entre 1 y 2.

Por ejemplo, cuando 75 cm^3 de agua atraviesan 10 cm^2 de un suelo con 50% de porosidad, en 25 minutos, este suelo tiene una densidad de flujo de 75/ (10 x 25 = 0,3 cm^3/cm^2 *min* ó 0,3 cm/min, pero el agua tiene una velocidad media de 0,3/0,5 = 0,6 cm/min. Nótese que a pesar de tener las mismas unidades ($L\ T^{-1}$)), el concepto y los valores q y v son diferentes.

La ley de Darcy (ecuación 3.1) expresa que la velocidad de flujo es proporcional a la fuerza conductora (gradiente) y a la conductividad del medio

poroso. Esta ley es igual a la que rige para movimiento de calor (ley de Fourier), electricidad (ley de Ohm) y difusión (ley de Fick). En todas estas leyes se tiene un gradiente (i) como fuerza conductora y el medio representado por la conductividad (K).

3.2. Gradiente Hidráulico o de Potencial de Agua.

El gradiente hidráulico o de potencial de agua (i) es la fuerza conductora que hace con que el agua se mueva. Cuando el gradiente es nulo, no hay fuerza conductora y todo el sistema está en equilibrio; consecuentemente no hay movimiento de agua.

El gradiente hidráulico o de potencial de agua (i) es definido en el sistema cartesiano en tres dimensiones, X, Y y Z.

En el sistema usado por los ingenieros, el gradiente se expresa en términos de cargas hidráulicas.

$$i = \nabla H = \partial H/\partial X + \partial H/\partial Y + \partial H/\partial Z \qquad (3.5)$$

Para una dimensión, Z, el gradiente se expresa como i =dH/dZ, o en forma finita $i = \Delta H/\Delta Z = (H_2 - H_1)/(Z_2 - Z_1)$.

Los cientistas de suelos expresan el gradiente i en términos de potencial de agua, como sigue:

$$i = \nabla\Psi = \partial\Psi/\partial X + \partial\Psi/\partial Y + \partial\Psi/\partial Z \qquad (3.6)$$

De forma similar, para la dirección Z, se escribe como $i = dH/dZ$, o en forma finita $i = \Delta\Psi/\Delta Z = (\Psi_2 - \Psi_1)/(Z_2 - Z_1)$.

El movimiento de agua siempre se produce en la dirección que disminuye la gradiente de carga hidráulica o disminuición de gradiente de potencial.

Dirección de flujo

Suelo húmedo ⟹ Suelo Seco

Baja Tensión Negativa ⟹ Alta Tensión Negativa

Baja Succión ⟹ Alta Succión

Alta Carga Hidráulica ⟹ Baja Carga hidráulica

Alto Potencial de Agua ⟹ Bajo potencial de Agua

El signo negativo de la ecuación de Darcy normalmente trae confusión en su uso, ya que en más de una oportunidad al hacer cálculos se encontrarán

con valores negativos de q, lo cual es imposible. El signo, positivo o negativo, indica la dirección del flujo desde que se convencione la forma de tomar los potenciales de agua en el cálculo del gradiente.

Si se calcula la diferencia de potencial de agua en las formas siguientes:

$$\Delta\Psi = \Psi_{arriba} - \Psi_{abajo} \quad (caso\ vertical)$$

$$\Delta\Psi = \Psi_{derecha} - \Psi_{izquierda} \quad (caso\ horizontal)$$

Entonces, el signo (positivo o negativo) final que resulte de la aplicación de la ecuación de Darcy, indicará la dirección del flujo, como sigue:

Flujo para arriba

Flujo para izquierda $\overset{-}{\leftarrow}\underset{-}{\downarrow}\uparrow\overset{+}{\rightarrow}\underset{+}{}$ Flujo para derecha

Flujo para abajo

En ingeniería se trabaja exclusivamente con cargas hidráulicas, normalmente positivas, por lo cual la ecuación de Darcy se escribe como q = ki, donde la carga hidráulica disminuye en la dirección del flujo.

El factor de proporcionalidad de la ecuación de Darcy es la conductividad hidráulica del medio poroso, el cual depende de las propiedades del suelo y del agua. Esta característica del suelo puede ser definida por la relación entre densidad de flujo y gradiente, como sigue:

$$K = -q/\nabla H = -q/\nabla\Psi \quad [L\,T^{-1}] \qquad (3.7)$$

Otros detalles sobre esta característica de los suelos se discuten en los Capítulos 4 y 5.

3.3. Ecuación de Continuidad.

La ecuación de Darcy permite describir la situación de movimiento del agua del suelo en un instante determinado. Sin embargo, el proceso del movimiento de agua es dinámico y cambiante. Debido a esto, es de importancia conocer y describir los cambios del agua en el suelo en función de la posición espacial y del tiempo.

La ecuación de continuidad permite establecer soluciones que describen la situación de $\Theta = \Theta(x, t)$.

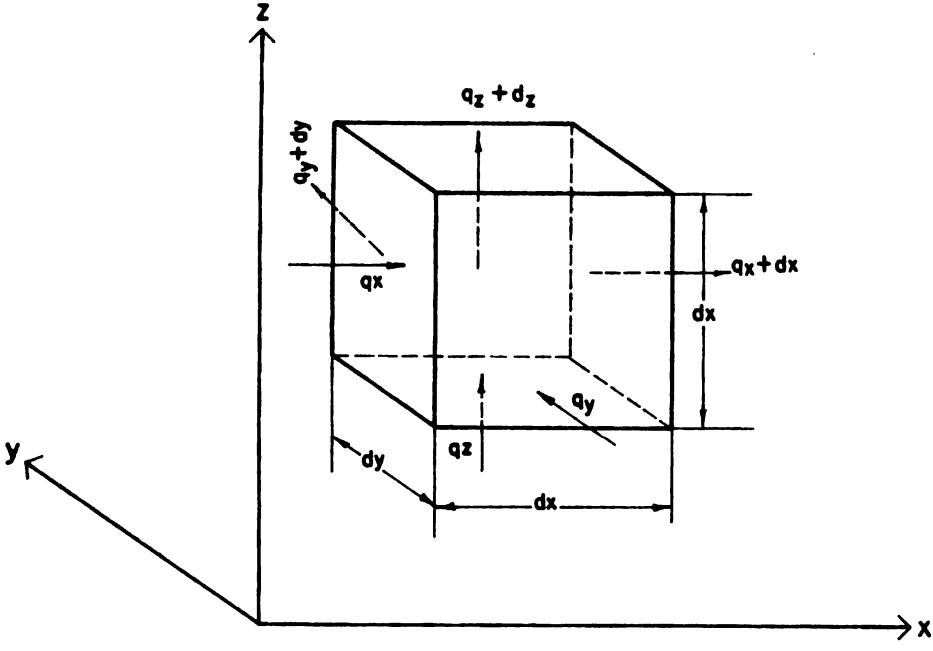


FIGURA 3.1. Elemento de volumen del suelo.

La ecuación de continuidad expresa que la suma algebraica de la cantidad de agua que entra y sale de un volumen específico de suelo en una unidad de tiempo es igual a la variación en el contenido de agua en ese volumen de suelo.

Para la derivación de la ecuación de continuidad consideraremos un volumen infinitesimal de suelo (Figura 3.1).

La cantidad de agua que entra en una unidad de volumen de suelo por unidad de tiempo es:

$$V_E/\Delta t = q_x\, dy\, dz + q_y\, dz\, dx + q_z\, dx\, dy \qquad (3.8)$$

La cantidad de agua que sale de la unidad de volumen de suelo por unidad de tiempo es:

$$V_s/\Delta t = \{q_x + (\partial q_x/\partial x)\}dy\, dz + \{q_y + (\partial q_y/\partial y)dy\}dx\, dz$$

$$+ \{q_z + (\partial q_z/\partial z)dz\}dx\,dy \qquad (3.9)$$

La cantidad de agua por unidad de tiempo que permanece en el volumen infinitesimal es igual a la ecuación 3.8 menos ecuación 3.9:

$$(V_E - V_S)/\Delta t = -(\partial q_x/\partial x)\,dx\,dy\,dz - (\partial q_y/\partial y)\,dx\,dy\,dz$$

$$- (\partial q_z/\partial z)\,dx\,dy\,dz \qquad (3.10)$$

Definiéndose como Θ al volumen de agua almacenado en el suelo, se puede escribir:

$$\Delta\Theta = (V_E - V_S)/dx\,dy\,dz$$

Luego se tiene que la ecuación 3.10 se reduce a la siguiente expresión:

$$\partial\Theta/\partial t = -(\partial q_x/\partial x + \partial q_y/\partial y + \partial q_z/\partial z) \qquad (3.11)$$

En notación vectorial, la ecuación 3.11 se reduce a:

$$\partial\Theta/\partial t = -\nabla.q \qquad (3.12)$$

La ecuación 3.12 se conoce como la ecuación de continuidad para medios porosos donde Θ es el contenido volumétrico de agua, t es tiempo, ∇ es el operador diferencial o "nabla" y q es la densidad de flujo.

El signo negativo se debe a que el operador diferencial o "nabla" es positivo y el vector densidad de flujo es negativo.

$$\nabla.q = \partial q_x/\partial x + \partial q_y/\partial y + \partial q_z/\partial z \quad (escalar) \qquad (3.13)$$

donde:

$$\nabla = (\partial/\partial x)\,\vec{i} + (\partial/\partial y)\,\vec{j} + (\partial/\partial z)\,\vec{k} \quad (vector) \qquad (3.14)$$

$$q = q_x \vec{i} + q_y \vec{j} + q_z \vec{k} \quad (vector) \tag{3.15}$$

3.4. Movimiento de Agua en Suelos Saturados.

Bajo condiciones de saturación, el agua no está bajo tensión y se encuentra llenando la mayoría de los poros del suelo.

El flujo saturado en una dimensión, z, queda descrito por la ley de Darcy, como:

$q = - K (dH/dZ)$

donde K es una constante denominada conductividad hidráulica del suelo, y dH/dZ es el gradiente de carga hidráulica.

Debido a que los poros del suelo se encuentran conectados entre sí, formando tubos de conducción, el flujo también se puede describir por la ecuación de Hagen-Poiseuille que expresa el flujo de agua en un tubo de diámetro pequeño:

$$Q = \Pi R^4 (P_2 - P_1)/8\eta L \tag{3.16}$$

donde

Q = Flujo (cm^3/seg)

$P_2 - P_1$ = Diferencia de presión ($dinas/cm^2$)

R = Radio del tubo (cm)

L = Largo del tubo (cm)

η = Viscosidad del líquido (poise $= g\ cm^{-1}\ seg^{-1}$)

La ecuación 3.16 expresa que el flujo de un líquido a través de un tubo de diámetro pequeño es proporcional a la cuarta potencia del radio del tubo y a la diferencia de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del líquido y largo del tubo.

La ecuación 3.16 demuestra que el tamaño de los poros del suelo es muy importante en condiciones de flujo saturado. El flujo decrece a medida que el tamaño de los poros disminuye.

La densidad de flujo en suelos saturados de diferentes texturas es en la secuencia:

Arena > Limo > Arcilla

La densidad de flujo es mayor en suelos saturados que en suelos no saturados. Esto se debe a que en un suelo no saturado la conductividad capilar es función del contenido de humedad, mientras que en un suelo saturado la conductividad es una constante, y siempre de valor mayor que la conductividad capilar a cualquier otro contenido de humedad del suelo.

3.4.1. Ecuación de Laplace

Aplicando la ecuación de continuidad al caso de un suelo saturado se obtiene la ecuación de Laplace que describe el movimiento de agua bajo esta condición.

Definiendo la densidad de flujo q para cada uno de los componentes de flujo en un eje de coordenadas cartesianas, utilizando cargas hidráulicas, se tiene:

$$q_x = -K_x \, (\partial H_x/\partial x) \tag{3.17}$$

$$q_y = -K_y \, (\partial H_y/\partial y) \tag{3.18}$$

$$q_z = -K_z \, (\partial H_z/\partial z) \tag{3.19}$$

Introduciendo las ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19 en la ecuación de continuidad (ecuación 3.12), obtenemos:

$$\partial\Theta/\partial t = -\{\partial/\partial x \, (-K_x \, \partial H_x/\partial x) + \partial/\partial y \, (-K_y \, \partial H_y/\partial y) + \partial/\partial z \, (-K_z \, \partial H_z/\partial z)\} \tag{3.20}$$

Considerando un suelo homogéneo donde la conductividad hidráulica es igual en todas direcciones ($K = K_x + K_y + K_z$), entonces la ecuación 3.20 se puede escribir de la siguiente forma:

$$\partial\Theta/\partial t = K \, (\partial^2 H_x/\partial x^2 + \partial^2 H_y/\partial y^2 + \partial^2 H_z/\partial z^2) \tag{3.21}$$

En el caso del flujo en un suelo saturado la conductividad hidráulica es constante y el contenido de agua no cambia con el tiempo. Así, $\partial\Theta/\partial \, t = 0$ y la ecuación 3.21 se reduce a:

$$\partial^2 H_s/\partial x^2 + \partial^2 H_y/\partial y^2 + \partial^2 H_z/\partial z^2 = 0 \qquad 3.22)$$

y en notación vectorial queda como:

$$\nabla^2 H = 0 \qquad (3.23)$$

La ecuación 3.22 ó 3.23 es conocida como la ecuación de Laplace para flujo saturado, y se constituye en el punto de partida para la búsqueda de soluciones a situaciones de flujo saturado. Bauer et al. (1972) presentan un ejemplo típico de su uso, aplicado a la situación del flujo para un pozo profundo.

Considerando el flujo en una sola dimensión se tiene que la ecuación de Laplace se reduce a:

$$d^2 H_z/dz^2 = 0 \qquad (3.24)$$

La solución de esta ecuación es encontrar una función H = H(z) que cumpla con la condición de que la segunda derivada sea nula.

La función cuya segunda derivada es cero, es una línea recta, representada por la expresión

$$H = az + b \qquad (3.25)$$

donde a y b son constantes que resultan de las dos integraciones. La ecuación 3.25 es llamada la solución general de la ecuación de Laplace para 1-dimensión.

3.4.2. Ejemplos Clásicos de Movimiento de Agua en Suelos Saturados

a. Caso de una Columna en Posición Vertical (Figura 3.2)

Para el análisis de este ejemplo es necesario recordar que:

(i). Carga hidráulica = Carga gravitacional + Carga de presión

$$H = h_g + H_p \quad (ecuacion\ 2.14)$$

(ii).Ley de Darcy

$$q = V/AT = -K\,i = -K\,(\Delta H/\Delta Z) = -K\,(H_2 - H_1)/(Z_2 - Z_1)$$

Columna vertical (Figura 3.2)

$$H = H_{ENTRADA} - H_{SALIDA}$$

$$H_{EN} = L + h$$

$$H_{SAL} = 0 + 0$$

Luego se tiene que:

$$\Delta H = H_{EN} - H_{SAL} = (L + h)$$

Gradiente :

$$i = \Delta H/\Delta Z = (H_{EN} - H_{SAL})/(Z_2 - Z_1) = (L + h)/L$$

Luego:

$$q = -K\,(L + h)/L \quad (columna\ vertical) \qquad (3.26)$$

El signo negativo indica flujo de arriba para abajo, de acuerdo con la convención adoptada.

Puesto que q = V/AT

Entonces: V/AT = K (L + h)/L

de donde:

$$K = V\,L/AT(L + h) \qquad (3.27)$$

La ecuación 3.27 se usa para determinar la conductividad hidráulica en laboratorio cuando se emplea una columna de suelo con una carga constante de agua. Este procedimiento se conoce como método del permeámetro de carga constante (Millar, 1978).

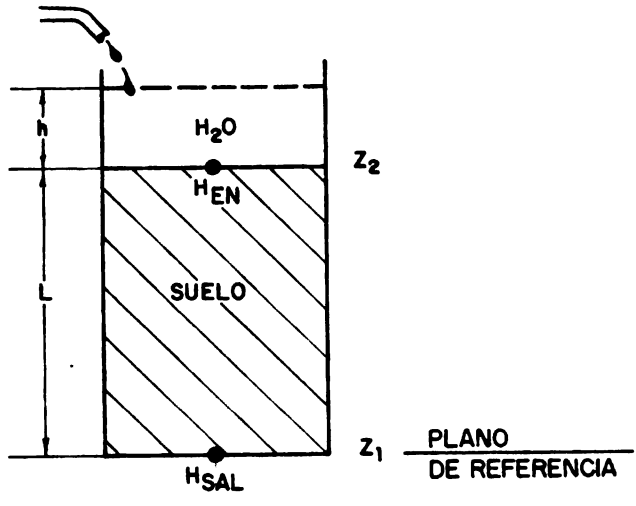


FIGURA 3.2. Flujo saturado vertical.

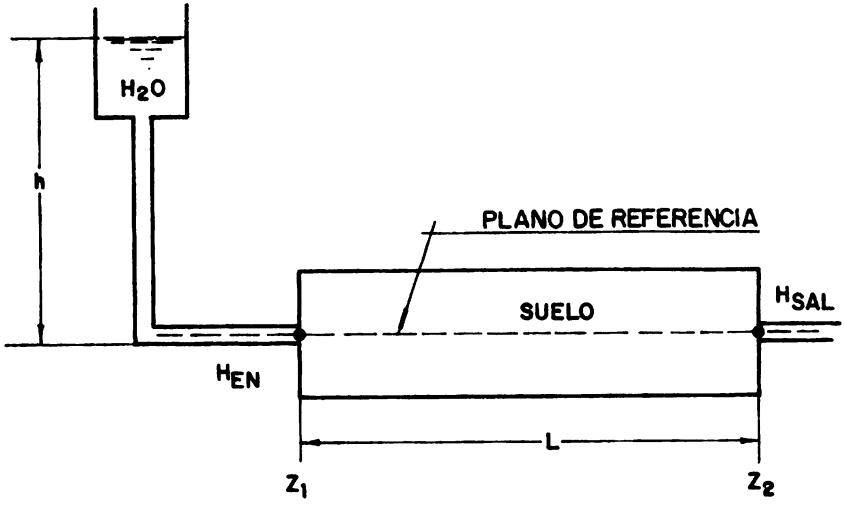


FIGURA 3.3. Flujo saturado horizontal.

El resultado (ecuación 3.26) también se puede obtener usando la solución general de la ecuación de Laplace en 1-dimensión.

Aplicando la ecuación 3.25 a la columna vertical en flujo saturado,

$H = az + b$ (solución general)

Se determinan las cargas hidráulicas en la posición, $Z_1 = 0$ (referencia) y Z_2

$H_{EN} = h + L$

$H_S = 0 + 0$

Luego se substituyen estos valores en la ecuación de la solución general.

$h + L = aL + b$ (vea que $Z = Z_2 = L$)

$0 = a.0 + b$

de donde se obtiene que:

$b = 0$

$a = (h + L)/L$

y la solución particular es

$$H = \{(h + L)/L\} Z \qquad (3.28)$$

El gradiente hidráulico corresponde a la derivada de la ecuación 3.28.

$dH/dZ = (h + L)/L$

Luego

$q = -k (h + L)/L$

donde el signo negativo indica que el flujo se efectua de arriba para abajo, de acuerdo con la convención adoptada.

b. Caso de una columna en posición horizontal (Figura 3.3)

$H = H_{SAL} - H_{EN}$

$H_{EN} = 0 + h$

$H_{SAL} = 0 + 0$

Luego: $\Delta H = H_{SAL} - H_{EN} = -h$

Gradiente: $i = \Delta H/\Delta Z = -h/L$

Obteniéndose:

$$q = K\,(h/L) \quad (columna\ horizontal) \tag{3.29}$$

De acuerdo con la convención adoptada, el signo positivo indica que la dirección del flujo es de izquierda para derecha.

Comparando la ecuación de flujo para una columna en posición vertical (ecuación 3.26) y la ecuación de flujo para una columna en posición horizontal (ecuación 3.29) se deduce que el flujo en la columna vertical es mayor que en la columna horizontal en valor igual al de la conductividad hidráulica.

En forma similar al caso de la columna en flujo saturado, se puede encontrar la solución general de la ecuación de Laplace en la dirección x ($H = aX + b$). Esto se deja como práctica para el lector.

3.5. Movimiento de Agua en Suelos no Saturados.

La mayoría de los procesos que envuelven el movimiento de agua en condiciones de campo ocurren cuando el suelo esta en su condición no saturada, de ahí la importancia de caracterizar el proceso y conocer mejor los parámetros que lo definen.

El movimiento de agua en suelos no saturados es complejo y más difícil de describir cuantitativamente debido a que el contenido de agua cambia constantemente durante el proceso.

En 1921, Willard Gardner sugirió que la Ley de Darcy podía ser aplicada a suelos no saturados, escrita como:

$$q = -k(\Theta)\, i \tag{3.30}$$

donde $k(\Theta)$ es la conductividad capilar considerada como función del contenido de humedad del suelo, y el gradiente $i = d\Psi/dZ$. Teóricamente se supone que la fase gas actúa como un sólido, de tal manera que $q = 0$ en la interfase aire-agua.

La conductividad capilar k decrece rápidamente con la insaturación debido a que la sección transversal de área es menor para la transmisión, el tamaño de poros es menor, y la trayectoria de una molécula de agua es mayor.

Comparativamente, el movimiento de agua en un suelo arenoso no saturado se detiene a una succión (tensión) menor que en suelos arcillosos no saturados. Esto se debe a la pérdida de la continuidad del film de agua entre las partículas mayores.

Para potenciales de agua menores de -1 bar (succiones mayores de 1 bar), la conductividad capilar es mayor en suelos de textura fina.

Arcilla > Limo > Arena

3.5.1. Ecuación General de Flujo en Suelos no Saturados

Como ya se vió anteriormente, el movimiento de agua se rige por la ley de Darcy

$$q = - k\,(d\Psi/dZ)$$

que en forma vectorial, se escribe como:

$$q = -k\,\nabla\Psi$$

Por otra parte, el agua en cualquier medio se rige por la ley de conservación de masa, o ecuación de continuidad, la cual se expresa como sigue: (ecuación 3.12):

$$\partial\Theta/\partial t = - \nabla.q$$

donde

Θ = contenido volumétrico de agua

t = tiempo

∇ = operador diferencial o "nabla"

Substituyendo la ley de Darcy en la ecuación de continuidad se obtiene la Ecuación General de Flujo Tridimensional para suelos no saturados:

$$\partial\Theta/\partial t = \nabla.(k\nabla\Psi) \qquad (3.31)$$

Esta ecuación constituye el punto de partida de todas las investigaciones en suelos no saturados.

a. Ecuación Diferencial para Movimiento de Agua en 1-Dimensión en Suelos no Saturados.

Tomando sólo una dimensión (vertical), la Ecuación General de Flujo, se reduce a la siguiente forma:

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z(k\,\partial\Psi/\partial z) \qquad (3.32)$$

pero

$$\Psi = z + (-\Psi_m) \tag{3.33}$$

donde z es el potencial gravitacional (profundidad) y Ψ_m es el potencial matricial o succión.

Reemplazando la ecuación 3.33 en 3.32, se obtiene

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z\{k\,\partial/\partial x(z - \Psi_m)\}$$

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z\{k\,(\partial z/\partial z - \partial\Psi_m/\partial z)\}$$

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z\{k(1 - \partial\Psi_m/\partial z)\}$$

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z(k - k\,\partial\Psi_m/\partial z)$$

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z(-k\,\partial\Psi_m/9partialz) + \partial k/\partial z \tag{3.34}$$

La ecuación 3.34 es la ecuación para flujo vertical.

En forma similar, se obtiene

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial x(-k\,\partial\Psi_m/\partial z) \tag{3.35}$$

La ecuación 3.35 es la ecuación para flujo horizontal.

Tomando el termino $\{-k(\partial\Psi_m/\partial z)\}$ de la ecuación 3.34 para flujo vertical, podemos realizar la operación matemática denominada "regla de la cadena", y se puede escribir lo siguiente:

$$-k\,\partial\Psi_m/\partial z = -k\,(\partial\Psi_m/\partial\Theta)(\partial\Theta/\partial z)$$

La operación anterior nos permite describir otra propiedad física del suelo llamada Difusividad (D) que tiene dimensiones $L^2\,T^{-1}$.

$$D = -k\,(\partial\Psi_m/\partial\Theta) \tag{3.36}$$

De acuerdo a la expresión anterior, la difusividad (D) es el producto de la conductividad capilar por la pendiente de la curva de retención de agua del suelo, y es uno de los procedimientos usados para determinar $D = D(\Theta)$.

Introduciendo D en las ecuaciones 3.34 y 3.35, quedan como sigue:

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z\,(D\,\partial\Theta/\partial z) + \partial k/\partial z \quad \textit{Flujo vertical} \qquad (3.37)$$

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z\,(D\,\partial\Theta/\partial z) \quad \textit{Flujo horizontal} \qquad (3.38)$$

b. Soluciones de la Ecuación de Flujo

La ecuación de flujo es una ecuación diferencial con muchas soluciones, que dependen de

- Condiciones limitantes que rodean el proceso
- Condiciones iniciales del problema

Entre las informaciones del suelo que se debe conocer antes de resolver la ecuación de flujo, están las siguientes:

a) $\Psi = \Psi(\Theta)$. Curva de retención de agua, también llamada de curva característica de humedad del suelo.

b) $k = k(\Theta)$. Conductividad capilar en función del contenido de agua del suelo.

c) $D = D(\Theta)$. Difusividad en función del contenido de agua del suelo, calculada a partir de la relación 3.36 ó determinada experimentalmente usando la ecuación de flujo de calor (Ley de Fourier).

Utilizando datos fidedignos de las relaciones anteriores, los problemas de movimiento de agua pueden ser estudiados en forma analítica. Entre los ejemplos clásicos de solución analítica están los de Gardner (1960) donde describe el movimiento de agua en el suelo hacia las raíces, el de determinación de la conductividad capilar a partir del agua eliminada por muestras de suelo en olla a presión a diferentes presiones (Gardner, 1956), determinación del drenaje fuera de la zona radicular de los cultivos (Black et al., 1970; La Rue et al, 1968).

Por otro lado, Reichardt (1979) describe y analiza en detalles varios casos de aplicación de la ecuación general de flujo en suelos no saturados, como por ejemplo: infiltración horizontal en columnas de suelo, redistribuición del agua en el suelo después de un riego, drenaje fuera de la zona radicular, etc.

Los lectores interesados en estos aspectos deben consultar el libro de Klaus Reichardt (1979), por el carácter didáctico de sus análisis.

También, se pueden encontrar soluciones numéricas a la ecuación de flujo, y en este caso, los datos de la ecuación de flujo se deben transferir a formas finitas (medibles) y los cálculos matemáticos se pueden realizar con microcomputadoras.

La ecuación de flujo para resolución numérica toma la siguiente forma:

$$\Delta\theta/\Delta t = (\overline{D}_1 \Delta\theta_1 - \overline{D}_2 \Delta\theta_2)/(\Delta z)^2 + \Delta k/\Delta z \qquad (3.39)$$

3.6. Movimiento de Agua en Suelos Estratificados.

En suelos estratificados se presenta el problema del flujo de agua a través de diferentes horizontes los cuales tienen diferentes características hídricas.

El movimiento de agua a través de un suelo estratificado se puede describir mediante un balance analítico de la situación del perfil de diferentes camadas de suelo.

Haciendo un balance de agua a un pequeño trozo de volumen (Figura 3.4), se tiene:

Entra – Sale = 0

$$q_z^{01}|_z \, LA \quad - q_z^{01}|_{z+\Delta z} \, LA = 0 \qquad (3.40)$$

Dividiendo por LA Δ Z y tomando el límite como Z se aproxima a cero, se obtiene:

$$dq_z^{01}/dz = 0 \qquad (3.41)$$

Integrando a ecuación 3.41, se obtiene

$q_z^{01} = q_0$ (una constante)

La constante q_0 es la densidad de flujo de agua en el plano $Z = Z_0$.

En condiciones de equilíbrio estático la densidad de flujo de agua en los tres horizontes es la misma. Por lo tanto, se tiene:

$$q_z^{01} = q_z^{12} = q_z^{13} = q_0 \qquad (3.42)$$

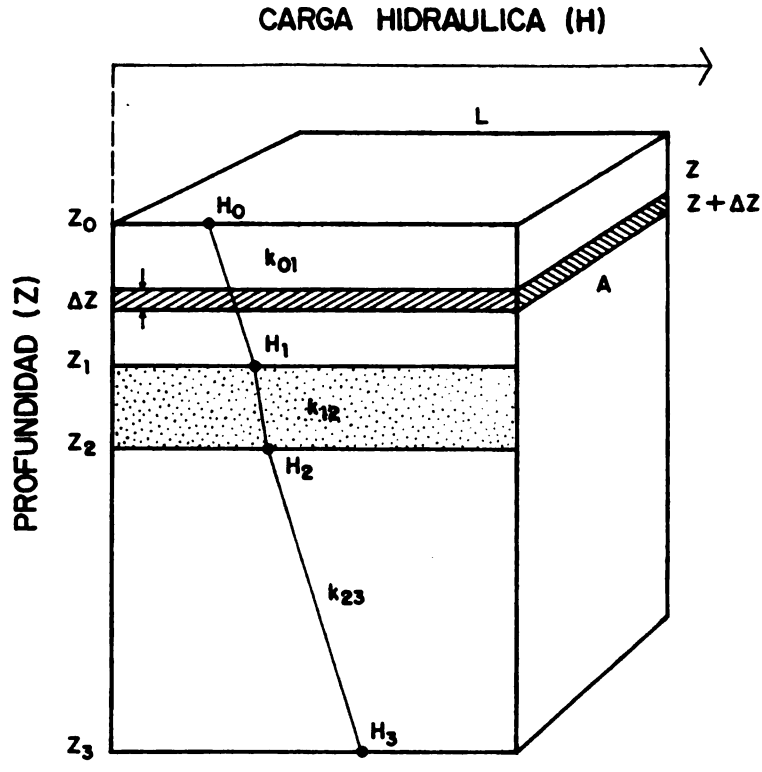


FIGURA 3.4. Perfil de suelo con camadas de diferentes características hídricas.

De acuerdo a la ley de Darcy, para cada horizonte se puede escribir:

$$q_z^{01} = -k^{01} \left(dH^{01}/dZ\right) \qquad (3.43)$$

$$q_z^{12} = -k^{12} \left(dH^{12}/dZ\right) \qquad (3.44)$$

$$q_z^{23} = -k^{23} \left(dH^{23}/dZ\right) \qquad (3.45)$$

Combinando las ecuaciones 3.43, 3.44, y 3.45 con la ecuación 3.42 se obtiene

$$-k^{01}\ (dH^{01}/dZ) = q_0 \tag{3.46}$$

$$-k^{12}\ (dH^{12}/dZ) = q_0 \tag{3.47}$$

$$-k^{23}\ (dH^{23}/dZ) = q_0 \tag{3.48}$$

Considerando las conductividades capilares k^{01}, k^{12} y k^{23} como constantes, e integrando las ecuaciones 3.46, 3.47 y 3.48, se tiene

$$\int_{H_1}^{H_0} dH^{01} = -q_0/k^{01} \int_{Z_1}^{Z_0} dZ;\ H_0 - H_1 = -q_0\ (Z_0 - Z_1)/k^{01} \tag{3.49}$$

De la misma forma se obtiene:

$$H_1 - H_2 = -q_0\ (Z_1 - Z_2)/k^{12} \tag{3.50}$$

$$H_2 - H_3 = -q_0\ (Z_2 - Z_3)/k^{23} \tag{3.51}$$

Sumando las ecuaciones 3.49, 3.50 y 3.51, se obtiene

$$H_0 - H_3 = q_0\ \{(Z_1 - Z_0)/k^{01} + (Z_2 - Z_1)/k^{12} + (Z_3 - Z_2)/k^{23}\} \tag{3.52}$$

También se puede escribir como

$$q_0 = (H_0 - H_3)/\sum_{i=1}^{3} (Z_i - Z_{i-1})/k^{i-1,i} \tag{3.53}$$

Considerando que la ecuación de Darcy expresa:

$$q_0 = Q/A = K\ (H/L) \tag{3.54}$$

y comparando las ecuaciones 3.53 y 3.54 se deduce que

$$k/L = 1/\sum_{i=1}^{3} (Z_i - Z_{i-1}/k^{i-1,i} \qquad (3.55)$$

de donde se obtiene una relación para la conductividad del suelo, $k_{aparente}$ para todo el perfil considerado

$$k_{aparente} = L/\sum_{i=1}^{3} (Z_i - Z_{i-1})/K^{i-1,i} \qquad (3.56)$$

La ecuación 3.53 es útil para el cálculo de la densidad de flujo de agua a través de un perfil de suelo estratificado cuando se conocen las cargas hidráulicas y las conductividades capilares de las diferentes camadas del perfil de suelo.

El término de sumatoria en la ecuación 3.53 se puede considerar como la "resistencia del suelo al flujo de agua", en forma similar a un circuito eléctrico.

El caso de flujo de agua en suelos estratificados es análogo al flujo de corriente a través de un circuito de resistencias en series.

La ley de Ohm expresa que la caída de potencial (voltaje) entre AB (V_{AB}) es proporcional al producto de la intensidad de la corriente (I) y la resistencia (R) entre A y B.

$V_AB = IR = I\,(R_1 + R_2 + R_3)$

$I = V_{AB}/(R_1 + R_2 + R_3) = V_{AB}/R = (V_A - V_B)/R = \Delta V/R$

Similitud entre las leyes de Darcy y Ohm

DARCY (Flujo de agua)		OHM (Flujo de electricidad)
$Q = K\,(\Delta H/\Delta L)\,A$		$I = (1/R)\,\Delta V$
Q	Flujo	I
K	Conductividad	$(1/R) = k = k't\,A/L$
$\Delta H/L$	Gradiente	$\Delta V/L$

donde k es la conductividad del metal y k' es su conductividad específica.

Esta similitud que existe entre el movimiento de agua en suelos (ley de Darcy) y el movimiento de electrones entre dos polos opuestos (ley de Ohm) se emplea a menudo en la solución de problemas de drenaje a través del estudio de analogías eléctricas (Millar, 1978).

3.7. Referencias Bibliográficas.

[1] BAVER, L. D., W. H. GARDNER AND W. R. GARDNER. 1972. Soil Physics. New York, John Willey and Sons, Inc. 498 p.

[2] BLACK, T. A.,W. R. GARDNER AND C. B. TANNER. 1970. Water storage and drainage under a row crop on a sandy soil. Agronomy Journal 62:48–51

[3] DARCY, H. 1856. Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon, p.592. Victor Dalmont, Paris.

[4] GARDNER, W. R. 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20:317–320.

[5] GARDNER, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Sci. 89:63–73.

[6] LARUE, M. E., D. R. NIELSEN AND R. M. HAGAN. 1968. Soil water flux below a ryegrass root zone. Agronomy Journal 60:625–629.

[7] MILLAR, A. A. 1978. Drenagem de terras agrícolas: Bases agronômicas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 276 p.

[8] REICHARDT, K. 1929. Processos de transferência no Sistema Solo-Planta-Atmósfera. São Paulo, Fundacão Cargill. 286 p.

CAPITULO 4

RELACIONES HIDRICAS EN SUELOS

4.1. Suelos Saturados.

Un suelo esta en su condición de saturación cuando todos los espacios porosos estan llenos de agua.

4.1.1. Contenido de Agua

El contenido de humedad de un suelo saturado es igual a la porosidad total del suelo.

4.1.2. Conductividad Hidráulica (K)

Matemáticamente es el factor de proporcionalidad en la Ecuación de Darcy para flujo de agua en suelos saturados. El conocimiento de la permeabilidad o conductividad hidráulica de los suelos es una información vital en estudios de drenaje. Dada su importancia, la información obtenida en condiciónes naturales ("in situ") es de mayor utilidad. Los valores de K son característicos para cada suelo ($K_{arena} > K_{arcilla}$) y dependen de varios factores, entre ellos: material constituyente del suelo o calidad del agua de riego, bloqueamiento de los poros, presencia de microorganismos, población edáfica (lombrices) y homogeneidad del suelo.

En suelos isotrópicos, que tienen las mismas características físicas en el sentido vertical y horizontal, la conductividad hidráulica es igual en ambos sentidos ($K_V = K_H$).

En suelos anisotrópicos, aquellos que tienen diferentes características de textura y estructura en el perfil, la conductividad hidráulica vertical es diferente de la conductividad hidráulica horizontal ($K_V \neq K_H$). La definición de esta situación es de gran importancia para la solución de problemas de drenaje, ya que el espaciamiento de drenes es directamente proporcional al valor de la conductividad hidráulica. Para el lector interesado se recomienda

consultar textos básicos de drenaje, entre otros los siguientes: Luthin (1957), SCS-USDA (1973) y Millar (1978).

La conductividad hidráulica depende de la matriz del suelo, a través de su textura, porosidad, estructura y tamaño y forma de las partículas, y de la viscosidad del fluido. Experimentalmente, se encontró la siguiente relación:

$$K = (k^1 \rho g)/\eta \qquad (4.1)$$

donde k^1 es la propiedad del suelo llamada permeabilidad intrínsica (cm^2), la cual depende del arreglo geométrico de las partículas y de la humedad, que determinan la sección transversal útil para el flujo; ρ es la densidad del fluido (agua) (g/cm^3); g es la aceleración de gravedad (cm/seg^2) y η es la viscosidad del fluido (agua) (g/cm seg).

Como K depende de la geometría del espacio poroso, su valor varía de suelo para suelo, y aún para un mismo suelo con las variaciones de estructura, compactación, etc.

Dada su importancia en la solución de problemas de drenaje, se debe determinar en condiciones naturales. Millar (1978) presenta las metodologías existentes para determinar la conductividad hidráulica en laboratorio y en condiciones de campo, tanto en presencia como en ausencia de napa freática.

4.2. Suelos no Saturados.

4.2.1. Contenido de Agua

El contenido de agua es siempre menor que el valor de saturación. Su valor esta dado por:

$$\Theta = P_T - Y \qquad (4.2)$$

donde Θ es el contenido de agua en volumen, P_T es la porosidad total del suelo y Y es la porosidad vacía (espacio poroso no ocupado con agua).

La porosidad vacía (Y) expresada en porcentaje de humedad en peso seco queda como:

$$Y = (1 - d_a/d_r) - (P_e\ d_a/d_{agua}) \qquad (4.3)$$

donde d_a es la densidad aparente o global del suelo, d_r es la densidad real del suelo y d_{agua} es la densidad del agua. Si se conocen d_a, d_r y P_e se puede calcular Y.

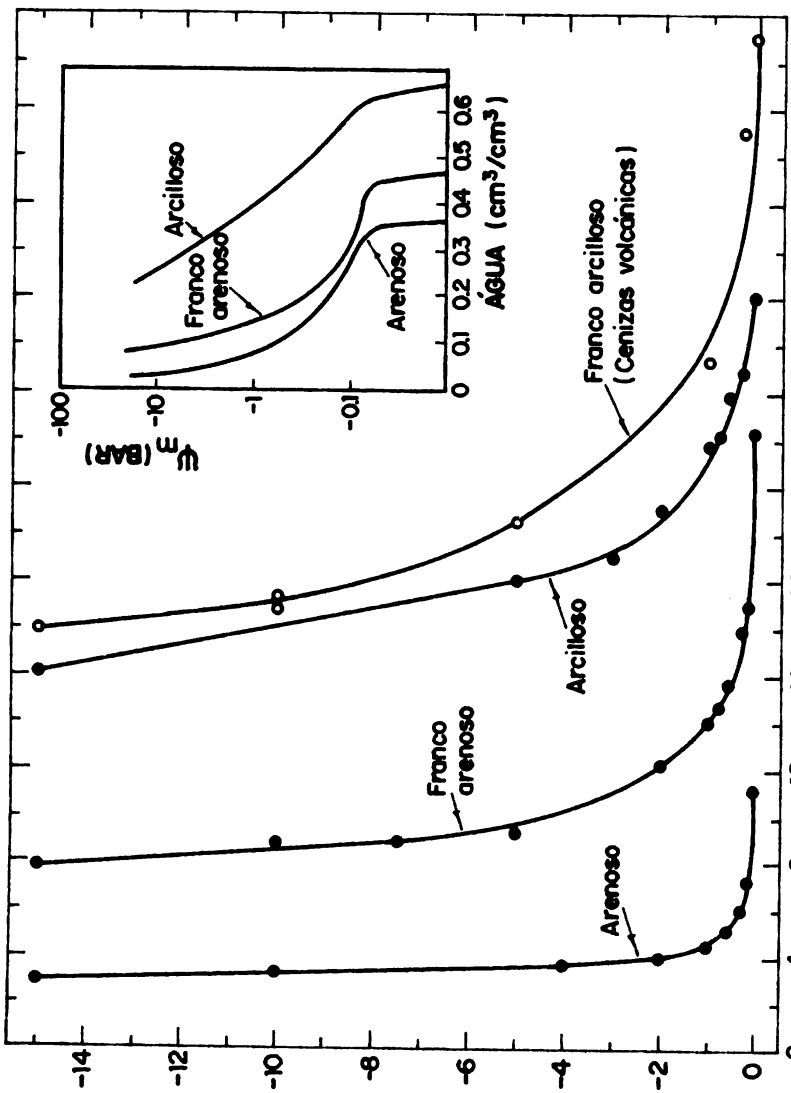


FIGURA 4.1. Curvas de retención de agua de diferentes tipos de suelos.

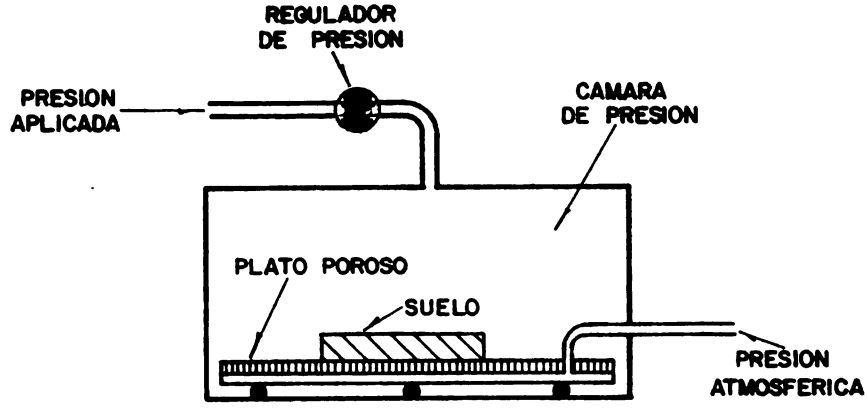


FIGURA 4.2. Esquema del sistema de olla de presión y plato poroso para determinar la retención de agua en muestras de suelo.

En algunos casos, es importante conocer P_s lo cual se puede obtener a partir de la expresión 4.3, quedando como sigue:

$$P_s = d_{agua} \left[(d_r - d_s)/(d_s\, d_r - Y/d_s) \right] \qquad (4.4)$$

Esta es una ecuación muy útil para calcular la cantidad de agua que un suelo puede retener a cualquier porosidad vacía (Y).

En la ecuación 4.2, si Y = 0, entonces P_s corresponde al porcentaje de humedad cuando el suelo está saturado.

Cuando un suelo está a capacidad de campo se tienen valores de Y que van desde 5 a 25%. En suelos de textura media, los horizontes superficiales tienen valores de 20% de porosidad vacía en cambio en el subsuelo encontramos valores de 5-10%, lo que se debe a compactación.

4.2.2. Curva de Retención de Agua

Es el nombre que se da la relación entre el potencial matricial (succión, tensión negativa) y el contenido de agua del suelo. Al gráfico correspondiente también se le denomina "curva característica de humedad" (Figura 4.1).

Las curvas de retención de agua de los suelos, normalmente se obtienen a partir de muestras alteradas sometidas a diferentes succiones, utilizando una olla de presión con platos porosos (Figura 4.2).

La olla de presión, consta de una cámara de presión ligada a la atmósfera por intermedio de una placa porosa, sobre la cual se colocan las muestras de suelo. La parte inferior de la placa porosa se encuentra siempre a presión atmosférica.

La práctica común de utilizar muestras alteradas, exceptuando los suelos no estructurados (arenosos), no representa las características hídricas del suelo en condiciones naturales (Hill y Summer, 1967; Young y Dixon, 1966).La diferencia de densidad aparente entre muestras alteradas y sin alterar es lo suficientemente grande como para causar diferencias apreciables en la retención de agua. Arias y Millar (1973) encontraron que el uso de datos físico-hídricos de muestras alteradas arrojaban láminas de riego 40-100% más altas que las obtenidas con datos físico-hídricos de muestras sin alterar donde se tomaban en consideración las variaciones volumétricas del suelo. En la Figura 4.3 se muestran las curvas de retención para muestras de suelo alteradas y sin alterar y en la Figura 4.4, los cambios de densidad.

En general,se recomienda obtener la información físico-hídrica de los suelos en condiciones que se asemejen más a su condición natural. La curva de retención de agua de los suelos se debe obtener en muestras sin alterar, conservando así la estructura y densidad aparente del suelo.

Obsérvese que los datos de las curvas de retención de agua de la Figura 4.3 estan representados en papel semi-logarítmico, a diferencia de los datos de la Figura 4.1 que están en escala normal.

El gráfico semi-logarítmico es de mayor utilidad en la práctica, especialmente cuando se hace uso de la curva para la conversión de humedad a potencial matricial o vice-versa. La linearización de las curvas permite definir valores de potencial matricial especialmente en la región de inflección de la curva (escala normal).

En la Figura 4.5 se presentan las curvas de retención de agua, en escala semi-logarítmica, de tres suelos de diferente textura.

Las curvas de retención de agua son muy importantes para el manejo del riego de los cultivos. Sin embargo, cuando se presentan en la forma de las Figuras 4.1 y 4.5, son de difícil utilización por el personal de asistencia técnica, debido a los cálculos que se requieren hacer. Millar et al. (1978) sugieren presentar las curvas de retención de agua del suelo relacionando la lámina de reposición con el nivel de restitución del riego y la profundidad del suelo (Figura 4.6) para facilitar el uso de la información hídrica del suelo en el manejo de riego.

Las curvas de retención de agua de los suelos, también, se pueden graficar relacionando la lámina de reposición en función del potencial matricial para

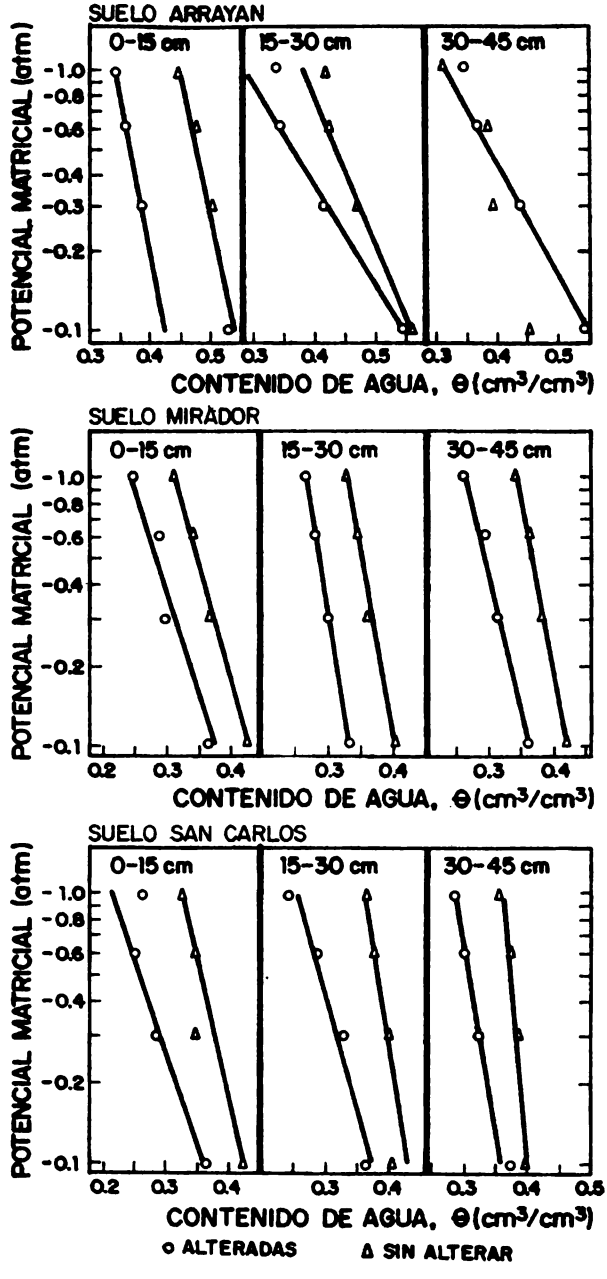


FIGURA 4.3. Curvas de retención de agua en muestras alteradas y sin alterar de los suelos Arrayán, Mirador y San Carlos (Arias y Millar, 1973).

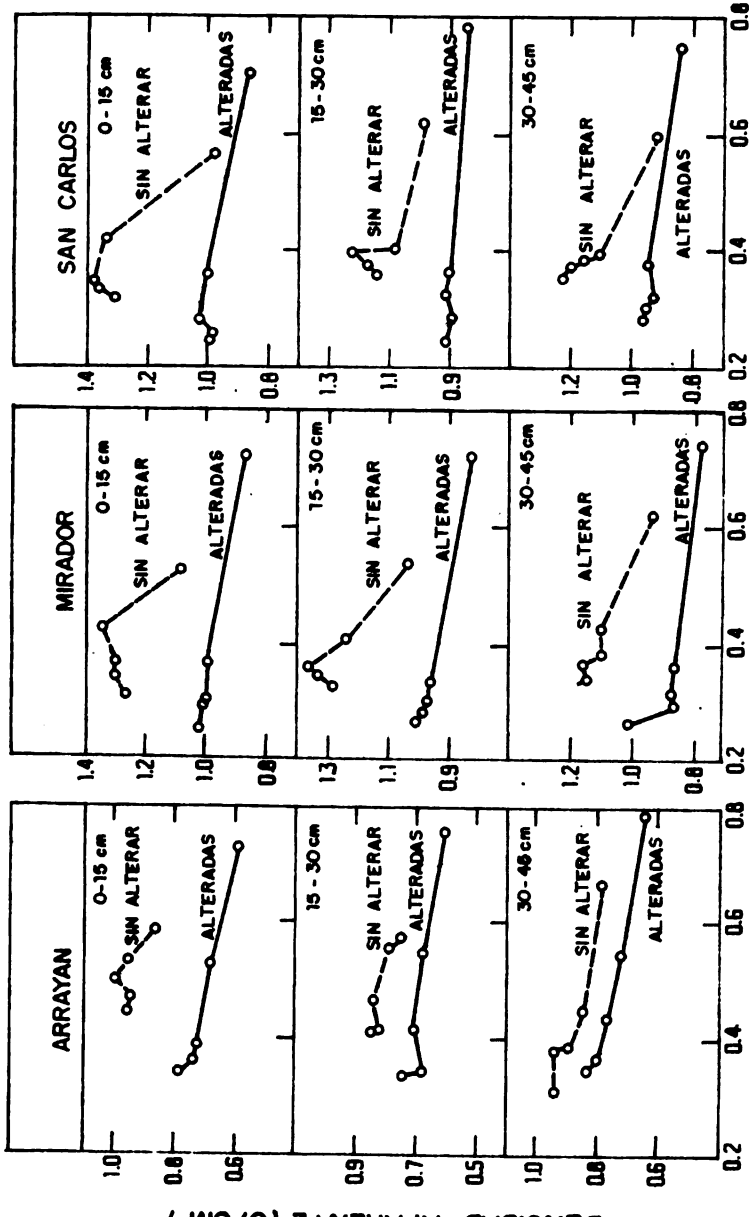


FIGURA 4.4. Variaciones de la densidad aparente con el contenido de agua en muestras alteradas y sin alterar de los suelos Arrayán, Mirador y San Carlos de la zona central de Chile (Arias y Millar, 1973).

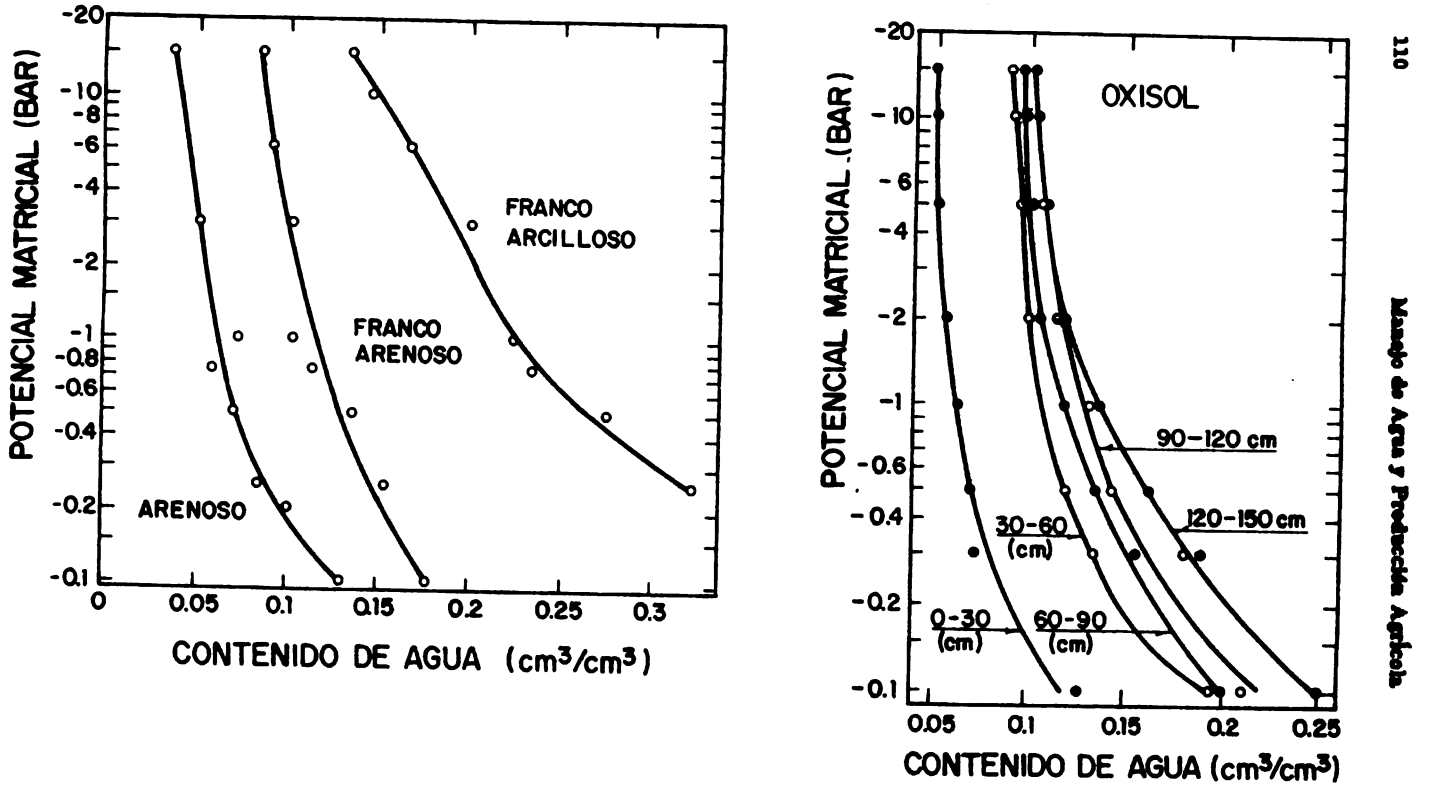


FIGURA 4.5. Curvas de retención de agua de tres suelos de diferente textura (Millar, 1970; Millar y Choudhury, 1980).

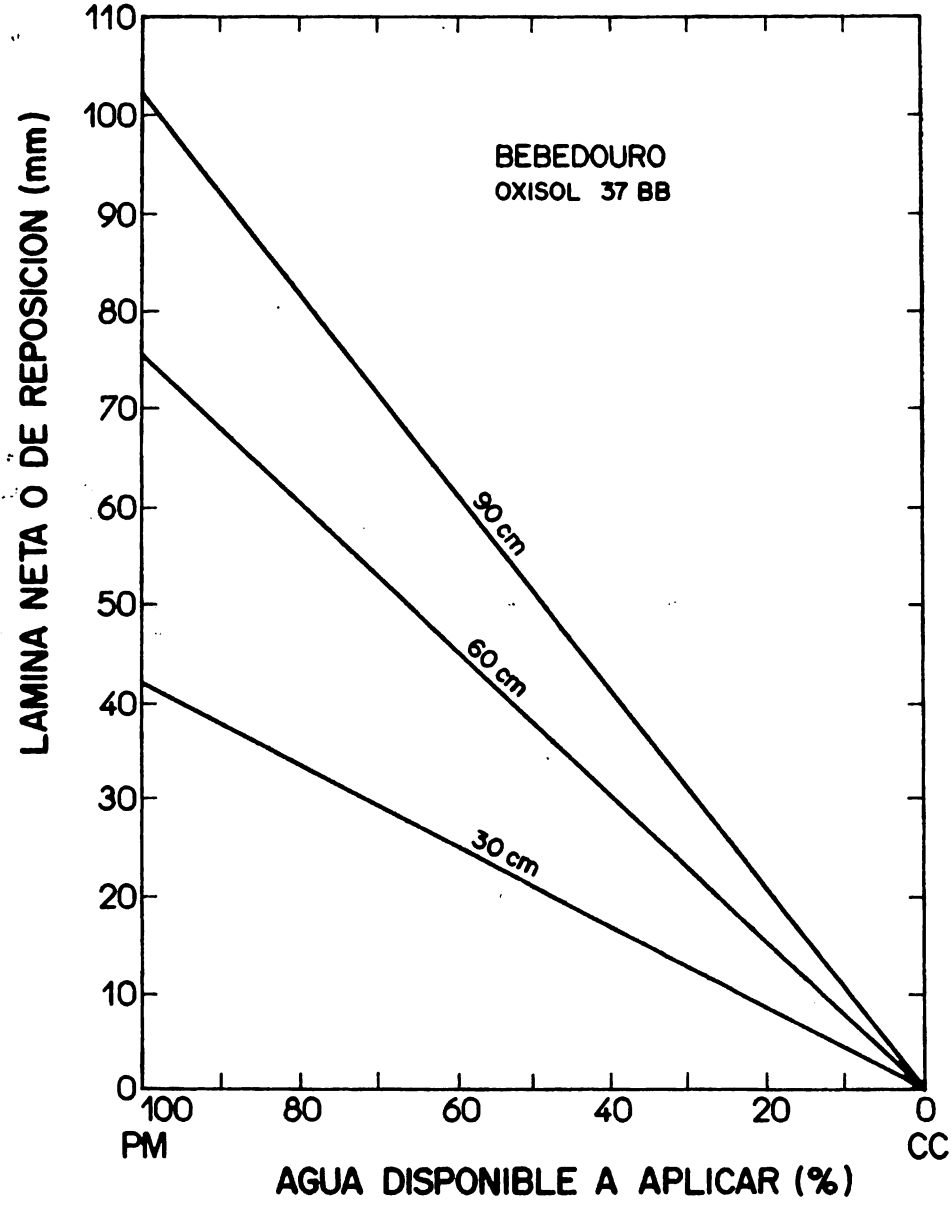


FIGURA 4.6. Lámina de reposición en función del agua disponible a aplicar en un oxisol (Millar et al., 1978).

diferentes profundidades (Figura 4.7). Estas curvas son útiles para definir las láminas de riego para un nivel de manejo, definido en términos de potencial matricial, que corresponde a un nivel de producción. La facilidad de uso y la importancia de este tipo de gráfico para manejo del agua de riego queda en evidencia cuando se usa con la información de productividad de los cultivos, presentada en el Capítulo 10.

4.2.3. Conductividad Capilar (k)

Matemáticamente es el factor de proporcionalidad en la Ecuación de Darcy para flujo de agua en suelos no saturados. Conceptualmente, conductividad capilar es una "densidad de flujo", es decir, la cantidad de agua que atraviesa una sección unitaria de suelo en una unidad de tiempo.

La conductividad capilar es una propiedad hídrica que depende de la humedad del suelo. En la Figura 4.8 se muestra la conductividad capilar de diferentes camadas de un oxisol en función del contenido de humedad. En la Figura 4.9 se muestra la conductividad capilar de tres suelos de diferentes texturas en función del potencial matricial (Gardner, 1960).

Para la mayoría de los suelos, la conductividad capilar se puede relacionar con el potencial matricial (succión) mediante la siguiente expresión empírica:

$$k = a/(\psi_m^n + b) \qquad (4.5)$$

donde k es la conductividad capilar (cm/día), ψ_m es el potencial matricial (succión) (cm de agua) y a,b,n son constantes.

Cuando $\psi_m = 0$, el suelo está en su condición saturada y la expresión 4.5 se reduce a $k = a/b$, la cual representa el valor de la conductividad hidráulica.

El valor de n varía entre 1,5 para arcilla y 4 para arena gruesa. Las unidades de las constantes son:

$$a = cm^{n+1}/día$$

$$b = cm^n$$

$$n = adimensional$$

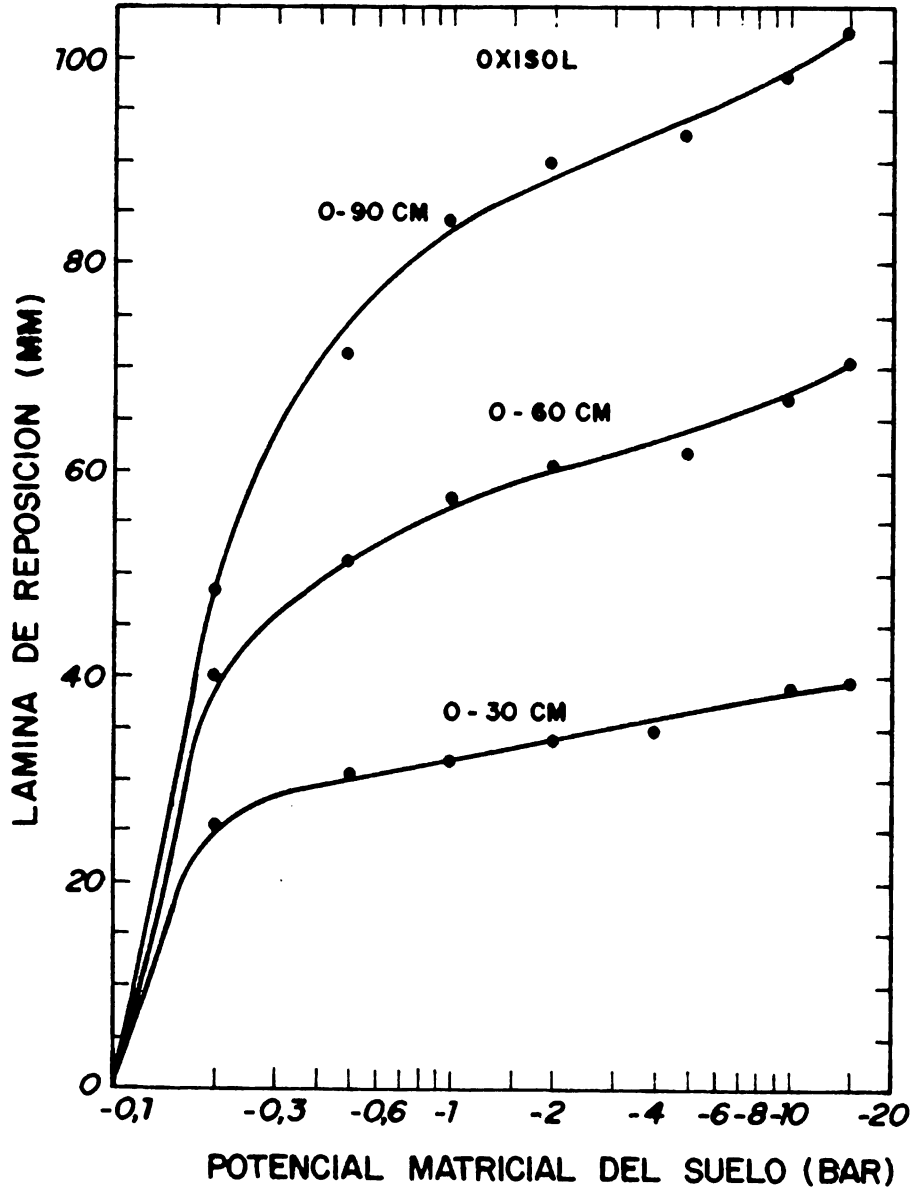


FIGURA 4.7. Lámina de reposición en función del potencial matricial para diferentes profundidades de un oxisol.

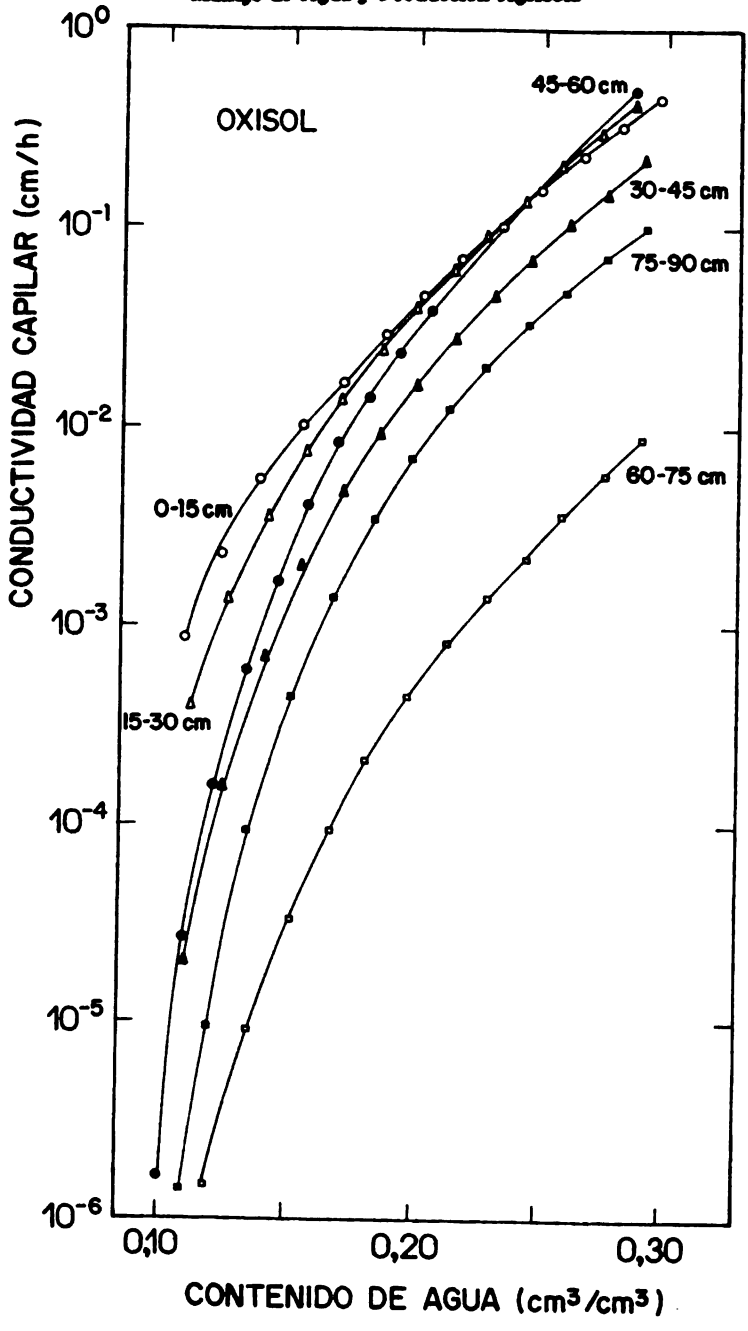


FIGURA 4.8. Conductividad capilar en función del contenido de agua de diferentes camadas de un oxisol (Carvallo y Azevedo, 1975).

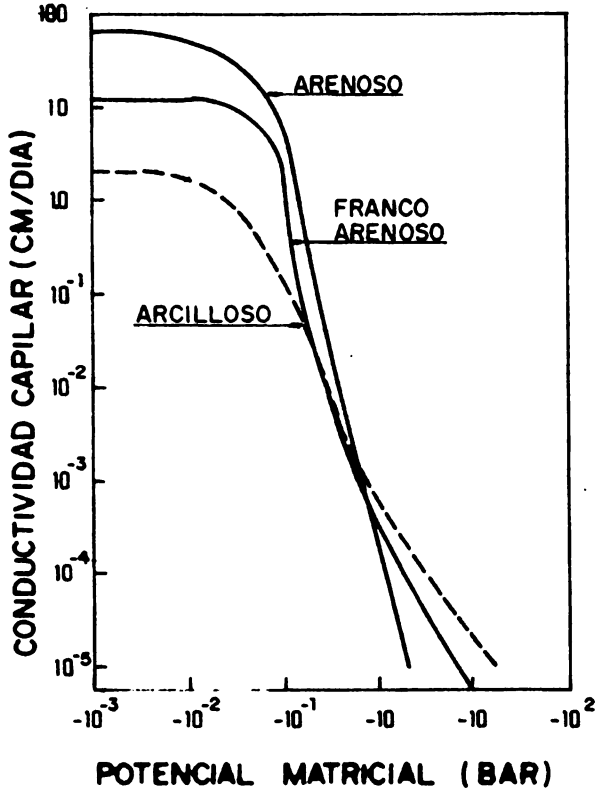


FIGURA 4.9. Conductividad capilar de tres suelos en función del potencial matricial (Gardner, 1960).

4.2.4. Tasa de Drenaje

En suelos isotrópicos que drenan monotónicamente es de gran importancia práctica conocer la relación que existe entre la tasa de drenaje fuera de la zona radicular y el agua almacenada en el perfil de suelo. Esta relación es muy útil en la determinación de balances de agua en suelos de riego y en el conocimiento de la lixiviación de nutrimentos del suelo (Millar et al., 1972).

En suelos estratificados no puede utilizarse satisfactoriamente debido a que las estratas impiden el drenaje natural.

La relación toma una forma similar a la relación entre conductividad

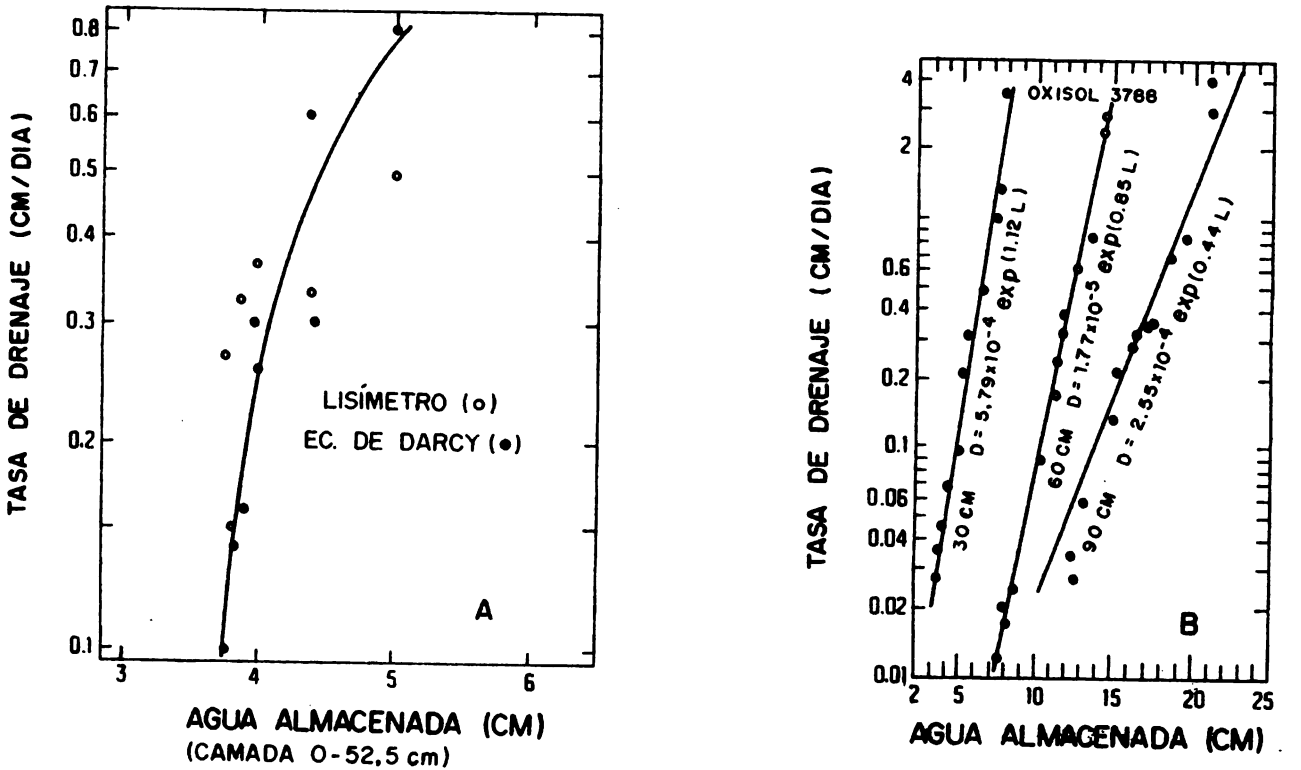


FIGURA 4.10. Tasa de drenaje en función de la lámina de agua almacenada en el perfil del suelo (Millar et al., 1971; Choudhury y Millar, 1983).

capilar y contenido de agua. En la Figura 4.10 se presenta la relación anterior para un perfil de textura arenosa de 52,5 cm de profundidad.

Otra información de gran importancia es la tasa de drenaje de un perfil de suelo en función del tiempo después de aplicado riego, para diferentes patrones de extracción de agua (Figura 4.11).

4.2.5. Difusividad (D)

La difusividad de agua del suelo queda definida por el producto de la conductividad capilar por la pendiente de la curva característica de humedad.

$$D = -k\,(d\psi_m/d\theta) \qquad (4.6)$$

donde D es la difusividad (L^2/T), k es la conductividad capilar (L/T), ψ_m es el potencial matricial o succión, θ es el contenido volumétrico de agua del suelo y $d\psi_m/d\theta$ es la pendiente de la curva de retención de humedad del suelo.

De lo anterior se deduce que la relación entre difusividad y el contenido de humedad se puede obtener utilizando la curva de retención de agua del suelo y la curva de conductividad capilar en función del contenido de agua del suelo. Utilizando este procedimiento, Gardner (1960), obtuvo la difusividad en función del contenido de humedad del suelo para los mismos suelos de la Figura 4.9. Las curvas de difusividad se muestran en la Figura 4.12.

Se ha encontrado que una función exponencial relaciona adecuadamente los datos de difusividad y de contenido de humedad, como sigue (Gardner, 1965):

$$D = D_o \exp \beta(\theta - \theta_o) \qquad (4.7)$$

donde D_o es la difusividad al contenido de humedad θ_o, y β es un parámetro del suelo.

4.2.6. Perfiles de Humedad y de Carga Hidráulica

Este tipo de información es particularmente importante en la determinación de balances de agua. Para este fin, los perfiles deben ser obtenidos en función del tiempo.

La Figura 4.13 muestra la variación del contenido de agua con la profundidad y en función del tiempo. De este tipo de gráfico se puede obtener información como la siguiente:

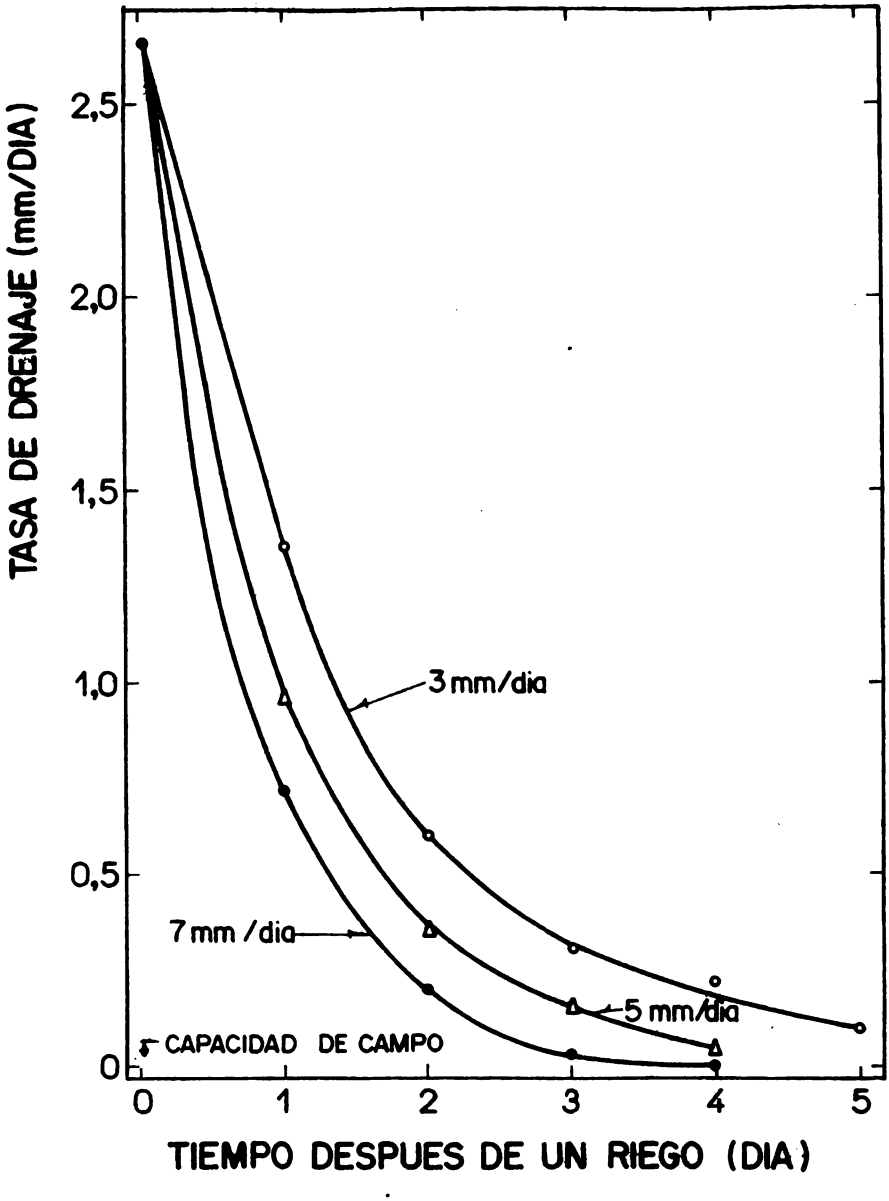


FIGURA 4.11. Tasa de drenaje en función del tiempo después de un riego, para diferentes padrones de extracción de agua (Millar et al., 1975).

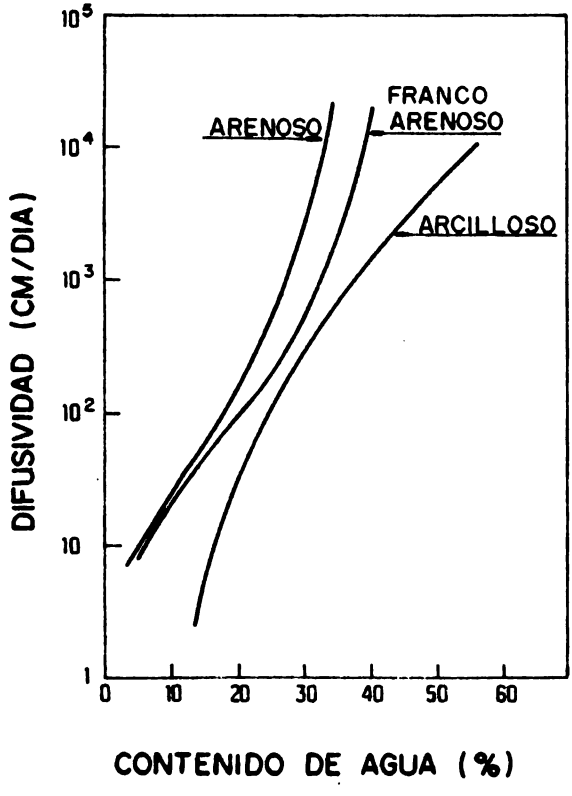


FIGURA 4.12. Difusividad en función del contenido de agua para suelos de textura arenosa, franco-arenosa y arcillosa (Gardner, 1960).

- Cuantificación de la extracción de humedad por los cultivos.
- Por inspección de las curvas se puede conocer si existe o no un componente de drenaje.
- Indica la presencia de cualquier variación textural del perfil.

En la Figura 4.14 se muestra la variación de cargas hidráulicas con la profundidad y en función del tiempo, en ausencia de evaporación. Esta información permite conocer el gradiente en cualquier punto del perfil y si se conoce la conductividad del horizonte correspondiente se puede obtener la densidad de flujo.

En la Figura 4.15 se muestra el mismo tipo de información, sólo que en

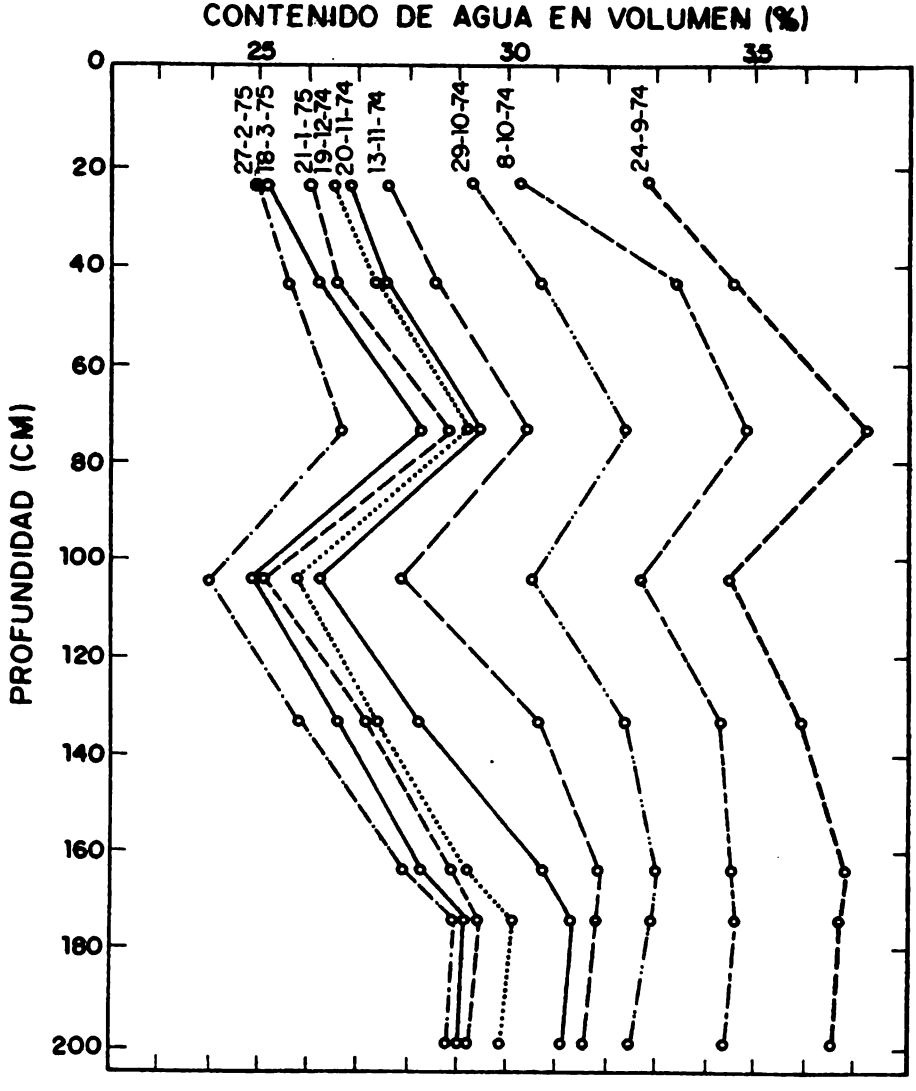


FIGURA 4.13. Variación en el contenido de agua en el suelo de un viñedo sometido a cultivo tradicional (Román et al., 1973).

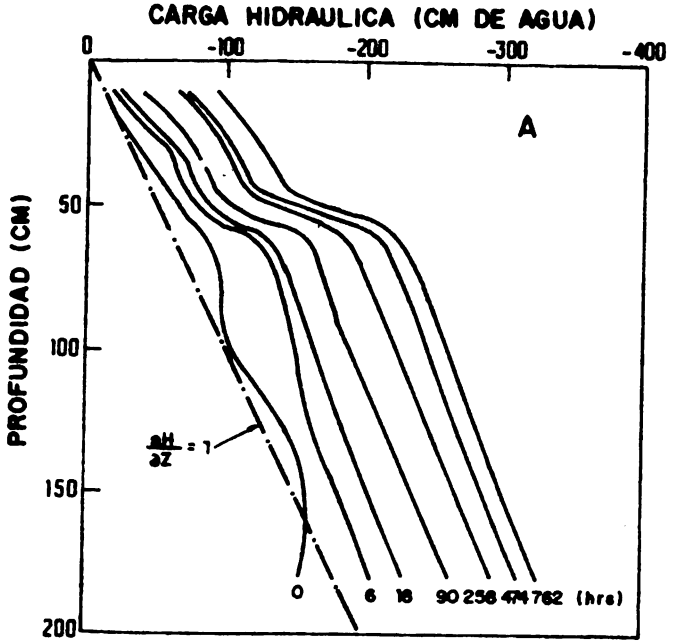


FIGURA 4.14. carga hidráulica en función de la profundidad y tiempo durante el proceso de drenaje interno de un perfil de suelo (Reichardt y Libardi, 1974).

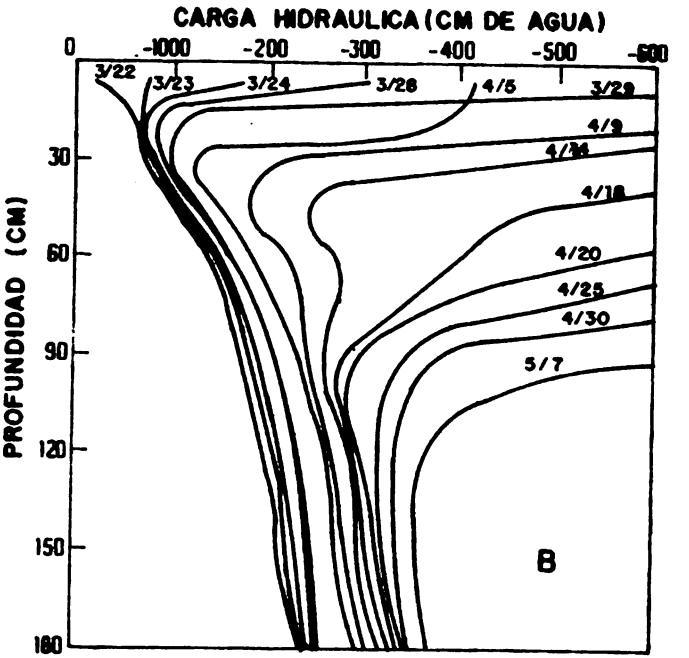


FIGURA 4.15. Variación de la carga hidráulica en función de la profundidad y del tiempo en un perfil de suelo con cultivo de frijol (Reichardt et al., 1974).

este caso existe extracción de agua del perfil de suelo mediante evapotranspiracion de un cultivo de frijol.

4.3. Disponibilidad de Agua del Suelo Para las Plantas.

Por mucho tiempo, se consideró que el almacenamiento y disponibilidad de agua para las plantas dependía exclusivamente de las propiedades del suelo. Otras informaciones permitieron definir la existencia de otros factores, de planta y climáticos, que tienen una importancia en la disponibilidad de agua para las plantas.

Jamison (1955) resumió los factores que afectaban la disponibilidad de agua para las plantas, los cuales agrupó de la siguiente manera:

Factores de la Planta.

a. Condiciones de la planta (incluyendo nutrición, estado de crecimiento, grado de turgescencia).

b. Hábito de enraizamiento (incluyendo profundidad radicular, grado de ramificación y actividad absortiva).

c. Resistencia de la planta a la sequía.

Factores del Suelo.

a. Relación humedad-potencial
b. Efecto de la presión osmótica de la solución del suelo.
c. Tipo de iones presentes en la solución del suelo.
d. Conductividad capilar
e. Profundidad del suelo
f. Estratificación del suelo, incluyendo horizontes compactados y texturales
g. Temperatura y gradientes de temperatura del suelo.

Factores Climáticos.

a. Evapotranspiración. Influencia de radiación, temperatura del aire, humedad del aire, viento, luz (demanda atmosférica).

A partir de la información de retención de humedad por el suelo, se ha definido un rango de disponibilidad de agua para las plantas con un límite superior y uno inferior. Al rango de humedad entre estos límites, se le denomina Humedad Aprovechable, Agua Util o Agua Disponible.

Al límite superior del rango se le conoce como "capacidad de campo" y al límite inferior como "punto de marchitez permanente".

4.3.1. Límite Superior de Disponibilidad de Agua

Capacidad de campo (CC)

Usualmente se define capacidad de campo como "el contenido de agua del suelo después que el exceso de agua gravitacional ha drenado y la tasa de movimiento vertical es practicamente nula" (Gardner, 1965; Wilcox, 1962).

En otras palabras, la definición expresa que cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, la conductividad capilar sería prácticamente cero.

Desde el punto de vista práctico, el término ha encontrado aceptación, pero al inspeccionar la Ecuación General de Flujo (Ecuación 3.12) que describe el movimiento de agua en suelos no saturados se observa que la definición implica

$$\partial\theta/\partial t = 0 \quad (no\ hay\ drenaje)$$

Continuando con la inspección matemática deducimos que, debido a lo anterior, k = 0, lo que en la práctica no ocurre. Es decir, el suelo continua drenando, a una tasa menor, en todo el rango no saturado.

Por otra parte, en la definición original, se supone que CC es una función sólo del suelo, haciendo total abstracción de la planta o de la evapotranspiracion.

Wilcox (1962) considera que la definición de CC no describe completamente el límite superior de disponibilidad de agua, proponiendo el concepto siguiente: "El límite superior de disponibilidad de agua es el contenido más alto de humedad que incluye toda el agua disponible para evapotranspiración y todo el drenaje fuera de la zona radicular". Se ha encontrado que este concepto de capacidad de campo difiere tanto en teoría como en la práctica, porque no toma en cuenta la evapotranspiración antes que se obtenga dicho límite.

Según Wilcox (1962), el uso consuntivo previo al punto de capacidad de campo es parte del verdadero límite de disponibilidad de agua.

Las implicancias del concepto de capacidad del campo con la demanda impuesta por la atmósfera se discute en el capítulo de evapotranspiración y los factores que la afectan.

4.3.2. Límite Inferior de Disponibilidad de Agua

Punto de Marchitez Permanente (PMP)

El sistema suelo-agua-planta es un sistema dinámico en el cual el agua en la planta rara vez se encuentra en equilibrio con el agua del suelo.

Para que la planta pueda extraer agua del suelo, el potencial de agua de la planta debe ser menor que el potencial de agua en el suelo. La diferencia en energía entre el agua de la planta y del suelo depende de la tasa de absorción de agua desde el suelo y de las propiedades conductoras del suelo y de la planta. En el rango de marchitez, la recuperación de los déficits de agua depende principalmente de la conductividad capilar del suelo.

El aparecimiento de signos visibles de marchitez es una manifestación de la inhabilidad del sistema de abastecimiento de agua a la planta para cumplir la demanda impuesta por la atmósfera.

Se ha encontrado que el contenido de humedad del suelo al cual las plantas presentan marchitez permanente se correlaciona adecuadamente con el contenido de agua retenido a −15 bares de potencial matricial. Este contenido de humedad se considera como el límite inferior de disponibilidad de agua para las plantas y se le denomina "punto de marchitez permanente".

Slatyer (1967) critica el concepto de punto de marchitez permanente, como una constante del suelo. Básicamente, Slatyer (1967) expresa que la marchitez ocurre por la pérdida de turgescencia de las hojas y que el punto de potencial de presión igual a cero, asociado a marchitez, es dependiente de las características osmóticas de la hoja. A medida que disminuye el contenido y potencial de agua de la hoja, decrece la turgencia de la hoja, y dependiendo de la relación volumen celular/potencial de presión y de las características de la hoja, esta puede tomar, gradualmente el aspecto de marchita.

Las hojas están completamente marchitas cuando se llega al punto de potencial de presión igual a cero ($\psi_p = 0$) y $\psi = -\psi_\pi$.

Slatyer (1967) propuso que sólo en el punto donde $\psi = -\psi_\pi$, y cuando $\psi = \psi_{raíz} = \psi_{suelo}$, entonces la planta estaría en el estado de marchitez permanente y el contenido de agua en el suelo sería el porcentaje de marchitez permanente".

El contenido de agua en el suelo al cual se presenta la marchitez permanente no representa el verdadero límite de disponibilidad de agua para las plantas, puesto que no define algunos procesos de la planta. Gardner y Nieman (1964) encontraron que medidas de transpiración, división celular y crecimiento celular muestran que ningún límite inferior de disponibilidad define a los tres procesos anteriormente mencionados.

Un análisis matemático de Philips (1957) demuestra que el contenido de agua al cual las plantas se marchitan depende de la tasa de transpiración, la extensión del sistema radicular, la difusividad del agua del suelo, y un potencial de agua característico, al cual aparecen los síntomas de marchitez.

A pesar que desde el punto de vista físico existen diferencias de interpretación de las constantes hídricas del suelo, desde el punto de vista práctico continúan siendo conceptos útiles y de fácil aplicación.

4.4. Referencias Bibliográficas.

[1] ARIAS, ENRIQUE y A. A. MILLAR. 1978. Relaciones hídricas de tres suelos regados de la zona Central de Chile. Turrialba 23(3): 275–283.

[2] CARVALLO, H. e H. AZEVEDO. 1975. Determinacão da condutividade capilar en funcão de conteúdo de água através das curvas de retencão. Fortaleza, CE, III Seminario Nacional de Irrigacão e Drenagem. 20 p.

[3] CHOUDHURY, E. N. e A. A. MILLAR. 1983. Retencão e movimiento de agua en Latosolo Vermelho–Amarelo irrigado de Petrolina (PE). Revista Brasileira de Ciência do Solo 7:21–26.

[4] GARDNER, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Science 89(2):63–73.

[5] GARDNER, W. R. 1965. Dynamic aspects of soil-water availability to plants. Annual Review of Plant Physiology 16:323–342.

[6] GARDNER, W. R. 1960. Soil water relations in arid and semi-arid conditions. UNESCO Arid Zone Research 15:3-27 (Symposium on Plant-water relationships in arid and semi-arid conditions).

[7] GARDNER, W. R. 1965. Rainfall, runoff and return. Meterological Monographs 6(28):133–148.

[8] GARDNER, W. R. AND R. H. NIEMAN. 1964. Lower limit of water availability to plants. Science 143(3613):1460–1462.

[9] HILL, J. N. AND M. E. SUMMER. 1967. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils. Soil Science 4:234–238.

[10] JAMISON, V.C. 1956. Pertinent factors governing the availability of soil moisture to plants. Soil Science 81:459–471.

[11] MILLAR, A. A., 1970. Internal water status and water transport in seed onion plantas. Madison, Wisconsin, University of Wisconsin. 50 p. (Ph.D Thesis).

[12] MILLAR, A. A., W. R. GARDNER AND G. WEISS. 1971. Water regimes of a sandy soil under row crops.Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin, 15 p. (Unpublished).

[13] MILLAR, A. A., N. DUARTE y E. RIQUELME. 1972. Movimiento de nitratos en un suelo derivado de cenizas volcánicas. Turrialba 25(2):139-143.

[14] MILLAR, A. A. 1972. Water balance of natural site in the Lake Wingra Basin. Progress Report, International Bilogical. Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin, 11p. (Biome Abstract 2(1):423, 1972).

[15] MILLAR, A. A. 1978. Drenagem de terras agrícolas: Bases agronômicas. São Paulo, Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda. 276 p.

[16] MILLAR, A. A., J. R. PEREIRA e F. LOPES FILHO 1975. Efeito da irrigação no movimento de nitratos em um latossolo. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem, III:342-352.

[17] MILLAR, A. A., H. M. de AZEVEDO e E. L. DE POSSIDIO. 1978. Metodología para adequação de parâmetros do método de irrigação por sulcos para uso pela assistência técnica. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 13(2):75-82.

[18] MILLAR, A. A. AND E. N. CHOUDHURY. 1980. A model to define operational irrigation frequency for maximum yield of crops. Turrialba 30(4):391-398.

[19] PHILIPS, J. R. 1957. The physical principles of soil water movement during the irrigation cycle. International Congress on Irrigation and Drainage, Proceeding 3rd, 8:125-154.

[20] REICHARDT, K AND P. L. LIBARDI. 1974. An analysis of soil water movement in the field: I Hidrological field site characterization. São Paulo, CENA/ESALQ/USP. 21p. (Boletim Científico N' 21).

[21] REICHARDT, K, P.L. LIBARDI AND J.M. dos SANTOS. 1974. An analysis of soil water movement in the field: II. Water balance in a snap bean crop. São Paulo, CENA/ESALQ/USP. 19 p. (Boletim Científico N' 22).

[22] ROMAN, C., B. FERNANDEZ y A. A. MILLAR. 1979. Evapotranspiración de viñedos de secano sometidos a dos sistemas de manejo. Ciencia e Investigación Agraria (Chile).

[23] SLATYER, R. O. 1967. Plant-water relationships. New York, Academic Press Inc. p. 274-282.

[24] WILCOX, J.C. 1962. Rate of soil drainage following irrigation. III. A new concept of upper limit of available moisture. Canadian Journal of Soil Science 42:122–128.

[25] YOUNG, K. K. AND J. D. DIXON. 1966. Overestimation of water content at field capacity from sieved sample data. Soil Science 101:104–107.

CAPITULO 5

DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD CAPILAR DEL SUELO

La caracterización de las propiedades transmisoras de agua de los suelos en su condición natural es un requisito necesario para la descripción cuantitativa del papel que juega el perfil del suelo en el ciclo hidrológico.

Por otra parte, la solución de muchos problemas asociados con el movimiento de agua en el suelo dependen del conocimiento de las características transmisoras, especialmente la conductividad capilar.

Hasta ahora no se dispone de un método universal confiable para obtener la conductividad capilar a partir de medidas físicas tales como tamaño de las partículas o distribución del tamaño de poros. Por lo tanto, se debe obtener a través de medidas experimentales.

Existen varios métodos que se han propuesto para medir la conductividad capilar (Klute, 1965; Young, 1964; Bouma et al., 1971; Davidson et al., 1969), de los cuales se deben preferir los métodos "in situ" en atención a su aplicabilidad directa a la solución de problemas de campo.

Actualmente se dispone de métodos satisfactorios para medir la conductividad hidráulica "in situ" bajo condiciones saturadas, tanto abajo como encima de la napa freática (Millar, 1978/1989).

Sin embargo, en muchos casos, el régimen de flujo es en suelos no saturados. En la presencia de una capa retardadora en la superficie, o cuando las precipitaciones son bajas, el perfil del suelo nunca llega a estar saturado durante la infiltración, y el flujo de agua depende, principalmente de la conductividad capilar, la cual es función del contenido de agua del suelo y del potencial matricial.

A continuación se discuten varios métodos de uso en el laboratorio y en el campo para la determinación de la conductividad capilar.

5.1. Método Basado en las Propiedades del Suelo.

Child y Collis-George (1950) demostraron que la conductividad capilar de un suelo arenoso se podía calcular a partir de la curva de retención de humedad cuando convertida a la distribución del tamaño de poros. El cálculo se basa en que cada poro puede ser caracterizado por un radio efectivo para flujo, el cual se puede substituir en la ecuación de Hagen-Poiseuille para flujo a través de un tubo capilar. La conductividad está dada por la suma de todas las contribuciones de las diferentes clases de poros convenientemente agrupadas.

Marshall (1962) mejoró la técnica de computación para obtener su aplicación en suelos francos y arcillosos. La conductividad, en unidades en cm/seg, se puede calcular mediante la siguiente relación (Marshall, 1962).

$$K = (2{,}7 \times 10^{2})\ E^{2}\ n^{-2}[h_1^{-2} + 3\ h_2^{-2} + 5\ h_3^{-2} + ... + (2\ n - 1)h_n^{-2}] \quad (5.1)$$

donde E es la porosidad, h_1 a h_n son las succiones características (cm de agua) a las cuales los poros de 1a., 2a., 3a., etc. clase se vacían del agua, y n es el número total de las clases.

5.2. Método de la Extracción del agua (Plato Poroso).

Este método fue descrito por Gardner (1956), y hace uso del equipo de platos porosos y olla de presión con que normalmente se obtienen las curvas de retención de humedad de los suelos, lo cual se explicó en el Capítulo 4.

El método consiste en utilizar muestras de suelo sin alterar las cuales se montan sobre el plato poroso correspondiente, y se somete a saturación. Luego se aplican incrementos de presión, de aproximadamente 0,1 bar, partiendo desde saturación. Se mide el agua extraída de la muestra en función del tiempo y utilizando una solución de la ecuación de flujo, se calcula la conductividad capilar para cada intervalo de presión.

Este método se basa en dos suposiciones las cuales se cumplirían durante el proceso de extracción de agua. Ellas son:

- La conductividad capilar es aproximadamente constante en el intervalo de presión.
- La relación entre el contenido de agua y la succión es lineal.

Para cumplir con estas suposiciones se usan pequeños incrementos de presión, que en la práctica se reduce a utilizar aproximadamente 0,1 bar.

Análisis y cálculo

Gardner (1956) usó la serie de Fourier y encontró la siguiente solución a la ecuación de flujo:

$$Q(t) = Q_\infty \left[1 - 8/\pi^2 \sum_{n=1}^{\infty} 1/n^2 \; exp\,(-\alpha^2 \, Dt)\right] \qquad (5.2)$$

donde

Q = Agua extraída en el tiempo t dentro del intervalo de presión.
Q = Total de agua extraída en el intervalo de presión.
n = Enteros impares [1, 3, 5, 7, ... ,(2n-1)]
$\alpha = n\pi/2L$
L = Altura de la muesta
D = Difusividad

Considerando sólo el primer término de la serie, (n=1), se obtiene:

$$Q(t) = Q_\infty \; [1 - 8/\pi^2 \;\; exp\,(-\alpha^2 \, Dt)] \qquad (5.3)$$

Rearreglando términos se obtiene

$$Q(t) = Q_\infty - (8Q_\infty/\pi^2) \; e^{-\alpha^2 \, Dt} \qquad (5.4)$$

$$Q_\infty - Q = 8Q_\infty/\pi^2 \;\; e^{-\alpha^2 \, Dt} \qquad (5.5)$$

Aplicando logarítmo natural a cada miembro de la ecuación 5.5 se tiene:

$$ln\,(Q_\infty - Q) = ln\,(8Q_\infty/\pi^2) - (\alpha^2 \, D)t \qquad (5.6)$$

La ecuación 5.6 se puede usar para determinar la difusividad a partir de datos experimentales.

Si se coloca la información experimental en un papel semi-logarítmico en que $(Q_\infty$-Q) va en la ordenada (escala logarítmica) y el tiempo t en la abcisa, se obtiene un gráfico similar al de la Figura 5.1.

Con los datos de la Figura 5.1 se obtiene una línea recta donde:

Pendiente, B $= \alpha^2 \, D$
Intercepción $= (8Q_\infty/\pi^2)$

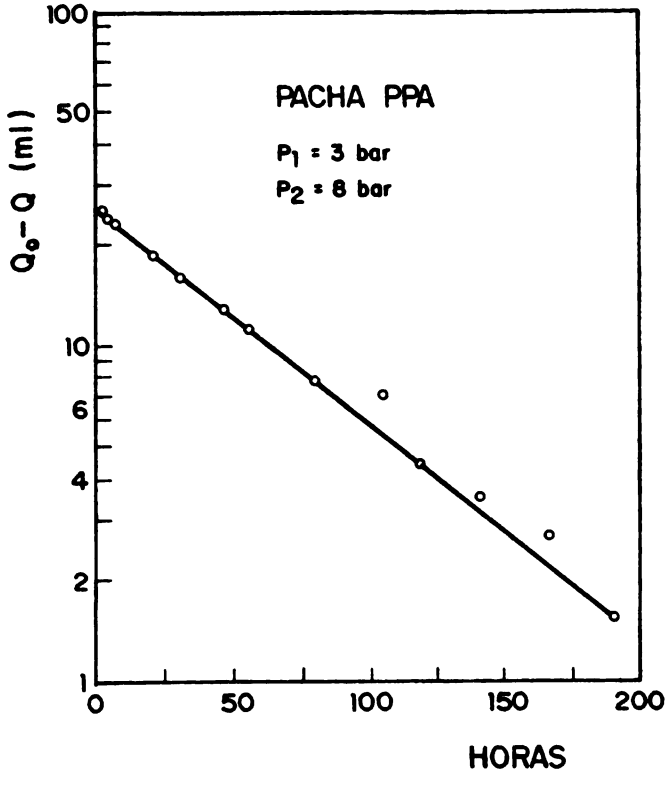


FIGURA 5.1. Variación del agua extraída de una muestra de suelo en función del tiempo (Gardner, 1956).

De esta información, se obtiene la difusividad:

$$D = B/\alpha^2 \tag{5.7}$$

donde B es la pendiente de la recta y $\alpha = \pi/2L$.

La conductividad capilar en el intervalo de presión se calcula mediante la siguiente expresión:

$$k = (B\, Q_o\, \rho_g)/(V\, \Delta P\, \alpha^2) \tag{5.8}$$

donde ρ es la densidad aparente del suelo (g/cm^3), g es la aceleración de gravedad (cm/seg^2), V es el volumen de la muestra (cm^3) y ΔP es el intervalo de presión ($dinas/cm^2$). Si, además de las unidades anteriores, se expresa B en dia^{-1}, Q_o en cm^3 y α^2 en cm^{-2}, entonces las unidades de conductividad capilar son cm/día.

Hay varios autores que han tratado de mejorar el método de Gardner (1956), introduciendo variaciones en el tratamiento u obtención de la información con el objeto de tomar en consideración la impedancia del plato poroso al flujo de agua (Rijtema, 1959; Miller y Elrick, 1958; Kunze y Kirkham, 1962; Collis - George y Rosenthal, 1966; Jackson et al., 1963).

5.3. Método del Flujo Constante.

El método basado en la extracción de agua mediante olla a presión demanda considerable tiempo para obtener la conductividad capilar en función del contenido de humedad, en atención a que se deben usar pequeños incrementos de presión y la obtención de equilibrio estático para cada intervalo.

El método del flujo constante reduce el tiempo de determinación, y además permite la obtención de una gran cantidad de informaciones sobre las relaciones entre conductividad capilar, difusividad y contenido de agua o potencial matricial.

Este método está basado en la solución de la ecuación de flujo para flujo constante en un extremo de una muestra de suelo (Gardner y Miklich, 1962). La suposición que se hace es que la evaporación (densidad de flujo q) debe ser pequeña para que la conductividad capilar no varíe a lo largo de la muestra.

Experimentalmente, se utiliza una columna corta de suelo, aproximadamente 10 cm, la cual sólo puede evaporar por un extremo. Se colocan dos tensiómetros de diámetro pequeño cerca de cada extremo de la muestra, los cuales se conectan a manómetros de mercurio.

La muestra se satura y luego se controla la evaporación en el extremo abierto mediante planchas perforadas a fin de evitar diferencias demasiado grandes entre los potenciales matriciales (succiones) de ambos extremos de la columna.

En la Figura 5.2 se muestra un diagrama esquemático del sistema que se utiliza para determinar la conductividad capilar.

Todo este sistema debe ser montado sobre una balanza con el objeto de determinar las pérdidas de agua, mediante evaporación, en función del tiempo. Junto con determinar las variaciones de peso del sistema, por lo tanto cambios en contenido de agua, se miden las succiones de cada tensiómetro.

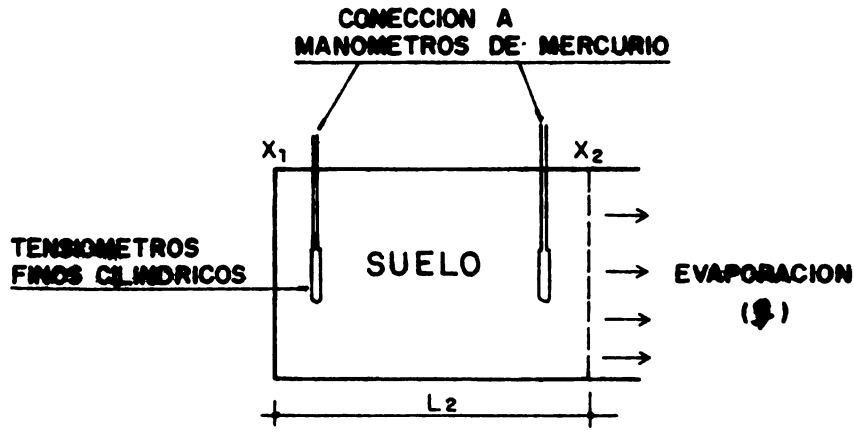


FIGURA 5.2. Diagrama esquemático del sistema para determinar la conductividad capilar por el método del flujo constante.

Según derivación efectuada por Gardner y Miklich (1962), la diferencia en potencial matricial (succión) entre los dos puntos X_1 y X_2 de la muestra es:

$$\psi_{m1} - \psi_{m2} = (qL/2k)[(X_1^2 - X_2^2)/L^2] \qquad (5.9)$$

donde ψ_{m1}, ψ_{m2} es el pontencial matricial en los puntos X_1 y X_2, q es la densidad de flujo (constante), L es el largo de la muestra, k es la conductividad capilar, X_1 y X_2 es la distancia de los tensiómetros desde el extremo abierto de la muestra.

Si los puntos son $X_1 = L$ y $X_2 = 0$, la ecuación 5.9 se transforma en

$$\psi_{m1} - \psi_{m2} = \Delta\Psi_m = qL/2k \qquad (5.10)$$

de donde se puede calcular la conductividad capilar

$$k = qL/2\Delta\psi_m \qquad (5.11)$$

Mediante este método la conductividad capilar se puede obtener midiendo la densidad de flujo q (evaporación), por cambios en el peso del sistema,

y la diferencia de potencial matricial o succión entre los puntos mediante tensiómetros. Estas dos determinaciones se deben realizar en función del tiempo.

Conociendo k, ψ_m y Θ del suelo a instantes determinados se puede graficar:

$\psi_m = \psi_m(\Theta)$: Curva de retención de humedad
$k = k(\Theta)$: Conductividad capilar en función del contenido de humedad
$k = k(\psi_m)$: Conductividad capilar en función del potencial matricial o succión.

Utilizando la curva de retención de humedad y la curva de la conductividad capilar en función del contenido de humedad se pueden realizar los cálculos necesarios mediante la siguiente relación:

$$D = -k(\Delta\psi_m/\Delta\Theta) \quad [L^2T^{-1}] \tag{5.12}$$

de tal manera que se pueden construir los gráficos $D=D(\Theta)$ y $D=D(\psi_m)$.

En la Figura 5.3 se muestra la conductividad capilar en función del contenido volumétrico de agua y del potencial matricial de un suelo derivado de cenizas volcánicas, obtenidas por el método de flujo constante (Millar, 1975).

5.4. Columnas de Suelo en Proceso de Drenaje.

Este método consiste en instalar las columnas de suelo en posición vertical. Las columnas deben ser lo suficientemente largas para permitir un drenaje normal, evitar la acumulación de agua en su parte inferior y lo que es más importante, permitir el desarrollo normal de los perfiles de carga hidráulica.

Las columnas de suelo pueden ser preparadas de muestras alteradas, pero es preferible la utilización de columnas de suelo sin alterar. De esta manera la información es de una mayor aplicabilidad a las condiciónes naturales.

Experimentalmente, se instala la columna con dos tensiómetros a 30 cm de distancia. La parte más crítica es la regulación del flujo de entrada del agua en la parte superior de la columna. El esquema experimental se muestra en la Figura 5.4.

Las determinaciones se inician con la columna saturada y luego se procede en sucesivos pasos, correspondientes a diferentes flujos. Para cada flujo se debe lograr el equilibrio dinámico, es decir, que no haya diferencias en las lecturas de los manómetros con el tiempo.

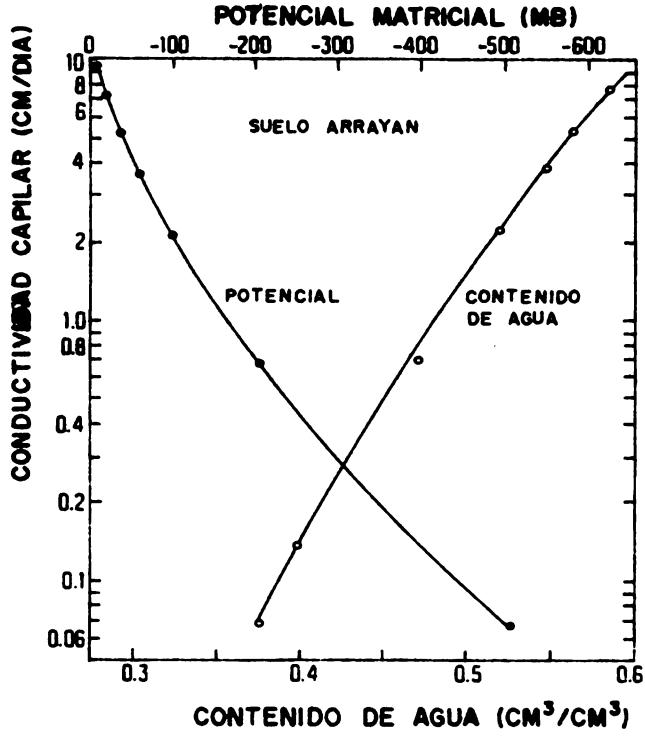


FIGURA 5.8. Conductividad capilar del suelo Arrayán en función del potencial matricial y del contenido de agua (Millar, 1975).

La regulación del flujo, después que se sale del régimen saturado, se puede efectuar mediante un sistema de goteo que permite definir el volumen de agua que se entrega en un tiempo determinado a la columna de suelo. Con esta información y el área de la columna se define la densidad de flujo.

Para cada densidad de flujo (q), después de alcanzar el equilibrio dinámico se efectúan las lecturas de los tensiómetros, para obtener el gradiente hidráulico.

Para determinar el valor de k que corresponde al equilibrio dinámico determinado se aplica la ecuación de Darcy en forma directa.

$$k = -q/(dH/dZ) \qquad (5.13)$$

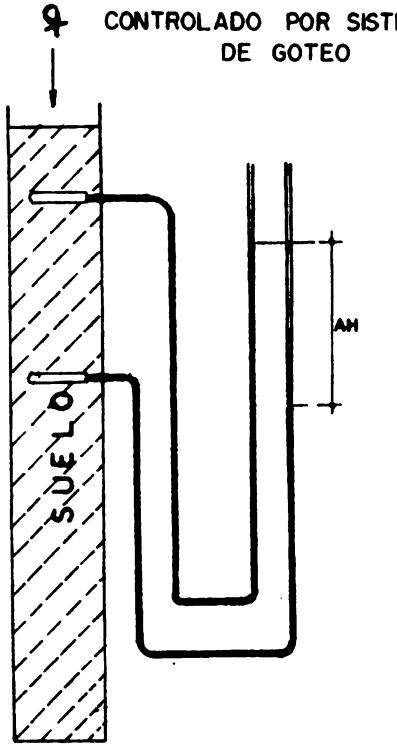


FIGURA 5.4. Esquema del sistema para determinar la conductividad capilar mediante columnas en proceso de drenaje.

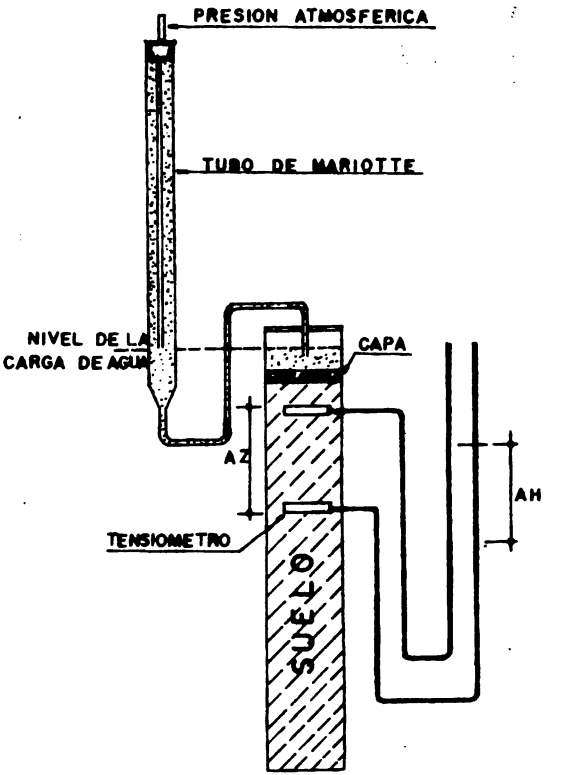


FIGURA 5.5. Esquema del sistema para determinar la conductividad capilar mediante infiltración a través de una capa artificial de permeabilidad conocida.

donde q es la densidad de flujo controlado por un sistema de goteo previamente calibrado o con una bomba peristáltica de flujo discontínuo y dH/dZ es el gradiente hidráulico determinado con los tensiómetros. De esta manera se obtiene un valor de k para un valor promedio de potencial matricial.

Regulando para un q menor, se espera que la columna alcance equilibrio dinámico y se obtiene otro punto de la relación. Esto se continúa sucesivamente hasta obtener los puntos necesarios que permiten graficar la conductividad capilar en función del potencial matricial.

Un sistema operado en la forma anteriormente descrita sólo permite obtener $k = k(\psi_m)$.

Para obtener $k = k(\Theta)$ se puede operar con el mismo sistema pero utilizando una columna seccionada, de tal manera que después de cada equilibrio dinámico se puede extraer el anillo entre los tensiómetros y hacer la determinacion de humedad. Luego, la columna se restituye y se continúa el mismo procedimiento.

5.5. Infiltración a Través de una Capa Artificial de Permeabilidad Conocida.

Este procedimiento es una variente del método anterior en que la densidad de flujo es controlada mediante capas de una mezcla de arena y arcilla que para una carga de agua dada presenta una permeabilidad determinada.

La base teórica y su utilización se encuentran ampliamente descrita en publicaciones de Hillel y Gardner (1969, 1970).

Las capas de la mezcla de arena y arcilla se calibran para una carga de agua que no pasa más alla de 2 cm, la cual se controla mediante un tubo de Mariotte construido a partir de una bureta graduada. El esquema experimental se muestra en la Figura 5.5.

Para obtener una densidad de flujo (q) diferente se utiliza una capa más gruesa de la mezcla. Para todos los q usados se debe esperar la obtención del equilibrio dinámico. El procedimiento de cálculo es idéntico al del caso anterior.

Como en el método anterior, se obtiene la conductividad capilar en función del potencial matricial. Para obtener la conductividad capilar en función del contenido de humedad se deben utilizar columnas seccionables.

Este método también se puede utilizar en condiciones de campo, mediante la infiltración a través de una capa artificial, en una columna especialmente cavada. En este caso sólo es posible la obtención de la conductividad capilar en función del potencial matricial o succión.

5.6. Determinación "in situ" de la Conductividad Capilar.

La determinación de la conductividad capilar en condiciones de campo se puede realizar investigando la re-distribución del agua (drenaje) en el perfil de suelo inmediatamente después de un riego profundo.

El método requiere medidas frecuentes y simultáneas de los perfiles de humedad y cargas hidráulicas bajo condiciones exlcusivamente de drenaje. Para tal efecto, la superficie del suelo se cubre con plástico para evitar la evaporación. A partir de las medidas anteriores es posible obtener valores instantáneos de gradientes hidráulicos y densidades de flujo que operan en el perfil, y por lo tanto permiten obtener la conductividad capilar por aplicación directa de la ecuación de Darcy.

Una vez que se conoce la conductividad capilar, para cada profundidad del perfil, en función del contenido de humedad, entonces se puede utilizar para analizar el drenaje y la evapotranspiración en suelos desnudos o con vegetación.

La descripción, base teórica y utilización del método es ampliamente abordada por varios autores (Rose et al., 1965; Davidson et al., 1969; Gardner, 1970; Hillel et al., 1972). Stephens (1985) describe otro procedimiento basado en la información de flujo desde un pozo mantenido con carga constante.

5.6.1. Procedimiento Experimental

a. Demarcar en el campo un área mínima de 5 x 5 m.

b. Instalar dentro del área una batería de tensiómetros de investigación, descritos en el Capítulo 2, cada 30 cm hasta una profundidad de aproximadamente 1,80 m.

c. Si se dispone de una sonda de neutrones para medir humedad de suelo se debe instalar un tubo de acceso dentro de esta área.

d. Efectuar un riego profundo.

e. Cubrir el área con un plástico para evitar la evaporación o entrada de agua de lluvia. De esta manera sólo se tiene el perfil de suelo en proceso de drenaje.

f. Efectuar medidas de humedad y de cargas hidráulicas en función del tiempo a medida que el perfil drena, durante el mayor tiempo que sea posible.

En el caso de suelos arenosos se deben tomar las medidas en intervalos menores de tiempo, especialmente al comienzo, debido a que el perfil drena rápidamente. A medida que el suelo llega a su rango menos saturado el intervalo de medida debe ser mayor para lograr un cambio detectable en las condiciones hídricas del perfil.

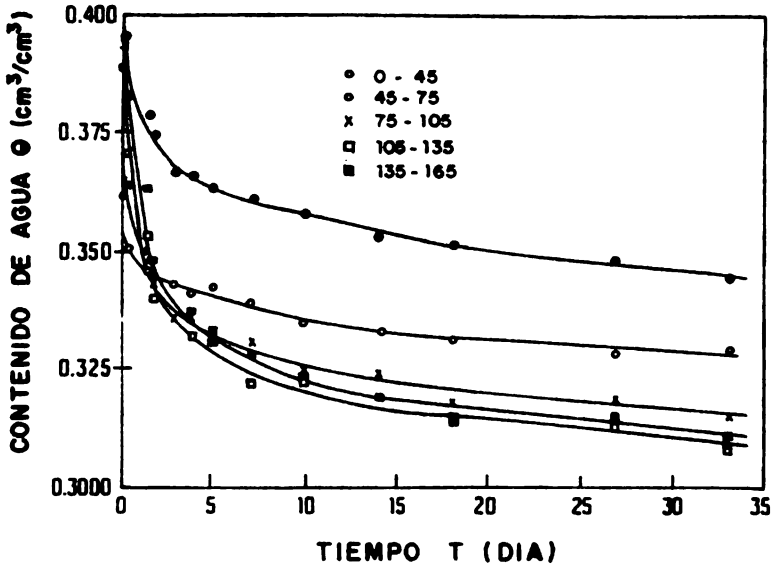


FIGURA 5.6. Variaciones del contenido de agua en función de la profundidad y del tiempo durante el drenaje interno del perfil del suelo (Reichardt y Libardi, 1974).

5.6.2. Manejo de la Información de Valores Instantáneos

a. Graficar la variación del contenido volumétrico de agua en función del tiempo para cada profundidad (Figura 5.6).

b. Calcular la densidad de flujo (q) para cada incremento de profundidad (Figura 5.7).

- Integrar la curva de humedad versus tiempo con respecto a la profundidad.
- La pendiente ($d\Theta/dt$) se mide en puntos dados en el tiempo.

c. Graficar las variaciones de potencial matricial para cada profundidad en función del tiempo (Información de tensiómetros).

d. Calcular y dibujar los perfiles de carga hidráulica para cada profundidad (Ejemplo Figura 4.14).

e. Calcular la conductividad capilar en cada profundidad, para diferentes contenidos de humedad, dividiendo q por el gradiente, es decir, aplicando directamente la ecuación de Darcy.

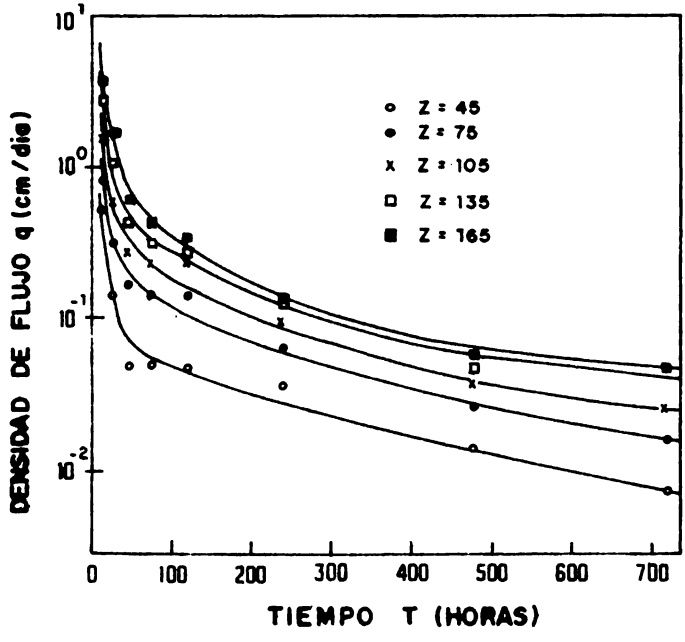


FIGURA 5.7. Densidad de flujo del agua del suelo en función de la profundidad y del tiempo durante el drenaje interno del perfil del suelo (Reichardt y Libardi, 1974).

$$k = -q/(dH/dZ) \tag{5.14}$$

donde q es la densidad de flujo obtenida por las variaciones de humedad con el tiempo para un punto dado del perfil, y dH/dZ es el gradiente hidráulico obtenido con los tensiómetros.

5.6.3. Cálculo de la Densidad de Flujo (q)

En el Cuadro 5.1 se muestra la secuencia de cálculo de la densidad de flujo (q) para diferentes camadas de suelo e intervalos de tiempo. Los datos corresponden al estudio realizado por Reichardt y Libardi (1974) en un suelo Acrohumox.

CUADRO 5.1. Cálculo de la densidad de flujo del agua en el suelo.

Tiempo (día)	Profundidad Intervalo ΔZ (cm)	Δθ/Δt (día $^{-1}$)	Δ Z(Δθ/ t) (cm/día)	q=ΣΔZ(ΔθΔt) (cm/día)
0,5	0 - 45	0,0117	0,5265	0,5265
	45 - 75	0,0102	0,3060	0,8325
	75 - 105	0,0254	0,7620	1,5945
	105 - 135	0,0381	1,1430	2,7375
	135 - 165	0,0354	1,0620	3,7995
1	0 - 45	0,0032	0,1440	0,1440
	45 - 75	0,0054	0,1620	0,3060
	75 - 105	0,0095	0,2850	0,5910
	105 - 135	0,0157	0,4710	1,0620
	135 - 165	0,0210	0,6300	1,6920
2	0 - 45	0,0011	0,0495	0,0495
	45 - 75	0,0040	0,1200	0,1695
	75 - 105	0,0036	0,1080	0,2775
	105 - 135	0,0051	0,1530	0,4305
	135 - 165	0,0083	0,2490	0,6795
3	0 - 45	0,0011	0,0495	0,0495
	45 - 75	0,0032	0,0960	0,1455
	75 - 105	0,0029	0,0870	0,2325
	105 - 135	0,0026	0,0780	0,3105
	135 - 165	0,0041	0,1230	0,4335
5	0 - 45	0,0011	0,0495	0,0495
	45 - 75	0,0032	0,0960	0,1455
	75 - 105	0,0029	0,0870	0,2325
	105 - 135	0,0018	0,0540	0,2865
	135 - 165	0,0020	0,0600	0,3465
10	0 - 45	0,00080	0,0360	0,0360
	45 - 75	0,00098	0,0294	0,0654
	75 - 105	0,0010	0,0300	0,0954
	105 - 135	0,0012	0,0360	0,1314
	135 - 165	0,00039	0,0117	0,1431
20	0 - 45	0,00031	0,0140	0,0140
	45 - 75	0,00046	0,0138	0,0278
	75 - 105	0,00031	0,0093	0,0371
	105 - 135	0,00038	0,0114	0,0485
	135 - 165	0,00038	0,0114	0,0599
30	0 - 45	0,00016	0,0072	0,0072
	45 - 75	0,00031	0,0093	0,0165
	75 - 105	0,00038	0,0090	0,0255
	105 - 135	0,00038	0,0114	0,0369
	135 - 165	0,00038	0,0114	0,0483

5.6.4. Cálculo de la Conductividad Capilar

Basado en la información del Cuadro 5.1 se efectúa el cálculo de la conductividad capilar para cada profundidad en particular.

En el Cuadro 5.2 se presenta la secuencia de cálculo de la conductividad capilar utilizando la ecuación de Darcy con los datos de densidad de flujo y de gradiente hidráulico. Los datos corresponden al mismo estudio de Reichardt y Libardi (1974).

Para cada profundidad se puede calcular el contenido promedio de humedad en volumen y el potencial matricial de tal manera que se puede obtener:

- Conductividad capilar en función del contenido de agua.
- Conductividad capilar en función del potencial matricial.
- Curva de retención de agua.

En la Figura 5.8 se presenta la conductividad capilar para diferentes camadas del suelo en función del contenido de agua usando los datos del Cuadro 5.2.

5.6.5. Manejo de la Información de Valores Promedios

Los datos de conductividad hidráulica se obtuvieron utilizando valores instantáneos de humedad y cargas hidráulicas del perfil.

Otra alternativa de tratamiento de la información es utilizando valores promedios del perfil o del horizonte considerado.

En el Cuadro 5.3 se presenta la información para diversos tiempos de medidas obtenidas en la profundidad de 75 cm de un suelo arenoso.

5.6.6. Ejemplo de Cálculo para el Primer Intervalo de Tiempo (t=0 y t=0,77)

a. Gradiente hidráulico promedio para el intervalo de tiempo:

Para t=0: $(\Delta H/\Delta Z) = (-112-(-85))/30 = -0,90$
Para t=0,77: $(\Delta H/\Delta Z) = (-127-(-97))/30 = -1,0$
Promedio: $(\Delta H/\Delta Z) = (-0,90 + (-1,0))/2 = -0,95$

b. Cálculo de la densidad de flujo (q):

$$q = (\Delta\Theta \; x \; Z)/t = (\Theta_1 - \Theta_2) \; Z/(t_2 - t_1) \qquad (5.15)$$

$= (0,121 - 0,084) \times 75/0,77$

CUADRO 5.2. Cálculo de la conductividad capilar (k).

Prof.Z (cm)	Densidad de Flujo q (cm/día)	Gradiente ΔH/ΔZ (cm/cm)	Conductividad Capilar, k (cm/día)	Promedio del contenido de agua (cm3 /cm3)
45	0.5265	2.433	0.2164	0.355
	0.1440	2.433	0.05919	0.347
	0.0495	2.433	0.02034	0.345
	0.0495	2.433	0.02034	0.344
	0.0495	2.433	0.02034	0.342
	0.0360	2.433	0.01480	0.338
	0.0140	2.433	0.005754	0.333
	0.0072	2.433	0.002959	0.330
75	0.0325	2.433	0.9421	0.388
	0.3060	2.433	0.1257	0.370
	0.1695	2.433	0.06966	0.375
	0.1455	2.433	0.05980	0.371
	0.1455	2.433	0.05980	0.366
	0.0654	2.433	0.02688	0.360
	0.0278	2.433	0.01142	0.354
	0.0165	2.433	0.00678	0.340
105	1.5945	0.850	1.0584	0.373
	0.5910	0.850	0.6888	0.351
	0.2775	0.850	0.3234	0.344
	0.2325	0.850	0.2709	0.337
	0.2325	0.850	0.2709	0.335
	0.0954	0.850	0.1111	0.329
	0.0371	0.850	0.04324	0.323
	0.0369	0.850	0.04300	0.318
135	2.7375	0.850	3.1905	0.378
	1.0620	0.850	1.2377	0.354
	0.4305	0.850	0.5017	0.343
	0.3105	0.850	0.3619	0.336
	0.2865	0.850	0.3339	0.332
	0.1314	0.850	0.1531	0.325
	0.0485	0.850	0.05653	0.317
	0.0369	0.850	0.04301	0.312
165	3.7995	0.850	4.4283	0.384
	1.6920	0.850	1.9720	0.365
	0.6795	0.850	0.7920	0.351
	0.4335	0.850	0.5052	0.341
	0.3465	0.850	0.4038	0.336
	0.1431	0.850	0.1668	0.328
	0.0599	0.850	0.06981	0.319
	0.0483	0.850	0.05629	0.314

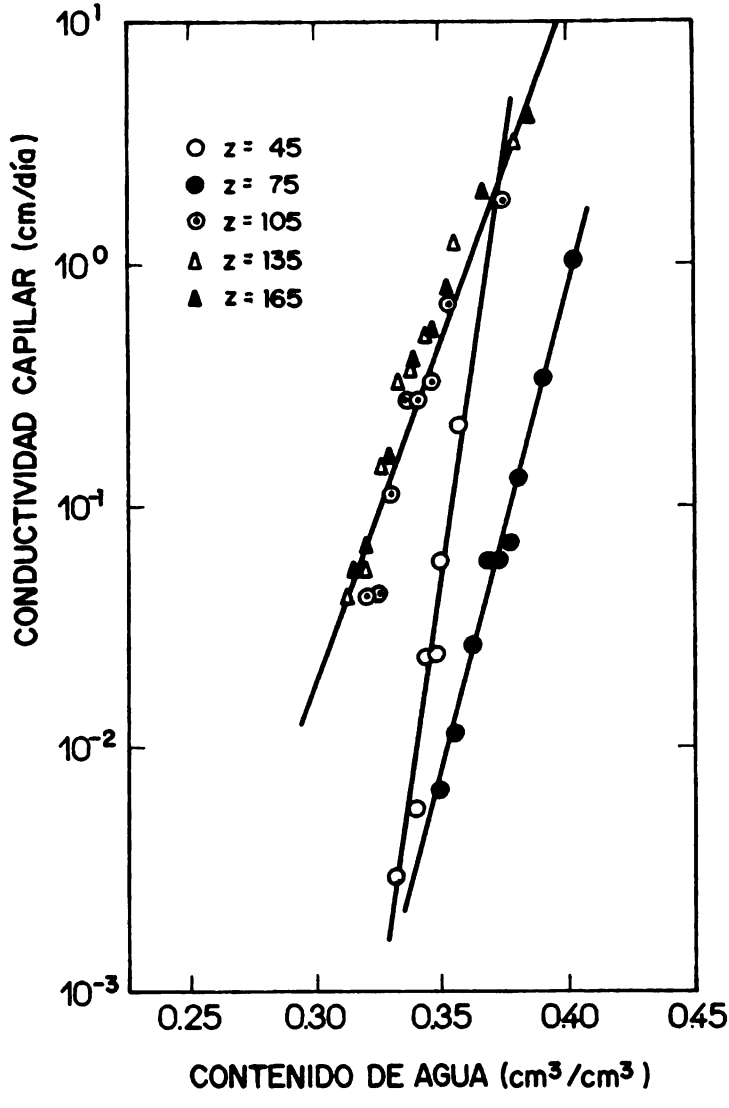


FIGURA 5.8. Conductividad capilar en función del contenido de agua del suelo y de la profundidad del perfil (Reichardt y Libardi, 1974).

CUADRO 5.3. Contenido de agua y cargas hidráulicas en función del tiempo para un suelo arenoso en proceso de drenaje.

Tiempo (t)	Contenido medio de Agua en el Perfil de 75 cm (θ)	Contenido medio de agua a 75 cm de profundidad (θ)	Cargas hidráulicas a profundidad de	
			60 cm	90 cm
0	0.121	0.113	-85	-112
0.77	0.084	0.083	-97	-127
2.10	0.071	0.070	-102	-129
5.02	0.060	0.064	-106	-133
13.77	0.055	0.057	-115	-144

$= 0{,}037 \times 75/0{,}77$
$q = 3{,}603$ cm/día

c. Cálculo de la conductividad capilar

$$q = -k\,(dH/dZ) \tag{5.16}$$

$k = -q/(\Delta H/\Delta Z)$
$k = 3{,}603/(-0{,}95) = 3{,}80$ cm/día

d. Cálculo promedio del contenido de humedad

$$\Theta = (\Theta_1 + \Theta_2)/2 \tag{5.17}$$

$= (0{,}113 + 0{,}083)/2 = 0.098$

5.7. Referencias Bibliográficas.

[1] BOUMA, J., D. HILLEL, F. D. HOLE AND C. R. AMERMAN. 1971. Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity by infiltration through artificial crusts. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32:362–364.

[2] CHILD, E. C. AND N. COLLIS-GEORGE. 1950. The permeability of porous materials. Royal Society (London) Proceedings A201:392–405.

[3] COLLIS-GEORGE, N. AND M. J. ROSENTHAL. 1966. Proposed outflow method for the determination of the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. Australian Journal of Soil Research 4:165–180.

[4] DAVIDSON, J. M., L. R. STONE, D. R. NIELSEN, AND M. E. LARUE. 1969. Field measurement and use of soil-water properties. Water Resources Research 5(6):1312–1321.

[5] GARDNER, W. R. 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. Soil Science Society of America Proceedings 20 (3):317–320

[6] GARDNER, W. R. 1970. Field measurement of soil water diffusivity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34:832–833.

[7] GARDNER, W. R. AND F. J. MIKLICH. 1962. Unsaturated conductivity and diffusivity measurements by a constant flux method. Soil Science 93:271–274.

[8] HILLEL, D. AND W. R. GARDNER. 1969. Steady infiltration into crust-topped profiles. Soil Sci. 108(2):137–142.

[9] HILLEL, D. AND W. R. GARDNER. 1970. Measurement of unsaturated conductivity and diffusivity by infiltration through an impeding layer. Soil Science 109:149–153.

[10] HILLEL, D., V. D. KRENTOS AND Y. STYLIANOU. 1972. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. Soil Science 114:395–400

[11] JACKSON, R. D., C. H. M. VAN BAVEL AND R. J. REGINATO. 1963. Examination of the pressure-plate outflow method for measuring capillary conductivity. Soi Science 96(4):249–256.

[12] KLUTE, A. 1965. Laboratory Measurement of hydraulic conductivity of unsatured soil. In: C. A. Black et al. (ed.) Methods of soil analysis, Part 1. Agronomy 9:253–261.

[13] KUNZE, R. J. AND D. KIRKHAM. 1962. Simplified accounting for membrane impedance in capillary conductivity determinations. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26:421–426.

[14] MARSHALL, T. J. 1962. Permeability equations and their models. Inst. Chem. Eng. Conf. Interactions Fluid Particles (London). p. 299–303.

[15] MILLAR, A. A., N. DUARTE y E. RIQUELME. 1975. Movimiento de nitratos en un suelo derivado de cenizas volcánicas. Turrialba 25(2):139–143.

[16] MILLAR, A. A. 1978. Drenagem de terras agricolas: Bases agronômicas. São Paulo, Brasil, Editora McGraw Hill do Brasil., Ltda. 276 p.

[17] MILLAR, A. A. 1989. Drenagem de terras agricolas:Bases Agronômicas. 2a. edicão. Brasilia, Brasil, Editora Editerra, 306 p.

[18] MILLAR, A. A. 1975. Conductividad capilar de un suelo derivado de cenizas volcánicas. Turrialba 25(4): 448–449.

[19] MILLER, E. E. AND D. E. ELRICK. 1958. Dynamic determination of capillary conductivity extended for non-negligible membrane impedance. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 22:483–486.

[20] REICHARDT, K. AND P. L. LIBARDI. 1974. An analysis of soil-water movement in the field: I.Hydrological field site characterization, Sao Paulo, CENA/ESALQ/USP. 21p. (Boletim Cientifico N' 21.).

[21] RIJTEMA, P. E. 1959. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data with non-negligible membrane impedance. Netherlands J. Agr. Sci. 7:209–215.

[22] ROSE, C. W. AND W. R. STERN AND J. E. DRUMMOND. 1965. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ. Australian Journal of Soil Research 3:1–9.

[23] STEPHENS, D. B. 1985. A field method to determine unsaturated hydraulic conductivity using flow nets. Water Resources Research 21(1):45–50.

[24] YOUNG, E. G. 1964. An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. Soil Science 97:307–311.

CAPITULO 6

USO PRACTICO DE LA INFORMACION DE CONDUCTIVIDAD CAPILAR Y DIFUSIVIDAD DEL SUELO

La utilidad práctica del conocimiento de las propiedades transmisoras de agua de un suelo es un hecho real que se puede constatar fácilmente si se analizan un sinnúmero de procesos físicos, químicos y biológicos que suceden en el perfil del suelo. La mayoría de ellos se presentan cuando el suelo se encuentra en su condición de semi-saturación y principalmente de no saturación.

Entre algunos de estos fenómenos, se puede mencionar:

-Contribución de agua a los cultivos desde napas freáticas
-Movimiento de agua en el suelo y hacia las raíces de las plantas
-Movimiento de nutrientes asociado con el movimiento de agua de suelo
-Movimiento de agua fuera de la zona radicular de los cultivos. Estimación del componente de drenaje en la ecuación hidrológica o de balance de agua.

Con la finalidad de apreciar el verdadero valor de la información de conductividad capilar y difusividad se analizan algunos de los fenómenos que suceden en el suelo, y que son de importancia agronómica.

6.1. Contribución de Agua a los Cultivos Desde Napas Freáticas por Alza Capilar.

El proceso de elevación capilar del agua a partir de una napa freática hacia la superficie del suelo se puede analizar como flujo permanente, es decir, donde la variación del contenido de humedad con el tiempo es constante.

Después de un riego o lluvia, disminuye el contenido de agua de los horizontes superficiales a causa de las pérdidas por evapotranspiración. Debido a la situación anterior se produce una inversión de los gradientes de potencial o carga hidráulica, y el agua se mueve hacia la superficie.

Si la evapotranspiración es mayor que el flujo de agua hacia la superficie, el contenido de agua de las capas superficiales disminuirá. Como resultado

de ésto, el potencial matricial, el gradiente hidráulico, y el flujo ascendente del agua aumentará. Se plantea, entonces, un balance entre la evapotranspiración y el flujo ascendente. Este proceso continúa hasta que se obtiene:

ET = Flujo capilar

Cuando se logra esta condición, la capilaridad alcanza su valor máximo y el flujo es permanente ($d\Theta/dt = 0$) y el proceso de flujo se puede describir mediante la ecuación de Darcy para flujo no saturado.

$$q = -k \ (d\Psi/dZ) \quad (Sentido \ \ Vertical) \tag{6.1}$$

Además

$$\Psi = -\psi_m + Z \tag{6.2}$$

Luego:

$$q = -k \ (d/dZ)(-\psi_m + Z) \tag{6.3}$$

$$q = k \ [(d\psi - m/dZ) - 1] \tag{6.4}$$

donde:
q = Tasa de ascenso capilar
k = conductividad capilar
ψ_m = potencial matricial
Z = profundidad de la napa freática

Es de interés analizar el perfil de humedad sobre la napa freática para la condición de equilibrio, sin flujo vertical, y de no equilibrio con flujo vertical.

6.1.1. Perfil en Condiciones de Equilibrio sin Flujo Vertical

q = 0 (Flujo vertical igual a cero)

Usando la ecuación 6.4, se tiene

$$0 = k \ [(d\psi_m/dZ) - 1] \tag{6.5}$$

De la ecuación 6.5 se deduce que k = 0 y entonces tenemos:

$$(d\psi_m/dZ) - 1 = 0 \tag{6.6}$$

$$\int d\psi_m = \int dZ \tag{6.7}$$

$$\psi_m = Z + C \tag{6.8}$$

En la superficie de la napa freática (Z = 0) se tiene que $\psi_m = 0$, lo cual permite calcular el valor de la constante de integración C.

Para Z = 0, $\psi_m = 0$

0 = 0 + C, lo cual implica que C = 0

Luego $\psi_m = Z + C$, y

$$\psi_m = Z \tag{6.9}$$

Según el análisis anterior, bajo condiciones de equilibrio y sin flujo vertical (q = 0), el potencial matricial en cualquier punto del perfil, sobre la napa freática, es igual a la altura sobre la napa freática.

6.1.2. Perfil en Condiciones de no Equilibrio y en Presencia de Flujo Vertical

Esta es la situación más común en condiciones naturales debido a la gran fluctuación de los valores de evapotranspiración.

Tomando la ecuación 6.4., separando variables e integrando, se obtiene:

$$\int dZ = \int d\psi_m/(1 + q/k) \tag{6.10}$$

$$Z = \int d\psi_m/(1 + q/k) \tag{6.11}$$

La ecuación 6.11 relaciona la altura sobre la napa freática (Z), potencial matricial (ψ_m) y la tasa de ascenso capilar (q) bajo condiciones de flujo permanente.

La ecuación 6.11 sólo puede integrarse numéricamente si se conoce k = k (ψ_m). Esto ha sido realizado por Wind (1961, 1965), Talsma (1963) y Rijtema (1965) para diferentes tipos de suelos y han obtenido resultados como los que se describen a continuación.

a. Relación entre la altura sobre la napa freática (Z) y el potencial matricial (ψ_m) para diferentes tasas de alza capilar (q)

En la Figura 6.1 se presenta la relación entre Z y ψ_m para diferentes tasas de alza capilar (q) para cuatro tipos de suelos (Rijtema, 1965).

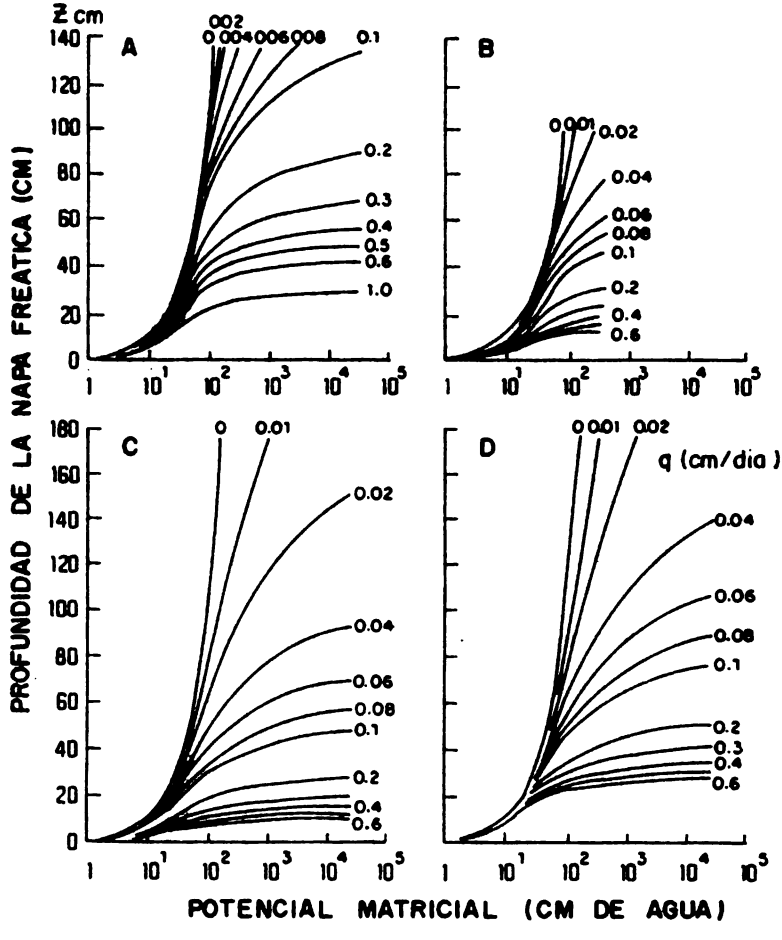


FIGURA 6.1. Relación entre la altura sobre la napa freática y el potencial matricial para diferentes tasas de alza capilar: a) Suelo franco arenoso con humus, b) Suelo franco arenoso, c) Suelo arcilloso y d) Suelo orgánico (Rijtema, 1965).

De esta infomación, obtenida por integración numérica de la ecuación 6.11 se pueden extraer algunas conclusiones:

– A bajos valores de q, existe una estrecha relación entre Z y ψ_m, lo cual indica que está muy cerca de cumplirse la condición de equilibrio, q = 0, donde se tiene z = ψ_m.

– Para un determinado valor de ψ_m se observa que a medida que se profundiza la napa freática (aumenta Z) la tasa de ascenso capilar (q) disminuye rápidamente.

Considerando sólo una curva (q determinado), se observa que a partir de un valor dado de ψ_m no hay ninguna relación entre Z y ψ_m, es decir, Z ≠ Z(ψ_m).

b. Relación entre la tasa de ascenso capilar (c) y el potencial matricial (ψ_m) para varias profundidades de la napa freática (Z)

En la Figura 6.2 se presenta la relación entre q y ψ_m para varias profundidades de la napa freática por debajo de la zona efectiva de raíces, para tres tipos de suelos (Rijtema, 1965).

De la Figura 6.2 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

– Para un determinado valor de potencial matricial, se observa que la tasa de ascenso capilar (q) aumenta a medida que la napa freática esta más cerca de la superficie del suelo.

–Para un determinado valor de Z, se observa que después de un cierto valor de potencial matricial, la tasa de ascenso capilar (q) tiende a ser constante.

– La relación entre q y ψ_m para un determinado valor Z, es del tipo exponencial.

c. Relación entre la tasa de ascenso capilar (q) y la profundidad de la napa freática (Z)

En la Figura 6.3 se presenta la relación entre la tasa de ascenso capilar y la profundidad de la napa freática para dos tipos de suelos (Rijtema, 1965). En el Cuadro 6.1 se presenta el flujo capilar máximo en función de la textura del suelo y la profundidad de la napa freática (FAO, 1973).

De la Figura 6.3. se concluye que la tasa de ascenso capilar (q) disminuye a medida que aumenta la profundidad de la napa freática.

La ecuación de tensión superficial o el alza de un fluido en un capilar esta dada por

$$h = 2\ T/\rho\ g\ r \qquad (6.12)$$

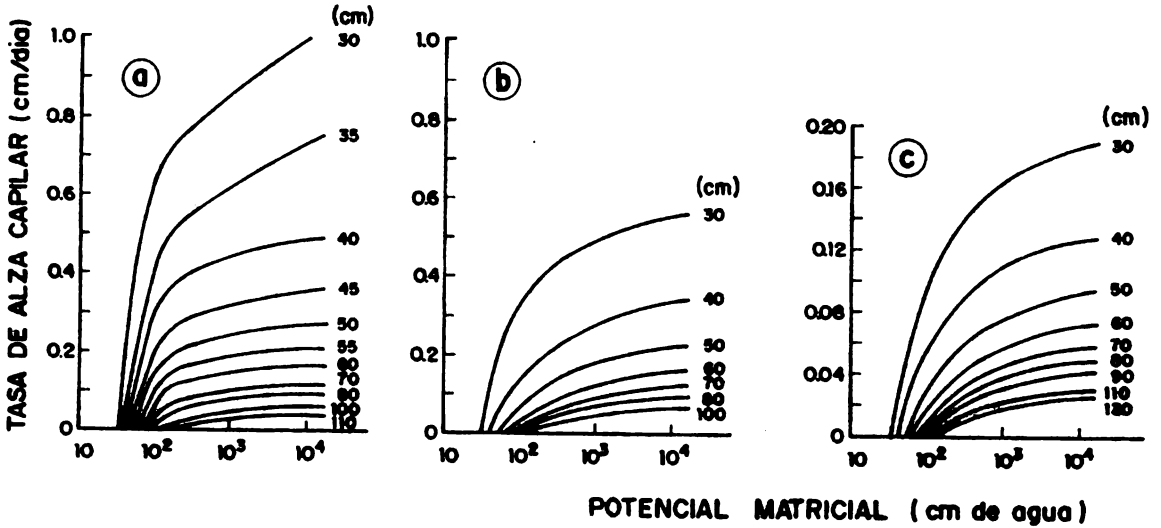


FIGURA 6.2. Relación entre la tasa de ascenso capilar y el potencial matricial para varias profundidades de la napa freática: a) Suelo franco arenoso, b) Suelo orgánico, y c) Suelo arcilloso (Rijtema, 1965).

CUADRO 6.1. Flujo capilar máximo en mm/día en función de la profundidad de la napa freática y de la textura del suelo (FAO, 1973).

Profundidad de la Napa Freática (cm)	Flujo Capilar Máximo (mm/día)			
	Arcilloso y Franco Arcilloso	Franco		
		Franco	Arenoso	Arena media
25	10	Alta	Muy alta	10
40	4	10	Muy alta	2,5
50	2,5	3	Alta	1
75	1	1	Alta	0,5
100	0,5	-	10	0,2
150	0,2	-	1-4	-
200	-	-	0,5-1	-

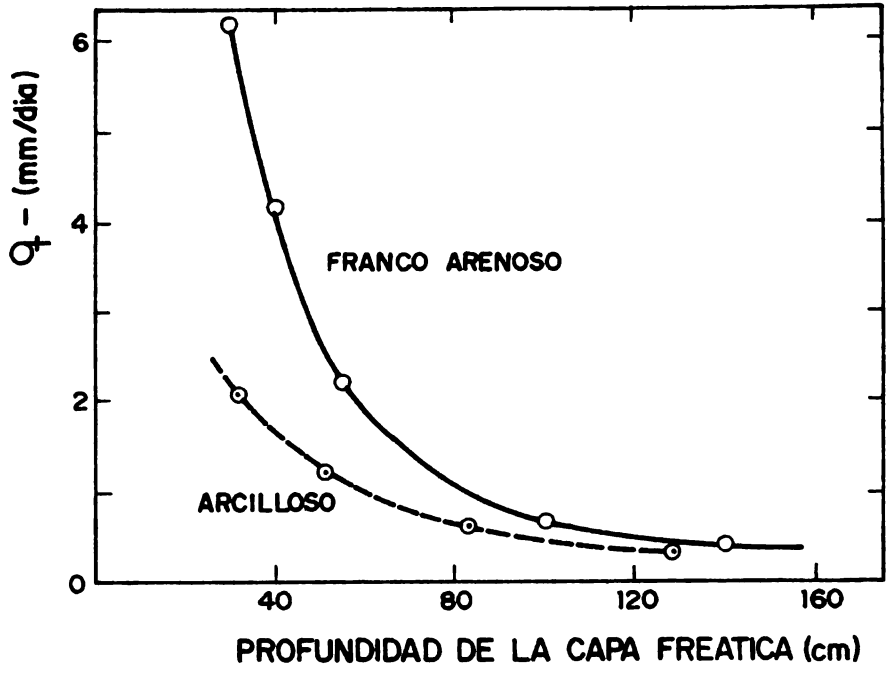


FIGURA 6.3. Relación entre la tasa de ascenso capilar y la profundidad de la napa freática (Rijtema, 1965).

donde h es el alza capilar en cm, T es la tensión superficial, P es la densidad del agua, g la aceleración de gravedad y r el radio del capilar. De acuerdo a esta ecuación, el alza capilar es mayor en suelos arcillosos que en arenosos debido al menor radio de los conductos capilares. Sin embargo, para una determinada profundidad de la napa freática, la tasa de ascenso capilar es mayor en un suelo arenoso que en un suelo arcilloso. Esta diferencia es más pronunciada cuanto menor es la profundidad de la napa freática. La explicación de ello se puede hacer en términos de conductividad capilar. A igualdad de gradientes hidráulicos, el suelo arenoso tendrá una mayor tasa de ascenso capilar debido a que la conductividad capilar es mayor en suelos arenosos que en arcillosos para potenciales mayores a -1 bar.

El tipo de información presentado en la Figura 6.3 es de vital importancia en aquellas áreas donde se manejan las napas freáticas para proveer agua a los cultivos por riego sub-superficial, ya que nos permite decidir hasta que punto podemos rebajar la napa freática para obtener condiciones de flujo

permanente, donde evapotranspiración es igual a la tasa de ascenso capilar.

6.2. Movimiento de Agua en el Suelo Hacia las Raíces de las Plantas.

Cuando cambia el potencial de agua en el suelo también cambia el movimiento de agua hacia las raíces de las plantas. Si el agua a una distancia desde la raíz, está disponible para absorción por la planta, el potencial de agua en el suelo debe ser más alto que en el de la raíz.

Gardner (1960) resolvió la ecuación general de flujo para movimiento de agua hacia la raíz de una planta suponiendo una geometría cilíndrica.

Se supuso que la raíz era un cilindro infinitamente largo, de radio y propiedades de absorción de agua uniformes. Además, se supuso que el agua se movía sólo en dirección radial. Considerando la compleja estructura y geometría de las raíces, todas las suposiciones anteriores son sólo aproximaciones.

La ecuación de flujo para una raíz en coordenadas cilíndricas esta dada por:

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial r \ (r \ D \ \partial\Theta/\partial r) \qquad (6.13)$$

donde Θ es el contenido volumétrico de agua, D es la difusividad, t es el tiempo, y r es la distancia radial desde el eje de la raíz.

Para las condiciones iniciales y limitantes siguientes:

Para $t = 0$, $\Theta = \Theta_o$ y $\psi_m = \psi_{m_o}$

$$t > 0 \quad 2\pi \ a \ k \ (d\psi_m/dr) = 2\pi \ a \ D \ (d\Theta/dr) = q \ ; \ r = a \qquad (6.14)$$

donde "a" es el radio de la raíz, k es la conductividad capilar del suelo y q es la tasa de absorción de agua (volumen de agua por unidad de largo de raíz por unidad de tiempo). La solución de la ecuación 6.13, sujeta a las condiciones de la ecuación 6.14, para D y k constante por un tiempo lo suficientemente largo está basada en la solución de Carlaw y Jaeger (1947, p. 283) para donducción de calor en sólidos.

$$\psi_m - \psi_{m_o} = \Delta\psi_m = (q/4\pi k) \ [\ln(4Dt/a^2) - \gamma) \qquad (6.15)$$

donde $\gamma = 0{,}57722$ es la constante de Euler.

Considerando que el diámetro de las raíces es pequeño, se puede considerar a la raíz como una línea de distribución o una línea de absorción, como en este caso, la solución de la ecuación de flujo (Carlaw y Jaeger, 1947, p. 221) es la siguiente:

$$\psi - \psi_{m_o} = \Delta\psi_m = (q/4\pi k) \left[ln(4Dt/r^2 - \gamma)\right] \qquad (6.16)$$

Cuando r = a, las ecuaciones 6.15 y 6.16 son idénticas. La ecuación 6.16 da la distribución del potencial matricial, y por lo tanto Θ, para cualquier r y no sólo para el caso de r = a.

De la ecuación 6.16 se pueden obtener algunas consideraciones de importancia acerca del proceso:

a) La ecuación muestra que la disminución del potencial matricial por debajo del valor inicial es proporcional a la tasa de transpiración (q) e inversamente proporcional a la conductividad capilar.

b) Permite el cálculo de la distribución del potencial matricial con la distancia desde la raíz. La distancia en la cual ocurre un potencial matricial dado aumenta con la raíz cuadrada del tiempo.

c) La diferencia de potencial matricial (ψ_m) necesaria para mantener una tasa de transpiración dada (q) depende principalmente de la conductividad capilar y del valor de q.

d) Permite, entre otros, el cálculo de la caída de potencial matricial entre el suelo y la raíz de la planta conociendo k, D, q y las dimensiones efectivas de la raíz.

6.3. Movimiento de Nutrientes Asociados con el Movimiento de Agua.

Las sales se mueven o acumulan en el suelo en gran parte debido al movimiento de agua. El nivel de esta acumulación que puede llegar a ser nociva, provocando problemas de salinidad, depende en gran parte de las prácticas de manejo tales como cantidad y frecuencia de riego, métodos de aplicación, nivelación y preparación del suelo, drenaje, etc.

Los procesos principales envueltos en el movimiento de cualquier nutriente en el suelo son:

a) **Convección.** Si la solución del suelo se mueve, entonces cualquier substancia disuelta en la solución se mueve por flujo de masa (arrastre).

b) **Difusión molecular o iónica.** Se debe a gradientes de concentración, ocurriendo tanto en la fase gaseosa como líquida del suelo.

Estos dos procesos pueden ocurrir simultáneamente actuando en la misma dirección o en dirección opuesta.

Desde el punto de vista del manejo de suelos bajo riego, el proceso de convección es de mayor importancia razón por la cual, a continuación, se trata en particular.

La dirección y extensión del movimiento de nutrientes por convección depende de la concentración del nutriente en la solución del suelo, y de la dirección y velocidad del movimiento de la solución del suelo.

Para el caso de convección, la densidad de flujo de un nutriente en la dirección del movimiento de agua está dada por la siguiente relación (Kemper, 1960; Gardner, 1965):

$$J = q\ C \tag{6.17}$$

donde J es la densidad de flujo del nutriente considerado (moles $cm^{-2}seg^{-1}$; g $cm^{-2}seg^{-1}$), q es la densidad de flujo de agua y C es la concentración del nutriente. En esta relación no se considera el efecto de harneado de la sal.

A menudo es conveniente relacionar q con la velocidad promedio del agua en el suelo.

$$q = v\ \Theta \tag{6.18}$$

donde v es la velocidad promedio del agua y Θ es el contenido volumétrico del agua del suelo.

Si el suelo está saturado, la ecuación 6.18 queda como q = v P donde P es la porosidad total. Esto ya se vió con cierto detalle en el Capítulo 3.

El movimiento de iones en el suelo se puede tratar cuantativamente mediante la ecuación de continuidad. Las soluciones a esta ecuación diferencial parcial, para las condiciones iniciales y limitantes apropiadas, permite determinar importante información acerca del movimiento y distribución de los iones.

La velocidad del cambio del contenido de nutrientes del suelo, por unidad de volumen del suelo, debido al proceso de convección se puede escribir de la siguiente manera:

$$\partial M/\partial t = -\partial J/\partial X \tag{6.19}$$

Pero $J = q\ C$
Luego

$$\partial M/\partial t = -\partial/\partial X\ (q\ C) \qquad (6.20)$$

donde M es la cantidad de substancia por unidad de volumen de suelo y t es el tiempo.

6.4. Movimiento y Distribución de Algunos Nutrientes en el Suelo.

En general hay cuatro propiedades del suelo que afectan la movilidad de sales. Estas son conductividad capilar, contenido de agua del suelo, heterogeneidad del tamaño de poros y la presencia de napas freáticas o zonas restrictivas al movimiento de agua (Thomas, 1970).

La conductividad capilar del suelo junto con la evaporación potencial determinan si ocurre o no evaporación desde la superficie del suelo. Si la velocidad de la transmisión de agua es lo suficientemente alta, y la tasa de evaporación es menor, entonces el movimiento de agua hacia la superficie del suelo será rápida y acarreará la mayoría del nutriente.

El contenido de agua del suelo no sólo influencia el movimiento ascendente del nutriente en el ascenso capilar sino que también el movimiento hacia abajo por lavado o arrastre.

La heterogeneidad del tamaño de poros es muy importante en el movimiento y distribución de nutrientes en el suelo.

En suelos arcillosos, el flujo de agua no se realiza a través de los poros pequeños a menos que el suelo esté casi saturado. Aun en ese caso, el movimiento de agua es tan lento que se obtiene muy poco movimiento del nutriente.

Si un suelo está extremadamente seco, el movimiento de agua comienza en los poros grandes pero el agua pronto penetra en los poros pequeños arrastrando el nutriente y determinando que el frente de la concentración del nutriente quede atrás del frente humedo.

El efecto de la presencia de una napa freática se puede apreciar a través de la información presentada anteriomente en la sección 6.1.2.

Hay otros factores que afectan la movilidad de los nutrientes, los cuales se refieren a las propiedades químicas del suelo y factores climáticos y de manejo de suelos, que no serán abordados en particular. Información relacionada con esto se encuentran en las publicaciones de Viets (1967), Thomas (1970) y Stewart (1970).

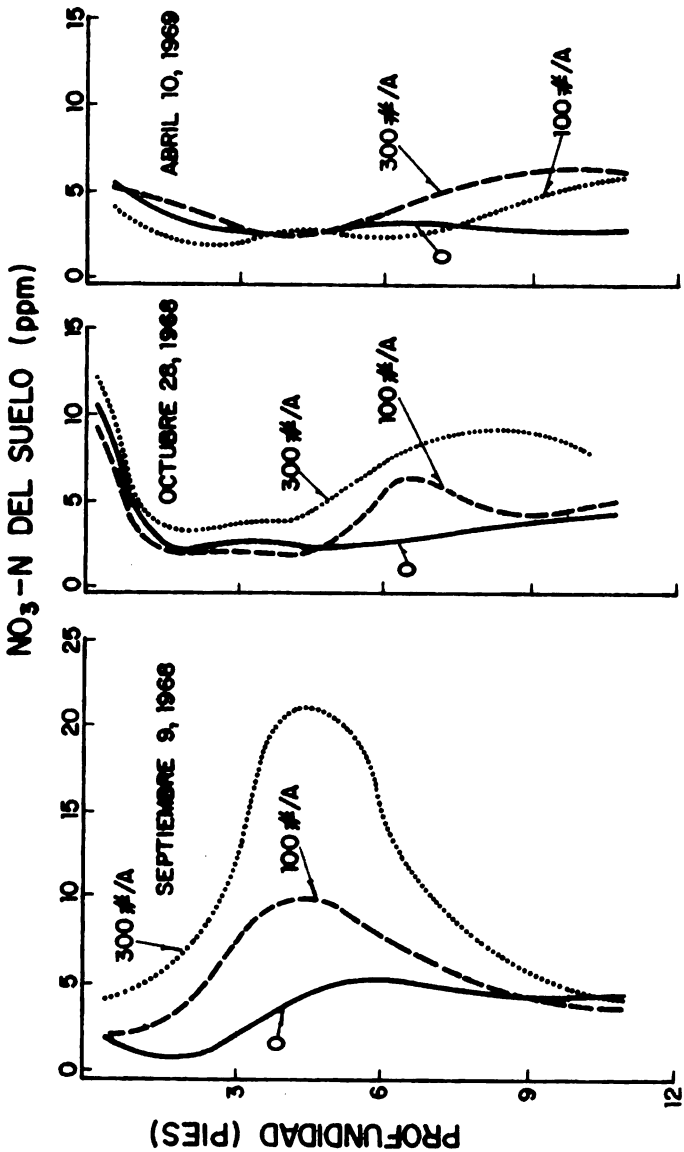


FIGURA 6.4. Movimiento de $NO_3 - N$ en un suelo arenoso desnudo durante un período de 8 meses. El N fue aplicado como $NH_4 - NO_3$ en agosto 1, 1968. El riego y la precipitación total fueron como sigue: Agosto 1–Sept. 9 = 12 pulgadas; Sept. 9–Oct. 28 = 6 pulgadas; Oct. 28–Abril 10 = 6 pulgadas (Keeney y Walsh, 1970).

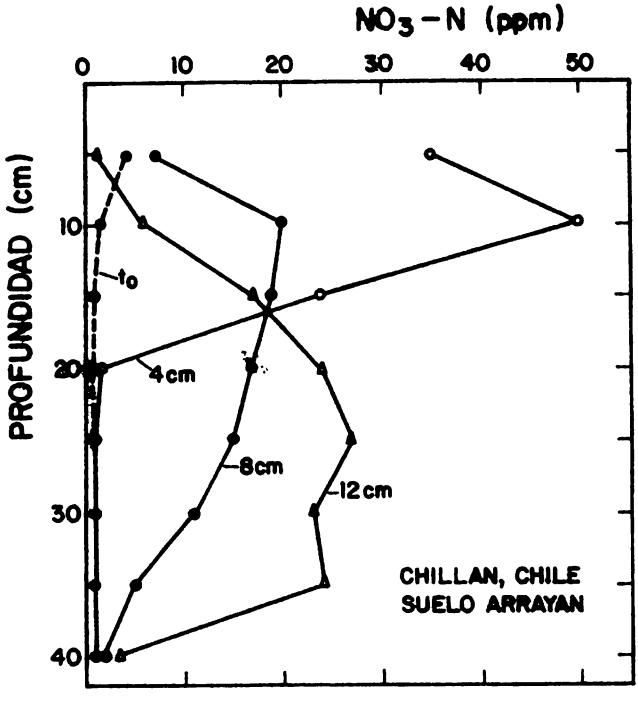


FIGURA 6.5. Distribución de nitrato en columnas de suelo en función de la lámina de agua después de 24 horas de aplicada. (t_o indica la distribución antes de la aplicación de $NaNO_3$).

Considerando la importancia agrícola que representa el nitrato en el suelo, se verán algunos aspectos de su acumulación y movilidad. Por otra parte, el contenido de nitrato en el agua de bebida es muy importante. El servicio de Salud Pública de U.S.A. considera dañina para la salud toda agua que contenga más de 10 ppm de $NO_3 - N$ (Stewart, 1970).

En la Figura 6.4. se presenta la distribución de nitratos con la profundidad del suelo en función del tiempo para un suelo arenoso sin cobertura vegetal. En estos perfiles de nitrato, se observan claramente las máximas concentraciones del ión y la uniformación de los perfiles de nitratos en épocas posteriores (Figuras 6.4.b y 6.4.c)

En la Figura 6.5. se presenta la distribución de nitrato en columnas de un suelo derivado de cenizas volcánicas sometidas a diferentes láminas de riego, y en condiciones de campo para una lámina de riego (Figura 6.6).

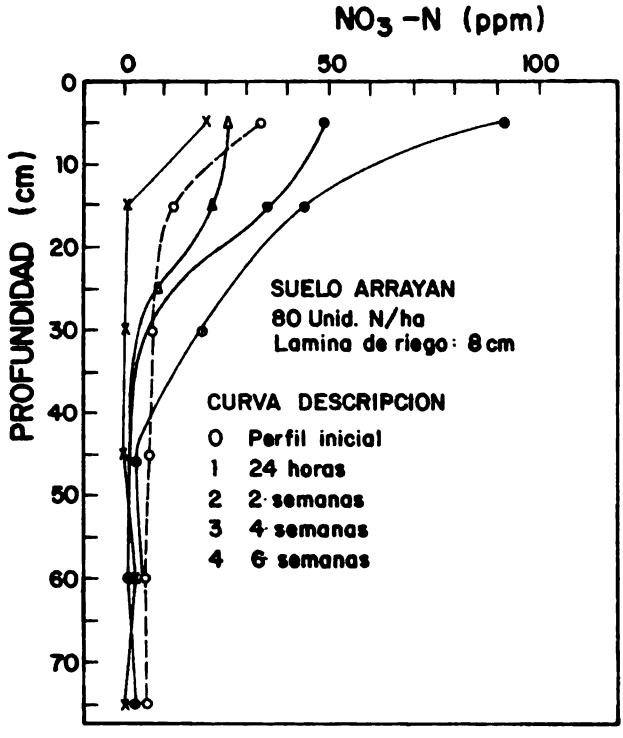


FIGURA 6.6. Distribución de nitrato en un suelo Arrayán en función del tiempo en condiciones de campo (Millar et al., 1972).

En el caso del suelo arenoso y en atención a las precipitaciones recibidas durante las mediciones, se estima que el mayor efecto se debe al arrastre del agua que se movió a través del perfil.

En el caso del suelo Arrayán (Figura 6.6.), a pesar del corto tiempo de medición, se observa un cambio pronunciado en los perfiles de nitratos. Considerando que este suelo tiene un movimiento de agua lento, se estima que además de un efecto de convección, habría una fuerte desnitrificación, la cual se encontraría en condiciones ideales, debido al alto contenido de humedad y altas temperaturas del suelo (Millar et al., 1972).

La cantidad de agua que se mueve a través del perfil del suelo determina la tasa de vovimiento del nitrato. Levin (1964) encontró una relación que ilustra el efecto de la textura del suelo y la cantidad de agua sobre el movimiento de nitratos.

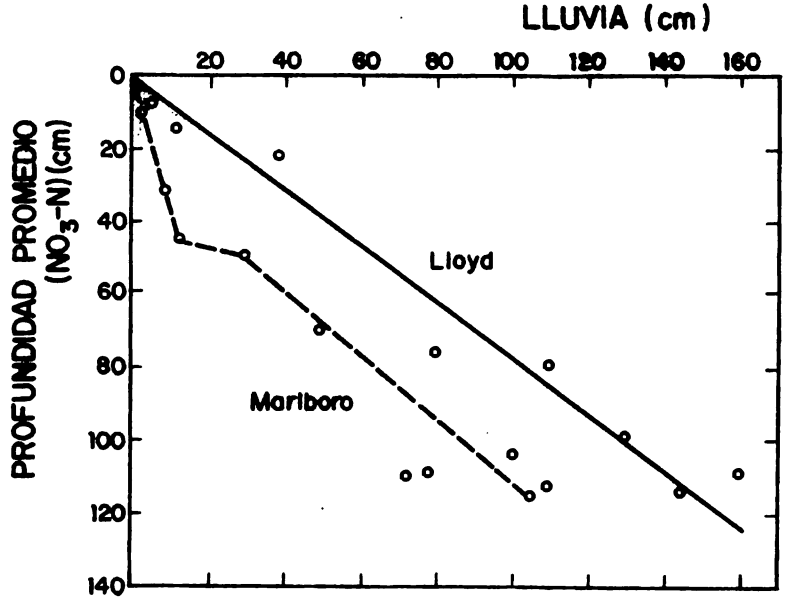


FIGURA 6.7. Profundidad media de la máxima concentración de nitrato en un suelo desnudo de Georgia, USA, en función de la precipitación (Boswell y Anderson, 1965).

La profundidad a la cual se concentra la máxima cantidad de nitratos se puede predecir por la relación (Levin, 1964):

$$Z = (L/\Theta_{cc})\ 100 \qquad (6.21)$$

donde Z es la profundidad de suelo (cm), Θ_{cc} es el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo y L es la lámina de agua de lavado en cm.

En la Figura 6.7 se muestra la relación entre la profundidad media de la máxima concentración de nitratos y la precipitación. De esta información se deduce que hay una relación directa entre la cantidad de agua que penetra en el perfil del suelo y el avance del frente de concentración de nitratos. Esto queda claramente demostrado con la información de Millar et al. (1972) obtenida en columnas de suelo y en condiciones de campo, usando diferentes láminas de riego (Figura 6.8).

Un gráfico que relacione la profundidad de la máxima concentración de

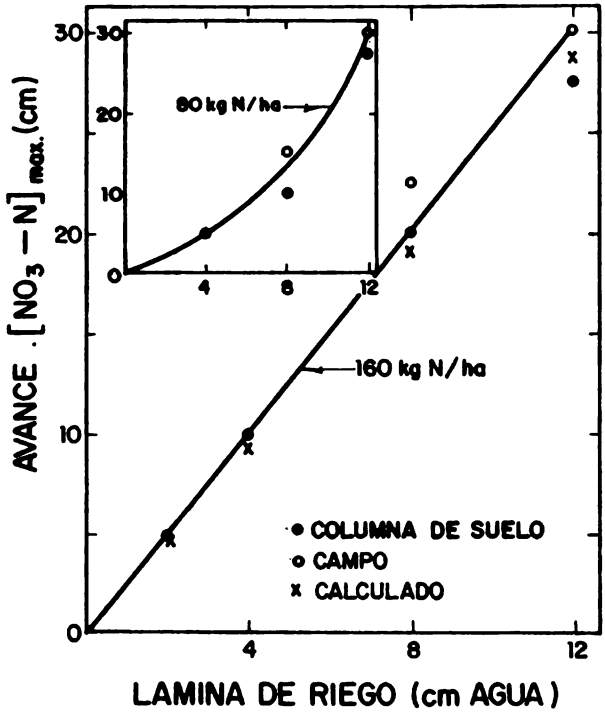
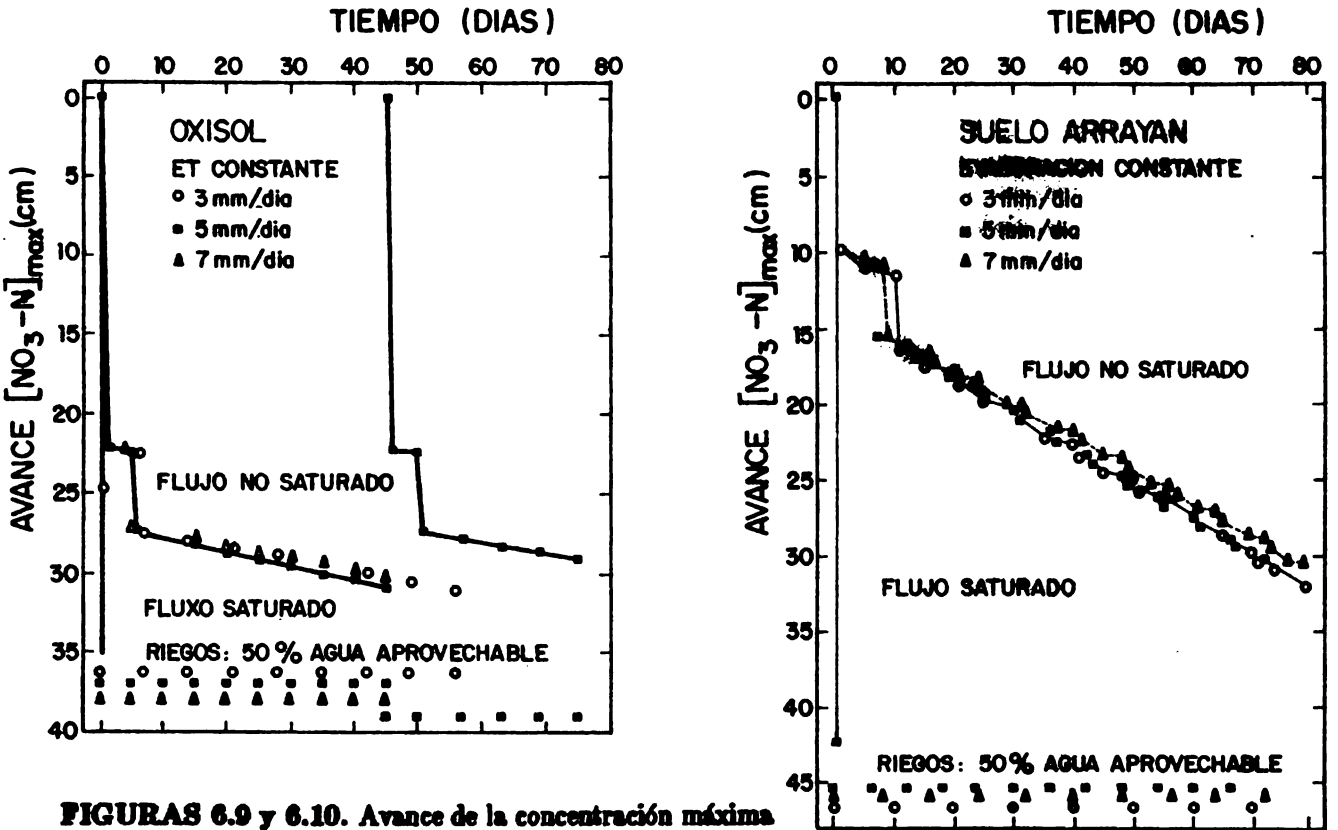


FIGURA 6.8. Movimiento de nitrato en función de la lámina de riego aplicada en un suelo Arrayán (Millar et al., 1975).

nutriente y la profundidad del máximo contenido de agua permite definir la intensidad del proceso de barneado del nutriente.

En la Figura 6.8 se muestra el efecto de riegos sucesivos sobre el avance de la máxima concentración de nitrato en un suelo arenoso, cuando el fertilizante nitrogenado se coloca en la superficie del suelo. Los datos de la Figura 6.9. muestran un gran movimiento inicial de la concentración máxima de nitrato como producto del primer riego. El movimiento en el primer día, después del riego, procede casi en la fase saturada, para continuar en los días siguientes del acuerdo al movimiento de agua en la fase no saturada. Obsérvese que el efecto de flujo de masa del segundo riego en adelante es menor, lo cual se debe al efecto de almacenamiento de agua de las camadas inmediatamente arriba de la concentración máxima de nitrato. Después del segundo riego, el movimiento de la concentración máxima sólo ocurre al movimiento capilar no saturado porque la lámina de riego no afecta directamente la máxima con-



FIGURAS 6.9 y 6.10. Avance de la concentración máxima de nitrato en función del tiempo para un ciclo de riegos en un oxisol y un suelo Arrayán (Millar et al., 1975; Millar y Arias, 1975).

centración del ión. Debido a lo anterior, es recomendable realizar un control eficiente en la aplicación de los dos primeros riegos, después de aplicado el fertilizante, con la finalidad de evitar pérdidas de nitrato por percolación. La Figura 6.10 presenta el mismo tipo de información para un suelo derivado de cenizas volcánicas (Millar y Arias, no publicado).

Comparando las Figuras 6.9 y 6.10 se observa que el avance de la máxima concentración es más rápido en el suelo arenoso que en el suelo derivado de cenizas volcánicas (franco arcilloso).

Este último tipo de información es importante en el manejo del agua de riego con el objeto de evitar pérdidas de nutrientes por exceso de aplicación de agua.

Los casos anteriormente discutidos son sólo algunos ejemplos de los muchos procesos donde se utiliza la información de conductividad capilar y difusividad de los suelos para explicar los fenómenos.

En el capítulo correspondiente a métodos de daterminación de la evapotranspiración de los cultivos se presentará el balance de agua de un perfil. Uno de los componentes del balance, drenaje de la zona radicular, es difícil de separar pero se verá que mediante el conocimiento de la conductividad capilar del suelo se puede estimar dicho componente lo cual facilita la obtención de la evapotranspiración, mediante la realización de balances de agua en parcelas experimentales. El componente de percolación es particularmente importante en suelos de textura franco arenoso a arenoso.

6.5. Referencias Bibliográficas.

[1] BOSWELL, F. C. AND O. E. ANDERSON. 1964. Nitrogen movement in undisturbed profiles of fallowed soils. Agronomy Journal 56:278–281.

[2] CARSLAW, H. S. AND J. C. JAEGER. 1947. Conduction of heat in solids. Oxford Press, London.

[3] FAO. 1973. Irrigation, drainage and salinity. London, Hutchinson and Co. Ltda.

[4] GARDNER, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Science 89(2):63–73.

[5] GARDNER, W. R. 1965. Movement of nitrogen in soil. In: W. V. Barthelomew and F. E.Clark (ed.) Soil Nitrogen. Agronomy Series 10:550–572.

[6] KEENEY, D. R. AND L. M. WALSH. 1970. The pollution problem: Part III. Nitrates in groundwater. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil

and Water Sciences, University of Wisconsin. 6 p. (Mimeographed sheets).

[7] LEVIN, H. 1964. Movement of added nitrates through soil columns and undisturbed soil profiles. Int. Congress Soil Science, Trans, 8th (Bucharest, Romania) IV:1011–1022.

[8] MILLAR, A. A., N. DUARTE y E. RIQUELME. 1975. Movimiento de nitratos en un suelo derivado de cenizas volcánicas. Turrialba 25(2):139–143.

[9] MILLAR, A. A., J. R. PEREIRA e F. LOPES FILHO. 1975. Efeito da irrigacao no movimiento de nitratos em um latossolo. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem III: 342–352.

[10] MILLAR, A. A. y E. ARIAS. 1975. Efecto del riego en el movimiento de nitratos en el perfil de un suelo derivado de cenizas volcánicas. (no publicado).

[11] RIJTEMA, P. E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Wageningem, Netherlands, Institute for Land and Water Management Research, 107 p. (Agricultural Research Report 659).

[12] STEWART, B. A. 1970. A look at agricultural practices in relation to nitrate accumulation. In: O. P. Engelstad (ed.). Nutrient mobility in soils: Accumulation and losses. p. 47-60. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of American Proceedings. (Serie de Publicaciones Especiales N' 4).

[13] TALSMA, T. 1963. The control of saline groundwater. Meded. Landbouwhogeschool, Wageningen. 63(10):1–68.

[14] THOMAS, G. W. 1970. Soil and climatic factors which affect nutrient mobility. In: O. P. Engelstad (ed.) Nutrient mobility in soils: accumulation and losses. p. 1–20. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America Proceedings. (Serie de Publicaciones Especiales N' 4).

[15] VIETS, F. G. 1967. Nutrient availability in relation to soil water. In: R.M. Hagan et al. (ed.). Irrigation of Agricultural Lands. Agronomy Series 11:458–471.

[16] WIND, G. P. 1965. A field experiment concerning capillary rise of moisture in a heavy clay soil. Netherland Journal of Agricultural Science 3:60–69.

[17] WIND, G. P. 1961. Capillary rise and some applications of the theory of moisture movement in unsaturated soils. Wageningen, Netherland, Institute for Land and Water Management Research. (Technical Bulletin 22).

[18] YOUNG, E. G. 1964. An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. Soil Science 97:307–311.

CAPITULO 7

LA PLANTA Y LA NECESIDAD DE RIEGO

El conocimiento de la respuesta fisiológica de la planta en condiciones deficientes de agua es un requisito primario para establecer cualquier programación de riego tendiente a economizar agua, sin llegar a menoscabar los rendimientos.

El agua afecta el crecimiento de la planta de varias formas. Se sabe que se necesita un grado mínimo de turgescencia para el desarrollo normal de las células (Kramer, 1963). La falta de agua cambia el curso normal de los procesos de crecimiento y diferenciación, causa el cierre prematuro de los estomas reduciendo la transpiración y la fotosíntesis, por lo tanto afecta directamente los rendimientos, causa cambios en el curso de los procesos bioquímicos tales como metabolismo de carbohidratos y nitrógeno (Denmead y Shaw, 1960; Henckel, 1964; Haise y Hagan, 1967; Kramer, 1963; Schneider y Childers, 1941; Slatyer, 1957; Slavik, 1966; Upchurch et al., 1955; Vaadia et al., 1961; Vaadia y Haise, 1967).

En la mayoría de los trabajos que se realizan no se mide el balance interno de agua de la planta, y el efecto de la falta de agua se discute sólo en términos cualitativos. Sin duda, este ha sido uno de los mayores defectos de las investigaciones en el pasado. El conocimiento de la respuesta de la planta a la deficiencia de agua ayudaría a los investigadores a hacer comparaciones cuantitativas entre especies, y a determinar el efecto producido en los procesos fisiológicos directamente conectados con calidad y rendimiento.

Teóricamente, considerando que la planta sirve como un integrador de su ambiente (agua, aire, nutrientes del suelo y condiciones atmosféricas) la información de las relaciones de agua en la planta es la mejor base para establecer la programación de los riegos (Fisher y Hagan, 1965; Hagan et al., 1957; Kramer y Brix, 1962; Mellado, 1965; Acevedo et al., 1973). Para llegar a hacer una evaluación completa es necesario conocer las correlaciones entre el contenido de agua en la planta, informaciones del suelo, condiciones atmosféricas y rendimientos. Mientras esto no sea hecho, se continuarán usando los niveles hídricos del suelo y aproximaciones meteorológicas en la

programación del agua de riego.

En el uso de la planta como indicador de la necesidad de riego, Haise y Hagan (1967) sugirieron tres aproximaciones:

a) Seleccionar un indicador de deficiencia de agua que se pueda visualizar fácilmente,
b) Medir el crecimiento de la planta con el propósito de regar antes que el retardo en crecimiento sea manifiesto, y
c) Correlacionar el crecimiento de la planta con el balance interno de agua, y hacer uso de esta información como criterio para regar.

Indicaciones visuales de la falta de agua pueden aparecer como marchitez, cambio de color, y movimiento de la planta. El uso de estos indicadores es limitado, puesto que los síntomas visibles de déficit interno puede significar que ya han ocurrido reducciones irreversibles en el rendimiento de los cultivos.

En algunos cultivos como frijol y algodón ocurre un cambio en el color de las hojas cuando el nivel de agua en la planta comienza a ser crítico. Usando esta indicación, Robin y Domingo (1956) programaron con éxito el riego de frijol en condiciones de campo.

Debido a la variación en el potencial de presión (turgescencia) de las células de la planta se producen movimientos diurnos pronunciados en las hojas. Haise y Hagan (1967) citan trabajos inéditos de California donde se regó con éxito un cultivo de sorgo, considerando sólo el ángulo de las hojas de las plantas. Mediante esta técnica se logró economizar agua de riego sin haber reducido los rendimientos.

Las medidas de crecimiento de ciertas partes de la planta pueden servir como criterio de riego (Haise y Hagan, 1967). En tal caso, el órgano seleccionado debe ser particularmente sensitivo a la deficiencia de agua. Indicadores tales como tamaño del fruto, crecimiento de las hojas, crecimiento del tallo o determinados internodos se han usado en programaciones de riego (Haise y Hagan, 1967).

La temperatura de las hojas puede servir como medio de detección de la necesidad de regar, puesto que se ha encontrado que la temperatura de las hojas es mayor en plantas deficientes en agua (Namken, 1964; Wiegand y Namken, 1966; Millar et al., 1971). El uso de termómetros infrarrojos en la obtención de la temperatura de las hojas o de la vegetación ofrecen posibilidades en el manejo del agua de riego, especialmente para grandes extensiones (Holtes, 1967).

En la literatura existen excelentes revisiones bibliográficas sobre los métodos que se pueden utilizar para medir el balance interno de agua de

la planta (Haise y Hagan, 1967; Kozlowski, 1964; Kramer, 1963; Kramer y Brix, 1962; Shaw y Laing, 1966; Slatyer, 1967; Slatyer y Shmuelt, 1967). A continuación se describen los métodos mas importantes y de mayor uso en la definición del estado hídrico de las plantas.

7.1 Criterios para Seleccionar un Método de Medida del Déficit de Agua.

Existen varios métodos para caracterizar el déficit de agua en la planta (Gardner, 1965; Kramer y Brix, 1962; Kramer, 1963; Kolowski, 1964; Barrs, 1968).

Kramer y Brix 1962 sugieren que un método satisfactorio de medida del déficit de agua debe tener las siguientes características:

a. Debe tener una buena correlación entre los procesos fisiológicos y el grado del déficit medido por el método.

b. El grado de déficit medido por el método debe tener el mismo significado fisiológico en una gran variedad de plantas.

c. Las unidades empleadas para expresar el déficit de agua y el método usado para medirlo deben ser aplicables a un amplio rango de plantas y suelos.

d. El método debe ser simple y barato tanto como sea posible.

e. Debe requerir una cantidad mínima de tejido vegetal en su medida.

Kramer y Brix (1962) también mencionan que la elección del método depende parcialmente del aspecto de la planta que se investiga en atención a que el déficit de agua provoca lo siguiente:

a. Disminución en la turgencia lo cual produce efectos tales como disminución en el alargamiento celular y cierre prematuro de los estomas,

b. Disturbio de los procesos fisiológicos tales como fotosíntesis, transpiración y translocación de metabólitos.

c. Cambios en el curso de los procesos bioquímicos tales como metabolismo de carbohidratos y nitrógeno.

La mejor medida del déficit de agua en plantas es el potencial de agua en atención a que cumple varios de los criterios enunciados y es aplicable a una variedad de plantas y de suelos donde estas se desarrollan.

En el Capítulo 1 se presenta el significado y las características termodinámicas del potencial de agua, y en el Capítulo 2 se describe el equipo necesario y los procedimientos para su medición.

7.2. Métodos de Medida del Déficit de Agua en las Plantas.

Considerando que existe una gran cantidad de métodos de medida, sólo se discuten los mas importantes y se describen sus conceptos básicos.

7.2.1. Contenido de Agua

Este método consiste en expresar el contenido de agua como porcentaje en base seca o peso fresco. El cálculo es idéntico al que se realiza en suelos para determinar el contenido de agua por el método gravimétrico. Por tratarse de tejidos esponjosos, los valores pueden sobrepasar 100 % y pueden variar considerablemente.

Considerando que el contenido de agua de los tejidos vegetales varía con la especie, órgano, edad, estación y tiempo del día, un determinado contenido de agua que represente turgencia en una espécie puede representar marchitez severa en otra especie, o aun en otra hoja de diferente edad en la misma planta.

7.2.2. Turgidez Relativa o Contenido Relativo de Agua (CRA)

La medida de la turgidez relativa fue descrita por Weatherley (1950) y posteriormente re-examinada por Barrs y Weatherley (1962). La determinación consiste en tomar discos o porciones mayores de hojas, se pesan, se colocan a flotar en agua destilada hasta que se ponen completamente turgidas. Luego se elimina el agua superficial mediante secado con papel filtro, se pesan y posteriormente se obtiene su peso seco.

Normalmente en 1,5 a 2 horas las muestras vegetales logran su máxima turgidez. Durante este período deben estar expuestas a una intensidad luminosa de aproximadamente 60 ft-c lo que representa el punto de compensación, es decir, el punto donde la tasa de fotosíntesis es igual a la tasa de respiración.

El CRA se calcula mediante la siguiente relación:

$$CRA = \frac{(Peso\ fresco\ original - Peso\ seco)}{(Peso\ a\ turgencia\ completa - Peso\ seco)} \times 100 \qquad (7.1)$$

Weatherley (1950) llamó a esta determinación Turgidez Relativa pero Ehlig y Gardner (1964) prefieren el término de Contenido Relativo de Agua porque describe más propiamente la medición.

El CRA se ha utilizado como índice de déficit (Werner, 1954; Todd et al., 1962; Millar et al., 1968; Shaw y Laing, 1966), e inclusive como indicador para programaciones de riego (Namken, 1965).

Weatherley y Slatyer (1957) propusieron establecer una relación entre CRA y potencial de agua (Ψ) con el objeto de poder estimar este último parámetro. Las implicaciones del uso de esta relación se discuten en el Capítulo 8.

Shaw y Laing (1966) establecen que las medidas de CRA dan una buena base para calibrar los déficit de tal manera que se puedan comparar períodos diferentes.

Por otra parte, Todd et al. (1962) encontraron que el CRA es un excelente indicador del grado de déficit en cereales, siendo más sensitivo que las determinaciones de humedad del suelo.

7.2.3. Déficit de Saturación (DS)

El DS es similar al CRA pero se ha calculado en forma diferente por varios autores (Kramer y Brix, 1962).

Algunos autores han calculado DS mediante la siguiente relación:

$$DS(\%) = \frac{(Peso\ a\ turgencia - Peso\ fresco\ original}{(Peso\ a\ turgencia - Peso\ seco)} \times 100 \qquad (7.2)$$

Otros investigadores lo han calculado del modo siguiente:

$$DS(\%) = \frac{(Peso\ a\ turgencia - Peso\ fresco\ original)}{Peso\ fresco} \times 100 \qquad (7.3)$$

Comparando las expresiones 7.2 y 7.1 se observa que el DS dado por la ecuación 7.2 es una expresión complementaria del CRA.

DS en términos de CRA queda como:

$$DS(\%) = 100 - CRA(\%) \qquad (7.4)$$

Johnston (1964) encontró que el DS es una medida más fidedigna y directa del déficit de agua en coníferas que las determinaciones de humedad del suelo en atención a que las especies de pino tienen la habilidad de absorber agua de la precipitación, la cual no moja el suelo.

7.2.4. Abertura Estomática

Las células estomáticas son muy sensibles al déficit de agua y un cierre prematuro de los estomas es un indicador visual de la presencia de déficits, pero es sólo una indicación general del comienzo del déficit de agua en diferentes plantas (Kramer y Brix, 1962).

La abertura estomática se puede determinar directamente mediante examen microscópico o indirectamente mediante técnicas de infiltración (Alvim y Havis, 1954), porómetro de difusión (Kanemasu et al., 1969) o medidas de transpiración (Kozlowski, 1964).

Un procedimiento que permite determinar la abertura estomática, además de la obtención de la densidad de estomas en la hoja y sus dimensiones, consiste en obtener réplicas de la superficie foliar mediante barniz de uñas (cutex). Estas réplicas se inspeccionan con un microscopio.

Es una medida altamente dependiente de las condiciones del medio, es decir, características de la relación suelo-agua, características de la planta y principalmente de las condiciones ambientales (Rojas , Millar y Valenzuela, 1971). Debido a esto se ha utilizado como indicador de las necesidades de riego.

En la década de los setenta se desarrolló el porómetro de difusión (Kanemasu et al., 1969) el cual se puede utilizar en el campo con el objeto de estimar el déficit de agua y emplearlo como guía del calendario de riego. El porómetro de difusión es más preciso y las medidas de resistencia estomática a difusión de vapor son de mayor significado físico y gran utilidad práctica ya que están intimamente relacionadas con el balance hídrico interno de la planta, crecimiento y fotosíntesis (Millar et al., 1971).

7.2.5. Detección de Radiación Beta

El método consiste en interponer una hoja de la planta entre una fuente de radiación beta (normalmente C14) y un tubo de detección Geiger. Este arreglo de fuente radioactiva y detector que se debe mantener en una posición geométrica determinada indica el cambio en la masa del material absorbente de radiación por unidad de área de la superficie de la hoja (Mederski, 1961).

Dentro de ciertos límites, la atenuación de los rayos beta a través de la materia para un radioisótopo determinado sigue una relación similar al caso de la radiación gama. Este fenómeno se puede expresar mediante la siguiente expresión exponencial:

$$I = I_o \ e^{-\mu s} \qquad (7.5)$$

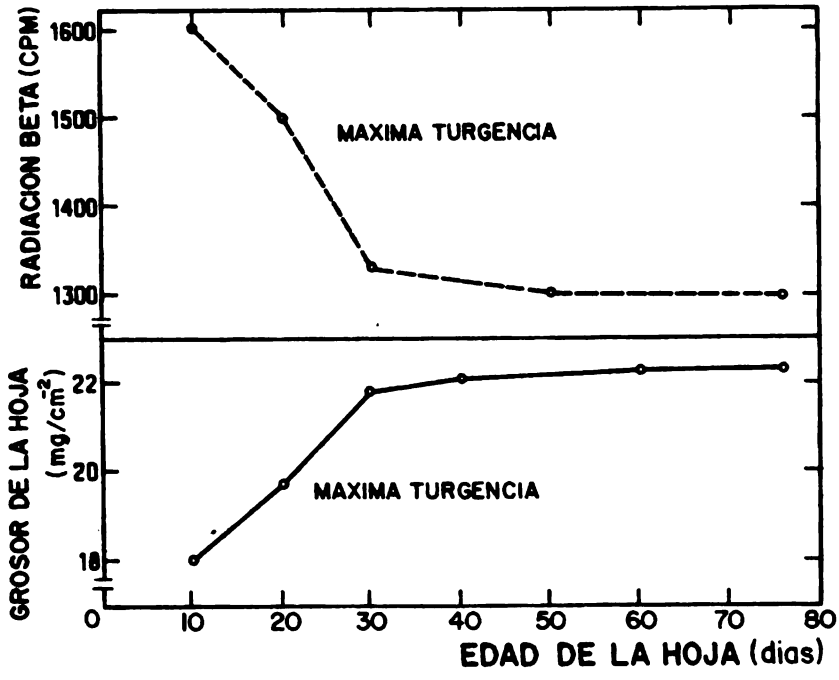


FIGURA 7.1. Variaciones del grosor de la hoja y atenuación de radiación beta con la edad de la hoja de frijol (Millar y Gardner, 1970).

donde:

I = Intensidad de la radiación transmitida (cpm)

I = Intensidad de la radiación incidente (cpm)

u = Coeficiente de absorción de masa (cm^2/mg)

x = Grosor del absorbedor (mg/cm^2)

El grosor del absorbedor en el caso de materiales vegetales se determina midiendo el peso fresco por unidad de área de la hoja. Puesto que la mayor parte del peso de la hoja se debe al agua, el cambio en contenido de agua de la hoja se reflejará en cambios de grosor lo que determinará mayor o menor atenuación de la radiación beta.

Aunque esta técnica simplemente mide los cambios en contenido de agua por unidad de área de la hoja, se puede determinar el contenido relativo de agua si se hace la calibración correspondiente. Por otra parte, si se conoce la relación entre el potencial de agua y el contenido relativo de agua, la técnica de la detección de radiación beta permite la obtención del potencial de agua.

Para calibrar estos instrumentos se deben realizar medidas simultáneas de la radiación beta (cmp) y el contenido relativo de agua de la hoja.

Este es un método indirecto que permite determinar el estado de agua de la planta en forma continua cuando se registra la información.

Debido a que se trabaja con un ente vivo que cambia de características con la edad, se ha encontrado que estos cambios que experimenta la hoja afectan la calibración de estos instrumentos (Mederski y Alles, 1968).

Con la finalidad de definir la influencia de la edad de la hoja en la calibración se detalla la información obtenida en frijol por Millar y Gardner (1970).

En la Figura 7.1 se muestra el efecto de la edad de la hoja en las medidas de radiación beta y grosor de la hoja para condiciones de turgencia completa. De esta información se deduce que el grosor de la hoja aumenta rápidamente hasta que la hoja de frijol tiene 30 días de edad. A partir de esa edad se estabiliza el grosor de la hoja a turgencia completa, lo cual implica también una estabilización de valores medidos de radiación beta.

Esto se debe principalmente a que la hoja incrementa su materia seca, además de perder sus condiciones de elasticidad.

Lo anterior implica que se obtendrán diferentes curvas de calibración dependiendo de la edad de la hoja. Esto se observa claramente en la Figura 7.2 que muestra curvas de calibración para hojas de frijol de diferentes edades (Millar y Gardner, 1970). En la Figura 7.2 se aprecia que a partir de los 30 días las hojas conservan las mismas características y se puede utilizar una sola curva de calibración.

Debido a los problemas derivados del cambio de características de la hoja, la determinación continua de los cambios de su contenido de agua no se puede realizar en una misma hoja por períodos que vayan mas allá de una semana. Por lo tanto se requieren calibraciones frecuentes.

Un tipo de calibración que elimina la atenuación de radiación beta debido a otros factores no directamente relacionados al contenido de agua, tales como variación en el grosor de la hoja por acumulación materia seca, es una calibracion relativa. El punto básico corresponde a turgencia completa (100 % CRA) de tal manera que todas las lecturas de radiación se dividen por la radiación medida cuando la hoja esta completamente túrgida. Una calibración de este tipo se muestra en la Figura 7.3 para hojas de frijol obtenidas con tubos Geiger P-10 y P-16 de la Compañía Nuclear Chicago (Millar y Gardner, 1970).

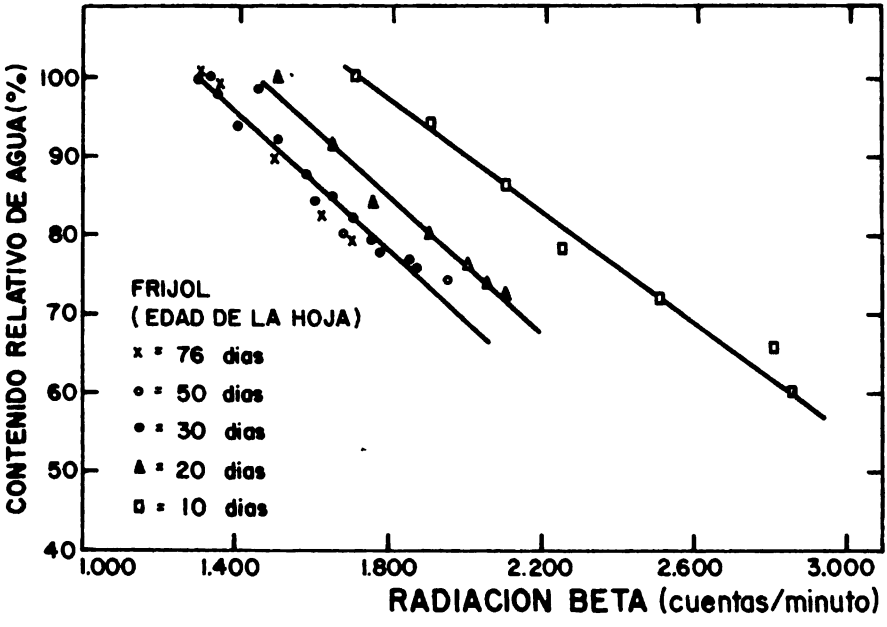


FIGURA 7.2. Influencia de la edad de hojas de frijol en la calibración de un aparato detector de radiación beta (Millar y Gardner, 1970).

La efectividad de una calibración relativa se puede constatar si se inspeccionan las curvas absolutas de calibración para hojas de frijol de diferentes edades (Figura 7.2). Se observa que las curvas de calibración son prácticamente paralelas de tal manera que si se expresan en forma relativa utilizando las lecturas de radiación para CRA de 100 %, prácticamente toda la información cae en una sola recta, eliminándose así el efecto de la edad de la hoja.

Esta técnica radioactiva se ha utilizado con éxito en varios trabajos experimentales (Mederski, 1961; Gardner y Nieman, 1964; Nakayama y Ehrler, 1964). Su mayor ventaja radica en el hecho que no es un método destructible de plantas y que permite la determinación de las variaciones del contenido de agua en forma continua. Por otra parte, si se dispone de una buena calibración de CRA versus Ψ se puede estimar el potencial de agua (Whiteman y Wilson, 1963).

7.2.6. Bomba de Presión (Scholander et al., 1965)

Este procedimiento para determinar el potencial de agua del xilema de

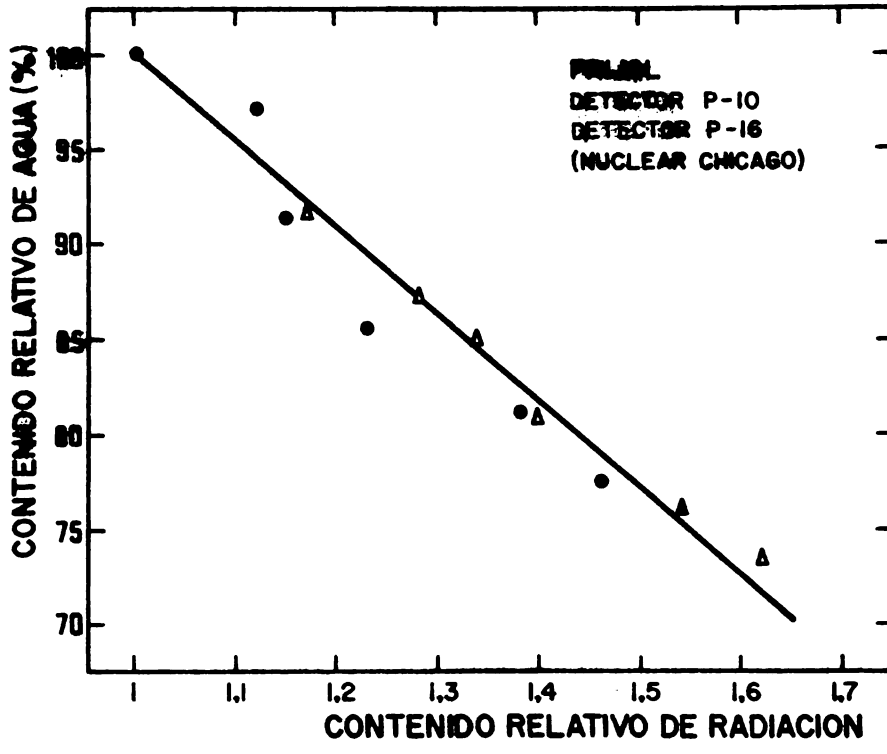


FIGURA 7.3. Curva de calibración relativa de un equipo detector de radiación beta (Millar y Gardner, 1970).

la planta, consiste en colocar una hoja en una cámara hermética (Figura 7.4).

Con el extremo del peciolo saliendo al exterior, la cámara se somete a una presión creciente y se observa el extremo del peciolo con una lupa. La presión a la cual el extremo del peciolo presenta indicios de salida de savia corresponde a la tensión del agua presente en el xilema antes que fuera cortado. Esta presión corresponde al potencial de agua del xilema.

Este método de medida es de fácil manejo y se puede realizar en condiciones de campo. Mayores antecedentes se pueden encontrar en varias publicaciones (Barra, 1968; Klepper, 1968; Queiroz Filho et al., 1975).

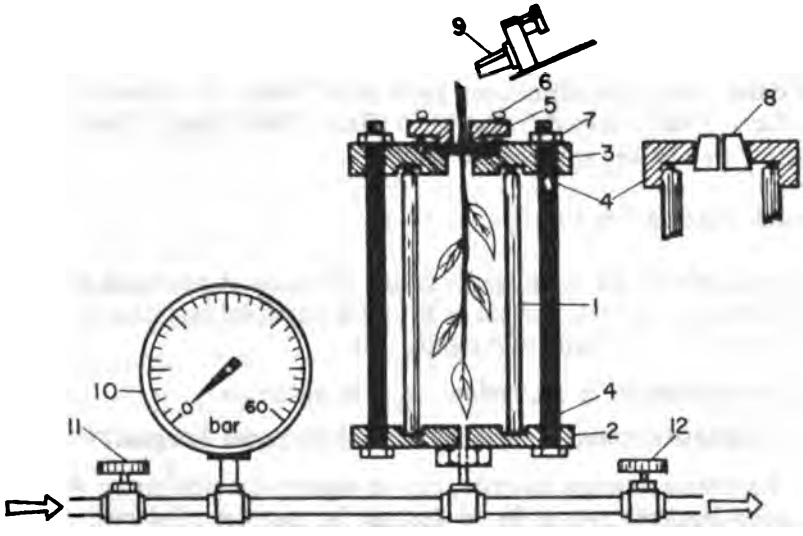


FIGURA 7.4. Componentes de la Bomba de apresión (Barra, 1968). 1: Cámara de presión, de acero, 2: Cubierta inferior, 3: cubierta superior, 4: Anillos–O, 5: Inserción sujeta con 4 tornillos (6) y utilizada para sello alrededor del tallo de la planta por medio de anillos–O (7), 8: Tapa de goma, 9: Lupa, 10: Medidor de presión, 11: Válvula de entrada, 12: Válvula de salida. Al lado derecho superior se muestra otro método para cerrar la cámara de presión y sellar el tallo de la planta.

7.2.7. Sicrómetros

Este procedimiento para determinar la humedad relativa del aire en equilibrio con el sistema, suelo o planta, permite obtener el potencial de agua, lo cual fue ampliamente abordado en el Capítulo 2.

7.3. Separación de los Componentes del Potencial de Agua.

7.3.1. Potencial Osmótico

El potencial osmótico se puede medir, entre otros procedimientos mediante el uso de sicrómetros. El material vegetal se somete a congelamiento

con lo cual se destruyen las paredes de las células, eliminándose así el potencial de presión. Luego, se determina el potencial osmótico siguiendo el mismo procedimiento descrito para medir el potencial de agua.

Existen otros procedimientos tales como índice de refracción (Davis, 1963; Barrs, 1968) y método crioscópico (Barrs, 1968; Cary y Fischer, 1969), que permitem obtener el potencial osmótico.

7.3.2. Potencial de Presión

La mayoría de los investigadores han obtenido el potencial de presión como diferencia entre el potencial de agua y el potencial osmótico en atención a que el potencial matricial es insignificante.

La sistemática de la determinación es la siguiente:

a. Mediante sicrómetros se determina el potencial de agua.

b. La misma muestra anterior, con su cámara del sicrómetro, se somete a congelamiento con el fin de destruir las paredes celulares. Con este procedimiento se elimina el potencial de presión.

c. La muestra se descongela, se coloca nuevamente la parte con cuplas del sicrómetro, se espera el equilibrio térmico y se efectúa la lectura. En este caso se obtiene el potencial osmótico.

Si se efectúa el proceso anterior para muestras con diferente déficit de agua, es posible obtener la relación entre potencial de agua y potencial osmótico como la presentada en las Figuras 1.2 y 1.3 del Capítulo 1. La diferencia entre la curva trazada a través de los puntos y la línea 1 : 1 ($\Psi = -\Psi_\pi$) corresponde al potencial de presión. Mayores antecedentes sobre el procedimiento son discutidos por Barrs (1968).

7.4. Referencias Bibliográficas.

[1] ACEVEDO, E., N. FRITSCH y K. URIU. 1973. Potencial del agua en hojas de duraznero (*Prunus persica*, Batsch) como criterio para determinar frecuencia de riego. Agricultura Técnica 33(2):94–99.

[2] ALVIM. P. DE T. AND J.R. HAVIS. 1954. An improved infiltration series for studying stmatal opening as illustrated with coffee. Plant Physiology 29,97.

[3] BARRS, H. D. 1968. Dtermination of water deficits in plant tissues, p.235–368. In: T. Kozlowski (ed.), water deficits and plant growth. Volume I: Development, control and measurement. New York, Academic Press.

[4] BARRS, H. D. AND P.E. WEATHERLEY. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. Australian J. Biol. Sci. 15(3): 413–428.

[5] CARY. J. W. AND H. D. FISHER. 1969. Plant moisture stress: A portable freezing-point meter compared with the psychrometer. Agronomy Journal 61(2):302–305.

[6] DAVIS, R. M. 1963. The refractometer reading of muskmelon leaf sap in relation to growing conditions. Proceedings of the American Society of Horticultural Science 83:599.

[7] DENMEAD, O. T. AND R. H. SHAW. 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn.Agronomy Journal 52:272—278.

[8] EHLIG. C. F. AND W. R. GARDNER. 1964. Relationship between transpiration and the internal water relations of plants. Agronomy Journal 56:127–130.

[9] GARDNER, W. R. 1965. Dynamic aspects of soil-water availability to plants. Annual Review of Plant Physiology 16:323–342.

[10] GARDNER, W. R. AND R. H. NIEMAN. 1964. Lower limit of water availability to plants. Science 143(3613):1460–1462.

[11] HAGAN, R. M., M. L. PETERSON, R. P. UPCHURCH AND L. JONES. 1957. Relationships of soil moisture stress to different aspects of growth in ladino clover. Proceedings of the Soil Science Society of America 21:360–365.

[12] HAISE, H. R. AND R. M. HAGAN. 1967. Soil, plant and evaporative measurements as criteria for scheduling irrigation. In: Irrigation of agricultural lands. R. M. Hagan, H. R. Haise and T. W. Edminster (eds.). Madison, USA, American Society of Agronomy Series 11. pp. 343–351.

[13] HENCKEL, P. A. 1964. Physiology of plants under drought. Annual Review of Plant Physiology 15:363–386.

[14] HOLTES, M. R. 1967. Infrared and multispectral sensing. Bioscience 17:376–383.

[15] JARVIS, P. G. AND R. O. SLATYER. 1966. Calibration of B gauges for determining leaf water status. Science 153(3731):78–79.

[16] JOHNSTON, R. D. 1964. Water relations of Pinus radiata under plantation conditions. Australian Journal of Botany 12:111–124.

[17] KANEMASU, E. T., G. W. THURTELL AND C. B. TANNER. 1969. Design, calibration and field use of stomatal diffusion porometer. Plant Physiology 44(6):881–885.

[18] KLEPPER, B. 1968. Diurnal pattern of water potential in woody plants. Plant Physiology 43:1931.

[19] KOZLOWSKI, T. T. 1964. Water metabolism in plants. New York, Harper and Row, Publishers, pp. 26–65.

[20] KRAMER, P. J. 1963. Water stress and plant growth. Agronomy Journal 55:31–35.

[21] KRAMER, P. J. AND H. BRIX. 1962. Measurement of water stress in plants. In: Methodology of Plant Eco-physiology. Proceedings of Montpellier Symposium. In: F. E. Eckardt (ed.), UNESCO, Paris, Arid Zone Research 25:343–351.

[22] MEDERSKI, H. J. 1961. Determination of internal water status of plants by beta ray gauging. Soil Science 92(2):143–146.

[23] MEDERSKI, H. J. AND W. ALLES. 1968. Beta gauging leaf water status: Influence of changing leaf characteristics. Plant Physiology 43:470–472.

[24] MELLADO, M. A. 1965. Síntomas fisiológicos de algunos cultivos como indicadores de necesidad de riego. Chillán, Chile, Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Tesis de Grado. 135 p.

[25] MILLAR, A. A., M. E. DUYSEN AND G. E. WILKINSON. 1968. Internal water balance of barley under soil moisture stress. Plant Physiology 43:968–972.

[26] MILLAR, A. A., R. E. JENSEN AND A. BAUER. 1971. Influence of the environmental parameters on the leaf water status of barley plants. Agricultural Meteorolgy 8:93–105.

[27] MILLAR, A. A. AND W. R. GARDNER. 1970. Influence of changing leaf characteristics on the calibration of beta ray gauging apparatus for measuring leaf water status. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin (unpublished).

[28] MILLAR, A. A., W. R. GARDNER AND S. M. GOLTZ. 1971. Internal water status and water transport in seed onion plants. Agronomy Journal 63:779–784.

[29] NAKAYAMA, F. S. AND W. L. EHRLER. 1964. Beta ray ganging technique for measuring leaf water content changes and moisture status of plants. Plant Physiology 39:95–98.

[30] NANKEM, L. N. 1964. The influence of crop environmento on the internal water balance of cotton. Proceedings of the Soil Science Society of America 28:12–15.

[31] NANKEM, L. N. 1965. Relative turgidity technique for scheduling cotton irrigation. Agronomy Journal 57:38–41.

[32] QUEIROZ FILHO, S.C., A. A. MILLAR e P. T. ALVIM. 1975. Micrometeorologia de videira sob condicões de deficiencia hídrica. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, III:434–439.

[33] ROBIN, J. S. AND C. E. DOMINGO. 1956. Moisture deficits in relation to the growth and development of dry beans. Agronomy Journal 48:67–70.

[34] OLSTON, D. E. AND M. L. HORTON. 1968. Two beta sources compared for evaluating water status of plants. Agronomy Journal 60:333–336.

[35] SCHNEIDER, G. W. AND N. F. CHILDERS. 1941. Influence of soil moisture on photosynthesis, respiration and traspiration of apple leaves. Plant Physiology 16:565–583.

[36] SHAW, R. H. AND D. R. LAING. 1966. Moisture stress and plant response. In: Plant environment and efficient water use. W. H. Pierre (ed.), American Society of Agronomy, Madison, USA. pp. 73–94.

[37] SLATYER, R. O. 1957. The influence of progressive increases in total soil moisture stress on transpiration, growth, and internal water relationships of plants. Australian Journal of Biological Science 10:320–336.

[38] SLATYER, R. O. 1967. Plant-water relationships. New York, Academic Press Inc. pp. 274–282.

[39] TODD, W. G., F. W. INGRAM AND C. A. STUTTE. 1962. Relative turgidity as an indicator of drought stress in cereal plants. Proceedings Oklahoma Academy of Science 42:55–60.

[40] UPCHURCH, R. P., M. L. PETERSON AND R. M. HAGAN. 1955. Effect of soil moisture content on the rate of photosynthesis and respiration in ladino clover (*Trifolium repens* L.). Plant Physiology 30:297–303.

[41] VAADIA, Y., F. C. RANEY AND R. M. HAGAN. 1961. Plant water deficits and physiological processes. Annual Review of Plant Physiology 12:265–292.

[42] VAADIA, Y. AND Y. HAISE. 1967. Physiological process as affected by water balance. In: Irrigation of agricultural lands. R. M. Hagan, H. R. Haise, and T. W. Edminster (eds.). American Society of Agronomy Series 11, Madison, USA. pp. 354–372.

[43] WEATHERLEY, P. E. 1950. Studies in the water relations of the cotton plant. I. The filed measurement of water deficits in the leaves. New Phytology 49:81–97.

[44] WEATHERLEY, P. E. AND R. O. SLATYER. 1957. Relationship between relative turgidity and diffusion pressure deficit in leaves. Nature 179:1085–1086.

[45] WERMER, H. O. 1954. Influence of atmospheric and soil moisture conditions on diurnal variations in relative turgidity of potato leaves. Research Bulletin Nebraska Agricultural Experiment Station 176.

[46] WHITEMAN, P. C. AND G. L. WILSON. 1963. Estimation of diffusion pressure deficit by correlation with relative turgidity and beta radiation absorption. Australian Journal of Biological Sciences 16:140–146.

[47] WIEGAND, C. L. AND L. N. NAMKEM. 1966. Influence of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperature. Agronomy Journal 58:582–586.

CAPITULO 8

EL AGUA EN LA PLANTA Y EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA

El sistema suelo-agua-planta es un sistema dinámico puesto que el agua en la planta rara vez se encuentra en equilibrio con el agua del suelo. El potencial en la planta debe ser menor (más negativo) que el potencial de agua del suelo, provocándose un gradiente, para que el agua se mueva desde el suelo a la planta.

Este gradiente de potencial entre la planta y el suelo depende de la demanda atmosférica impuesta sobre la planta y de las propiedades conductoras del suelo y de la planta.

La magnitud del déficit interno de agua diario en la planta es determinado por el valor efectivo del potencial de agua en el suelo, y por el grado de desfase en que la absorción de agua permanece atrás de la transpiración debido a la variación de la demanda atmosférica durante el día (Slatyer, 1967). Cuando el potencial de agua en el suelo es alto (menos negativo) y está lejos de un nivel crítico, el déficit de agua en la planta depende exclusivamente de las condiciones atmosféricas. Cuando el potencial de agua en el suelo disminuye (más negativo) y ultrapasa el nivel crítico, entonces se transforma en el factor controlador del potencial de agua en la planta (Weatherly, 1951).

El aspecto más importante de la relación planta-agua es el balance interno, debido a que controla procesos fisiológicos y bioquímicos, además de determinar la cantidad y calidad del crecimiento y producción de la planta (Kramer y Brix, 1962; Kramer 1963). En la Figura 8.1 se muestra en forma esquemática el efecto del déficit de agua sobre varios procesos de la planta (Hsiao, 1973). Se observa que la mayoría de los procesos fisiológicos han sido afectados cuando la planta alcanza el nivel de marchitez permanente.

El manejo del riego en los cultivos, en la mayoría de los casos, se realiza a través del balance de agua de la zona radicular sin considerar adecuadamente la respuesta de la planta a las condiciones de agua del suelo, y de la atmosfera. La planta al integrar las condiciones del ambiente suelo-atmósfera, es el mejor índice de las necesidades de riego.

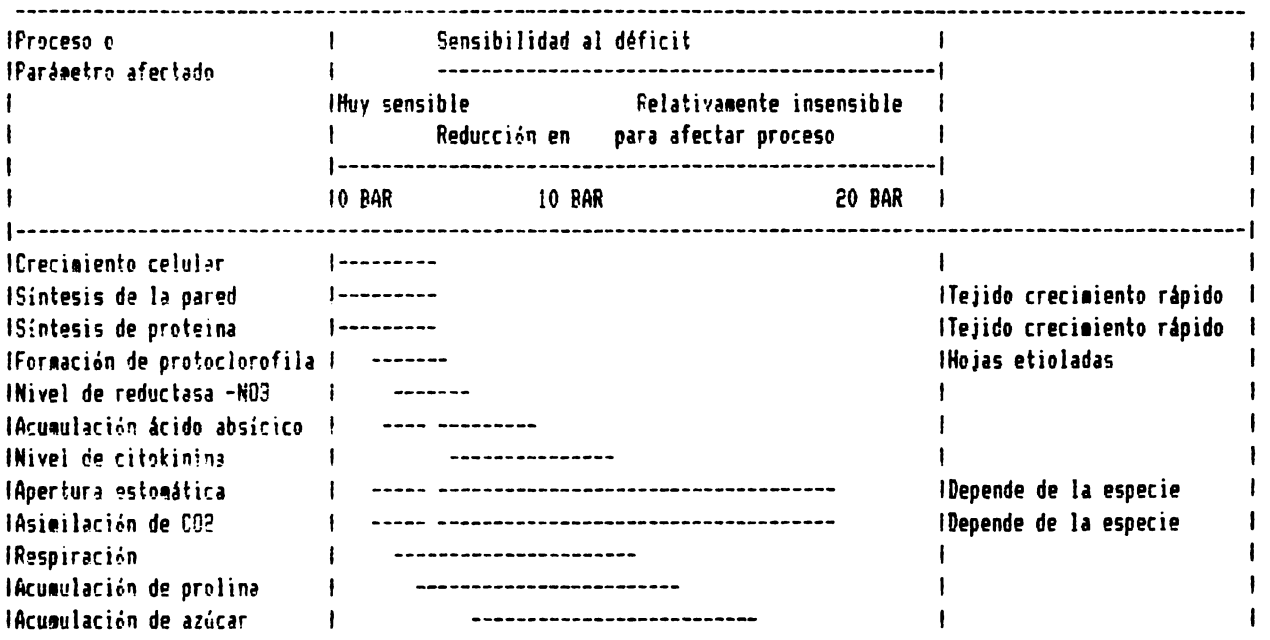
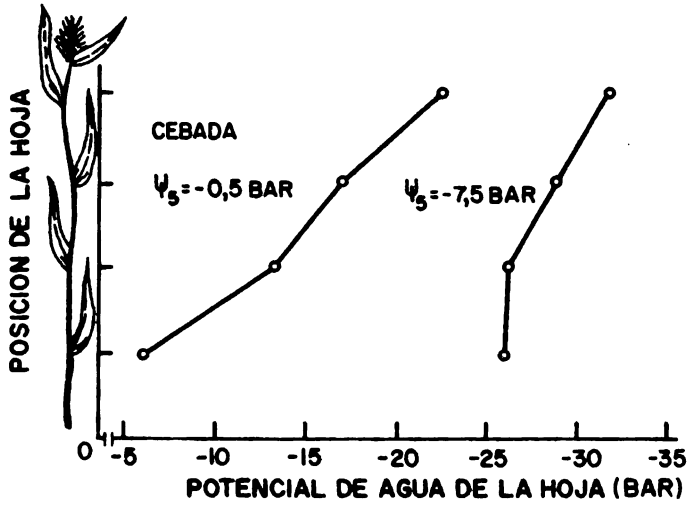


FIGURA 8.1. Representación esquemática generalizada de la sensibilidad de algunos procesos o parámetros de la planta al déficit de agua (Hsiao, 1973).



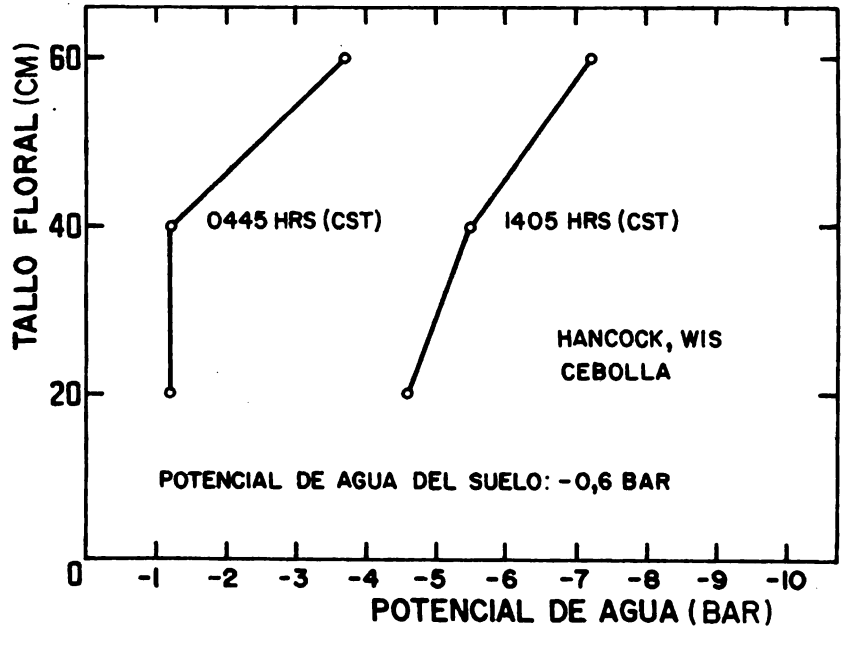


FIGURA 8.2. Perfiles de potencial de agua en cebada y cebolla (Millar et al., 1968; Millar et al., 1971).

Existen varios parámetros hídricos de la planta que podrían ser usados como indicadores, los cuales se discutieron en el Capítulo 7.

En este Capítulo se muestran los tipos de relaciones hídricas más usados para caracterizar la condición de agua en la planta y su relación con el agua existente en el suelo.

8.1. Relaciones Hídricas en la Planta.

8.1.1. Variación del Potencial de Agua en la Planta

En general, las hojas superiores de una planta presentan potenciales de agua menores (más negativo) que las hojas inferiores, lo cual es una condición necesaria para proveer un gradiente para que el agua se mueva a través de la planta, de acuerdo a la ley de Darcy. En la Figura 8.2 se muestran los perfiles para plantas de cebada y cebolla (Millar et al., 1968; Millar et al., 1971). La forma de los perfiles depende de las características estructurales de la planta, resistencia de la planta y componentes al flujo de agua, índice de área foliar (IAF) y características de los perfiles microclimáticos. Los perfiles de Ψ son más normalizados a bajos valores de IAF debido a la mayor circulación del aire en la zona del cultivo y a la penetración de la radiación solar. A medida que aumenta el IAF se producen alteraciones acentuadas en los perfiles de viento, humedad del aire, temperatura y radiación, variando la demanda atmosférica a diferentes niveles del cultivo. Por otra parte las diferencias en radiación provocan una variación en la temperatura de la planta y luminosidad, variando la abertura de los estomas (Millar, 1972). Debido a la variación de Ψ en la planta, en investigaciones de la relación suelo-agua-planta debe tomarse el cuidado de realizar las determinaciones siempre en hojas de la misma posición.

Otras informaciones sobre perfiles de Ψ son presentadas por Begg y Turner (1970) para tabaco, por Rojas et al. (1972) para frijol, maravilla y ballica, por Queiroz et al. (1975) para vid, por Schepherd (1964) para trébol rosado y por Millar et al. (1971) para cebollas.

8.1.2. Curva de Retención de Agua

En forma similar al caso de suelos, la curva de retención de agua en material vegetal es la relación existente entre Ψ y el contenido relativo de agua (CRA). Weatherley y Slatyer (1957) propusieron establecer esta relación para inferir Ψ a través de la determinación del CRA, el cual es fácilmente medible.

En la Figura 8.3 se muestra la curva de retención de agua para hojas de varias especies y en la Figura 8.4 para hojas de cebada y alfalfa. En general,

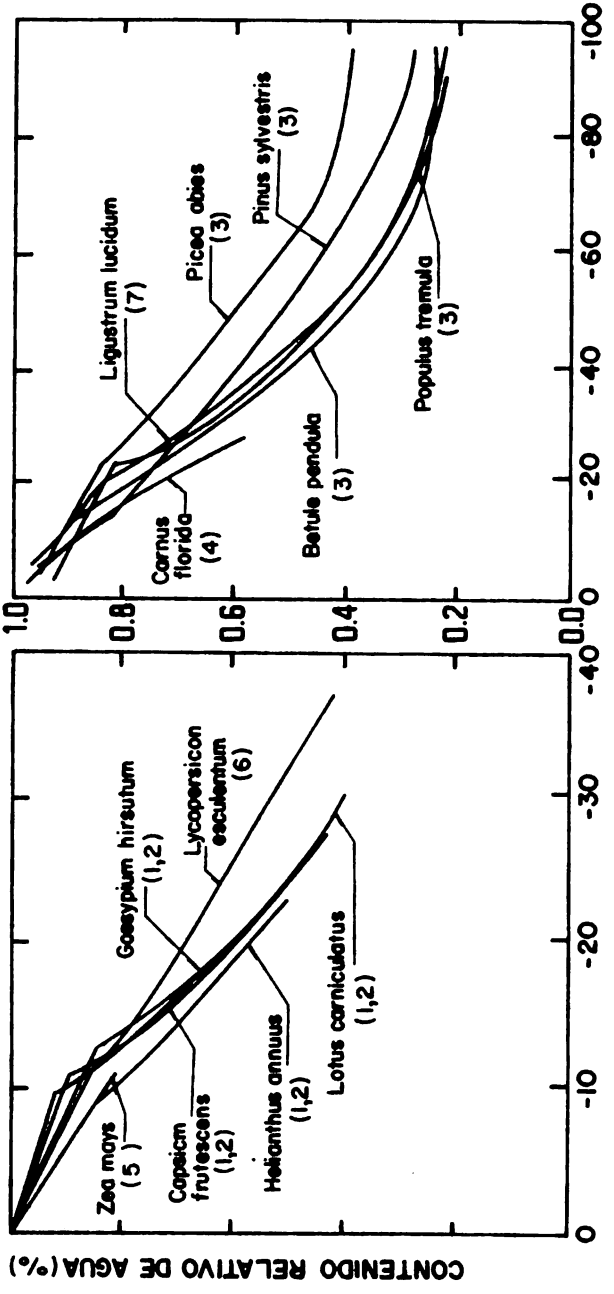


FIGURA 8.3 Curvas de retención de agua en plantas (1: Ehlig, 1964; 2: Ehlig y Gardner, 1964; 3: Jarvis y Jarvis, 1963; 4: Knipling, 1963; 5: Shinn y Lemon, 1962; 6: Shatyer, 1957; Weatherley y Shatyer, 1957).

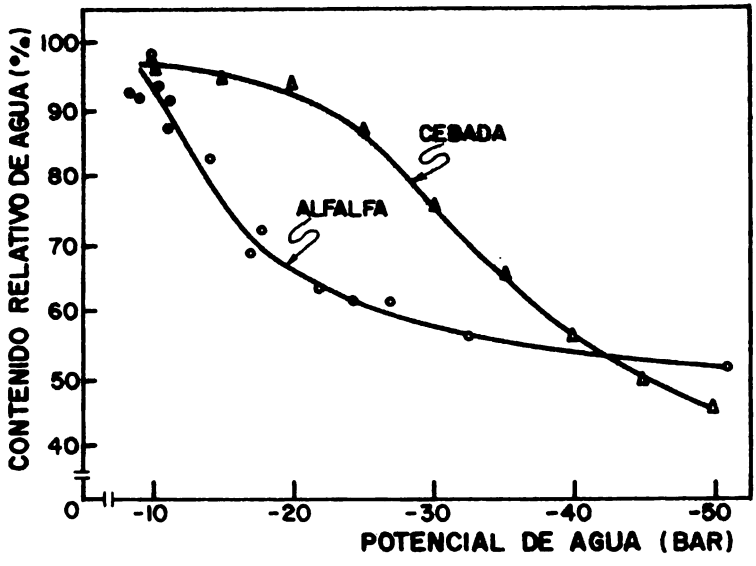


FIGURA 8.4. Curvas de retención de agua en cebada (Millar et al., 1968) y alfalfa (Millar, 1967–no publicado).

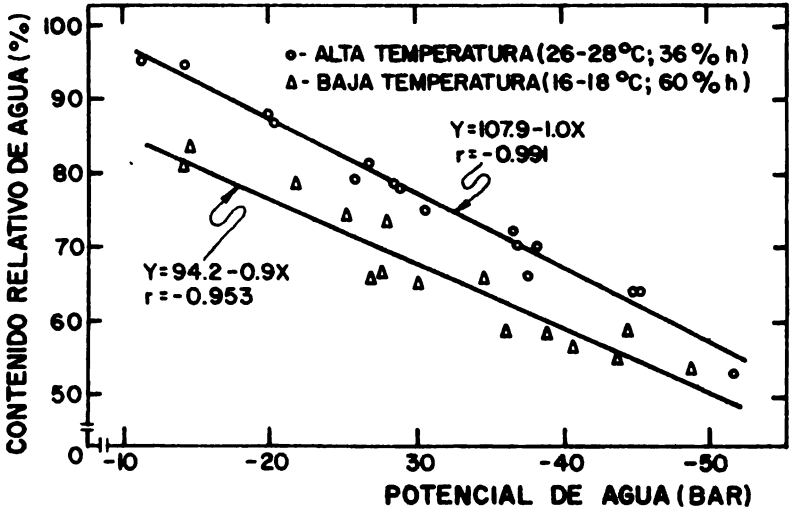


FIGURA 8.5. Curva de retención de agua en hojas de cebada para dos condiciones ambientales (Millar et al., 1968).

el Ψ disminuye (más negativo) a menores valores de (CRA). La forma de la relación varía para diferentes especies con la edad de las hojas y condiciones ambientales (Kramer y Brix, 1962; Ehlig y Gardner, 1964; Knipling, 1967; Millar et al., 1968; Slatyer, 1967).

Knipling (1967) encontró que Ψ disminuía (más negativo) para un valor determinado de CRA bajo condiciones de alta intensidad luminosa y demanda atmosférica. Millar et al. (1968) observaron un cambio en la relación Ψ–CRA de cebada cuando se aumentaba la temperatura del aire y se disminuía la humedad relativa (Figura 8.5). Aparentemente, las plantas crecidas en ambientes de alta temperatura y baja humedad relativa presentan cambios fisiológicos y morfológicos. En ambientes secos, se producen cambios en la elasticidad de las células, cantidad del material celular, y potencial osmótico.

Existe bastante información publicada sobre la relación CRA y Ψ. Entre otras, para tomate (Weatherley y Slatyer, 1957; Slatyer 1967), y para pimiento, algodón, maravilla y trébol (Gardner y Ehlig, 1965). Esta relación también ha sido usada para obtener Ψ a través de medidas "in situ" de la espesura de las hojas con equipos de radiación beta (Whiteman y Wilson, 1963).

8.1.3. Relaciones entre Potenciales de Agua, Osmótico y de Presión

En el Capítulo 1, sobre terminología termodinámica, se hizo referencia a las relaciones entre Ψ, ψ_π y ψ_p en plantas, y en el Capítulo 7 se indicó el procedimiento más usado para la determinación de estos potenciales en la planta.

La relación entre potencial de agua y potencial osmótico en plantas depende de la especie y de las condiciones salinas del suelo y de la planta (Gardner y Ehlig, 1965; Gardner y Ehlig, 1964). En la Figura 8.6 se muestra la relación entre Ψ y ψ_π en hojas de cebada (Millar et al., 1970). Esta relación es característica en todas las plantas siendo que la mayor diferencia se encuentra en los valores de ψ_π cuando $\Psi = 0$. La mayor parte de la información existente en la literatura para algodón, pimiento, maravilla y trébol (Gardner y Ehlig, 1965), cebada (Millar et al., 1970) y pimiento (Barra, 1968) muestran que $\psi_\pi \approx -10$ bar cuando $\Psi = 0$, excepto en algunas especies como cebolla donde $\psi_\pi \approx -4$ bar cuando $\Psi = 0$ (Millar et al., 1971).

La información graficada, como en la Figura 8.6, permite obtener el potencial de presión, como se indica en el Capítulo 7. La línea de 45 grados indica la igualdad entre Ψ y ψ_π. La distancia vertical entre la línea de 45 grados y la curva experimental indica el potencial de presión (ψ_p) o presión de turgencia. El potencial de presión es normalmente positivo en plantas

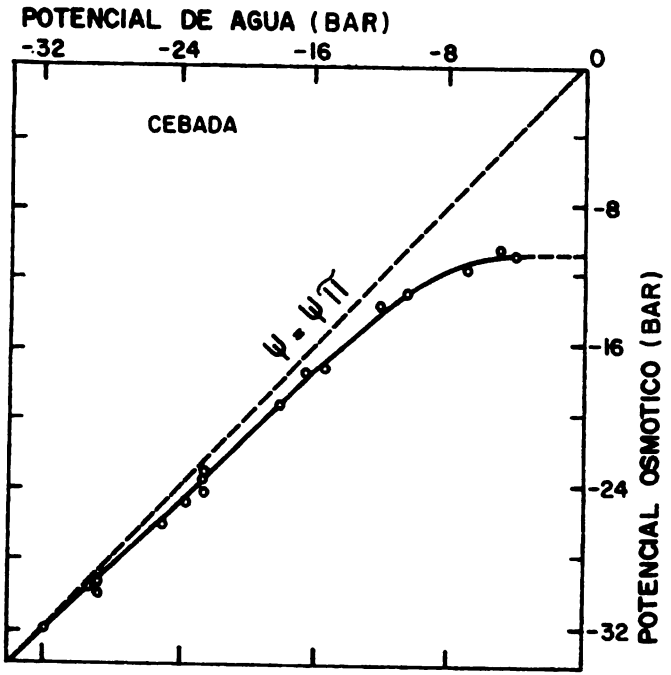


FIGURA 8.6. Relación entre potencial de agua y potencial osmótico (Millar et al., 1970).

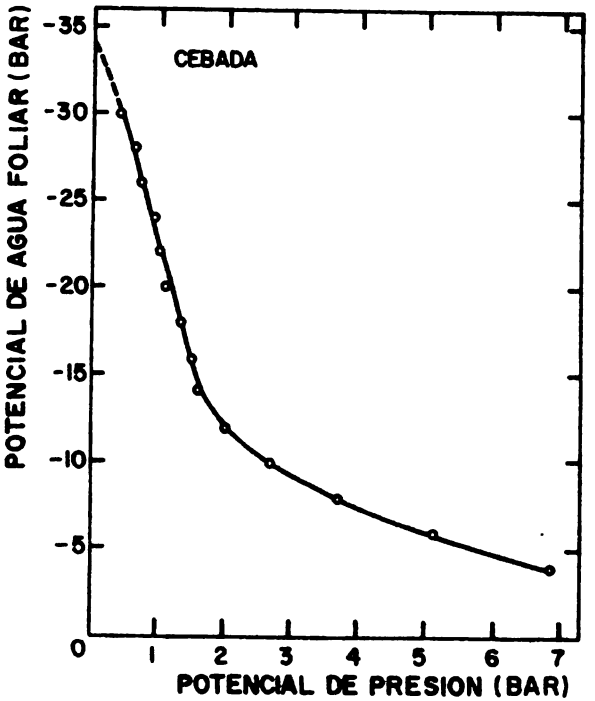


FIGURA 8.7. Relación entre el potencial de agua y el potencial de presión (Millar et al., 1970).

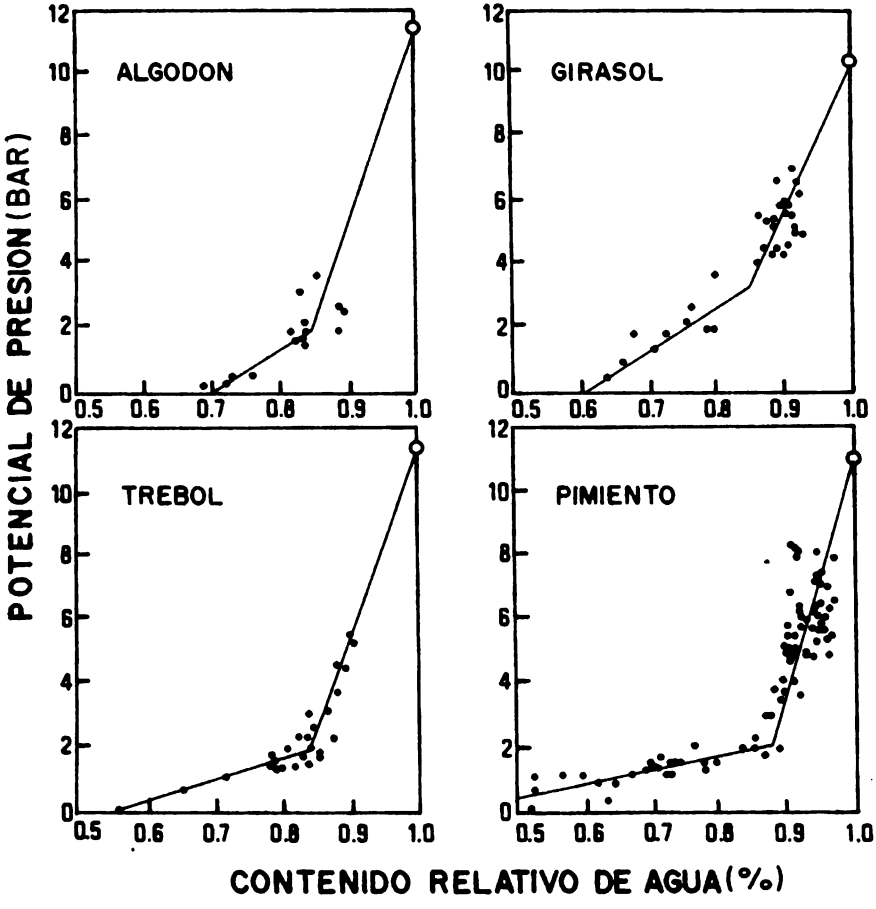


FIGURA 8.8. Potencial de presión de hojas de algodón, girasol, trébol y pimiento en función del contenido relativo de agua (Ehlig y Gardner, 1965).

que crecen en ambientes normales, pero también puede ser negativo, como en plantas que crecen en ambientes salinos (Gardner y Ehlig, 1964).

La individualización de los componentes de Ψ permite que puedan graficarse otras relaciones como Ψ y ψ_p (Figura 8.7).

La mayoría de las plantas operan a bajos valores de ψ_p, siendo que algunas especies como cebolla, regulan el sistema estomático, controlador de

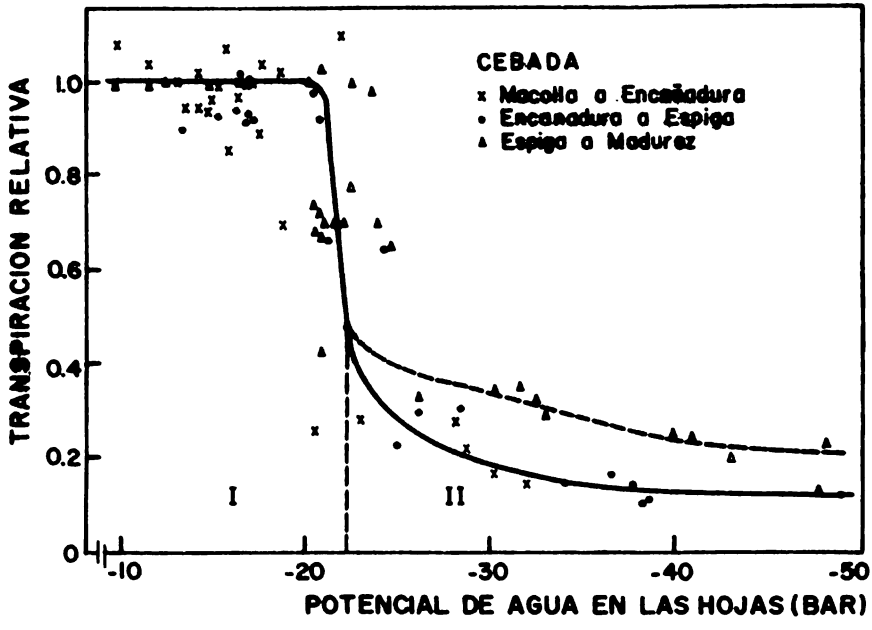


FIGURA 8.9. Transpiración relativa de cebada en función del potencial de agua de las hojas en tres períodos fenológicos (Millar et al., 1968).

las pérdidas de agua, a valores de ψ_p menores de 1 bar (Millar et al., 1971).

La importancia del conocimiento de los componentes de Ψ y sus relaciones, radica en el hecho que son indicaciones directas de la respuesta de la planta a las condiciones del medio y que pueden ser relacionadas con otros parámetros de la planta que controlan los procesos de transpiración y fotosíntesis, y por ende producción.

8.1.4. Relación entre Potencial de Presión y Contenido Relativo de Agua

El potencial de presión disminuye a medida que decrece el contenido de agua en la planta siguiendo una relación que es característica para la mayoría de las especies. En la Figura 8.8 se muestra la relación entre ψ_p y CRA para cuatro especies (Gardner y Ehlig, 1965). El ψ_p disminuye rápidamente a medida que el CRA decrece.

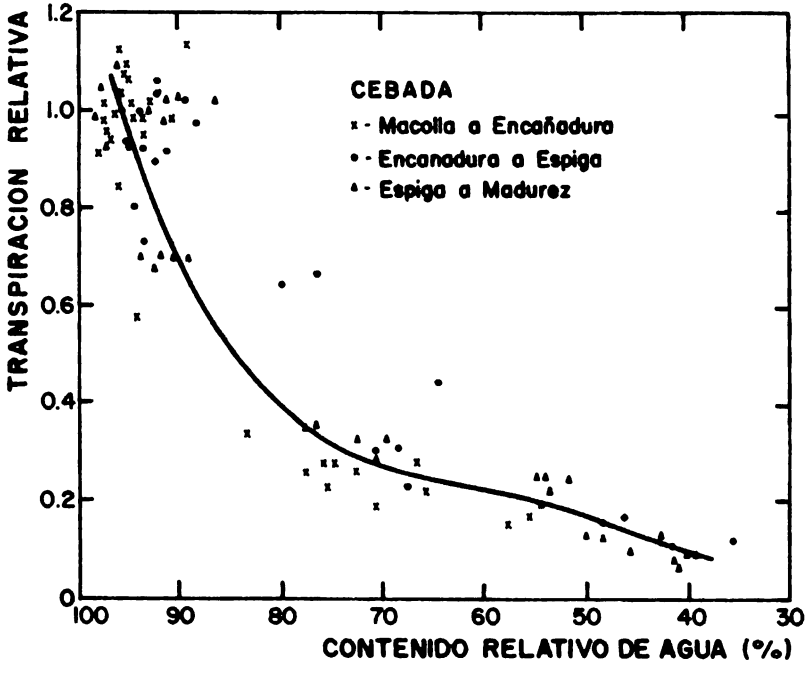


FIGURA 8.10. Transpiración relativa de cebada en función del contenido relativo de agua de las hojas (Millar et al., 1970).

A valores de CRA de aproximadamente 85 % se produce un cambio acentuado de pendiente, lo que Gardner y Ehlig (1965) relacionan con un cambio en el módulo de elasticidad del tejido vegetal. Este cambio se produce a valores de aproximadamente 2 bar de ψ_p, lo cual también fue observado en cebada (Millar et al., 1970), sólo que a valores de 95 % de CRA.

8.1.5. Transpiración en Función de Ψ y CRA

La relación entre transpiración y potencial de agua toma una forma característica como indicado en la Figura 8.9 (Millar et al., 1968). Esta relación depende de las condiciones de demanda atmosférica, de la respuesta de los estomas (resistencia estomática) al potencial de agua, y de las características transmisoras del sistema suelo-planta (resistencia al flujo de agua). De esta forma, y dependiendo de la especie, la relación tiene dos fases bien definidas. La fase I depende exclusivamente de la demanda atmosférica, mientras que la

fase II depende de la resistencia al flujo de agua del sistema suelo-planta. De acuerdo con la especie, la transición entre las fases puede ser abrupta, como en la Figura 8.9, indicando que la resistencia estomática al flujo de vapor aumenta considerablemente. Esta relación permite estimar el potencial de agua al cual se produce el cierre de los estomas. No obstante, ello queda mejor definido a través de la relación entre resistencia estomática y potencial de agua, la cual es más difícil de obtener.

La transpiración de la planta disminuye a medida que decrece el contenido relativo de agua, como indicado en la Figura 8.10. Esta relación es altamente dependiente de la demanda evaporativa y de la densidad radicular. Cuando la demanda evaporativa es alta, se observan bajas tasas de transpiración en el rango de humedad aprovechable, lo cual se debe al desfase en la absorción de agua por las raíces (Idso, 1968). Cowan (1965) resolvió la ecuación de flujo para movimiento de agua en el suelo hacia las raíces en condiciones de baja densidad radicular y demostró que la transpiración se reduce a altos valores de agua en el suelo. En condiciones de alta densidad radicular, la transpiración es casi completamente independiente de las condiciones de humedad hasta un valor límite que depende de la demanda atmosférica y de las características transmisoras del suelo.

8.1.6. Resistencia Estomática en Función del Potencial de Agua

La relación entre resistencia estomática y potencial de agua, como mostrada en la Figura 8.11, es importante en la definición de modelos de transpiración para el contínuo suelo-planta-atmósfera.

Esta es una relación que depende de la intensidad de luz (Kanemasu et al., 1969) y de la temperatura de la planta (Queiroz et al., 1975). Por otra parte, dependiendo de la especie, los estomas del haz y del envés de la hoja responden en forma diferente al potencial de agua. Kanemasu et al. (1969) por ejemplo, encontraron que los estomas del haz de las hojas de frijol eran más sensitivos al déficit de agua que los estomas del envés, en cambio Pallas et al. (1967) encontraron que los estomas del haz y envés se cerraban simultáneamente.

La Figura 8.11 muestra que existe un determinado valor de potencial de agua, que depende de la especie, al cual se cierran los estomas con un aumento abrupto en la resistencia estomática. La parte más relevante de este tipo de gráfico es el rango de potencial de agua en el cual operan los estomas. En el Cuadro 8.1 se incluye el potencial de agua crítico y la resistencia estomática observada en algunas especies.

La planta controla el flujo de transpiración abriendo o cerrando los estomas, en respuesta a cambios de potencial de agua, principalmente, de su

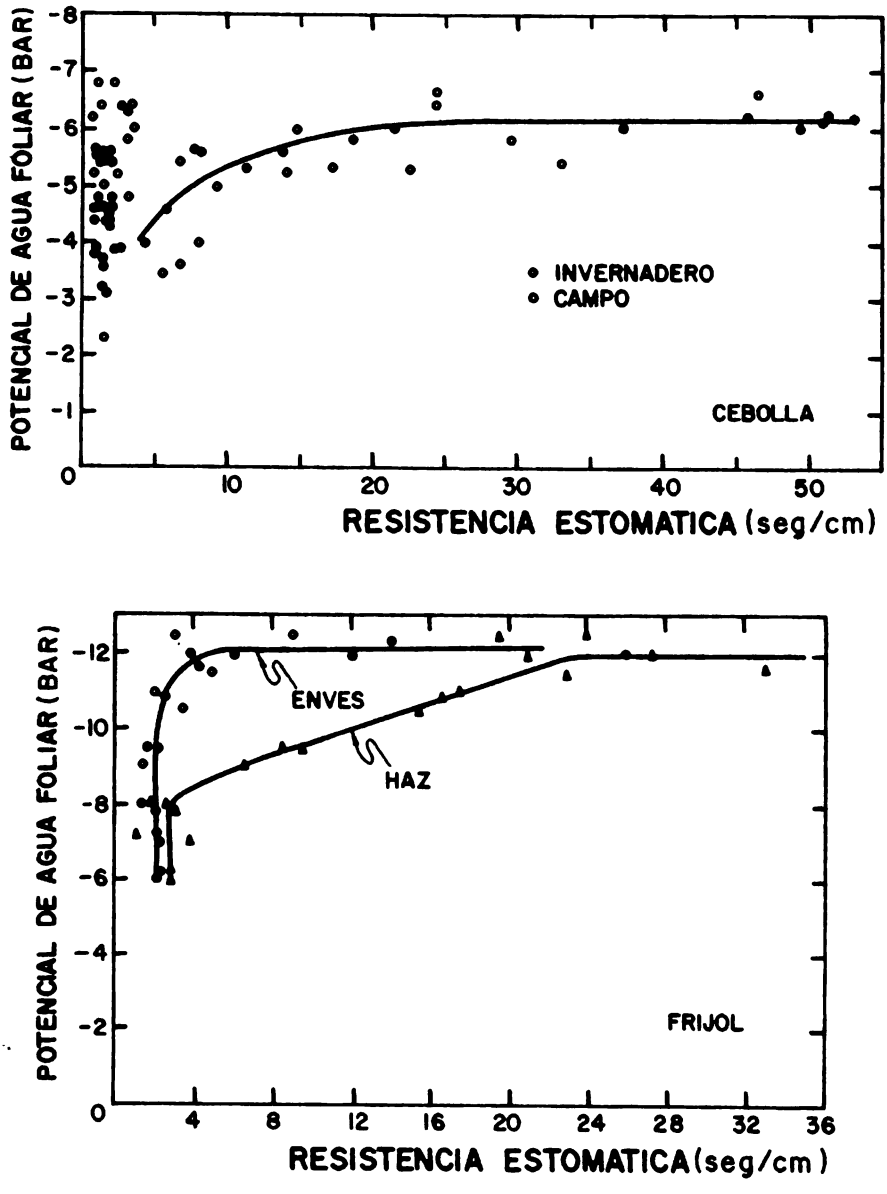


FIGURA 8.11. Relación entre la resistencia estomática y el potencial de agua en hojas de cebolla y frijol (Millar et al., 1971; Kanemasu y Tanner, 1969).

CUADRO 8.1. Relación entre el potencial de agua crítico y resistencia estomática observada en algunas especies.

Cultivo	Potencial de Agua crítico (BAR)	Resistencia Estomática (seg/cm)	Referencias
Tomate	-10 a -12	>12	Duniway (1971)
Cebolla	-5 a -7	>10	Millar et al (1971)
Frijol	-12 a -14	>4	Kanemasu et al (1969)
Maíz	-9 a -11	>1,5	Beadle et al (1973)
	-9	>1,5	Dubé et al (1974)
Sorgo	-12 a -14	>1,5	Beadle et al (1973)
	-13 a -16	>4	Fereres et al. (1978) /1-
Algodón	-18 a -22	>10	Brown et al. (1976)

/1- Physiologia Plantarum 44:261-267.

componente de potencial de presión o presión de turgencia (Kanemasu et al., 1969; Millar at al., 1971). A altos valores de potencial de presión aumenta la resistencia estomática debido a la presión mecánica aplicada por las células subsidiarias. Existe un cambio abrupto en la elasticidad de las paredes celulares de varias especies a potenciales de presión de cerca de 2 bar (Gardner y Ehlig, 1965), siendo que a este potencial de presión se observa marchitez en algunas especies (Kanemasu et al., 1969).

8.1.7. Conductancia Estomática y los Potenciales de Agua y de Presión

La relación entre conductancia estomática y los potenciales de agua y de presión, como mostrado en la Figura 8.12 para cebolla (Millar et al, 1971), es una forma diferente de presentar la información de la Figura 8.13. La conductancia estomática es el recíproco de la resistencia estomática. La importancia del uso de esta relación radica en el hecho que los estomas son el camino normal del flujo de vapor de agua (transpiración) y del flujo de CO_2, material básico en el proceso de fotosíntesis, de tal forma que se puede estudiar la relación entre transpiración y fotosíntesis.

La conductancia estomática decrece casi linealmente con la disminución del potencial de agua. Al igual que la relación de la Figura 8.10, esta relación depende de aquellos factores que afectan los estomas, como ser la luz, temperatura y concentración de CO_2 (Meidner y Mansfield, 1969; Ketellaper, 1963).

La relación entre conductancia estomática y potencial de presión (Figura 8.12) varía con la especie y es función de los factores ambientales antes mencionados. En general, la conductancia estomática aumenta rápidamente con el aumento del potencial de presión. Normalmente, un cambio reducido en el potencial de presión produce un cambio apreciable en la conductancia estomática. Esto implica también que el flujo de CO_2 es restringido marcadamente con pequeños cambios en el potencial de agua.

Datos de Kanemasu y Tanner (1969) rearreglados por Gardner (1969) demuestran que la conductancia de fríjol es cerca de 3 veces menor que la de cebolla (Millar et al., 1971) en los mismos rangos de potencial de presión, indicando por tanto, que la cebolla es más sensitiva al déficit de agua que el fríjol.

8.2. El Agua del Suelo y las Relaciones Hídricas de la Planta.

8.2.1. Transpiración en Función del Agua del Suelo

Esta relación es altamente dependiente de las condiciones de demanda atmosférica. En condiciones de alto contenido de agua en el suelo, la tasa

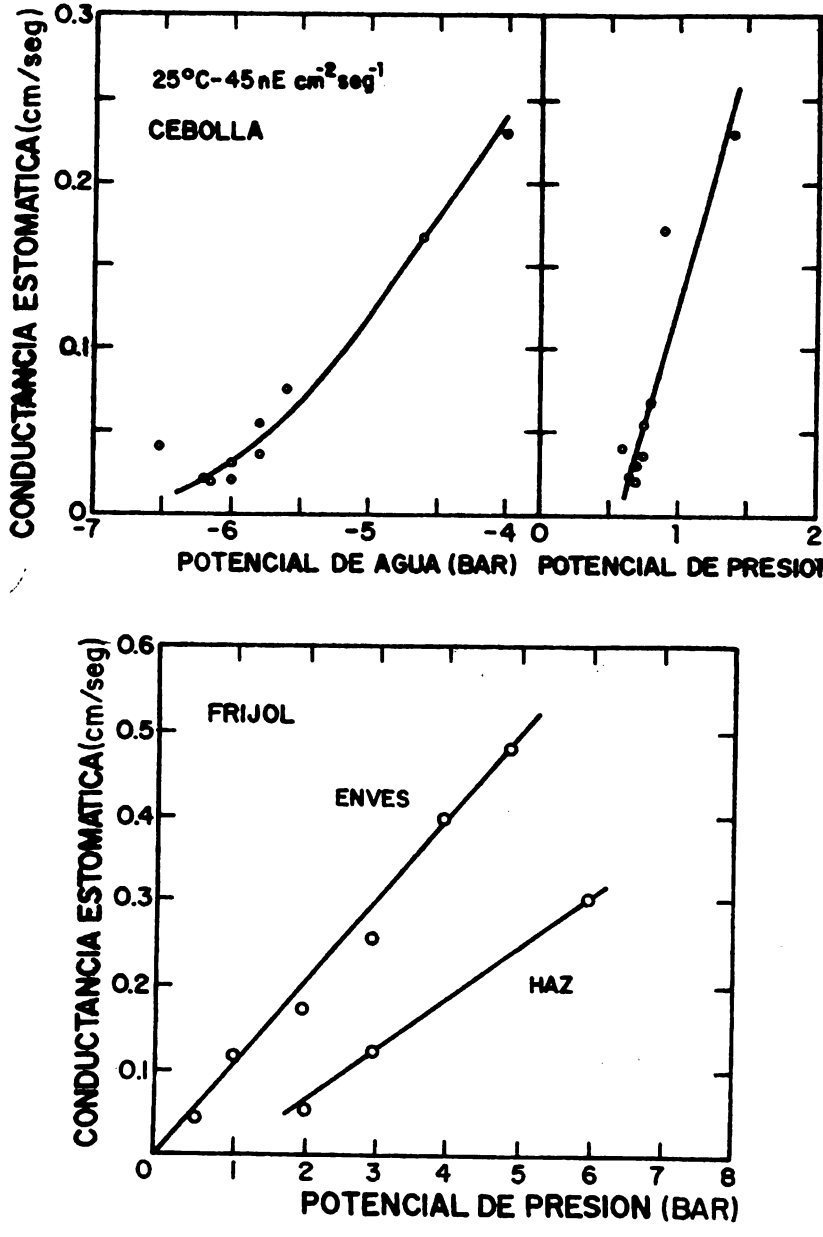


FIGURA 8.12. Relación entre la conductancia estomática y el potencial de presión en hojas de cebolla y frijol (Millar et al., 1971; Gardner, 1969).

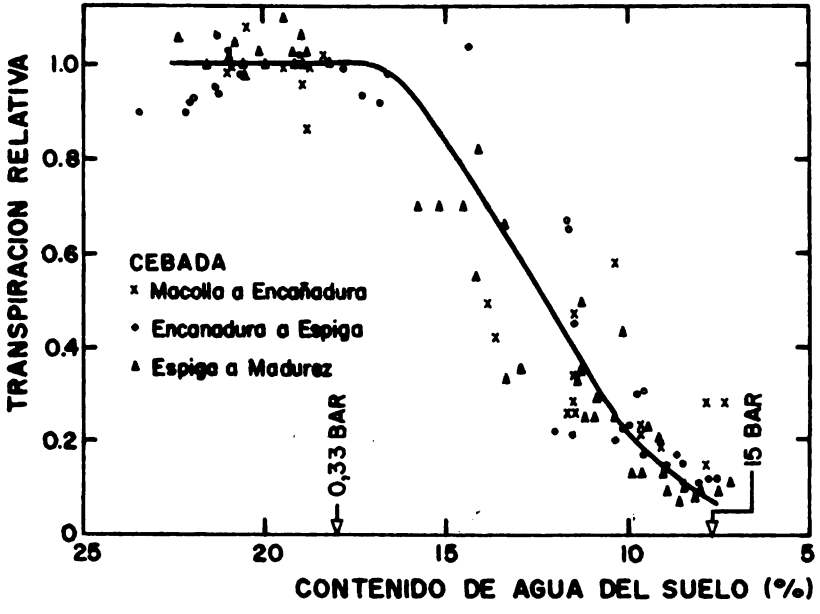


FIGURA 8.13. Transpiración relativa de cebada en función del contenido de agua del suelo (Millar et al., 1970).

de transpiración depende exclusivamente de la demanda atmosférica hasta que la planta comienza a regular fisiológicamente el proceso, a través de los estomas. A partir de este instante la tasa depende del efecto combinado de la demanda y de las características de transmisión de agua en el suelo (Figura 8.13).

Este tipo de relación sigue las mismas características anteriormente indicadas, independiente de como se exprese el agua del suelo, ya sea como porcentaje (Figura 8.13), succión o potencial matricial (Figura 8.14) o potencial de agua del suelo (Figura 8.14). Los detalles del proceso se discuten en el Capítulo 12.

8.2.2. Contenido Relativo de Agua en Función del Agua en el Suelo

Este tipo de relación sigue las mismas características de la relación entre transpiración y el contenido de agua del suelo. A altos contenidos de agua en el suelo, el CRA es un indicador poco sensitivo de la condición de agua en la planta. A partir del momento que los estomas comienzan a controlar

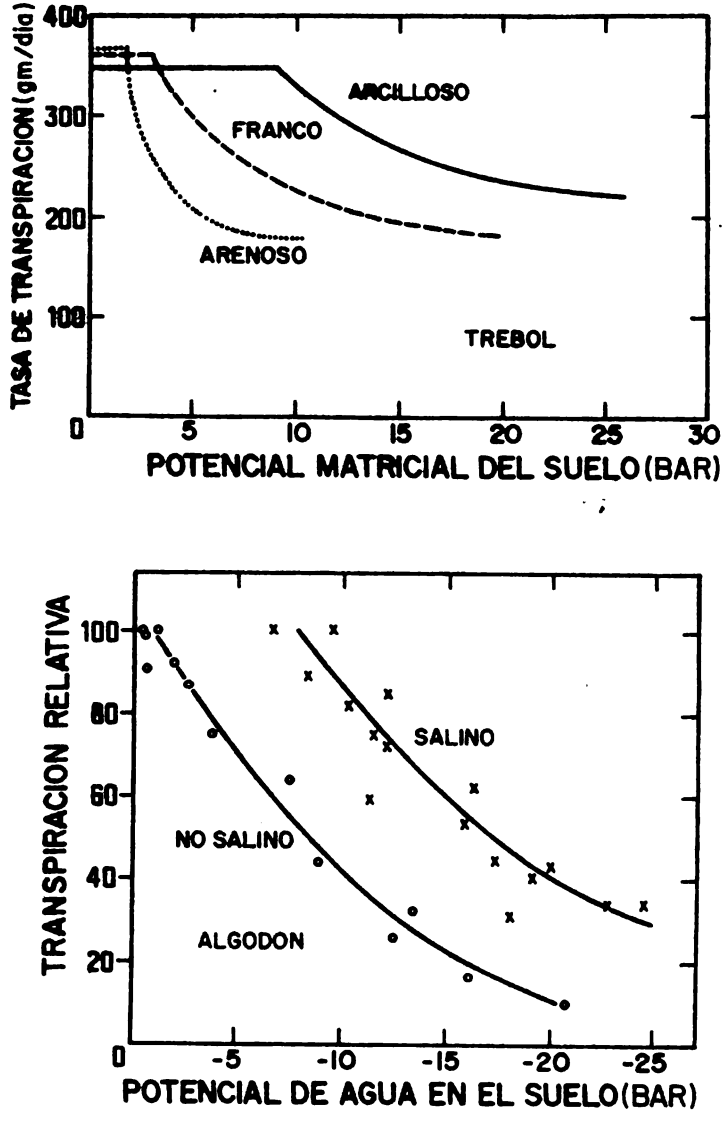


FIGURA 8.14. Tasa de transpiración en función del potencial matricial y del potencial de agua del suelo para trébol en tres tipos de suelos y para algodón en condiciones de salinidad (Gardner y Ehlig, 1962, 1964).

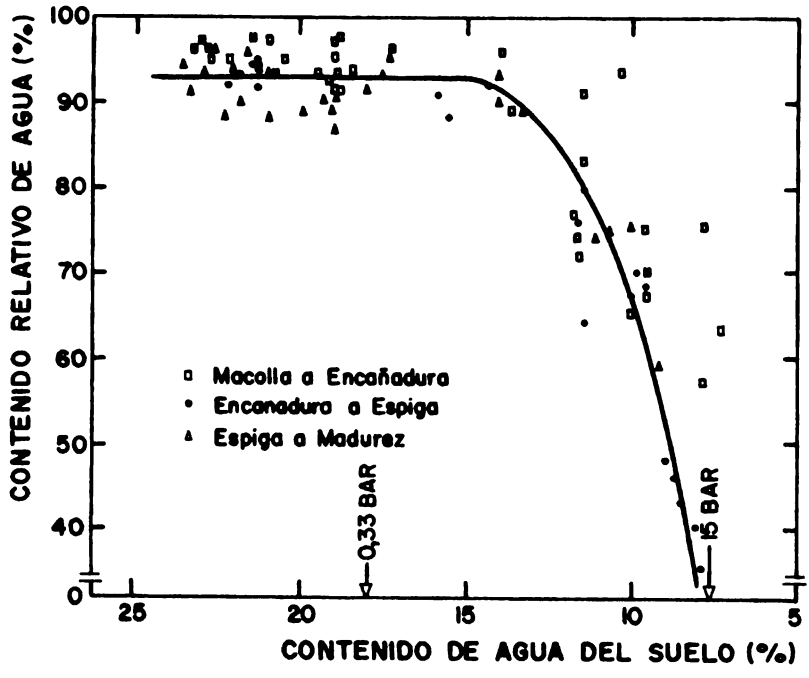


FIGURA 8.15. Contenido relativo de agua en hojas de cebada en función del contenido de agua en el suelo (Millar, 1967).

el proceso de transpiración y los déficits de agua son más expresivos, el indicador CRA cobra mayor validez (Figura 8.15). Mayores informaciones de su significado y uso se encuentran en el Capítulo 7.

8.2.3. Potencial de Agua en la Planta en Función del Agua del Suelo

La Figura 8.16 muestra la relación entre el potencial de agua en la planta y el potencial de agua en el suelo para algodón (Gardner y Ehlig, 1964). Este gráfico indica que el potencial de agua en la planta es siempre menor que el potencial del agua en el suelo, lo cual es un requisito para que exista movimiento de agua desde el suelo a la planta. La diferencia de potencial de agua entre el suelo y la planta es mayor a altos potenciales de agua en el suelo, región en que la tasa de transpiración es mayor, disminuyendo para bajos valores de potencial de agua en el suelo hasta un cierto valor a partir del cual

tiende a mantenerse constante. Mayores informaciones sobre la diferencia de potencial y movimiento de agua se presentan en el Capítulo 9.

La relación entre el potencial de agua en la planta y el potencial matricial del suelo (Figura 8.16) tiene la misma connotación que cuando se usa el potencial de agua en el suelo, pudiendo variar la forma de la respuesta de la planta, lo cual depende de la especie y fase de desarrollo.

8.2.3. Abertura Estomática en Función del Agua en el Suelo

La abertura estomática, definida en términos de resistencia o conductancia estomática es altamente dependiente del contenido de agua en el suelo.

La forma de las curvas para diferentes suelos (Figura 8.17) es una expresión del rango de disponibilidad de agua para las plantas. En el suelo arenoso el rango de disponibilidad de agua es menor que en los suelos arenolimoso y franco arcilloso. La importancia de esta información radica en que el rango de disponibilidad de agua es definido por un indicador de la planta. En la Figura 8.18 se incluye también el gráfico para la misma información pero en términos de conductancia estomática.

8.3. Influencia de los Parámetros Ambientales.

8.3.1. Variaciones Diurnas

Las plantas como integradoras del ambiente en que se desarrollan responden rápidamente a las condiciones hídricas del suelo y de demanda atmosférica.

La Figura 8.19 muestra la variación del potencial de agua de la hoja y de la raíz, y el potencial de agua en el suelo en los días siguientes a un riego. Existe una variación diurna de los parámetros hídricos, especialmente de la planta, lo cual es una respuesta del balance interno de agua que resulta de los procesos de absorción y transpiración. Cada día, en la medida que se intensifica la demanda atmosférica, aumenta la transpiración de la planta y consecuentemente la absorción por el sistema radicular. La planta desarrolla déficits internos de agua cuando el movimiento de agua a las raíces y el proceso de absorción en general no es capaz de suplir los requerimientos de transpiración de la planta. A medida que disminuye el agua en el suelo se intensifican las condiciones deficitarias de agua en la planta y los potenciales de agua de las hojas y raíces disminuyen a menores valores cada día (Figura 8.19). En la Figura 8.20 se muestra la variación diurna de potenciales de agua en cebada y cebolla.

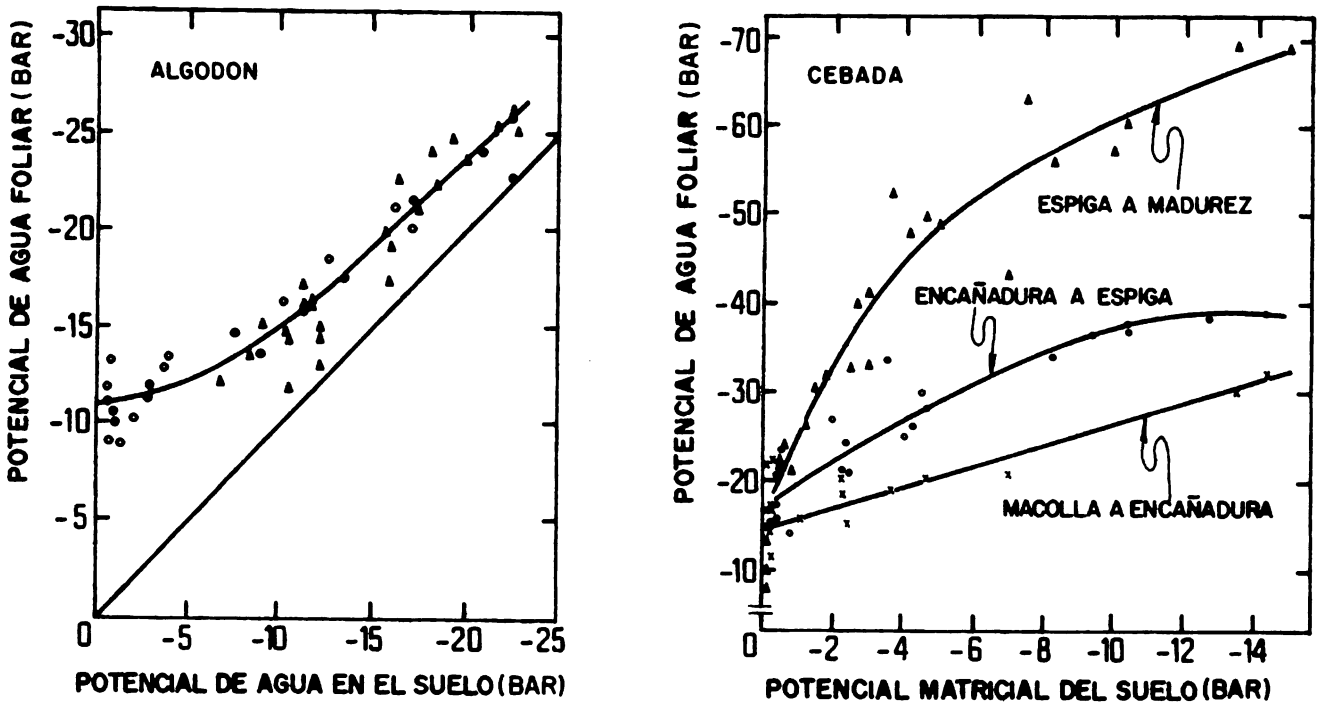


FIGURA 8.16. Relación entre el potencial de agua en la planta y potencial de agua y potencial matricial del suelo (Gardner y Ehlig, 1964; Millar et al., 1970).

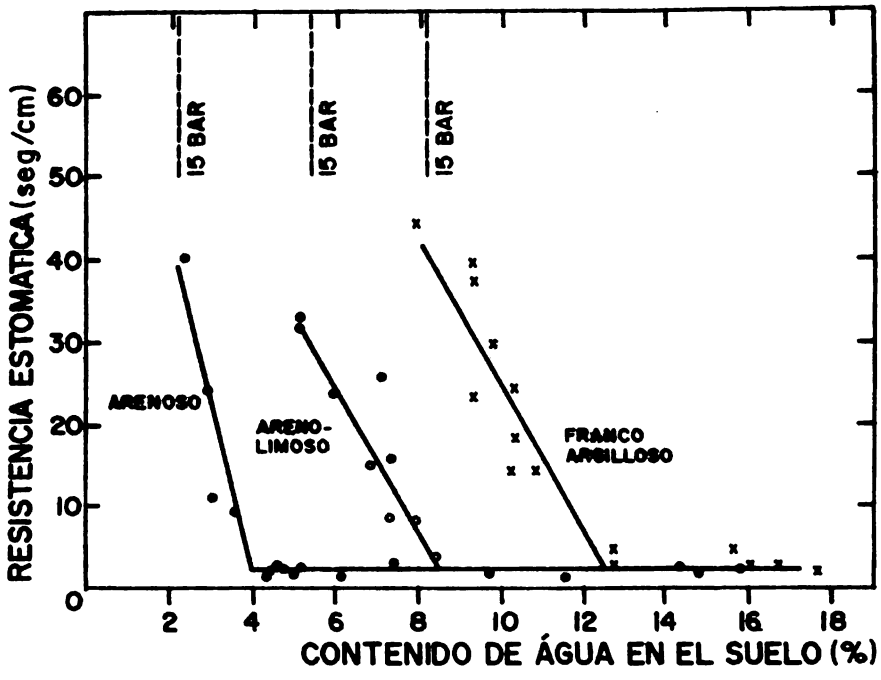


FIGURA 8.17. Resistencia estomática de cebollas en función del contenido de agua en el suelo (Millar y Gardner, 1970, no publicado).

Durante el período nocturno, la planta se abastece de agua, eliminando los déficits, hasta donde lo permitan las características transmisoras del suelo. En el día siguiente, a medida que se intensifica la demanda, desarrollará déficits de agua, los cuales se manifestarán más tempranos y se harán más expresivos.

Los indicadores más utilizados para describir el estado de agua en la planta son el potencial de agua y el contenido relativo de agua (CRA). Gran número de trabajos experimentales se han desarrollado buscando definir la influencia de los parámetros ambientales sobre los indicadores hídricos de la planta.

En trabajos realizados por Nankem (1964) se definió que 88 % de las variaciones en el contenido relativo de agua en hojas de algodón se debía a cambios en la condición de humedad del suelo, temperatura ambiental y evaporación. Estudios similares realizados por Weatherley (1951) indicaron

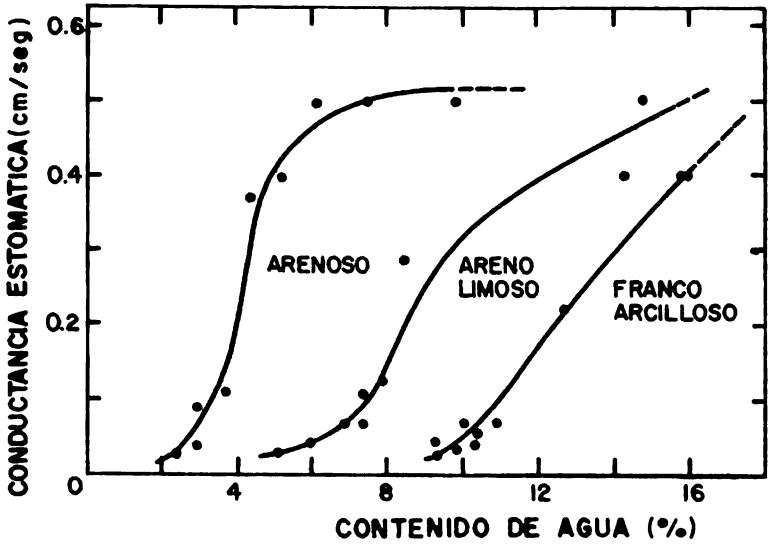


FIGURA 8.18. Relación entre la conductancia estomática de cebolla y el contenido de agua en tres tipos de suelos (Millar et al., 1971).

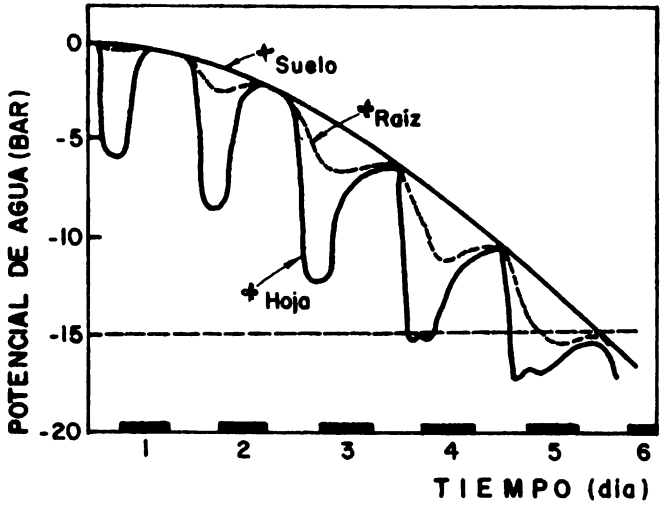


FIGURA 8.19. Representación esquemática de las variaciones en los potenciales de agua de la hoja, de la raíz y del suelo a partir de la aplicación de un riego (Slatyer, 1969).

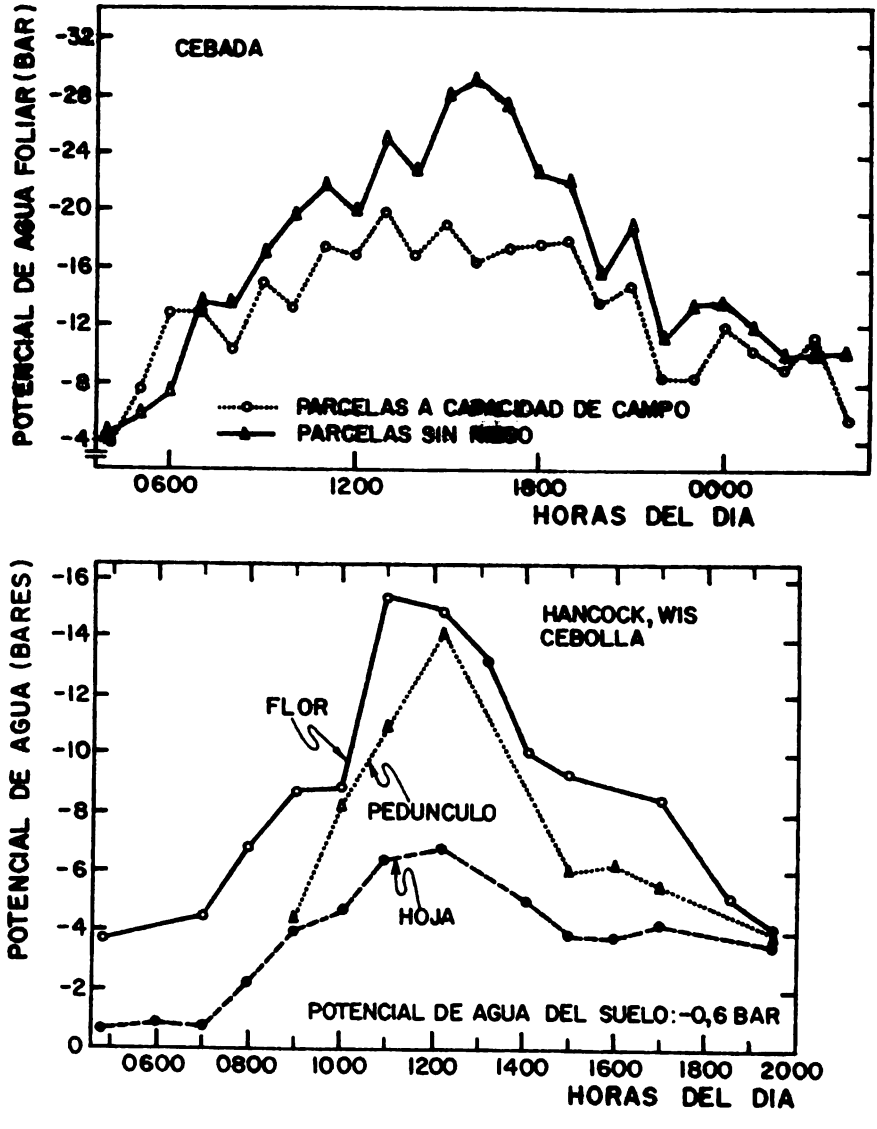


FIGURA 8.20. Variación diurna de los potenciales de agua en plantas de cebada y cebolla (Millar et al., 1971).

CUADRO 8.2. Correlaciones simples entre el potencial de agua y contenido relativo de agua en cebada y varios parámetros atmosféricos (Millar et al., 1971).

Código	Factor	Unid.	Suelo Húmedo /1-		Suelo Seco /2-	
			CRA		CRA	
TL	Temperatura de la hoja	°C	-0,888	-0,842	-0,913	-0,910
TA	Temperatura del aire	°C	-0,851	-0,805	-0,889	-0,887
TS	Temperatura del suelo	°C	-0,909	-0,862	-0,902	-0,917
VPD	Déficit de Presión de Vapor	mmHg	-0,912	-0,782	-0,943	-0,906
PE	Evaporación (tanque)	mm/h	-0,605	-0,534	-0,644	-0,687
WV	Velocidad del Viento	cm/seg	-0,106	-0,066	-0,110	-0,011
Rs	Radiación solar	ly/min	-0,846	-0,728	-0,703	-0,693
Rn	Radiación neta	ly/min	-0,793	-0,672	-0,617	-0,608

/1- Capacidad de campo
/2- Punto de Marchitez Permanente

que el CRA se correlacionaba con el déficit de presión de vapor, lo cual también fue corroborado en los estudios de Werner (1954) y Prasad (1967).

En la Figura 8.21 se muestra la variación del contenido relativo de agua en hojas de cebada y la de los parámetros climáticos para dos condiciones atmosféricas, día frío y nublado, y día caluroso y claro (Millar et al., 1971). La información de cebada de la Figura 8.20 sobre variación diurna del potencial de agua corresponde al día caluroso y claro.

Análisis estadísticos realizados con los datos para el cultivo de cebada (Figura 8.21) demostraron que el CRA y el potencial de agua tenían alta correlación con el déficit de presión de vapor del aire (Cuadro 8.2). En la Figura 8.22 se muestra la correlación del CRA y potencial de agua de cebada con el déficit de presión de vapor. Por otra parte, a través de correlaciones lineales múltiples se definió que el déficit de presión de vapor explicaba entre 83 y 89 % de las variaciones del CRA (Millar et al., 1971). Stanley et al. (1981) encontraron que bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo, el potencial de agua en soya dependía, principalmente, de la radiación solar y temperatura del aire.

CUADRO 8.3. Resistencias estomáticas medias (seg/cm) en maíz sometido a tres aplicaciones de nitrógeno en dos tipos de suelo, para densidades de flujo de quantos de luz mayores de 0,1 $\mu E/cm^2$ *seg* (Millar y Gardner, 1970; Información no publicada).

Fecha	Nitrógeno Aplicado (kg N/ha) 0	113,6	341,0
	Suelo Arcilloso (Arlington, Wisconsin)		
Agosto 9	3,97±1,4	3,64±1,21	3,33±0,56
Agosto 12	2,41±0,41*	1,94±0,40*	1,76±0,56*
Agosto 14	3,91±0,91**	2,61±0,60**	2,36± 0,50**
	Suelo Arenoso (Hancock, Wisconsin)		
Agosto 21	6,57±1,98*	4,90±1,29**	3,60±0,71 **
Agosto 24	4,42±0,79**	3,60±0,80*	3,10±0,89 **

* Diferencia significativa entre medias a nivel 0.05.
** Diferencia significativa entre medias a nivel 0.001.

Los cultivos con falta de agua presentan mayor temperatura foliar que los cultivos bien regados (Figura 8.23). La correlación existente entre la

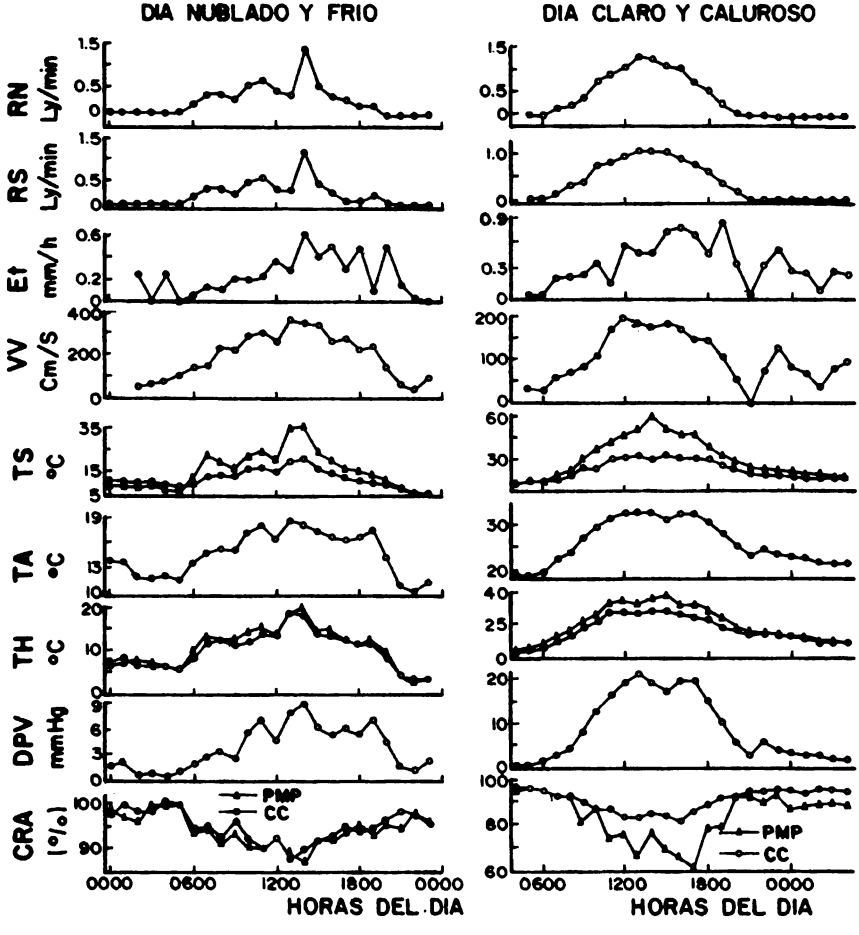


FIGURA 8.21. Variación diurna de los potenciales de agua en plantas de cebada y de los parámetros climáticos para dos condiciones atmosféricas (Millar et al., 1971).

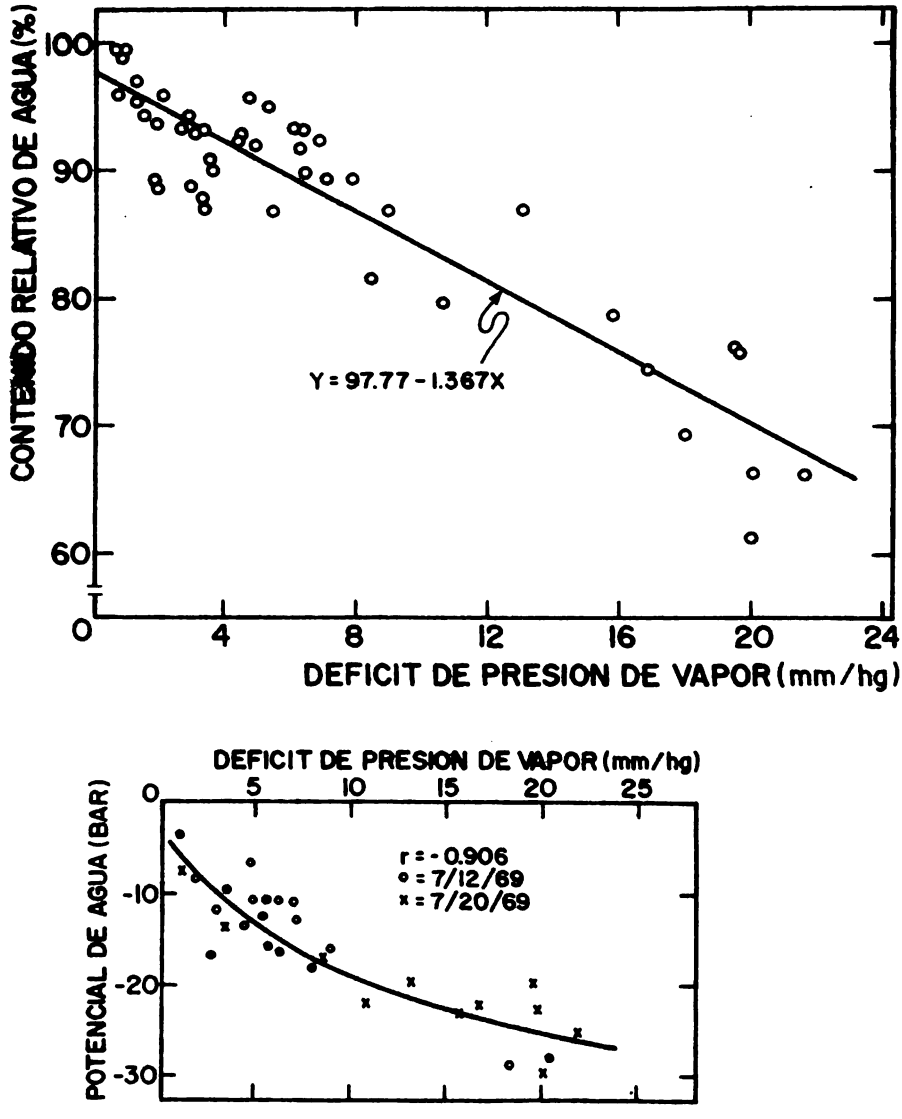


FIGURA 8.22. Relación del contenido relativo de agua y del potencial de agua con el déficit de presión de vapor (Millar et al., 1971).

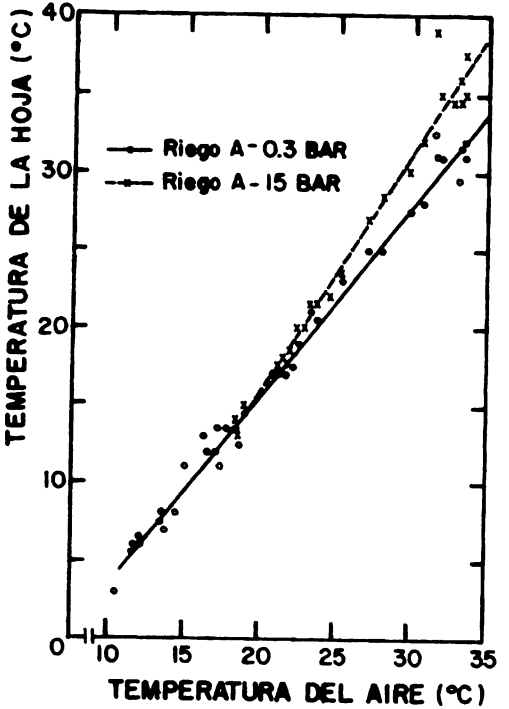


FIGURA 8.23. Relación entre la temperatura de la hoja y temperatura del aire en plantas bajo dos condiciones de riego (Millar, 1967).

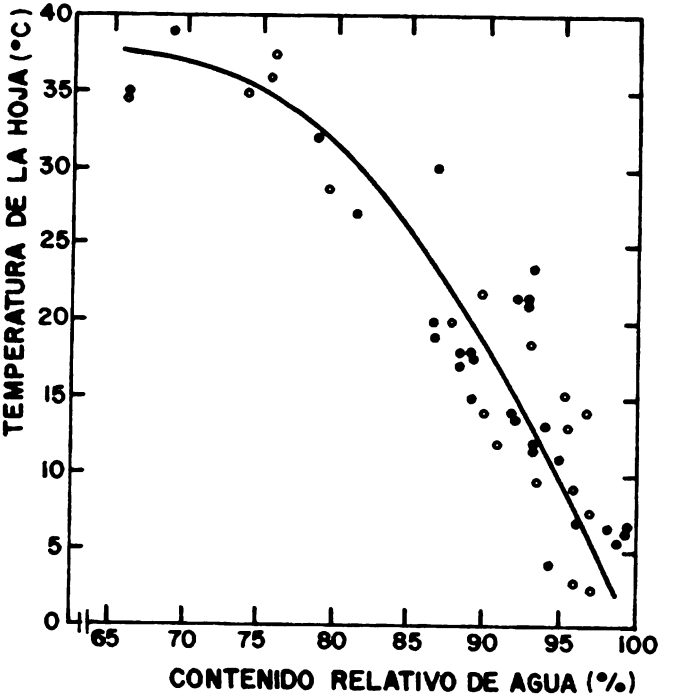


FIGURA 8.24. Temperatura de la hoja en función del contenido relativo de agua (Millar, 1967).

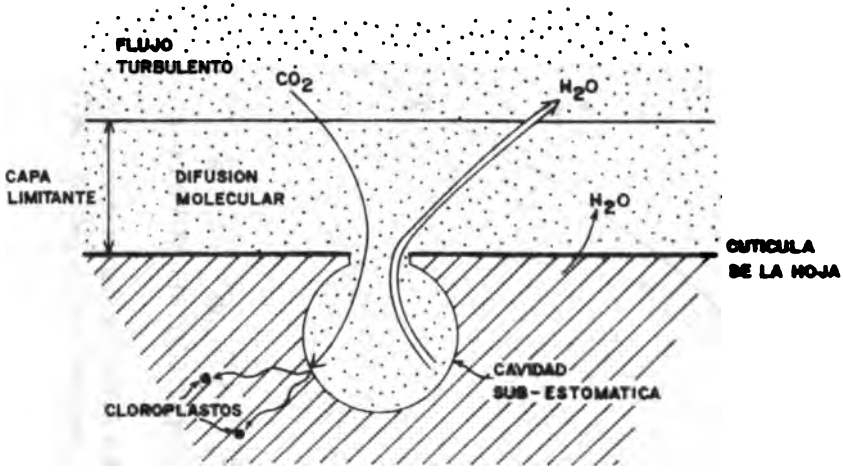


FIGURA 8.25. Diagrama esquemático del transporte de anhidrido carbónico y de vapor de agua desde la cavidad estomática hacia la atmósfera.

temperatura foliar e indicadores del déficit de agua (Figura 8.24) han llevado a investigar el uso de la temperatura de los cultivos como un indicador de la necesidad de riego, especialmente con el uso de instrumental portátil de termometría infrarroja.

8.4. Transpiración y Control Estomático.

La transpiración de las plantas se realiza en su mayor parte a través de los estomas. La distribución y número de los estomas varía con la especie. En algunas especies se encuentra el mismo número de estomas en el haz y envés de la hoja (remolacha, girasol), mayor número en el envés (fríjol, trébol), y otras especies no presentan estomas en el haz (vid).

El cierre y abertura de los estomas, determinando mayor o menor transpiración, está controlado por las células estomáticas, cuyo movimiento está regulado por el potencial de presión (Kramer et al, 1967). Existe un potencial de agua crítico al cual comienza a operar el mecanismo. El cierre o abertura de los estomas es el resultado de una cadena de cambios bioquímicos, los que se indican a continuación.

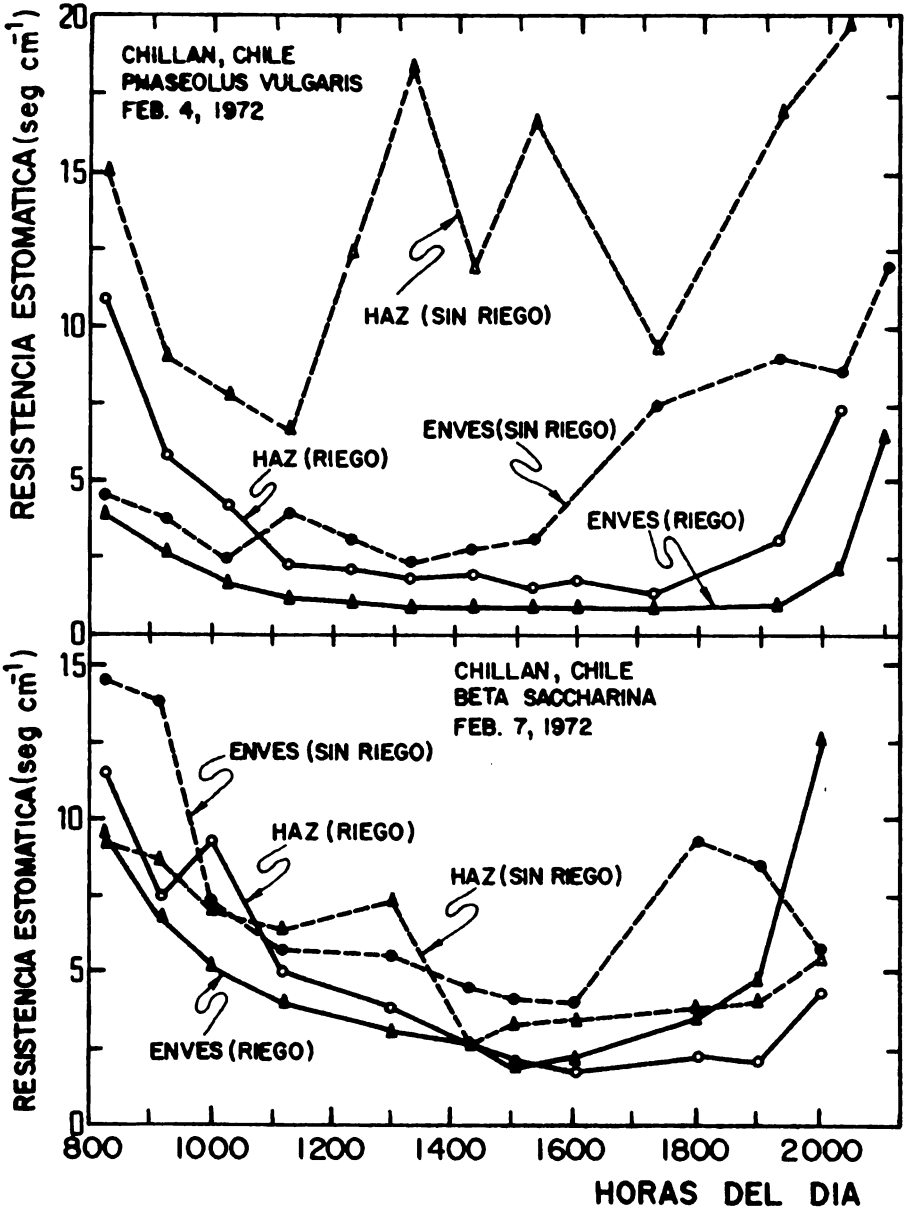


FIGURA 8.26. Variación diurna de la resistencia estomática de frijol y remolacha bajo condiciones de riego y sin riego (Millar, 1972; no publicado).

8.4.1. Mecanismo de Abertura y Cierre de los Estomas

Los estomas permanecen cerrados durante la noche y al iniciarse la mañana se abren y comienzan a tomar anhídrido carbónico del aire, iniciando el proceso de fotosíntesis.

Las células estomáticas realizan la siguiente conversión:

Durante el día convierten almidón a azúcar.

Durante la noche convierten azúcar a almidón.

El proceso bioquímico es el siguiente:

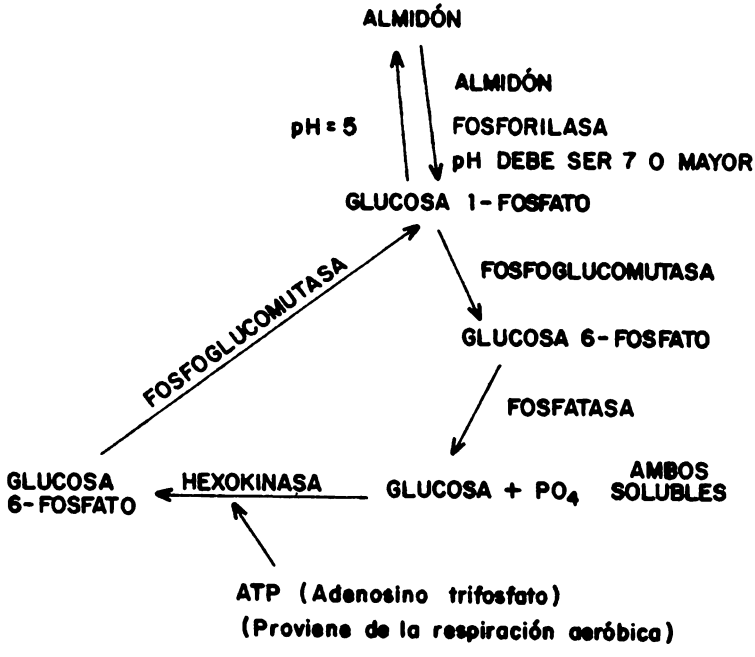
a. Mecanismo de apertura de las células estomáticas

i. Fotosíntesis excede a la respiración
ii. Se usa CO2
iii. El pH aumenta
iv. A pH 7 se activa la enzima almidón fosforilasa.
v. El almidón es desdoblado en glucosa y ión fosfato, siendo ambos solubles.
vi. Al aumentar la cantidad de soluto en las células estomáticas, disminuye el potencial osmótico o aumenta la presión osmótica.
vii. Debido al déficit desarrollado, agua se mueve desde otras células epidérmicas a las células estomáticas.
viii. Aumenta el potencial de presión en las células estomáticas.
ix. Se ejerce presión contra las paredes de las células estomáticas lo cual determina, por efecto mecánico, que se abra el poro estomático.

b. Mecanismo de Cierre de los Estomas

i. Respiración excede a la fotosíntesis.
ii. Aumenta la concentración de CO_2 en las células estomáticas.
iii. El pH disminuye ($H_20 + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$).
iv. A pH = 5 se activa la enzima almidón fosforilasa para catalizar la reacción de conversión de glucosa 1-fosfato a almidón.
v. Glucosa 1-fosfato se convierte a almidón.
vi. Al disminuir la cantidad de solutos aumenta el potencial osmótico de la célula.
vii. Agua se mueve desde las células estomáticas hacia otras células epidérmicas.
viii. Disminuye el potencial de presión de las células.
ix. Los estomas se cierran debido a la elasticidad natural de las células.

El esquema del proceso bioquímico en el cierre y apertura de los estomas es el siguiente:



En la mayoría de las plantas, los estomas se abren durante el día dejando expuesta la cavidad estomática húmeda a las condiciones más secas del aire circundante (Figura 8.25).

Desde el punto de vista físico, la transpiración de una hoja es la pérdida de agua al estado de vapor y es proporcional a la gradiente de presión de vapor entre la hoja y el aire circundante, e inversamente proporcional a una resistencia de la transpiración (Miller y Gates, 1967). Esta resistencia está constituida por la resistencia estomática (R_s) y la resistencia a la difusión de vapor de la capa de aire circundante estagnada (r_a). Esto se puede expresar como:

$$T = CE\ (\rho\, C_p/\gamma)(e_h - e_a)/(R_s + r_a) \qquad (8.1)$$

donde e_h es la presión de vapor (mb) de la cavidad estomática y se supone ser la presión de vapor saturado a la temperatura de la hoja, e_a es la

presión de vapor fuera de la capa de aire circundante estagnada (mb), ρ es la densidad del aire húmedo (g/cm^3), Cp es el calor específico del aire húmedo (Cal/g ^oK), γ es la constante sicrométrica (mb/^oC) y CE es una constante para convertir unidades de energía a unidades de densidad de flujo de agua.

Bajo condiciones de buena circulación de aire, la resistencia debida a la capa de aire estagnada es insignificante comparada a la resistencia estomática. En estas condiciones la expresión (8.1) queda como:

$$T = CE\ (\rho C_p/\gamma)(e_h - e_e)/R_e \qquad (8.2)$$

Todo el mecanismo regulador de la transpiración reside en los estomas. Los estomas son muy sensitivos a variaciones del estado de agua de la planta, de las condiciones ambientales y condiciones nutricionales de la planta.

Desde el punto de vista de las relaciones hídricas del sistema suelo-planta, la secuencia operacional del mecanismo estomático, válvula de control de la transpiración, sería la siguiente:

Secuencia de Operación del Mecanismo Estomático

Aplicación de un riego (Evapotranspiración potencial)

↓

Disminuye el agua en el suelo

↓

Disminuye la conductividad capilar del suelo

↓

Disminuye el flujo de agua a la planta por aumento de la resistencia (impedancia) del sistema.

↓

Disminuye el potencial de agua en la planta

↓

Potencial de agua crítico en la planta.

↓

Cierre de los estomas

↓

Disminuye el flujo de CO_2 → Disminuye la acumulación de materia seca (Fotosíntesis).

↓

Disminuye la transpiración → Disminuye la evapotranspiración real.

Dada la importancia de los estomas, es de interés discutir el efecto de las relaciones de agua, parámetros ambientales y condiciones nutricionales de la planta sobre el mecanismo regulador.

8.4.2. Relaciones Hídricas de la Planta y Resistencia Estomática

El movimiento estomático es un efecto mecánico que depende de un cambio en la diferencia entre el potencial de presión de las células estomáticas y las células epidérmicas circundantes (Meider y Mansfield, 1969). La información presentada a través de los gráficos de la Sección 8.1 de este Capítulo corrobora esta aseveración. La Figura 8.11 indica que existe un potencial de agua crítico en la planta que controla el cierre o abertura de los estomas, indicado como resistencia estomática (Millar et al., 1971). La Figura 8.12, también para cebolla, relaciona conductancia estomática (recíproco de la resistencia) con el potencial de agua y potencial de presión. De esta información se deduce que la conductancia estomática está directamente relacionada con el potencial de presión. Un pequeño cambio en el potencial de presión produce un gran cambio en la conductancia, y por lo tanto en la tasa de transpiración.

8.4.3. Parámetros Atmosféricos y la Resistencia Estomática

La resistencia estomática no sólo es afectada por el estado de agua en la planta sino que también por algunos parámetros atmosféricos, notablemente luz y temperatura, lo cual produce variaciones cíclicas en respuestas a la demanda atmosférica y disponibilidad de agua en el suelo (Figura 8.26).

En la Figura 8.27 muestra la relación entre resistencia estomática del envés y la temperatura de la hoja de plantas de vid. Se observa que la resistencia estomática diaminuye con el aumento de la temperatura. Debido a que estos datos son obtenidos a través de parte de un ciclo diurno es probable que también incluyan algún efecto de la intensidad luminosa. En las Figuras 8.28, 8.29 y 8.30 se incluyen las relaciones entre resistencia estomática y temperatura de la hoja, haz y envés, bajo condiciones de riego de cultivos de trébol, fríjol y remolacha, respectivamente. Para las plantas bajo condiciones de déficit de agua (sin riego), la curva de estos gráficos se desplaza hacia la derecha.

Los estomas de algunos cultivos como maíz son altamente sensibles a la intensidad luminosa (Kanemasu y Tanner, 1969). En la Figura 8.31 se muestra la relación entre resistencia estomática de maíz y la intensidad luminosa medida en términos de densidad de flujo de quantos de luz (Millar y Gardner 1970), y en la Figura 8.32 el efecto asociado del riego y la intensidad luminosa

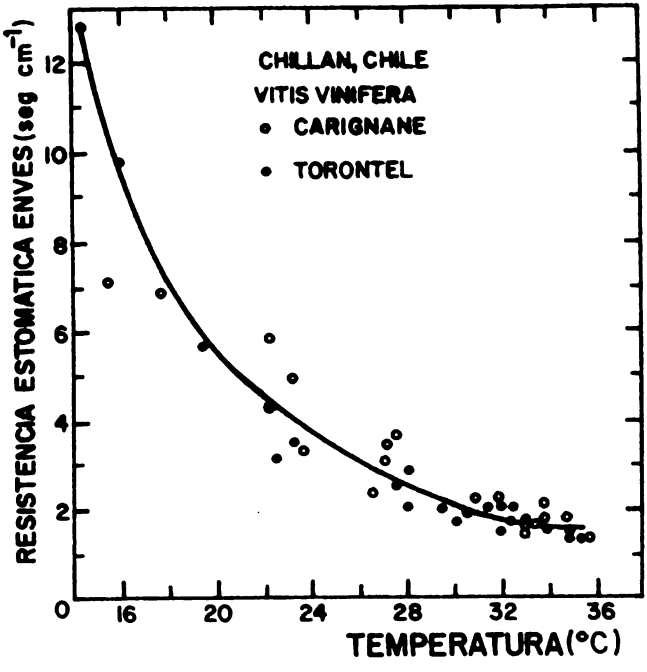


FIGURA 8.37. Resistencia estomática de hojas de dos variedades de vid en función de la temperatura de la hoja (Millar, 1972).

para remolacha y trébol. Se observa que la resistencia estomática disminuye hiperbólicamente a medida que aumenta la intensidad de luz. La Figura 8.33 muestra una representación esquemática de la relación entre resistencia estomática e intensidad luminosa en función del déficit de agua. A medida que la planta alcanza mayores déficits de agua las resistencias estomáticas son mayores, a altos valores de intensidad luminosa. Los estomas reaccionan con mayor rapidez a las condiciones de exposición a la luz que a las condiciones de sombreamiento (Figura 8.34).

8.4.4. Estado Nutricional de la Planta y la Resistencia Estomática

En la literatura existe evidencia que el estado nutricional de la planta tiene efecto sobre la conducta de los estomas y por consiguiente sobre la transpiración.

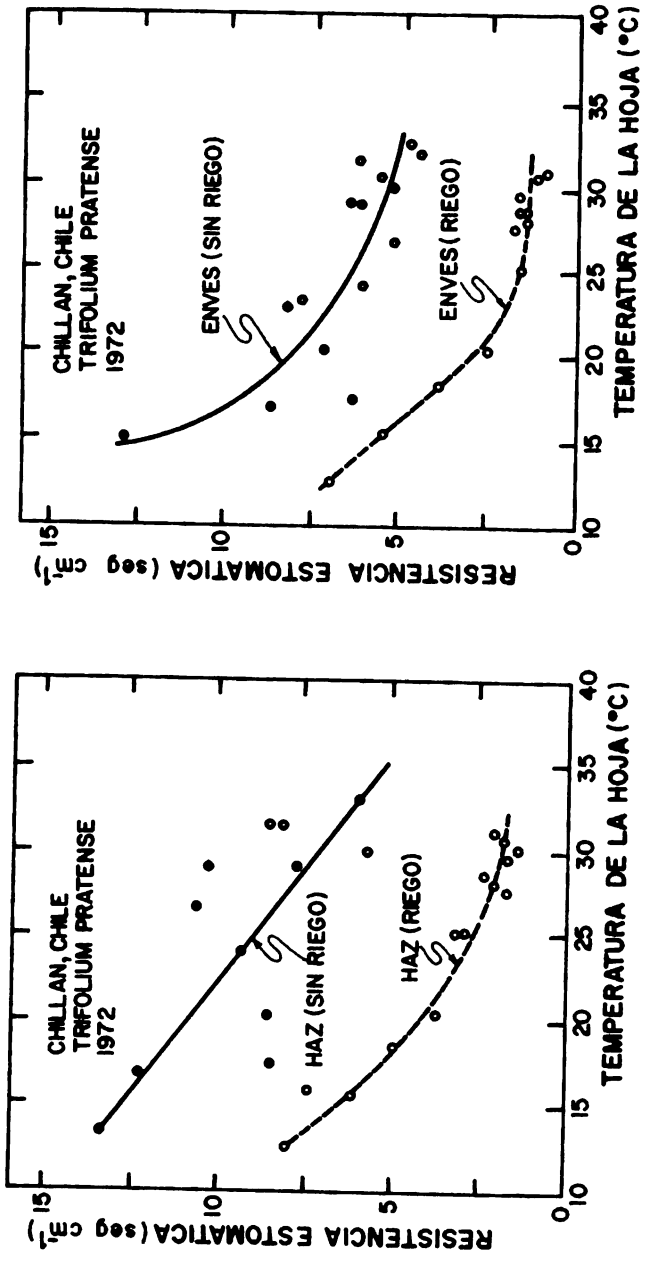


FIGURA 8.28. Resistencia estomática de trébol en función de la temperatura de la hoja bajo condiciones de riego y sin riego (Millar, 1972; no publicado).

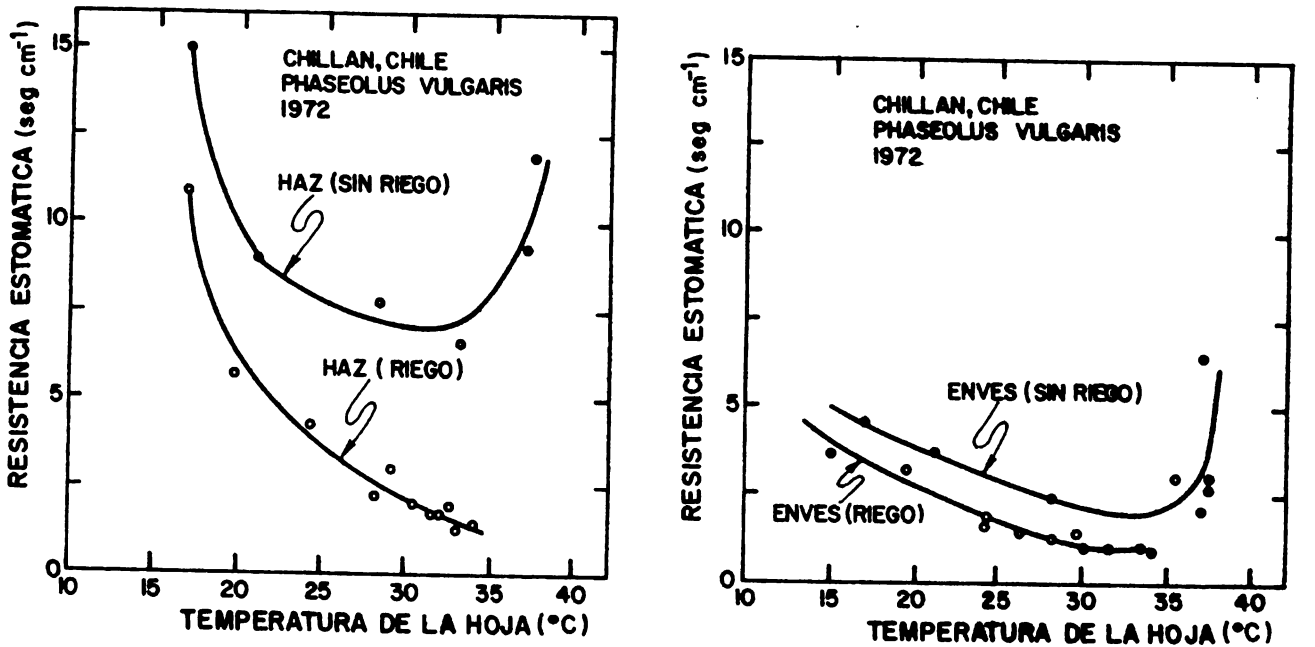


FIGURA 8.29. Resistencia estomática de frijol en función de la temperatura de la hoja bajo condiciones de riego y sin riego (Millar, 1972; no publicado).

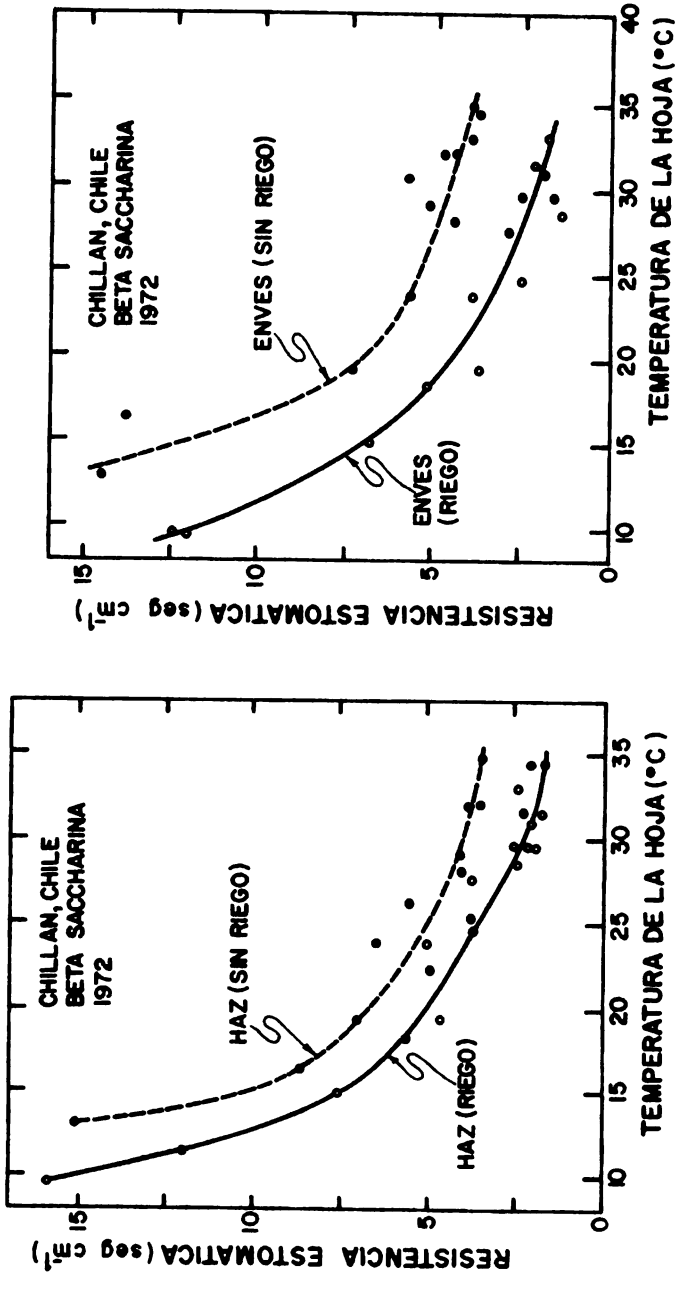


FIGURA 8.30. Resistencia estomática de remolacha en función de la temperatura de la hoja bajo condiciones de riego y sin riego (Millar, 1972; no publicado).

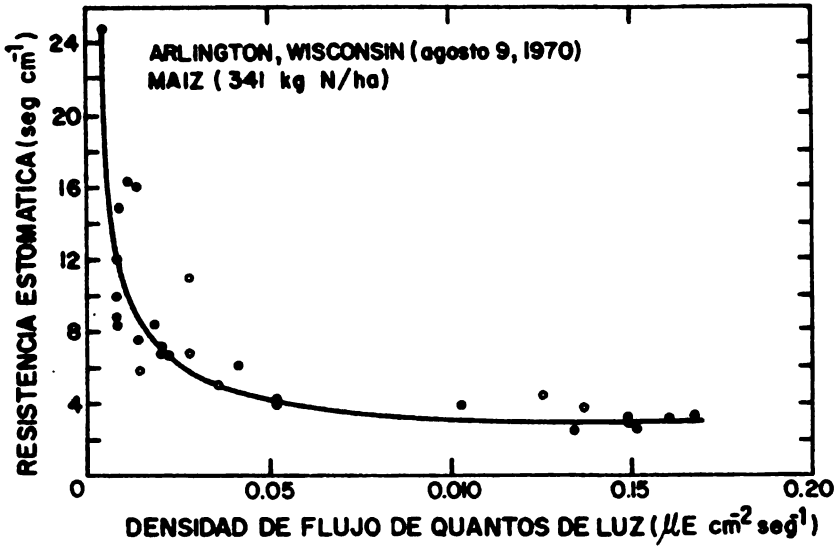


FIGURA 8.31. Relación entre resistencia estomática de maíz y densidad de flujo de quantos de luz (Millar y Gardner, 1970, no publicado).

a. Efecto del Nitrógeno

Shimshi (1970) encontró que plantas con adecuado abastecimiento de nitrógeno tenían una mayor tasa de transpiración que las plantas deficientes (Figura 8.35), llegando a ser igual a dos veces en el rango de alto contenido de agua en el suelo.

Por otra parte, Murata et al., (1966) encontraron que la actividad fotosintética de hojas de arroz aumentaba con el contenido de nitrógeno (Figura 8.36). Puesto que el flujo de CO_2 también se produce a través de los estomas, estaría indicando que un alto contenido de nitrógeno en las hojas favorecería la abertura de los estomas, por lo tanto aumentando la tasa de transpiración.

Otra evidencia del efecto del nitrógeno en la pérdida de agua por la planta se encuentra en la información de Brown (1971), presentada en la Figura 8.37. En esta figura que relaciona la evapotranspiración en función del ciclo fonológico del cultivo de trigo para diferentes dosis de nitrógeno, se observa que la evapotranspiración es mayor en los tratamientos con mayor dosis de nitrógeno.

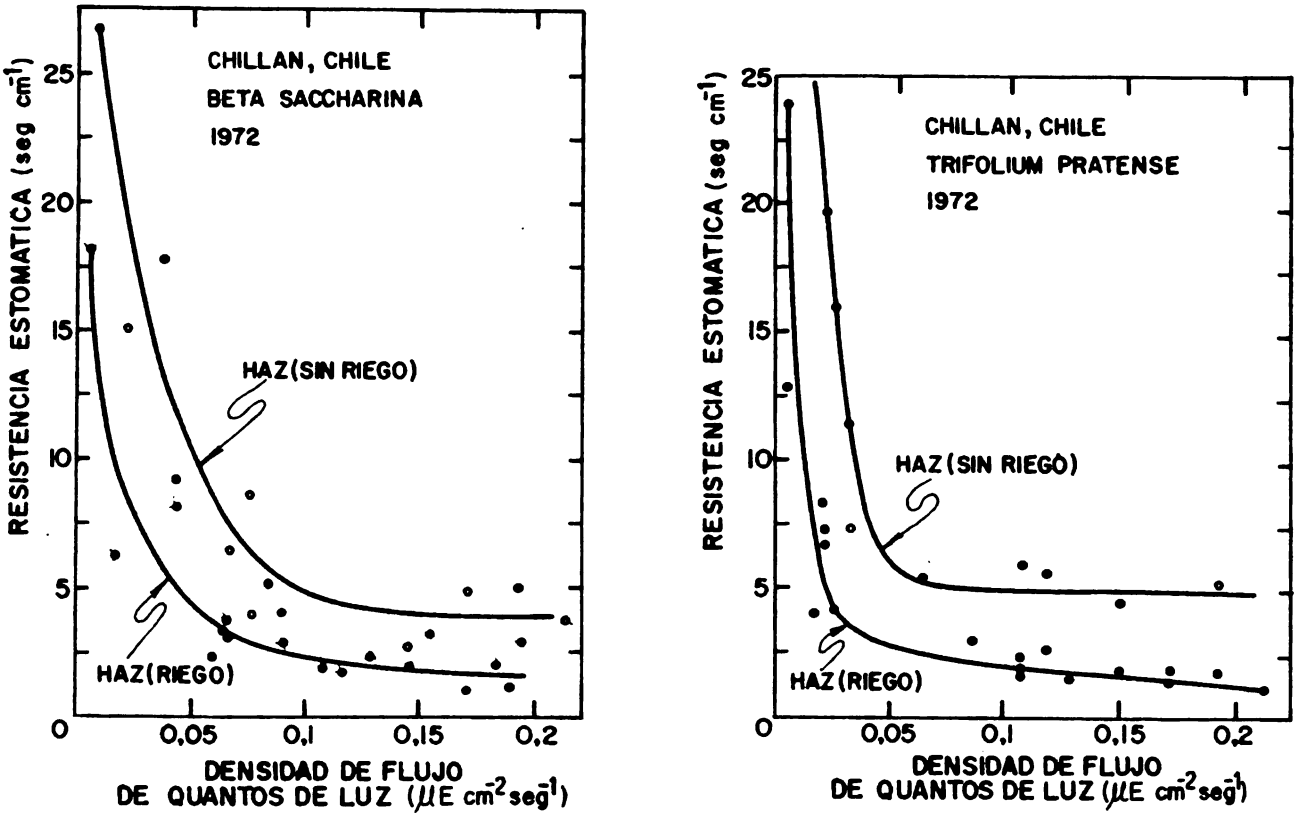


FIGURA 8.32. Relación entre resistencia estomática de remolacha y trébol y densidad de flujo de quantos de luz bajo condiciones de riego y sin riego (Millar, 1972; no publicado).

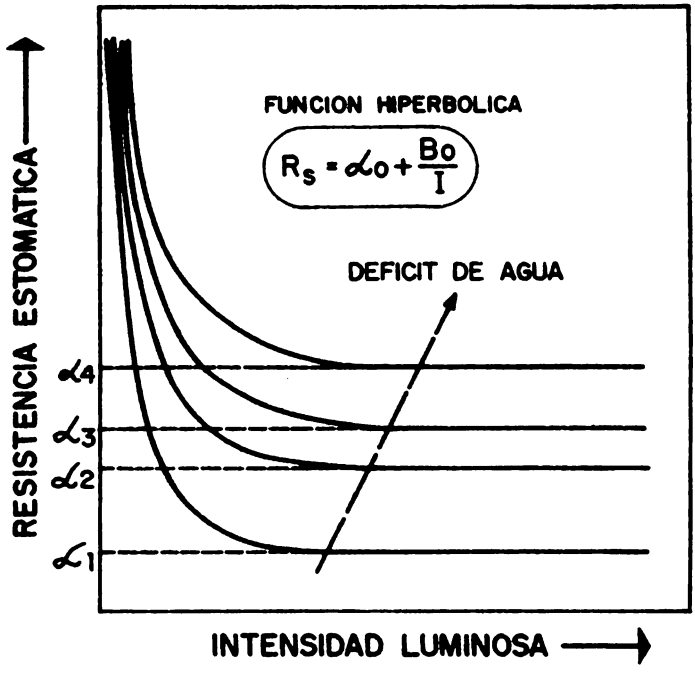


FIGURA 8.33. Representación esquemática de la relación entre resistencia estomática e intensidad luminosa en función del déficit de agua.

Millar y Gardner (1970) estudiaron el efecto del nitrógeno sobre la resistencia estomática de maíz bajo condiciones controladas y de campo. En la Figura 8.38 se muestra la relación entre resistencia estomática del haz y envés de hojas de maíz en función de la concentración de $NO_3 - N$ aplicado al sistema radicular creciendo en solución Hoagland (1/2 poder). En esta figura se observa que la resistencia estomática disminuye a medida que aumenta la concentración de $NO_3 - N$ en el medio radicular. Se midió la tasa de transpiración para las concentraciones 0, 100 y 200 ppm de $NO_3 - N$ y se encontró que la resistencia estomática era menor en los tratamientos de mayor concentración de nitrógeno (Figura 8.39).

b. Efecto del Potasio

Las plantas que crecen con buen abastecimiento de potasio presentan una acumulación de este catión en las células estomáticas (Fisher, 1968). Juntamente con esto, se ha encontrado que las hojas presentan mayor abertura

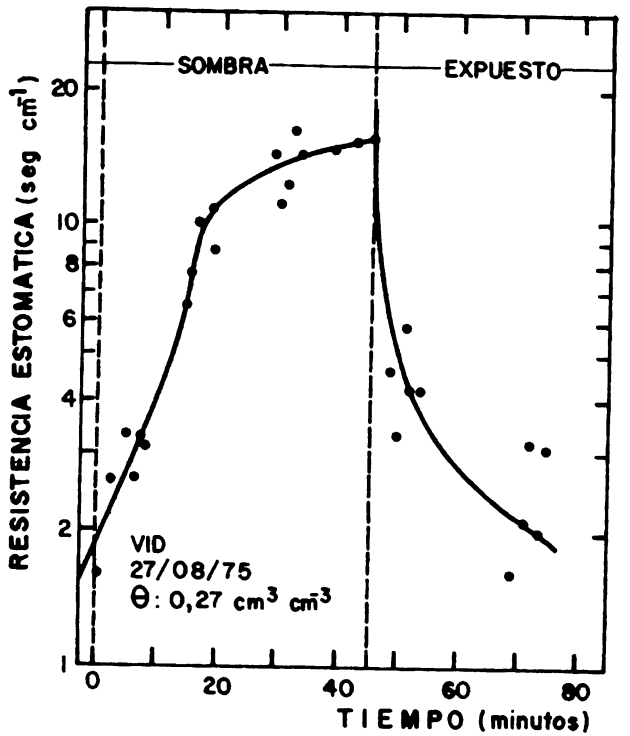


FIGURA 8.34. Reacción de los estomas en términos de resistencia estomática, a períodos de sombreamiento y exposición luminosa (Queiroz et al., 1975).

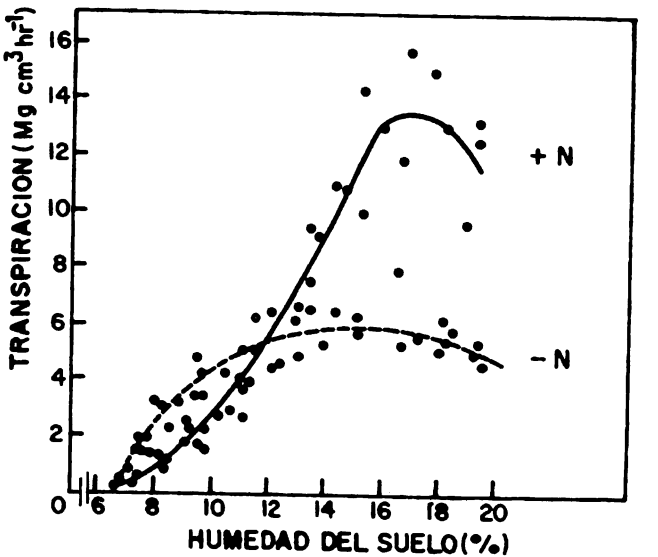


FIGURA 8.35. Transpiración de frijol en función del contenido de agua del suelo para dos condiciones de fertilización nitrogenada (Shimshi, 1970).

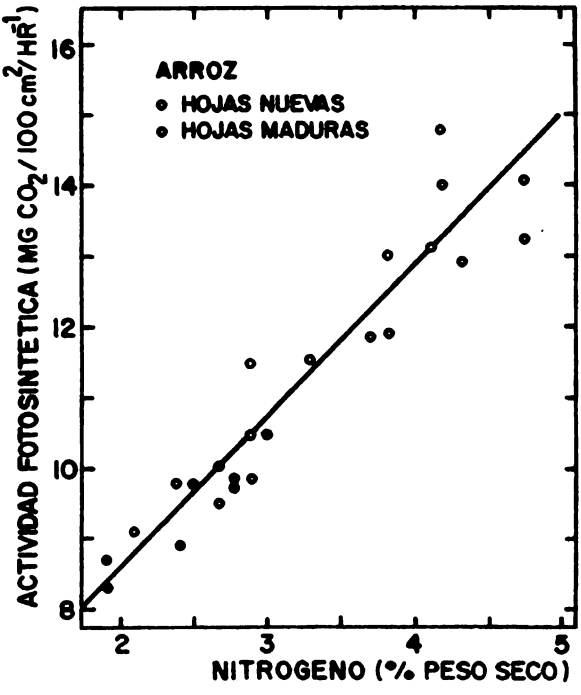


FIGURA 8.36. Relación entre el contenido de nitrógeno y la actividad fotosintética de hojas de arroz (Murata et al., 1966.)

de las células estomáticas (Fisher y Hsiao, 1968). La absorción de potasio es fuertemente estimulada por la luz y aire libre de CO_2.

Millar y Gardner (1970) realizaron experimentos similares a los descritos para nitratos, encontrando que la resistencia estomática disminuía cuando la planta tenía a su disposición una mayor cantidad de potasio (Figura 8.40). Mediciones de la tasa de transpiración en plantas con diferente concentración de K en el medio radicular, indicaron que la transpiración era notablemente mayor en aquellas plantas que tenían mayor cantidad de potasio a su disposición (Figura 8.41).

8.5. Fotosíntesis y Producción.

En varios estudios se indica que la transferencia de anhídrido carbónico a la hoja es uno de los factores más críticos para obtener fotosíntesis potencial en los cultivos.

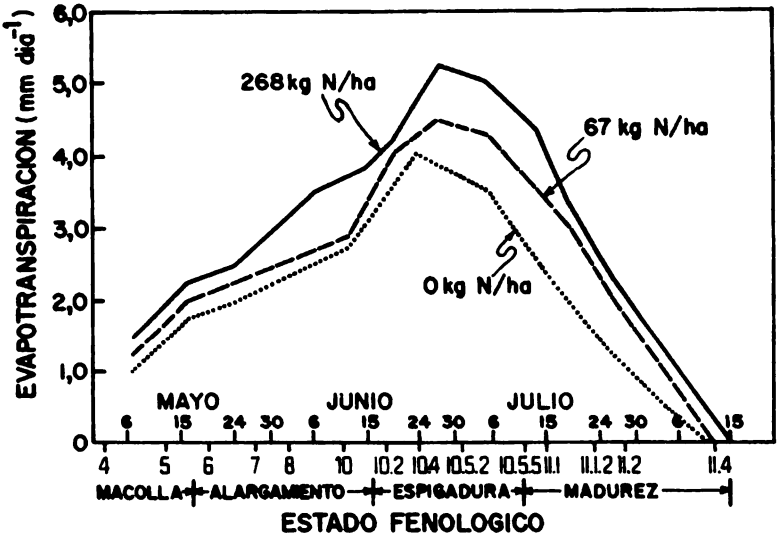


FIGURA 8.37. Evapotranspiración de trigo, cultivado con diferentes dosis de nitrógeno, en función del período fenológico (Brown, 1971).

La abertura estomática, la cual es afectada principalmente por el balance de agua de la planta y parámetros ambientales, es uno de los factores que controlan la tasa de anhídrido carbónico que entra a la planta. La transpiración es más dependiente del cierre y apertura estomática, que la fotosíntesis. Mientras la transpiración depende de las resistencias estomáticas y del aire circundante, la fotosíntesis depende, además, de la resistencia del mesófilo. El anhídrido carbónico asimilado en fotosíntesis penetra a través del mismo conducto que el agua transpirada, o sea a través de los estomas.

La fotosíntesis (F) se puede describir mediante la siguiente expresión (Stanhil y Vaadia, 1967; Waggoner, 1966):

$$F = (C_a - C_c)/(r_a + R_e + r_c + r_m) \qquad (8.3)$$

donde C_a es la concentración de CO_2 en el aire, C_c es la concentración de CO_2 en los cloroplastos, r_a es la resistencia al flujo de CO_2 debida al aire, R_e es la resistencia estomática, r_c es la resistencia de los cloroplastos y r_m es la resistencia del mesófilo.

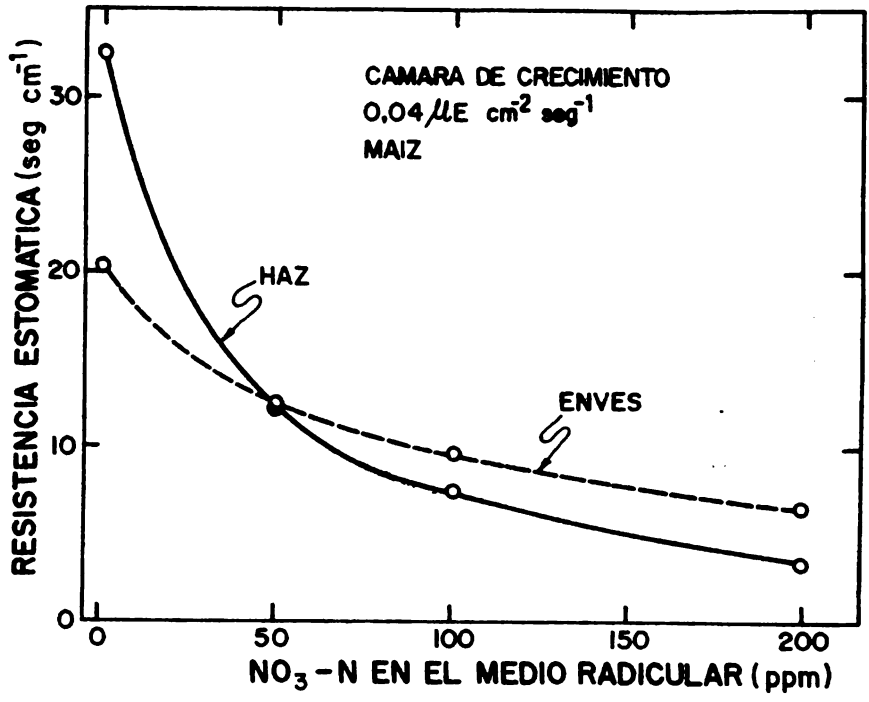


FIGURA 8.38. Resistencia estomática de maíz en función de la cantidad de nitrógeno suministrado en el medio radicular (Millar y Gardner, 1970; no publicado).

El contenido de CO_2 dentro del cloroplasto, no se puede medir directamente, pero se estima que es igual a cero en condiciones de saturación de luz, bajo las cuales ocurre la mayor parte de la acumulación de materia seca (Gaastra, 1963).

El flujo de agua y CO_2, por lo tanto, transpiración y producción de materia seca, se pueden tratar como un fenómeno de difusión con resistencias comunes en la fase de vapor.

Aunque está claro que tanto la transpiración como la producción de materia seca son afectadas por el estado de agua en el suelo, vía su efecto sobre el potencial de agua de la planta, la respuesta relativa de estos dos procesos depende de la importancia relativa de la resistencia estomática en la resistencia total para los dos tipos de flujo (Stanhil y Vaadia, 1967).

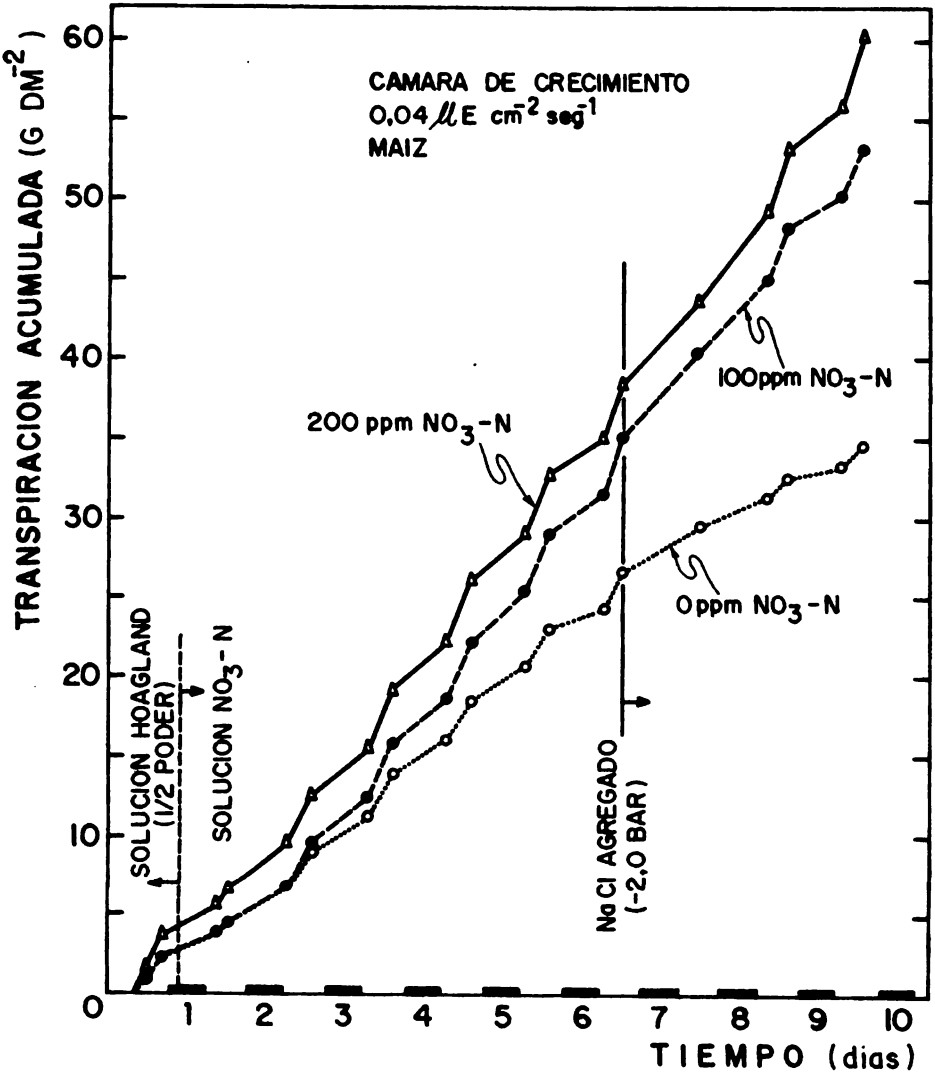


FIGURA 8.39. Transpiración de maíz en función del tiempo, para diferentes cantidades de nitrógeno suministrado en el medio radicular (Millar y Gardner, 1970; no publicado).

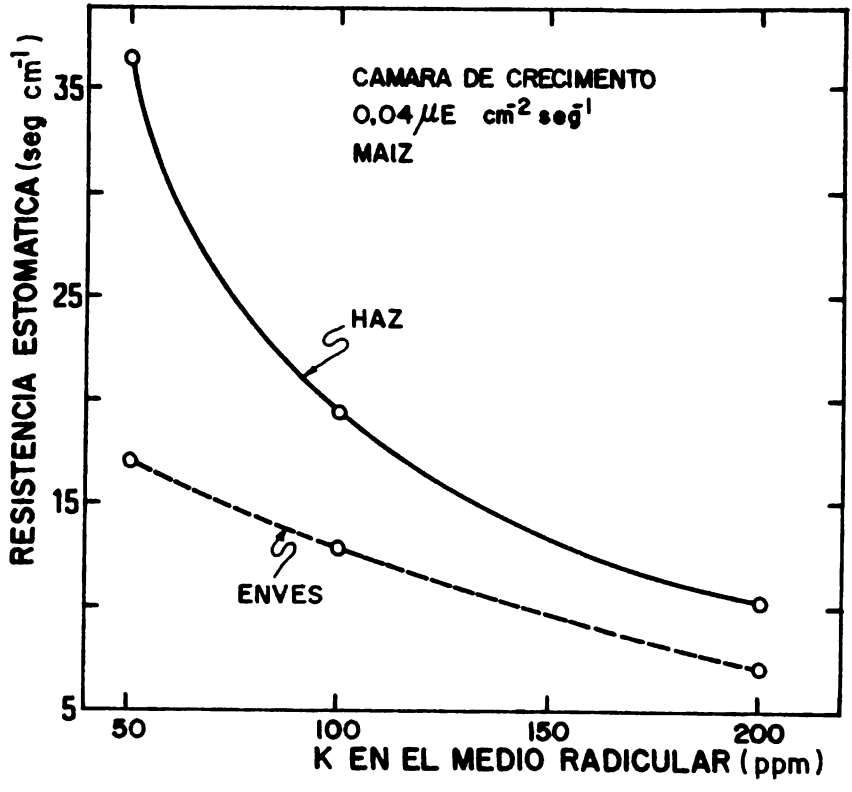


FIGURA 8.40. Resistencia estomática de maíz en función de la cantidad de potasio suministrado en el medio radicular (Millar y Gardner, 1970; no publicado).

8.5.1. Efecto del Déficit de Agua sobre la Tasa de Fotosíntesis

Un aumento en el déficit de agua reduce la tasa de fotosíntesis porque el protoplasma deshidratado es menos efectivo y porque el cierre de los estomas reduce el abastecimiento de CO_2 (Kramer, 1959; Vaadia et al., 1961; Fischer y Hagan, 1975).

Brix (1962) encontró que la fotosíntesis disminuía aun cuando las hojas presentaban poco déficit. La fotosíntesis disminuía cuando el potencial de agua disminuía por debajo de −7 bar en tomate y −4 bar en pino. Cuando el potencial de agua llegaba a −11 bar en pino y −14 bar en tomate la

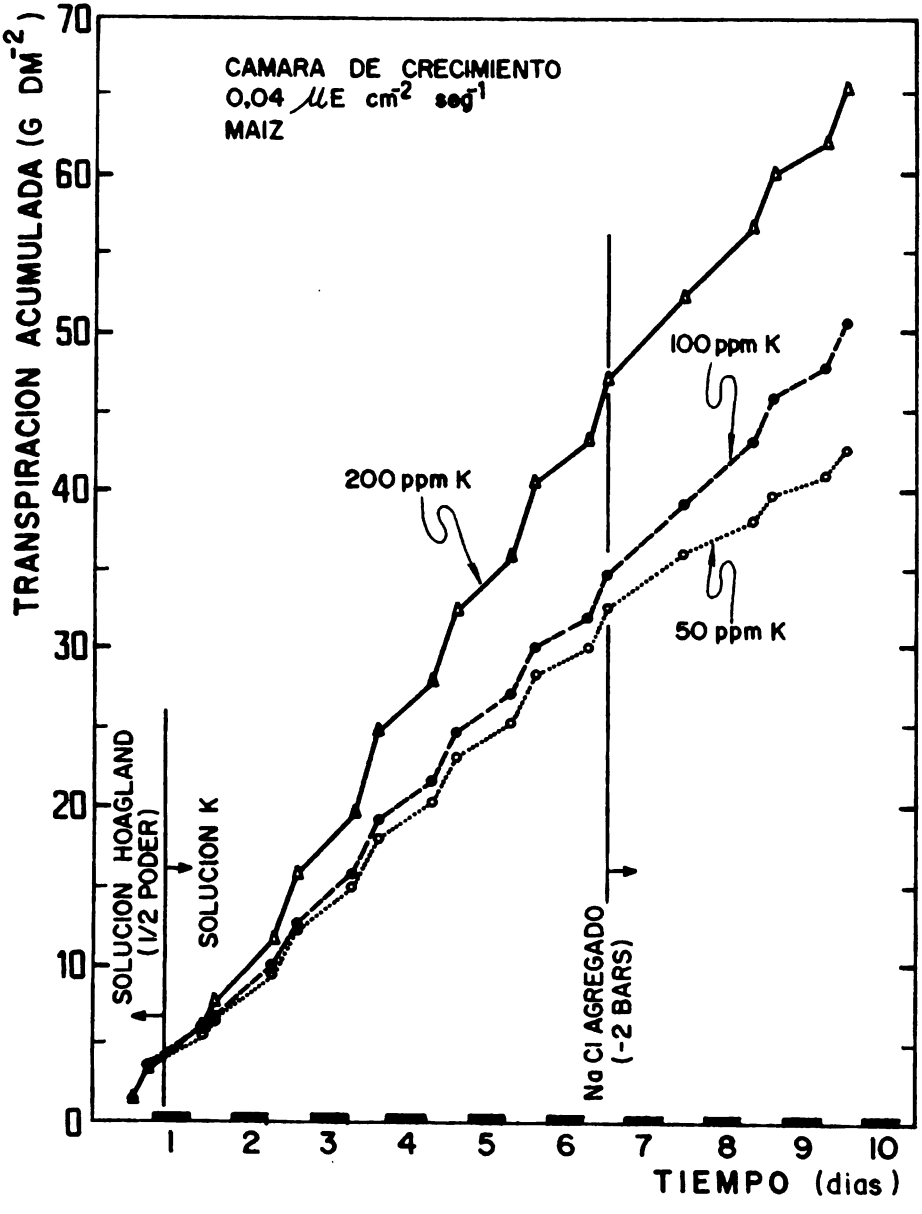


FIGURA 8.41. Transpiración de maíz en función del tiempo, para diferentes cantidades de potasio suministrado en el medio radicular (Millar y Gardner, 1970; no publicado).

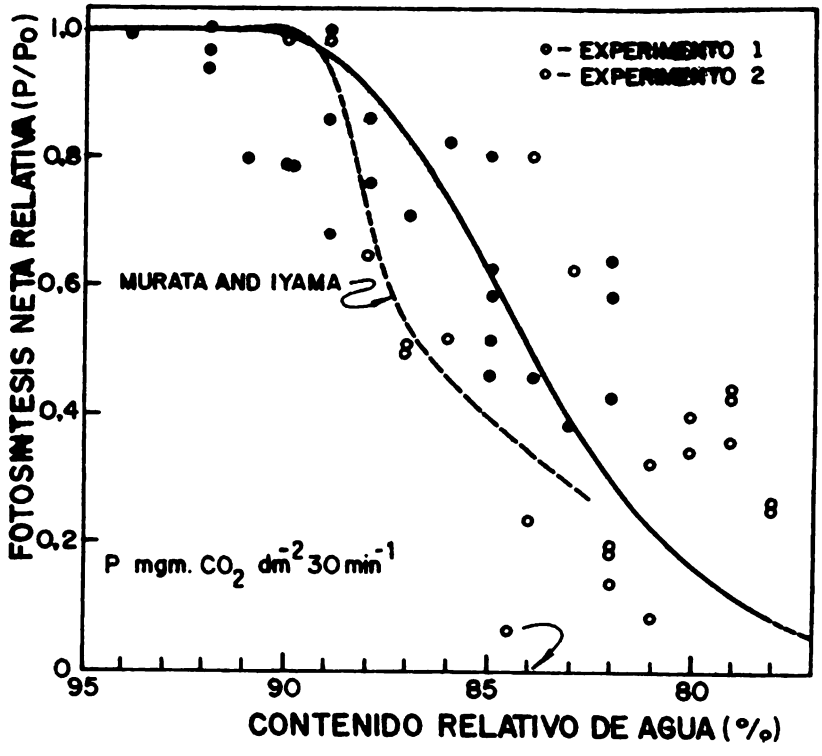


FIGURA 8.42. Relación entre fotosíntesis y contenido relativo de agua en hojas de soya (Shaw y Laing, 1966).

fotosíntesis era prácticamente cero.

En los experimentos de Totsuka y Monsi, citados por Kozlowski (1964), encontraron que la fotosíntesis de tabaco disminuía linealmente cuando los déficits aumentaban de 100 a 85 % de contenido relativo de agua en la hoja. La tasa de fotosíntesis a 85 % de contenido relativo de agua era aproximadamente igual a la mitad de la que ocurría cuando la hoja no tenía déficit de agua.

En la Figura 8.42 se muestra la información de Shaw y Laing (1966) donde se relaciona la fotosíntesis neta relativa de frijol soya en condiciones de alta luminosidad en función del contenido relativo de agua de la hoja. Esta figura indica una reducción abrupta en fotosíntesis a contenido relativo de agua en la hoja menores de 90 %. Esta información es corroborada por los

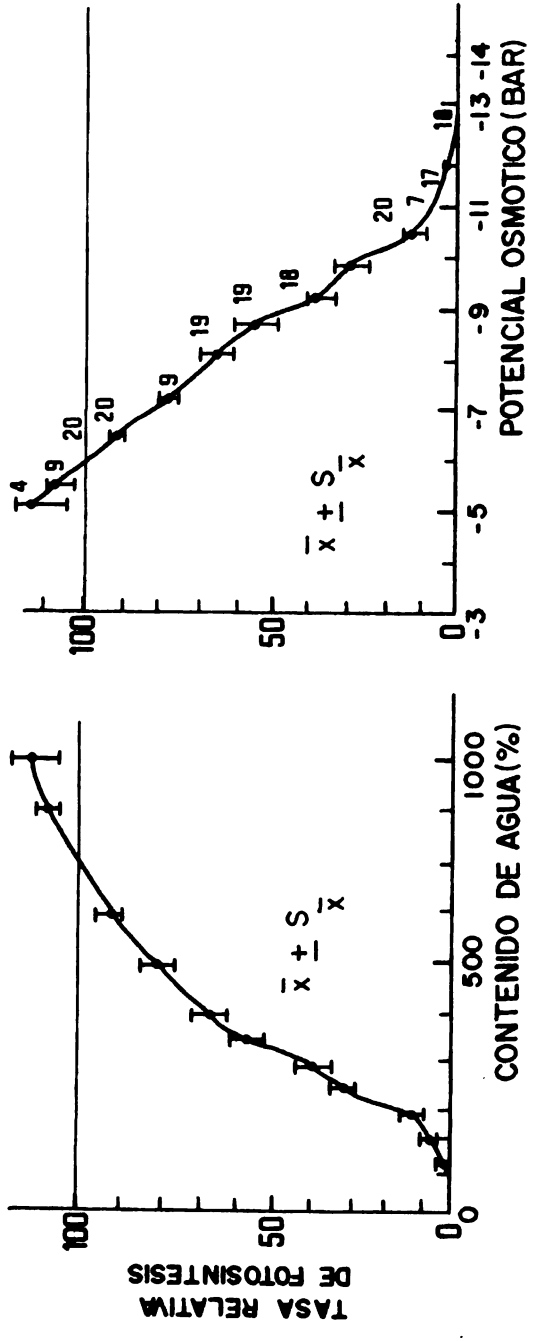


FIGURA 8.43. Fotosíntesis en función del contenido de agua y potencial osmótico de la hoja (Slavik, 1965).

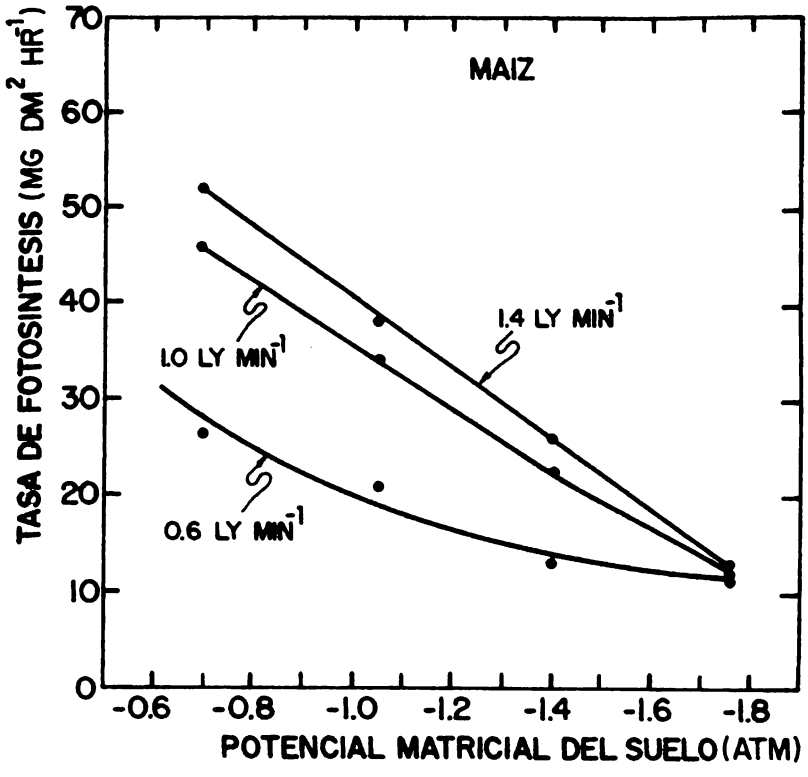


FIGURA 8.44. Fotosíntesis en maíz en función del potencial matricial del suelo y de la intensidad luminosa para hojas con 30 grados Celsius de temperatura (Información rearreglada de la Figura 3 de Idso, 1968).

datos de Murata e Iyama (1961) que también se incluyen en la Figura 8.42.

En la Figura 8.43 se muestra la relación entre fotosíntesis y contenido de agua en la hoja, la cual indica que la fotosíntesis disminuye a medida que disminuye el contenido de agua (Slavik, 1965). Por otra parte, se ha encontrado que la fotosíntesis disminuye con la disminución del potencial osmótico, en una forma similar a la indicada en la Figura 8.43 (Slavik, 1965).

En la Figura 8.44 se presenta la relación entre tasa de fotosíntesis de maíz y potencial matricial del suelo para varias intensidades luminosas y corresponde a información rearreglada de la Figura 3 de Idso (1968). Esta

información indica que la fotosíntesis disminuye rápidamente con la disminución del potencial matricial del suelo.

Durante períodos de déficits de agua en el suelo, el aumento en las resistencias estomáticas debido a la disminución de potencial de agua de las hojas, no sólo produce una reducción en la tasa de transpiración sino que también una reducción en el flujo de CO_2 por lo tanto afectando el proceso de fotosíntesis y de producción de materia seca. En la Figura 8.45 se presenta la producción de materia seca y la tasa de transpiración de fríjol en función del contenido de humedad y potencial de agua en un suelo arenoso (Millar y Gardner, 1972). La acumulación de materia seca (fotosíntesis) disminuyó abruptamente a medida que disminuía el agua del suelo. Cuando el potencial de agua disminuía de -0.28 a -0.40 bar, la producción de materia seca disminuía en 47 %. La relación entre producción de materia seca y potencial de agua promedio del día (Figura 8.46) muestra que la producción de materia seca disminuía rápidamente a potenciales de agua menores que -8 bar.

Millar y Gardner (1972) encontraron que el cierre de los estomas debido al déficit de agua resulta en una mayor reducción en la tasa de fotosíntesis que en la tasa de transpiración. Este mismo efecto fue observado por Idso (1968).

Por otra parte, se ha encontrado que la tasa de crecimiento de cebollas es directamente proporcional al potencial de presión y que la conductancia estomática es función del potencial de presión (Millar y Gardner, 1971).

Un hecho significativo observado en el experimento con fríjol en un suelo arenoso se refiere a la marcada reducción en la tasa de crecimiento (producción de materia seca) aún a altos valores de potencial de agua en el suelo (Millar y Gardner, 1972; Gardner y Millar, 1973). Esta información es similar a la obtenida por Rawitz (1970) en fríjol (Figuras 8.47 y 8.48).

Toda esta información indica que la producción de materia seca es afectada en el inicio del llamado rango de disponibilidad de agua para las plantas por lo cual desde el punto de vista de la producción de la planta el rango definido como característica del suelo no tiene mucho significado.

Un gráfico que permitiría definir un "rango de humedad productiva" del suelo sería la relación entre conductancia estomática o resistencia estomática en función del contenido de humedad del suelo, como el presentado anteriormente para cebolla en la Sección 8.1.

Otro aspecto significativo es la utilización práctica que se podría hacer de la relación entre producción de materia seca o de granos y el contenido de agua en el suelo o potencial matricial (Figura 8.43). Para regiones donde no exista una fluctuación marcada en las condiciones climáticas de año a año,

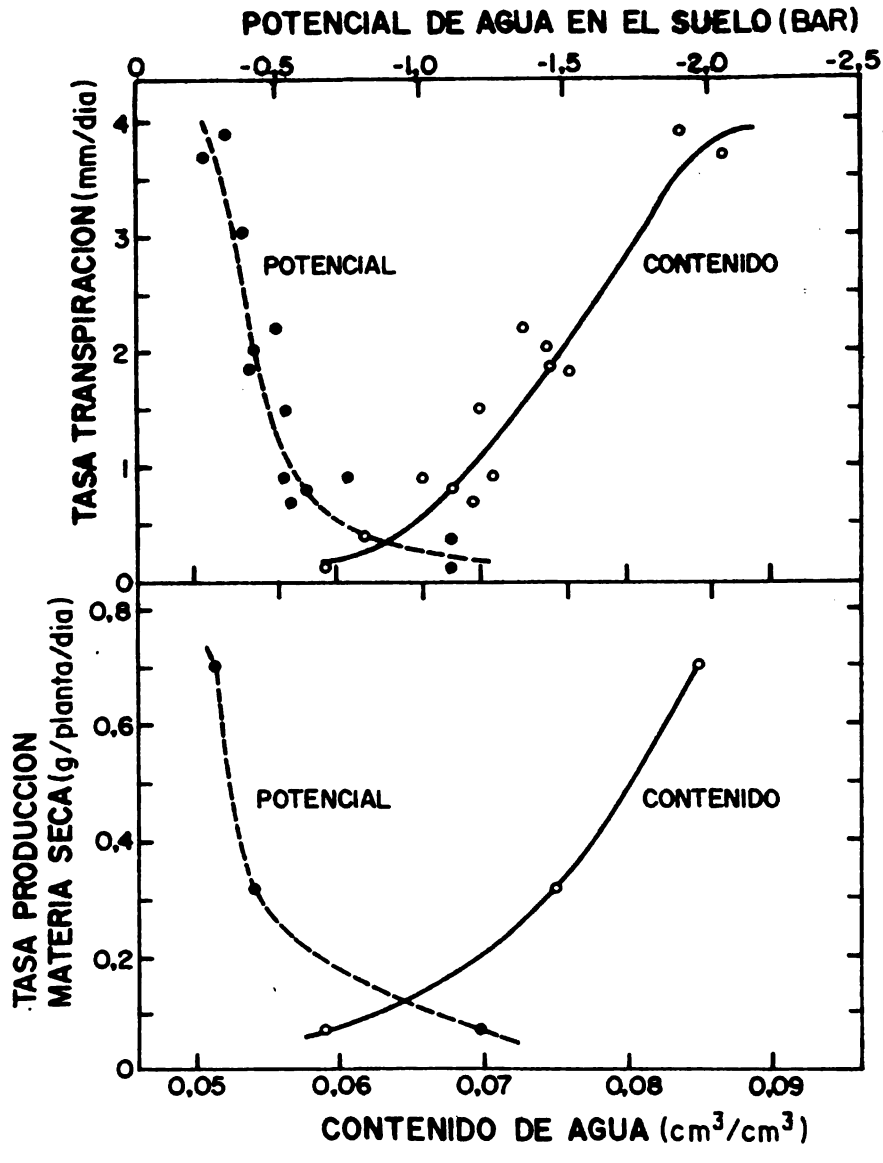


FIGURA 8.45. Tasa de transpiración y tasa de producción de materia seca de frijol en función del contenido de agua y del potencial de agua del suelo (Millar y Gardner, 1972).

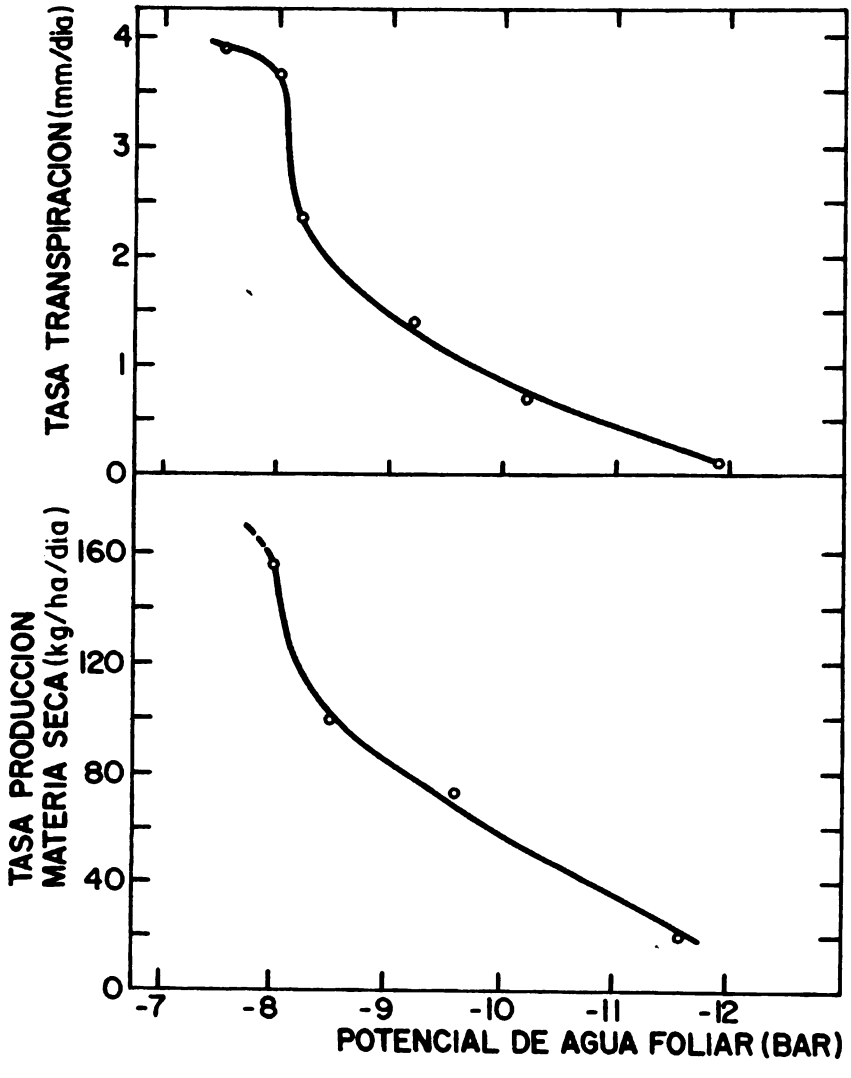


FIGURA 8.46. Tasa de transpiración y tasa de producción de materia seca de frijol en función del potencial de agua promedio de la hoja (Millar y gardner, 1972).

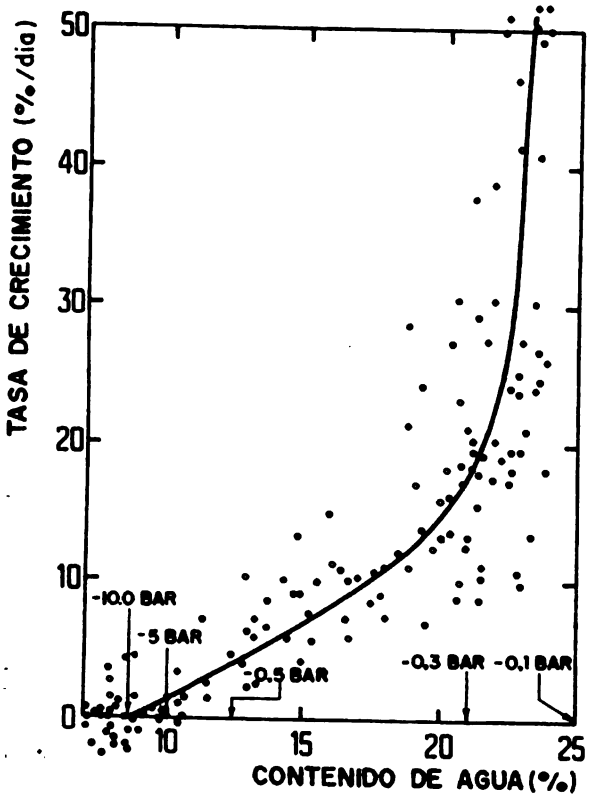


FIGURA 8.46. Relación entre la tasa de crecimiento de frijol y el potencial matricial del suelo (Rawitz, 1970).

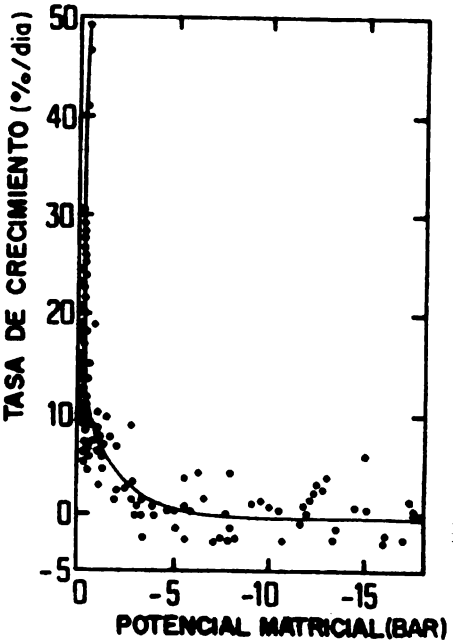


FIGURA 8.47. Relación entre la tasa de crecimiento de frijol y el contenido de agua en el suelo (Rawitz, 1970).

la relación del tipo anterior ayudaría en las programaciones de riego, además de permitir un pronóstico de la producción basándose exclusivamente en las variaciones de las condiciones de humedad o de potencial matricial en el suelo. Por cierto que esta sería una proposición simplificada al dejar de lado los parámetros de la atmósfera, pero no errada en consideración al gran efecto que produce en la producción una pequeña variación en las condiciones hídricas del suelo (Figuras 8.45 y 8.46), especialmente en suelos de textura franco a arenosa.

8.6. Referencias Bibliográficas.

[1]BARRS, H. D. 1968. Determination of water deficits in plant tissues, p. 235–368. In: T. Kozlowski (ed.) water deficits and plant growth. Volume I: Development, Control and Measurement, New York, Academic Press.

[2] BEADLE, C. L., K. R. STEVENSON, H. H. NEUMANN, G. W. THURTELL AND K. M. KING 1972. Diffusive resistance, transpiration, and photosynthesis in single leaves of corn and sorghum in relation to leaf water potential. Can. J. Plant Sci. 53:537–544.

[3] BEGG, J. E. AND N. C. TURNER. 1970. Water potential gradients in field tobacco. Agronomy Journal 46:343–346.

[4] BRIX, H. 1962. The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plants and loblolly pine seedlings. Physiologia Plantarum 15:10–20.

[5] BROWN, P. L. 1971. Water use and soil water depletion by dryland winter wheat as affected by nitrogen fertilization. Agronomy Journal 63(1):43–46.

[6] BROWN, K. W., W. R., JORDAN AND J. C. THOMAS. 1976. Water stress induced alterations of the stomatal response to decreases in leaf water potential. Physiology Plantarum 37:1–5.

[7] CASTEL SANCHEZ, J. R. 1983. Relaciones Agua-Planta. 124 p. In: II Curso Internacional de Riego Localizado. Tomo II: Aspectos Agronómicos. Tenerife, España, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.

[8] COWAN, I. R. 1965. Transport of Water in the soil plant-atmosphere system. J. Appl. Ecol. 2:221–239.

[9] DUBE, P. A., K. R. STEVENSON AND G. W. THURTELL. 1974. Comparison between two inbred corn lines for diffusive resistances, photosynthesis and transpiration as a function of leaf water potential. Can. J. Plant Sci. 54:765–770.

[10] DENIWAY, J. M. 1971. Water relations of Fusarium wilt in tomato. Physiol. Plant Pathol. 1:537–546.

[11] EHLIG, C. F. AND W. R. GARDNER. 1964. Relationship between transpiration and the internal water relations of plants. Agronomy Journal 56:127–130.

[12] FISHER, R. A. AND R. M. HAGAN, 1965. Plan water relations, irrigation management, and crop yield. Experimental Agriculture 1:161–177.

[13] FISHER, R. A. 1968. Stomatal opening: role of potassium uptake by guard cells. Science 168:784–785.

[14] FISHER, R. A. AND T. C. HSIAO. 1963. Stomatal opening in isolated epidermal strips of vicia faba. II. Responses to KCl concentration and the role of potassium absorption. Plant Physiology 43:1953–1958.

[15] GAASTRA, P. 1963. Climatic control of photosynthesis and respiration. In: L. T. Evans (ed), Environment control of plant growth. New York, Academic Press.

[16] GARDNER, W. R. AND C. F. EHLIG. 1962. Some observations of the movement of water to plant roots. Agronomy Journal 54:453–456.

[17] GARDNER, W. R. AND C. F. EHLIG. 1964. Water flux from soil to plant to atmosphere. Chapter 1. In: W. R. Gardner et al. (eds). Water Transfer from soil to the atmosphere as related to soil properties, plant characteristics and weather. Riverside, California, U. S. Salinity Laboratory, ARS/USDA. (Research Report 374).

[18] GARDNER, W. R. AND C. F. EHLIG. 1965. Physical aspects of the internal water relations of plant leaves. Plant Phisiology 40:705–710.

[19] GARDNER, W. R. AND A. A. MILLAR. 1973. Plant response to field water balance. Vienna, International Atomic Energy Agency, Soil-Moisture and Irrigation Studies II: 143–153.

[20] HSIAO, T. C. 1973. Plant responses to water stress. Annual Review of Plant Physiology 24:519–570.

[21] IDSO, S. B. 1968. Atmospheric-and soil-induced water stresses in plants and their effects on transpiration and photosynthesis. Journal of Theorethical Biology 21:1–12.

[22] KANEMASU, E. T. AND C. B. TANNER. 1969. Stomatal diffusion resistance of snap beans. I. The influence of leaf-water potencial. Plant Physiology 44:1547–1552.

[23] KANEMASU, E. T. AND C. B. TANNER. 1969. Stomatal diffusion resistnace of snap beans. II. Effect of light. Plant Physiology 44:1542–1546.

[24] KETELLAPER, H. J. 1963. Stomatal physiology. Ann. Rev. Plant Physiology 14:249–270.

[25] KNIPLING, E. B. 1967. Effect of leaf aging on water deficit-water potential relationships of dogwood leaves growing in two environments. Phisiologia Plantarum 20:65–72.

[26] KOZLOWSKI, T. T. 1964. Water metabolism in plants. New York, Harper and Row, Publishers.

[27] KRAMER, P. J. 1959. Transpiration and water economy of plants. In: F. C. Steward (ed.), Plant Physiology. 2. Plants in relations to water and solutes. New York, Academic Press. pp. 607–726.

[28] KRAMER P. J. 1963. Water stress and plant growth. Agronomy Journal 55:31–35.

[29] KRAMER, P. J, AND H. BRIX. 1962. Measurement of water stress in plants. In: F. E. Eckhardt (ed.). Methodology of plant ecophysiology. Proceedings of Montpellier Symposium, UNESCO, Paris. Arid Zone Research 25:343–351.

[30] KRAMER, P. J., O. BIDDULPH AND F. S. NAKAYAMA. 1967. Water absorption, conduction and transpiration. In: R. M. Hagan et al. (ed.), Irrigation of agricultural lands. American Society of Agronomy, Agronomy Series 11:320–336.

[31] MEIDER, H. AND T. A. MANSFIELD. 1968. Physiology of stomata. Maidenhead, England, McGraw Hill Publishing Company, Ltd. 179 p.

[32] MILLAR, A. A. 1967. Internal water balance of barley in relation to soil moisture stress and environmental conditions. Fargo, N. Dakota State University, Dept. of Soils. 104 p. (M.S. Thesis).

[33] MILLAR, A. A., M. E. DUYSEN, AND G. E. WILKINSON. 1968. Internal water balance of barley under soil moisture stress. Plant Physiology 43:968–972.

[34] MILLAR, A. A., M. E. DUYSEN AND E. B. NORUM. 1970. Relationships between the leaf water status of barley and soil water. Canadian Journal of Plant Science 50:363–370.

[35] MILLAR, A. A. AND W. R. GARDNER. 1970. The effect of nitrogen and potassium supplies on the stomatal resistance of corn. Madison, Wis., Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. (Unpublished data).

[36] MILLAR, A. A., R. E. JENSEN, A. BAUER AND E. B. NORUM 1971. Influence of atmospheric and soil environmental parameters on the diurnal fluctuations of leaf water status of barley. Agricultural Meteorology 8:92–105.

[37] MILLAR, A. A., W. R. GARDNER AND S. M. GOLTZ. 1971. Internal water status and water transport in seed onion plants. Agronomy Journal 63:779–784.

[38] MILLAR, A. A. 1972. Thermal regime of grapevines. American Journal of Enology and Viticulture 23(4):173–176.

[39] MILLAR, A. A. AND W. R. GARDNER. 1972. Effect of the soil and plant water potentials on the dry matter production of snap beans. Agronomy Journal 64:559–562.

[40] MILLAR, A. A. 1972. Efecto del riego y condiciones atmosféricas sobre la resistencia estomática de algunos cultivos. Chillán, Chile, Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción (No publicado).

[41] MILLER, P. C. AND D. M. GATES. 1967. Transpiration resistance of plants. The American Midland Naturalist 77(1):77–85.

[42] MOSS, D. M., R. B. MUSGRAVE AND E. R. LEMON. 1961. Photosynthesis under field conditions: III. Some effects of light, carbon dioxide, temperature and soil moisture on photosynthesis, respiration and transpiration of corn. Crop Sci. 1:83–87.

[43] MURATA, Y. AND J. IYAMA. 1961. Studies on the photosynthesis in upland field crops: II. Relationships between soil moisture and photosynthesis of some upland crops and rice plant. Crop Science Society of Japan Proceedings 19:349–352.

[44] MURATA, Y., J. IYAMA, M. HIMEDA, S. IZUMI, A. KAWABE, AND Y. KANZAKI. 1966. Studies on the deep plowing, dense planting cultivation of rice plants from the point of view of photosynthesis and production of dry matter. Bulletin National Institute Agriculture Science, Japan, Serie D 15:1–53.

[45] NAMKEN, L. N. 1964. The influence of crop environment on the internal water balance of cotton. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28:12–15.

[46] PRASAD, N. 1967. Influence of microclimate on diurnal water relations in western wheatgrass leaves. Ph.D. Thesis, Dept. of Botany, North Dakota State University, Fargo, N.D. 149 p.

[47] QUEIROZ FILHO, S.C. de, A. A. MILLAR e P. T. ALVIM. 1975. Micrometeorología da videira sob condicões de deficiencia hídrica. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, III:434–439.

[48] RAWITZ, E. 1970. The dependence of growth rate and transpiration rate of plant and soil physical parameters under controlled conditions. Soil Science 110(3):172–182.

[49] ROJAS, M., A. A. MILLAR y A. VALENZUELA. 1972. Relaciones hídricas del sistema suelo-planta. Chillán, Chile, Departamento de Suelos, Universidad de Concepción 12. (Boletín Técnico–Suelos 37).

[50] SHAW, R. H. AND D. R. LAING. 1966. Moisture stress and plant response, pp. 73–94. In: W. H. Pierre et al. (ed.), Plant environment and efficient water use. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy.

[51] SHEPHERD, W. 1964. Diffusion pressure deficit and turgidity relationships of dettached leaves of *Trifolium repens* L. Australian Journal of Agricultural Research 15:746–751.

[52] SHIMSHI, D. 1970. The effect of nitrogen supply on transpiration and stomatal behaviour of beans (*Phaseolus vulgaris*). New phytologist 69:405–412.

[53] SHIMSHI, D. 1970. The effect of nitrogen supply on some indices of plant-water relations of beans (*Phaseolus vulgaris*). New Phytolist 69:413–424.

[54] SLAYTER, R. O. 1967. Plant-water relationships. New York, Academic Press Inc.

[55] SLAVIK, B. 1965. The influence of decreasing hydration level of photosynthetic rate in the thalli of the hepatic *Conocephalium conicum*. In: B. Slavik (ed.), Symposium on water stress in plants. The Hague, Dr. W. Junk Publisher. pp. 203–209.

[56] STANHIL, G. AND Y. VAADIA. 1967. Factors affecting plant responses to soil water, pp. 446–457. In: R. M. Hagan et al. (ed.), Irrigation of agricultural lands. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. (Agronomy Series No. 11).

[57] STANLEY, C. D., T. C. KASPAR AND H. M. TAYLOR. 1981. Modeling soybean leaf-water potentials under nonlimiting soil water conditions. Agronomy Journal 73(2):251–254.

[58] STERN, W. R. AND C. M. DONALD. 1963. The influence of leaf area and radiation on the growth of clover in swards. Australian Journal of Agricultural Research 13:615–623.

[59] TANEDA, T. 1961. Studies on the photosynthesis and production of dry matter in the community of rice plants. Japanese Journal of botany 17:403–437.

[60] VAADIA, Y., F. C. RANEY AND R. M. HAGAN. 1961. Plant water deficits and physiological processes. Annual Review Plant Physiology 12:265–292.

[61] WAGGONER, P. E. 1966. Decreasing transpiration and the effect upon growth. pp. 49–72. In: W. H. Pierre et al. (ed.), Plant environment and efficient water use. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy.

[62] WEATHERLEY, P. E. 1951. Studies in the water relations of the cotton plant. 2. Diurnal and seasonal variations in relative turgidity and environmental factors. New Phytologist 50:36–51.

[63] WEATHERLEY, P. E. AND R. O. SLATYER. 1957. Relationship between relative turgidity and diffusion pressure deficit in leaves. Nature 179:1085–1086.

[64] WERNER, H. O. 1954. Influence of atmospheric and soil moisture conditions on diurnal variations in relative turgidity of potato leaves. Nebraska University, Agr. Expt. Sta., Res. Bull. 76. 39 p.

[65] WHITEMAN, P. C. AND G. L. WILSON. 1963. Estimation of diffusion pressure deficit by correlation with relative turgidity and beta radiation absorption. Australian Journal of Biological Sciences 16:140–146.

CAPITULO 9

MOVIMIENTO DE AGUA EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA

El movimiento de agua desde el suelo a través de la planta y hacia la atmósfera se produce en la dirección de los menores potenciales de agua. En otras palabras, el agua se mueve desde un alto potencial a un bajo potencial de agua.

Gardner y Ehlig (1962) aplicaron la ecuación general de flujo a la absorción pasiva del agua por las plantas y encontraron que bajo condiciones de estado permanente, el proceso del movimiento del agua queda descrito por la siguiente expresión:

$$q = (\Psi_p - \Psi_s)/R \qquad (9.1)$$

donde q es la densidad de flujo de agua absorbida por la planta (igual a la tasa de transpiración), Ψ_p es el potencial de agua en la planta, Ψ_s es el potencial de agua en el suelo de la zona radicular, y R es la resistencia total al movimiento de agua del sistema suelo-planta.

9.1. Densidad de Flujo y Gradiente de Potencial.

El conocimiento de la relación entre la densidad de flujo y la caída de potencial de agua en plantas, en diferentes tipos de suelo, es de gran importancia para entender y modelar el movimiento del agua a través del sistema suelo-planta-atmósfera.

La mayoría de los modelos que describen el movimiento agua a través del sistema suelo-planta usan la analogía de la ley de Ohm, la cual fue propuesta por Van den Honert (1948). En esta analogía se supone que el flujo de agua es directamente proporcional a la diferencia de potencial de agua entre la planta y el suelo.

En la literatura no existe mucha información de la relación entre flujo y diferencia de potencial para plantas creciendo en el suelo. Existe mucha información obtenida en plantas con el sistema radicular creciendo en solución

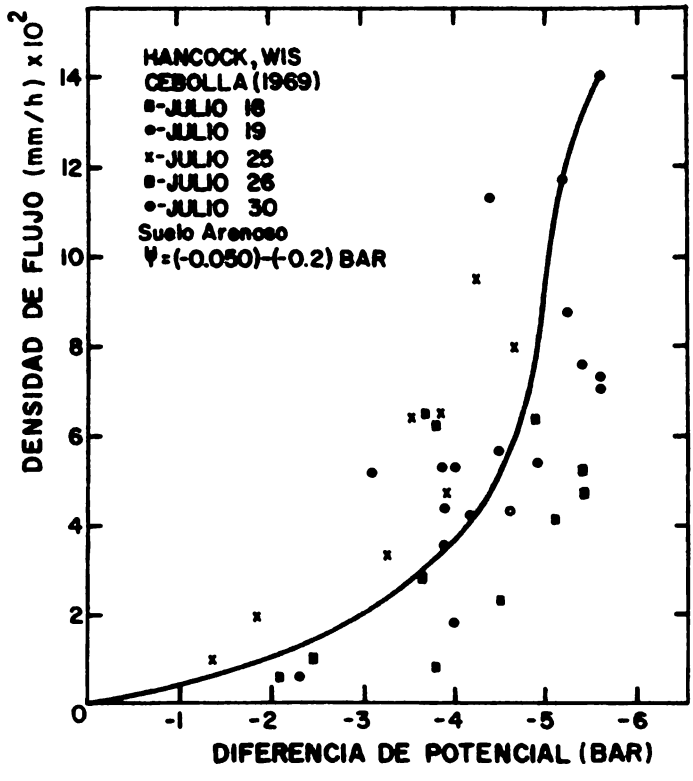


FIGURA 9.1. Relación entre la densidad de flujo y la diferencia de potencial de agua en plantas de cebollas creciendo en un suelo arenoso en condiciones de campo (Millar et al., 1971).

y sometidas a succión aplicada a través del tallo decapitado (Hylmo, 1958; Mees Weatherley, 1957; Kuiper, 1963). Kuiper (1963), trabajando con plantas de frijol decapitadas encontró que aumentando la succión resultaba en una relación logarítmica entre el agua absorbida y la succión y encontró una relación lineal cuando se disminuía desde altos (0,8 bar) a bajos valores de succión. Hylmo (1958) encontró para habas una relación no lineal hasta 3,5 bar, mientras que Mees y Weatherley (1957) encontró una relación logarítmica hasta 2,5 bar, para tomate.

Millar et al. (1971) estudiaron la relación entre la densidad de flujo y la diferencia de potencial en cebolla bajo condiciones de campo en un suelo arenoso (Figura 9.1), en condiciones controladas en tres tipos de suelos (Fi-

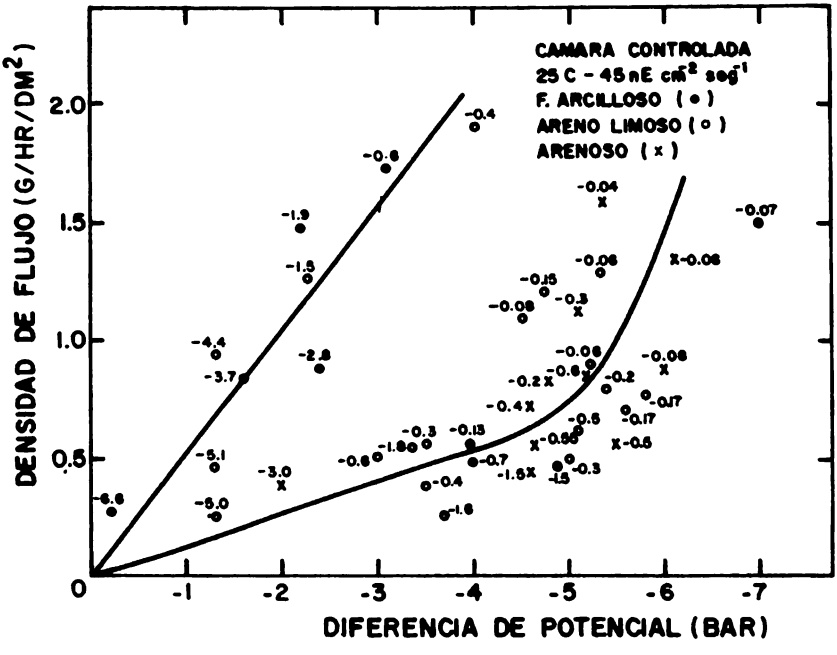


FIGURA 9.2. Relación entre la densidad de flujo y la diferencia de potencial de agua en plantas de cebolla creciendo en tres suelos diferentes, bajo condiciones variables de potencial de agua en el suelo. Los números encima de los puntos indican el valor del potencial de agua del suelo (Millar, 1970).

guras 9.2 y 9.3) y en condiciones controladas en medio nutritivo (Figura 9.4), encontrando que la relación entre densidad de flujo y diferencia de potencial de agua era de tipo curvilíneo. El mismo tipo de relación se encontró para fríjol (Gardner 1969). En general, la relación entre transpiración (densidad de flujo) y diferencia de potencial es cóncava hacia el eje de potencial. Esto implica que a medida que el flujo aumenta, la diferencia de potencial entre las hojas de la planta y el suelo disminuye considerablemente para mantener una determinada densidad de flujo. Después de una diferencia de potencial de cerca de −5 bar, aumentos de flujo resultan en pequeños aumentos de diferencia de potencial a través de la planta. Estudios teóricos realizados por Dalton y Gardner (1972) permitieron verificar matemáticamente los resultados experimentales.

Hailey et. al. (1973) revisaron los trabajos existentes sobre la relación

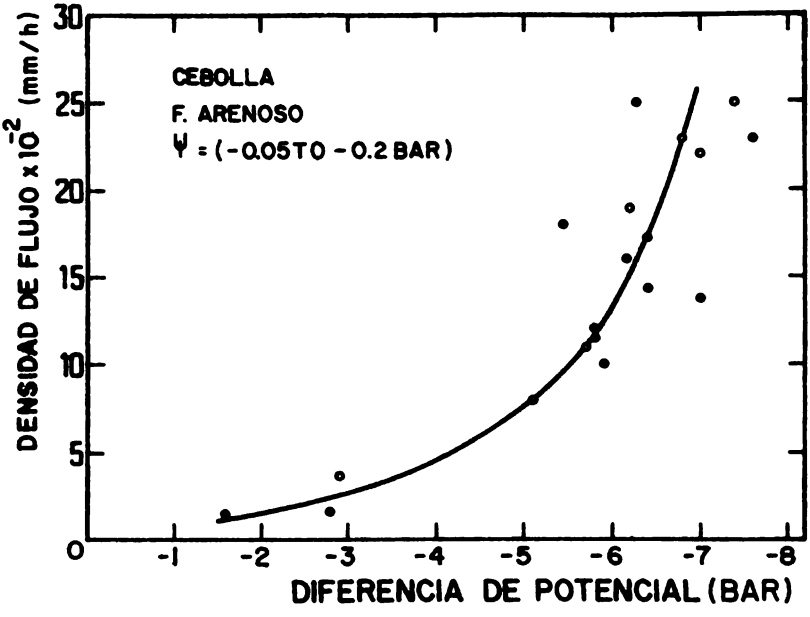


FIGURA 9.3. Relación entre la densidad de flujo y la diferencia de potencial de agua en plantas de cebolla creciendo en un suelo areno limoso en condiciones de invernadero (Millar, 1970).

entre la densidad de flujo y la diferencia de potencial, cuyos resultados aparecen en la Figura 9.5. Un grupo de plantas presentaba una relación lineal (curvas 4, 5, 6, 9 y 10), relación exponencial (curvas 7 y 8) y relación curvilínea (curvas 1, 2 y 3).

La naturaleza no linear de la relación entre densidad de flujo y la diferencia de potencial es evidente, pero no se tiene una explicación sólida para esta conducta de la planta. Kuiper (1963) discute en forma detallada los posibles mecanismos que intervienen. Una de las explicaciones se basa en el problema del flujo simultáneo de agua e iones a través de las membranas semipermeables de las raíces. Kedem y Katcholsky (1958) le dan un tratamiento matemático a esta posibilidad.

La mayoría de los modelos que describen el proceso de transporte de agua en el sistema suelo-planta consideran que la diferencia de potencial de agua

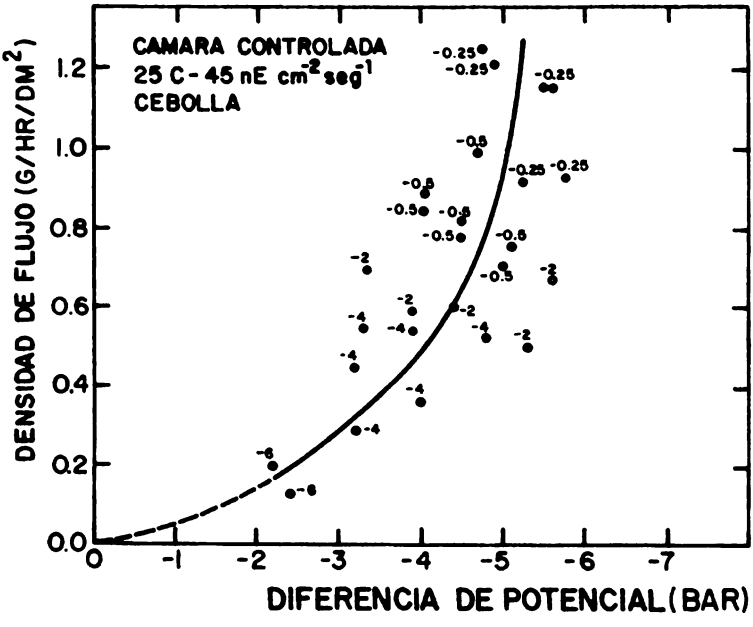


FIGURA 9.4. Densidad de flujo de cebollas en función de la diferencia de potencial de agua entre las hojas y la solución del medio radicular. Los números encima de los puntos indican el potencial de agua de la solución nutritiva (Millar, 1970).

varía linearmente con la densidad de flujo, lo que sugiere que las resistencias internas de la planta permanecen constantes con los cambios de flujo, como lo usan Gardner (1960) y Cowan (1965) en sus modelos .

En virtud de la información experimental existente que indica que la relación densidad de flujo y diferencia de potencial es esencialmente no linear, los modelos que describen el transporte de agua en el sistema suelo- planta basados en la ley de Ohm deben ser modificados para incluir la no linearidad de la relación.

9.2. Resistencia del Sistema Suelo-Planta al Flujo de Agua.

La resistencia total del sistema, R, esta formada por dos resistencias, R_p la resistencia que presenta la planta y R_s la resistencia que presenta el suelo al movimiento del agua. Estas resistencias individuales se consideran actuando en serie, resultando por lo tanto:

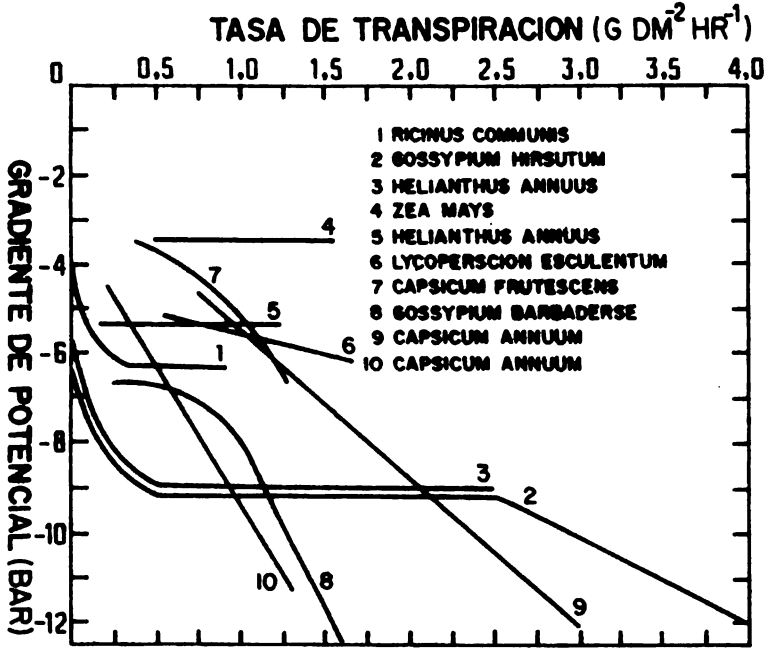


FIGURA 9.5. Relación entre tasa de transpiración y gradiente de potencial para varias especies (Hailey et al., 1973).

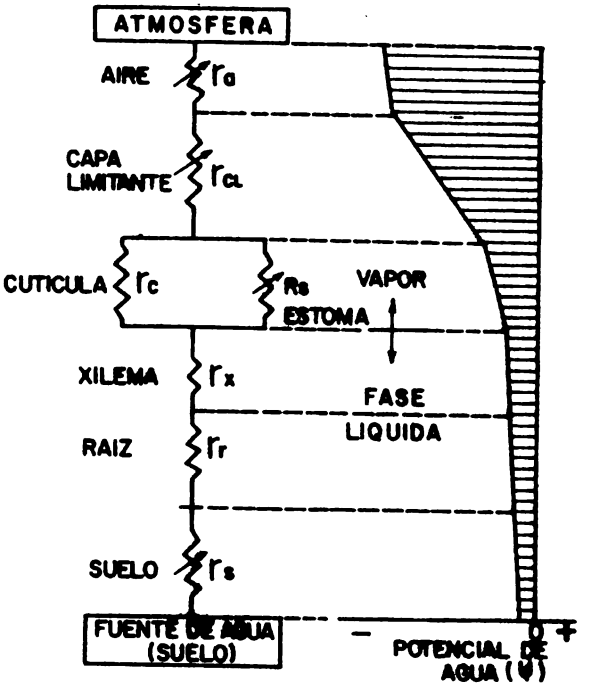


FIGURA 9.6. Diagrama esquemático de las resistencias al movimiento de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera.

$$R = R_p + R_s \tag{9.2}$$

Introduciendo la ecuación (9.2) en (9.1), se tiene:

$$q = (\Psi_p - \Psi_s)/(R_p + R_s) \tag{9.3}$$

En la resistencia que presenta la planta, R_p, se pueden incluir componentes que consideren la resistencia que oponen las raíces, tallos y hojas a la transmisión del agua (Skidmore y Stone, 1964). Un diagrama esquemático de las resistencias al movimiento de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera se presenta en la Figura 9.6.

Con el objetivo de simplificar la discusión, se englobaron las resistencias parciales de la planta en el término R_p.

La resistencia que presenta el suelo al movimiento de agua, R_s, es inversamente proporcional a la conductividad capilar del suelo y a la densidad del sistema radicular. Lo anterior queda descrito por la expresión siguiente:

$$R_s = 1/(B\ k\ L) \tag{9.4}$$

donde B es una constante, k es la conductividad capilar del suelo, y L es la longitud de raíces por unidad de volumen del suelo.

Introduciendo la ecuación (9.4) en la ecuación (9.3), se tiene la ecuación general que describe el flujo de agua en el sistema suelo-planta:

$$q = (\Psi_p - \Psi_s)/\{R_p + 1/(B\ k\ L)\} \tag{9.5}$$

Considerando que la conductividad capilar del suelo (k) esta relacionada exponencialmente con el contenido volumétrico de agua del suelo (Θ), se puede escribir:

$$k = C\ \Theta^n \tag{9.6}$$

donde C y n son constantes que dependen del tipo de suelo.

Introduciendo la expresión (9.6) en la ecuación (9.5), se tiene:

$$q = (\Psi_p - \Psi_s)/\{R_p + 1/(B\ L\ C\ \Theta^n)\} \tag{9.7}$$

Multiplicando la expresión (9.7) por R_p/R_p y luego factorizando el denominador, se obtiene:

$$q = \{(\Psi_p - \Psi_s)/R_p\}/\{(1/\Theta^n)\,(\Theta^n + 1/(B\,L\,C\,R_p))\} \qquad (9.8)$$

De la expresión (9.8), se obtiene:

$$q = \alpha\,\Theta^n/(\Theta^n + \beta) \qquad (9.9)$$

$$\alpha = (\Psi_p - \Psi_s)/R_p$$

$$\beta = 1/(B\,L\,C\,R_p)$$

La ecuación (9.9) expresa la absorción de agua por la planta en función del contenido de agua del suelo.

9.2.1. Condiciones de Alto Contenido de Agua en el Suelo

La conductividad capilar del suelo es una función del contenido de agua (Figura 4.8 del Capítulo 4). Para contenidos de agua, cerca de capacidad de campo, la conductividad capilar no es un factor limitante de movimiento de agua en la mayoría de los suelos. Bajo estas condiciones, el término R_p es considerablemente mayor que R_s. Por lo tanto, el término R_s se puede considerar igual a cero debido a su insignificancia con respecto al valor de R_p.

Considerando lo anterior, la ecuación (9.3) se reduce a:

$$q = (\Psi_p - \Psi_s)/R_p \qquad (9.10)$$

La expresión (9.10) permite determinar la magnitud de la resistencia de la planta, puesto que q, Ψ_p y Ψ_s son parámetros fácilmente medibles.

Algunos datos experimentales indican que R_p tiene valores similares en diversas plantas (Cuadro 9.1).

En el Cuadro 9.2 se muestra la resistencia de la planta y sus componentes para las especies de girasol, tomate y tabaco. En general, la mayor resistencia se encuentra en el paso del agua desde la superficie de raíz hasta el xilema. La resistencia en esta trayectoria se conoce como resistencia radial. Comparativamente, la resistencia axial, a través de los vasos xilemáticos, es muy pequeña y se debe principalmente a la fricción en los vasos capilares. En los Cuadros 9.3 y 9.4 se incluyen valores típicos de resistencias radial y axial, respectivamente, para varias especies.

CUADRO 9.1. Valores experimentales de resistencia de la planta al flujo de agua determinados en la ecuación 9.10, en varios suelos.

Suelo	Rp (cm día/mm)	Especie	Referencias
Franco arenoso	1044	Pasto	Rijtema (1965)
Arcilla	1065	Pasto	Rijtema (1965)
Orgánico	1018	Pasto	Rijtema (1965)
Franco arenoso fino	1100	Trébol	Gardner y Ehlig (1963)
Arenoso	1250	Cebolla	Millar et al. (1971)

CUADRO 9.2. Valores de resistencia al flujo de agua a través de la planta y sus componentes (Jensen et al., 1961; Begg y Turner, 1970.

	Resistencia (100 atm/cm3)		
Componente	Girasol	Tomate	Tabaco
Planta	14,7	8,9	-
Tallo y raices	9,2	5,1	4,77
Tallo y hojas	5,5	2,7	13,03
Tallo	2,7	1,5	3,72

CUADRO 9.3. Resistencia radial al transporte de agua por unidad de superficie absorbente de raíz y/o unidad de longitud radicular en varias especies (Castel, 1983).

Especie	Unidad de superficie (bar seg/cm) x 10	Unidad de longitud de raiz (bar seg/cm) x 10	Referencias
Cebolla	1,1 - 2,3	-	Hay y Anderson (1972)
Girasol	2,2 - 14,3	1,4	Newman (1973)
			Shalhevet et al. (1976)
Haba	0,6 - 18,5	0,02 - 0,8	Brouwer (1953)
			Newman (1973)
Judia	1 - 17,8	1,9	O'Learly (1971)
			Newman (1973)
Algodón	-	0,9	Taylor y Kleeper (1975)
Limón	-	1	Ramos y Kaufman (1979)
Maiz	1,5 - 5	0,03 - 0,4	House y Findlay (1966)
			Newman (1973)
Tomate	1 - 1,6	0,2	Newman (1973)
			Shalhevet et al. (1976)
Pasto	-	3,2	Hansen (1974)
Trigo	0,5 - 42	-	Seaton y Landsberg
Trébol y Festuca	-	0,65	Burch (1979)

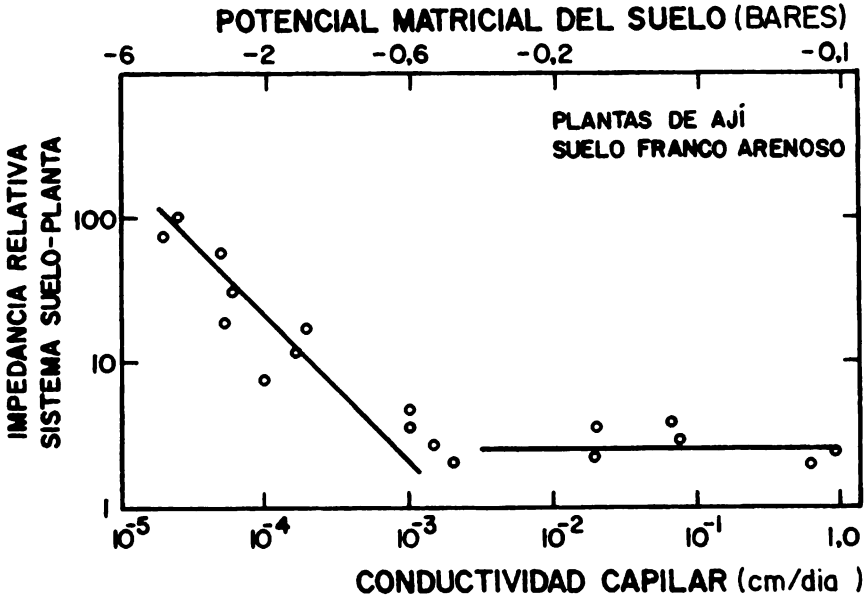


FIGURA 9.7. Impedancia o resistencia relativa del sistema suelo-planta al movimiento de agua en función de la conductividad capilar del suelo (Gardner y Ehlig, 1962).

En el Cuadro 9.5 se incluyen datos relativos de la resistencia al flujo de agua en la raíz, tallos y hojas de diferentes especies. Comparativamente para una misma especie, la mayor resistencia se presenta a nivel de la raíz de la planta. En algunas plantas,como cebollas para semillas, la mayor resistencia al flujo de agua se presenta entre el fin del eje floral e inicio de la inflorescencia (Millar et al., 1971).

9.2.2. Condiciones de Bajo Contenido de Agua en el Suelo

Cuando el contenido de agua en el suelo disminuye, la conductividad capilar también disminuye, reduciendo el flujo de agua. De acuerdo a la ecuación (9.4), a medida que la conductividad capilar disminuye, la resistencia del suelo aumenta y debido a esto, disminuye el flujo de agua.

El contenido de agua al cual la conductividad capilar llega a ser limitante depende de la planta y de la textura del suelo.

Las dos suposiciones anteriormente discutidas se resumen gráficamente en la Figura 9.7, obtenida por Gardner y Ehlig (1962) en plantas de ají, en

CUADRO 9.4. Resistencia axial al transporte del agua por unidad de superficie absorbente de raíz y/o unidad de longitud radicular en varias especies (Castel, 1983).

Especie	Resistencia Axial: Unidad de superficie (bar seg/cm)	Unidad de longitud (bar seg/cm2)	Referencias
Cereales	1	100 - 1000	Gracen et al. (1976)
Coniferas	10 - 100	-	
Limón	-	2 - 10	Ramos y Kaufman (1979)
Maiz	-	6	Newman (1976)

CUADRO 9.5. Datos relativos de la resistencia al flujo del agua en raíz, tallos y hojas de varias especies (Castel, 1983).

Especie	Rraiz	Rtallo	Rhoja	Referencias
Tomate	2,5	1	1	Jensen et al. (1961)
Girasol	2	1	1	Boyer, (1971)-Jensen et al. (1961)
Frijol	2	1	1,5	Boyer (1971)
Soya	10	1	2,5	Boyer (1969)
Cártamo	2,5	1	10	Dunlway (1975)
Manzano	2	1	-	Landsberg et al. (1976)
Naranjo	4,1	1,3	1	Castel (1978)
Pino	4	1	-	Roberts et al. (1979)

un suelo franco arenoso.

En la Figura 9.7 se presenta la resistencia total del sistema suelo-planta al flujo de agua en función de la conductividad capilar del suelo.

En el rango de conductividad capilar de 1 a 0,001 cm/día la resistencia total es prácticamente constante y se debe casi exclusivamente a la resistencia interna que presenta la planta. En otras palabras no habría ninguna o casi ninguna resistencia debida al suelo.

A partir del valor de conductividad capilar igual y menor que 0,001 cm/día, este parámetro llega a ser un factor limitante, aumentando la resistencia (ecuación 9.4) y por lo tanto disminuyendo el flujo de agua en el sistema. Para esta porción de la Figura 9.7, la recta representa la resistencia total debida a la planta y al suelo, pero en su mayor parte corresponde a la resistencia que opone el suelo al flujo de agua. Reiskosky y Ritchie (1976) presentan información para maíz y sorgo que corrobora esta tendencia general.

La teoría anteriormente desarrollada es aplicable a casos con sistemas radiculares uniformes, especialmente sistemas confinados, pero la ecuación 9.5 también se puede aplicar a sistemas radiculares desuniformes de diferente densidad radicular con la profundidad, lo cual constituye la situación mas común en la práctica.

Para usar la ecuación (9.5) en casos de sistemas radiculares desuniformes, se divide la zona radicular en capas y se escribe una ecuación para cada capa. El flujo total de agua absorbida del sistema es igual a la suma de los flujos de cada capa (Gardner, 1964).

Así, para la capa i, se puede escribir:

$$W_i = B\, h(\Psi_r - \Psi_{si} - z_i)\, k_i\, L_i \qquad (9.11)$$

donde W_i es la tasa de transpiración o agua absorbida por unidad de sección de la capa de espesor h, Ψ_r es el potencial de agua de la raíz, Ψ_{si} es el potencial de agua en el suelo de la capa i, z_i es la distancia desde la superficie del suelo al centro de la capa, k_i es la conductividad capilar del suelo de la capa i, y L_i es la densidad radicular de la capa i.

Si se tienen n capas de espesor h, entonces la tasa total de agua absorbida, q, por unidad seccional de área, se obtiene sumando los valores de W_i desde $i = 1$ a $i = n$, como sigue:

$$q = \sum_{i=1}^{n} W_i \qquad (9.12)$$

Introduciendo la ecuación (9.11) en la ecuación (9.12), se obtiene:

$$q = B\, h \sum_{i=1}^{n} (\Psi_r - \Psi_{si} - z_i)\, k_i\, L_i \qquad (9.13)$$

La ecuación (9.13) es de gran utilidad práctica para determinar patrones de extracción de agua de los cultivos en condiciones de campo, como lo demuestra Gardner (1964).

9.3. Referencias Bibliográficas.

[1] ANDREWS, R. E. AND E. L NEWMAN. 1969. Resistance to water flow in soil and plant. III. Evidence from experiments with wheat. New Phytology 68:1051–1058.

[2] BEGG, J. E. AND N. C. TURNER. 1970. Water potential gradients in field tobacco. Plant Physiology 46:343–346.

[3] CASTEL, J. R. 1983. Relaciones agua-planta. In: INIA (ed.), Tenerife, España, III Curso Internacional de Riego Localizado, Volumen I. 124 p.

[4] COWAN, I. R. 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. Journal of Applied Ecology 2:221–239.

[5] GARDNER, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Science 89:63–73.

[6] GARDNER, W. R AND C. F. EHLIG. 1962. Impedance to water movement in soil and plant. Science 138(3539):522–523.

[7] GARDNER, W. R. AND C. F. EHLIG. 1963. The influence of soil water on transpiration by plants. Journal of Geophysical Research 68:5719–5724.

[8] GARDNER, W. R. 1969. Internal water status and response in relation to the external water regime. Madison, Wis., Dept. of Soil and Water Sciences. 12 p.

[9] GARDNER, W. R. 1964. Relation of root distribution to water uptake and availability. Agronomy Journal 56:41–45.

[10] GARDNER, W. R. AND C. F. EHLIG. 1962. Some observations on the movement of water to plant roots. Agronomy Journal 54:453–456.

[11] HAILEY, J. L., E. A. HILER, W. R. JORDAM AND C. H. M. van BAVEL. 1973. Resistance to water flow in *Vigna sinensis* L. (Endl.) at high rates of transpiration. Crop Science 13:264–267.

[12] HONERT, T. H. van den. 1948. Water transport in plants as a catenary process. Disc. Faraday Soc. 3:146–153.

[13] HYLMO, B. 1958. Passive components in the ion absorption of the plant. II. The zonal water flow, ion passage and pore size in roots of *Vicia faba*. Physiologia Plantarum 11:382–400.

[14] JENSEN, R. D. AND S. A. TAYLOR. 1961. Effect of temperature on water transport through plants. Plant Physiology 36:639.

[15] JENSEN, R. D., S. A. TAYLOR AND H. H. WIEBE. 1961. Negative transport and resistance to water flow through plants. Plant Physiology 36:633–638.

[16] KEDEM, O. AND A. KATCHALSKY. 1958. Thermodynamic analysis of the permeability of biological membranes to nonelectrolytes. Biochim. Biophys. Acta 27:229–246.

[17] KUIPER, P. J. C. 1963. Some considerations on water transport across living cell membranes. Conn. Agr. Expt. Sta. Bull. 664, p. 59–68.

[18] MEES, G. C. AND P. E. WEATHERLEY. 1957. The mechanism of water absorption by roots. I. Preliminary studies on the effect of hydrostatic pressure gradient. Proc. Royal Soc. (B) 147:367–380.

[19] MILLAR, A. A. 1970. Internal water status and water transport in seed onion plants. Madison, Wisconsin, USA, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 39 p. (Chapter I, Ph. D. Thesis).

[20] MILLAR, A. A., W. R. GARDNER AND S. M. GOLTZ. 1971. Internal water status and water transport in seed onion plants. Agronomy Journal 63(5):779–784.

[21] NEWMAN, E. I. 1976. Water movement through root systems. Phil. Trans. Roy. Soc. London Ser. B. 273:463–478.

[22] REIKOSKY, D. C. AND J. T. RITCHIE. 1976. Relative importance of soil resistance and plant resistance in root water absorption. Journal of Soil Science Society of America 40:293–297.

[23] RIJTEMA, P. E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Wageningen, Netherlands, Institute for Land and Water Management Research. 107 p. (Agricultural Research Report no. 659).

[24] SKIDMORE, E. L. AND J. F. STONE. 1964. Physiological role in regulating transpiration rate of the cotton plant. Agronomy Journal 56:405–410.

CAPITULO 10

INFORMACIONES BASICAS DE LOS CULTIVOS PARA EL MANEJO DEL RIEGO

El rendimiento y calidad de los cultivos agrícolas aumentó rápidamente desde 1945 debido principalmente al uso de variedades mejoradas, uso de fertilizantes, mejor uso del agua de riego, control de insectos y plagas, y otros.

De los factores complementarios de la producción, el agua es el factor que limita los rendimientos con mayor frecuencia, de tal manera que el control de la humedad del suelo es crítico para el éxito de la agricultura de riego.

En general, los cultivos en mayor o menor grado responden a las condiciones variables de la humedad del suelo. De tal forma que para realizar un manejo adecuado y eficiente del riego es imprescindible conocer cuantitativamente el efecto del déficit de agua sobre el rendimiento de los cultivos.

La falta de agua puede afectar seriamente el rendimiento de los cultivos siendo necesaria la aplicación de agua por medios artificiales para obtener niveles adecuados de productividad. Existe un nivel de agua en el suelo al cual se debe manejar el riego de los cultivos para obtener el rendimiento máximo. Este es el tema central de este Capítulo. Por otra parte, la aplicación de agua en exceso es perjudicial para los cultivos provocando disminución acentuada en la productividad. En el primer caso se trata de un problema de riego y en el segundo caso de un problema de drenaje. Las situaciones anteriores son esquematizadas en la Figura 10.1.

En este Capítulo se presentan las informaciones básicas de algunos cultivos para realizar un manejo racional y eficiente del riego. Las informaciones incluidas fueron obtenidas por Millar (1976), usando una metodología de análisis que le permitió usar información mundial y determinar niveles de manejo del riego para diferentes cultivos a fin de maximizar el nivel de producción real.

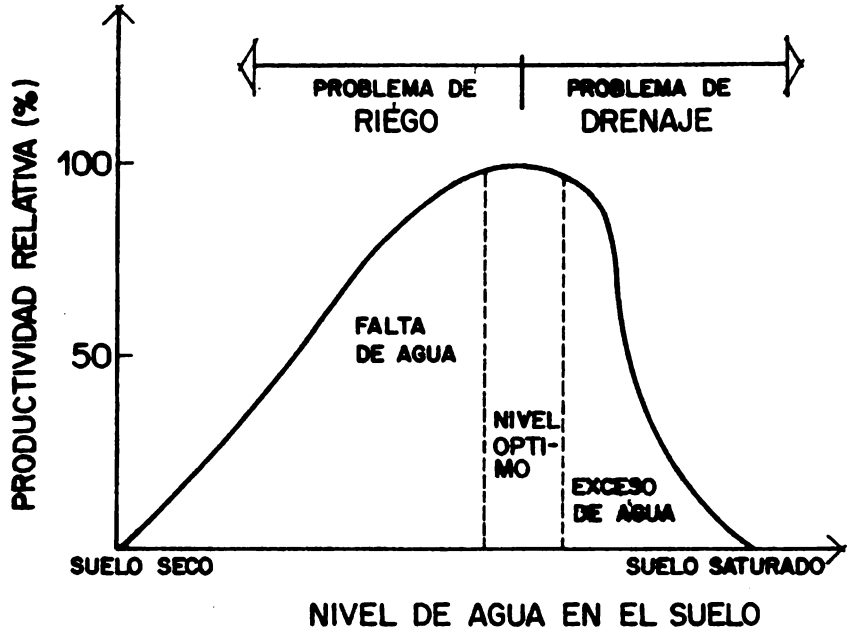


FIGURA 10.1. Esquematización del efecto de la falta y del exceso de agua en el rendimiento de los cultivos.

10.1. Información Genérica Presentada en la Literatura.

En la literatura existe un gran volumen de resultados de experimentos realizados con la finalidad de estudiar el efecto de los niveles de humedad en el suelo sobre el rendimiento de los cultivos (Haise y Hagan, 1967; Salter y Goode, 1967; Taylor, 1965). Esta información permitió definir el nivel de potencial matricial (succión) del suelo al cual se debe aplicar riego a los cultivos para obtener rendimientos máximos.

En el Cuadro 10.1 se presentan los niveles de potencial matricial en el suelo al cual se debe aplicar riego para obtener máximo rendimiento en diferentes cultivos, cuando cultivados en suelos profundos y en condiciones adecuadas de drenaje y fertilidad.

De los datos del Cuadro 10.1 se concluye que la mayoría de los cultivos requieren de riego antes de alcanzar un potencial matricial de 0,7 bar, para obtener rendimientos máximos. En algunos casos, como en frutillas, apio y caña de azúcar se requieren aplicaciones de riego en altos niveles de potencial matricial (baja succión).

La información del Cuadro 10.1 permite definir los niveles óptimos a

CUADRO 10.1. Potencial matricial (succión) del suelo al cual se debe aplicar el riego para obtener rendimiento máximo en varios cultivos.

CULTIVO	POTENCIAL MATRICIAL (Bar)	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
HORTALIZAS		Vittum et al. (1958)
		Pew (1958)
Repollo	-(0,60-0,70)	Taylor (1965)
Arvejas	-(0,30-0,50)	Haise y Hagan (1967)
Apio	-(0,20-0,30)	Vissar (1959),Pew(1958)
Lechuga	-(0,40-0,60)	Taylor (1965)
Maiz dulce	-(0,50-1,0)	Vittum et al.(1963)
Cebolla	-(0,45-0,65)	Pew (1958)
Papas	-(0,30-0,50)	Vittum et al (1963)
		Pew (1958)
Zanahoria	-(0,55-0,65)	Pew (1958)
Coliflor	-(0,60-0,70)	Pew (1958)
Tomate	-(0,80-1,50)	Vittum et al. (1958)
		Vittum et al. (1958)
Pepinos	-(1,0-3,0)	Doorenbos y Pruit (1975)
Zanahorias		Hawthorne (1951)
para semillas	-(4,0-6,0)	
Cebollas		Haise y Hagan (1967)
para semillas	-1,50	
SEMILLAS		
Trigo	-(0,80-1,50)	Doorenbos y Pruitt (1965)
Trigo (maduración)	-(3,0-4,0)	Doorenbos y Pruitt (1965)
Maiz (Vegetativo)	-0,50	Taylor (1965)
Maiz (maduración)	-(8,0-12,0)	Taylor (1965)
Cereales Menores (vegetativo)	-(0,40-0,50)	Taylor (1965)
Cereales menores (maduración)	-(8,0-12,0)	Taylor (1965)
Poroto	-(0,75-2,0)	Vittum et al. (1963)
FRUTAS Y FRUTALES		
Frutillas	-(0,20-0,30)	Haise y Hagan (1967)
Cantaloupe	-(0,35-0,40)	Marsh (1961), Pew (1958)

(CONTINUACION CUADRO 10.1).

CULTIVO	POTENCIAL MATRICIAL (Bar)	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
Plátano	-(0,30-1,50)	Shumueli (1953)
Vid (plantas nuevas)	-(0,40-0,50)	Haise y Hagan (1967)
Vid (plantas forsadas)	-1,0	Haise y Hagan (1967)
Limonero	-4,0	Haise y Hagan (1967)
Naranjo	-(0,20-1,0)	Stolzy et al. (1963)
Palto	-0,50	Richards et al. (1962)
Melón	-(0,30-0,80)	Doorenbos y Pruitt (1975)
FORRAJERAS		
Sorgo	-(0,60-1,3)	Doorenbos y Pruitt (1975)
Alfalfa	-1,50	Taylor (1965)
Alfalfa para semillas		
Prefloración	-2,0	Taylor et al. (1958)
Floración	-(4,0-8,0)	Taylor et al. (1958)
Maduración	-(4,0-15,0)	Taylor et al. (1958)
Pasto	-(0,30-1,0)	Vissar (1959)
Trébol	-(0,30-0,60)	Doorenbos y Pruitt (1975)
PLANTAS INDUSTRIALES		
Tabaco	-(0,30-0,80)	Jones et al. (1968)
Caña de azucar	-(0,25-0,30)	Anónimo (1954)
	-(0,80-1,50)	Doorenbos y Pruitt (1975)
Remolacha	-(0,40-0,60)	Taylor (1965)
Algodón	-(1,0-3,0)	Doorenbos y Pruitt (1975)
Cartamo	-(1,0-2,0)	Doorenbos y Pruitt (1975)
Soya	-(0,50-1,50)	Doorenbos y Pruitt (1975)

que se debe aplicar el riego, pero normalmente las condiciones de operación (equipos, capacidad de la infraestructura de riego, método de riego, clima y mano de obra) impiden la realización de un manejo del riego en condiciones óptimas. No obstante ser una información básica que permite definir el nivel potencial de producción, es de mayor importancia conocer el efecto de niveles de humedad fuera del óptimo de tal forma de poder definir el nivel de manejo del riego a que se puede adecuar el productor para obtener un "rendimiento máximo" de acuerdo con sus posibilidades, dadas por las condiciones de operación y clima. Esta información no se puede obtener de los datos del Cuadro 10.1, pero Millar (1976) definió una metodología y sistemática de análisis de resultados de investigación que permite determinar el manejo del riego para cualquier situación operacional. Esta información se incluye en este Capítulo.

Por otra parte, numerosos trabajos realizados han permitido definir aquellos períodos de los cultivos en que un déficit de riego produce una caída pronunciada en el rendimiento, el cual se conoce como período crítico del cultivo. La información existente en la literatura permite definir estos períodos para diferentes cultivos, lo cual se muestra en el Cuadro 10.2. Para fines de manejo de riego y toma de decisiones, esta información es valiosa pero incompleta. Para tener todos los antecedentes necesarios es preciso no sólo conocer el efecto del déficit de riego durante el período crítico sino que también antes y después de este. El déficit de riego, en otros períodos del ciclo fenológico del cultivo, también produce reducción del rendimiento, en menor escala, pero que en el manejo de los cultivos bajo riego constituye una información muy importante.

Esta última información se obtiene a través de la metodología utilizada por Millar (1976), que permite definir cuantitativamente el nivel de reducción de la productividad del cultivo en cualquier fase del ciclo fenológico.

10.2. Elementos Metodológicos.

10.2.1. Información de Rendimiento

Con la finalidad de obtener la información en una forma que se constituya en un elemento de decisión para programadores y operadores de riego, se redujeron todos los datos experimentales disponibles, tanto para niveles de humedad como aquellos de ciclos fenológicos en forma de rendimientos relativos. Como rendimiento relativo debe entenderse el rendimiento en determinadas condiciones (rendimiento real) respecto de las condiciones óptimas (rendimiento potencial). El rendimiento potencial corresponde al rendimiento obtenido en condiciones óptimas de humedad, normalmente en condiciones de "capacidad de campo" del suelo.

CUADRO 10.2. Períodos críticos al déficit de agua de algunos cultivos.

CULTIVO	PERIODO CRITICO	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
HORTALIZAS		
Repollo	Durante la formación de la cabeza y su crecimiento	Janes y Drinkwater (1959); Vittum et al. (1963); Drew (1966).
Arveja	Comienzo floración y durante hinchamiento del capi	Salter (1962, 1963).
Lechuga	Antes de la cosecha	Sale (1966).
	Durante la formación de la cabeza	Singh y Alderfer (1966).
Cebolla (bulbo)	Durante la formación del bulbo	Lis et al. (1967); Singh y Alderfer (1966).
Cebolla (semilla)	Floración	Salter y Goode (1967).
Papas	Después de la formación del tubérculo	Winter (1960); Taylor y Rognerud (1959).
	Estolonización y comienzo del tuberculización	Sctruchteneyer (1960); Lis et al. (1964).
	Floración y tuberización	Nijensohn et al. (1966).
	Floración a cosecha	Doorenbos y Pruitt (1975).
Coliflor	Sin período crítico. Riego frecuente desde plantio	Salter (1961), Doorenbos y Pruitt (1975).
Tomate	Floración	Grassi et al. (1967).
	Formación de flores y crecimiento rápido de los frutos	Salter y Goode (1967).
	Primeros frutos y desarrollo frutos.	Choudhury y Millar (1978)
Rabanito	Durante formación y crecimiento de la raíz	Singh y Alderfer (1966).

(CONTINUACION CUADRO 10.3).

CULTIVO	PERIODO CRITICO	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
GRANOS		
Trigo	Espigadura y formación del grano	Lahane y Staple (1962).
	Dos semanas antes de polinización	Doorenbos y Pruitt (1975).
Cebada	Espigadura a grano en estaddo lechoso	Jensen, Millar y Bauer (1967).
	Grano en estado lechoso	Wells y Dubetz (1966).
Avena	Comienzo emergencia de la espiga	Van der Paauw (1949).
	Emergencia espiga a completa espigadura	Doorenbos y Pruitt (1975).
Maiz	Previo a formación del polen y durante formación de la	Denmead y Shaw (1960).
	mazorca	Robins y Domingo (1953).
		Runge y Odell (1958).
		Howe y Rhoades (1955).
	Período de polinización es muy crítico si no hubo	Doorenbos y Pruitt (1975).
	déficit previo	
Poroto (Frijol)	Floración y formación del capi	Kattan y Fleming (1956)
	Floración y formación capi) dificit temprano) madurez	
	Período madurez) temprano si no hubo déficit previo	Doorenbos y Pruitt (1975)
FRUTAS Y FRUTALES		
Frutillas	Desarrollo fruto a madurez	Doorenbos y Pruitt (1975)
Melón	Floración a cosecha	Doorenboss y Pruitt (1975)
Vid	Comienzo crecimiento. Despues de formación del grano	Kasimatis (1967),Vaadia y
		Kasimatis (1961)
Cítricos	Floración y formación del fruto	Salter y Goode (1967)
	Alta floración puede inducirse con un corte del	
	riego antes de floración (limón)	Doorenbos y Pruitt (1975)

(CONTINUACION CUADRO 10.2).

CULTIVO	PERIODO CRITICO	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
Banásco	Período de floración y desarrollo de los botones florales	Uriu (1964)
Cerezo y Durazno	Período de crecimiento rápido que antecede a la madurez	Hildreth , Magness y Mitchell (1941)
FORRAJERAS		
Alfalfa	Inmediatamente después de los cortes para heno	Doorenbos y Pruitt (1975)
Alfalfa (semilla)	Inicio período de floración	
Sorgo	Raíces secundarias y macolla a encañadura) espigadura, floración y formación del grano) período de llenado del grano.	Doorenbos y Pruitt (1975)
PLANTAS INDUSTRIALES		
Caña de azúcar	Período de máximo crecimiento vegetativo	Doorenbos y Pruitt (1975)
Remolacha	Floración y desarrollo de la semilla	Salter y Goode (1967)
(semilla)	3-4 semanas después de emergencia	Doorenbos y Pruitt (1975)
Lino (fibra)	Período vegetativo de pre-floración	Salter y Goode (1967)
Lino (semilla)	Durante y después de floración	Salter y Goode (1967)
Algodón	Floración y formación capullo) fases anteriores)	Doorenbos y Pruitt (1975)
	después formación capullo	Marani (1963)
	Comienzo floración	Salter y Goode (1967)
	Pre-floración	
Maravilla	Formación de las flores y madurez de las semillas	Salter y Goode (1967)
Soja	Período de mayor crecimiento vegetativo y floración	Salter y Goode (1967)
Olivos	Inmediatamente antes de floración y durante crecimiento del fruto	Doorenbos y Pruitt (1975)
	Ultimos períodos de la madurez de los frutos	Spiegel (1955)

La información de rendimiento expresada en forma relativa presenta una serie de ventajas porque permite utilizar datos expresados en diferentes unidades (kg/ha, g/maceta, etc.) de diferentes variedades, producidas en diversos climas y provenientes de años diferentes.

En el caso de la relación rendimiento relativo y potencial matricial del suelo, toda la información debe seguir una misma relación, independiente de variedad y clima, pero en algunos casos se presenta dispersión de los datos lo cual se debe principalmente a que próximo al nivel de humedad prefijado (indicación de aplicación de riego), coincide con parte del período crítico causando una disminución extra en el rendimiento.

La definición del ciclo fenológico, tanto en tiempo como en períodos, para la conformación de la relación rendimiento relativo versus ciclo fenológico, se obtuvo en base a los datos existentes. Esto no implica que sean absolutos ya que por razones de variedad, latitud y clima, se presentarán diferencias en el tiempo para alcanzar determinado período o completar el ciclo. Lo importante en este caso es que independiente de los factores que afectan el ciclo, el cultivo antes o después deberá pasar por los diferentes períodos de su ciclo vegetativo.

10.2.2. Definición del Potencial Matricial del Suelo y Profundidad Efectiva

La información de los niveles de humedad a los cuales se aplica el riego no siempre son presentados en términos de succión o potencial matricial. La información más comunmente encontrada en la literatura es en la forma de porcentaje de la humedad aprovechable alcanzado antes de aplicar el riego. En estos casos, cuando se acompaña la curva de retención de agua del suelo, se convierte el nivel de agua aprovechable a valores de potencial matricial (succión).

En aquellos casos en que sólo se conocen los niveles de humedad aprovechable prefijados para el riego, se puede utilizar la Figura 30-2 de Haise y Hagan (1967) que relaciona niveles de humedad aprovechable y potencial matricial para diferentes texturas del suelo (Figura 10.2).

La profundidad efectiva que se considera corresponde a aquella donde se concentra la mayor proporción del sistema radicular.

10.2.3. Definición del Nivel de Producción Real en Función del Potencial Matricial del Suelo (Nivel de Manejo del Riego)

Utilizando la relación entre rendimiento relativo y potencial matricial del suelo se definen los potenciales matriciales para cada cultivo a los cuales se debería aplicar el riego para asegurar un nivel de producción, pre-determinados en 100 (potencial), 90, 80, 70, 60 y 50 %.

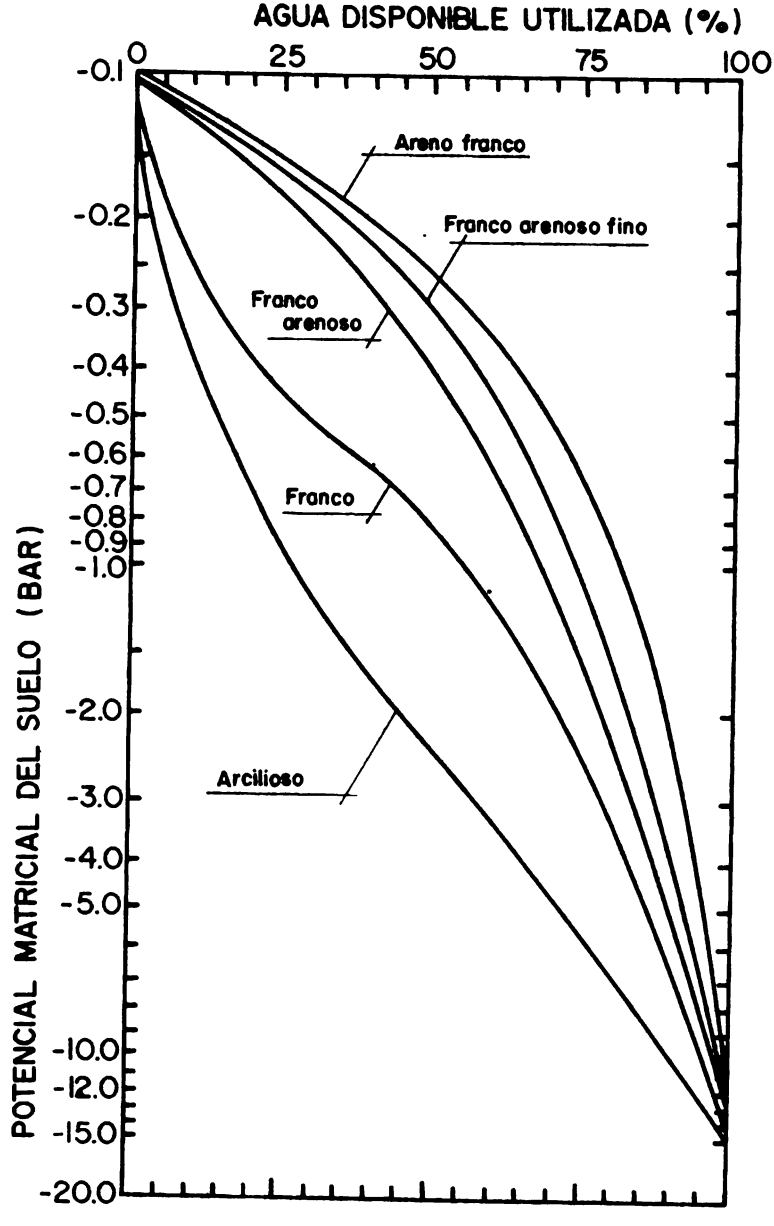


FIGURA 10.2. Relación entre niveles de agua disponible utilizada y potencial matricial para diferentes texturas de suelo (Haise y Hagan, 1967).

10.2.4. Rendimiento Relativo en Función del Potencial Matricial del Suelo y de la Fenología del Cultivo

La sistemática de análisis de los resultados de las investigaciones realizadas en los diferentes países, utilizada por Millar (1976), para experimentos de niveles de agua en el suelo versus rendimiento y de déficit de agua en períodos específicos del ciclo fenológico de los cultivos permite definir cuantitativamente lo siguiente:

a. Reducción del rendimiento a cualquier nivel de potencial matricial entre 0 y – 10 bar.

b. Reducción del rendimiento por efecto de déficits fenológicos de agua en cualquier período del ciclo vegetativo del cultivo.

c. Nivel de producción real, respecto del potencial, que se puede obtener bajo determinadas condiciones de demanda atmosférica (clima).

d. Frecuencia de riego, en base a la demanda del cultivo y potencial matricial, para definir el nivel de producción real a que se puede manejar el riego.

Con este tipo de información es posible tomar decisiones que permitan el mejor aprovechamiento del agua disponible, equipos y mano de obra, de tal forma de poder ecuacionar la distribución y manejo del riego para obtener el máximo nivel de producción real.

Por otra parte, la información generada se transforma en un elemento de análisis para decisiones económicas. Por ejemplo, frente a problemas de falta de agua, sea por quiebra de la infraestructura de riego o por problemas de sequía se puede utilizar la información para definir cuales cultivos tienen prioridad para reiniciar la operación del riego o en que cultivos se debe concentrar el uso del agua existente.

10.3. Informaciones Básicas de los Cultivos.

10.3.1. Trigo y Cebada

El rendimiento relativo de trigo y cebada en función del potencial matricial del suelo se presenta en la Figura 10.3. Esta figura indica que el rendimiento disminuye a medida que el riego se aplica a niveles menores de potencial matricial (mayor succión). Así para obtener un 90 % del rendimiento potencial se necesitará aplicar riego cada vez que el potencial matricial del suelo llegue a – 2 bar. El nivel potencial de producción se obtendría manejando el riego a – 0,5 bar de potencial matricial lo que resulta difícil de obtener con los métodos comunes de riego.

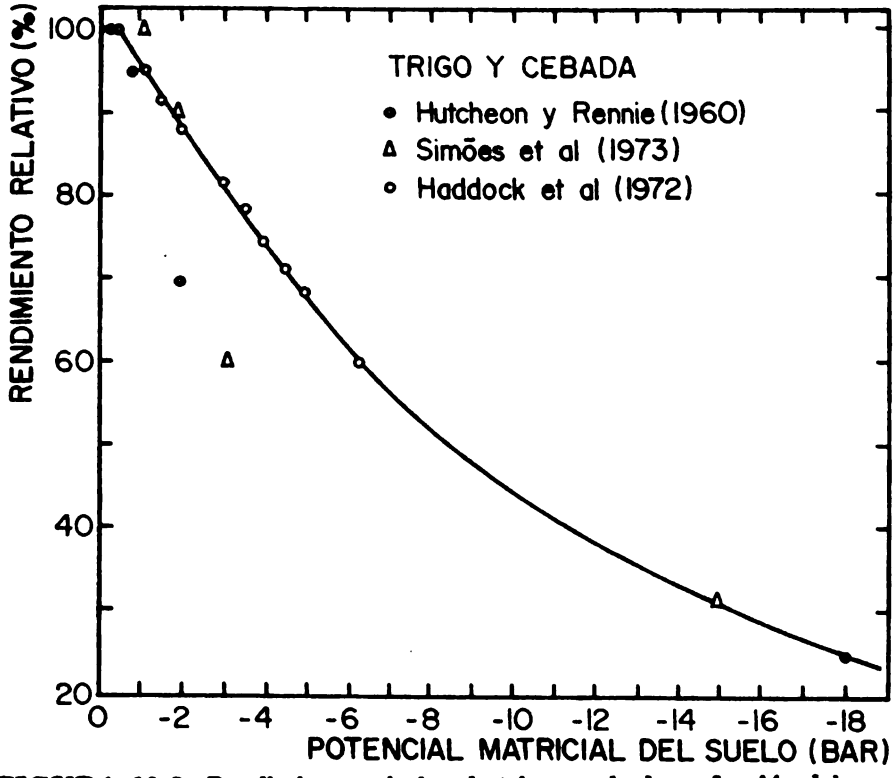


FIGURA 10.3. Rendimiento relativo de trigo y cebada en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

De la Figura 10.3 también se puede concluir que 80 % de la producción potencial se puede obtener regando a un nivel de -3 bar, 70 % a - 4,6 bar, 60 % a - 6,3 bar y 50 % a - 8,5 bar. Lo anterior se mantendrá sólo en el caso de que en los últimos días antes de alcanzar el nivel al cual se debe aplicar el riego, no coincida con parte del período crítico.

Maximov, citado por Henckel (1964), establece que los cereales tienen dos períodos críticos a la falta de agua, desde la macolla al espigado y desde el espigado hasta el final del estado lechoso del grano. Alekseev, también citado por Henckel (1964), encontró una reducción máxima en los rendimientos cuando el cultivo era sometido a déficits de agua durante la fase de espigadura.

La información recolectada por Robin y Domingo (1962) muestra que el peso promedio de los granos se reduce marcadamente por déficits de agua provocados antes o durante el proceso de madurez. Por otra parte, Jensen,

Millar y Bauer (1967) encontraron que el rendimiento de granos en cebada fue notoriamente reducido, cuando el déficit se provocó entre la fase de largura completa del grano hasta la madurez.

Los estudios de déficit de riego en cebada de Aspinal et al. (1964), permiten obtener varias conclusiones, entre otras, las siguientes:

- Un déficit de agua, temprano en el ciclo, tiene influencia sólo en la macolla.

- Aquellos órganos que crecen más rápidos durante el déficit de agua son los que sufren los mayores efectos.

- El déficit de agua durante la reproducción produce una reducción en el llenado del grano, en el tamaño y algunas veces produce arrugamiento.

Salter y Goode (1967) resumen la respuesta de los cereales a la falta de agua en las siguientes conclusiones:

- Estos cultivos muestran una marcada sensibilidad a la falta de agua durante la floración.

- Déficits de agua durante los períodos indicados reducen marcadamente los rendimientos de granos a través de una reducción en el número de granos por espiga.

- Los tejidos de los órganos reproductivos demuestran ser susceptibles a daño por la falta de agua. Debido a esto la formación del polen y la fecundación pueden ser seriamente afectadas bajo condiciones de sequía.

- El riego tiene un máximo efecto beneficioso sobre el rendimiento cuando se aplica durante el desarrollo de los órganos florales (aplicación tardía durante el encañado, espigado y floración). La lluvia tiene un efecto beneficioso similar cuando coincide con estos períodos críticos.

En la Figura 10.4 se muestra el efecto de déficits fenológicos a través de la relación entre el rendimiento relativo y fenología del cultivo, basada en datos experimentales de varios autores. El calendario fenológico de trigo y cebada, corresponde al descrito por Peterson (1965). Se observa que la disminución de rendimiento debido a la falta de riego es marcada entre floración y grano al estado semi-consistente. La influencia del déficit no es específica, ya que en menor escala se extiende a parte del ciclo vegetativo (macolla a encañadura).

La falta de riego en el período crítico causará aproximadamente 37 % de disminución en el rendimiento. Si esto ocurre entre macolla y encañadura, la reducción será entre 5 y 25 %.

Esta es la importancia de este tipo de gráfico ya que permite cuantificar la disminución del rendimiento por efecto de déficits fenológicos en cualquier etapa del ciclo fenológico del cultivo.

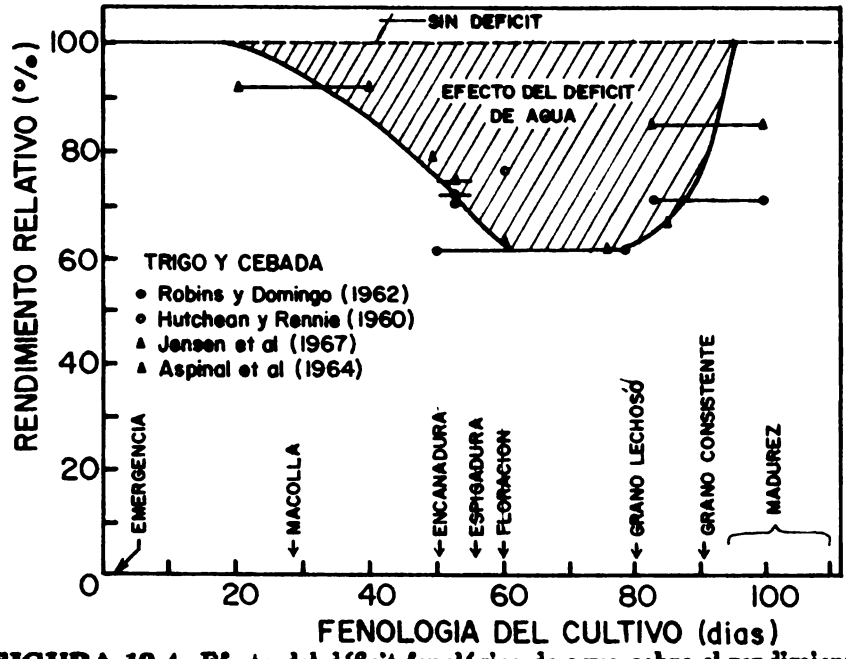


FIGURA 10.4. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento relativo de trigo y cebada (Millar, 1976).

10.3.2. Maíz

La Figura 10.5 muestra la relación entre rendimiento relativo de maíz y potencial matricial del suelo. Se observa que este cultivo es más sensible a la falta de agua que el trigo y cebada. Para obtener 90 % del rendimiento potencial es necesario manejar el riego a – 0,9 bar de potencial matricial (– 2 bar en el caso de trigo y cebada). El 80 % del rendimiento potencial se obtendría regando a – 1,6 bar, 70 % a – 2,4 bar, 60 % a – 3,4 bar y 50 % a –4,9 bar.

Respecto a la influencia de déficits fenológicos sobre el rendimiento de maíz, la información es abundante.

Robins y Domingo (1953) en trabajos realizados en condiciones de campo, encontraron que déficits severos por períodos de 1 a 2 días durante la polinización reducían el rendimiento en 22 %. Cuando el período de déficit se extendió a 8 días, la reducción de rendimiento fue de 50 %.

El trabajo realizado por Denmead y Shaw (1960) demuestra que la falta de riego durante el período reproductivo, formación de las inflorescencias

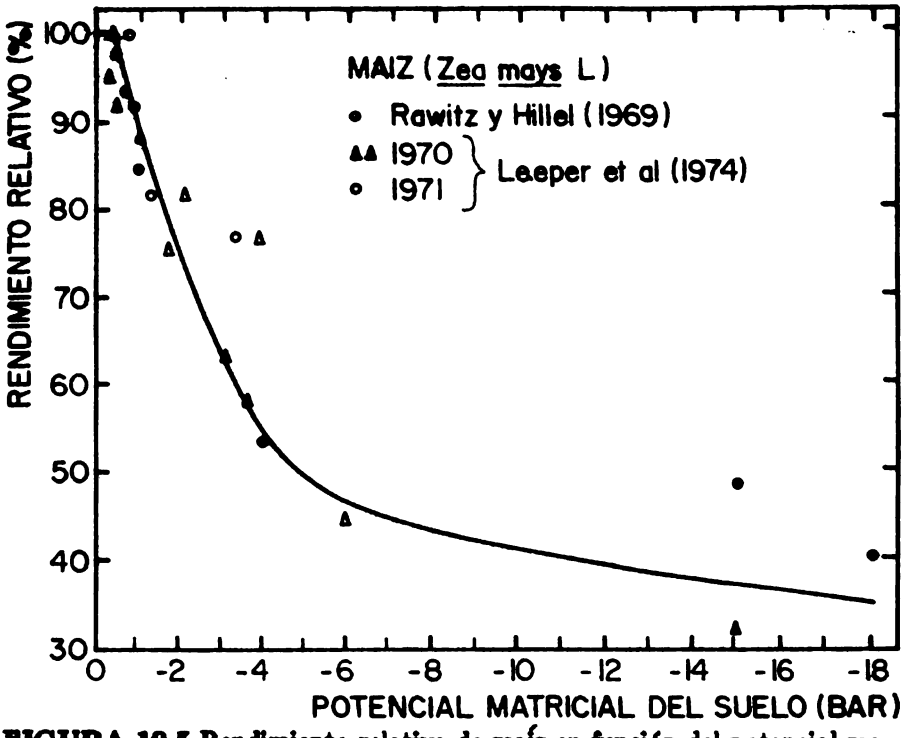


FIGURA 10.5. Rendimiento relativo de maíz en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

masculinas y femeninas, y polinización, es el período más crítico. El déficit de agua durante el período vegetativo y formación de los granos también afecta el rendimiento pero en menor escala.

En otros trabajos realizados por Godard, citado por Salter y Goode (1967), se encontró que la falta de riego algunos días antes de la floración producía 25 % de reducción en el rendimiento.

Volodarskij y Zinevic, citados por Salter y Goode (1967) encontraron que un déficit de agua moderado durante el período de germinación hasta la formación de la inflorescencia femenina o un déficit de agua desde la germinación al período de hoja 7–8, causan una reducción de rendimiento vegetativo pero no afecta el rendimiento de granos. La mayor reducción en el rendimiento de granos se produjo cuando el déficit de agua se provocaba en el período reproductivo, formación de las inflorescencias y polinización.

La importancia del riego antes de la formación de los órganos reproductivos y polinización se observa en los resultados de Rhoades et al. (1954),

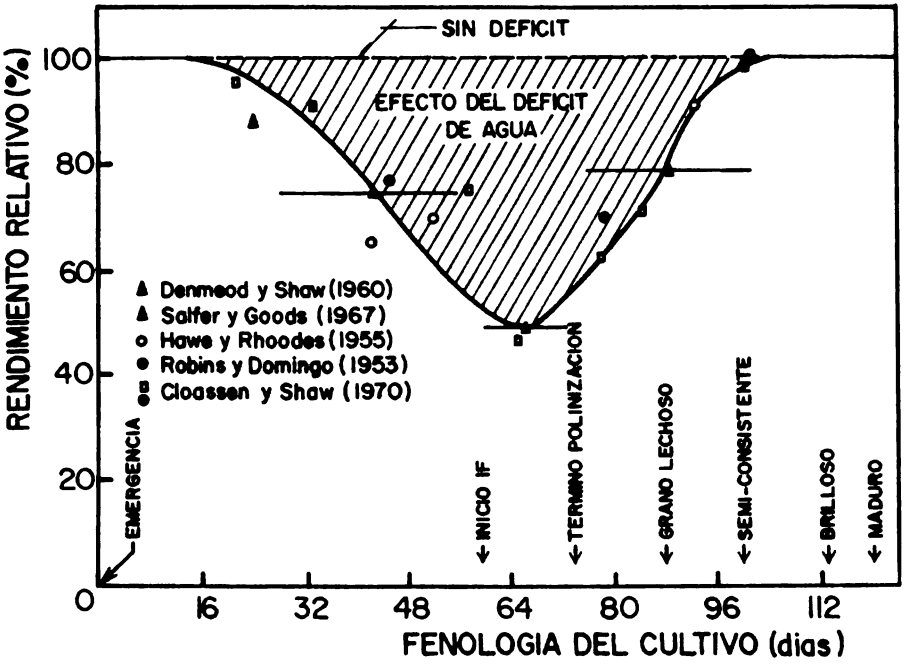


FIGURA 10.6. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento relativo de maíz (Millar, 1976).

Howe y Rhoades (1955) y Jones et al. (1957).

Resultados similares a los anteriormente descritos se encuentran en los trabajos realizados por Gard et al. (1961), Sommerfeldt (1960) y Claassen y Shaw (1970).

En la Figura 10.6 se resumen los resultados de varios autores sobre el efecto del déficit de riego en determinados períodos del ciclo fenológico del maíz sobre el rendimiento.

La extensión del ciclo fenológico varía por influencia de factores ambientales del suelo y de la atmósfera, tales como humedad, temperatura, luz, pero en cualquier caso la planta debe pasar por los períodos, desde emergencia hasta la madurez. El período reproductivo del maíz (formación de inflorescencias, polinización hasta madurez) normalmente varía poco en extensión (47 – 48 días).

Kiesselbach, citado por Sommerfeldt (1960) indica como promedio, el calendario siguiente:

Emergencia a inflorescencia femenina (EIF) hasta completamente fuera → 6,3 días

EIF a formación de anteras (polen) → 6,4 días

EIF a emergencia de la inflorescencia masculina → 8,4 días

EIF a máxima expulsión de polen → 9,8 días

EIF a máxima largura de la inflorescencia masculina → 10,7 días

EIF a fertilización evidente por inflorescencia masculina → 12 días

EIF a término de la expulsión del pólen → 12,7 días

Por otra parte, para una variedad de maíz adaptada para la parte central de Iowa, USA, Hanway (1966) identifica los siguientes períodos:

Siembra a emergencia → 5 días

Emergencia a inicio de EIF → 28 días

Emergencia a EIF → 56 días

Emergencia a largura máxima de inflorescencia femenina → 63–64 días

Emergencia a emergencia de la inflorescencia masculina (EIM) → 66 días

Estado acuoso → 12 días después de EIM

Grano estado semiconsistente → 24 días después de EIM

Grano completamente extendido → 48 días después de EIM

madurez fisiológica → 60 días después de EIM

De acuerdo a Wiidakas (1958), el calendario fenológico para maíz de madurez relativa de 100 días es el siguiente:

Siembra a emergencia → 7–10 días

Emergencia a inflorescencia masculina (50 % de plantas) → 50–100 días

Inflorescencia masculina a grano estado lechoso → 16 días

Grano estado lechoso a grano semiconsistente → 13 días

Grano semiconsistente a grano brilloso → 12 días

Grano brilloso a grano maduro → 7 días

La extensión de los diferentes períodos del ciclo fenológico de la Figura 10.6 corresponde aproximadamente a este último calendario.

De la Figura 10.6 se deduce que la falta de agua en el período comprendido entre inflorescencia femenina y término de la polinización afecta marcadamente el rendimiento de maíz, y constituye el período más sensible al déficit de agua. La reducción en el rendimiento es menor para otros períodos fenológicos.

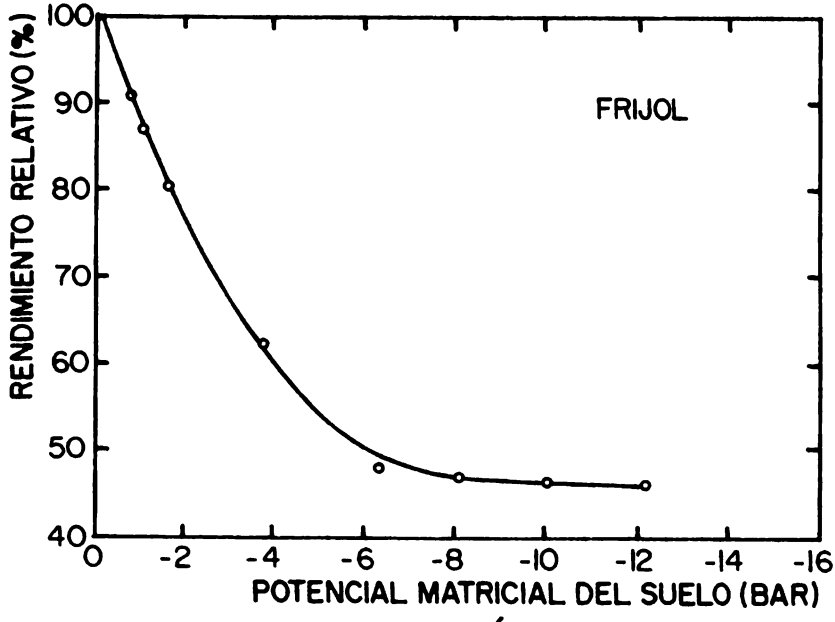


FIGURA 10.7. Rendimiento relativo del fríjol en función del potencial matricial del suelo (Magalhães y Millar, 1978).

El efecto del déficit de agua sobre el rendimiento de maíz comienza a ser evidente a partir de aproximadamente 20 días después de la emergencia, con una reducción de cerca de 5 %, alcanzando su máximo efecto detrimental durante el período reproductivo, aproximadamente 50 %, y disminuyendo su intensidad cuando el grano está cercano a la madurez fisiológica.

10.3.3. Frijol

La Figura 10.7 muestra la relación entre rendimiento relativo de frijol y el potencial matricial del suelo, obtenida por Magalhães y Millar (1978). Para obtener 90 % del rendimiento potencial es necesario manejar el riego a −0,8 bar de potencial matricial. El 80 % se obtendría regando cuando el suelo llega a un potencial matricial de −1,7 bar, 70 % a −2,5 bar, 60 % a −4 bar y 50 % a −6 bar.

Respecto a la influencia del contenido de agua en el suelo en diferentes períodos fenológicos sobre el rendimiento de fríjol, la información existente en la literatura es abundante.

Deficiencias de agua en el inicio del período de crecimiento provocan rendimientos más bajos, aún cuando más tarde se aplique riego adecuado

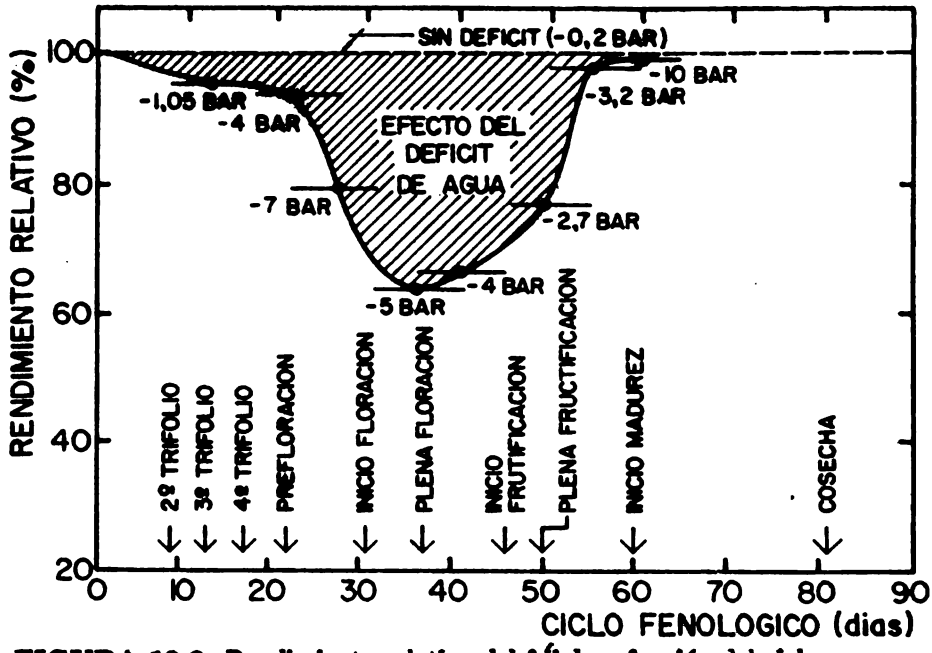


FIGURA 10.8. Rendimiento relativo del fríjol en función del ciclo fenológico (Magalhães et al., 1979).

(Dreibrodt, citado por Salter y Goode, 1967). Se obtiene gran reducción de rendimiento cuando se producen déficits de agua en el período de floración, lo cual se atribuye a la caída de flores y capices (Bierhuizen y De Vos, 1959).

Nelson (1962) estudió el efecto del déficit de agua en diferentes períodos del ciclo de crecimiento y concluyó que un alto déficit de agua en el suelo durante el florecimiento y desarrollo de los capices, provocaba una reducción de 22 % en la producción. Resultados similares fueron obtenidos por Dreibrodt, citado por Salter y Goode (1967), Robins y Domingo (1956), Horner y Mojtehedi (1970) y Magalhães et al. (1979).

En los estudios de Magalhães et al. (1979), el período más crítico al déficit de agua fue desde el inicio de la floración a plena floración. En este período, en el de prefloración a inicio de floración y en el período de inicio de la fructificación a plena fructificación, la reducción en los rendimientos debido al déficit de agua fue de 37, 21, y 24 %, respectivamente.

En la Figura 10.8 se presenta el rendimiento relativo del frijol en función del ciclo fenológico, obtenido por Magalhães et al. (1979).

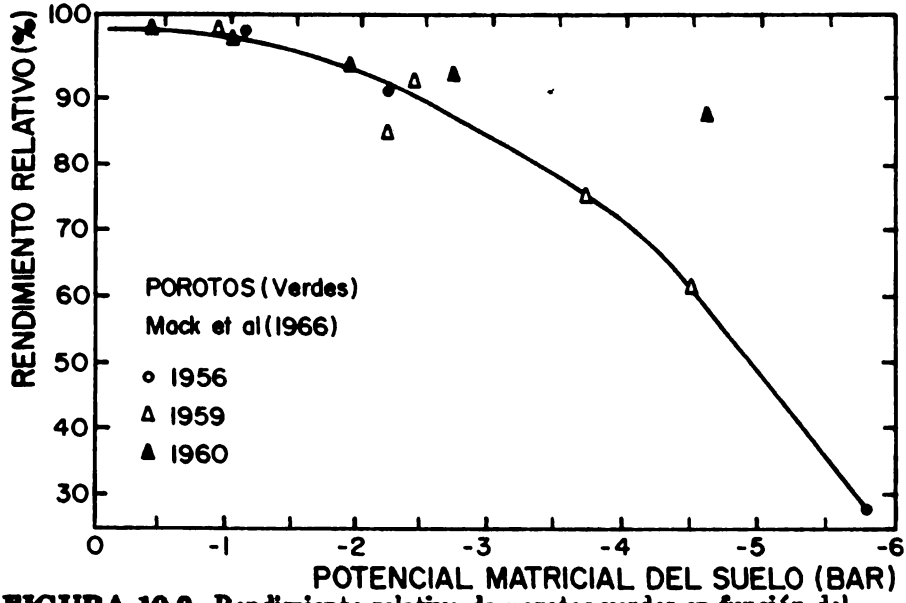


FIGURA 10.9. Rendimiento relativo de porotos verdes en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

El frijol o poroto para consumo en verde tiene una respuesta diferente que en el caso de la producción de granos. En la Figura 10.9 se muestra el rendimiento relativo de frijol verde en función del potencial matricial del suelo. Comparando las curvas de las Figuras 10.8 y 10.9 se concluye que la producción de porotos verdes se puede manejar a un menor potencial matricial del suelo para obtener un mismo nivel de rendimiento relativo.

10.3.4. Algunos Cultivos Hortícolas

En general, existe diferencia en la respuesta al agua por parte de las especies hortícolas, según la producción sean bulbos, tubérculos, raíces (ejemplo: cebollas, papas y rábanos, respectivamente), hojas (lechuga, repollo) o frutos (tomates). Con el fin de ejemplarizar lo que ocurre se presenta la información para cuatro especies cuyo producto es diferente: cebolla (bulbo), papas (tubérculo), lechuga (hojas) y tomate (frutos).

a. Cebolla

La Figura 10.10 muestra la relación entre rendimiento relativo de cebolla y el potencial matricial del suelo. Como indica el Cuadro 10.1 y la Figura 10.10, el nivel potencial de rendimiento se alcanza cuando se maneja el riego a

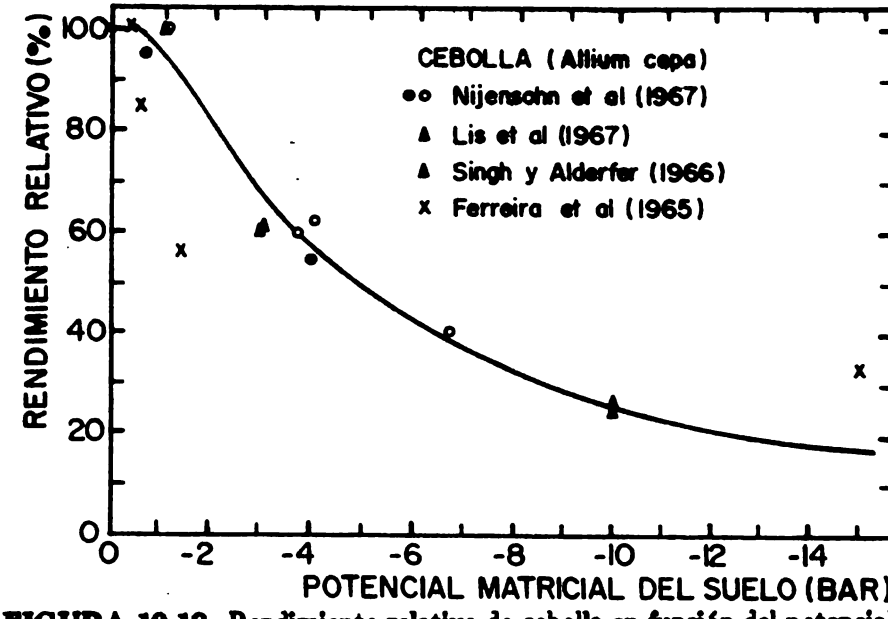


FIGURA 10.10. Rendimiento relativo de cebolla en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

un nivel de –0,5 bar. El rendimiento disminuye para otros niveles de manejo de riego. Así, 90 % del rendimiento potencial se obtiene con el manejo del riego a un nivel de –1,6 bar, 80 % a –2,1 bar, 70 % a –2,9 bar, 60 % a –3,7 bar y 50 % a –5 bar.

Jones y Johnson (1958) estudiaron la respuesta de la cebolla a la falta de agua en experimentos de campo, consistentes en 18 tratamientos de riego. De éstos, 12 consistieron en riegos diferidos durante el ciclo fenológico de la cebolla. El mayor rendimiento lo obtuvieron en el tratamiento con potencial matricial máximo (succión máxima) en el suelo de –0,3 bar. Ellos encontraron que la falta de agua en cualquier período reducía el rendimiento. Los déficits que ocurrían temprano eran menos detrimentales que los provocados más tarde en el ciclo fenológico.

Estudios realizados por Singh y Alderfer (1966) demuestran que los déficits de agua en cualquier período del ciclo fenológico reducen los rendimientos. Ellos encontraron que que el período más crítico, que provoca una mayor reducción en el rendimiento ocurría durante el período del desarrollo del bulbo y crecimiento del mismo.

Lis et al. (1967) encontraron que el inicio de la formación del bulbo es el período más crítico al déficit de agua.

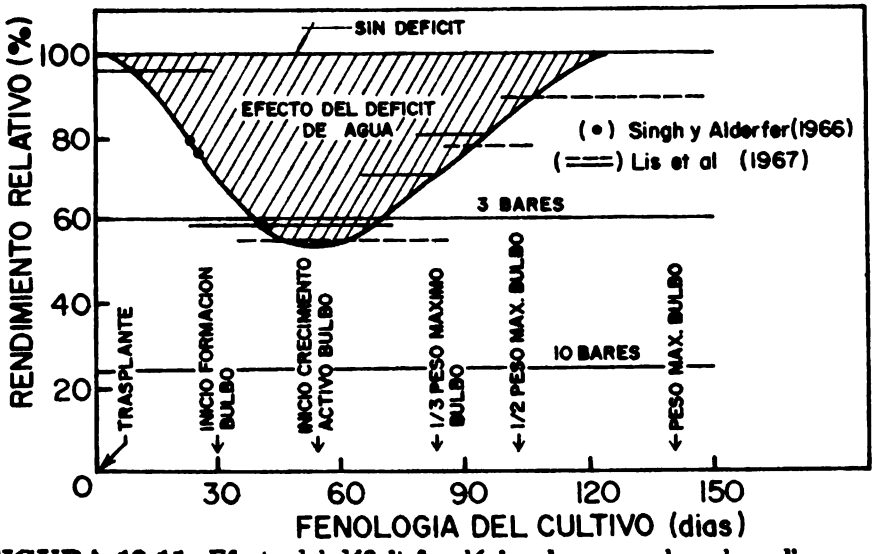


FIGURA 10.11. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento relativo de cebolla (Millar, 1976).

En el caso de cebollas para producción de semillas, MacGillivray (1948) encontró que la floración es el período más crítico al déficit de agua.

En la Figura 10.11 se muestra la información resumida de los rendimientos relativos de cebolla cuando sometida a déficits de agua únicos, en diversos períodos del ciclo fenológico. El ciclo fenológico utilizado es aquel descrito por Lis et al. (1967).

La Figura 10.11 muestra que el mayor efecto del déficit de agua sobre el rendimiento se produce en el período de crecimiento activo del bulbo, con una disminución de aproximadamente 45 % en el rendimiento. Este efecto se manifiesta, en menor escala, desde antes del inicio de la formación del bulbo y se extiende hasta cuando alcanza 80 % de su peso máximo.

De la Figura 10.11 se desprende que el mayor efecto benéfico del riego se obtendrá cuando las aplicaciones de agua son realizadas antes de alcanzar el período crítico. Un riego durante el período crítico no resultará tan beneficial puesto que ya se han producido los procesos bioquímicos irreversibles que determinan una baja de rendimientos.

b. Papas

En la Figura 10.12 se presenta la relación entre el rendimiento relativo y el potencial matricial del suelo al cual se aplica el riego en papas. La mayoría

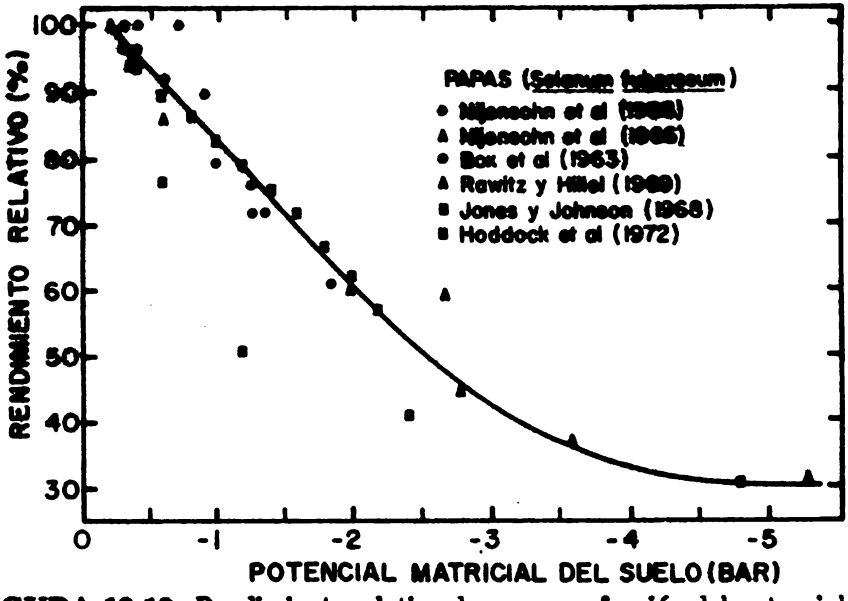


FIGURA 10.12. Rendimiento relativo de papas en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

de los datos recolectados de la literatura siguen la misma curva, excepto la información de Jones y Johnson (1958) que está más dispersa, lo cual como se mencionó anteriormente se puede deber, en gran parte, a que próximo al nivel de manejo del riego prefijado coincidió con parte del período crítico provocando una disminución extra en el rendimiento. Doorenbos y Pruit (1975) manifiestan que la papa no tiene un período crítico específico, pero sobre el particular, la información existente indica que existe un período crítico, lo cual se discute más adelante.

La Figura 10.12 muestra que el cultivo de papas es más sensible a la falta de agua que todos los cultivos antes discutidos. Para obtener el rendimiento potencial es necesario manejar el riego a aproximadamente –0,3 bar de potencial matricial. Un 90 % del rendimiento potencial se obtiene con el manejo del riego en un nivel de –0,65 bar, 80 % con –1,1 bar, 70 % con –1,6 bar, 60 % con –2 bar y 50 % del rendimiento potencial se obtiene manejando el riego a un nivel de –2,5 bar de potencial matricial de agua en el suelo.

La información sobre el efecto del déficit único de riego en diferentes períodos del ciclo fenológico es abundante, y Salter y Goode (1967) presentan un buen resumen.

Datos de Claypool y Morris (1932) indican que una reducción de 50 % en el rendimiento se produce cuando no se riega después de la formación del

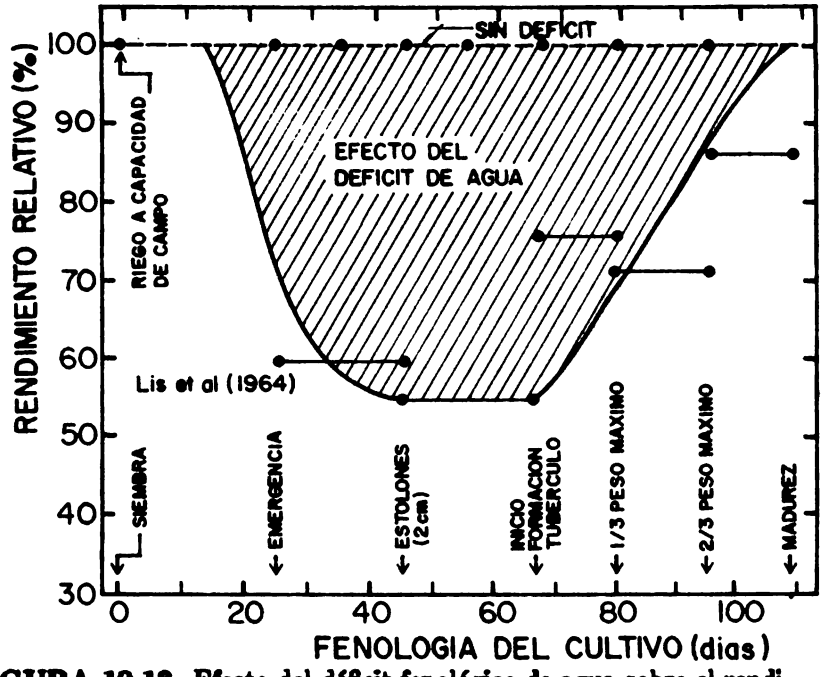


FIGURA 10.13. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento de papas (Millar, 1976).

tubérculo.

Jones y Johnson (1958) encontraron que déficits de agua provocados en la primera parte del ciclo fenológico producía un efecto menor que cuando el déficit de agua se producía en el período de crecimiento de los tubérculos.

Salter y Goode (1967) analizando la información pertinente llegan a la conclusión que para obtener buenos rendimientos y calidad de papas se requiere riego adecuado desde el inicio de la formación del tubérculo. Lo anterior contrasta con los resultados de Lis et al. (1964) que indican que el período de estolones a inicio de formación del tubérculo es el período más crítico. La diferencia puede estar en la calidad del producto, que es una condición del primer caso.

Salter y Goode (1967) también concluyen que riego adecuado antes del inicio de la formación de los tubérculos produce un mayor número de tubérculos por planta, mientras que un riego adecuado después de este período aumenta el tamaño de los tubérculos.

En la Figura 10.13 se muestra el rendimiento relativo de papas en función de la fenología del cultivo cuando se provocaron déficits únicos de riego en

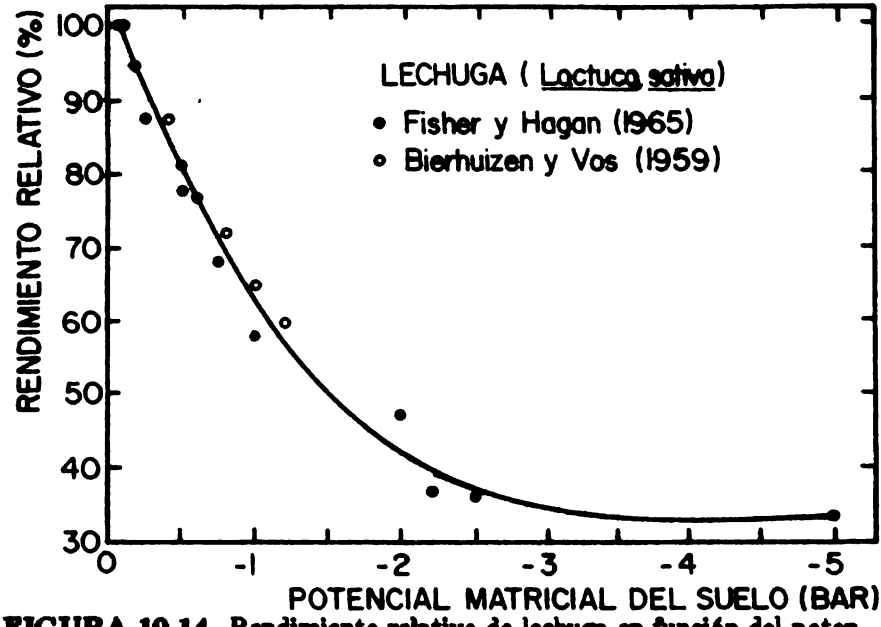


FIGURA 10.14. Rendimiento relativo de lechuga en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

determinados períodos del ciclo fenológico. La información tanto de rendimiento como de fenología, corresponde a Lis et al. (1964). Estos resultados indican que el período más crítico al agua es entre el período de estolones a inicio de la formación del tubérculo, donde la falta de riego produce una disminución de 45 % en el rendimiento.

c. Lechuga

En la Figura 10.14 se muestra la relación entre el rendimiento relativo de lechuga y el potencial matricial del suelo al cual se aplicaba riego. Esta información indica que lechuga es el cultivo más sensible a la falta de agua, comparado a los niveles de otros cultivos para obtener rendimientos similares.

De acuerdo a la información de la Figura 10.14, confeccionada a partir de los datos de Fischer y Hagan (1965) y Bierhuizen y Vos (1959), para obtener el rendimiento potencial sería necesario mantener el nivel de riego del suelo en −0,15 bar, mientras que los datos de Vissar (1959) y Pew (1958) indican un potencial matricial de −0,5 bar, para obtener rendimiento máximo. La Figura 10.14 indica que un rendimiento de 80 % del potencial se obtendría manejando el riego a nivel de −0,5 bar de potencial matricial en el suelo y 60 % a −1,1 bar.

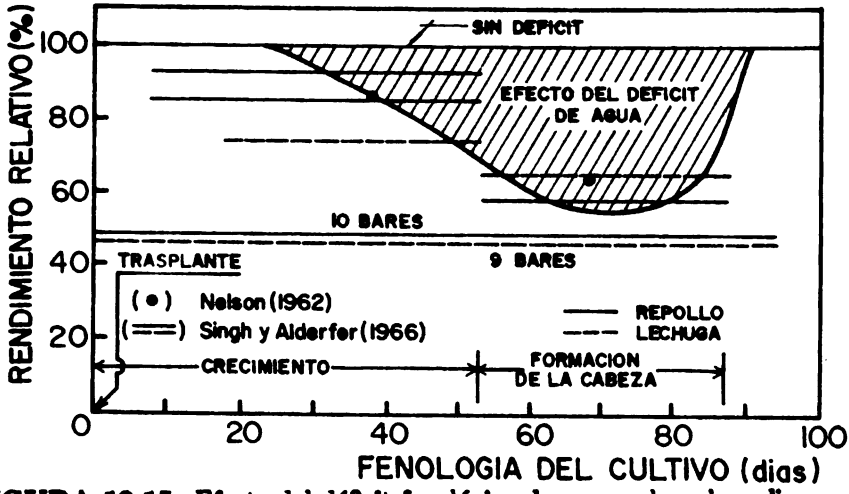


FIGURA 10.15. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento de lechuga y repollo (Millar, 1976).

Como en la mayoría de los cultivos hortícolas, la producción máxima de lechuga se obtiene cuando se mantienen condiciones óptimas de humedad en el suelo durante todo el ciclo fenológico (Salter y Goode, 1967). Los riegos únicos y diferidos a través del ciclo fenológico producen cabezas más pequeñas, y mayor porcentaje de cabezas desechables, pequeñas y quemadas. La falta de agua en cualquier período del ciclo fenológico, especialmente antes de la cosecha, favorece la producción de cabezas con hojas quemadas (Salter y Goode, 1967).

Los resultados de experimentos realizados en Alemania, citados por Salter y Goode (1967), sugieren que un adecuado abastecimiento de agua es necesario en las últimas 3 semanas antes de la cosecha. Los resultados de Singh y Alderfer (1966) indican que el mayor efecto del déficit de agua sobre el rendimiento se produce durante el período de formación de la cabeza, lo que concuerda con la información anterior.

En la Figura 10.15, basada en información de Nelson (1962) y Singh y Alderfer (1966), se muestra el efecto de riegos únicos y diferidos sobre el rendimiento de lechuga. También se incluye información para repollo, otra especie productora de hojas. El ciclo fenológico corresponde al descrito por Singh y Alderfer (1966). Se concluye que la falta de riego causando déficit de agua en el período de la formación de la cabeza produce una disminución de aproximadamente 45 % en el rendimiento.

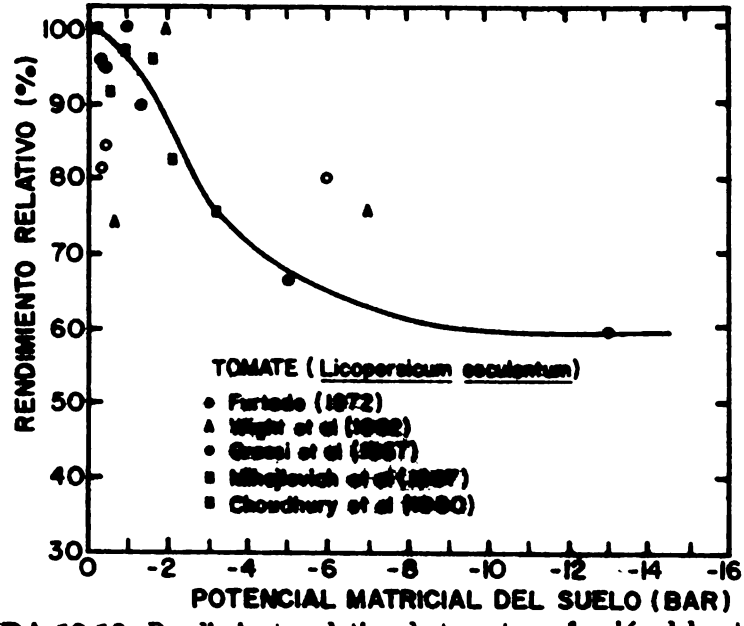


FIGURA 10.16. Rendimiento relativo de tomate en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976)

d. Tomates

Para el cultivo de tomate no existe mucha información que defina claramente su respuesta a los niveles de agua en el suelo. Flocher y Lingle (1961) emplearon tensiómetros y bloques de yeso para determinar el nivel más adecuado de riego en un suelo franco arenoso, probando tres tratamientos, los cuales consistieron en regar cuando el potencial matricial del suelo llegaba a –7, –2 y –0,7 bar. La producción máxima se obtuvo en el tratamiento de –2 bar, no habiendo diferencia significativa en los tratamientos extremos.

Salter (1954) estudiando el comportamiento del tomate industrial en condiciones de diferentes potenciales matriciales del suelo, encontró que la producción de frutos fue significativamente superior en los tratamientos con manejo del riego a potenciales matriciales en el suelo mayores de –1 bar.

Otras investigaciones semejantes fueron realizadas por Wright et al. (1962), Grassi et al. (1967), Mihajlovich et al. (1967), Furtado y Simão (1973) y Choudhury et al. (1980). Millar (1976) parametrizó las informaciones de estos experimentos para el manejo del riego. En la Figura 10.16 se presenta el rendimiento relativo de tomate en función del potencial matricial del suelo.

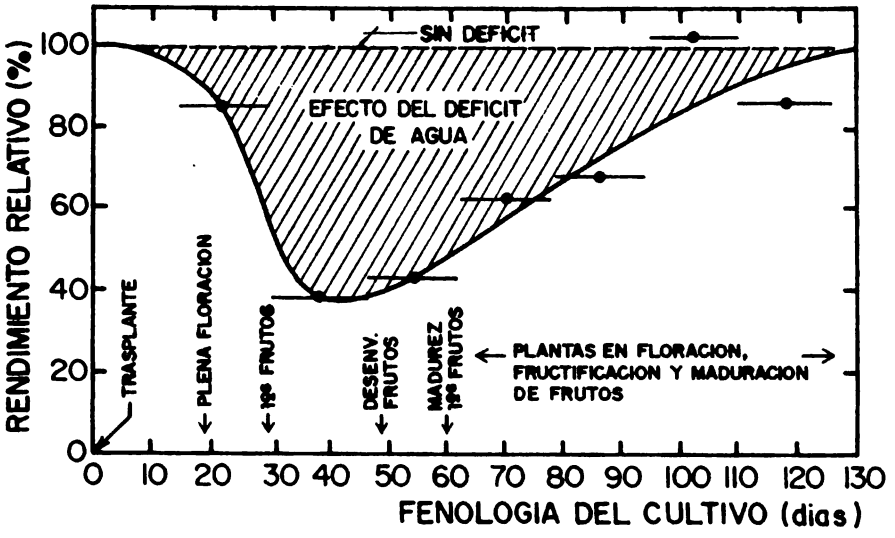


FIGURA 10.17. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento relativo de tomate industrial (Choudhury y Millar, 1978).

Para obtener 90 % del rendimiento potencial se debe manejar el riego a −2 bar de potencial matricial del suelo, para obtener 80, 70 y 60 %, se debe manejar el riego a potenciales matriciales de −2,7, −4 y −9 bar, respectivamente.

Referente a la respuesta fenológica al déficit de agua, Huguet (1961) encontró que existen dos períodos sensibles a la falta de agua, durante la formación de las flores y durante el crecimiento rápido de los frutos. Por otra parte, Vittum et al. (1963) encontraron que el riego temprano aumentaba el tamaño y vigor de las plantas y cuaje, mientras que el riego en la última parte del ciclo fenológico, aumentaba el tamaño del fruto y rendimiento. Salter y Goode (1967) analizando la información existente concluyeron que el tomate es más sensible al déficit de agua desde el comienzo del cuaje del fruto hasta madurez.

En la Figura 10.17 se presenta el rendimiento relativo del tomate industrial en función del ciclo fenológico, de acuerdo con los datos obtenidos por Choudhury y Millar (1978). Esta información muestra claramente que el período crítico de falta de agua del tomate es entre la formación de los primeros frutos y su maduración. La falta de riego en este período provoca una reducción de 60 % en el rendimiento. Sin embargo, hay disminución apreciable en el rendimiento cuando falta agua desde el período de plena floración. A partir de la madurez de los primeros frutos, la planta entra en un proceso simultáneo de floración, fructificación y madurez de los frutos, por

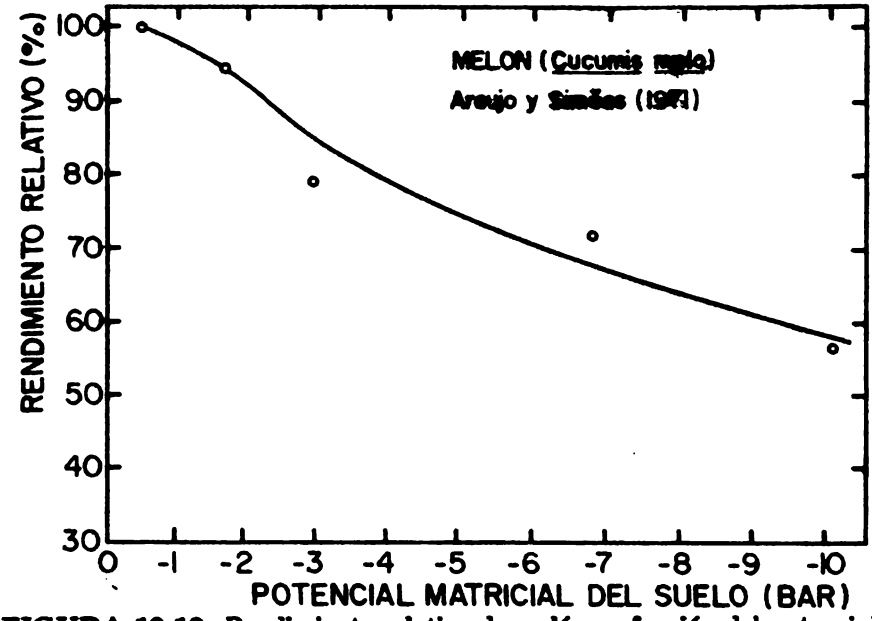


FIGURA 10.18. Rendimiento relativo de melón en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

lo cual el efecto de la falta de agua durante el período de plena producción del tomate industrial se ejerce simultáneamente en todos los procesos.

e. Otros Cultivos

En la Figura 10.18 se presenta la relación entre rendimiento relativo y potencial matricial del suelo para melón (Araujo y Simões, 1971). El potencial matricial al cual se debe manejar el riego para rendimiento máximo en melón es de –0,5 bar.

Para obtener 90 % del rendimiento potencial se debe manejar el riego a –2,2 bar de potencial matricial del suelo y para obtener 80 % del rendimiento potencial se debe manejar el riego a –3,6 bar.

El melón es un cultivo relativamente resistente a la falta de agua, lo cual posibilita un manejo de riego más adecuado a la metodología tradicional de aplicación de agua.

Respecto a la respuesta del melón al riego único y diferido no se tiene mucha información. Azzi, citado por Salter y Goode (1967) encontró que el melón requiere riego adecuado hasta que el fruto alcanza su tamaño máximo, después del cual el corte del riego es necesario para la madurez y evitar rajaduras, mejorando la calidad y presentación del producto.

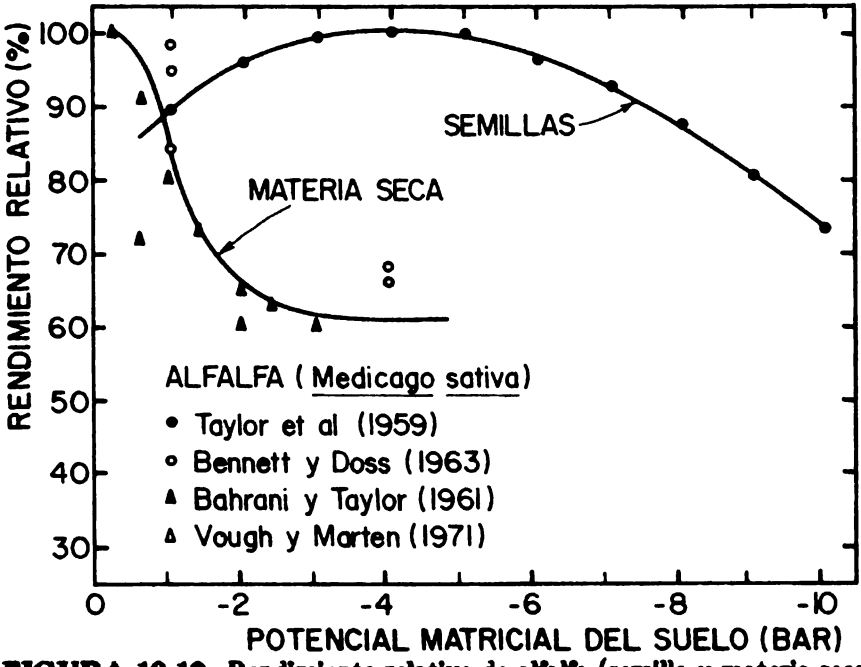


FIGURA 10.19. Rendimiento relativo de alfalfa (semilla y materia seca) en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

10.3.5. Forrajeras

a. Alfalfa

En la Figura 10.19 se muestra la relación entre el rendimiento relativo de alfalfa para heno y semillas, y el potencial matricial del suelo al cual se manejó el riego. La respuesta al nivel de riego en alfalfa para semillas es totalmente diferente que en el caso para producción de heno. En el caso de producción de semillas, manejando el riego a niveles entre -2 y -7 bar de potencial matricial del suelo se obtienen rendimientos cerca del valor potencial. Sólo habría necesidad de evitar esos niveles de potencial matricial en el suelo durante el período de floración que es el período más crítico (Doorenbos y Pruitt, 1975).

En el caso de producción de materia seca, la alfalfa es muy sensible al déficit de agua. El 90 % del rendimiento potencial se obtiene cuando se maneja el riego a -0,9 bar de potencial matricial del suelo, 80 % a -1,5 bar, 70 % a -1,65 bar y se obtiene 60 % del rendimiento potencial cuando se aplica

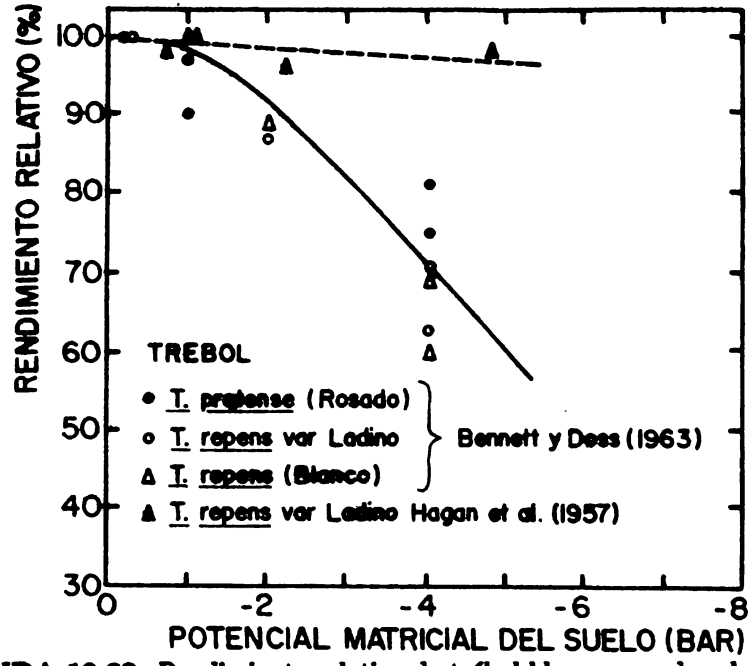


FIGURA 10.20. Rendimiento relativo de trébol blanco, rosado y ladino, en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

riego a un nivel de –(3 a 4) bar de potencial matricial del suelo. Lo anterior excluye el efecto adicional de reducción en el rendimiento que se producirá si al momento de alcanzar el nivel indicativo de riego se está en el período crítico del cultivo.

b. Trébol

En la Figura 10.20 se muestra la relación entre el rendimiento relativo y potencial matricial del suelo al cual se aplicó riego para trébol blanco, rosado y ladino. La información de Bennett y Doss (1963) indica que el rendimiento disminuye a medida que disminuye (más negativo) el potencial matricial. Según estos datos, el rendimiento potencial se obtendrá manejando el riego a –0,5 bar, 90 % a –2,15 bar, 80 % a –3,1 bar, 70 % a –4 bar y 60 % del rendimiento potencial, cuando se maneja el riego a –5 bar de potencial matricial del suelo. En cambio, los datos de Hagan et al. (1957) para trébol ladino indican que no hay cambio apreciable en los rendimientos cuando el riego se realizó entre –0,3 y –5 bar, lo cual está en desacuerdo con la mayoría de la información publicada.

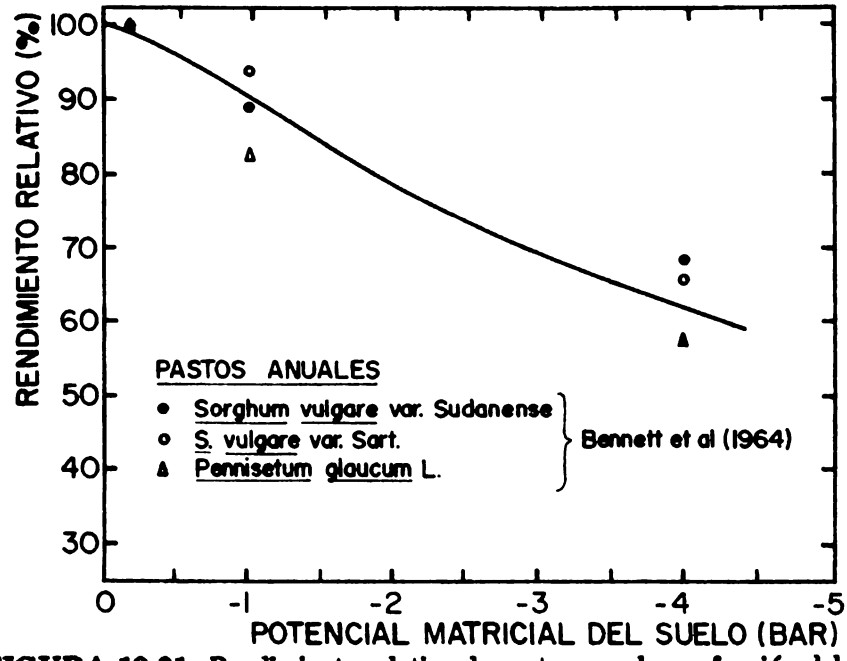


FIGURA 10.21. Rendimiento relativo de pastos anuales en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

c. Pastos Anuales

La información de la Figura 10.21, aunque reducida, indica que el rendimiento potencial de pastos anuales se obtiene manejando el riego a un nivel de –0,4 bar de potencial matricial del suelo. El 90 % del rendimiento potencial se obtendría manejando el riego a –1 bar, 80 % a –1,75 bar, 70 % a –3 bar y 60 % a – 4,25 bar.

En la Figura 10.22 se muestra la producción de granos de millo (**Pennisetum typhoides**) en función del potencial matricial del suelo (Silva et al., 1978). De este gráfico se concluye que el millo es resistente a la sequía, ya que se obtiene rendimiento máximo a bajos valores de potencial matricial en el suelo (–7,5 bar).

En la Figura 10.23 se muestra el rendimiento de sorgo granífero en función de la fenología del cultivo (Steward et al., 1974). Aunque es un cultivo relativamente resistente a la falta de agua, el sorgo tiene un período crítico entre macolla e inicio de la espiga.

d. Pastos Perennes

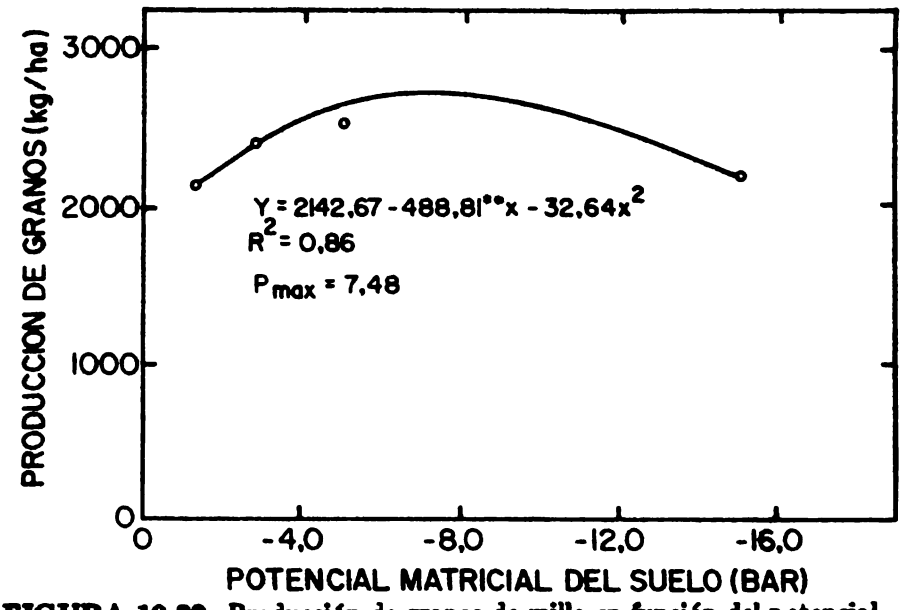


FIGURA 10.22. Producción de granos de millo en función del potencial matricial del suelo (Silva et al., 1980).

La Figura 10.24 reune la información para festuca, falaris y pasto ovillo. El rendimiento potencial se puede obtener manejando el riego entre –0,25 y –1 bar. El 90 % del rendimiento potencial se obtendría manejando el riego a –2,75 bar, 80 % a –3,75 bar y 70 % a –4,6 bar de potencial matricial del suelo. De esta información se concluye que los pastos perennes son más resistentes al déficit de agua, permitiendo un manejo más fácil y adecuado del riego.

Según Blasser et al. (1952), los pastos, una vez establecidos, son menos vulnerables a los excesos y deficiencias de agua que las especies leguminosas (alfalfa, trébol). Los pastos pueden soportar severas deficiencias de agua debido a que poseen estolones auxiliares, los cuales están bajo la superficie del suelo donde son protegidos contra la desecación, y porque durante los períodos secos están en dormancia. También se ha encontrado que los pastos pueden soportar bien las condiciones adversas de humedad cuando están bien provistos de nitrógeno (Low y Armitage, 1959).

En general, el análisis de la información publicada lleva a conclusiones que contrastan con las obtenidas por Salter y Goode (1967) quienes establecen que la tasa de crecimiento y rendimiento de los pastos dependen de un continuo aporte de agua a bajas tensiones. Agregan, además, que no hay succión determinada a la cual se reduce la tasa de crecimiento de los pastos.

La información publicada e incluida en este Capítulo permite concluir

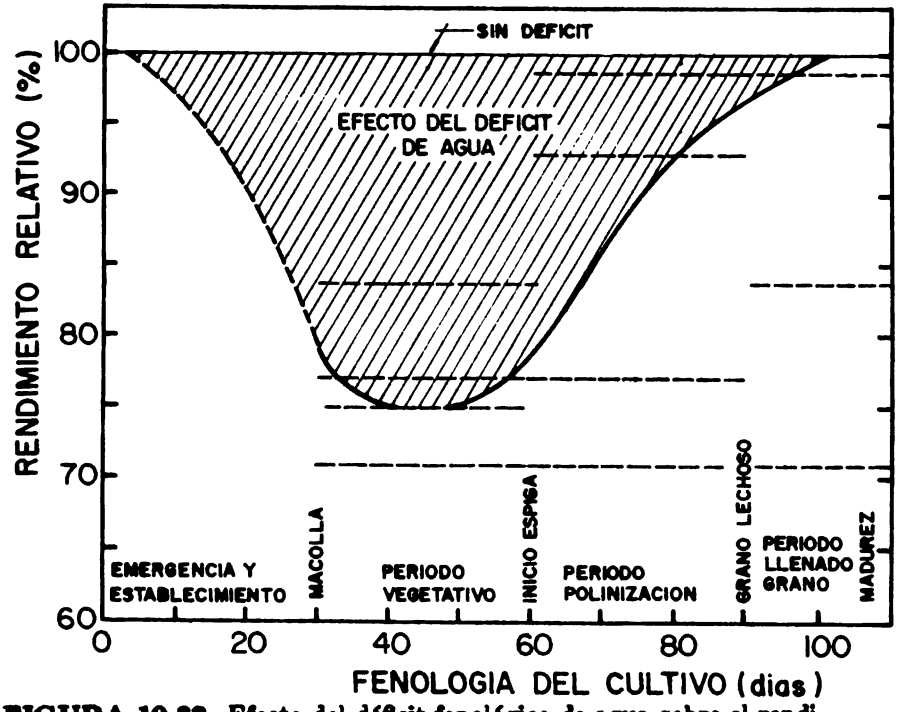


FIGURA 10.23. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento relativo de sorgo granífero, basado en datos de Steward et al., 1974 (Millar, 1984).

que los pastos soportan déficits de agua, y que manejando el riego a niveles de potenciales matriciales entre -2 y -4 bar se obtienen rendimientos de aproximadamente 80 % del rendimiento potencial. Este nivel de producción es posible de obtener con la metodología tradicional de aplicación del agua de riego por gravedad. Las regiones de mayor demanda requieren una mayor frecuencia de aplicación, lo cual puede imposibilitar el manejo del riego para mayores rendimientos con la metodología tradicional de riego, a no ser mediante el uso de métodos como aspersión y goteo, que permiten una alta frecuencia de riego.

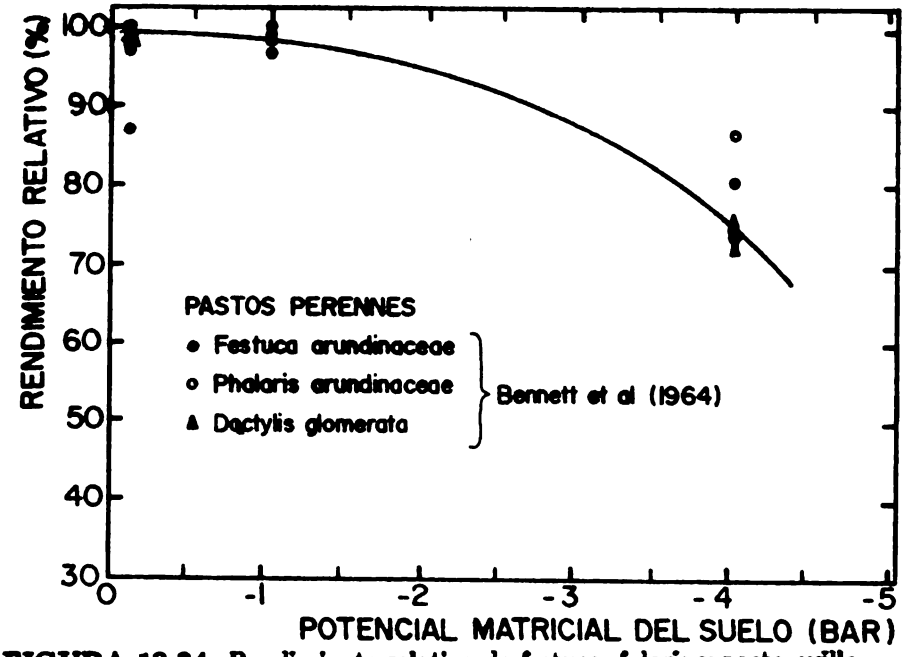


FIGURA 10.24. Rendimiento relativo de festuca, falaris y pasto ovillo, en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

10.3.6. Cultivos Industriales

a. Algodón

En la Figura 10.25 se muestra la relación entre el rendimiento relativo de algodón y potencial matricial del suelo al cual se manejó la aplicación del riego. Se puede obtener rendimiento relativo de 90 % del potencial, manejando el riego a −5 bar de potencial matricial del suelo, 80 % a −7,5 bar y 70 % a −10 bar. Lo anterior está indicando que el algodón es un cultivo resistente a la sequía.

En la Figura 10.26 se muestra el efecto de déficits únicos de agua en algunos períodos del ciclo fenológico sobre el rendimiento relativo de algodón. Desde el inicio al término de la floración es el período más crítico a la falta de agua, provocando aproximadamente 40 % de reducción en el rendimiento. Un déficit de agua entre el término de la floración y madurez de los capullos tempranos provoca un 25 % de reducción en el rendimiento.

La información anterior indica que el algodón es un cultivo que se puede manejar en condiciones de secano, haciendo un uso eficiente de la distribución

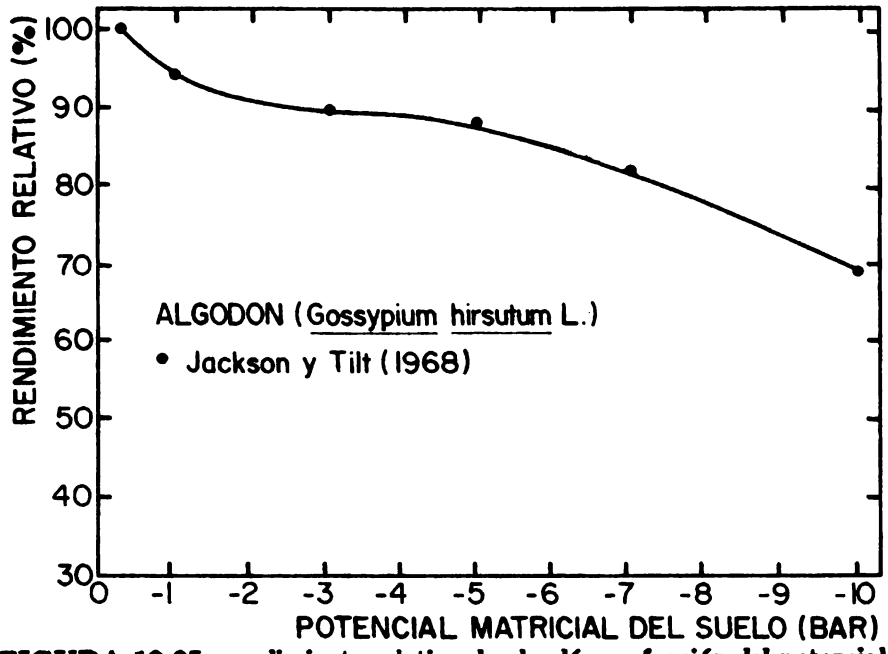


FIGURA 10.25. rendimiento relativo de algodón en función del potencial matricial del suelo al cual se aplicó el riego (Millar, 1976).

o concentración de las lluvias. El problema se reduce al manejo de la época de siembra.

b. Caña de Azúcar

En general, durante el período de crecimiento la respuesta de la caña de azúcar al déficit de agua es mayor, especialmente durante la primera mitad de su período de crecimiento (Salter y Goode, 1967). A medida que se aproxima la cosecha y durante el período de madurez, el déficit de agua favorece la acumulación de sacarosa.

El efecto benéfico del agua es mayor cuando se aplica al final o durante el período de macolla (Acharya et al., 1960; Gill, 1962).

El crecimiento del tallo determina el rendimiento de la caña de azúcar. El agua produce un efecto marcado en la tasa de crecimiento, el cual normalmente es mayor en la noche que en el día (Salter y Goode, 1967), lo cual está directamente relacionado con el potencial de presión existente en la planta.

En la Figura 10.27 se muestra el crecimiento relativo del tallo en función del potencial matricial del suelo (Robinson, 1963), demostrando que el crecimiento del tallo disminuye rápidamente hasta –2 bar. Por otra parte, esto

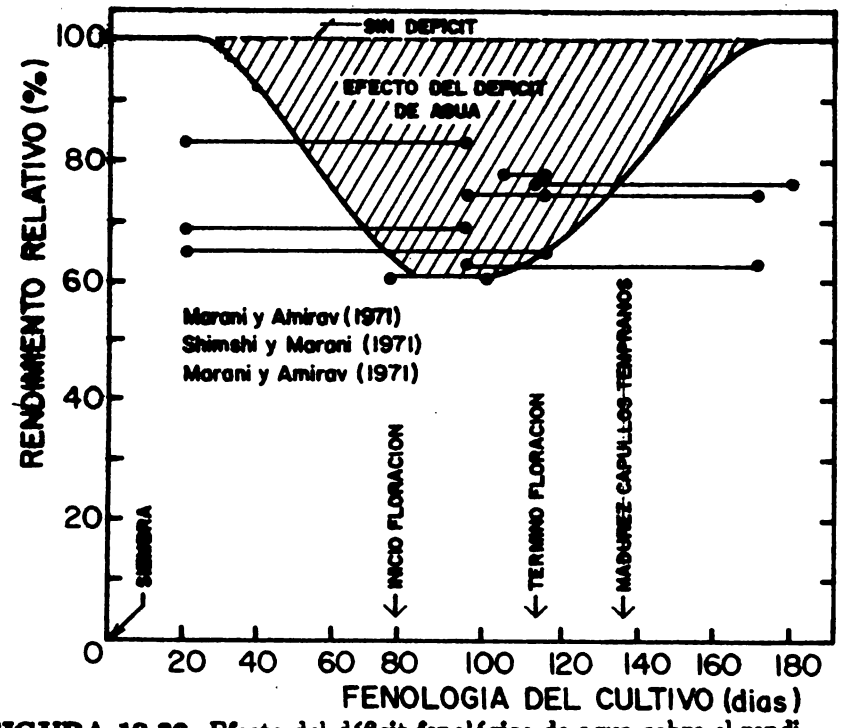


FIGURA 10.26. Efecto del déficit fenológico de agua sobre el rendimiento relativo de algodón (Millar, 1976).

indica que se debe disminuir el intervalo de los riegos durante el período de crecimiento para maximizar el rendimiento de la caña de azúcar.

10.3.7. Cuadro-Resumen de la Respuesta de los Cultivos al Manejo de Riego

En el Cuadro 10.3 se presenta un resumen de los diferentes cultivos indicados anteriormente mostrando el nivel de producción que se obtiene cuando se maneja el riego al nivel indicado de potencial matricial en el suelo.

De este cuadro, se deduce que existen cultivos cuyo rendimiento es más afectado que otros por el nivel de manejo de riego. Formando una escala de sensibilidad a la falta de agua, se tiene:

Lechuga > Papas > Alfalfa (materia seca) > Maíz

Por otra parte, una escala para los cultivos en que la falta de agua presenta menor efecto en los rendimientos (cultivos más resistentes) , sería la siguiente:

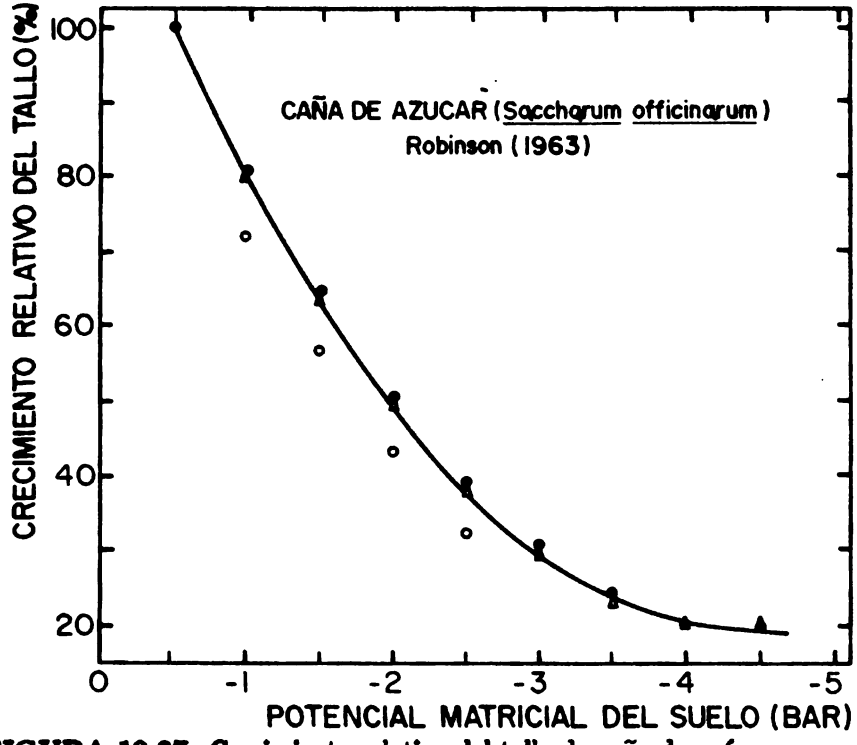


FIGURA 10.27. Crecimiento relativo del tallo de caña de azúcar en función del potencial matricial del suelo (Robinson, 1963).

Alfalfa (semillas) > Algodón > Melón > Tomate > Trigo

La información del Cuadro 10.3 indica que la producción de cultivos como alfalfa para semillas y algodón podrían ser manejados en condiciones de secano. La información de períodos críticos se podría usar en combinación con la distribución de lluvias. En aquellas regiones donde la pluviometría se concentra en determinados períodos, sería posible manejar la época de siembra de los cultivos con el objeto de hacer coincidir el período crítico del cultivo con aquel período donde el análisis de datos de lluvia muestra más de un 75 % de probabilidad de recibir una lámina de agua significativa, que reemplazaría al riego complementario.

10.3.8. Uso de la Información en Areas Bajo Riego

a. Datos Necesarios

CUADRO 10.3. Nivel de producción de diferentes cultivos cuando manejados al nivel de riego indicado en términos de potencial matricial del suelo.

	Nivel de Producción (%)					
CULTIVO	Potencial	90	80	70	60	50
GRANOS	Potencial matrical del suelo (bar)					
Trigo (cebada)	-0,50	-1,75	-3,2	-4,6	-6,3	-8,5
Maiz	-0,50	-0,90	-1,6	-2,4	-3,4	-4,9
Frijol	-0,80	-1,70	-2,5	-4,0	-6,0	-
HORTALIZAS						
Cebolla	-0,50	-1,6	-2,1	-2,9	-3,7	-5,0
Papas	-0,25	-0,65	-1,1	-1,6	-2,0	-2,5
Tomates	-0,50	-2,0	-2,7	-4,0	-9,0	-
Lechuga	-0,15	-0,3	-0,5	-0,75	-1,1	-1,5
Porotos (verdes)	-0,40	-2,4	-3,3	-4,0	-4,5	-4,95
Melón	-0,50	-2,2	-3,6	-6,0	-9,5	-
FORRAJERAS						
Alfalfa (materia seca)	-0,40	-0,9	-1,15	-1,65	-(3-4)	-
Alfalfa (semillas)	-(4-5)	-7,5	-9,1	-(10-11)	-	-
Trébol (materia seca)	-0,50	-2,15	-3,1	-4,0	-5,0	-
Pastos anuales	-0,40	-1,0	-1,75	-3,0	-4,25	-
Pastos perennes	-(0,25-1,0)	-2,75	-3,75	-4,6	-	-
PLANTAS INDUSTRIALES						
Algodón	-0,60	-2,5	-7,5	-9,75	-	-
Caña de Azúcar	-0,50	-0,75	-1,0	-1,3	-1,6	-2,0

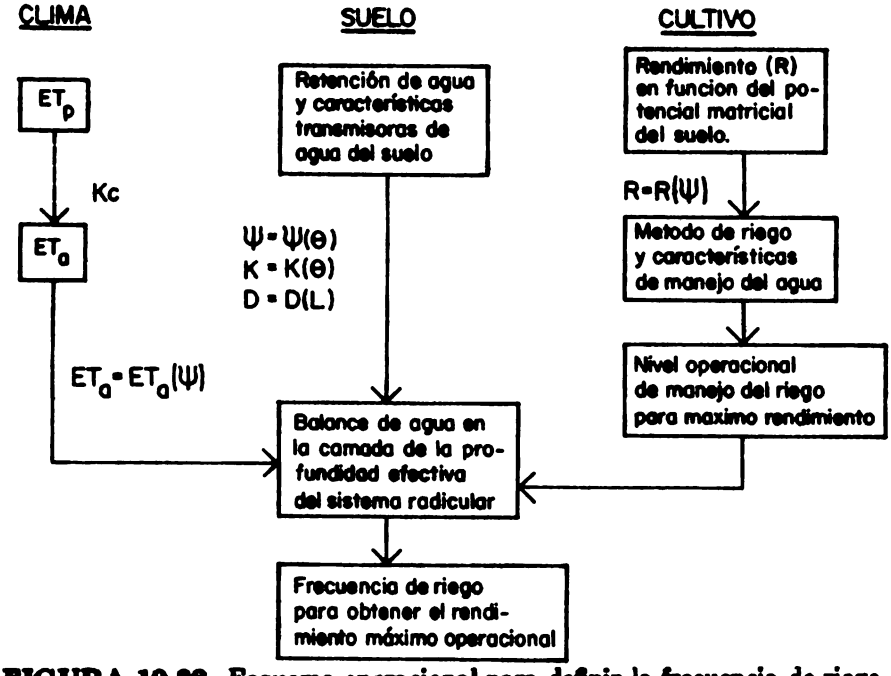


FIGURA 10.28. Esquema operacional para definir la frecuencia de riego a nivel de finca (Millar y Choudhury, 1980).

La información presentada en este Capítulo constituye la información básica para el manejo del riego. Sin embargo, para su aplicación en una situación específica, determinada por suelos, clima, método de riego, se deben conocer algunos parámetros del área de riego, entre otros los siguientes:

i. Curva de retención de agua de los suelos (contenido volumétrico de agua en función del potencial matricial del suelo).

ii. Profundidad efectiva del sistema radicular del cultivo, y

iii. Evapotranspiración del cultivo, por estado fenológico o promedio del ciclo vegetativo.

Con estos datos se realiza un balance de agua en el perfil de suelo para la profundidad efectiva del sistema radicular, iniciándose con el suelo en condiciones de capacidad de campo, aproximadamente –0,1 a –0,33 bar de potencial matricial para suelos arenosos y arcillosos, respectivamente.

Con la información anterior se genera un gráfico, que tiene el potencial matricial del suelo en función del tiempo después del riego y en el cual se introduce como variable la extracción de agua por el cultivo y la evaporación

del suelo (evapotranspiración). En el caso de suelos arenosos es necesario considerar las pérdidas por percolación fuera de la profundidad efectiva del sistema radicular. Los detalles de los procedimientos metodológicos se encuentran en la publicación de Millar y Choudhury (1980) y la finalidad es definir la frecuencia operacional de riego a nivel de finca, utilizando información de clima, suelo y del cultivo (Figura 10.28).

b. Ejemplo de Uso de la Información

Con la finalidad de mostrar con un ejemplo práctico de como sería la situación de manejo del riego en una región semiárida, se presenta un balance de agua para dos suelos, oxisol y vertisol, del Valle del río San Francisco en la región noreste de Brasil.

Para el ejemplo se supuso diferentes padrones de extracción de agua de un perfil de 40 cm del suelo y mediante el uso de las curvas de retención de agua se definió la variación en el potencial matricial como producto de la extracción. La secuencia del cálculo se muestra en el esquema de la Figura 10.29. En la Figura 10.30 se muestra el balance de agua para el Vertisol en función del tiempo después de aplicado el riego. La Figura 10.31 presenta la misma información para el Oxisol.

Con la información del Cuadro 10.3, obtenida de la relación entre el rendimiento relativo y el potencial matricial para los diferentes cultivos, se determinó la frecuencia de riego que sería necesaria en estos suelos para obtener un determinado nivel de producción. Se consideraron en el análisis, los cultivos más comunes en la región, a los cuales se les asignó un patrón de extracción de agua (evapotranspiración) común para una región semiárida cuando el cultivo cubre totalmente el suelo. En lo posible se deben utilizar datos de evapotranspiración obtenidos por métodos directos (parcelas experimentales o lisímetros). En el caso del ejemplo, se utilizaron datos de otras regiones de clima similar, principalmente Arizona (Erie, French y Harris, 1968).

La situación de manejo del riego de alfalfa, maíz, tomate, cebolla, algodón y melón en el Vertisol se presenta en la Figura 10.32. Se observa que para obtener un mismo nivel de producción de estos cultivos, por ejemplo 90 % del rendimiento potencial, la frecuencia de riego sería en el siguiente orden:

Alfalfa > Maíz > Cebolla > Tomate > Algodón > Melón

Lo anterior implica que los últimos cultivos son más resistentes a la falta de agua soportando un intervalo de tiempo mayor entre riegos. Como se estableció anteriormente, este análisis considera un perfil de 40 cm de

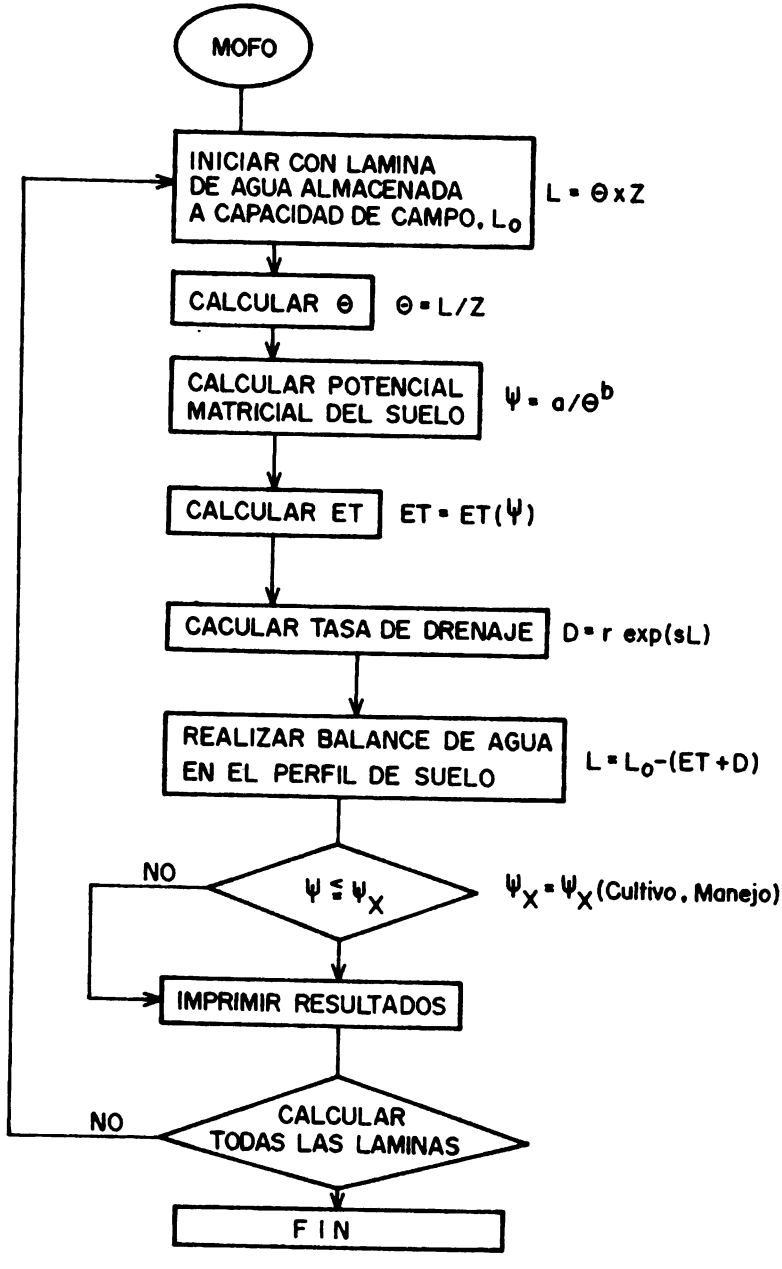


FIGURA 10.29. Secuencia de cálculo del Modelo MOFO para determinar la frecuencia operacional de riego para máximo rendimiento (Millar y Choudhury, 1980).

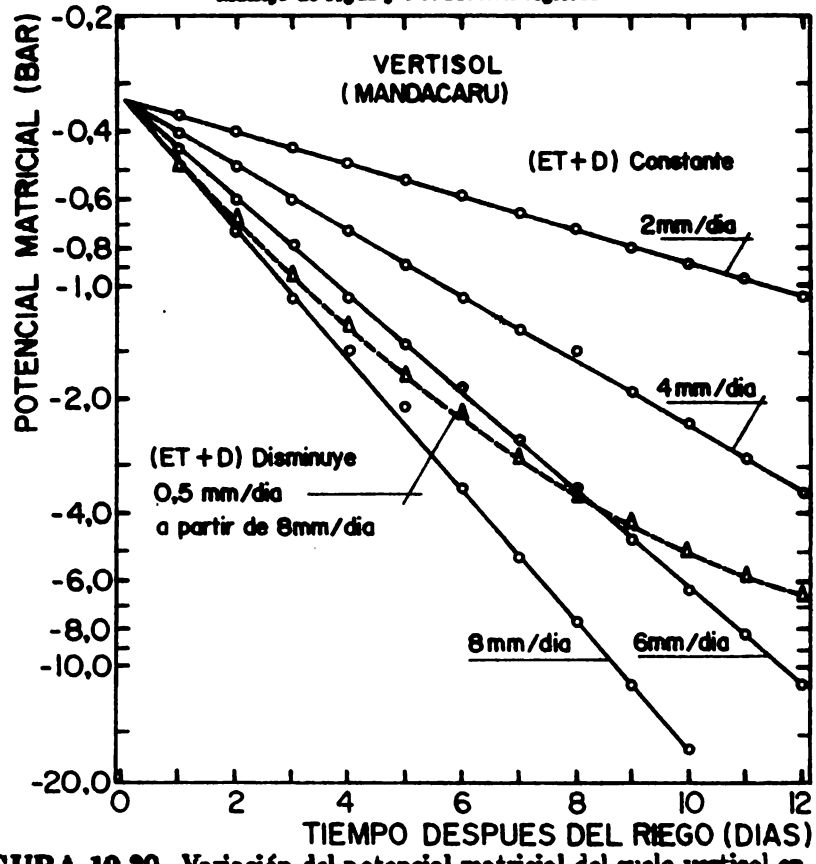


FIGURA 10.30. Variación del potencial matricial del suelo vertisol en función del tiempo después del riego para diferentes patrones de extracción de agua (Millar, 1984).

suelo donde se concentraría el mayor porcentaje de raíces. Si la densidad radicular extrae agua de una profundidad mayor, la situación va a cambiar especialmente en la frecuencia de riego.

En la Figura 10.33 se muestra la relación entre el nivel de producción y la frecuencia de riego en el Oxisol para diferentes cultivos comunes en la región. En este suelo, de características arenosas, es extremadamente crítica la oportunidad de aplicación del riego, especialmente en cultivos muy sensibles a la falta de agua como maíz y papas. En el caso de maíz, la demora de un día en la aplicación de los riegos puede representar una disminución de 30 % en el rendimiento. La situación no es muy diferente para los cultivos hortícolas. Este cambio acentuado en la producción ante pequeños cambios

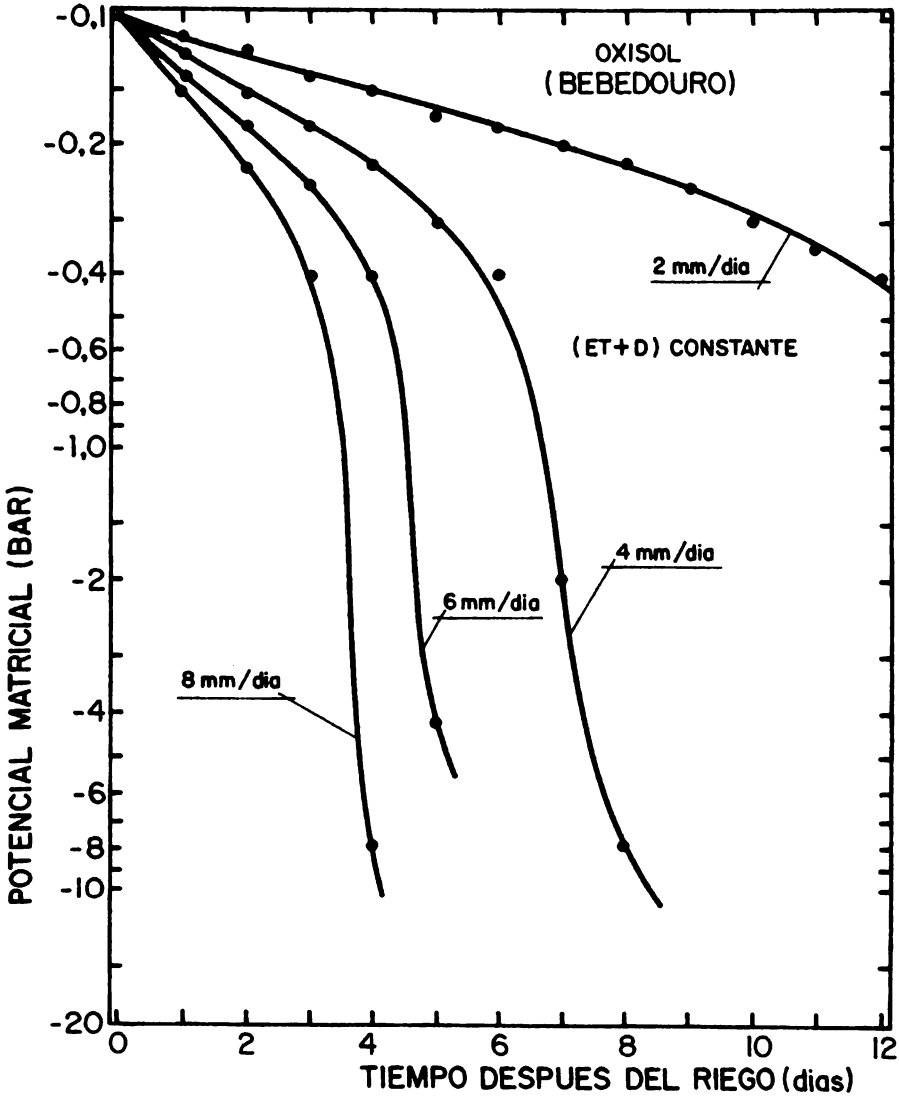


FIGURA 10.31. Variación del potencial matricial del suelo Latosol en función del tiempo después del riego para diferentes patrones de extracción de agua (Millar, 1984).

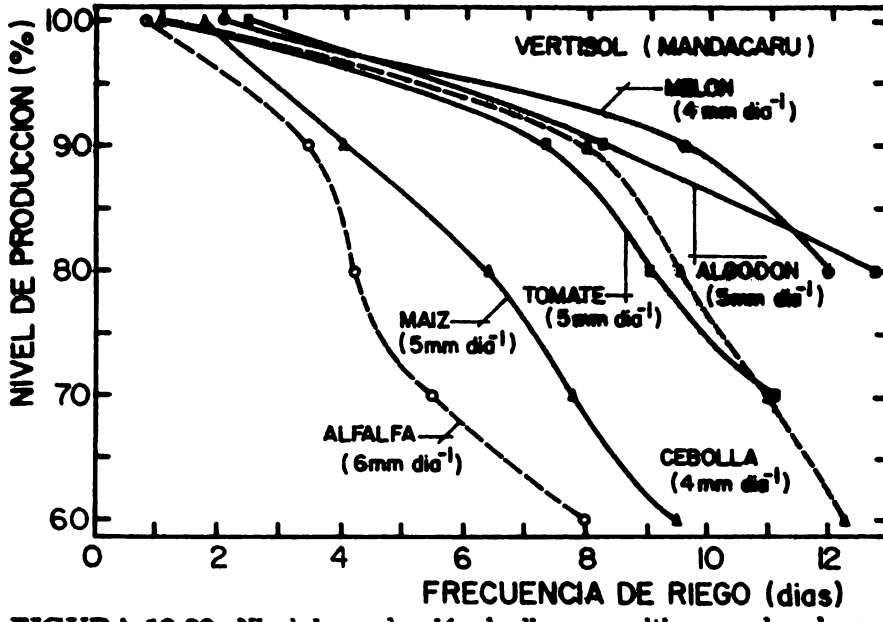


FIGURA 10.32. Nivel de producción de diversos cultivos en el suelo vertisol en función de la frecuencia de riego mantenida a través del ciclo vegetativo (Millar, 1984).

en la frecuencia de aplicación de agua se debe principalmente a la forma de la curva de retención de agua del Oxisol, lo cual también se manifiesta en el balance de agua de la Figura 10.31.

La situación anterior no se presenta en el caso del Vertisol (Figura 10.32), donde debido a una curva de retención de agua más normalizada (menos pronunciada), la variación en el intervalo de tiempo entre riegos no afecta tan drásticamente los rendimientos.

De esta información se concluye que para obtener rendimientos cerca del nivel potencial es necesaria una alta frecuencia de riego, lo cual normalmente es imposible de manejar con la metodología tradicional de aplicación de agua a los cultivos. De lo anterior se deduce que sólo con métodos modernos de aplicación, como goteo, se podrá obtener rendimientos a nivel potencial.

En todo caso, la información , como presentada, da un elemento de decisión, al permitir al productor u operador de un proyecto de riego de adecuarse al nivel de producción más acorde con sus posibilidades, representadas principalmente por equipos y disponibilidad de mano de obra entrenada. En otras palabras, hay un elemento de decisión para adecuar la producción a la eficiencia de manejo del riego basada en las condiciones operacionales del

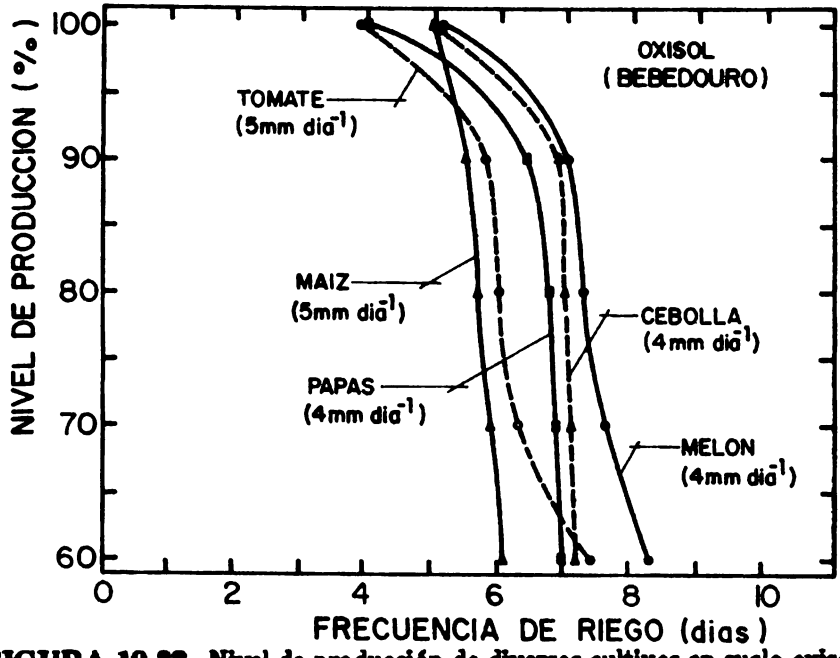


FIGURA 10.33. Nivel de producción de diversos cultivos en suelo oxisol en función de la frecuencia de riego mantenida a través del ciclo vegetativo (Millar, 1984).

agricultor.

10.4. Referencias Bibliográficas.

[1] ACHARIA, R. C., M. N. ALAM, A. B. B. SINHA AND K. L. KHANNA. 1960. Studies on crop–weather relationships. II. The influence of weekly rainfall on sugar cane yields at the Government Experimental Farm, Pusa Bihar. Indian Journal of Sugarcane Research 4:187–191.

[2] ANONIMO. 1954. How much and when to irrigate. Farm management, p. 32–34.

[3] ARAUJO, A. R. de e A. J. SIMOES. 1971. Efeito da irrigacão na producão de melão. Petrolina, PE., Departamento de Recursos Naturais, Divisão de Estudos Integrados. (Relatorio Técnico Estacão Experimental de Mandacarú).

[4] ASPINAL, D., P. B. NICHOLLS AND L. H. MAY. 1964. The effects of soil moisture stress on the growth of barley. I. Vegetative development and grain yield. Australian Journal of Agricultural Research 15:729–745.

[5] BAHRANI, B. AND S. A. TAYLOR. 1961. Influence of soil moisture potential and evaporative demand on the actual evapotranspiration from an alfalfa field. Agronomy Journal 53:233–237.

[6] BENNETT, O. L. AND B. D. DOSS. 1963. Effects of soil moisture regime on yield and evapotranspiration from cool-season perennial forage species. Agronomy Journal 55(3):275–278.

[7] BENNETT, O. L., B. D. DOSS, D. A. ASHLEY, V. J. KILMER AND B. C. RICHARDSON. 4. Effects of soil moisture regime on yield, nutrient content, and evapotranspiration for three annal forage species. Agronomy Journal 56(2):195–198.

[8] BIERHUIZEN, J. F. AND N. M. des VOS. 1959. The effect of soil moisture on the growth and yoeld of vegetable crops. Report, Conference on Supplemental Irrigation, Commission VI (Copenhagen). Int. Soc. Soil Sci. Tech. Bull. 2:83–92.

[9] BLASSER, R. E., W. H. SKRDLA AND T. H. TAYLOR. 1952. Ecological and physiological factors in compounding forage seed mixtures. Advances in Agronomy 4:179–219.

[10] BOX, J. E., W. H. SLETTEN, J. H. KYLE AND A. POPE. 1963. Effect of soil moisture, temperature, and fertility on yield and quality of irrigated potatoes in the Southern Plains. Agronomy Journal 55(5):492–494.

[11] CHOUDHURY, E. N. e A. A. MILLAR. 1978. Efeito do deficit fenológico de agua sobre a producão e características industriais do tomate. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, IV, 1978. 20 p.

[12] CHOUDHURY, E. N., A. A. MILLAR e M. A. DA SILVA. 1980. Comparacão entre tres sistemas de manejo da irrigacão em áreas semicomerciais de tomate. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, V, 1980. 20 p.

[13] CLAASSEN, M. M. AND R. H. SHAW. 1970. Water deficits effects on corn. II. Yield Components. Agronomy Journal 62(5):625–655.

[14] CLAYPOOL, L. L. AND O. M. MORRIS. 1932. Some effects of irrigation on yield and quality of potatoes produced in the Yakima Valley. Proceedings of the American Society of Horticultural Sciences 28:249–252.

[15] DENMEAD, O. T. AND R. H. SHAW. 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. Agronomy Journal 52:272–273.

[16] DOORENBOS, J. AND W. O. PRUITT. 1975. Crop water requirements. Rome, Food and Agricultural Organization of the United nations. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper 24).

[17] DREW, D. H. 1966. Irrigation studies on summer cabbage. Journal of Horticultural Science 41:103–114.

[18] ERIE, L. J., O. F. FRENCH AND K. HARRIS. 1968. Consumptive use of water by crops in Arizona. Agriculture Experiment Station, The University of Arizona. 44 p. (Technical Bulletin 169).

[19] FERREIRA da COSTA FILHO, J., F. de SOUZA, D. C. KIDMAN e H. O. CARVALHO. 1975. Efeito de níveis de umidade na producão de cebola. Petrolina, PE., EMBRAPA, Centro de Pesquisas do Trópico Semi-árido (CPATSA). (Apresentado no III Seminário Nacional de Irrigacão e Drenagem, Fortaleza).

[20] FISHER, R. A. AND R. M. HAGAN. 1965. Plant water relations, irrigation management and crop yield. Experimental Agriculture 1:161–177.

[21] FURTADO, J. e S. SIMAO. 1973. Influencia da umidade do solo na producão do tomateiro. Boletim Técnico (DNOCS) 31(2):159–193.

[22] GARD, L. E., G. E. McKIBBEN AND B. A. JONES. 1961. Moisture loss and corn yields on a silt-pan soil as affected by three levels of water supply. Soil Science Society American Proceedings 25:154.

[23] GRASSI, C. J., D. L. MIHAJLOVICH y L. NIJENSOHN. 1967. Respuesta del tomate (CV Roma) a diferentes regímenes de riego. Revista de investigaciones Agropecuarias, INTA. Serie 2. Biología y Producción Vegetal (15):269–291.

[24] GILL, H. S. 1962. The influence of soil drought on the growth, yield and quality of cane varieties in relation to their drought endurance. Indian Journal of Agronomy 7:148–159.

[25] HADDOCK, J. L., S. A. TAYLOR AND C. H. MILLIGAN. 1972. Irrigation, fertilization, and soil management of crops in rotation. Utah Agr. Exp. Sta. Bull.

[26] HAISE, H. R. AND R. M. HAGAN. 1967. Soil, plant, and evaporative measurements as criteria for scheduling irrigation. pp. 577–604. In. R. M. Hagan et al. (ed), Irrigation of Agricultural Lands. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. (Agronomy Series No. 11).

[27] HAGAN, R. M., M. L. PETERSON, R. P. UPCHURCH AND L. G. JONES. 1957. Relationships of soil moisture stress to different aspects of growth in ladino clover. Soil Science Society of America Proceedings 21:360–365.

[28] HANWAY, J. J. 1966. How a corn plant develops. Iowa State University. Special Report No. 48. Iowa State University of Sciences and Technology. Coop. Ext. Ser., Ames, Iowa.

[29] HAWTHORNE, L. R. 1951. Studies of soil moisture and spacing for seed crops of carrots and onions. U. S. Dept. Agr. Cir. 892. p. 26.

[30] HENCKEL, P. A. 1964. Physiology of plants under drought. Annual Review of Plant Physiology 15:363–386.

[31] HILDRETH, A. C., J. R. MAGNESS AND J. W. MITCHELL. 1941. Effects of climatic factors on growing plants. In climate and man. USDA Yearbook.

[32] HOWE, O. W. AND H. F. RHOADES. 1965. Irrigation practice for corn production in relation to stage of plant development. Soil Science Society of America Proceedings 19:94–98.

[33] HUGUET, C. 1961. Essais d'evaluation des besoins en eau de cultures maraicheres sous climat mediterraen. Ann. Agron. (Paris) 12:99–107.

[34] HUTCHEON, W. L. AND D. A. RENNIE. 1960. The relationship of soil moisture stress and nutrient availability to the growth characteristics and quality of wheat. Madison, Wisconsin, 7th International Congress Soil Science IV:488–494.

[35] JACKSON, E. B. AND P. A. TILT. 1968. Effects of irrigation intensity and nitrogen level on the performance of eight varieties of upland cotton, Gossypium hirsutum L. Agronomy Journal 60(1):13–17.

[36] JANES, B. E. AND W. O. DRINKWATER. 1959. Irrigation studies in vegetables. Connecticut Agricultural Experiment Station Bulletin 338.

[37] JENSEN, R. E., A. A. MILLAR AND A. BAUER. 1967. The effect of water deficits at diffecrent stages of growth on the barley yield. Fargo, North Dakota, Soil Department, North Dakota State University. (Unpublished data).

[38] JONES, S. T. AND W. A. JOHSON. 1958. Effect of irrigation at different minimum levels of soil moisture and of imposed droughts on yield of onions and potatoes. Proceedings American Society of Horticultural Sciences 71:440–445.

[39] JONES, J. N., Jr., J. E. MOODY AND J. H. LILLARD. 1957. Corn and burley tobacco plot studies, Research Report, 1953–1957, Virginia Agricultural Experiment Station. pp. 52–53.

[40] JONES, J. N., G. N. SPARROW AND J. D. MILES. 1960. Principles of tobacco irrigation. U. S. Department of Agricultural Informative Bulletin 228. 16 p.

[41] KASIMATIS, A. N. 1967. Grapes and berries. Part I. Grapes. In: Irrigation of Agricultural Lands, R. M. hagan, N. R. Haise and T. W. Edminster (ed.). Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. pp. 179–733.

[42] KATTAN, A. A. AND J. W. FLEMING. 1956. Effect of irrigation at specific stages of development on yield, quality, growth, and composition of snapbeans. Proceedings, American Society for Horticultural Science 68:329–342.

[43] LEEPER, R. A., E. C. A. RUNGE AND W. M. WALKER. 1974. Effect of plant-available stored soil moisture on corn yields. I. Constant Climatic Condition. Agronomy Journal 66(6):723–727.

[44] LEHANE, J. J. AND W. J. STAPLE. 1962. Effect of soil moisture tensions on growth of wheat. Canadian Journal of Soil Science 42:180–188.

[45] LIS, B. R. de, I. PONCE AND R. M. TIZIO. 1964. Studies on water requirements of horticultural crops. I. Influence of drought at different growth stages of potato on tuber's yield. Agronomy Journal 56(54):377–381.

[46] LIS, B. R. de, I. PONCE, J. B. CAVAGNARD AND R. M. TIZIO. 1967. Studies of water requirements of horticultural crops: II. Influence of drought at different growth stages of onion. Agronomy Journal 59(6):573–576.

[47] LOW, A. J. AND E. R. ARMITAGE. 1959. Irrigation of grassland. Outlook on Agriculture 2:213–218.

[48] MACK, H. J., L. L. BOERSMA, J. W. WOLFE, W. A. SISTRINK, AND D. D. EVANS. 1966. Effects of soil moisture and nitrogen fertilizer on Pole beans. Corvallis, Oregon State University, Agricultural Experiment Station. 28 p. (Technical Bulletin 97).

[49] MacGILLIVRAY, J. H. 1948. Effect of irrigation on the yield of onion seed. Proceedings, American Society of Horticultural Sciences 51:423–427.

[50] MAGALHAES, A. A. de e A. A. MILLAR. 1978. Efeito do deficit de água no periodo reprodutivo sobre a producão do feijão. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 13(2):55–60.

[51] MAGALHAES, A. A. de, A. A. MILLAR e E. N. CHOUDHURY. 1979. Efeito do deficit fenológico de água sobre a producão de feijão. Turrialba 29(4):269–273.

[52] MARANI, A. AND M. HORWITZ. 1963. Growth and yield of cotton as affected by the time of a single irrigation. Agronomy Journal 55:219–222.

[53] MARANI, A. AND A. AMIRAV. 1971. Effects of soil moisture stress on two varieties of upland cotton in Israel. I. The Coastal Plain Region. Experimental Agriculture 7:213–224.

[54] MARANI, A. AND A. AMIRAV. 1971. Effects of soil moisture stress on two varieties of upland cotton in Israel. III. The Bet-She'an Valley. Experimental agriculture 7:289–301.

[55] MARSH, A. W. 1961. Tensiometers: Key to increased profits. Western Grower and Shipper 32:15–17, 34.

[56] MIHAJLOVICH, D. L. E., M. J. C. ORIOLANI, L. NIJENSOHN y H. GALMARINI. 1976. Respuesta del tomate cv. Roma en cultivo comercial a diferentes regímenes de riego. Revista de Investigaciones Agropecuarias. Serie 2. Biología y Producción Vegetal IV(15):293–303.

[57] MILLAR, A. A. 1976. Respuesta de los cultivos al déficit de agua como información básica para el manejo del riego. Brasilia, DF., Brasil, CODEVASF/FAO/USAID/ABID, 1976. 62 p. (Conferencia presentada en el Seminario sobre Manejo de Agua, Brasilia, Mayo 3–5, 1976).

[58] MILLAR, A. A. e E. N. CHOUDHURY. 1980. A model to define operational irrigation frequency for maximum yield of crops. Turrialba 30(4):391–398.

[59] MILLAR, A. A. 1984. Manejo racional da irrigacão: Uso de informacões básicas sobre differentes culturas. Brasilia, DF., Brasil, Instituto Interamericano de Cooperacão para a Agricultura, 57 p. (Serie Publicacões Miscelâneas No. 461).

[60] NELSON, W. E. 1962. The effects of soil moisture stress at critical stages of growth of some vegetable crops. Ph.D. Thesis, Rutgers State University, New Jersey.

[61] NIJENSOHN, L., D. L. MIHAJLOVICH, H. GALMARI y C. J. GRASSI. 1966. Respuesta de la papa (cv. White Rose) a diferentes regimenes de riego. Revista de Investigaciones Agropecuarias, INTA. Serie 2, Biología y producción Vegetal 3(6):67–108.

[62] JENSOHN, L., D. L. MIHAJLOVICH y C. J. GRASSI. 1967. Respuesta de la cebolla (cv. Valenciana) a diferentes regímenes de riego. Revista de Investigaciones Agropecuarias, INTA. Serie 2, Biología y Producción Vegetal 4(7):87–116.

[63] PETERSON, R. F. 1965. Wheat. New York, Interscience Publishers.

[64] PEW, W. D. 1958. Effects of soil moisture on cantaloupe growth and production. Western Grower and Shipper 29:22–24.

[65] RAWITZ, E. AND D. I. HILLEL. 1969. Comparison of indexes relating plant response to soil moisture status. Agronomy Journal 61(2):231–235.

[66] RHOADES, H. F., O. W. HOWE, J. A. BONDURANT AND F. B. HAMILTON. 1964. Fertilization and irrigation practices for corn production on newly irrigated land in the Republican valley. Nebraska Agricultural Experiment Station. (Bulletin 424).

[67] RICHARDS, S. J., J. E. WARNEKE AND T. F. BINGHAM. 1962. Avocado tree growth response to irrigation. California Avocado Soc. Yearbook 46:83–87.

[68] ROBINS, J. S. AND C. E. DOMINGO. 1953. Some effects of severe soil moisture at specific growth stages of corn. Agronomy Journal 45:618–621.

[69] ROBINS, J. S. AND C. E. DOMINGO. 1956. Moisture deficits in relation to the growth and development of dry beans. Agronomy Journal 48:67–70.

[70] ROBINS, J. S. AND C. E. DOMINGO. 1962. Moisture and nitrogen effects of irrigated spring wheat. Agronomy Journal 54:135.

[71] ROBINSON, F. E. 1963. Soil moisture tension, sugarcane stalk elongation and irrigation interval control. Agronomy Journal 55:481–484.

[72] RUNGE, E. C. A., AND R. T. ODELL. 1958. The relation between precipitation, temperature and the yield of corn on the Agronomy South Farm, Urbana, Illinois. Agronomy Journall 52:245–247.

[73] SALE, P. J. M. 1966. The response of summer lettuce to irrigation at different stages of growth. Journal of Horticultural Science 41:43–52.

[74] SALTER, P. J. 1961. The irrigation of early summer cauliflower in relation to stage of growth, plant spacing, and nitrogen level. Journal of horticultural Science 36:241–253.

[75] SALTER, P. J. 1962. Some responses of peas to irrigation at different growth stages. Journal of Horticultural Science 37:141–149.

[76] SALTER, P. J. 1954. The effect of different water-regimes of the growth of plants under glass, experiments with tomatoes (Lycopersicum esculentum Mill). Journal of Horticultural Science 24(4):258–262.

[77] SALTER, P. J. 1963. The effect of wet or dry soil conditions at different growth on the components of yield of a pea crop. Journal of Horticultural Science 38:321–334.

[78] SALTER, P. J. AND J. E. GOODE. 1967. Crop responses to water at different stages of growth. Bucks, England, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal.

[79] SCHMUELI, E. 1953. Irrigation studies in the Jordan Valley: I. Physiological activity of banana in relation to soil moisture. Bulletin Research Council of Israel 3:228–247.

[80] SHIMSHI, D. AND A. MARANI. 1971. Effects of soil moisture stress on two varieties of upland cotton in Israel. II. The Northern Negev Region. Experimental Agriculture 7:225–239.

[81] SIMOES, A. J. e OUTROS. 1973. Comportamento do trigo nos grumossolos do Baixo Médio São Francisco. Petrolina, PE., GEIDA/SUDENE, IICA/CIDIAT. 28 p. (mimeografado).

[82] SINGH, R. AND R. B. ALDERFER. 1966. Effects of soil moisture stress at different periods of growth of some vegetable crops. Soil Science 101:69–80.

[83] SOMMERFELD, T. G. 1960. Effect of irrigation, plant population and row spacing on corn yield. North Dakota Farm Research 21(5):16.

[84] SPIELGEL, P. 1955. The water requirement of the olive tree, critical periods of moisture stress, and the effect of irrigation upon the oil content of its fruit. In: Report 2, Fourteenth International Horticultural Congress. Scheveningen, The Netherlands.

[85] STEWART, J. I., R. D. MISRA, W. O. PRUITT AND R. M. HAGAN. 1974. Irrigation corn and grain sorghum with limited water. American Society of Agricultural Enineers, Annual Meeting, June 23–26, 1974. (Paper No. 74–2024).

[86] STOLZY, L. H., O. C. TAYLOR, M J. GARBER, AND P. B. LOMBARD. Previous treatments as factors in subsequent-irrigation level studies in orange production. Amer. Hort. Soc. 82:199–203.

[87] STRUCHTEMEYER, R. A. 1960. Efficiency of the use of water by potatoes. American Potato Journal 38:22–24.

[88] TAYLOR, S. A., AND B. ROGNERUND. 1959. Water management for potato production. Utah Farm and Home Science 20:82–84.

[89] TAYLOR, S. A., J. L. HADDOCK, AND M. W. PEDERSEN. 1959. Alfalfa irrigation for maximum seed production. Agronomy Journal 51:357–360.

[90] TAYLOR, S. A. 1965. Managing irrigation water on the farm. Amer. Soc. Agr. Eng. Trans. 8:433–436.

[91] URIU, K. 1964. Effect of pos-harvest soil moisture depletion on subsequent yield of apricots. Proceeedings, American Society for Horticultural Science 84:93–97.

[92] VAADIA, Y. AND A. N. KASIMATIS. 1961. Vineyard irrigation trials. The American Journal of Enology and Viticulture 12:88–89.

[93] VAN DER PAAUW, F. 1949. Water relation of oats with special attentions to the influence of periods of drought. Plant and Soil 1:303–341.

[94] VISSAR, W. C. 1959. Crop growth and availability of moisture. Institute of Land and Water Management Research (Wageningen). Technical Bulletin 6.

[95] VITTUM, M. T., W. T. TAPLEY, AND N. H. PECK. 1958. Response of tomato varieties to irrigation and fertility level. New York Agricultural Experimental Station (Geneva) Bulletin 782.

[96] VITTUM, M. T., R. B. ALDERFER, B. E. JANES, C. W. REYNOLDS, AND R. A. STRUCHTEMEYER. 1963. Crop response to irrigation in the Northeast. New York State Agricultural Experiment Station Bulletin 800.

[97] VOUGHT, L. R. AND G. C. MARTEN. 1971. Influence of soil moisture and ambient temperature on yield and quality of alfalfa forage. Agronomy Journal 63(1):40–42.

[98] WELLS, S. A., AND S. DUBETZ. 1966. Reaction of barley varieties to soil water stress. Canadian Journal of plant Science 112:489–494.

[99] WIIDAKAS, W. 1958. Early maturing corn more dependable. North Dakota Farm Research 20 (May-June issue).

[100] WINTER, E. J. 1960. The irrigation of potatoes. Agriculture, London 66:549–551.

[101] WRIGHT, J. R., J. C. LINGLE, W. J. FLOCKER AND S. L. LEONARD. 1962. The effect of irrigation and nitrogen fertilization treatments on the yield maturation and quality of canning tomatoes. American Society of Horticultural Sciences 81:451–457.

CAPITULO 11

EFECTO DEL EXCESO DE AGUA SOBRE LOS CULTIVOS

11.1. Aireación del Suelo.

Los suelos que permanecen bajo condiciones de exceso de agua presentan una aireación deficiente debido a que el agua pasa a ocupar parte de la porosidad vacía. Esta falta de aireación afecta grandemente los rendimientos de los cultivos al reducirse la tasa de difusión de oxígeno, cuyo nivel crítico varía con las especies.

La fase gaseosa del suelo es importante en el rendimiento de los cultivos ya que a través de ella se transporta nitrógeno, oxígeno y anhídrido carbónico.

La composición del aire del suelo, comparado al aire atmosférico es la siguiente:

Componente	Aire del Suelo	Aire Atmosférico
N_2	79,2%	79,0%
O_2	20,55%	20,97%
CO_2	0,25%	0,03%

La composición del aire del suelo puede variar dependiendo del consumo de oxígeno por la planta, la producción de anhídrido carbónico y la velocidad de movimiento de estos gases hacia y desde la atmósfera.

El movimiento de los gases se realiza mediante flujo de masa (convección) o difusión. La difusión de los gases es el mecanismo principal de la aireación del suelo que se debe a un gradiente de concentración, y en forma similar a la ecuación de Darcy, se describe por la ley de Fick. En una dimensión se puede escribir:

$$f = -D \nabla C \quad (\textit{Primera Ley de Fick}) \qquad (11.1)$$

donde f es la densidad de flujo de masa ($ML^{-2}T^{-1}$), D es el coeficiente de difusión (L^2T^{-1}), C es la concentración (ML^{-3}) y ∇ es el operador diferencial.

En suelos se ha encontrado que la difusión de gases queda descrita por la ley de Fick escrita de la siguiente manera:

$$J = \alpha\ P\ D_o\ dC/dX \qquad (11.2)$$

donde P es la porosidad del suelo, α es un factor de tortuosidad. Se ha encontrado que el factor 0,6 es un valor razonable para la tortuosidad en materiales porosos (Currie, 1960). D_o es el coeficiente de difusión del gas a través del aire, el cual es del orden de $1{,}4 \times 10^4\ cm^2\ dia^{-1}$ para la mayoría de los gases (Gardner, 1965).

Para difusión a través del agua del suelo, la primera ley de Fick se puede escribir como:

$$J = -D\ \Theta\ dC/dX \qquad (11.3)$$

donde J es el flujo de la substancia, D es el coeficiente de difusión aparente o efectivo, Θ es el contenido volumetrico de agua, C es la concentración de la substancia y X es la variable espacial.

La primera ley de Fick sólo es válida para difusión en equilibrio dinámico o flujo permanente.

Al igual que Darcy, Fick aplicó la ley a un flujo variable para obtener la variación de la concentración en el suelo de determinado gas en función del tiempo.

$$\partial C/\partial t = -\nabla.f \quad (Ecuación\ de\ Continuidad) \qquad (11.4)$$

Introduciendo la expresión (11.1) en (11.4), se obtiene:

$$\partial C/\partial t = \nabla.(D\nabla C) \qquad (11.5)$$

$$\partial C/\partial t = D\nabla^2 C \qquad (11.6)$$

La relación (11.6) constituye la Segunda ley de Fick donde D se considera constante. La ecuación 11.6 es la ecuación diferencial más general de difusión de un gas en el suelo. Su aplicación para problemas particulares

con determinadas condiciones de frontera puede resultar en una solución del tipo C = c(X,t), es decir, una solución que da la concentración en cualquier tiempo y punto en el espacio considerado. Algunas soluciones y ejemplos numéricos para casos particulares son dados por Reichardt (1975).

En el suelo, los gases pueden ser consumidos o producidos por microorganismos y raíces. Si se toma en cuenta este efecto biológico, la segunda ley de Fick, queda de la siguiente manera:

$$\partial C/\partial t = D\nabla^2 C + \beta \qquad (11.7)$$

donde β es la cantidad de gas producido o consumido.

La solución de la ecuación diferencial (11.7) depende de las condiciones de frontera, condiciones iniciales del sistema y de la medición experimental de la actividad del consumo y producción del gas. Esta es una ecuación diferencial de difícil solución, principalmente por la dificultad de definir $\beta = \beta(X,t)$.

Experimentalmente se ha encontrado que existe una relación entre difusión y porosidad vacía (Penman, 1940; Van Bavel, 1952), la cual se presenta en la Figura 11.1.

Para la mayoría de los suelos se ha encontrado que la pendiente de la Figura 11.1 es de aproximadamente 0,66, y que para valores de Y aproximadamente 10 %, no hay difusividad indicando que los poros del suelo no se encuentran conectados entre si. La expresión para la recta de la Figura 11.1 sería:

$$D/D_o = 0,66(Y - 10) \qquad (11.8)$$

donde D_o es el coeficiente de difusión en la atmósfera libre cuyos valores se pueden obtener en manuales, e Y es la porosidad vacía expresada en porcentaje. En el Capítulo 4 se discute en mayor detalle el concepto de porosidad vacía.

Uno de los aspectos importantes en el crecimiento de las plantas es la disponibilidad de una cantidad adecuada de oxígeno. La difusión de oxígeno hacia la raíz se produce tanto en la fase gaseosa como en la líquida. La difusión en la fase gaseosa, en los poros, es mil a diez mil veces mayor que en el agua.

Con el objeto de visualizar el efecto del exceso de agua sobre la planta, a continuación se discuten los aspectos de mayor relevancia.

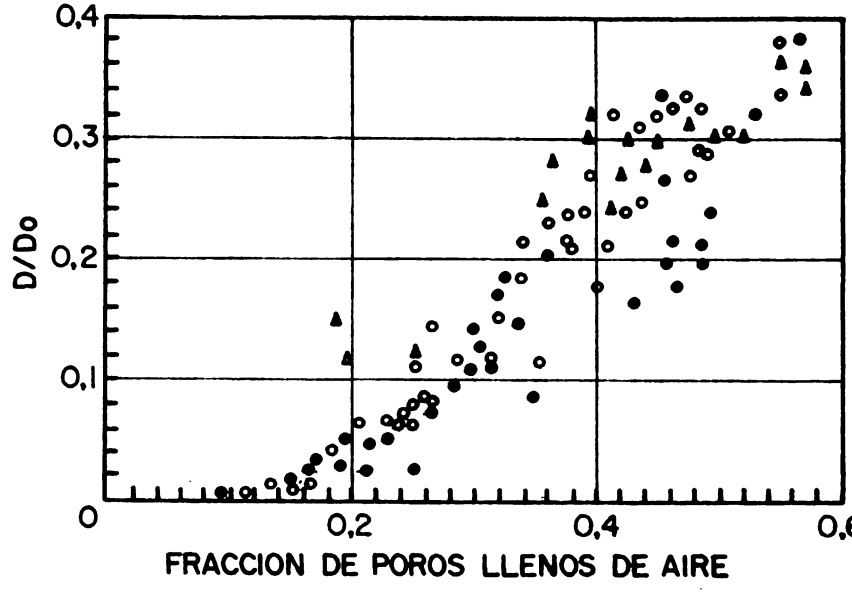


FIGURA 11.1. Relación entre D/D_o y la fracción de poros llenos de aire calculada con datos de Buckingham (1901), Penman (1940), Taylor (1949) y Van Bavel (1952). D_o es el coeficiente de difusión de CO_2 en el aire en reposo. D es el coeficiente de difusión de CO_2 en el suelo.

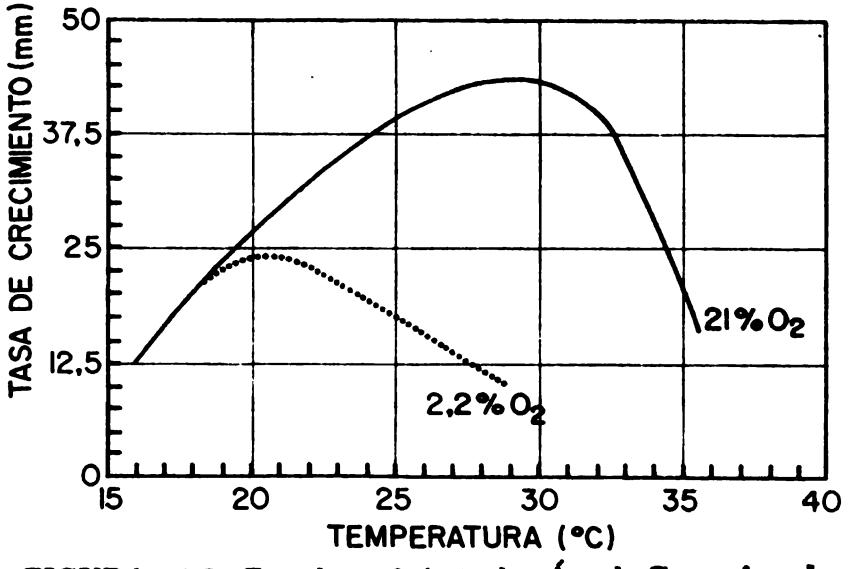


FIGURA 11.2. Tasa de crecimiento de raíces de **Gossypium barbadense** a diferentes temperaturas en condiciones constantes de presión parcial de oxígeno (Cannon, 1952).

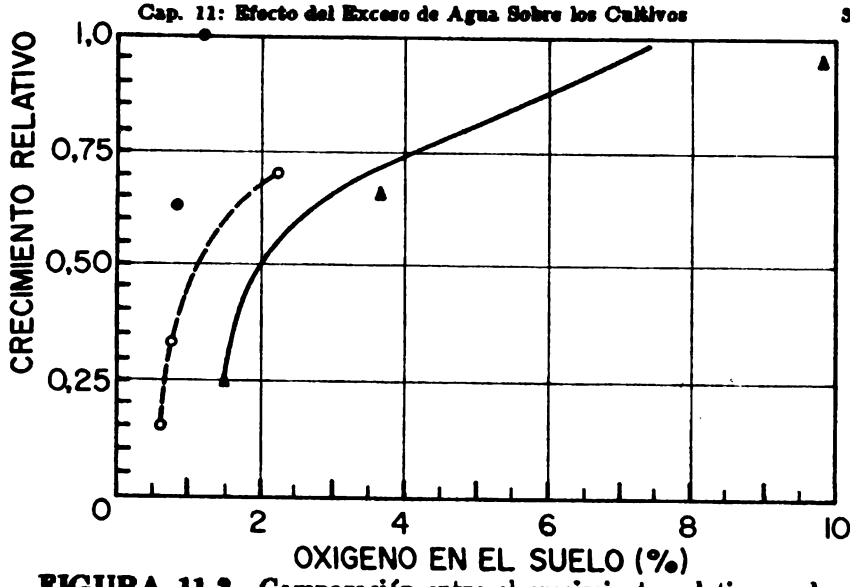


FIGURA 11.3. Comparación entre el crecimiento relativo y el porcentaje de oxígeno en el suelo. El ambiente óptimo tenía 21 % de O_2.

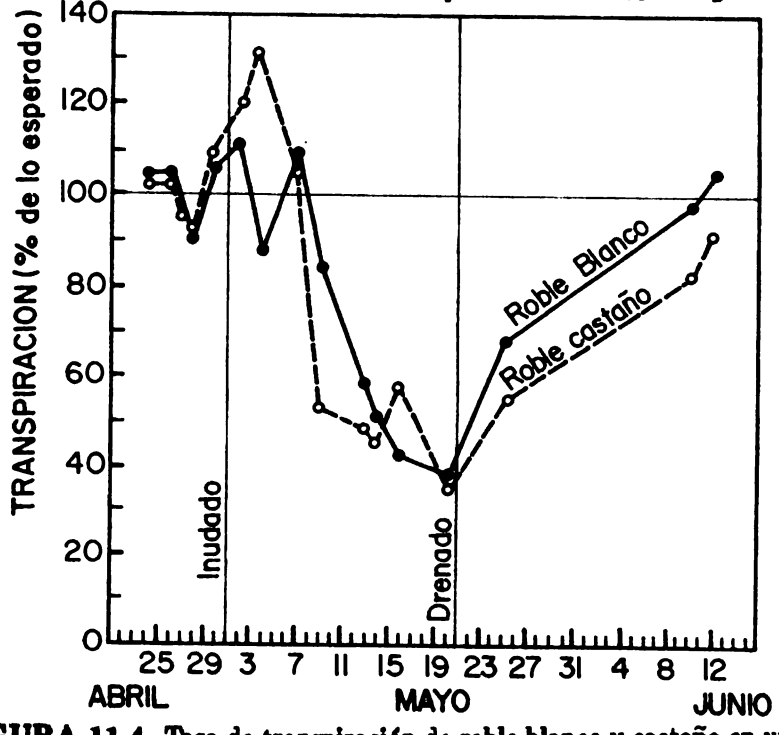


FIGURA 11.4. Tasa de transpiración de roble blanco y castaño en un suelo inundado (Parker, 1950).

11.2. Aireación y Procesos Fisiológicos.

El oxígeno del aire del suelo es importante en el crecimiento de los sistemas radiculares, y su demanda está directamente relaciónada con la temperatura. En la Figura 11.2 se presenta la tasa de crecimiento de un sistema radicular en función de la temperatura para dos concentraciones de oxígeno. Se observa que existe un incremento en el crecimiento con la temperatura del medio, pero la concentración de oxígeno es un factor limitante. Para 2,2 % de oxígeno, la tasa de crecimiento aumenta hasta 20 °C y luego disminuye. Cuando el sistema radicular tiene 21 % de oxígeno la tasa de crecimiento aumenta hasta 30 °C y luego disminuye.

En la Figura 11.3 se presenta una comparación de la tasa de crecimiento en función de la concentración de oxígeno en el aire del suelo, y temperatura constante para diferentes especies vegetales.

De la Figura 11.3 se deduce que los requerimientos de oxígeno varían según la especie. Algunos cultivos como maíz y arvejas requieren una elevada concentración de oxígeno (21 %) para obtener máximo crecimiento, en cambio el arroz sólo muestra una disminución de la tasa de crecimiento cuando la concentración de oxígeno es 0,5 %.

Información de la literatura rusa (Wesseling y Van Wijk, 1967) indica que para producir 1 gramo de materia seca se necesita un mg de oxígeno.

Un índice de aireación bastante empleado es la Tasa de Difusión de Oxígeno (TDO) (Letey y Stolzy, 1964; Birkle et al., 1964; Stolzy y Letey, 1964). Para la mayoría de las plantas, cuando la TDO es menor de 20×10^{-8} g O_2 cm^{-2} min^{-1} se detiene el crecimiento de las raíces. Para obtener un crecimiento óptimo de la planta se requiere una TDO de aproximadamente 40×10^{-8} g O_2 cm^{-2} min^{-1}.

La cebada comienza a detener su crecimiento cuando la TDO es menor de 15×10^{-8} g O_2 cm^{-2} min^{-1}, en cambio la remolacha es muy sensible a la falta de oxígeno y no crece cuando la TDO es menor de 30×10^{-8} g O_2 cm^{-2} min^{-1}.

En el Cuadro 11.1 se resumen las tasas de difusión de oxígeno, críticas y óptimas, que afectan el crecimiento radicular en diferentes cultivos.

En el Cuadro 11.2 se resumen las TDO, críticas y óptimas, que afectan el crecimiento aéreo de diferentes cultivos. Esta información muestra que el oxígeno del suelo tiene un rango de influencia amplio sobre la planta, lo cual depende de la especie y del estado de crecimiento. Para la mayoría de las plantas en estado vegetativo, valores iguales o menores a 40×10^{-8} g O_2 cm^{-2} min^{-1} de TDO son críticos. Para los períodos de floración y fructificación los requerimientos de TDO son mayores (Stolzy y Letey, 1964).

La determinación de la Tasa de Difusión de Oxígeno se realiza con electródos de platino. El equipo que se emplea es presentado en detalle por Lemon y Erickson (1952) y Letey y Stolzy (1964).

CUADRO 11.1. Tasas de difusión de oxígeno (TDO), críticas y óptimas, que afectan el crecimiento radicular en diferentes cultivos.

	TDO x 10^{-8} (g cm^{-2} min^{-1})		
CULTIVO	Crítico	Optimo	Referencia
Maravilla	20	–	Letey et al. (1961)
Algodón	20	–	Letey et al. (1961)
Pasto	20	40	Letey et al. (1964)
Maíz	20–30	40	Bertrand y Kohnke (1957)
Remolacha	20–30	–	Wiersma y Mortland (1953)
Remolacha	30*	–	Erickson y Van Doren (1960)
Cebada	15	–	Letey et al. (1962)

* Provocó 50 % de reducción en los rendimientos

CUADRO 11.2. Efecto de la tasa de difusión de oxígeno sobre el crecimiento aéreo de la planta.

	TDO x 10^{-8} (g cm^{-2} min−1)		
CULTIVO	Crítico	Optimo	Referencia
Maravilla	–	40	Letey et al. (1962)
Cebada	–	40	Letey et al. (1962)
Tomate	30	40	Lemon y Erickson (1952) Erikson y Van Doren (1960)
Arveja	15	70	Cline y Erikson (1959)
Maíz	–	25	
Maíz*	–	–	Van Diest (1962)

* TDO 10 a 20 no causó diferencia

Un déficit de aireación en el suelo produce, entre otros, los siguientes efectos en la planta:

a. Epistasia o curvatura de las plantas
b) Iniciación de raices adventicias
c) Pérdida del geotropismo

d) Abcisión prematura de las estructuras de la reproducción
e) Toxicidad de algunos elementos nutritivos. Las condiciones de exceso de agua en el suelo determinan una disminución del pH y esto provoca que ciertos elementos del suelo lleguen a estar disponibles para la planta, incluso pudiendo alcanzar niveles tóxicos. Entre otros, se produce una mineralización de Fe, Co, Mn, Cu, Zn, S (Grable, 1966).

En la Figura 11.4 se muestra el efecto del exceso de agua sobre la tasa de transpiración (Parker, 1950).

Después de la inundación de un cultivo se produce una rápida reducción de la tasa de transpiración. En algunos casos se han presentado ciertas manifestaciones de recuperación de la tasa de transpiración durante la inundación lo que se ha relacionado con el desarrollo de raíces adventicias (Kramer, 1951; Parker, 1950).

La tasa de fotosíntesis es afectada por el exceso de agua en el suelo de la misma forma que la transpiración. En algunos casos se ha encontrado que el efecto del exceso de agua es mayor que en el caso de la transpiración. (Van't Woudt y Hagan, 1967).

11.3. Exceso de Agua y Rendimiento de los Cultivos.

En las secciones anteriores se vió el efecto nocivo que un exceso de agua produce sobre algunos procesos fisiológicos de la planta, lo cual incide también en los rendimientos.

Un exceso de agua predispone al suelo a permanecer con napas freáticas cerca de la superficie, lo cual limita el desarrollo normal de los sistemas radiculares de los cultivos. Por lo tanto, con el fin de disponer de un medio adecuado para el cultivo se introducen técnicas de drenaje con el objetivo de rebajar la napa freática, mejorando así las condiciones de aireación del suelo, lo que permite aumentar los rendimentos y mejorar la calidad de los productos.

En el Cuadro 11.3 se presentan los rendimientos de algunos cultivos bajo diferentes condiciones de profundidad de la napa freática. Se observa que el rendimiento de los cultivos aumenta a medida que la napa freática se mantiene a mayor profundidad.

En el Capítulo 6 se discutió el aporte de agua desde las napas freáticas al sistema radicular, lo cual podría ser manejable con fines de abastecer de agua a los cultivos por riego subsuperficial. Anteriormente, se destacó, que la situación ideal sería abastecer de agua al cultivo, controlando la napa freática, para aportar una cantidad igual a la utilizada en evapotranspiración.

CUADRO 11.3. Rendimiento de algunos cultivos bajo diferentes condiciones de profundidad de la napa freática (Van't Woudt y Hagan, 1967).

Rendimiento de granos (kg/área)

CULTIVO	Profundidad napa freática (cm)				
	40	60	90	120	150
Cebada	27.2	28.9	31.4	27.0	26.9
Trigo invierno	21.5	21.3	24.5	29.3	24.8
Trigo verano	33.8	41.9	43.7	43.7	42.6
Avena	24	33.7	40.0	48.1	45.6
Remolacha	723	796	847	862	859
Cebada invierno	28.5	38.0	39.0	43.3	43.0
Cebada verano	33.2	39.5	42.1	43.0	43.4
Porotos	7.7	17.5	19.2	19.2	19.4
Papas	232	259	245	239	247

CUADRO 11.4. Reducción en el rendimiento de algunos cultivos cuando sometidos a inundación durante 3, 7, 11 y 15 días (Rojas, 1972).

	Número de días de inundación			
CULTIVO	3	7	11	15
	Reducción del Rendimiento (%)			
Forrajeras perennes	10	25	55	85
Pastos	0	14	26	42
Papas	42	84	100	100
Girasol (maravilla)	10	28	50	72
Cañamo	15	40	61	88
Cereales	14	36	60	90
Maíz	13	57	85	100
Remolacha	10	44	91	100

Un antecedente complementario para fines de decisión sería el conocimiento del efecto de la profundidad de la napa freática sobre los rendimientos relativos. En la Figura 11.5 se muestra este tipo de gráfico para el caso de pastos. Se observa que el rendimiento optimo, se obtiene con la napa freática a 60 cm de profundidad. Cuando la napa freática estaba a menos de 60 cm de profundidad se producía una marcada reducción en el rendimiento relativo, y en este rango de profundidad de la napa freática, se debería a deficiencia de aireación o exceso de agua. Cuando la napa freática se encontraba a una profundidad mayor de 60 cm también se reducía el rendimiento relativo. En este último caso, se debería a déficit de agua porque al alejarse la napa freática del sistema radicular, el aporte por alza capilar es menor.

En la Figura 11.6 se presenta el mismo tipo de gráfico para varios cul-

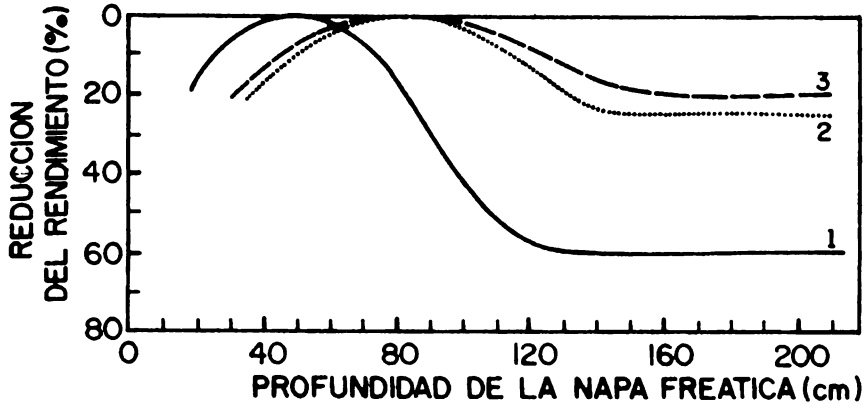


FIGURA 11.5. Disminución del rendimiento de pasto en relación con la profundidad de la napa freática en diferentes suelos: 1) Arenoso; 2) Franco; 3) Arcilloso (Van't Woudt y Hagan, 1967).

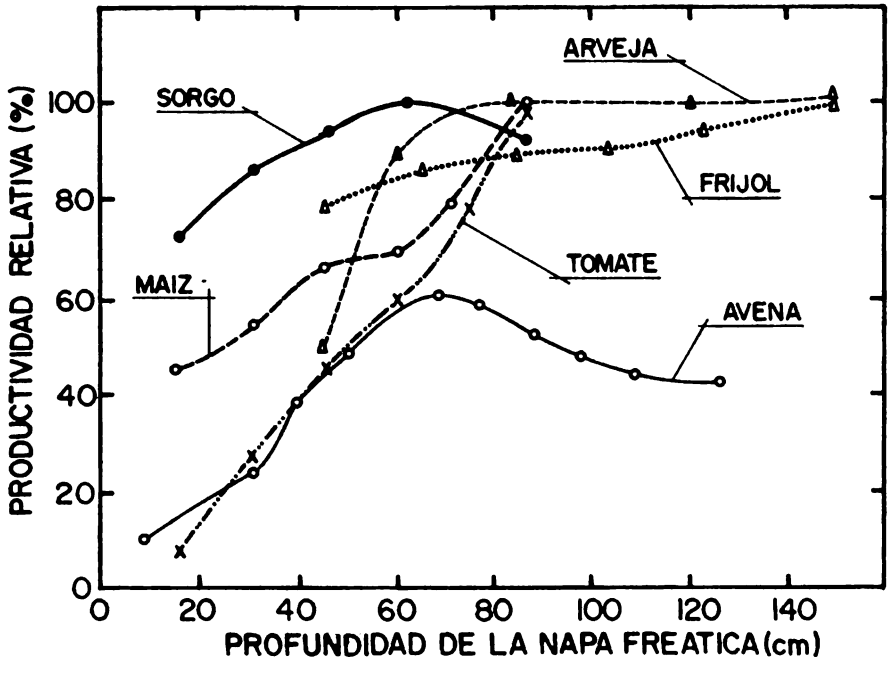


FIGURA 11.6. Efecto de la profundidad de la napa freática sobre el rendimiento de varios cultivos.

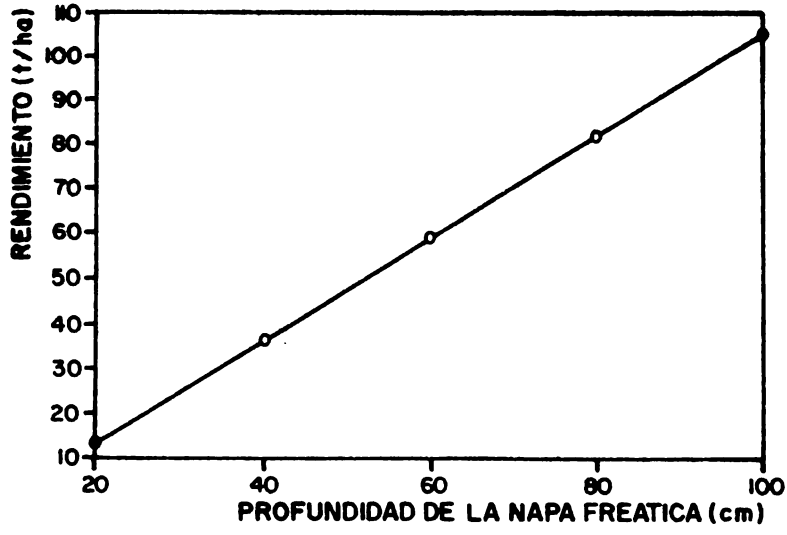


FIGURA 11.7. Efecto de la profundidad de la napa freática sobre el rendimiento de la caña de azúcar.

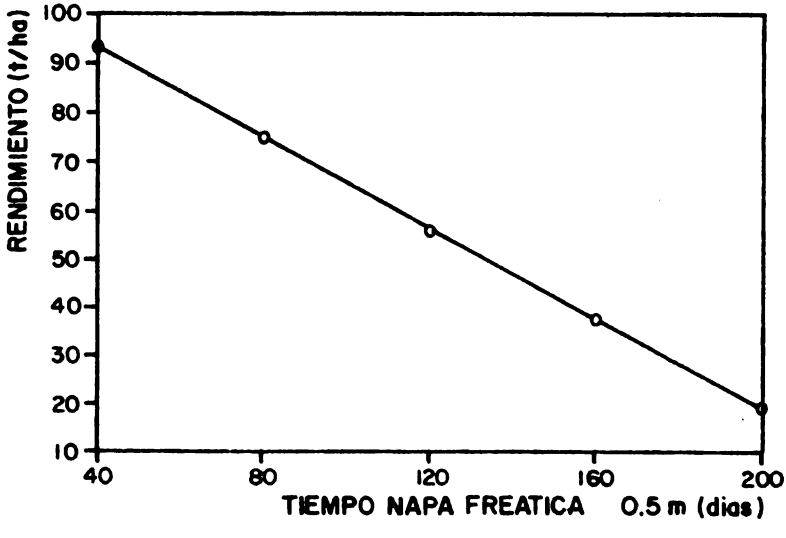


FIGURA 11.8. Efecto del tiempo de saturación del perfil del suelo sobre el rendimiento de la caña de azúcar.

tivos. En el caso de la avena, el rendimiento mayor se obtuvo cuando la napa freática se encontraba a 70 cm de profundidad, disminuyendo para mayores y menores profundidades. Esta situación vendría a representar el caso de flujo permanente en que la tasa de ascenso capilar es igual a la evapotranspiración del cultivo.

Otra situación de importancia agronômica y de ingeniería es el proceso de inundación de un cultivo. La magnitud de los daños provocados por la inundación sobre el rendimiento de los cultivos está directamente relacionado con la duración de la inundación. Los cultivos presentan diferentes grados de tolerancia al exceso de agua, siendo específico para cada planta. Por ejemplo, las hortalizas sólo resisten al exceso de agua por pocas horas; los cereales y otros cultivos de ciclo corto pueden permitir inundación de 24 horas; los pastos permiten una condición de inundación de tres o más días y el arroz prefiere una lámina de agua constante.

Cada cultivo tiene un límite de tolerancia presentando una disminución en los rendimientos cada vez que se pasa de este límite.

En el caso de la caña de azúcar el efecto de la profundidad de la napa freática sobre el rendimiento es muy marcado como lo muestra la Figura 11.7. Este cultivo requiere de al menos un perfil de suelo de 1 m de profundidad con buena aireación para producir en un nivel adecuado.

La reducción del rendimiento de los cultivos no sólo depende de la profundidad de la napa freática sino también del tiempo en que el cultivo permanece con su sistema radicular parcial o totalmente inundado. En la Figura 11.8 se muestra como varía el rendimiento de caña de azúcar con el tiempo en que la napa freática permanece a menos de 0,5 m de profundidad.

En el Cuadro 11.4 se muestra el daño producido por la inundación prolongada en varios cultivos. El cultivo más sensible a la inundación es la papa, en el cual se produce 42 % de pérdidas cuando sometida a tres días de inundación. Si esto sucede durante el período de formación de los tubérculos, el daño es mayor. Otros cultivos sensibles a la inundación son el maíz y la remolacha. En la Figura 11.9 se presenta el daño producido en maíz y tabaco con diferentes condiciones de aireación y concentración de CO_2. Se observa que el daño es mayor y en menor tiempo cuando el maíz está en presencia de una elevada concentración de CO_2 en el medio radicular.

La Figura 11.9 muestra que el tabaco es un cultivo más sensible que el maíz a la inundación; con doce horas de inundación se produce un daño de 50 % en la producción.

En la mayoría de los cultivos esta respuesta es función del período fenológico. Al igual que en el caso del efecto del déficit de agua (Capítulo

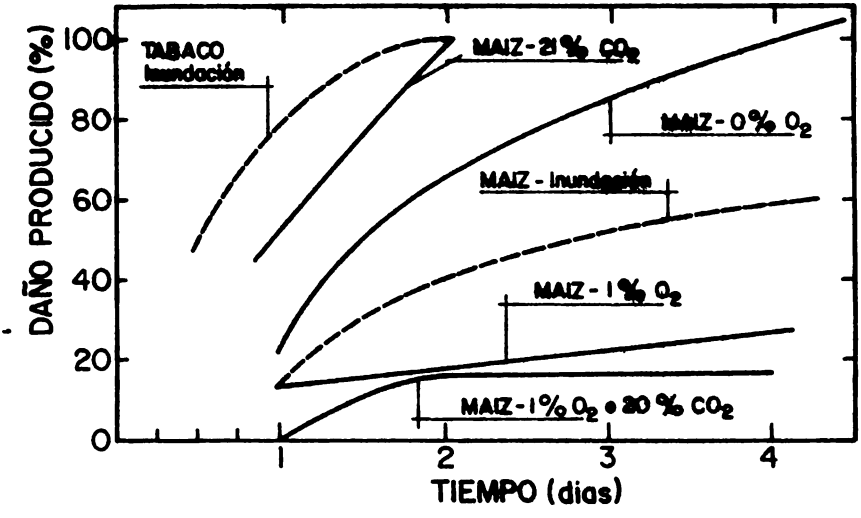


FIGURA 11.9. Daño producido por efecto de la inundación y concentración de O_2 y CO_2 en maíz y tabaco (Williamson y Kriz, 1970).

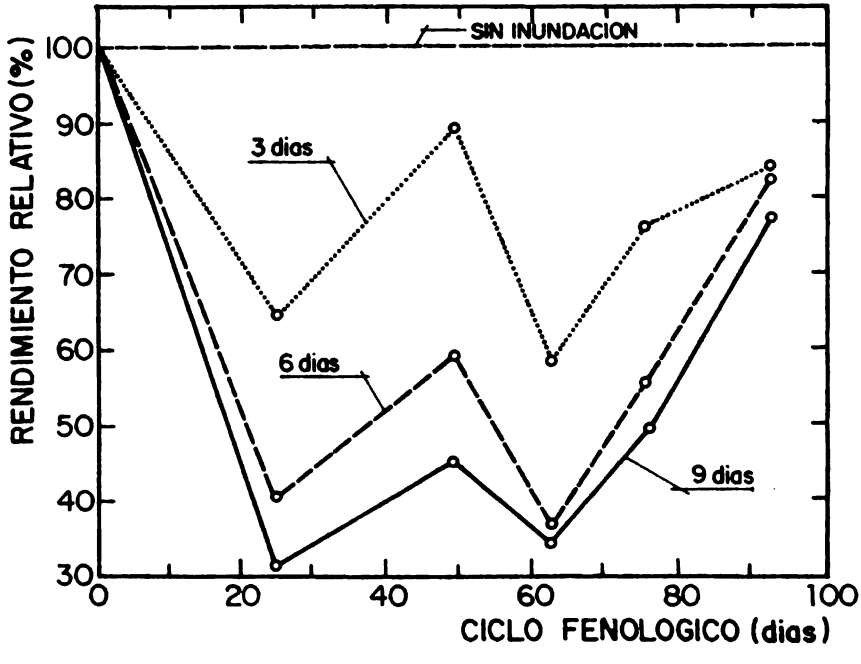


FIGURA 11.10. Efecto de la inundación fenológica sobre el rendimiento del maíz (Basada en datos de Cruciani, 1985).

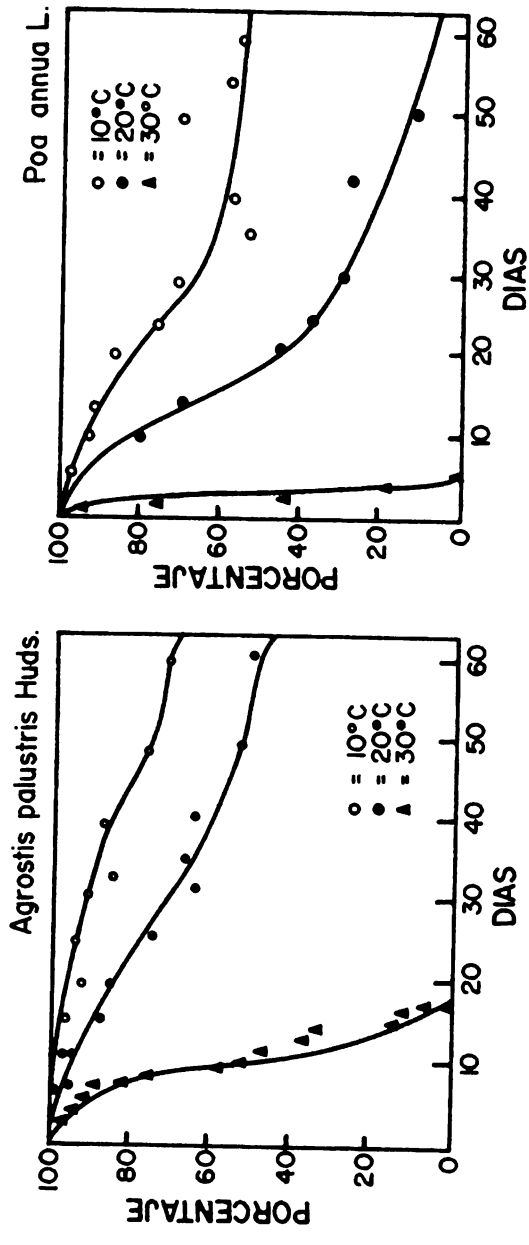


FIGURA 11.11. Porcentaje de sobrevivencia de **Agrostis palustris Huds** y **Poa annua L.** cuando inundadas con agua de 10, 20 y 30 °C de temperatura (Beard y Martin, 1970).

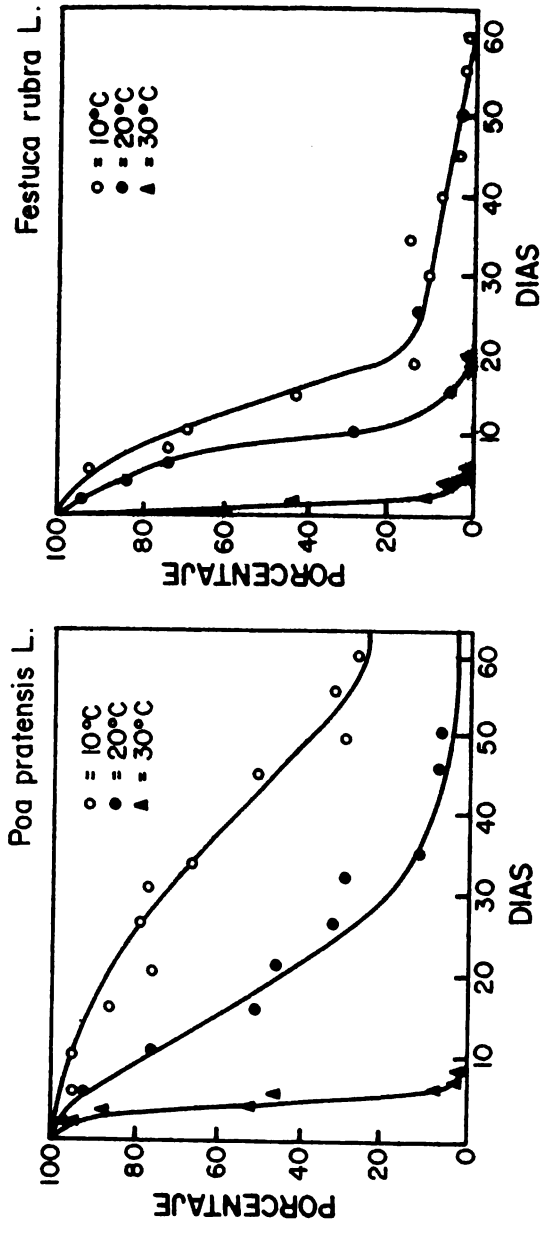


FIGURA 11.12. Porcentaje de sobrevivencia de **Poa pratensis L.** y **Festuca rubra L.** cuando inundadas con agua de 10, 20 y 30 °C de temperatura (Beard y martin).

10), cuando se tiene información de la respuesta del cultivo a la inundación fenológica se pueden parametrizar los datos y mostrar gráficamente el efecto en los diferentes períodos del ciclo vegetativo. En la Figura 11.10 se muestra la respuesta fenológica del maíz a diferentes períodos de inundación.

Los cultivos más tolerantes al exceso de agua son las especies forrageras, especialmente los pastos. En el Cuadro 11.5 se presenta una relación de especies de forrajeras clasificadas en función de la tolerancia a la inundación. Algunas especies de pastos pueden soportar hasta 20 días o más de inundación. Esto queda demostrado con la información de Beard y Martin (1970), incluida en las Figuras 11.11 y 11.12. En este trabajo, algunas especies en condiciones de baja temperatura, soportan hasta 40 días sin que se produzcan daños significativos.

A medida que aumenta la temperatura, la sobrevivencia disminuye. Por otra parte, el daño producido es mayor cuando el agua permanece estancada.

CUADRO 11.5. Tolerancia a la inundación de diferentes especies forrajeras (Rhodes, 1967).

Tolerancia	Especies
Muy alta (más de 20 días)	Cynodon dactylon Buchloe dactyloides Panicum obtusum Paspalum districhum
Alta (hasta 20 días)	Panicum virgatum var. Phalaris arundinacea Spartina pectinata Paspalum floridanum
Moderada a alta (hasta 15 días)	Andropagon gerardi Andropagon hallu Elymus virginieus Panicum anceps
Baja	Tripsacum dactyloides Sporobulus airoides Andropogon ischaemum var. Eragrostis curvula

11.4. Referencias Bibliográficas.

[1] BEARD, J. B. AND D. O. MARTIN. 1970. Influence of water temperature on submersion tolerance of four grasses. Agronomy Journal 62:257.

[2] BERTRAND, A.R. AND H. KOHNKE. 1957. Subsoil conditions and their effects and oxygen supply and the growth of corn roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21(2):135–140

[3] BIRKLE, D.E., J. LETEY, L.H. STOLZY AND T.E. SZUSZKIEWICZ. 1964. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum electrode. II. Factors influencing the measurement. Hilgardia 35(20):555–566.

[4] BUCKINGHAM, E. 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. USDA Bureau of Soils. (Bulletin 25).

[5] CANON, W.A. 1925. Physiological features of root with special reference to the relation of roots to aeration of soil. Carnegie Institute, Washington. (Publication 368).

[6] CLINE, R.A. AND A.E. ERICKSON. 1959. The effect of oxygen diffusion rate and applied fertilizer on growth, yield and chemical composition of peas. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 23(5):333–335.

[7] CRUCIANI, DECIO E. 1985. Caracterizacão agronômica do coeficiente de drenagem para elaboracão de projetos com cultura de milho (Zea mays, L). Irrigacão e Tecnologia Moderna (Brasil) 22:28–31.

[8] CURRIE, J.A. 1960. Gaseous diffusion in porous media: 2. Dry granular materials. British Journal of Applied Physics 11:318–324.

[9] ERICKSON, A. E. AND D. M. VAN DOREN. 1960. The relation of plant growth and yield to soil oxygen availability. 7th International Congress of Soil Science III:428–434.

[10] GARDNER, W. R. 1965. Movement of nitrogen in soils. In: W. V. Bartholomev and F. E. Clark, Soil nitrogen. Agronomy Series 10:550–572.

[11] GRABLE, A. R. 1966. Soil aireation and plant growth. Advances in Agronomy 18:57–106.

[12] KRAMER, P. J. 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. Plant Physiology 26:722–736.

[13] LEMON, E. R. AND A. E. ERICKSON. 1952. The measurement of oxygen diffusion in the soil with platinum microelectrode. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16(2):160–163.

[14] LETEY, J. AND L. H. STOLZY. 1964. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. I. Theory and equipment. Hilgardia 35(20):545–554.

[15] LETEY, J., L. H. STOLZY, G. B. BLANK AND O. R. LUNT. 1961. Effect of temperature on oxygen diffusion rates and subsequent shoot growth, root growth, and mineral content of two plant species. Soil Science 92(5):314–321.

[16] LETEY, J., O. R. LUNT, L. H. STOLZY AND T. E. SZUSZKIEWIZ. 1961. Plant growth, water use and nutritional response to rizosphere differentials of oxygen concentration. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25(3):183–186.

[17] LETEY, J., L. H. STOLZY, N. VALORAS AND T. E. SZUSZKIEWIK. 1962. Influence of soil oxigen on growth and mineral concentration of barley. Agronomy Journal 54(6)538–540.

[18] PARKER, J. 1950. The effect of flooding on the respiration and survival of some south eastern forest tree species. Plant Physiology 24:435–460.

[19] PENMAN, H. L. 1940. Gas and vapor movement in the soil. I. Journal Agricultural Science 30:437–462.

[20] REICHARDT, KLAUS. 1975. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo, Fundac ao Cargill, 286 p.

[21] RHOADES, E. D. 1967. Grass survival in flood pool areas. Journal of Soil Conservation, Jan–Feb issue.

[22] ROJAS, R. 1972. Drenaje superficial. Mérida, Venezuela, CIDIAT, 63 p. (Documento de enseñanza).

[23] STOLZY, L. H. AND J. LETEY. 1964. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. III. Correlation of plant response to soil oxygen diffusion rates. Hilgardia 35(20):567–576.

[24] TAYLOR, S. A. 1949. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aireation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14:55–61.

[25] VAN BAVEL, C. H. M. 1952. Gaseous diffusion and porosity in porous media. Soil Sci. 73:91–96.

[26] VAN DIEST, A. 1962. Effect of soil aeration and compaction upon yield, nutrient takeup, and variability in a greenhouse fertility experiment. Agronomy Journal 54(6):515–518.

[27] VAN'T WOUDT, B. D. AND R. M. HAGAN. 1967. Respuesta de los cultivos a niveles excesivamente elevados de humedad del suelo. In: J.

N. Luthin, Drenaje de tierras agrícolas, Mexico, Editorial Limusa Wiley, S. A. pp. 571–649.

[28] WESSELING, J. AND W. R. VAN WIJK. 1967. Condiciones físicas del suelo en relación con la profundidad de los drenes. In: J. N. Luthin, Drenaje de tierras agrícolas, Mexico, Editorial Limusa Wiley, S.A. pp. 511–560.

[29] WIERSMA, D. AND M. M. MORTLAND. 1953. Response of sugar beets to peroxide fertilization and its relationship to oxigen diffusion. Soil Science 75(5):355–360.

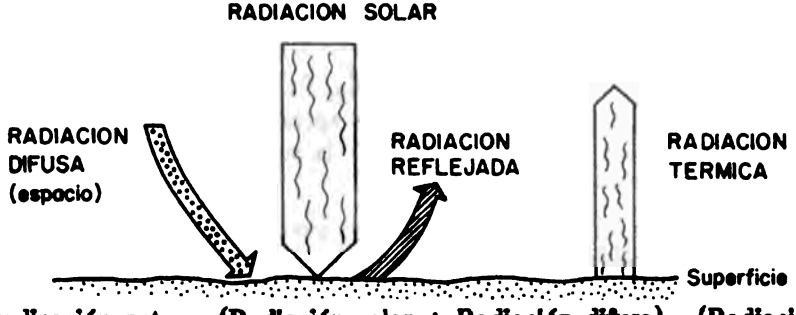
[30] WILLIAMSON, R. E. AND G. J. KRIZ. 1970. Response of agricultural crops to flooding, depth of water table and soil gaseous composition. Amer. Soc. Agric. Eng. Trans. 13:216–220.

CAPITULO 12

EVAPORACION DESDE SUPERFICIES

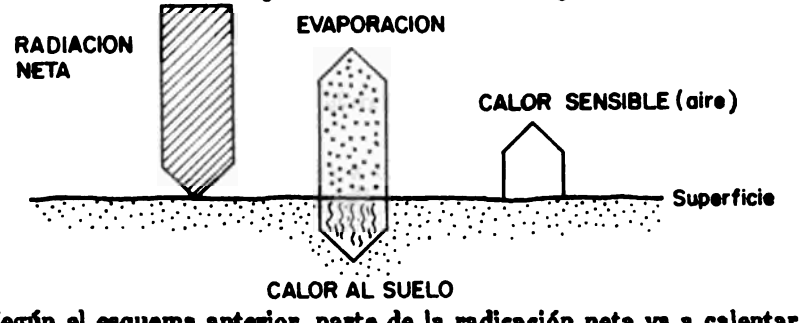
La evaporación desde una superficie vegetal o suelo es causada solamente por la energía. Para evaporar un gramo de agua se necesitan aproximadamente 600 calorías.

La energía disponible para evaporar proviene principalmente de la energía solar. La diferencia entre la energía recibida por la superficie y la emitida se llama Radiación Neta y es la energía disponible para evaporar.



Radicación neta = (Radiación solar + Radiación difusa) - (Radiación reflejada + Radiación térmica)

La distribución de energía durante el día es la siguiente:

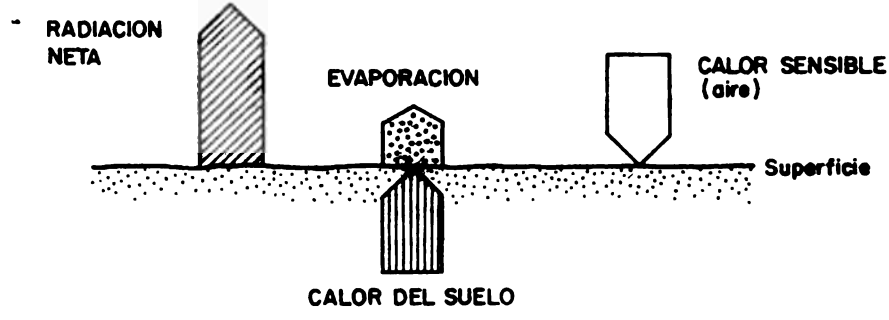


Según el esquema anterior, parte de la radicación neta va a calentar el

aire (calor sensible), otra pequeña parte va a calentar el suelo y vegetación, y el resto de la energía es utilizada para evaporar.

A medida que el suelo pierde humedad disminuye la disponibilidad de agua y por lo tanto menor cantidad de radicación neta se utiliza en evaporación. Por consiguiente la temperatura aumenta y hay una mayor transferencia de calor desde la superficie caliente al aire circundante (Tanner, 1957).

La distribución de energía durante el período nocturno es la siguiente:



Durante la noche la superficie se enfría. La evaporación continúa durante la noche, y para superficie cultivadas es aproximadamente 5 a 10 % de los valores diurnos. La radiación que sale de la superficie es alrededor de 10 % de la radiación neta diurna.

En la noche, el calor disponible para evaporación y radiación proviene del suelo, de la vegetación y del aire. En un período de 24 horas, el calor perdido por el suelo durante la noche es aproximadamente igual al que gana durante el período diurno.

El general, para que se produzca evaporación desde una superficie, suelo o planta, se requieren tres requisitos básicos:

-Agua disponible
-Energía suficiente
-Gradiente de presión de vapor entre la superficie evaporante y el medio circundante.

12.1. Factores que Afectan la Tasa de Evaporación.

La tasa de evaporación depende de la naturaleza de la superficie evaporante y de ciertos factores meteorológicos que limitan la cantidad de energía disponible para evaporar. En atención a lo anterior, se puede hacer la siguiente división:

12.1.1. Factores que Afectan el Abastecimiento de Agua a la Superficie Evaporante

a) Planta

-Disponibilidad de agua en la superficie radicular
-Extensión del sistema radicular
-Resistencia al flujo a través de la planta
-Sensibilidad hídrica (resistencia a la sequía)
-Control estomático

b) Suelo

-Textura (retención de humedad)
-Contenido de humedad
-Características transmisoras de agua (conductividad capilar y difusividad).
-Características de la superficie (color, rugosidad, etc.)

12.1.2. Factores que Limitan el Abastecimiento de Energía

a) Mesoescala

-Latitud
-Estación del año
-Hora del día
-Nubosidad

b) Microescala

-Viento (presencia de turbulencia o "eddies")
-Densidad de plantas
-Estructura del cultivo.

12.2. Evaporación desde Suelos Desnudos.

La tasa de evaporación de un suelo bien húmedo es aproximadamente igual a la tasa de evaporación de una superficie libre de agua (Penman, 1948).

Cuando la superficie del suelo no está limitada por agua, la tasa de evaporación depende exclusivamente de la cantidad de energía disponible. A medida que la superficie se seca, menor cantidad de energía neta va a evaporación, la superficie aumenta su temperatura y calor se tranfiere al aire

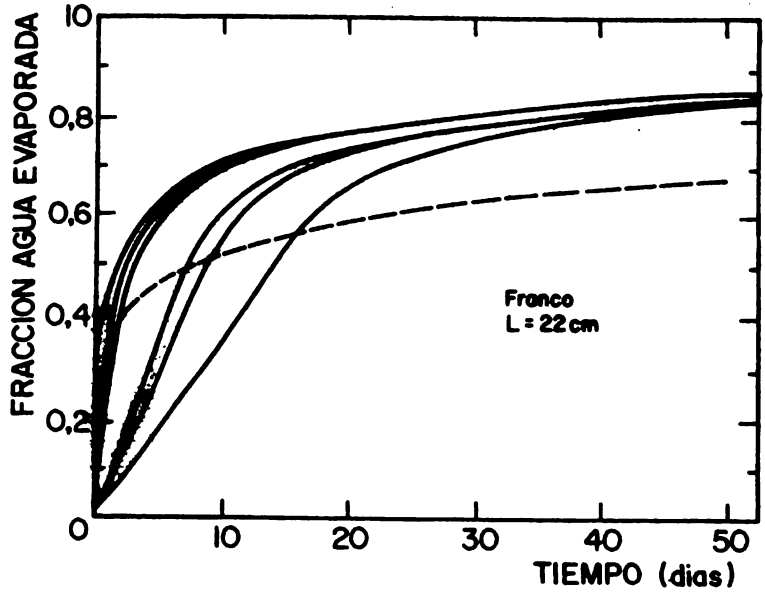


FIGURA 12.1 Fracción acumulada del agua evaporada en función del tiempo para 5 columnas de suelo franco de 22 cm de largo (Gardner y Hillel, 1962).

aumentando la temperatura del aire. En este instante la tasa de evaporación es limitada por la disponibilidad de agua y no por la energía.

De lo anterior se desprende que el proceso de evaporación en un suelo está caracterizado por dos fases: En la primera, la tasa de evaporación depende sólo de las condiciones evaporantes de la atmósfera. Durante la segunda fase, la tasa de evaporación disminuye con el tiempo y con el contenido de agua del suelo. En la Figura 12.1 se presentan resultados experimentales que dan soporte a la aseveración anterior (Gardner y Hillel, 1962).

Si el suelo, bajo la superficie está húmedo puede abastecer de agua a la superficie evaporante, pero el transporte de agua por movimiento capilar es lento.

También existe movimiento de vapor de agua hacia la superficie el que es causado por gradientes de temperatura y presión de vapor (Philip y De Vries, 1957; Rose, 1968). Debido a que la temperatura del suelo está continuamente cambiando, hay un transporte de agua en el suelo asociado con la onda diaria de temperatura. Esta situación ha sido extensamente analizada por Rose (1968), para un ciclo completo de evaporación. Los datos de perfiles

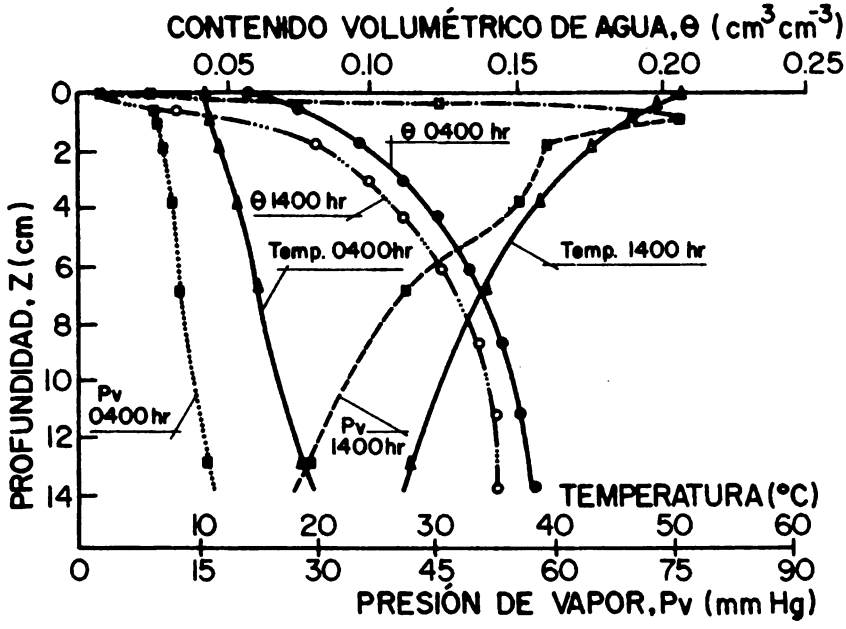


FIGURA 12.2. Perfiles de contenido de agua, temperatura y presión de vapor en la noche (4:00 horas) y en el día (14:00 horas) del día 4 (Rose, 1968).

de temperatura, humedad y presión de vapor del suelo para el cuarto día del ciclo, se presentan en la Figura 12.2. Los perfiles de humedad indican un movimiento de agua hacia arriba durante la noche y día. Los perfiles de presión de vapor indican una reversión en la dirección del flujo de vapor, predominante hacia abajo durante el día, y hacia arriba durante la noche. Se encontró que la concurrencia de flujos de agua y de vapor hacia arriba durante la noche, recargaban de agua la capa superficial

La textura del suelo, configuración de la superficie, discontinuidades de perfil controlan la retención de agua por el suelo (Parr y Bertrand, 1960). En general, suelos de textura gruesa retienen menor cantidad de agua a cualquier potencial matricial que los suelos de textura fina. El menor contenido de agua de los suelos de textura gruesa da como resultado un menor abastecimiento de agua cerca de las superficies de absorción para transporte a los lugares de evaporación, que los suelos de textura fina. Bajo condiciones sostenidas de demanda evaporativa, las capas superficiales de los suelos de textura gruesa presentan una rápida reducción en la difusividad, que los suelos de textura fina.

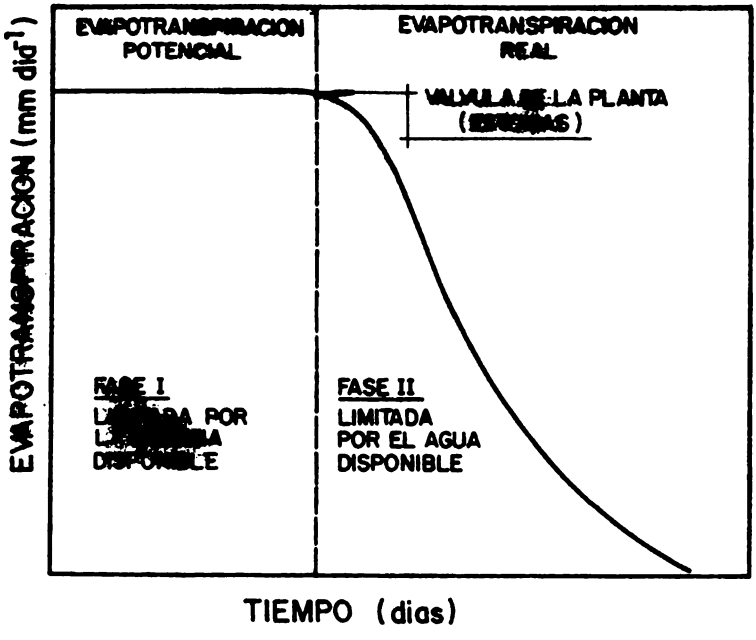


FIGURA 12.3. Esquema de la evapotranspiración de un cultivo en función del tiempo después de la aplicación de un riego.

El color, inclinación, rugosidad y residuos vegetales, alteran la absorción de energía por la superficie del suelo. Los suelos de color claro reflejan un alto porcentual de la radiación incidente, que los suelos de colores oscuros (Monteith y Szeicz, 1962).

El aspecto y grado de la pendiente altera la absorción de energía por unidad de área, debido al ángulo de la radiación incidente.

12.3. Evapotranspiración.

El término evapotranspiración se refiere a la suma de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta.

En la Figura 12.3 se presenta un esquema que muestra la evapotranspiración de un cultivo en función del tiempo después de la aplicación de un riego. En este gráfico se denotan las dos fases del proceso de evaporación, descritas anteriormente.

El cultivo, inmediatamente después de un riego, está en condiciones de evaporar tanta agua como sea posible dependiendo de la cantidad de energía

disponible (Fase I). En este caso se obtiene un valor de evapotranspiración potencial.

Cuando el agua en el suelo disminuye a un nivel dado, se desencadena el proceso que determina el cierre de los estomas, detalladamente descrito en el Capítulo 8. A partir de este instante, el proceso de evapotranspiración esta limitado por el abastecimiento de agua (Fase II) y los valores obtenidos corresponden a evapotranspiración real o actual.

Evapotranspiración Potencial (ETp)

Se define ETp como la cantidad de agua evaporada en una unidad de tiempo por un cultivo verde, corto y de altura uniforme que cubre completamente el suelo y nunca carente de agua.

Requisitos de la definición:

Cultivo:

-Verde
-Corto
-Altura uniforme
-Cubre completamente el suelo (no hay suelo descubierto)

Suelo : -Agua abundante (sin limitar el abastecimiento a la planta)

Unica limitante: Disponibilidad de energía

Pruitt (1960) postula el término de "Maxima evapotranspiración potencial" para describir la situación cuando hay presencia del "efecto de oasis", es decir presencia de energía advectiva.

Evapotranspiración real o uso consuntivo

Se define como la cantidad de agua evaporada por un cultivo en condiciones de campo.

Limitante:

a) energía disponible
b) Nivel de humedad del suelo
c) Características del cultivo

12.3.1 Factores que Afectan la Evapotranspiración

a. Disponibilidad de Agua en el Suelo

En la Figura 12.4 se resumen la diferentes opiniones acerca del efecto de la disponibilidad de agua sobre la evapotranspiración. Thornthwaite y

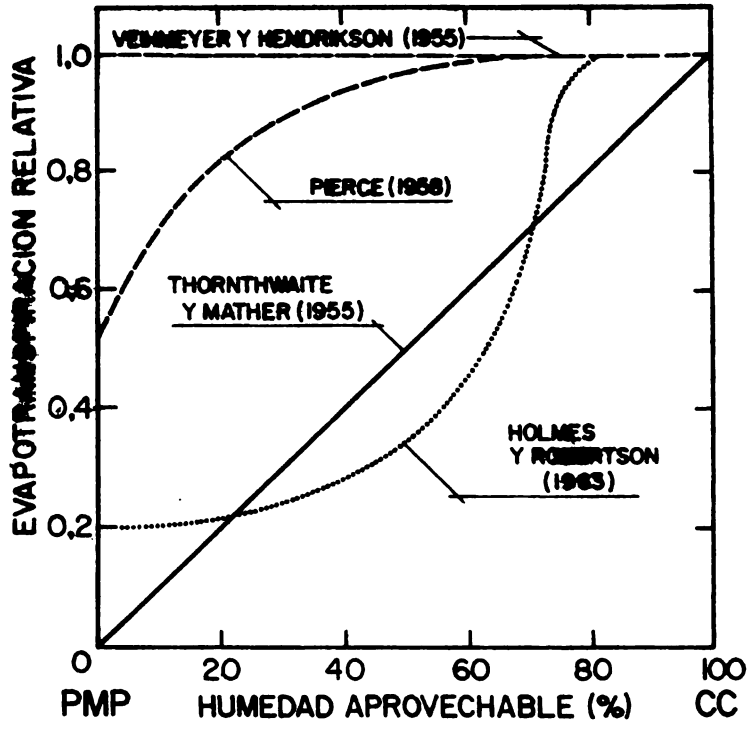


FIGURA 12.4. Evapotranspiración relativa en función de la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas.

Mather (1955) supusieron que la disponibilidad del agua aumentaba linealmente desde el punto de marchitez permanente (PMP) al nivel de capacidad de campo (CC). Pierce (1959) presentó una curva convexa para esta relación, en cambio, Holmes y Robertson (1963) encontraron una curva cóncava. El caso extremo fue aquel postulado por Veihmeyer y Hendrickson (1955) quienes concluyeron que la evapotranspiración ocurría a una tasa potencial a través de todo el rango entre CC y PMP.

Las diferentes curvas de la Figura 12.4 fueron parcialmente explicadas por Denmead y Shaw (1962), encontrando que la relación variaba con diferentes condiciones de evapotranspiración potencial. Así, la curva de Veihmeyer y Hendrickson era aplicable para una baja demanda evaporativa de la atmósfera, la curva de Thornthwaite era aplicable cuando la evapotranspiración potencial era alta, y la curva de Pierce corresponde a una demanda evaporativa promedio o variable. Eagleman y Decker (1965) sugieren que

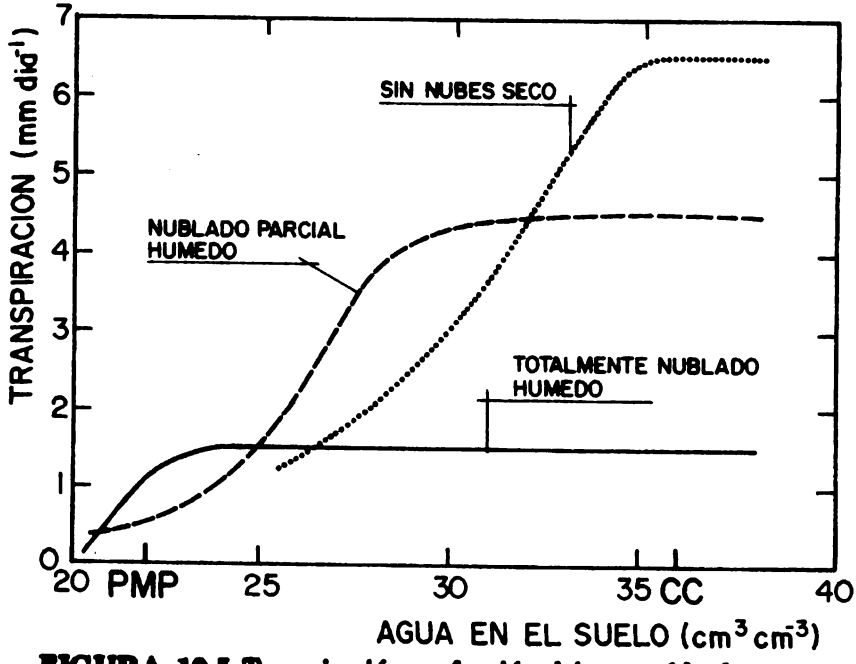


FIGURA 12.5. Transpiración en función del contenido de agua en el suelo y la demanda atmosférica (Denmead y Shaw, 1962).

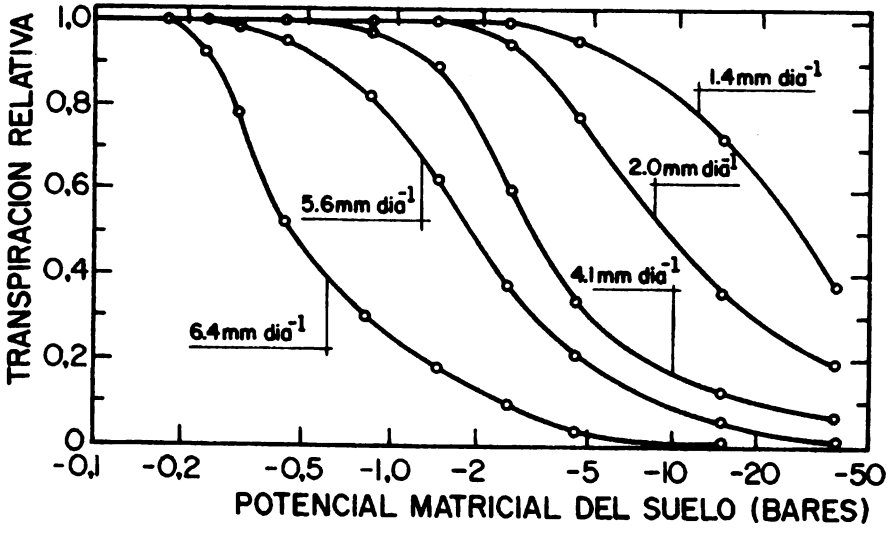


FIGURA 12.6. Transpiración relativa de maíz en función del potencial matricial del suelo para diferentes demandas evaporativas (Denmead y Shaw, 1962).

otra razón podrían ser los diferentes contenidos de humedad al cual la evapotranspiración era influenciada por la conductividad capilar en los diferentes grupos texturales de suelos.

Los resultados de Denmead y Shaw (1962) claramente indican el efecto de la demanda evaporativa (Figura 12.5 y 12.6). En la Figura 12.5 se muestra el efecto de tres condiciones, día sin nubes seco, nublado parcial húmedo, y totalmente nublado húmedo. Se observa que en el caso de los días de menor demanda evaporativa la transpiración se mantiene a su nivel potencial en mayor rango del contenido de agua a través de todo el rango de humedad aprovechable.

En la Figura 12.6 se muestra la transpiración relativa en función del potencial matricial del suelo para diferentes demandas evaporativas. Se observa que a medida que disminuye la demanda evaporativa, el nivel potencial de transpiración se mantuvo a través de un rango mayor de potencial matricial.

Bajo condiciones de baja demanda evaporativa, es posible mantener el abastecimiento de agua del suelo al mismo nivel de la demanda. Es decir, el movimiento de agua es lo suficientemente rápido para reabastecer las zonas de absorción de agua del sistema radicular. Esto no ocurre cuando la demanda es muy alta de tal manera que la válvula de control de la transpiracción, los estomas, funcionan a mayores potenciales matriciales determinando una disminución temprana en la tasa de transpiración.

En resumen, la evapotranspiración de las plantas depende de la disponibilidad de agua del suelo, y el rango de humedad del suelo en el cual se mantiene a un valor potencial, depende de la demanda evaporativa impuesta por la atmósfera y de las características conductoras del suelo.

b. Sistema radicular del cultivo

La estructura, distribución y densidad radicular juegan un papel importante en la absorción de agua para mantener el mismo nivel de la demanda evaporativa.

En la Figura 12.7 se muestra la transpiración de un cultivo en función del potencial matricial para varias condiciónes de densidad radicular. A medida que aumenta la densidad radicular, la planta está en mejores condiciones de mantenerse al mismo nivel de la demanda evaporativa durante un mayor rango de potencial matricial. Así, en suelos con baja densidad radicular la transpiración cae a altos valores de potencial matricial.

c. Indice de área foliar (IAF)

El IAF se define como la relación entre la superficie foliar y la superficie proyectada de la planta sobre el suelo. El IAF varía con el transcurso de la

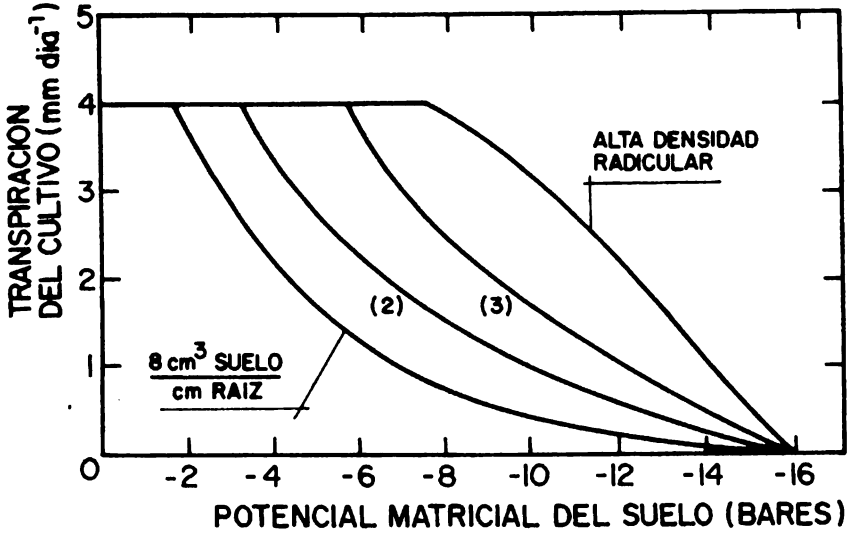


FIGURA 12.7. Transpiración de un cultivo en función del potencial matricial del suelo y de la densidad radicular. Los números de las curvas (2) y (3) corresponden a 4 y 2 cm^3 suelo/cm raíz, respectivamente (Cowan, 1965).

fenología del cultivo, lo cual determina una variación en la distribución de la energía recibida.

En la Figura 12.8 se presenta la distribución de la energía en un campo cultivado en función del IAF. De esta figura se deduce que parte de la energía absorbida por el suelo es máxima a bajos valores de IAF y disminuye a medida que aumenta el IAF, de tal manera que la evaporación del suelo disminuye con el aumento de IAF. El calor latente, energía utilizada en evaporar agua, aumenta a medida que aumenta el IAF hasta alcanzar un máximo que corresponde a un IAF igual a 3.

En la Figura 12.9 se muestra la relación entre ET e IAF obtenida por Stern (1965) para un cultivo de cártamo. Se observa la existencia de una relación exponencial, donde el valor máximo de ET se obtuvo a un IAF igual a 3. A un valor de IAF igual a cero indicaría el valor de evaporación del suelo.

En la Figura 12.10 se muestra una comparación de balances de agua para suelo desnudo, con cultivos de frijol y cebolla. Estos balances representan tres situaciones diferentes en cuanto a cubierta vegetal, variando desde un

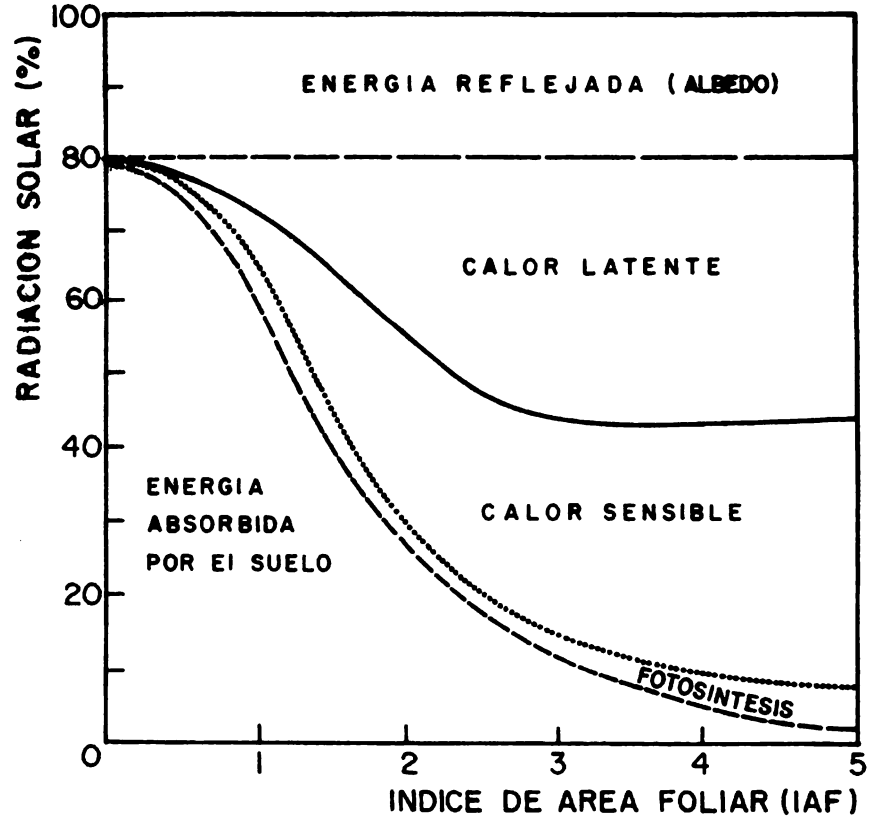


FIGURA 12.8. Distribución de la energía solar en un campo cultivado en función del índice de área foliar.

valor de IAF igual a cero para suelo desnudo, 0,1 a 0,5 para cebollas y 1,0 a 1,8 para frijol. Si todas las curvas de ET se llevan a un mismo nivel de referencia, se observa que la ET aumenta en el mismo sentido. Para períodos similares, se encontró que la evaporación del suelo desnudo era 1,17 mm/día, la ET de cebollas era igual a 1,61 mm/día, y la de frijol igual a 2,81 mm/día, bajo las condiciones climáticas de Hancock, Wisconsin (Millar et al., 1970).

d. Factores del Cultivo

Entre estos se agrupan una serie de factores intimamente relacionados con el manejo. Entre ellos cabe mencionar el cultivo del suelo, manejo de aguas freáticas, mulching, sombreo, fertilidad del suelo y aspecto nutricional de la planta, aspecto sanitario de la planta, etc.

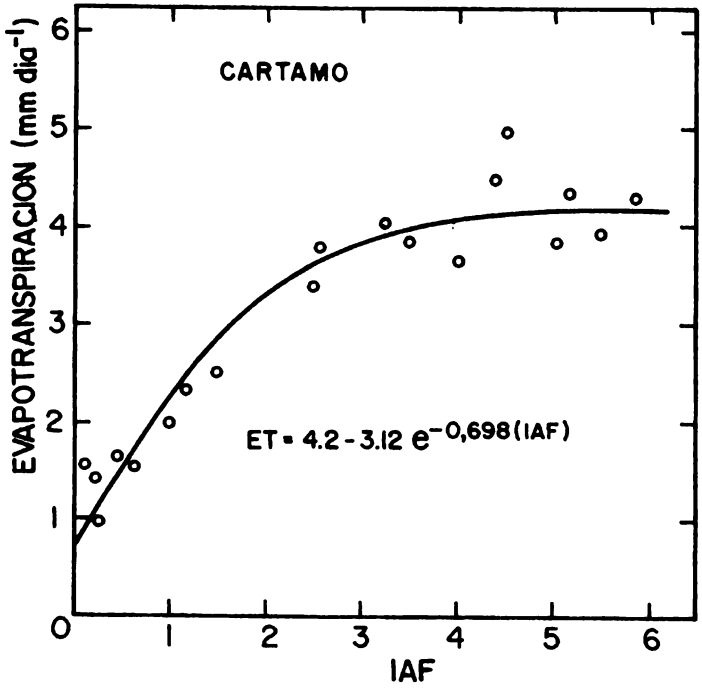


FIGURA 12.9. Evapotranspiración en función del índice de área foliar (Stern, 1965).

Los efectos de napas freáticas y aspectos nutricionales de la planta sobre la ET ya fueron discutidos en los Capítulos 6 y 8, respectivamente.

El uso de mulch o barreras aislantes reducen apreciablemente la evaporación. La temperatura bajo estos "mulch" generalmente aumenta, provocando un aumento de flujo de vapor, aumento de la transpiración del cultivo y promueve el crecimiento.

El sombreo es una manera de controlar la radiación incidente, por lo tanto, reduciendo la energía disponible para evapotranspiración. Esto se ha aplicado en escala comercial cuando existe necesidad de controlar la temperatura principalmente durante los estadíos fenológicos de la reproducción. Esta es una técnica que se puede emplear para reducir requerimientos de riego (Robins, 1967).

El aspecto sanitario del cultivo es un factor importante en la magnitud de las pérdidas de agua. Generalmente, los agentes patógenos destruyen la

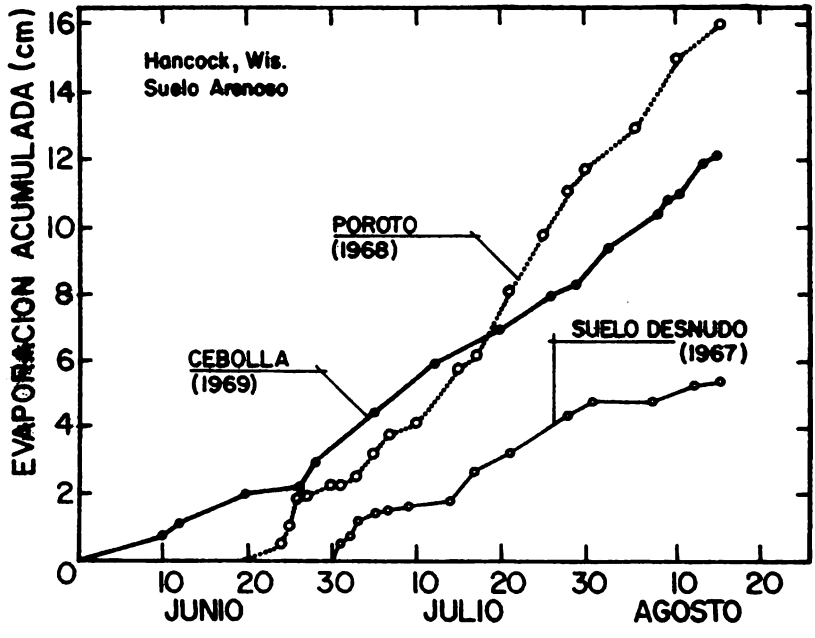


FIGURA 12.10. Evaporación acumulada para tres períodos, con suelo desnudo (1967), porotos (1968) y cebollas de semilla (1969) (Millar et al., 1970).

cutícula de las hojas, con lo cual la planta pierde todo el control de sus pérdidas de agua y evapora en forma similar a una superficie libre. De tal manera que si se efectúa la medición de cultivos sanos y atacados por un patógeno, se encontrará que la ET será mayor en este último caso.

Mayores antecedentes sobre el efecto de los factores del suelo y del cultivo sobre la evapotranspiración se encuentran en la publicación de Ekern et al. (1967).

12.4. Evaporación desde una Cubierta Vegetal: Separación entre Transpiración del Cultivo y Evaporación del Suelo.

La separación de los componentes de evapotranspiración es una de los mayores problemas que enfrenta la micrometeorología. No existe una metodología clásica para enfocar el problema, y tan solo indicaciones a través

de la experimentación de los casos más simples (Black et al., 1970; Goltz et al., 1971).

Black et al. (1970) lograron montar un modelo que permite la separación de los componentes de la evapotranspiración para un cultivo en hileras y poco denso. El modelo requiere la obtención de la evapotranspiración potencial a través de medidas micrometeorológicas, la estimación de la evaporación del suelo a través de medidas de la radicación neta en la superficie del suelo y contenido de agua de la capa superficial, y el conocimiento de la resistencia ponderada por el índice del área foliar. En forma similar, Goltz et al (1971) utilizando un método combinado que requiere la resolución simultánea de un sistema de ecuaciones, teniendo como incógnitas la evaporación del suelo y la transpiración, lograron separar dichos componentes en un campo cultivado con cebollas para semillas. En el experimento obtuvieron la evapotranspiración con lisímetros de precisión, constituyendo una ecuación, y la transpiración del cultivo producto de un rearreglo del modelo de Monteith (1965) para evapotranspiración, constituyendo la segunda ecuación.

Una tercera posibilidad, también a través de un método combinado, requeriría la medida de la evapotranspiración mediante lisímetro o un balance de energía y la obtención de la transpiración del cultivo a través de medidas de la transferencia de masa. La evaporación del suelo se obtendría por diferencia.

12.4.1. Transpiración del Cultivo

La transpiración del cultivo (T_c) se puede determinar por la ecuación combinada (Goltz el al., 1971).

$$T_c = (E_p - E_s)/\{1 + [\gamma/(\gamma + s)](r_{tc}/r_a)\} \qquad (12.1)$$

donde E_p es la evaporación potencial (mm/día), γ es la constante sicrométrica (mb/°C), s es la pendiente de la curva de saturación de vapor (mb/°K), r_{tc} es la resistencia a la transpiración del cultivo (seg/cm) y r_a es la resistencia a la difusión en la capa de aire circundante (seg/cm).

Por otra parte, la evapotranspiración (ET) se puede expresar como la suma de la evaporación del suelo (E_s) y la transpiración del cultivo (T_c).

$$ET = E_s + T_c \qquad (12.2)$$

Así, si se mide ET mediante lisímetro u otro método adecuado, relación de Bowen por ejemplo, y si se conocen E_p, r_{tc} y r_a, entonces las ecuaciones (12.1) y (12.2) pueden ser resueltas en forma simultánea teniendo como incognitas E_s y T_c.

La evaporación potencial (E_p) se puede determinar mediante la relación

$$E_p = ((s/s+\gamma))[(R_n - G) + (\lambda\rho\ C_p/s\ r_a)(e_z^* - e_z)] \qquad (12.3)$$

mientras que r_a se puede determinar con una relación basada en la ecuación de perfil de viento.

$$r_a = k^{-2}\ ln[(z + D)/z_o]^2/V_z \qquad (12.4)$$

donde R_n es la radiación neta (mm/día), G es el flujo de calor al suelo (mm/día), λ es el factor de conversión del calor latente de vaporación de agua (mm dia^{-1}/cal cm^{-2} seg^{-1}), ρ es la densidad del aire (g/cm^3), C_p es el calor específico del aire (cal/g °K), e_z^* es la presión de vapor saturado a la altura z sobre el suelo (mb), y e_z es la presión de vapor a la altura z (mb).

En la ecuación (12.4), k es la constante de Karman (0,428), (adimensional), D es la altura de desplazamiento (d + z_o) (cm), z_o es el "largo de rugosidad" (cm), y V_z es la velocidad del viento a la altura z (cm/seg).

La resistencia a la transpiración del cultivo (r_{tc}), considerando ambos lados de las hojas como superficie evaporante, queda determinada por

$$r_{tc} = r_s\ \ (2\ \ IAF)^{-1} \qquad (12.5)$$

donde r_s es la resistencia estomática, e IAF es el índice de área foliar del cultivo.

12.4.2. Evaporación del Suelo

La evaporación del suelo es limitada por la energía disponible en la superficie del suelo para evaporar o por la habilidad del suelo para conducir agua a la superficie.

Cuando el suelo está suficientemente húmedo se puede suponer que la evaporación del suelo es función de la radiación neta, y se puede expresar como:

$$E_s = B\ \ R_n \qquad (12.6)$$

Es decir, E_s es una fracción de la radiación neta en la superficie, y B es la fracción. Cuando el suelo está seco, la evaporación del suelo es limitada por

el flujo capilar, el cual es función del contenido de agua del suelo, pudiendo escribirse.

$$E_s = g\ (\overline{\Theta}_{o-z}) \tag{12.7}$$

donde $\overline{\Theta}_{o-z}$ es el contenido de agua promedio hasta la profundidad z.

En suelos sin vegetación, o en aquellos con vegetación pero con sistemas radiculares poco densos (Ej. cebolla), la evaporación del suelo se puede determinar usando la solución de la ecuación unidireccional de flujo no saturado (Black et al., 1969).

La ecuación del flujo no saturado se puede resolver analíticamente para una sección de suelo semiinfinita con difusividad constante (D), lo cual da

$$q = (\Theta_i - \Theta_o)(D/\pi\ t)^{1/2} \tag{12.8}$$

donde Θ_i es el contenido inicial de agua, supuesto constante para $t = 0$ y $X \geq 0$, y Θ_o es el contenido de agua en el límite ($X = 0$) supuesto constante para $t > 0$. La integración de la ecuación (12.8) con respecto al tiempo da el flujo acumulado (E).

$$E = 2(\Theta_i - \Theta_o)(D\ t/\pi)^{1/2} \tag{12.9}$$

donde D es la difusividad media ponderada.

Por conveniencia, se define un factor C de tal manera que la ecuación (12.9) queda como

$$E = C\ t^{1/2} \tag{12.10}$$

$$C = 2(\Theta_i - \Theta_o)(D/\pi)^{1/2} \tag{12.11}$$

En la ecuación (12.10), C se puede determinar con un lisímetro, cuya información se grafica como E versus $t^{1/2}$. Se obtiene una recta donde C es la pendiente. Otra forma de obtener el factor C es usando la relación (12.11), y haciendo $\Theta_i - \Theta_o = \Theta$, donde Θ es el contenido de humedad del suelo dos días después de una lluvia.

De esta manera, conociendo el factor C para un suelo determinado, el trabajo se reduce a fijar t=0 después de cada lluvia y calcular $t^{1/2}$.

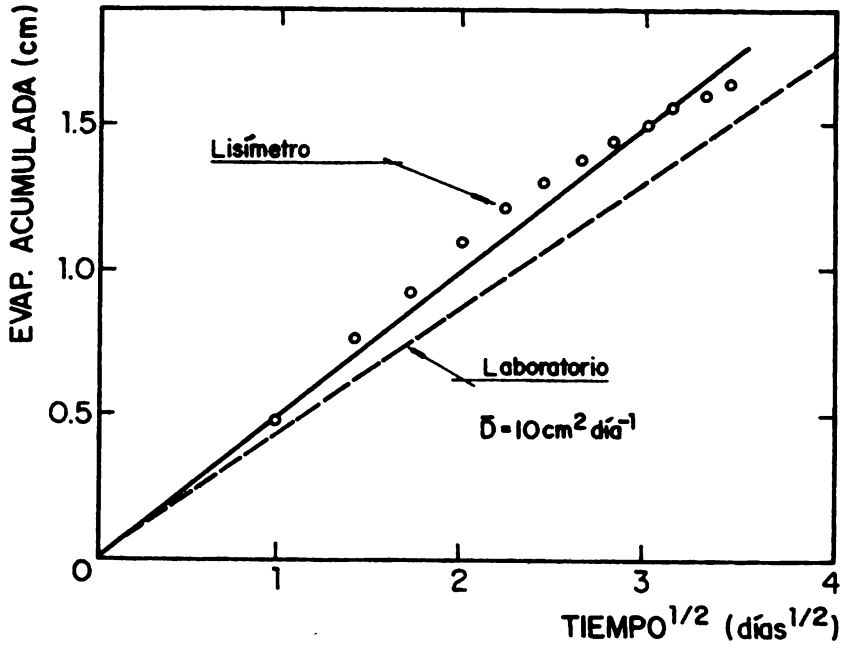


FIGURA 12.11. Evaporación acumulada para un suelo desnudo en función de $t^{1/2}$ (Black et al., 1969).

Este tipo de estimación ha dado muy buenos resultados en suelo desnudo (Black et al., 1969) y suelo cultivado con cebolla, de baja densidad radicular (Millar et al., 1970) los cuales se presentan en las Figuras 12.11, 12.12 y 12.13.

12.5. Transpiración del Cultivo: Modelaje por Transferencia de Masa.

La pérdida de agua de una planta se puede representar matemáticamente como la sumatoria de las pérdidas individuales desde las hojas.

$$T_{Pl} = T_{h1} + \ldots\ldots\ldots + T_{hn} \tag{12.12}$$

$$T_{Pl} = \sum_{i=1}^{n} T_{hi} \tag{12.13}$$

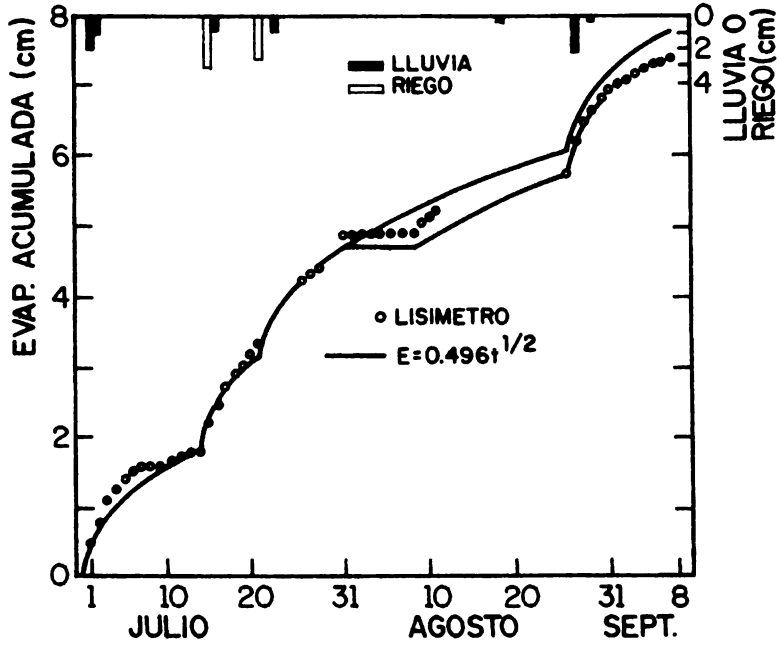


FIGURA 12.12. Predicción de la evaporación acumulada de un suelo desnudo comparada a la medida con lisímetro (Black et al., 1969).

donde T_{Pt} es la transpiración total de la planta, y T_h es la trasnpiración de una hoja individual.

Desde el punto de vista físico, la transpiración de una hoja es la pérdida de agua al estado de vapor, y es proporcional a la gradiente de presión de vapor entre la hoja y el aire circundante, e inversamente proporcional a una resistencia a la transpiración (r_{th}) constituída por la resistencia estomática y la resistencia a la difusión de vapor de la capa de aire circundante estagnada.

$$T_h = CE\ \ (\rho C_p/\gamma)[(e_h - e_a)/r_{th}] \qquad (12.14)$$

donde e_h es la presión de vapor de la cavidad estomática y se supone ser la presión de vapor saturado a la temperatura de la hoja, e_a es la presión de vapor del aire fuera de la capa de aire circundante estagnada, ρ es la densidad del aire húmedo, C_p es el calor específico del aire húmedo, γ es la constante

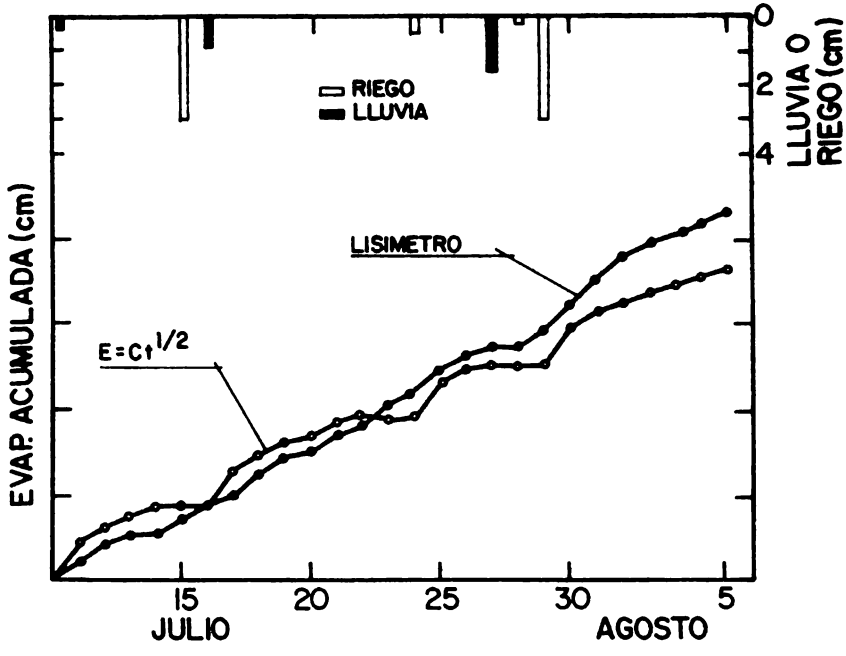


FIGURA 12.13. Evapotranspiración acumulada de cebolla (lisímetro) y evaporación acumulada del suelo ($E = C\ t^{1/2}$) (Millar et al., 1970).

sicrométrica (mb/°C), r_{th} es la resistencia media al flujo de vapor desde la hoja y CE es una constante para convertir Langley/seg a mm/hr.

La resistencia a la transpiración (r_{th}) para una hoja delgada se puede representarse por la siguiente relación:

$$2/r_{th} = [1/(r_{sh} + r_a)] + [1/(r_{sc} + r_a)] \qquad (12.15)$$

donde r_{sh} y r_{sc} son las resistencias estomáticas del haz y envés de las hojas, y r_a es la resistencia para el calor y vapor de agua de la capa de aire circundante estagnada. La ecuación (12.15) considera r_s y r_a actuando como resistencias en serie a cada lado de la hoja y r_{th} es la resistencia a la transpiración que resulta al considerar $(r_{sh} + r_a)$ y $(r_{sc} + r_a)$ actuando como resistencias en paralelo.

Introduciendo la ecuación (12.14) en ecuación (12.12), se obtiene la

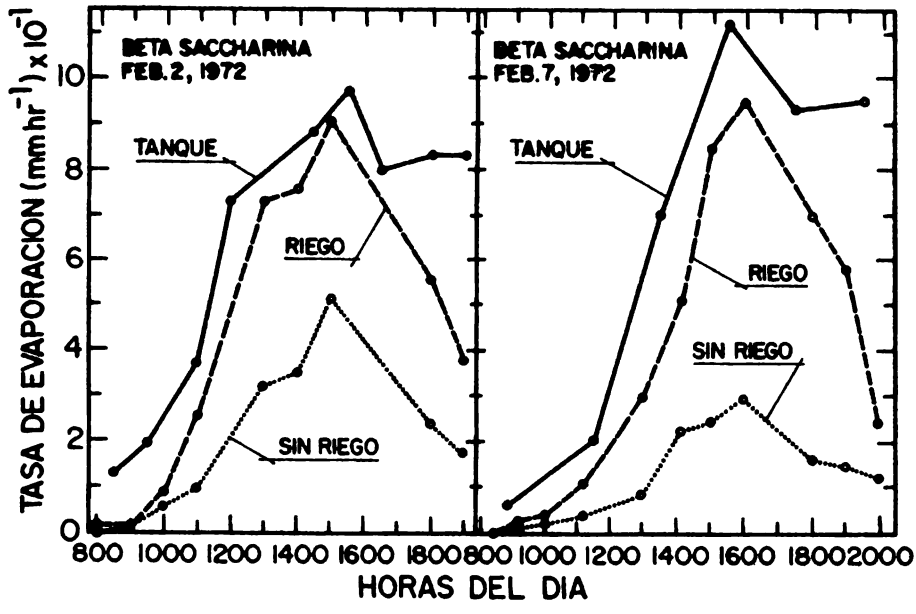


FIGURA 12.14. Variación diurna de la tasa de transpiración de remolacha con riego y sin riego, obtenida con el modelo, comparada a la evaporación de tanque o bandeja (Millar et al., 1878).

transpiracion total de la planta en función de gradientes de vapor y resistencias a la difusión de vapor

$$T_{Pt} = (CE \ \rho \ C_p/\gamma)[(e_{h1} - e_{a1})/r_{th1}) + \ldots\ldots\ldots + (e_{hn} - e_{an}/r_{thn})] \quad (12.16)$$

y en forma resumida se puede escribir:

$$T_{Pt} = (CE \ \rho \ C_p/\gamma) \sum_{i=1}^{n} [(e_{hi} - e_{ai})/r_{thi})] \quad (12.17)$$

La ecuación (12.17) es una relación que toma en cuenta todos los factores de la planta y de la demanda del ambiente en el proceso de pérdidas de agua desde la planta.

La ecuación (12.17) es perfectamente válida para cultivos altos como maíz y maravilla donde los perfiles de vapor de agua y temperatura del aire están bien desarrollados.

Para cultivos de baja altura como remolacha, fríjol, etc., la diferencia con altura de la temperatura del aire y vapor de agua son muy pequeñas, de tal manera que una medida adecuada de estos parámetros representaría el ambiente de estos cultivos.

Tomando en consideración lo anterior, la transpiración total de la planta para cultivos bajos quedaría determinada por una relación similar a la ecuación (12.14), como sigue:

$$T_{Pl} = (CE \ \rho \ C_p/\gamma)[(e_h - e_a)/r_{th}] \qquad (12.18)$$

donde los parámetros de esta ecuación representarían el promedio del microambiente planta-atmósfera considerado.

Cuando se tiene una alta circulación de aire en el ambiente del cultivo, velocidad del viento mayor a 200 cm/seg, la resistencia a la difusión de vapor de la capa de aire en contacto con la superficie foliar es muy pequeña en comparación a la resistencia estomática, y se puede descartar en el análisis. Si se considera lo anterior para cultivos de baja altura y poco densos, la ecuación (12.15) se reduce a

$$r_{th} = r_s = (r_{sh} \cdot r_{sc})/(r_{sh} + r_{sc}) \qquad (12.19)$$

y la ecuación (12.18) se reduce a

$$T_{Pl} = (CE \ \rho \ C_p/\gamma)[(e_h - e_a)/r_s] \qquad (12.20)$$

donde r_s es la resistencia estomática promedio, considerando las resistencias estomáticas del haz y del envés de la hoja actuando como resistencias en paralelo.

Para la utilización de la ecuación (12.20) se requiere de medidas de temperatura de las hojas, temperaturas de bulbo seco y húmedo en el aire, resistencia estomática del haz y envés de las hojas.

Para determinar las pérdidas de agua en un cultivo, se necesita, además, tomar en consideración la densidad de plantas y suelo cubierto por el cultivo. Esto se obtiene por inclusión del índice de área foliar (IAF = superficie foliar/superfice proyectada de la planta sobre el suelo). Extendiendo el uso de la ecuación (12.14) para un número de plantas, la transpiración de un cultivo (T_c) se puede escribir como:

$$T_c = (CE \ \rho \ C_p/\gamma)[(e_h - e_a)/r_{tc}] \qquad (12.21)$$

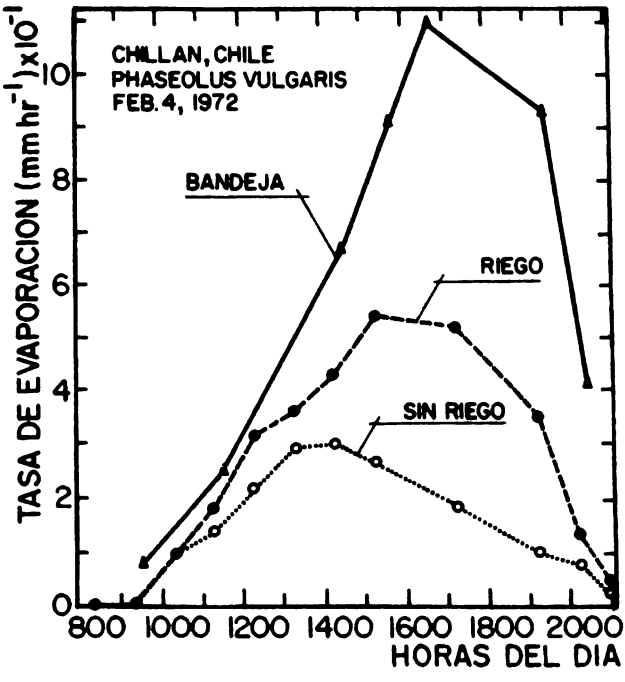


FIGURA 12.15. Variación diurna de la tasa de transpiración de frijol con riego y sin riego, obtenida con el modelo, comparada a la evaporación de tanque o bandeja (Millar et al., 1978).

donde r_{tc} es la resistencia a transpiración del cultivo y se puede expresar como:

$$r_{tc} = r_s/IAF \tag{12.22}$$

La relación (12.21) se puede utilizar para obtener la transpiración horaria y diaria de los cultivos de poca altura. Millar et al. (1978) usaron esta metodología para obtener información de transpiración de cultivos de remolacha y frijol en condiciones de riego y sin riego cuyos resultados se presentan en las Figuras 12.14 y 12.15.

12.5. Referencias Bibliográficas.

[1] BLACK, T.A., W.R. GARDNER AND G.W. THURTELL. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. Agronomy Journal 33 (5):655–660.

[2] BLACK, T.A.., C.B. TANNER AND W.R. GARDNER. 1970. Evapotranspiration from a snap bean crop. Agronomy Journal 62(1):66–69.

[3] COWAN, I.R. 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. Journal of applied Ecology 2:221.

[4] DENMEAD, O.T. AND R.H. SHAW. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agronomy Journal 54:385–389.

[5] EAGLEMAN, J.R. AND W.L. DECKER. 1965. The role of soil moisture in evapotranpiration. Agronomy Journal 57:626–629.

[6] EKERN, P.C., J.S. ROBINS AND W.J. STAPLE. 1967. Soil and cultural factors affecting evapotranspiration, pp. 522–533. In: R.M. Hagan et al. (ed.), Irrigation of agricultural lands. Madison, Wis., American Society of Agronomy.

[7] GARDNER, W.R. AND D.I. HILLEL. 1962. The relation of external conditions to the drying of soils. Journal of Geophysical Research 68:5719–5723.

[8] GOLTZ, S.M., C.B. TANNER, A.A. MILLAR AND A.R.G. LANG. 1971. Water balance of a seed onion field. Agronomy Journal 63:762–765.

[9] HOLMES, R.M. AND G.W. ROBERTSON. 1963. Application of the relationship between actual and potential evapotranspiration in dry land agriculture. Transactions, American Society of Agricultural Engineers 6:65–67.

[10] MILLAR, A.A., W.R. GARDNER AND G. WEISS. 1970. Water regimes of a sandy soil under row crops. Madison, Wisconsin, Dept. of Soils and Water Sciences, University of Wisconsin, 15 p. (Unpublished).

[11] MILLAR, A.A., M. ROJAS y N. DUARTE. 1978. Consideraciones micro meteorológicas de la pérdida de agua de algunos cultivos. Turrialba (Costa Rica) 28(3):167–173.

[12] MONTEITH, J.L. 1965. Evaporation and evironment. p. 305-324. In: G.E. Fogg (ed). The state and movement of water in living organisms. New York, Academic Press.

[13] MONTEITH, J.L. AND G. SZEICZ. 1962. Radiative temperature in the heat budget of natural surfaces. Quarterly Journal Royal Meteorology Society 188:496–507.

[14] PARR, J.F. AND A.R. BERTRAND. 1960. Water infiltration into soils. Advances in Agronomy 12:311–363.

[15] PENMAN, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proceedings, Royal Society, Series A 193:120–145.

[16] PHILIP, J.R. AND D.A. DE VRIES. 1957. Moisture movement in porous material under temperature gradient. Transaction American Geophysical Union 38(3):222–232.

[17] PIERCE, L. T. 1958. Estimating seasonal and short-term fluctuations in evapotranspiration from meadow crops. Bulletin American Meteorology Society 39:73–78.

[18] PRUITT, W. O. 1960. Correlation of climatological data with water requirement of crops. Department of Irrgation, University of California, Davis.

[19] ROBINS, J. S. 1967. Reducing irrigation requirements. pp. 1143–1158. In: R.M. Hagan et al. (ed.), Irrigation of agricultural lands, Madison, Wis., American Society of Agronomy.

[20] ROSE, C. W. 1968. Evaporation from bare soil under high radiation conditions. Trans. 9th International Congress of Soil Science, Vol I:57–66.

[21] ROSE, C.W. 1968. Water transport in soil with a daily temperature wave. I. Theory and experiment. Australian Journal of Soil Research 6:31–44.

[22] ROSE, C.W. 1968. Water transport in soil with a daily temperature wave. II. Analysis. Australian Journal of Soil Research 6:47–57.

[23] STERN, W.R. 1965. Evapotranspiration of safflower at three densities of sowing. Australian Journal of Agricultural Research 16:961–971.

[24] TANNER, C.B. 1957. Factors affecting evaporation from plants and soils. Journal of Soil and Water Conservation 12 (5):221–227.

[25] TANNER, C.B., W.R. GARDNER, A.A. MILLAR AND S.M. GOLTZ. 1970. Actual evapotranspiration as determined from soil-water and canopy characteristics and potential evapotranspiration. Report to Evironmental Science Service Administration, ESSA Grant N' E-287–68(G). 43 p.

CAPITULO 13

DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION

La evapotranspiración (ET) de los cultivos es un dato básico para el manejo del riego a nivel de parcela, para el dimensionamiento de proyectos, de las estructuras hidráulicas y de los equipos, y la operación de los sistemas de riego.

La única forma precisa de conocer los requerimientos de agua de las plantas es midiendo directamente el consumo a través del ciclo vegetativo de los cultivos, ya sea mediante balances de agua o de energía y/o lisímetros. Sin embargo, cuando se carece de medios adecuados y tiempo para determinar valores de evapotranspiración de los cultivos, se recurre al uso de otros procedimientos como tanque de evaporación y formulaciones empíricas basadas en parámetros climáticos para obtener estimaciones de ET. Entre algunos factores climáticos que se consideran están temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, presión de vapor del aire, luminosidad, etc. Existen varios modelos que usan uno o más factores climáticos; otros modelos introducen algunos aspectos de la planta como ser, período vegetativo. En general, los modelos son de uso adecuado sólo en el lugar donde fueron obtenidos y su uso en otras regiones diferentes requiere, en algunos casos, de modificaciones para adaptarlos al lugar. A continuación se describen algunos procedimientos que son de uso generalizado para estimar evapotranspiración de los cultivos.

13.1. Balance Hídrico.

El método del balance hídrico permite conocer y cuantificar la importancia de los términos incluidos en el ciclo hidrológico.

La evapotranspiración de un cultivo se obtiene por diferencia, usando la ecuación de balance hidrológico, que en general, se escribe de la siguiente manera (De Doodt et al., 1967; Aranda, 1961):

$$P - G = ET + \Delta S + D \qquad (13.1)$$

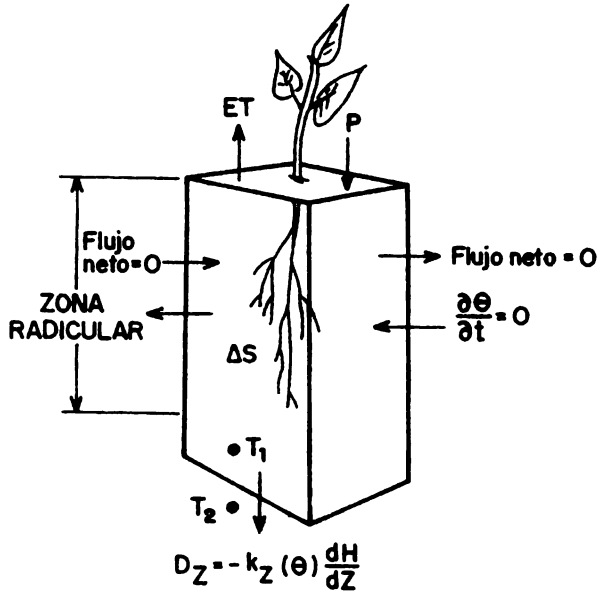
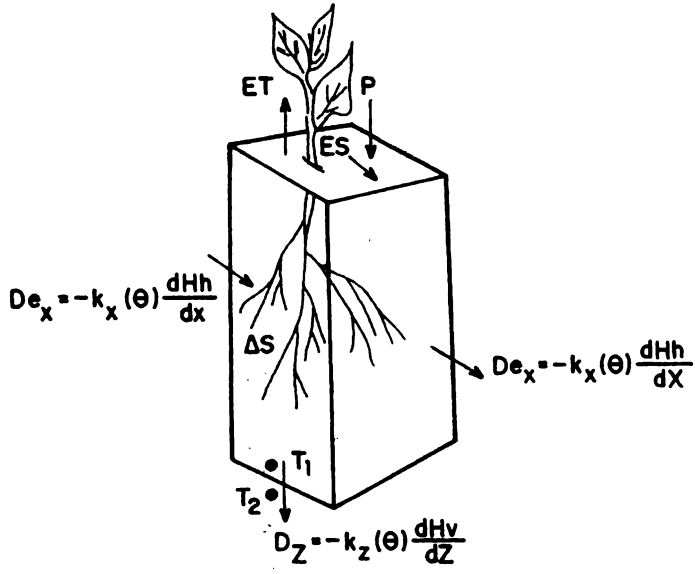


FIGURA 13.1. *Diagrama esquemático de la situación hidrológica de un volumen de suelo en superficies planas.*

donde P es precipitación (o riego), G es escurrimiento superficial, ET es evapotranspiración, D es drenaje de la zona radicular y ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua en la zona radicular del cultivo.

En general, para el caso de superficies planas, no hay escurrimiento superficial y toda el agua se infiltra en el perfil del suelo (Figura 13.1). En el caso de superficies inclinadas hay escurrimiento superficial y presencia de flujos internos tanto en el sentido vertical como en la dirección de la pendiente (Figura 13.2) que deben ser propiamente determinados.

En esta sección se analiza particularmente la determinación de evapotranspiración de cultivos en superficies planas, eliminando el término de escurrimiento superficial. Así la ecuación de balance hidrológico se reduce a:



ECUACION HIDROLOGICA

ENTRA = SALE ± ALMACENAJE

$$P + De_x = ET + E_s + D_z + D_{s_x} + \Delta S$$

FIGURA 13.2. Diagrama esquemático de la situación hidrológica de un volumen de suelo en superficies inclinadas.

$$P + I = ET + \Delta S + D \qquad (13.2)$$

donde I es el agua recibida mediante riego. Conociendo P, I, Δ S y D se obtiene ET como remanente en la ecuación (13.2).

En condiciones de campo, los parámetros P e I se miden con pluviómetros o pluviógrafos, la variación del agua almacenada (ΔS) se obtiene mediante muestreo gravimétrico o a través del uso de una sonda de neutrones, lo cual se explicó en detalles en el Capítulo 2.

El componente de drenaje (D) normalmente no se considera en los balances de agua que se realizan para determinar ET en el campo, aduciendo que no hay movimiento de agua después de 48 horas del riego o lluvia. Esto, de acuerdo con lo pregonado en términos de capacidad de campo, pero en

el Capítulo 4 se demostró que aún después de capacidad de campo el suelo sigue drenando a tasas cada vez menores, a medida que disminuye el agua en el perfil del suelo (Rose y Stern, 1965). Si no se considera el componente de drenaje, se introducen errores de importancia, sobrestimando los valores de ET. Millar et al. (1970) determinaron que el componente de drenaje en un suelo arenoso llegó a representar 40-50 % del agua aplicada en el ciclo del cultivo.

La ecuación para la determinación del flujo de agua en una dirección en un suelo con vegetación, es la siguiente (Black et al., 1970; Rose y Stern, 1967; Van Bavel et al., 1970):

$$(\partial\Theta/\partial t) = \partial/z\,(k\,\partial H/\partial z) - Q \qquad (13.3)$$

donde Θ es el contenido volumétrico de agua y k es la conductividad capilar. La carga hidráulica (H), a la profundidad Z, es dada por $H = \phi_m + Z$ donde ϕ_m es el potencial matricial, Z es el potencial gravitacional (profundidad), negativo, medido a partir de la superficie. El término Q es la tasa de agua removida del suelo debida a evapotranspiración.

La variación del agua almacenada en el perfil del suelo se obtiene por integración de la ecuación (13.3), en la profundidad del sistema radicular, para t constante. En estas condiciones, se obtiene (Rose et al., 1967).

$$dET/dt = (dS/dt)_{z=z_r} - (k\,dH/dZ)_{z=z_r} \qquad (13.4)$$

donde Δ S es el agua almacenada en la zona radicular de profundidad Z_r, dET/dt es la tasa de evapotranspiración y (-k dH/dZ) es la tasa de drenaje dD/dt a través del límite de la zona radicular Z_r.

El componente de drenaje D, como se indica en la Figura 13.1, se obtiene multiplicando la conductividad capilar por el gradiente hidráulico que actúa a través del plano Zr.

El procedimiento es el siguiente:

a. Se debe conocer la curva $k = k(\Theta)$ para el suelo donde se realiza el balance de agua (similar a la Figura 4.8 del Capítulo 4). En el Capítulo 5 se detallan los procedimientos para determinar la conductividad capilar.

b. Se deben determinar las cargas hidráulicas usando dos tensiómetros sensibles instalados fuera de la zona radicular.

c. Se debe determinar la humedad del suelo entre los tensiómetros (profundidad intermedia).

CUADRO 13.1. Balance de agua de un área virgen de la hoya hidrográfica del lago Wingra (Wisconsin, USA) para dos períodos, seco y húmedo (Millar, 1970).

PARAMETRO	Período seco Jul 15-Sept 2 (49 días)	Período húmedo Sept 2-Sept 13 (16 días)
Precipitación (cm)	5.0	14.0
Evapotranpiración acumulada (cm)	7.4	3.9
Drenaje acumulado (cm)	1.5	3.6
Cambio en el agua almacenada (cm)	-3.9*	6.5
Evapotranspiración media (mm/día)	1.51	2.44

* Signo negativo indica una disminución en el almacenaje de agua durante el período considerado.

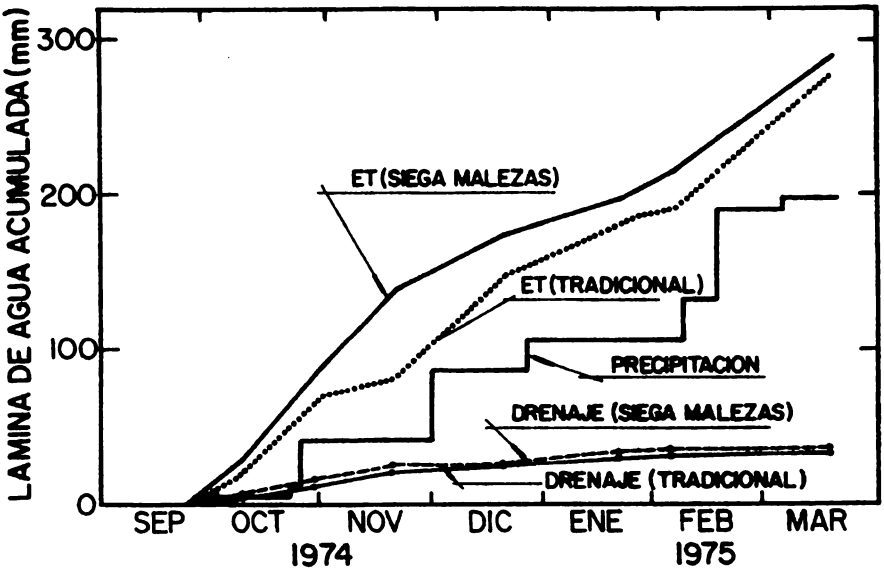


FIGURA 13.3. Evapotranspiración y drenaje en función del tiempo para un viñedo de secano sometido a dos sistemas de manejo, siega periódica de malezas y cultivo tradicional (Román et al., 1979).

El valor del D, se obtiene de la siguiente forma:

a.Con el dato de humedad se entra en el gráfico $k=k(\Theta)$, y se obtiene el valor de k.

b.Con las cargas hidráulicas determinadas con los tensiómetros se calcula la gradiente dH/dZ.

c.D se obtiene multiplicando los valores anteriores.

En suelos homogéneos donde el drenaje se desarrolla monotónicamente, es posible graficar la tasa de drenaje que sale de la zona radicular en función del agua almacenada en dicho perfil (Figura 4.10 del Capítulo 4). Esta relación es de gran utilidad práctica puesto que permite determinar el drenaje con sólo conocer el agua almacenada.

En suelos estratificados esta relación pierde vigencia debido a las acumulaciones de agua en el perfil por cambios de textura perdiéndose la condición de drenaje monotónico.

La información obtenida a través de un balance hídrico se debe presentar en una forma que sea fácil de entender, a través de un cuadro resumen como el indicado en el Cuadro 13.1. Una forma resumida de presentar los datos es graficando la lámina acumulada versus tiempo, donde se introducen todos los parámetros más importantes (Figura 13.3).

A nivel de los cultivos de riego, cuando se realizan balances hídricos detallados, para cortos espacios de tiempo, y si se tiene información de la evaporación de tanque, se pueden obtener valores del coeficiente K_c de los cultivos. (Doorenbos y Pruitt, 1975, Silva et al., 1981; Silva y Millar, 1981; Robin y Haise, 1961; Hargreaves 1976).

13.2. Balance de Energía.

Al igual que el balance hídrico, el balance de energía para una superficie horizontal se puede expresar en término de los componentes que intervienen. Como se indicó en el Capítulo 12, la energía disponible a nivel de un cultivo es la radiación neta. Esta energía es usada para calentar el aire y las plantas, para evaporar agua y para calentar el suelo.

El balance de energía para una superficie horizontal, se puede escribir como (Sellers, 1965):

$$R_n - G = LE + H \qquad (13.5)$$

donde Rn es la radiación neta, G es el flujo de calor al suelo, LE es el calor latente de evaporación y H es el calor sensible.

Dividiendo la ecuación (13.5) por LE, se obtiene:

$$(R_n - G)/LE = 1 + H/LE \qquad (13.6)$$

La relación H/LE se conoce como la relación de Bowen y se designa por B.

Conociendo R_n, G y B se puede obtener el calor latente de evaporación (LE) de la ecuación (13.6) (Suomi y Tanner, 1958):

$$LE = (R_n - G)/(1 + B) \qquad (13.7)$$

Las ecuaciones de transferencia turbulenta para flujo de calor sensible (H) y flujo de vapor de agua (E) se pueden expresar como (Sellers, 1965):

$$H = -\rho C_p K_h(\Delta T/\Delta Z) \tag{13.8}$$

$$E = -(\rho \xi/P) K_w (\Delta e/\Delta Z) \tag{13.9}$$

donde ρ es la densidad del aire (g/cm^3), C_p es el calor específico del aire a presión constante (cal g^{-1} °C), P es la presión atmosférica (mb), ξ es la relación entre el peso molecular del agua y el peso molecular del aire seco (18/28,966 = 0,622), K_h y K_w son los coeficiente para transferencia turbulenta de calor y vapor de agua (cm^2 seg^{-1}), respectivamente, T es la temperatura (°C), e es la presión de vapor (mb) y Z es la altura (cm).

Suponiendo que $K_h = K_w$ para la relación de Bowen (B) se obtienen lo siguiente:

$$B = H/LE = (C_p P/L)/(\Delta T/\Delta e) = \gamma(\Delta T/\Delta e) \tag{13.10}$$

donde γ es la "constante" sicrométrica (γ = 0,66 mb/°C)

Para computar la relación de Bowen se supuso la igualdad de los coeficientes para transferencia de calor y vapor. La validez de esta suposición es cuestionada pero a pesar de ello, la relación de Bowen ha demostrado ser precisa en aplicaciones prácticas por lo cual es ampliamente utilizada.

Para determinar evapotranspiración de los cultivos mediante el balance de energía se requiere de varios tipos de instrumentos de precisión, los cuales no están fácilmente disponibles. De ahí que este procedimiento se restringe a centros de investigación con adecuadas facilidades. Tanner (1960, 1963) discute el uso de estos instrumentos en balances de energía con cultivos.

La radiación neta (R_n) se determina con radiómetros netos. Estos instrumentos miden directamente la energía que queda disponible. Trichett et al. (1957) presentan una revisión de los instrumentos utilizados en mediciones de energía solar. Suomi y Kuhn (1958) y Swam et al. (1961) muestran como construir, calibrar y usar un radiómetro neto económico, y Fritschen (1963) muestra como construir y evaluar un radiómetro neto pequeño. Sin embargo, la revisión más extensa y bien documentada es presentada por el Profesor Tanner (1963).

El flujo de calor hacia o desde el suelo (G) se puede medir a través de los siguientes procedimientos: método del gradiente de temperatura, método del plato de flujo de calor y método calorimétrico.

En el método del gradiente de temperatura se colocan sensores de temperatura (termómetros, termopares o diodos calibrados) a varias profundidades

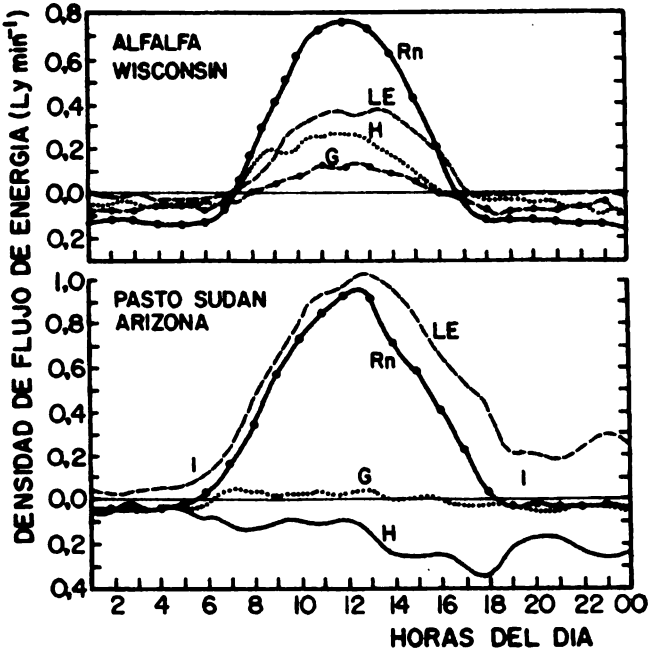


FIGURA 13.4. Variación diaria de los componentes del balance de energía sobre alfalfa y pasto sudán (Sellers, 1965).

del suelo (Tanner 1968) y la densidad de flujo de calor (S) se determina mediante la expresión de la ley de Fourier.

$$S = -\lambda \, (dT/dZ) \qquad (13.11)$$

donde λ es la conductividad calórica del suelo, la cual se debe determinar por alguno de los métodos comunmente usados (Vries y Peck, 1958; Vries, 1958).

El método del plato de flujo de calor se basa en el mismo principio de los radiómetros netos. Platos pequeños (2 x 2 cm) que poseen conductividad térmica casi constante, se colocan horizontalmente entre 5 y 10 cm de profundidad. El flujo y la densidad de flujo de calor se determina de las medidas de diferencia de temperatura a través del plato. La densidad de flujo de calor en la capa de suelo encima del plato se determina por el método calorimétrico.

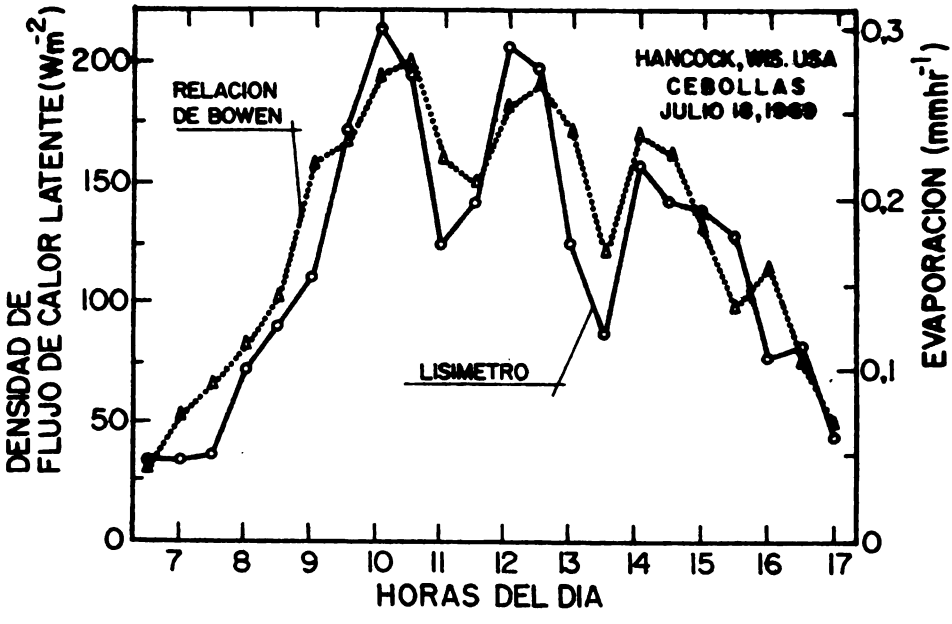


FIGURA 13.5. Comparación de valores de evaporación obtenidos con lisímetro y mediante la relación de Bowen (Tanner et al., 1970).

En el método calorimétrico, el promedio del flujo de calor se determina a partir de los cambios en el almacenamiento de calor en el perfil del suelo en un intervalo de tiempo, mediante:

$$S = (Q_1 - Q_2)/(t_1 - t_2) \qquad (13.12)$$

donde Q es el almacenamiento de calor, el cual es determinado para un tiempo dado, por:

$$Q = \int_{z_1}^{z_2} C(Z)\, T(Z)\, dz \qquad (13.13)$$

Este método requiere información de la capacidad calórica del suelo y de variaciones de temperatura en función del tiempo y la profundidad. Baver et al. (1972) presentan mayores detalles sobre las propiedades térmicas de los suelos.

Referente a la relación de Bowen, Tanner (1963) demostró las ventajas prácticas de determinar B a través de medidas de los gradientes de temperatura y humedad, principalmente debido a que estos gradientes cambian en forma similar con los cambios en la estructura del perfil del viento. Mientras los valores de B no sean más negativos que −0.5 los errores son insignificantes en LE por causa de la suposición de $K_w = K_h$. Los valores de B tienden a −1 sólo durante los períodos del amanecer y anochecer, y ocasionalmente durante la noche. La evapotranspiración de los cultivos en estos períodos carecen de importancia agrícola. Tanner (1960, 1965) presenta detalles del instrumental usado para medir los gradientes de temperatura y vapor en cultivos.

En la Figura 13.4 se muestra como varían los componentes de la ecuación de balance de energía sobre alfalfa (Wisconsin) y pasto sudan (Arizona). En la Figura 13.5 se muestra la evapotranspiración obtenida mediante un balance de energía y a través de un lisímetro de pesada (Tanner et al., 1970).

13.3. Lisímetros.

El lisímetro es el único método hidrológico mediante el cual se puede tener un conocimiento completo de todos los términos de la ecuación de balance de agua. Así, los lisímetros son de gran importancia no sólo para determinar ET sino también un método independiente que permite probar la adecuación de los métodos micrometeorológicos y para calibrar las fórmulas empíricas (Tanner, 1967).

Hay numerosas publicaciones que incluyen información sobre construcción y uso de lisímetros (Slatyer y Mc Ilroy, 1961; Pelton, 1961; Mc Ilroy y Angus, 1963; Black et al., 1968).

El lisímetro es un instrumento en el cual un volumen de suelo se aisla hidrológicamente de sus alrededores. El lisímetro debe representar las condiciones circundantes si se quiere tener una adecuada medida de ET. Esta representatividad debe ser tanto para el suelo (propiedades térmicas, humedad y mecánicas) como de la vegetación (altura, densidad, aspecto fisiológico).

Hay varios aspectos que determinan el diseño de un lisímetro, entre los cuales se pueden mencionar:

- Si se requieren medidas de ET potencial o ET real.
- Estructura de la vegetación (pasto, cultivos en hilera, densidad, etc.)
- Estructura del sistema radicular (profundo, superficial, etc.)
- Período de medida (hora, día, o mes).

Los factores anteriores influencian el diseño del lisímetro en cuanto a profundidad y control del agua que sale del lisímetro.

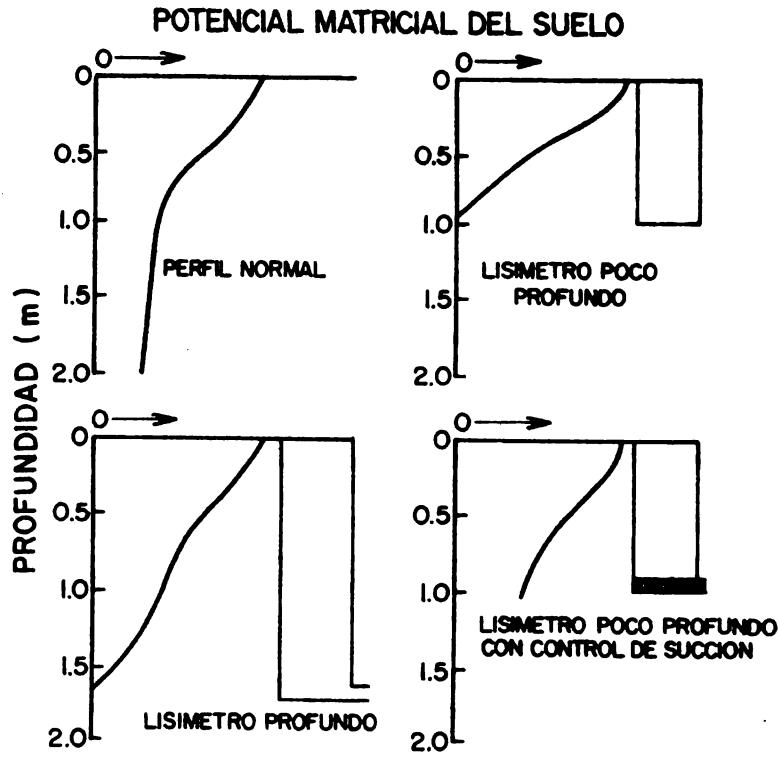


FIGURA 13.6. Relación idealizada del potencial matricial y la profundidad del suelo en lisímetros (Van Bavel, 1961).

13.3.1. Profundidad y Control del Agua

Cuando se requiere obtener ET real es necesario tomar precauciones respecto al ambiente radicular, de tal manera que realmente represente las condiciones del suelo circundante.

La distribución del agua en el perfil de suelo del lisímetro es el factor más importante puesto que afecta la disponibilidad de agua para las plantas, la aireación del suelo y el régimen térmico.

Van Bavel (1961) discute ampliamente la importancia del drenaje forzado en el lisímetro para simular la distribución natural del agua que ocurre en el suelo adyacente. Esquemáticamente, en la Figura 13.6 se

presenta el perfil de humedad que ocurriría con diferentes condiciones de lisímetros.

Cuando se trata de obtener ET potencial el requerimiento de distribución de agua no es tan crítico puesto que tanto el lisímetro como los alrededores reciben agua en exceso a las pérdidas por ET. En todo caso el lisímetro debe tener una profundidad que permita un buen desarrollo del sistema radicular y una aireación adecuada. La profundidad debe ser lo suficiente como para permitir que el contenido de agua en los primeros 40 cm de suelo sea representativa del suelo circundante para evitar problemas de diferencias térmicas (Tanner, 1967).

13.3.2. Area del Lisímetro

La superficie del lisímetro depende principalmente de la estructura de la vegetación y de la construcción de las paredes. El volumen de agua que se pierde se divide por el área "efectiva" del lisímetro para obtener ET.

El tamaño y forma del lisímetro es un factor importante dependiendo del tipo de cultivo que se utilice. Así, cuando se utilizan lisímetros pequeños y redondos para cultivos en hileras los valores obtenidos no representan la ET del campo, en atención a que hay diferencias en el área del suelo expuesta por unidad de hilera de planta y porque el área de muestreo es muy pequeña. Este problema se presenta en los experimentos con apio realizados por Drinkwater y Janes (1967). Hay ventajas en el uso de lisímetros rectangulares para cultivos en hileras debido a que permiten hileras de longitud uniformes, y representatividad en el área de suelo expuesto respecto de la vegetación.

El área del lisímetro debe ser mayor que el área no cultivada en sus bordes.

13.3.3. Propiedades Térmicas del Lisímetro

Las propiedades térmicas del suelo del lisímetro y alrededores pueden llegar a ser bastante diferentes, especialmente cuando hay diferencias en la distribución del agua en el perfil. Esto es particularmente importante y se debe evitar, cuando se requiere la obtención de medidas horarias de ET. El error debido a diferencias térmicas es menor en medidas diarias que en las horarias, y disminuye cuando el lisímetro está cubierto con vegetación porque es menor la cantidad de calor que penetra al suelo.

La representatividad térmica del lisímetro se puede determinar midiendo el flujo de calor que penetra en el suelo, dentro y fuera del lisímetro.

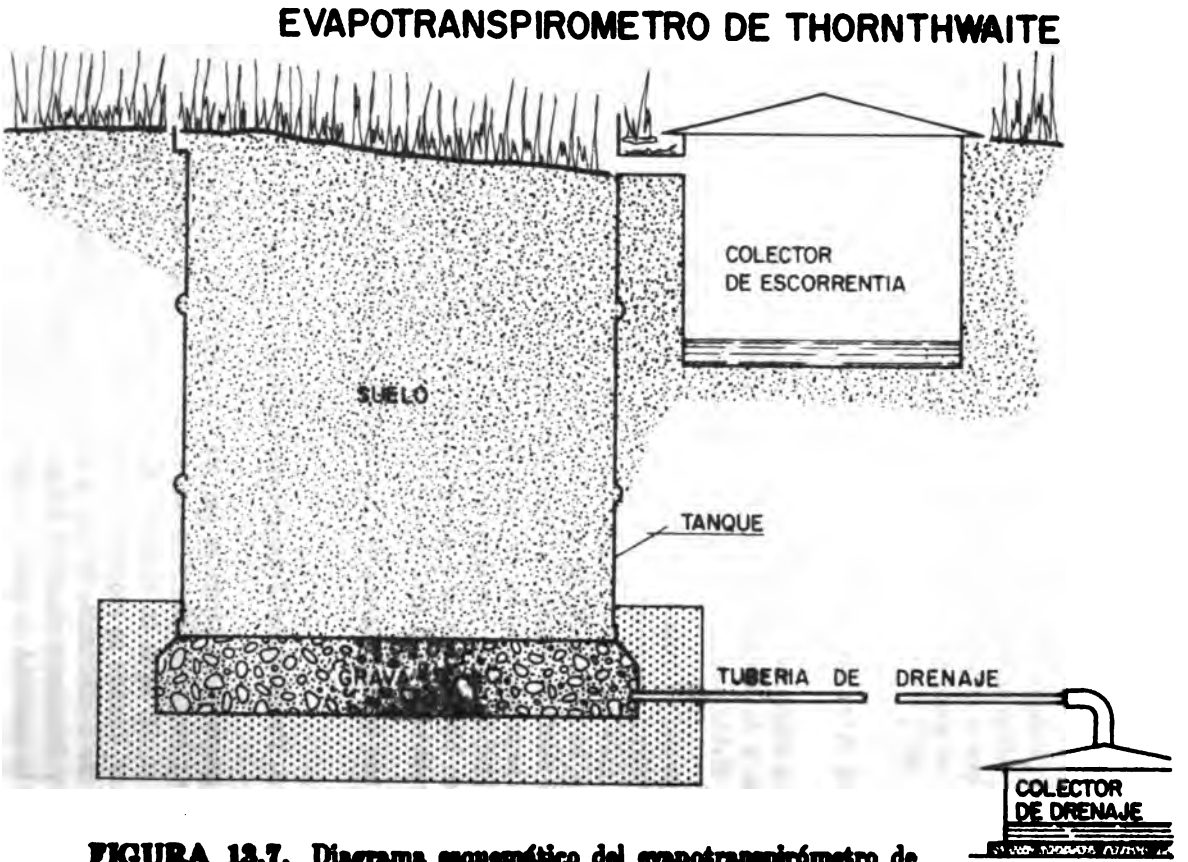


FIGURA 13.7. Diagrama esquemático del evapotranspirómetro de Thornthwaite (López, 1978).

13.3.4. Tipos de Lisímetros

Los lisímetros se pueden clasificar en dos grupos dependiendo si se realiza o no el pesaje del volumen de suelo aislado, y sus características se encuentran ampliamente difundidas (Tanner, 1967; Kohnke et al., 1940; Harrold y Dreibelbis, 1958; Van Bavel y Myers, 1962; Aboukhaled, 1982).

a.Evapotranspirómetro de Thornthwaite

En este lisímetro se mantiene una napa freática constante la cual abastece de agua al cultivo. Puesto que el cultivo nunca está carente de agua se obtiene una medida de ET potencial. El agua requerida para mantener la napa freática a una profundidad constante es medida y permite obtener la ET potencial.

Una de las críticas que se le hace a este tipo de lisímetro es que si se mantiene una profundidad de napa freática que permita un desarrollo razonable del sistema radicular, se obtendría un inadecuado abastecimiento de agua para mantener el nivel de la demanda que impone la atmósfera. En la Figura 13.7 se muestra un esquema del lisímetro de Thornthwaite (López, 1973).

b.Lisímetros Flotantes

Este tipo de lisímetro desarrollado por King, Tanner y Suomi (1956) es simple y de bajo costo. Consiste en un compartimiento donde se coloca agua o una solución de cloruro de Zinc, y dentro de esta se coloca otro compartimiento que contiene el volumen de suelo (Figura 13.8). Los cambios de peso se registran mediante cambios en las lecturas de nivel de agua.

Mejoras en este tipo de lisímetros han sido introducidas por Mc Millan y Paul (1961), King et al. (1964) y Konstantinov (1963). Glover y Forsgate (1962) construyeron un lisímetro sobre bolsas especiales llenas con agua. La presión en las bolsas cambia en función del peso total del lisímetro. Hanks y Shawcroft (1965) describen un lisímetro similar donde los cambios de presión son leídos a través de manómetros. Este tipo de lisímetros sólo permiten medidas diarias de ET (Hillel et al., 1969).

c. Lisímetros de Pesada Directa

El tipo más común emplea balanzas mecánicas para determinar la pérdida de peso. Lisímetros de este tipo se han empleado con éxito en trabajos experimentales en California (Pruitt y Angus, 1960). Otro lisímetro de este tipo pero que introduce un sistema eléctrico de detección, que permite medidas continuas, es el descrito por Mc Ilroy y Angus (1963), y Van Bavel y Myers (1962).

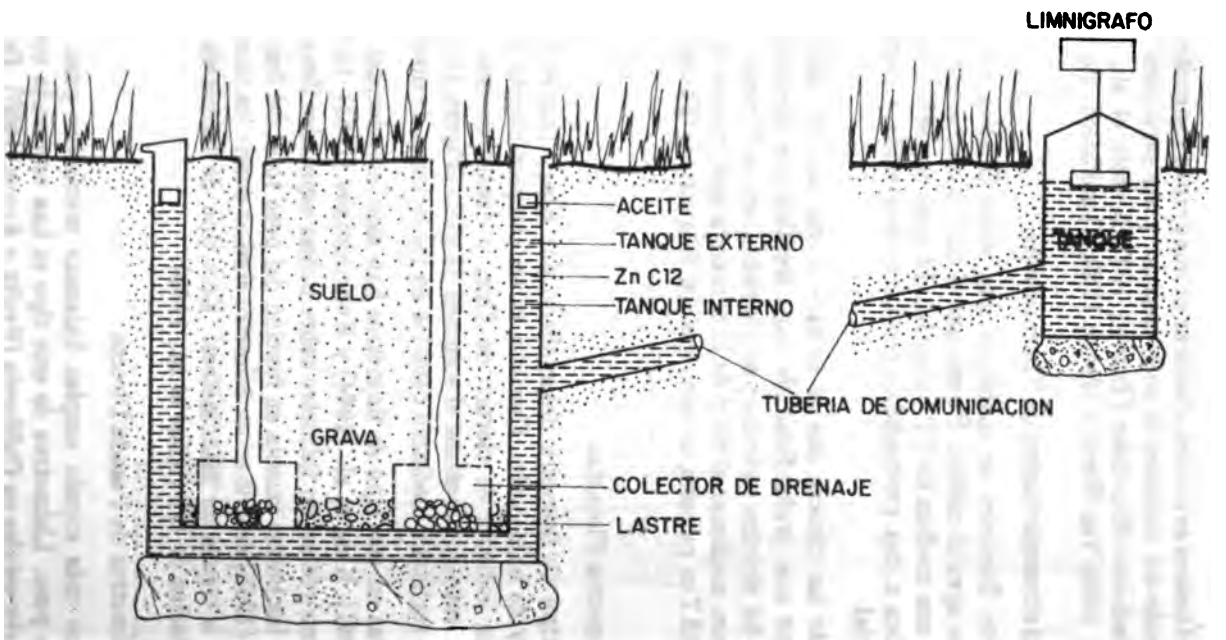


FIGURA 13.8. Diagrama esquemático del lisímetro flotante (López, 1973).

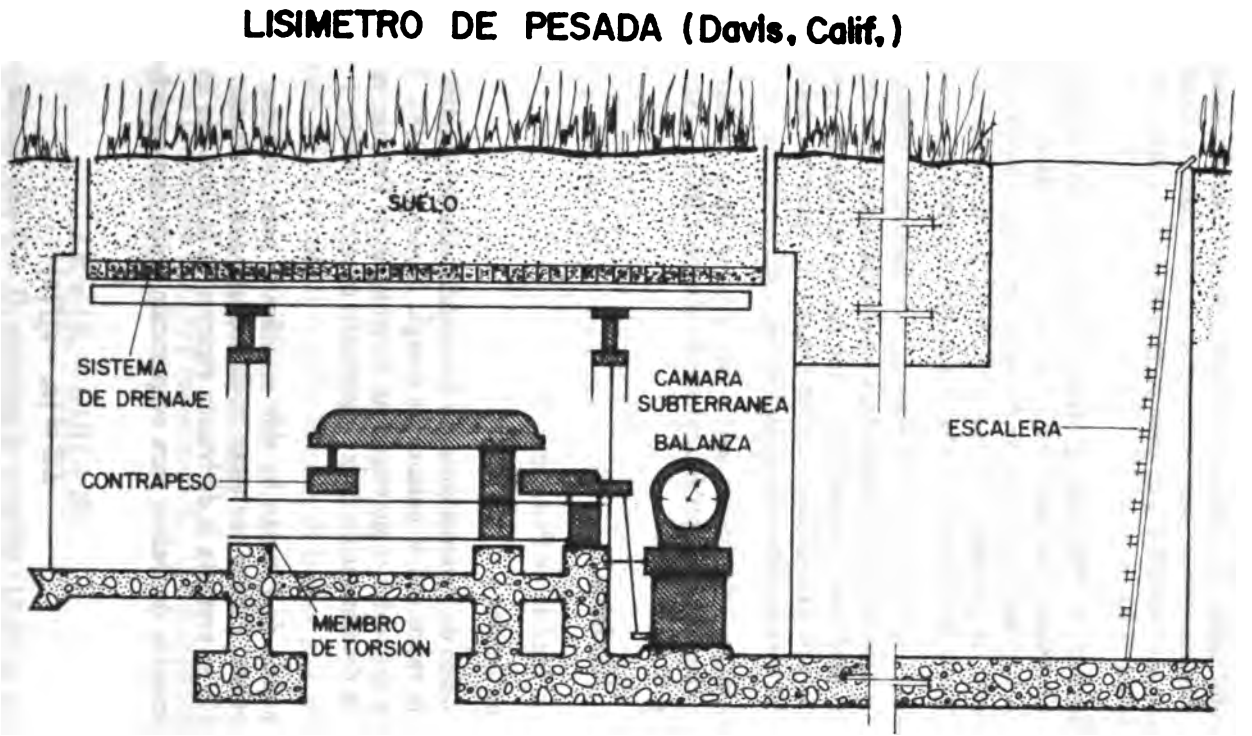


FIGURA 13.9. Diagrama esquemático del lisímetro de pesada (López, 1973).

El lisímetro de Pruitt y Angus (1960) tiene un diámetro de 6 m y 1 m de profundidad. El drenaje se obtiene en el fondo del tanque mediante succión. Los cambios de peso se detectan en una balanza, donde un cambio de aproximadamente 900 g de peso corresponde a un cambio de 0,03 mm de agua (Figura 13.9).

El lisímetro de Van Bavel y Myers (1962) es un tipo automático de precisión que consiste de un tanque 1 x 1 x 1 m, el cual pesa aproximadamente 3 toneladas. Los cambios de peso se detectan por medios electrónicos, teniendo una precisión de aproximadamente 10 g ó 0,01 mm de agua. Con este equipo se puede hacer mediciones horarias o aún más frecuentes.

Debido a que el empleo de este tipo de lisímetros resulta en un costo inicial muy alto se han propuesto varios sistemás hidráulicos de pesada. Uno de ellos es mediante flotación cuyo tipo fue anteriormente presentado. En algunos casos se han utilizado bolsas llenas con líquidos, combinado con un sistema eléctrico de detección (Black et al., 1969).

Para mayor información sobre este y otros tipos de lisímetros se recomienda consultar las publicaciones de Pelton (1961), Tanner (1967) y Rosenberg et al. (1968).

13.4. Modelos.

13.4.1. Modelo de Penman

a. Base Teórica

El modelo de Penman combina los mecanismos aerodinámicos de transferencia de vapor con el balance de energía (Penman, 1948). De todas las ecuaciones conocidas como empíricas, la ecuación de Penman es la más precisa para la determinación de la evaporación potencial (Pruit, 1960; Stanhill, 1961).

El modelo de Penman ha sido modificado para condiciones locales en muchos países. Puesto que estas modificaciones son de alcance limitado, en esta sección se presenta la derivación rigurosa de la Ecuación de Penman.

La ecuación de Dalton para evaporación desde una superficie saturada es:

$$LE = (e_s - e)f(u) \qquad (13.14)$$

donde u es la velocidad del viento sobre la superficie, e_s es la presión de vapor saturada a la temperatura de la superficie y e es la presión de vapor del aire sobre la superficie.

Si e_a es la presión de vapor del aire saturado a la temperatura del aire, entonces se puede escribir:

$$LE_a = (e_a - e)/(a) \tag{13.15}$$

Dividiendo la ecuación (13.15) por la ecuación (13.14) se obtiene:

$$E_a/E = (e_a - e)/(e_s - e) \tag{13.16}$$

Sumando y restando e_s al numerador del segundo miembro de la ecuación (13.16), se obtiene:

$$E_a/E = (e_a - e + e_s - e_s)/(e_s - e)$$

y arreglando términos, queda de la siguiente manera:

$$E_a/E = 1 - [(e_s - e_a)/(e_s - e)] \tag{13.17}$$

Como se indicó anteriormente el balance de energía para una superficie horizontal se puede escribir como (Sellers, 1965):

$$R_n - G = LE + H \tag{13.18}$$

Dividiendo la ecuación (13.18) por LE, se obtiene:

$$(R_n - G)/LE = 1 + H/LE \tag{13.19}$$

La relación H/LE se conoce como la relación de Bowen y se designa por B.

B = H/LE (calor sensible/calor latente)

A partir de la ecuación (13.19) y conociendo R_n, G y B se puede obtener el calor latente de evaporación.

$$LE = (R_n - G)/(1 + B) \tag{13.20}$$

Penman supone que G = 0, entonces la ecuación (13.20) se reduce a:

$$LE = R_n/(1 + B) \tag{13.21}$$

Considerando las ecuaciones de transferencia turbulenta para flujo de calor sensible (H) y para flujo de vapor de agua (E), se obtuvo la ecuación (13.10) donde $B = \gamma\ (\Delta\ T/\Delta\ e)$.

La relación de Bowen también se puede escribir como:

$$B = \gamma\ (T_s - T_a)/(e_s - e) \qquad (13.22)$$

Introduciendo la ecuación (13.22) en (13.21) se obtiene:

$$R_n/LE = 1 + \gamma\ [(T_s - T_a)/(e_s - e)] \qquad (13.23)$$

Multiplicando y dividiendo la ecuación (13.23) por $(e_s - e_a)$ y reagrupando términos, queda como sigue:

$$R_n/LE = 1 + \gamma\ [(e_s - e_a)/(e_s - e)]/[(e_s - e_a)/(T_s - T_a)] \qquad (13.24)$$

En la ecuación (13.24) se puede escribir:

$$(e_s - e_a)/(T_s - T_a) = (\Delta e/\Delta T)_{T=T_a} = s \qquad (13.25)$$

donde s es la pendiente de la curva presión de vapor saturada versus temperatura.

Introduciendo la ecuación (13.25) en la ecuación (13.24), se obtiene:

$$R_n = 1 + (\gamma/s)[(e_s - e_a)/(e_s - e)] \qquad (13.26)$$

Combinando las ecuaciones (13.17) y (13.26), se obtiene:

$$R_n/LE = 1 + (\gamma/s)(1 - E_a/E) \qquad (13.27)$$

Operando algebraicamente en la ecuación (13.27), se obtiene:

$$LE = [(s/\gamma)\ R_n + LE_a]/[(s/\gamma + 1)] \qquad (13.28)$$

La ecuación (13.28) es la Ecuación de Penman, donde:

$$E_a = 0{,}35(e_a - e)(0{,}5 + U_2/100) \quad (mm/día) \qquad (13.29)$$

donde e_a es la presión de vapor del aire saturado a la temperatura media del aire (mm Hg), e es la presión de vapor promedio del aire (mm Hg), U_2 es la velocidad promedio del viento en millas/día a una altura de 2 m sobre la superficie y (s/γ) es adimensional.

La Ecuación de Penman (13.28) incluye una contribución debida a la radiación y una contribución aerodinámica, como sigue:

Contribución debida a la radiación = $(s/\gamma) R_n /[(s/\gamma) + 1]$

Término aerodinámico = $LE_a /[(s/\gamma) + 1]$

b.Ejemplos de Cálculos

Caso 1: Se dispone de información de radiación neta.

En Chillán, Chile para un día de Enero se obtuvo la siguiente información:

Temperatura promedio del aire: 20 °C.
Velocidad del viento: 120 millas/día
Humedad relativa: 60 %
Presión barométrica: 1000 mb
Radiación neta: 390 Langley/día (1 Langley = 1 cal/cm^2)

(i).Calcule la densidad de flujo potencial de calor latente en Ly/día y la velocidad de evaporación en mm/día.

(ii).Qué proporción de la evaporación potencial se debe al término de radiación y qué proporción proviene del término aerodinámico?

Cálculo de E_a

Los únicos valores no especificados y que se requieren para el cálculo de E_a son e_a y e. Sin embargo, éstos se determinan a partir de los datos de temperatura y humedad relativa del aire y del Cuadro 13.2.

Del Cuadro 13.2 se obtiene e_a = 17.535 mm Hg cuando T = 20 °C. Además, considerando que humedad relativa = e/e_a se obtiene que:

e = humedad relativa x e_a = 0,6 x 17,535 = 10,52 mm Hg

Luego
$E_a = 0{,}35 (e_a - e)(0{,}5 + U_2/100)$ mm/día
$= 0{,}35 (17{,}535 - 10{,}52)(0{,}5 + 120/100)$
$= 0{,}35 (7{,}0)(1{,}7) = 4{,}165$ mm/día

De la Tabla 4 del apéndice, para una presión barométrica de 1000 mb se obtiene el cuociente $(s/\gamma) = 2{,}17$ para X = 20 °C.

CUADRO 13.2. Presión de saturación de vapor de agua (mm Hg) en función de la temperatura (0–60 °C).

Temp. °C	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	Temp. °C	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
0	4.579	4.647	4.715	4.785	4.855	15	12.788	12.953	13.121	13.290	13.461
1	4.296	4.998	5.070	5.144	5.219	16	13.634	13.809	13.987	14.166	14.347
2	5.294	5.370	5.447	5.525	5.605	17	14.530	14.715	14.903	15.092	15.284
3	5.685	5.766	5.848	5.931	6.015	18	15.477	15.673	15.871	16.071	16.272
4	6.101	6.187	6.274	6.363	6.453	19	16.477	16.685	16.894	17.105	17.319
5	6.543	6.635	6.728	6.822	6.917	20	17.535	17.753	17.974	18.197	18.422
6	7.013	7.111	7.209	7.309	7.411	21	18.650	18.880	19.113	19.349	19.587
7	7.513	7.617	7.722	7.828	7.936	22	19.827	20.070	20.316	20.565	20.815
8	8.045	8.155	8.267	8.380	8.494	23	21.068	21.324	21.583	21.845	22.110
9	8.609	8.727	8.845	8.965	9.086	24	22.377	22.648	22.922	23.198	23.476
10	9.209	9.333	9.458	9.585	9.714	25	23.756	24.039	24.326	24.617	24.912
11	9.844	9.976	10.109	10.244	10.380	26	25.209	25.509	25.812	26.117	26.426
12	10.518	10.658	10.799	10.941	11.085	27	26.739	27.055	27.374	27.696	28.021
13	11.231	11.379	11.528	11.680	11.833	28	28.349	28.680	29.015	29.254	29.697
14	11.987	12.144	12.302	12.462	12.624	29	30.043	30.392	30.745	31.102	31.461

(CONTINUACION CUADRO 13.2).

Temp. C	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	Temp. C	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
30	31.824	32.191	32.561	32.934	33.312	45	71.88	72.62	73.36	74.12	74.88
31	33.695	34.082	34.471	34.864	35.261	46	75.65	76.43	77.21	78.00	78.80
32	35.663	36.068	36.477	36.891	37.308	47	79.60	80.41	81.23	82.05	82.87
33	37.729	38.155	38.584	39.018	39.457	48	83.71	84.56	85.42	86.28	87.14
34	39.898	40.344	40.796	41.251	41.710	49	88.02	88.90	89.79	90.69	91.59
35	42.175	42.644	43.117	43.595	44.078	50	92.51	93.5	94.4	95.3	96.3
36	44.563	45.054	45.549	46.050	46.556	51	97.20	98.2	99.1	100.1	101.1
37	47.067	47.582	48.102	48.627	49.157	52	102.09	103.1	104.1	105.1	106.2
38	49.692	50.231	50.774	51.323	51.879	53	107.20	108.2	109.3	110.4	111.4
39	52.442	53.009	53.580	54.156	54.737	54	112.51	113.6	114.7	115.8	116.9
40	55.324	55.91	56.51	57.11	57.72	55	118.04	119.1	120.3	121.5	122.6
41	58.34	58.96	59.58	60.22	60.86	56	123.80	125.0	126.2	127.4	128.6
42	61.50	62.14	62.80	63.46	64.12	57	129.82	131.0	132.3	133.5	134.7
43	64.80	65.48	66.16	66.86	67.56	58	136.08	137.3	138.5	139.9	141.2
44	68.26	68.97	69.69	70.41	71.14	59	142.60	143.9	145.2	146.6	148.0

Usando la ecuación de Penman (ecuación 13.29) y considerando que 1 mm de evaporación es igual a 58,5 langleys, se obtiene:

LE = [(2,17)(390 Ly/día) + (58,5 Ly)(4,165 mm/día)]/(2,17 + 1)
LE = (846,3 + 243,65)/3,17 = 267 + 76,8 = 343,8 Langley/día

Respuestas:

(i). Densidad de flujo potencial de calor latente = 343,8 Langley/día

Evaporación potencial = (LE/L) = (343,8 Ly/día)/(58,5 Ly/1 mm evap.) = 5,87 mm/día

(ii) Proporción debida al término de radiación = 267/343,8 = 0,77 ó 77 %

Proporción debida al término aerodinámico = 76,8/343,8 = 0,23 ó 23 %

Caso 2: No se Dispone de Información de Radiación Neta.

En este caso se hace necesaria la estimación de la radiación neta a partir de otros parámetros atmosféricos. Si no existe información de radiación neta obtenida por radiómetros neto, ésta se puede estimar preferencialmente a partir de radiación solar. Si tampoco se dispone de esta información se pueden utilizar datos de horas de luz del día y horas de sol (Fitzpatrick and Stern, 1966). El cálculo de evaporación potencial se realiza como en el caso 1.

La radiación neta (R_n) es la diferencia entre la radiación recibida (R_r) y la radiación emitida (R_e). Para estimar la radiación recibida, Penman (1948) obtuvo la siguiente ecuación:

$$R_r = R_A\,(1 - r)[0,18 + 0,55(n/N)] \qquad (13.30)$$

Para el cálculo de la radiación emitida (R_e), obtuvo lo siguiente:

$$R_e = \sigma\, T^4\,(0,56 - 0,092e_d^{1/2})[0,10 + 0,90(n/N)] \qquad (13.31)$$

Luego:

$$R_n = R_r - R_e$$

donde R_n es la radiación neta en Langley/día o mm/día, R_r es la radiación recibida y R_e es la radiación emitida, r es el Albedo (para valores anuales promedios Penman usó 0,05 para superficie de agua libre, 0,10 para suelo desnudo húmedo y 0,20 para vegetación verde).

CUADRO 13.3. Valores promedios diarios de la radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente en mm/día, en función de la latitud (Doorenbos y Pruit, 1975).

	Hemisferio Norte											
LAT.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV	DIC.
50°	3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2
48	4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7
46	4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3
44	5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7
42	5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2
40	6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7
38	6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1
36	7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6
34	7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2
32	8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8
30	8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8*	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3
28	9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8
26	9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3
24	10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7
22	10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2
20	11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7
18	11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1
16	12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6
14	12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0
12	12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5
10	13.2	14.2	15.2	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9
8	13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3
6	13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7
4	14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1
2	14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4
0	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

(CONTINUACION CUADRO 13.3).

		Hemisferio Sur											
LAT.		ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
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
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
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
44		17.8	15.3	11.7	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
42		17.8	15.5	12.2	8.3	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
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
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
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
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
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
30		17.8	16.3	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
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
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
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
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
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
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
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
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		16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
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
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
6		15.8	15.9	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
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
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
0		15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

R_A es el Valor de Angot (cantidad teórica de radiación que se recibiría en la superficie de la tierra en ausencia de atmósfera)(Cuadro 13.3.), n es el número de horas de sol, N es el número de horas de luz del día (largo astronómico del día), σ es la constante de Stefan-Boltzman (2,01 x 10^{-9} mm/día), e_d es la presión de vapor del aire (mm Hg)($e_d = e_s \cdot h_r$), h_r es la humedad relativa, T es la temperatura promedio del período considerado (°K), y T^4 es la función de cuerpo negro (Cuadro 13.4) (Tanner y Robinson, 1959).

13.4.2. Modelo de Thornthwaite

En 1948, Thornthwaite a partir de mediciones en lisímetros y comparaciones con datos de temperatura media mensual del aire encontró la siguiente ecuación de tipo exponencial.

$$ET_p^o = 1,6(10T/I)^a \qquad (13.32)$$

donde ET_p^o es la evapotranspiración potencial no corregida (cm/mes), T es la temperatura media mensual del aire (°C), I es el índice de calor anual dado por $I = \sum i$, e i es el índice de calor mensual dado por

$$i = (T/5)^{1,514} \qquad (13.33)$$

"a" es la función cúbica del índice de calor anual dado por

$$a = 0,675x10^{-6}\, I^3 - 77,1x10^{-6}\, I^2 + 0,01792\, I + 0,49239 \qquad (13.34)$$

Los valores de ET_p^o que se obtienen por el modelo de Thorthwaite son para meses de 30 días y 12 horas de luz por día. Debido a que el número de horas de luz por día cambia con la latitud, y también porque se tienen meses de 31 días, es necesario hacer correcciones. El factor de correcciones (f) tiene la forma siguiente:

$$f = (h/12)(n/30) \qquad (13.35)$$

donde h es el número de horas de luz a la latitud considerada, y n es el número de días del mes considerado.

Con el objeto de simplificar los cálculos con este modelo se han preparado tablas y nomogramas y su uso es el siguiente:

CUADRO 13.4. Valores de la función σT^4 en langley/día y en mm de agua/día en función de la temperatura (°C) (Tanner y Robinson, 1959).

	ly/día					mm agua /día				
°C	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
.0	655.4	657.3	659.2	661.2	663.1	11.206	11.238	11.271	11.304	11.337
1.0	665.1	667.0	668.9	670.9	672.8	11.371	11.404	11.437	11.470	11.504
2.0	674.8	676.8	678.7	680.7	682.7	11.537	11.571	11.605	11.638	11.672
3.0	684.7	686.7	688.6	690.6	692.6	11.706	11.740	11.774	11.808	11.842
4.0	694.6	696.6	698.7	700.7	702.7	11.876	11.911	11.945	11.980	12.014
5.0	704.7	706.7	708.8	710.8	712.9	12.049	12.083	12.118	12.153	12.188
6.0	714.9	717.0	719.0	721.1	723.1	12.223	12.258	12.293	12.328	12.364
7.0	725.2	727.3	729.3	731.4	733.5	12.399	12.434	12.470	12.505	12.541
8.0	735.6	737.7	739.8	741.9	744.0	12.577	12.613	12.649	12.685	12.721
9.0	746.1	748.2	750.4	752.5	754.6	12.757	12.793	12.829	12.866	12.902
10.0	756.8	758.9	761.0	763.2	765.3	12.938	12.975	13.012	13.048	13.085
11.0	767.5	769.7	771.8	774.0	776.2	13.122	13.159	13.196	13.233	13.271
12.0	778.4	780.5	782.7	784.9	787.1	13.308	13.345	13.383	13.420	13.458
13.0	789.3	791.5	793.8	796.0	798.2	13.495	13.533	13.571	13.609	13.647
14.0	800.4	802.7	804.9	807.1	809.4	13.685	13.723	13.761	13.800	13.838
15.0	811.6	813.9	816.1	818.4	820.7	13.877	13.915	13.954	13.993	14.031
16.0	823.0	825.2	827.5	829.8	832.1	14.070	14.109	14.148	14.187	14.227
17.0	834.4	836.7	839.0	841.3	843.6	14.266	14.305	14.345	14.384	14.424
18.0	846.0	848.3	850.6	853.0	855.3	14.464	14.503	14.543	14.583	14.623
19.0	857.6	860.0	862.3	864.7	867.1	14.663	14.703	14.744	14.784	14.825

(CONTINUACION CUADRO 13.4).

	Ly/día					mm agua /día				
°C	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
20.0	869.4	871.8	874.2	876.6	879.0	14.865	14.906	14.946	14.987	15.028
21.0	881.4	883.8	886.2	888.6	891.0	15.069	15.110	15.151	15.192	15.233
22.0	893.4	895.8	898.3	900.7	903.1	15.275	15.316	15.358	15.399	15.441
23.0	905.6	908.0	910.5	912.9	915.4	15.483	15.525	15.567	15.609	15.651
24.0	917.9	920.3	922.8	925.3	927.8	15.693	15.735	15.778	15.820	15.863
25.0	930.3	932.8	935.3	937.8	940.3	15.905	15.948	15.991	16.034	16.077
26.0	942.8	945.3	947.9	950.4	952.9	16.120	16.163	16.206	16.249	16.293
27.0	955.5	958.0	960.6	963.2	965.7	16.336	16.380	16.424	16.467	16.511
28.0	968.3	970.9	973.4	976.0	978.6	16.555	16.599	16.643	16.687	16.732
29.0	981.2	983.8	986.4	989.0	991.6	16.776	16.820	16.865	16.910	16.954
30.0	994.3	996.9	999.5	1002.2	1004.8	16.999	17.044	17.089	17.134	17.179
31.0	1007.4	1010.1	1012.8	1015.4	1018.1	17.225	17.270	17.315	17.361	17.406
32.0	1020.8	1023.4	1026.1	1028.8	1031.5	17.452	17.498	17.544	17.590	17.636
33.0	1034.2	1036.9	1039.6	1042.3	1045.1	17.682	17.728	17.775	17.821	17.867
34.0	1047.8	1050.5	1053.2	1056.0	1058.7	17.914	17.961	18.008	18.054	18.101
35.0	1061.5	1064.2	1067.0	1069.8	1072.6	18.184	18.196	18.243	18.290	18.338
36.0	1075.3	1078.1	1080.9	1083.7	1086.5	18.385	18.433	18.481	18.528	18.576
37.0	1089.3	1092.1	1094.9	1097.8	1100.6	18.624	18.672	18.720	18.769	18.817
38.0	1103.4	1106.3	1109.1	1112.0	1114.8	18.866	18.914	18.963	19.011	19.060
39.0	1117.7	1120.5	1123.4	1126.3	1129.2	18.109	19.158	19.207	19.256	19.306

(CONTINUACION CUADRO 13.4).

°C	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
40.0	1132.1	1135.0	1137.9	1140.8	1143.7	19.355	19.405	19.454	19.504	19.554
41.0	1146.6	1149.5	1152.4	1155.4	1158.3	19.604	19.654	19.704	19.754	19.804
42.0	1161.3	1164.2	1167.2	1170.1	1173.1	19.854	19.905	19.955	20.006	20.057
43.0	1176.1	1179.0	1182.0	1185.0	1188.0	20.107	20.158	20.209	20.261	20.312
44.0	1191.0	1194.0	1197.0	1200.1	1203.1	20.363	20.414	20.466	20.518	20.569
45.0	1206.1	1209.1	1212.2	1215.2	1218.3	20.621	20.673	20.725	20.777	20.829
46.0	1221.3	1224.4	1227.5	1230.5	1233.6	20.881	20.934	20.986	21.039	21.092
47.0	1236.7	1239.8	1242.9	1246.0	1249.1	21.144	21.197	21.250	21.303	21.357
48.0	1252.2	1255.4	1258.5	1261.6	1264.8	21.410	21.463	21.517	21.570	21.624
49.0	1267.9	1271.1	1274.2	1277.4	1280.5	21.678	21.732	21.786	21.840	21.894
50.0	1283.7	1286.9	1290.1	1293.3	1296.5	21.948	22.002	22.057	22.111	22.166
51.0	1299.7	1302.9	1306.1	1309.3	1312.6	22.221	22.276	22.331	22.386	22.441
52.0	1315.8	1319.0	1322.3	1325.5	1328.8	22.496	22.552	22.607	22.663	22.719
53.0	1332.0	1335.3	1338.6	1341.9	1345.2	22.774	22.830	22.886	22.942	22.999
54.0	1348.5	1351.8	1355.1	1358.4	1361.7	23.055	23.111	23.168	23.224	23.281
55.0	1365.0	1368.3	1371.7	1375.0	1378.4	23.338	23.395	23.452	23.509	23.566
56.0	1381.7	1385.1	1388.5	1391.8	1395.2	23.624	23.681	23.739	23.796	23.854
57.0	1398.6	1402.0	1405.4	1408.8	1412.2	23.912	23.970	24.028	24.086	24.145
58.0	1415.6	1419.0	1422.5	1425.9	1429.3	24.203	24.262	24.320	24.379	24.438
59.0	1432.8	1436.2	1439.7	1443.2	1446.6	24.497	24.556	24.615	24.674	24.734

a) Para obtener el índice de calor mensual (i) se utiliza el Cuadro 13.5.

b) La ET_p no corregida (ET_p^*) se obtiene del nomograma y Tabla (Fig. 13.10) para el índice de calor anual (I) calculado. En el nomograma se entra con la temperatura media mensual (T) y se obtiene ET_p^*. Cuando la temperatura es mayor a 27 °C se utiliza la tabla incluida en el mismo nomograma (Figura 13.10).

c) La ET_p corregida se obtiene multiplicando ET_p^* (ET no corregida) por el factor de corrección (f) a la latitud apropiada que se obtiene del Cuadro 13.6.

$$ET_p = ET_p^* \cdot f$$

donde ET_p es la evapotranspiración mensual (cm/mes), ET_p^* es la evapotranspiración mensual no corregida obtenida del nomograma (Figura 13.10) y f es el factor de corrección (Cuadro 13.6).

La ventaja principal de la fórmula de Thornthwaite radica en el hecho que sólo requiere de datos promedios mensuales de temperatura del aire cuya información es fácil de obtener.

Entre las limitaciones del modelo están las siguientes:

a). Temperatura no es un buen indicador de la energía disponible para evapotranspiración.

b). No considera la influencia del viento.

c). No considera efectos de advección de aire frio o caliente.

d) . No sirve para estimar ET_p para períodos cortos de tiempo (días).

e). Obtenida en la región Este de losEstados Unidos por lo que su uso sería adecuado para regiones húmedas.

13.4.3. Modelo de Blaney-Criddle

Este modelo, al igual que el de Thornthwaite, utiliza la temperatura media mensual del aire como parámetro climático principal incluyendo, además, un factor de luminosidad y un coeficiente de cultivo.

Este modelo fue desarrollado en el Oeste de los Estados Unidos por lo que su uso sería adecuado en zonas áridas y semiáridas.

El modelo de Blaney - Criddle tiene la siguiente expresión:

$$ET_r = k\ p\ (0{,}457T + 8{,}13) \qquad (13.36)$$

CUADRO 13.5. Determinación de los valores de T e i en el Modelo de Thornthwaite (Escala Centígrada). $[i = (t/5)^{1,514}]$.

T °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0			0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
1	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.16	0.18	0.20	0.21	0.23
2	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39	0.42	0.44
3	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	0.61	0.63	0.66	0.69
4	0.71	0.74	0.77	0.80	0.82	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97
5	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.16	1.19	1.22	1.25	1.29
6	1.32	1.35	1.39	1.42	1.45	1.49	1.52	1.56	1.59	1.63
7	1.66	1.70	1.74	1.77	1.81	1.85	1.89	1.92	1.96	2.00
8	2.04	2.08	2.12	2.15	2.19	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39
9	2.44	2.48	2.52	2.56	2.60	2.64	2.69	2.73	2.77	2.81
10	2.86	2.90	2.94	2.99	3.03	3.08	3.12	3.16	3.21	3.25
11	3.30	3.34	3.39	3.44	3.48	3.53	3.58	3.62	3.67	3.72
12	3.76	3.81	3.86	3.91	3.96	4.00	4.05	4.10	4.15	4.20
13	4.25	4.30	4.35	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60	4.65	4.70
14	4.75	4.81	4.86	4.91	4.96	5.01	5.07	5.12	5.17	5.22
15	5.28	5.33	5.38	5.44	5.49	5.55	5.60	5.65	5.71	5.76
16	5.82	5.87	5.93	5.98	6.04	6.10	6.15	6.21	6.26	6.32
17	6.38	6.44	6.49	6.55	6.61	6.66	6.72	6.78	6.84	6.90

(CONTINUACION CUADRO 13.5).

T °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
18	6.95	7.01	7.07	7.13	7.19	7.25	7.31	7.37	7.43	7.49
19	7.55	7.61	7.67	7.73	7.79	7.85	7.91	7.97	8.03	8.10
20	8.16	8.22	8.28	8.34	8.41	8.47	8.53	8.59	8.66	8.72
21	8.78	8.85	8.91	8.97	9.04	9.10	9.17	9.23	9.29	9.36
22	9.42	9.49	9.55	9.62	9.68	9.75	9.82	9.88	9.95	10.01
23	10.08	10.15	10.21	10.28	10.35	10.41	10.48	10.55	10.62	10.68
24	10.75	10.82	10.89	10.95	11.02	11.09	11.16	11.23	11.30	11.37
25	11.44	11.50	11.57	11.64	11.71	11.78	11.85	11.92	11.99	12.06
26	12.13	12.21	12.28	12.35	12.42	12.49	12.56	12.63	12.70	12.78
27	12.85	12.92	12.99	13.07	13.14	13.21	13.28	13.36	13.43	13.50
28	13.58	13.65	13.72	13.80	13.87	13.94	14.02	14.09	14.17	14.24
29	14.32	14.39	14.47	14.54	14.62	14.69	14.77	14.84	14.92	14.99
30	15.07	15.15	15.22	15.30	15.38	15.45	15.53	15.61	15.68	15.76
31	15.84	15.92	15.99	16.07	16.15	16.23	16.30	16.38	16.46	16.54
32	16.62	16.70	16.78	16.85	16.93	17.01	17.09	17.17	17.25	17.33
33	17.41	17.49	17.57	17.65	17.73	17.81	17.89	17.97	18.05	18.13
34	18.22	18.30	18.38	18.46	18.54	18.62	18.70	18.79	18.87	18.95
35	19.03	19.11	19.20	19.28	19.36	19.45	19.53	19.61	19.69	19.78
36	19.86	19.95	20.03	20.11	20.20	20.28	20.36	20.45	20.53	20.62
37	20.70	20.79	20.87	20.96	21.04	21.13	21.21	21.30	21.38	21.47
38	21.56	21.64	21.73	21.81	21.90	22.99	22.07	22.16	22.25	22.33
39	22.42	22.51	22.59	22.68	22.77	22.86	22.95	23.03	23.12	23.21

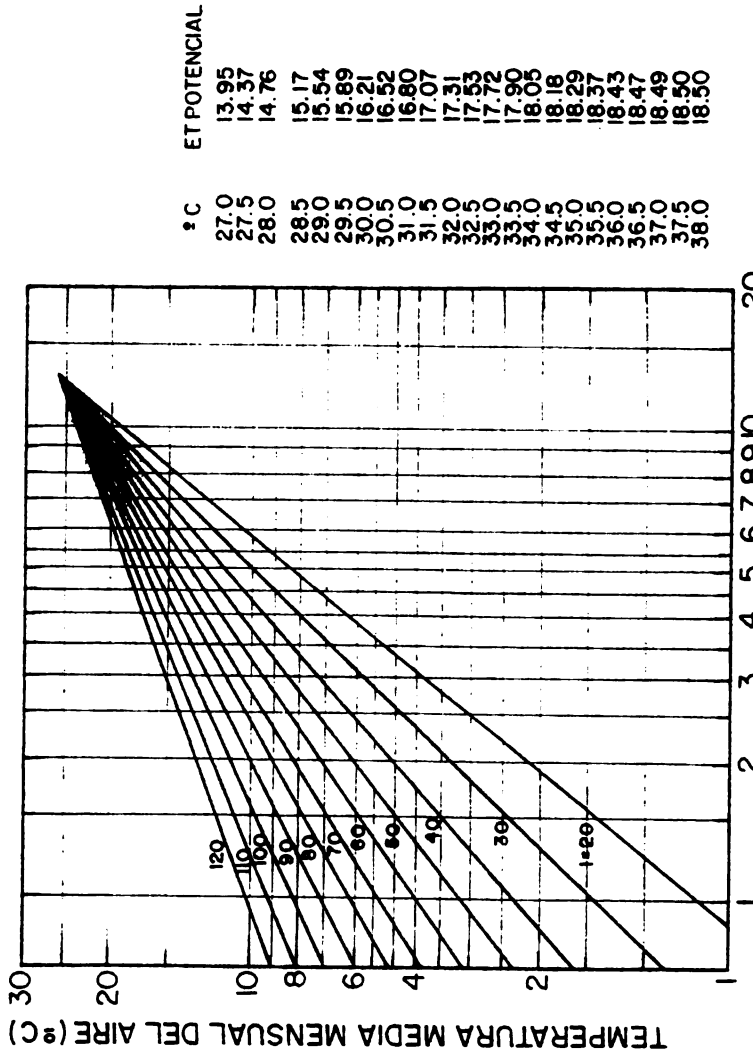


FIGURA 13.10. Nomograma y Tabla para determinar la evapotranspiracion según el Modelo de Thornthwaite.

CUADRO 13.6. Factores de corrección de la evapotranspiración potencial mensual calculada por el Modelo de Thornthwaite, para ajustarlo al número de días del mes y al número de horas de luz del día (Burgos y Vidal, 1951).

Latitud Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEP	OCT	NOV	DIC
15° N	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
10° N	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5° N	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
Ecuador	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1 01	1,04
5° S	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10° S	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15° S	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20° S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22° S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23° S	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24° S	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25° S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26° S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27° S	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28° S	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29° S	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30° S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31° S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32° S	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23
33° S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
34° S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,16	1,24

donde ET_r es la evapotranspiración real (mm/mes), k es el coeficiente de uso consuntivo mensual del cultivo (adimensional) (Cuadro 13.7), p es el porcentaje mensual de horas luz de día durante el año (Cuadro 13.8), T es la temperatura media mensual del aire (°C).

Cuando el coeficiente de cultivo k de la fórmula anterior es igual a 1 se obtiene la evapotranspiración potencial del mes considerado.

En el Cuadro 13.7. se incluyen los coeficientes mensuales, k, para algunos cultivos. Dependiendo de la región y períodos de siembra los valores de k deberán ser ajustados, y en otros casos, definidos.

El porcentaje mensual de horas de luz de día (p) cambia con la latitud y estación del año. Los valores de p para diferentes meses y latitudes norte y sur se presentan en el Cuadro 13.8.

13.4.4. Modelo de Blaney-Morin

Este modelo es idéntico al de Blaney-Criddle, al cual se le ha agregado otro parámetro climático. Este modelo tiene la siguiente forma:

$$ET_r = k\,p\,(0,457T + 8,13)(1,14 - 0,01h_r) \qquad (13.37)$$

donde h_r es el promedio mensual de humedad relativa (%).

13.4.5. Modelo de Makkink

Este modelo requiere de valores de radiación solar y temperatura del aire y fue derivado en Holanda usando medidas lisimétricas de evapotranspiración potencial de pasto.

Este modelo es de clima húmedo y tiene la siguiente forma:

$$ET_p = 0,61R_s[s/(s+\gamma)] - 0,12 \qquad (13.38)$$

donde ET_p es la evapotranspiración potencial (mm/día), R_s es la radiación solar expresada en mm/día, s es la pendiente de la curva presión de vapor saturado versus temperatura y γ es la constante sicrométrica (mb/°C).

Cuando no se dispone de información de radiación solar (R_s), se puede estimar por la fórmula siguiente:

$$R_s = R_A\,(0,18 + 0,55n/N) \qquad (13.39)$$

CUADRO 18.7. Coeficientes "K" mensuales sugeridos para ser usados en el cálculo de la evapotranspiración mediante la fórmula de Blaney y Criddle (Blaney y Criddle, 1962).

CULTIVO	K Coeficiente estacional	(k) máximo mensual
Alfalfa	0,85	0,95 - 1,25
Algodón	0,70	0,75 - 1,10
Arroz	1,70	1,10 - 1,30
Cereales finos	0,75	0,85 - 1,00
Frutales cítricos	0,60	0,65 - 0,75
Frutales de hoja caduca	0,65	0,70 - 0,95
Habas	0,65	0,75 - 0,85
Maíz	0,75	0,80 - 1,20
Papas	0,70	0,85 - 1,00
Praderas Naturales	0,75	0,85 - 1,15
Remolacha azucarera	0,70	0,85 - 1,00

CUADRO 13.8. Porcentaje mensual de horas de luz del día, durante el año, para las latitudes de 0 °C a 50 °C.

Lat. Norte Lat. Sur	JUL ENE	AGO FEB	SET MAR	OCT ABR	NOV MAY	DIC JUN	ENE JUL	FEB AGO	MAR SET	ABR OCT	MAY NOV	JUN DIC
0°	8,49	7,67	8,49	8,22	8,49	8,22	8,49	8,49	8,19	8,49	8,22	8,491
2°	8,55	7,71	8,49	8,19	8,44	8,17	8,43	8,44	8,19	8,52	8,27	8,551
4°	8,64	7,76	8,50	8,17	8,39	8,08	8,20	8,41	8,19	8,56	8,33	8,651
6°	8,71	7,81	8,50	8,12	8,30	8,00	8,19	8,37	8,18	8,59	8,38	8,741
8°	8,79	7,84	8,51	8,11	8,24	7,91	8,13	8,32	8,18	8,62	8,47	8,841
10°	8,85	7,86	8,52	8,09	8,18	7,84	8,11	8,28	8,18	8,65	8,52	8,901
12°	8,91	7,91	8,53	8,06	8,15	7,79	8,08	8,26	8,17	8,67	8,58	8,951
14°	8,97	7,97	8,54	8,03	8,07	7,70	7,08	8,19	8,16	8,69	8,65	9,011
16°	9,09	8,02	8,56	7,98	7,96	7,57	7,94	8,14	8,14	8,76	8,72	9,171
18°	9,18	8,06	8,57	7,93	7,99	7,50	7,88	8,90	8,14	8,80	8,80	9,241
20°	9,25	8,09	8,58	7,92	7,83	7,41	7,73	8,05	8,13	8,83	8,85	9,321
22°	9,36	8,12	8,58	7,89	7,74	7,30	7,76	8,03	8,13	8,86	8,90	9,381
24°	9,44	8,17	8,59	7,87	7,60	7,24	7,58	7,99	8,12	8,89	8,96	9,471

(CONTINUACION CUADRO 18.8).

Lat. Norte / Lat. Sur	JUL / ENE	AGO / FEB	SET / MAR	OCT / ABR	NOV / MAY	DIC / JUN	ENE / JUL	FEB / AGO	MAR / SET	ABR / OCT	MAY / NOV	JUN / DIC
26°	9,52	8,28	8,00	7,81	7,56	7,07	7,49	7,87	8,11	8,94	9,10	9,61
28°	9,61	8,31	8,61	7,79	7,49	6,99	7,40	7,85	8,10	8,97	9,19	9,74
30°	9,69	8,33	8,63	7,75	7,43	6,94	7,30	7,80	8,09	9,00	9,24	9,80
32°	9,76	8,36	8,64	7,70	7,39	6,85	7,20	7,73	8,08	9,04	9,31	9,87
34°	9,88	8,41	8,65	7,68	7,30	6,73	7,10	7,69	8,06	9,07	9,38	9,99
36°	10,06	8,53	8,67	7,61	7,10	6,59	6,99	7,59	8,06	9,15	9,51	10,21
38°	10,41	8,61	8,68	7,59	7,03	6,46	6,87	7,51	8,05	9,19	9,60	10,34
40°	10,24	8,65	8,70	7,54	6,96	6,33	6,73	7,46	8,04	9,23	9,69	10,42
42°	10,39	8,72	8,71	7,49	6,85	6,20	6,60	7,39	8,01	9,27	9,79	10,57
44°	10,52	8,81	7,72	7,44	6,73	6,04	6,45	7,30	8,00	9,34	9,91	10,72
46°	10,68	8,88	8,73	7,39	6,61	5,87	6,30	7,21	7,98	9,41	10,03	10,90
48°	10,85	8,98	8,76	7,32	6,45	5,69	6,13	7,12	7,96	9,47	10,17	11,09
50°	11,03	9,06	8,77	7,25	6,31	5,48	5,98	7,03	7,95	9,53	10,32	11,30

donde R_A es el valor de Angot o radiación extraterrestre (Radiación que se recibiría en la superficie de la tierra en la ausencia de atmósfera, Cuadro 13.3), n es el número actual de horas de sol, y N es el número máximo de horas de luz del día (Cuadro 13.9).

13.4.6. Modelo de Papadakis

Este modelo se basa en el uso de valores de déficit de saturación lo cual comprende tanto la temperatura como la humedad relativa.

El modelo tiene la siguiente forma:

$$ET_p = 0,5625\ (e_{mas} - e_{mín} - 2) \qquad (13.40)$$

donde ET_p es la evapotranspiración potencial en mm/día, e_{mas} es la presión de saturación de vapor promedio de los máximos diarios (mb) y $e_{mín}$ es la presión de saturación de vapor promedio de los mínimos diarios (mb).

13.4.7. Modelo de García-López

Este modelo se derivó en base a la relación encontrada entre la ET_p medida en seis estaciones netamente tropicales, dentro del rango latitudinal 15° N y 15° S, y está basado en la influencia del déficit de saturación de vapor y la temperatura sobre la evapotranspiración.

Como es difícil obtener los valores de déficit de saturación de vapor se calculan a partir de la temperatura media y la humedad relativa media. El modelo tiene la siguiente forma:

$$ET_p = 1,21x10^N\ (1 - 0,01HR) + 0,21T - 2,30 \qquad (13.41)$$

en la cual N = 7,45 T/(234,7 + T)

donde ETp es la evapotranspiración potencial (mm/día), T es la temperatura media (°C) y HR es la humedad relativa media (%).

Con el objeto de simplificar el uso de esta fórmula, García y López (1970) prepararon una tabla (Cuadro 13.10) que da los valores de ET_p en forma directa, sólo conociendo T y HR.

13.4.8. Modelo de Hargreaves

El modelo de Hargreaves fue derivado considerando la temperatura media, la humedad relativa media al mediodía, y la duración del día lo cual

CUADRO 13.9. Duración máxima de horas de luz del día para los diferentes meses en función de la latitud (Smithsonian Meteorological Tables, 1951).

Latitud Norte	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Sur	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
50°	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48°	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46°	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44°	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42°	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35°	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30°	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	1.00	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25°	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20°	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5°	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

CUADRO 13.10. Valores de ETP en mm/día para diferentes combinaciones de temperatura y humedad relativa según el Modelo de García-López.

	Humedad relativa																			
°C	40.00	42.00	44.00	46.00	48.00	50.00	52.00	54.00	56.00	58.00	60.00	62.00	64.00	66.00	68.00	70.00	72.00	74.00	76.00
15.00	2.86	2.79	2.72	2.66	2.59	2.52	2.45	2.38	2.32	2.25	2.18	2.11	2.05	1.98	1.91	1.84	1.77	1.71	1.64
15.50	3.03	2.96	2.45	2.82	2.75	2.68	2.61	2.54	2.47	2.40	2.33	2.62	2.19	2.12	2.05	1.98	1.91	1.84	1.77
16.00	3.20	3.13	2.61	2.99	2.91	2.84	2.77	2.70	2.62	2.55	2.48	2.41	2.34	2.26	2.19	2.12	2.05	1.97	1.90
16.50	3.37	3.30	2.77	3.15	3.08	3.00	2.93	2.86	2.78	2.70	2.63	2.56	2.48	2.41	2.34	2.26	2.13	2.10	2.03
17.00	3.55	3.48	3.40	3.32	3.25	3.17	3.09	3.02	2.94	2.86	2.78	2.71	2.63	2.55	2.48	2.40	2.32	2.24	2.17
17.50	3.73	3.65	3.57	3.49	3.42	3.33	3.25	3.18	3.10	3.03	2.93	2.86	2.78	2.70	2.62	2.54	2.46	2.38	2.30
18.00	3.91	3.83	3.75	3.67	3.59	3.50	3.42	3.34	3.26	3.18	3.09	3.01	2.93	2.85	2.77	2.68	2.60	2.52	2.44
18.50	4.09	4.01	3.93	3.84	3.76	3.67	3.59	3.50	3.42	3.34	3.25	3.16	3.08	3.00	2.91	2.82	2.74	2.66	2.57
19.00	4.28	4.19	4.11	4.02	3.93	3.85	3.76	3.67	3.58	3.50	3.41	3.32	3.23	3.15	3.06	4.97	2.88	2.80	2.71
19.50	4.47	4.38	4.29	4.20	4.16	4.02	3.93	3.84	3.75	3.66	3.57	3.48	3.38	3.30	3.21	3.11	3.02	2.94	2.85
20.00	4.66	4.57	4.47	4.38	4.29	4.19	4.10	4.01	3.92	3.82	3.73	3.64	3.54	3.45	3.36	3.26	3.17	3.08	2.99
20.50	4.85	4.76	4.66	4.56	4.47	4.37	4.27	4.18	4.08	3.99	3.89	3.80	3.70	3.60	3.51	3.41	3.31	3.22	3.12
21.00	5.05	4.95	4.35	4.75	4.65	4.55	4.45	4.35	4.25	4.16	4.06	3.96	3.86	3.76	3.66	3.56	3.46	3.36	3.26
21.50	5.24	5.14	5.04	4.94	4.83	4.73	4.63	4.53	4.42	4.33	4.22	4.12	4.02	3.91	3.81	3.71	3.61	3.50	3.40
22.00	5.44	5.34	5.23	5.13	5.02	4.92	4.81	4.71	4.60	4.50	4.39	4.28	4.18	4.01	3.97	3.86	3.76	3.65	3.55
22.50	5.64	5.54	5.43	5.32	5.21	5.10	4.99	4.89	4.77	4.67	4.56	4.45	4.34	4.23	4.12	4.01	3.90	3.80	3.69

(CONTINUACION CUADRO 13.10).

	Humedad relativa																		
°C	40.00	42.00	44.00	46.00	48.00	50.00	52.00	54.00	56.00	58.00	60.00	62.00	64.00	66.00	68.00	70.00	72.00	74.00	76.00
23.00	5.85	5.74	5.63	5.51	5.40	5.29	5.18	5.07	4.95	4.84	4.73	4.62	4.51	4.40	4.28	4.17	4.06	3.95	3.84
23.50	6.06	5.94	5.83	5.71	5.59	5.48	5.36	5.25	5.13	5.02	4.90	4.79	4.67	4.56	4.44	4.32	4.21	4.10	3.98
24.00	6.27	6.15	6.03	5.91	5.79	5.67	5.55	5.43	5.32	5.20	5.08	4.96	4.84	4.72	4.60	4.48	4.37	4.25	4.13
24.50	6.48	6.36	6.23	6.11	5.99	5.86	5.74	5.62	5.50	5.38	5.25	5.13	5.01	4.89	4.76	4.64	4.52	4.40	4.28
25.00	6.69	6.57	6.44	6.32	6.19	6.06	5.94	5.81	5.69	5.56	5.43	5.31	5.18	5.06	4.93	4.80	4.68	4.55	4.43
25.50	6.91	6.78	6.65	6.52	6.39	6.00	6.13	6.00	5.87	5.74	5.61	5.48	5.35	5.23	5.09	4.96	4.83	4.70	4.58
26.00	7.13	7.00	6.87	6.73	6.60	6.26	6.33	6.20	6.06	5.98	5.80	5.66	5.53	5.40	5.26	5.13	4.99	4.86	4.73
26.50	7.36	7.22	7.08	6.94	6.81	6.47	6.53	6.39	6.25	6.12	5.98	5.84	5.70	5.57	5.43	5.29	5.10	5.01	4.88
27.00	7.59	7.45	7.30	7.16	7.02	6.67	6.74	6.59	6.45	6.31	6.17	6.03	5.90	5.74	5.60	5.46	5.32	5.17	5.03
27.50	7.82	7.67	7.52	7.33	7.23	6.88	6.94	6.79	6.65	6.50	6.36	6.21	6.06	5.92	5.77	5.63	5.48	5.33	5.18
28.00	8.05	7.90	7.75	7.60	7.45	7.09	7.15	7.00	6.85	6.70	6.55	6.40	6.25	6.10	5.95	5.80	5.65	5.49	5.34
28.50	8.29	8.10	7.98	7.82	7.67	7.30	7.36	7.21	7.05	6.90	6.74	6.59	6.43	6.26	6.12	5.97	5.81	5.65	5.50
29.00	8.53	8.37	8.21	8.05	7.89	7.51	7.57	7.42	7.26	7.10	6.94	6.78	6.62	6.46	6.30	6.14	5.98	5.82	5.66
29.50	8.77	8.61	8.45	8.28	8.12	7.73	7.79	7.63	7.46	7.30	7.13	6.97	6.81	6.64	6.48	6.31	6.15	5.98	5.82
30.00	9.02	8.86	8.69	8.52	8.35	7.95	8.01	7.84	7.67	7.50	7.33	7.17	7.00	6.83	6.66	6.49	6.32	6.15	5.98

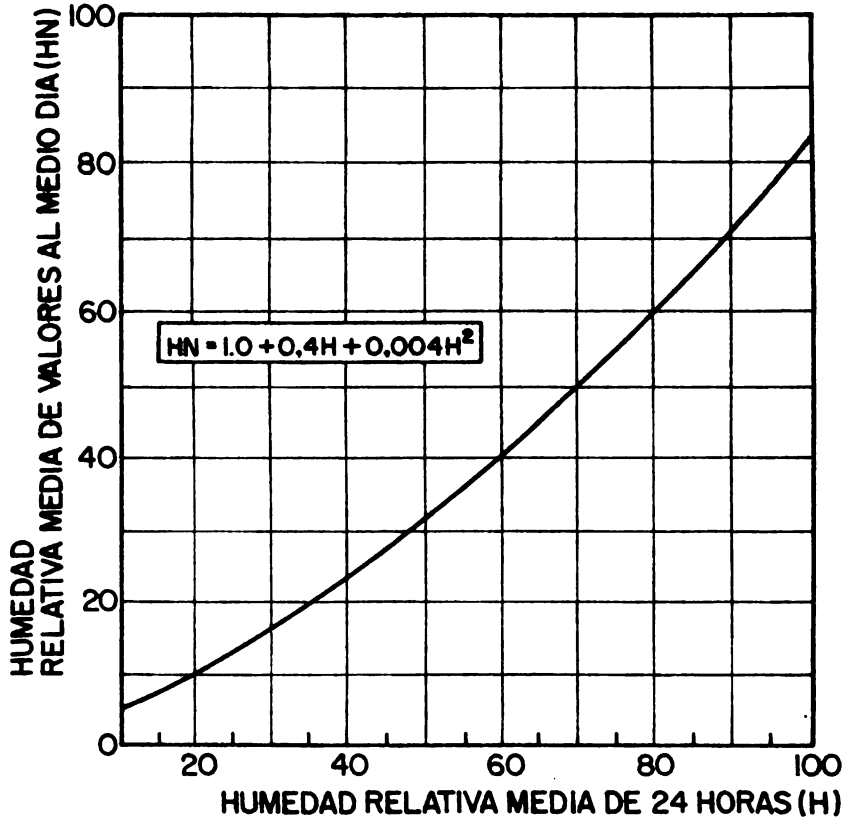


FIGURA 13.11. Relación entre humedad relativa media diaria y la humedad relativa media al mediodía (Al-Barrak, 1964).

depende de la latitud. Se incluye también un coeficiente para tener en cuenta el efecto del cultivo.

El modelo tiene la siguiente expresión:

$$ET_r = 17{,}37\ k\ d\ T\ (1{,}0 - 0{,}01 h_r) \qquad (13.42)$$

donde ET_r es la evapotranspiración real (mm/mes), k es el coeficiente empírico de cultivo, d es el coeficiente mensual de duración del día. Este coeficiente k está relacionado con el coeficiente p de Blaney - Criddle de la siguiente forma: d = 0,12 p; T es la temperatura media mensual y h_r es la humedad relativa media al mediodía.

CUADRO 13.11. Valores del coeficiente k de Hargreaves (1976).

Estación de crecimiento %	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F	Grupo G	Arroz
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.20	0.15	0.12	0.00	1.00	0.60	0.55	0.90
10	0.36	0.27	0.22	0.15	1.00	0.60	0.60	0.92
15	0.50	0.38	0.30	0.19	1.00	0.60	0.65	0.95
20	0.64	0.48	0.38	0.27	1.00	0.60	0.70	0.98
25	0.75	0.56	0.45	0.33	1.00	0.60	0.75	1.00
30	0.84	0.63	0.50	0.40	1.00	0.60	0.80	1.03
35	0.92	0.69	0.55	0.46	1.00	0.60	0.85	1.06
40	0.97	0.73	0.58	0.52	1.00	0.60	0.90	1.08
45	0.99	0.74	0.60	0.58	1.00	0.60	0.95	1.10

Grupo A: frijol, maíz, algodón, papas, remolacha azucarera y tomates
Grupo B: dátiles, olivo, duraznos, ciruelas, nogal
Grupo C: melón, cebada, zanahorias, vides y almendras
Grupo D: espárragos, cebada, apio, lino, avena, trigo y otros cereales menores y sorgo granífero
Grupo E: pasto pangola, trébol, huertos con cultivos de cobertura, bananas y plátanos
Grupo F: naranjo, limón y toronja
Grupo G: caña de azúcar y alfalfa

(CONTINUACION CUADRO 13.11).

Estación de crecimiento %	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F	Grupo G	Arroz
50	1.00	0.75	0.60	0.65	1.00	0.60	1.00	1.00
55	1.00	0.75	0.60	0.65	1.00	0.60	1.00	1.00
60	0.99	0.74	0.60	0.77	1.00	0.60	1.00	1.00
65	0.96	0.72	0.58	0.82	1.00	0.60	0.95	1.00
70	0.91	0.68	0.55	0.88	1.00	0.60	0.90	1.05
75	0.85	0.64	0.51	0.90	1.00	0.60	0.85	1.00
80	0.75	0.56	0.45	0.90	1.00	0.60	0.80	0.95
85	0.60	0.45	0.36	0.80	1.00	0.60	0.75	0.90
90	0.46	0.35	0.28	0.70	1.00	0.60	0.70	0.85
95	0.28	0.21	0.17	0.60	1.00	0.60	0.55	0.80
100	0	0	0	0	0	0	0	0

Grupo A: frijol, maíz, algodón, papas, remolacha azucarera y tomates
Grupo B: dátiles, olivo, duraznos, ciruelas, nogal
Grupo C: melón, cebada, zanahorias, vides y almendras
Grupo D: espárragos, cebada, apio, lino, avena, trigo y otros cereales menores y sorgo granífero
Grupo E: pasto pangola, trébol, huertos con cultivos de cobertura, bananas y plátanos
Grupo F: naranjo, limón y toronja
Grupo G: caña de azúcar y alfalfa

Los datos de h_r normalmente disponibles corresponden a promedios diarios. Dado que se requieren datos medios al mediodía, Al-Barrak (1964) obtuvo una curva que relaciona ambas medidas, la cual se presenta en la Figura 13.11.

Los valores del coeficiente empírico k se presentan en el Cuadro 13.11 y se han expresado en función del porcentaje de la época de crecimiento para varios cultivos.

13.4.9. Modelo de Jensen-Haise

El modelo de Jensen-Haise definido para estimar la evapotranspiración potencial considera los parámetros climáticos de radiación solar y la temperatura media del aire.

Este modelo tiene la siguiente forma:

$$ET_p = (0,078 + 0,0252)R_s \qquad (13.42)$$

donde ET_p es la evapotranspiración potencial (mm/día), T es la temperatura media (°C), R_s es la radiación solar promedio del período correspondiente expresada en mm/día (Para evaporar 1 mm de agua se necesitan 58,5 Langleys de energía; 1 Langley = 1 cal/cm^2).

13.4.10. Modelo de Grassi-Christiansen

Este modelo incluye la radiación teórica al tope de la atmósfera, nubosidad, temperatura y un factor de cultivo (Grassi, 1968).

El modelo tiene la siguiente forma:

$$ET_p = 5,46\, C_R\, C_N\, C_T\, C_{TD} \quad (mm/dia) \qquad (13.44)$$

donde cada uno de los coeficientes se determina por ecuaciones individuales.

$$C_R = 0,1824 + 0,0575R \qquad (13.45)$$

$$C_N = 1,15 - 0,05N \qquad (13.46)$$

$$C_T = 0,62081 + 0,02633\,T - 36,82 \times 10^{-5}\,T^2 \qquad (13.47)$$

$$C_{TD} = 0,9361 + 0,00767\,TD \qquad (13.48)$$

donde ET_p es la evapotranspiración potencial (mm/día), C_R es el coeficiente de radiación (adimensional), R es la radiación teórica al tope de la atmósfera, C_N es el coeficiente de nubosidad (adimensional), N es la nubosidad expresada en décimos, C_T es el coeficiente de temperatura (adimensional), T es la temperatura (°C), y C_{TD} es el coeficiente de diferencia de temperatura (adimensional).

La evapotranspiración real de un cultivo se puede obtener introduciendo en la ecuación (13.44) un coeficiente del ciclo vegetativo y un factor de cultivo. La ecuación es la siguiente:

$$ET_r = ET_p.C_{V_e}.F \quad (mm/dia) \qquad (13.49)$$

donde ET_r es la evapotranspiración real (mm/día), ET_p es la evapotranspiración potencial (mm/día) obtenida con la ecuación (13.44), C_{V_e} es el coeficiente del ciclo vegetativo (adimensional) y F es el factor de cultivo.

El coeficiente C_{V_e} es determinado por la siguiente relación:

$$C_{V_e} = 0,0942 + 0,02774\,V_e - 0,0002126\,V_e^2 \qquad (13.50)$$

donde V_e es el porcentaje de la duración del ciclo vegetativo.

Los autores han hecho algunas simplificaciones con el objeto de utilizar un Nomograma (Figura 13.12). Este nomograma da un valor de ET_r no corregido (ecuación 13.49) donde se elimina el coeficiente de diferencia de temperatura (C_{TD}) y el coeficiente C_T (ecuación 13.47) se resuelve en base a una ecuación lineal (se elimina el término T^2).

El valor que sale del Nomograma es ET_r^* (no corregida). Para obtener ET_r se multiplica ET_r^* por el factor F del cultivo.

$$ET_r = ET_r^*.F \qquad (13.51)$$

donde ET_r es la evapotranspiración real del cultivo (mm/día), ET_r^* es la evapotranspiración real del cultivo obtenida por el Nomograma (Figura 13.12) y F es el factor del cultivo (Cuadro 13.12).

13.4.11. Modelo de Turc

Este modelo expresa el poder evaporante del aire como una función de la temperatura media y radiación solar.

El modelo tiene la forma siguiente:

$$ET_p = 0,013\ T\ (R_s + 50)/(T + 15) \qquad (13.52)$$

donde ET_p es la evapotranspiración potencial (mm/día), T es la temperatura media (°C), y R_s es la radiación solar (Langley/día).

Cuando el poder evaporante del aire es muy alto, es decir, bajas humedades relativas, se introduce un factor que incluye esta situación. Entonces cuando la humedad relativa es menor de 50 %, la fórmula (13.51) debe multiplicarse por el siguiente factor (f):

$$f = [1 + (50 - h_r)/70] \qquad (13.53)$$

donde h_r es la humedad relativa (%)

CUADRO 13.12. Valores de F para diferentes cultivos.

Cultivo	F
Alfalfa	1,00(*)
Algodón	1,06
Avena	0,89
Cebolla	1,01
Frijol	0,96
Maíz	1,00
Manzana	1,02(*)(**)
Papas	1,02(*)
Remolacha azucarera	1,00
Tomate	0,82
Vid	0,73(*)(**)

(*) Debe tomarse C_v = 1,00 (**) Frutales formados

13.4.12. Representatividad de los Resultados de los Modelos

Los modelos normalmente son derivados para un lugar determinado, a través de calibraciones con datos obtenidos en lisímetros o por medio de balances de energía. Mediante un proceso de correlaciones y ajustes se separan los parámetros climáticos más adecuados que representan mejor las condiciones evaporantes del área en estudio. El uso de modelos derivados para una latitud de características definidas no siempre da resultados satisfactorios en otros lugares de la misma latitud.

En la Figura 13.13 se presentan los resultados de evapotranspiración potencial obtenidos por Millar (1975) con varios modelos para una región semiárida en la latitud 9°26' S. La información obtenida por los modelos es comparada con la evaporación de tanque clase A.

El modelo de Blaney y Criddle fue derivado en una región semiárida y por consiguiente, a priori, podría ser usada en otras regiones similares. En la Figura 13.13, se observa que los datos obtenidos mediante el modelo de Blaney y Criddle son marcadamente inferiores a los valores de evaporación de tanque. Por otra parte, se deduce que los datos del modelo de Blaney y Criddle no acusan las variaciones estacionales, permaneciendo entre 5 y 6 mm/día a través del año, en cambio, la evaporación del tanque fluctuó entre 4 y 10 mm/día. En este caso, el mes de mayor demanda es setiembre con una media de 10 mm/día de evaporación según el tanque, y los datos obtenidos con diferentes modelos varían entre 4 mm/día (Thornthwaite) y 9 mm/día (Hargreaves). Para esta región, los modelos de Hargreaves, Jensen Haise y García–López merecen un estudio más detallado por acusar las variaciones del tanque de evaporación. Con algún ajuste, estos modelos podrían ser los más indicados para estimar evapotranspiración potencial.

En tres regiones tropicales, Legarda y Forsythe (1972) compararon los modelos de Blaney–Criddle, García–López, Grassi–Christiansen, Holdridge, Thornthwaite, Papadakis y Van Bavel–Penman, encontrando que los modelos de García–López, Papadakis y Van Bavel–Penman eran los que describían mejor las características de evaporación de la región estudiada.

La Figura 13.14 muestra la comparación de varios modelos en una región templada de clima marítimo en la latitud 36° S (Millar, 1973, no publicado). La variación mensual de evaporación a través del año es de 0,5 a 7,7 mm/día. En el mes de mayor demanda, enero, los modelos indican valores de evapotranspiración potencial entre 8,35 mm/día (Blaney–Morin) y 8,72 mm/día (Hargreaves). Para esta latitud y condiciones climáticas, las fórmulas de Jensen–Haise y Hargreaves fueron las que más se ajustaron a los valores y variaciones del tanque de evaporación, que en este caso se utilizó como indi-

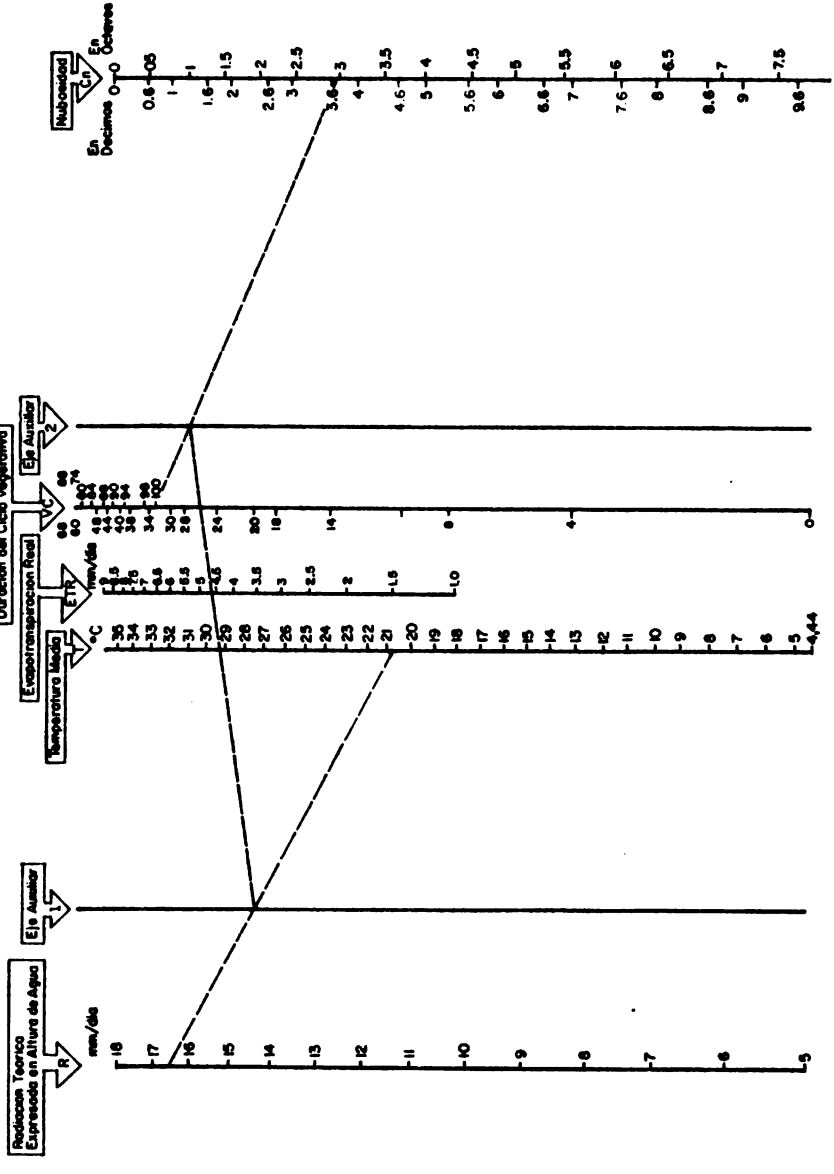


FIGURA 18.12. Nomograma para estimar la evapotranspiración de los cultivos por el Modelo de Grassi-Christiansen.

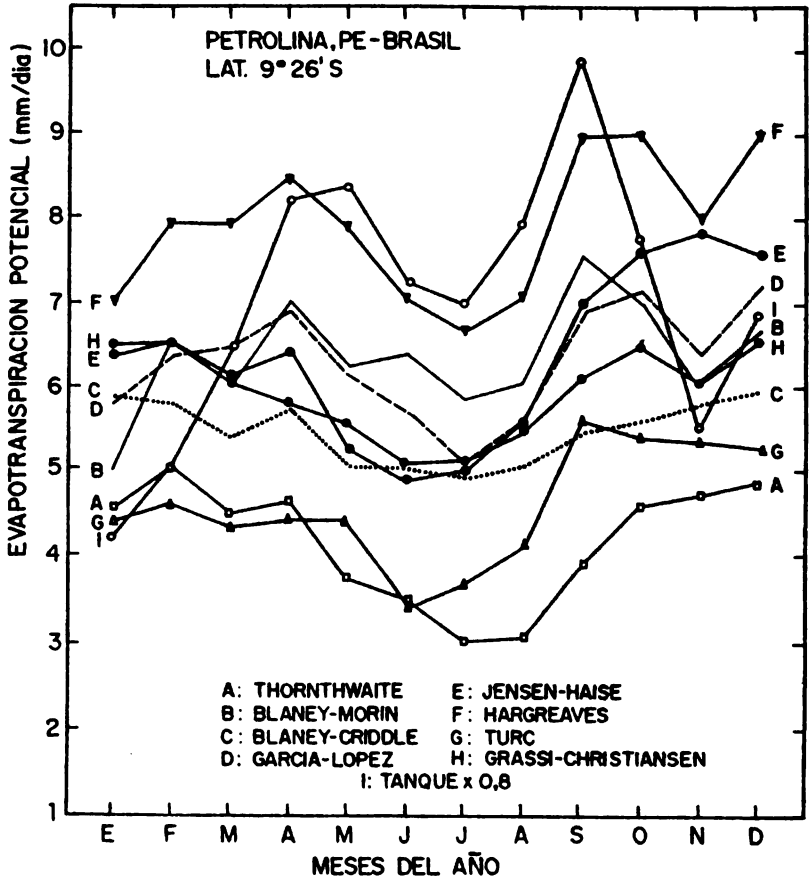


FIGURA 13.13. Evapotranspiración potencial obtenida con varios modelos para una región semiárida (Millar, 1975).

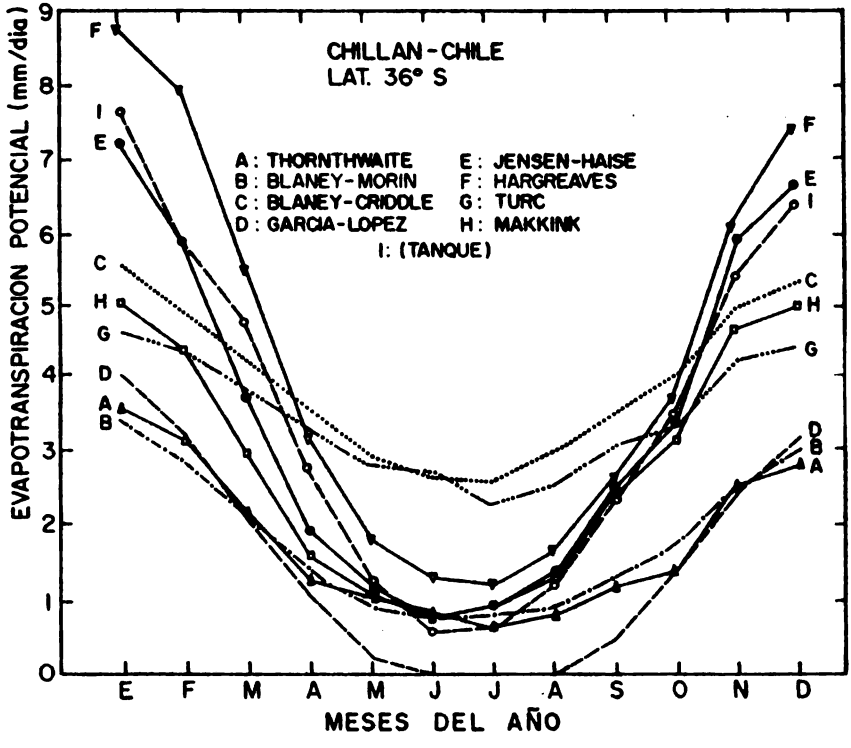


FIGURA 13.14. Evapotranspiración potencial obtenida con varios modelos para una región templada (36° latitud sur) (Millar, 1973).

cador de las variaciones de evaporación por integrar los factores de radiación y aerodinámicos del proceso de evaporación.

En la Figura 13.15 se incluyen los datos de varios modelos para una región semiárida del Perú (Dulá, 1976).

En general, los valores obtenidos por algunos modelos respecto de la bandeja clase A, indican discrepancias que van de 200 a 900 % en los meses de mayor demanda. Debido a este los modelos no se pueden usar indiscriminadamente sin previo conocimiento de su representatividad.

13.5. Tanque o Bandeja de Evaporación.

Este tipo de instrumento permite estimar la evaporación de la superficie del agua y la evaporación de suelos y vegetación a través de correlaciones con valores de evaporación obtenidos por otros métodos más confiables. Existen otros instrumentos similares, llamados atmómetros los cuales consisten en superficies porosas y siempre húmedas. Estos aparatos no se discuten en este libro, recomendándose al lector recurrir a publicaciones de Tanner (1967) y Chang (1968) para mayor información.

La evaporación de tanque es un proceso similar a la evaporación de suelos y vegetación ya que integra, prácticamente, todos los factores climáticos que intervienen en el proceso. Es un procedimiento bastante confiable especialmente en programaciones de riego de cultivos, pero lamentablemente se trata de una información escasa ya que se mide sólo en estaciones agrometeorológicas de primera categoría.

Los valores de evaporación obtenidos con estos instrumentos para períodos de tiempo apropiados están altamente correlacionados con evapotranspiración potencial aún cuando la bandeja es una pobre analogía de una superficie vegetal (Tanner, 1967).

13.5.1. Limitaciones y Ventajas

a).El proceso de evaporacion es similar pero no idéntico al de transpiración. En el caso de plantas hay una resistencia a la difusión lo cual no se tiene en el caso de la superficie de agua libre.

b). Existen diferencias entre la rugosidad aerodinámica de las superficies.

c). El tanque de evaporación toma en consideración todos los factores de clima, por lo cual es más preciso en la estimación de la ET para períodos cortos de tiempo que la ET estimada por fórmulas empíricas que dependen de sólo algunos parámetros climáticos.

d). En presencia de energía advectiva, la tasa de evaporación se correlaciona mejor con ET mientras que el balance de energía da valores menores de ET (Ehern, 1965).

e). Desde el punto de vista práctico la evaporación de bandeja es el método más satisfactorio para el uso en la definición de requerimientos de riego (Chang, 1968).

13.5.2. Diseño e Instalación

Existen varios tipos de bandejas, pero el más común y de mayor uso es el Clase A del U.S. Weather Bureau (USWB). Los diferentes tipos varían en diámetro, profundidad y altura de agua bajo el borde superior.

Los tanques son localizados enterrados en el suelo, sobre la superficie y en algunos casos a cierta altura sobre la superficie. La posición enterrada es la menos deseable puesto que los datos son altamente influenciados por los gradientes de temperaturas entre el suelo y el tanque. Los aspectos micrometeorológicos sobre el uso de tanques y su diseño son discutidos por Deacon et al. (1958) y Mc Ilroy y Angus (1964).

El tanque Clase A (USWB) es de forma cilíndrica y tiene 120,65 cm (47,5 pulgadas) de diámetro interior y 25,4 cm (10 pulgadas) de profundidad. Se construye de latón o fierro galvanizado.

Se instala sobre una plataforma de madera debiendo quedar el fondo del tanque a aproximadamente 10 cm de la superficie del suelo para permitir el flujo de aire bajo el tanque.

El tanque se debe llenar hasta 5 cm del borde superior y se debe rellenar cuando se evaporan 2,5 cm de agua.

En climas húmedos, el área de resguardo o la localización del tanque respecto de campos cultivados no tiene mayor importancia. En climas áridos la localización del tanque es muy importante a fin de evitar el efecto de bordes. Se ha encontrado que la evaporación disminuye rápidamente desde el borde hacia el centro del campo cultivado (Millar, 1964; Stanhill, 1961). Stanhill (1961) investigó el efecto de la localización del tanque en campos regados de diferente tamaño, encontrando que el tanque se debería ubicar a 300 m del borde seco-húmedo, en la dirección del viento, con el objeto de minimizar el efecto de transferencia horizontal de energía o advección.

13.5.3. Relación entre Evapotranspiración Potencial (ET_p) y Evaporación del Tanque (E_t)

Normalmente, en el manejo del riego a nivel parcelar, las necesidades de agua de los cultivos se definen en función de los datos de evapotranspiración potencial (ET_p) y del coeficiente de cultivo (K_c), el cual se define como:

$$K_c = ET_a / ET_p \qquad (13.54)$$

donde ET_a es la evapotranspiración actual o real del cultivo. ET_p es la evapotranspiración potencial, estimada a partir de datos climáticos, definida como la evapotranspiración de un cultivo con superficie totalmente cubierta con vegetación baja, verde y densa, no afectada por plagas y enfermedades y nunca deficiente de agua (ET_p pasto) (Hargreaves, 1976).

Así, conociendo la ET potencial de los cultivos y los coeficientes K_c se puede determinar la evapotranspiración real mediante:

$$ET_r = K_c \, . \, ET_p \qquad (13.55)$$

La evapotranspiración potencial se puede obtener a través de cualquiera de los métodos hasta ahora presentados. Sin embargo, con mucha frecuencia se usan los procedimientos que se basan en información climática.

Varios estudios sugieren utilizar los datos de evaporación de tanque para estimar la evapotranspiración potencial, usando la relación:

$$ET_p = K_p \, . \, E_t \qquad (13.56)$$

en que el coeficiente K_p depende del cultivo de referencia y del tipo de tanque usado.

Existe una correlación entre ET_p y E_t para períodos semanales o mensuales. Numerosos estudios se han realizado para determinar la relación E_p/E_t, conocido también como coeficiente K_p (Fritschen y Shaw, 1961; Stanhill, 1961). Penman (1948) encontró para pastos valores de K_p que variaban con la estación entre 0,6 y 0,8. Stanhill (1961) encontró, para alfalfa, K_p mensuales de 0,7 y K_p semanales de 0,75. Información recolectada por Pruitt (1964) indica que el coeficiente K_p, obtenido a través de 5 años de estudios con pasto, oscila alrededor de 0,8.

La información anterior se refiere exclusivamente para cultivos perennes donde prácticamente no hay variación de K_p con el tiempo, y no es difícil de adoptar un coeficiente único para el cultivo.

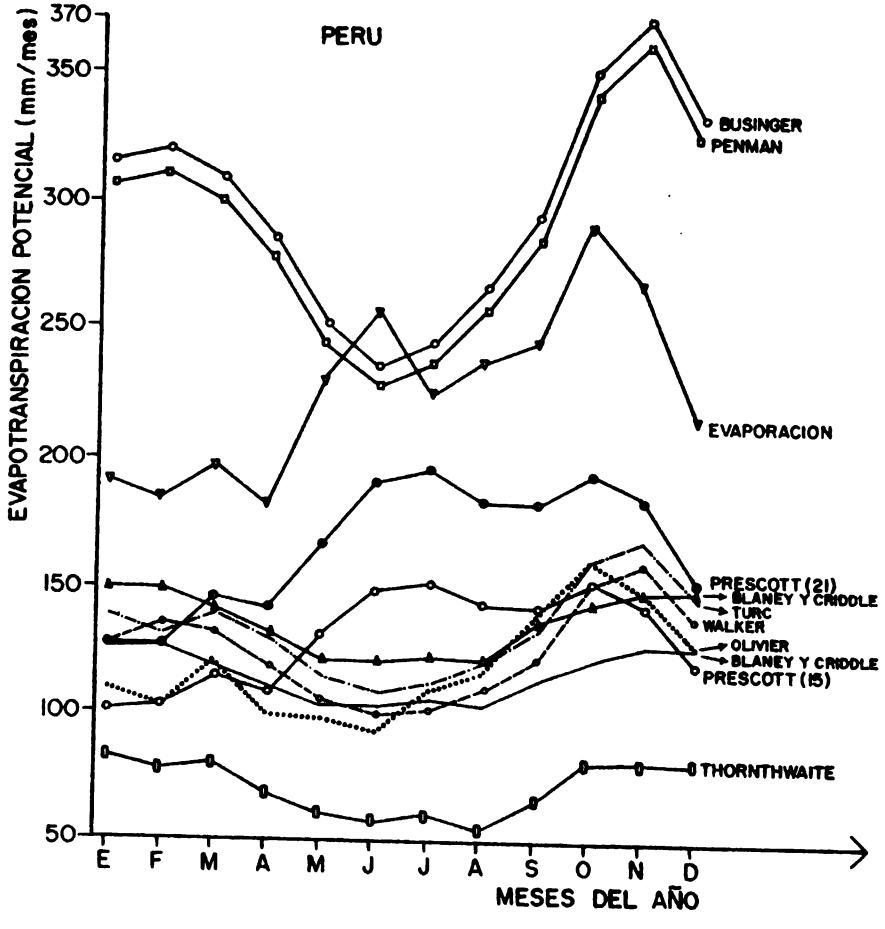


FIGURA 18.16. Evapotranspiración potencial obtenida con varios modelos para la región de la costa peruana (Dulá, 1976).

CUADRO 13.13. Coeficientes K_p, en el caso de un tanque clase A rodeado de cubierta verde para diferentes niveles de humedad relativa media y vientos durante las 24 horas.

Tanque Clase A	Caso A Tanque rodeado de cubierta verde baja.			
RH media %		Baja <40	Media 40-70	Alta >70
Vientos Km/día	Distancia a barlovento de la cubierta verde (en m)			
Débiles <175	0	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
	1.000	0,75	0,85	0,85
Moderados 175-425	0	0,50	0,60	0,65
	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
	1.000	0,70	0,80	0,80
Fuertes 425-700	0	0,45	0,5	0,60
	10	0,55	0,6	0,65
	100	0,60	0,65	0,70
	1.000	0,65	0,7	0,75
Muy fuertes >700	0	0,4	0,45	0,5
	10	0,45	0,55	0,6
	100	0,5	0,6	0,65
	1.000	0,55	0,6	0,65

El valor de K_p es bajo durante los primeros estadíos de crecimientos, aumentando hasta floración y disminuyendo posteriormente con la madurez del cultivo. Chang (1968) presenta información de K_p para varios cultivos en diferentes períodos fenológicos. El valor de K_p variaba entre 0,8 para cultivos bajos, a 1,0 para cultivos altos. El valor de K_p depende de las condiciones ambientales, tipo de cultivo y tipo de tanque. En el Cuadro 13.13 se muestran los valores de K_p para el tanque Clase A para varias condiciones (Doorenbos y Pruit, 1975).

Con fines de utilidad práctica, Hansen (1963) ha propuesto una curva que relaciona el coeficiente de evaporación, $ET_p/E_t = K_p$, con el crecimiente y maduración relativa porcentual del cultivo. Para la obtención del coeficiente se puede utilizar información de fórmulas empíricas fidedignas para ET_p y datos de tanque de evaporación o atmómetro Piche para E_t.

La curva única propuesta por Hansen, (1963) se presenta en la Figura 13.16. Esta figura muestra el K_p en función del porcentaje del ciclo fenológico. En la rama descendente de la curva se indican los valores K_p promedios del ciclo para diferentes cultivos.

La curva única de Hansen (1963) es de gran utilidad práctica puesto que permite la adopción de valores de K_p dependiendo del período fenológico del cultivo. De esta manera, utilizando la información de tanque es posible estimar valores de evapotranspiración potencial del cultivo (Fuchs y Stanhill, 1963; Pruitt, 1966; Stanhill, 1961; Silva et al., 1981).

Desde el punto de vista operacional de las programaciones de riego es de gran importancia poder correlacionar directamente la evapotranspiración real (ET_r) de los cultivos con la evaporación de tanque (E_t), o sea, obtener la relación.

$$ET_r = K_c^1 \, E_t \qquad (13.57)$$

donde el K_c^1 es el coeficiente de cultivo para evapotranspiración real ($K_c^1 = K_p \times K_c$).

Los coeficientes publicados por Hargreaves (1976) corresponden a K_c de la ecuación (13.56) los cuales deben ser corregidos para su utilización con la ecuación (13.57). Este proceso se facilita cuando se puede establecer la relación experimental entre evapotranspiración potencial de pasto y evaporación de tanque. Para condiciones semiáridas y áridas, la relación ET_{pasto}/E_t tiende a ser constante, lo cual ha permitido corregir los valores de K de Hargreaves (1976) y su utilizacion en la obtención de ET_c y programaciones de riego de los cultivos (Silva et al., 1981).

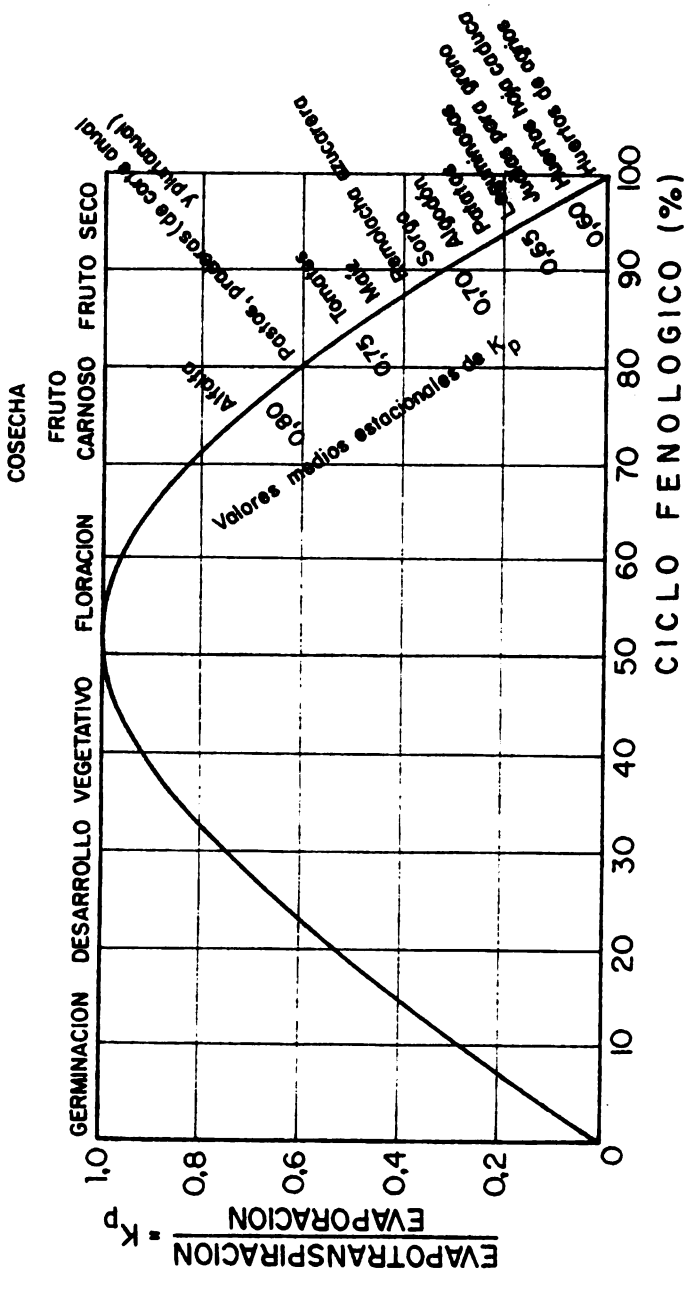


FIGURA 13.16. Curva única de Hansen (1963).

13.6. Referencias Bibliográficas.

[1] ABOUKHALED, A., J. ALFARO AND M. SMITH. 1982. Lysimeters. Rome, FAO. 68 p.(FAO Irrigation and Drainage Paper 39).

[2] AL BARRAK, A. H. 1964. Evaporation and potential evaporation. Logan, Utah, Utah State University (M.S.Thesis).

[3] ARANDA, J. M. 1961. El balance de agua en los suelos. I. Algunas consideraciones teóricas. Anales de Edafología y Agrobiología 29(11):627–647.

[4] BAVER, L.D., W.H.GARDNER AND W.R. GARDNER. 1972. Soil Physics. New York, John Wiley and Sons, Inc. 498 p.

[5] BLACK, T.A., G.W. THURTELL AND C.B. TANNER. 1968. Hydraulic load-cell lysimeter, construction, calibration, and tests. Soil Science Soc. Amer. Proc. 32:623–629.

[6] BLACK, T.A., W.R. GARDNER AND G.W. THURTELL. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33:655–660.

[7] BLACK, T.A., W.R. GARDNER AND C.B. TANNER. 1970. Water storage and drainage under a row crop on a sandy soil. Agronomy Journal 62(1):48–51.

[8] BLANEY, H.F. AND W.D. CRIDDLE. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture. (Technical Bulletin 1275).

[9] BURGOS, G.J. y A.L. VIDAL. 1951. Los climas de la República Argentina según la clasificación de Thornthwaite. Buenos Aires, Servicio Meteorológico Nacional.

[10] CHANG, GEN-HU. 1968 Climate and Agriculture. An ecological survey. Chicago, Aldine Publishing Company. 304 p.

[11] DEACON, E. L., C.H.B. PRIESTLEY AND W.C. SWINBANK. 1958. Evapotranspiration and the water balance: Climatology review of research. UNESCO Arid Zone Research 10:9–34.

[12] DE BOODT, M., R. HARTMENN AND P. DE MEESTER. 1967. Determination of soil-moisture characteristics for irrigation purposes by neutron-moisture meter and air-purged tensiometers. In: Symposium on the use of Isotopes and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies, Istambul, 12-16 June 1967. Proceedings. Viena, International Atomic Energy Agency. pp. 147–160.

[13] DOORENBOS. J. AND W.O. PRUIT. 1975. Crop water requirements. Roma, FAO, 179 p. (Irrigation and Drainage Paper 24).

[14] DRINKWATER, W.O. AND B.E. JANES. 1967. Relation of potential evapotranspiration to environment and kind of plant. American Geophysical Union Transactions 38:524–528.

[15] DULA, J. 1976. Parámetros de Irrigacão. Brasilia, DF. CODEVASF/FAO/USAID/ABID. 30 p. (Conferencia presentada en el Seminario sobre Manejo de Agua, Mayo 3-5, 1976).

[16] EKERN, P.C. 1965. Disposition of net radiation by a free water surface in Hawaii. Journal of Geophysical Research 70:795–800.

[17] FRITSCHEN, L.J. AND R.H. SHAW. 1961. Evapotranspiration for a corn as related to pan evaporation. Agronomy Journal 53:149–150.

[18] FRITSCHEN, L.J. 1963. Construction and evaluation of a miniature net radiometer. Journal of Applied Meteorology 2:165–172.

[19] FITZPATRICK, E.A. AND W.R. STERN. 1966. Estimates of potential evapotranspiration using alternative data in Penman's formula. Agricultural Meteorology 3:255–259.

[20] FUCHS, M. AND G. STANHILL. 1963. The use of class A evaporation pan data to estimate irrigation water requirements of the cotton crop. Israel J. Agric. Research 13:63–78.

[21] GARCIA BENAVIDES, J. y JAVIER LOPEZ DIAS. 1970. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15 N-15 S). Agronomía Tropical (Venezuela) 20(5):335–345.

[22] GLOVER, J. AND J.A. FORSGATE. 1962. Measurement of evapotranspiration from large tanks of soil. Nature 195:1330.

[23] GRASSI, C.J. 1968. Estimación de los usos consuntivos de agua y requerimientos de riego con fines de formulación y diseõ de proyectos. Mérida, Venezuela CIDIAT-OEA. 96 p. (Material de Enseñanza, Documento No. 58.).

[24] HANKS, R.J. AND R.W. SHAWCROFT. 1965. An economical lysimiter for evapotranspiration studies. Agronomy Journal 57:634–636.

[25] HANSEN, V.E. 1963. A unique consumptive use curve related to irrigation practice. Journal of the Irrigation and Drainage Division Proceedings of the American Society of Civil Engineering 89(1):43–50.

[26] HARGREAVES, G.H. 1976. Climate and irrigation requirements for Brazil. Logan Utah State University. 44 p.

[27] HARROLD, L.L. AND F.R. DREIBELBIS. 1958. Evaluation of agricultural hydrology by monolith lysimeters. U.S. Dep. Agric. Tech. Bulletin 1179. 166 p.

[28] HILLEL, D., S. GAIRON, V. FALKENFLUG AND E. RAWITZ. 1969. New design of a low cost hydraulic lysimeter system for field measurement of evapotranspiration. Israel Journal of Agricultural Research 19:57–63.

[29] KING, K.M., C.B. TANNER AND V.E. SUOMI. 1956. A floating lysimeter and its evaporation recorder. American Geophysical Union Transactions 37:738–742.

[30] KING K.M., E.J. MUKAMMAL AND V. TURNER. 1964. Errors involved using ZnCl solution in floating lysimiters. 6th Nat'l Conf. on Agric. Meteorology. Lincoln, Neb. Mimeo. 12 p.

[31] KOHNKE, H., P.R. DREAILBELBIS AND J.M. DAVIDSON. 1940. A Survey and discussion of lysimiters and a bibliography on their construction and perfomance. U.S. Dept. Agric. Misc. Publication 372. 68 p.

[32] KONSTANTINOV. A.R. 1968. Evaporation in nature. (Transl. from Russian by the Israel Program for Scientific Transl., Ltd., 1966). U.S.Dept. Commerce TT 66-51015. 522 p.

[33] LEGARDA B., LUCIO y W. FORSYTHE. 1972. Estudio comparativo entre la evaporación calculada por varias fórmulas y la evaporación de tanques, medida en tres lugares tropicales. Turrialba 22(3):282–292.

[34] LOPEZ, J.E. 1973. Lisímetros. Petrolina, Pe., Brasil, Programa de Entrenamiento en Agricultura Irrigada. MINTER/IICA/CIDIAT. 24 p. (mimeografiado).

[35] MC ILROY, I.C. AND D.E. ANGUS. 1963. The Aspendale multiple weighed lysimeter installation. CSIRO, Div. Meteorology. Physics Tech. Paper No. 4. Melbourne, Australia, 29 p.

[36] MC MILLAN, W.B. AND H.A. PAUL. 1961. Floating lysimeter uses heavy liquid for buoyancy. Agricultural Engineering 42:498–499.

[37] MC ILROY, I.C. AND D.E. ANGUS. 1964. Grass, water and soil evaporation at Aspendale. Agricultural Meteorology 1:201–224.

[38] MILLAR, B.D. 1964. Effect of local advection on evaporation rate and plant water status. Australian Journal of Agricultural Research 15:85–90.

[39] MILLAR A.A. 1970. Water balance of a natural site in the lake Wingra Basin. Report to the International Biological Program, National Science

Foundation. Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. Biome Abstract 2(1):428, 1972).

[40] MILLAR, A.A., W.R. GARDNER AND G. WEISS. 1970. Water regimes of sandy soil under row crops. Madison, Wisconsing, University of Wisconsin. 11 p. (Unpublish, Part I, Ph.D. Thesis of A.A. Millar.)

[41] MILLAR. A.A. 1973. Comportamiento de varios modelos para estimar la evapotranspiración en la Región Central de Chile (Latitud 36° S). Chillán, Chile, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. (No Publicado).

[42] MILLAR, A.A. 1975. Comportamiento de varios modelos para estimar evapotranspiración potencial en la región semiárida de Brasil. Petrolina, Pernambuco, IICA. (No Publicado).

[43] PELTON, W.L. 1961. The use of lysimetric methods to measure evapotranspiration. Proceedings Hidrology Symposium 2: 166-124 (Queen's Printer, Ottawa, Canada Cat. N 32-361/2).

[44] PENMAN, H.N. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Royal Society Proceedings Series A. 193:120-145.

[45] PRUITT, W.O. 1960. Relation of consumptive use of water to climate. Transaction, American Society of Agricultural Engineers 3:9-17.

[46] PRUITT, W.O. AND D.E. ANGUS. 1960. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. Amer. Soc. Agricultural Engineering, Transactions 3:13-15, 18.

[47] PRUITT, W.O. 1964. Evapotranspiration. A guide to irrigation. California Turfgrass Culture 14(4):27-32.

[48] ROBINS, J.S. AND H.R. HAISE. 1961. Determination of consumptive use of water by irrigated crops in the western United States. Soil Science of America Proceedings 25(2):150-154.

[49] ROMAN, C.A., B. FERNANDEZ y A.A. MILLAR. 1979. Evapotranspiración en viñas de secano sometidas a dos sistemas de manejo. Ciencia e Investigación Agraria (Chile).

[50] ROSE, C.E. AND W.R. STERN. 1965. The drainage component of the water balance equation. Australian Journal of Soil Research 3:95-100.

[51] ROSE, C.W. AND W.R. STERN. 1967. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. Australian Journal of Soil Research 5:11-19.

[52] ROSENBERG, N.J., H.E. HART, AND K.W. BROWN. 1968. Evapotranspiration. Review of research. University of Nebraska, Agricultural Station. 80 p. (Bulletin MP20).

[53] SELLERS, WILLIAM D. 1965. Physical Climatology. Chicago, The University of Chicago Press. pp. 100–180.

[54] SILVA, M.A. da e A.A. MILLAR. 1961. Evapotranspiracao do feijao-de-corda. Petrolina, Pernambuco, EMBRAPA/CPATSA. pp. 15–24 (Boletin de Pesquisa No. 4).

[55] SILVA, M.A. dA, E. N. CHOUDHURY, L.A. GUROVICH e A.A.MILLAR. 1961. Metodología para determinar as necessidades de água das culturas irrigadas. Petrolina, Pernambuco, EMBRAPA/CPATSA. pp. 25–44. (Boletim de Pesquisa No. 4).

[56] SLATYER, R.O. AND J.C. MC ILROY. 1961. Practical microclimatology. CSIRO, Plant Ind. Div. Canberra (UNESCO Sponsored). 328 p.

[57] STANHILL, G. 1961. A comparison of methods calculating potential evapotranspiration from climatic data. Israel Journal of Agricultural Research 11:159–171.

[58] SUOMI, V.E. AND P.M. KUHN. 1958. An economical net radiometer. Tellus 10:161–163.

[59] SUOMI, V.E. AND C.B TANNER, 1958. Evapotranspiration estimates from heat- budget measurements over a field crop. Trans. Amer. Geophys. Union 39:296–304.

[60] SWAM, J.B., C.A. FEDERER AND C.B. TANNER. 1961. Economical radiometer performance, construction and theory. Madison, Wisconsin, University of Wisconsin, Soils Dept. (Soils Bulletin No. 4).

[61] TANNER, C.B. AND S.M. ROBINSON. 1959. Blackbody function. Madison, Wisconsin, Department of Soils, University of Wisconsin. 45 p. (Soil Bulletin 1).

[62] TANNER, C.B. 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. Soil Science Society of America Proceedings 24(1):1–9.

[63] TANNER, C.B. 1963. Basic instrumentation and measurements for plant environment and micrometeorology. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil Science, University of Wisconsin. (Soil Bulletin No. 6).

[64] TANNER, C.B. 1967. Measurement of evapotranspiration, p. 5334-574. In: R.M. Hagan et al. (ed.), Irrigation of Agricultural Lands. Madison, Wisc., American Society of Agronomy.

[65] TANNER, C.B., W.R. GARDNER, A.A.MILLAR AND S.M.GOLTZ. 1970. Actual evapotranspiration as determined from soil-water and canopy characteristics and potential evapotranspiration. Report to Environmental Science Service Administration, ESSA Grant No. E-267-68(G). 43p.

[66] TRICKETT, E.S., L.J. MOULSLEY AND R.I. EDWARDS. 1957. Measurement of solar and artificial radiation with particular reference to agriculture and horticulture. Journal of Agricultural Engineering Research 2:86-110.

[67] VAN BAVEL, C.H.M. 1961. Lysimetric measurements of evapotranspiration rates in the eastern United States. Soil Sci. Soc, Amer. Proc. 25:138-141.

[68] VAN BAVEL, C.H.M. AND L.E. MYERS. 1962. An automatic weighing lysimeter. Agricultural Engineering 43:580-583.

[69] VAN BAVEL, C.H.M., K.J. BRUST AND G.B. SKIRK. 1970. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by root: II. The water balance of the root zone. Soil Science Society of America Proceedings 32:317-321.

[70] VRIES, D.A. de. 1958. The thermal behavior of soils: Climatology and microclimatology. UNESCO Arid Zone Research 11:109-113.

[71] VRIES, D.A. de AND A.J. PECK. 1958. On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils. II. Analysis of moisture effects. Australian Journal of Physics. 11:409-423.

CAPITULO 14

FUNCIONES DE PRODUCCION

14.1. Producción y Tecnología.

En la década de los sesenta, la producción mundial de alimentos aumentó en 40aumento considerable en la producción mundial provino principalmente de lugares donde el alimento era abundante, es decir de las naciones desarrolladas. Esto es explicable porque estas naciones contando con un ingreso per capita más elevado pueden gastar más recursos en investigación agrícola y aplicación más adecuada y eficiente de la tecnología.

Entre los factores determinantes del aumento en la producción se encuentra la obtención e introducción de variedades de alto capital genético y adaptadas a su medio, y un aumento en la respuesta de los cultivos a la acción combinada del uso de agua y fertilizantes.

Un ejemplo palpable del uso adecuado de la tecnología se observa en la producción triguera de México. Un plan agresivo de investigación llevado a cabo por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) dió como resultado la obtención de rendimientos de 3000 kg/ha en poco más de 10 años (Figura 14.1).

Entre otros casos del uso apropiado de la tecnología en fitomejoramiento se pueden citar los siguientes: (i) En los Estados Unidos, los rendimientos actuales de trigo son 35-60 % mayores que 30 a 70 años atrás. Se ha obtenido 50-60 % de mayor rendimiento en maíz híbrido respecto de las variedades de 1940; la producción aumento de 1784 kg/ha en 1939 a 3504 kg/ha en 1960, atribuyéndose 625 kg del aumento al uso de fertilizantes y 565 kg al uso de variedades mejoradas (Heady y Auer, 1966). En el período de 1939-1960, los rendimientos de avena aumentaron en 15 %, (ii) En Japón, los rendimientos de algunas variedades de arroz aumentaron en 70 % con respecto de 1900, (iii) En México, los rendimientos de trigo aumentaron en 300 % en un lapso de 14 años y (iv) En Pakistán, el rendimiento de trigo aumentó en 75 % en sólo dos años.

Estos aumentos expresivos en el rendimiento promedio de trigo en México y Pakistán no pueden atribuirse enteramente al avance tecnológico

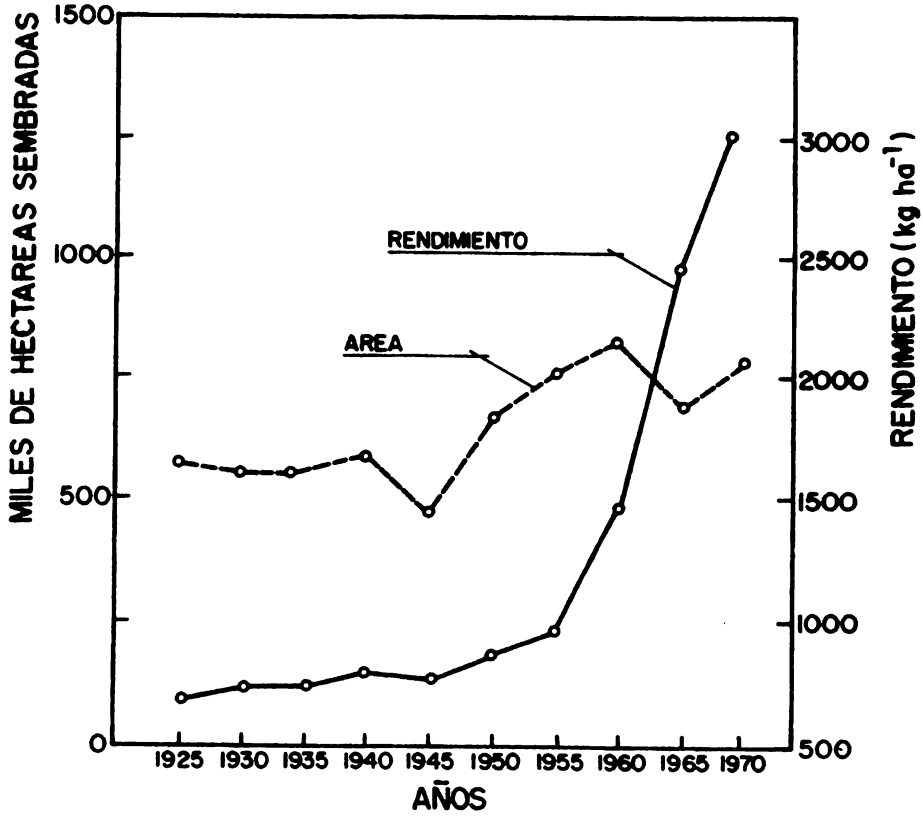


FIGURA 14.1 Area sembrada y rendimiento de trigo en México entre los años 1925 y 1969 (Borlaug et al., 1969).

en fitomejoramiento. Ello es el producto del uso de un "paquete tecnológico" (fertilización, riego, variedades mejoradas, etc.).

En la Figura 14.2 se presenta en forma esquemática la relación entre producción y la introducción de tecnología. La producción sería una función de la raíz cuadrada de la tecnología y en la práctica se produciría en etapas que tenderían a alcanzar un cierto plateau. La extensión de este plateau dependería de la prontitud en la introducción de mayor tenología como así también de su calidad y adecuación (Millar, 1974).

Los países desarrollados han introducidos una gran cantidad de tecnología en el sector agrícola, y producto de ello su producción es elevada. Al parecer, las naciones bien desarrolladas estan agotando los recursos tec-

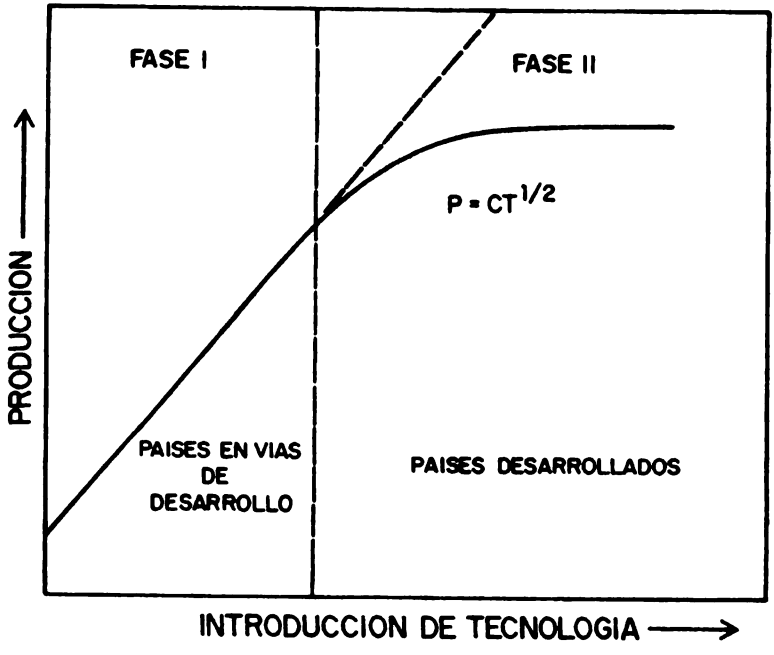


FIGURA 14.2. Concepción esquemática de la producción en función de la introducción de tecnología (Millar, 1974).

nológicos y estarían llegando al plateau de producción (Fase II). El problema será, entonces, como salir del plateau. Esto requerirá mayor sofisticación de la tenología, cuya introducción en la práctica será de un costo muy oneroso con beneficio progresivamente menor.

La situación de los países y en vías de desarrollo es completamente diferente. La producción agrícola está lejos de alcanzar el plateau o incremento de producción igual a cero. En esta etapa del desarrollo, el aumento de la producción es pronunciado en relación a la introducción de tecnología.

El aumento unitário de la producción en la Fase I dependerá, en gran medida, de la elección adecuada de la tecnología a ser introducida y deberá corresponder a las necesidades del país e incidir principalmente sobre aquellos factores complementarios limitantes de la producción.

Los recursos mundiales de tierras que potencialmente se podrían utilizar para producción agrícola llegan a 344 millones de hectáreas siendo que actualmente se usan 1400 millones de ha (NAS, 1977). El nivel teórico de

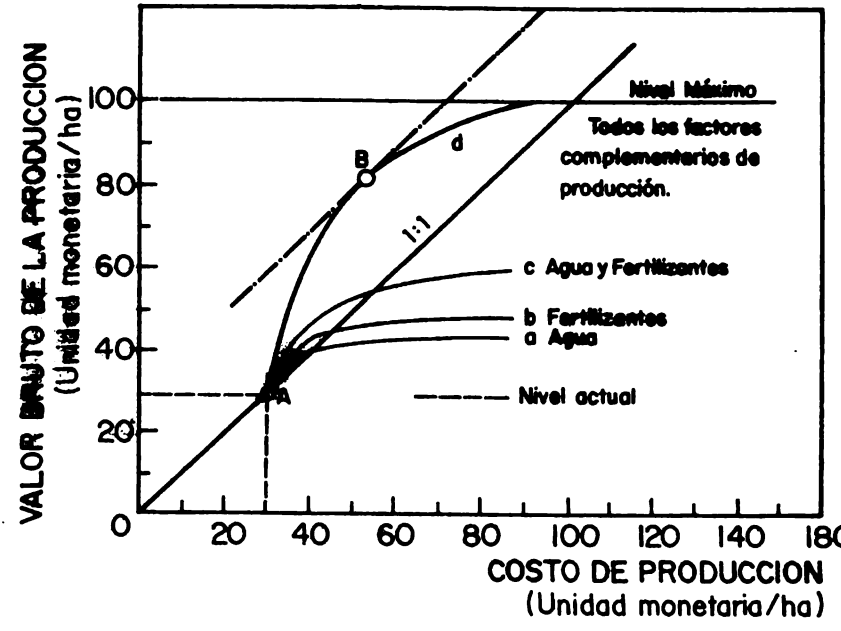


FIGURA 14.3. Relación entre valor y costo de producción para varios factores de producción en la agricultura bajo riego.

producción que se puede obtener de estos recursos se estima que es 40 veces superior (Buringh et al., 1975). Como parte de este potencial, el área regada actual de 220 millones de ha se puede expandir a 450 millones de ha (Buringh et al. 1975; NAS, 1977). Estas suposiciones implican un alto nivel tecnológico y uso intensivo de insumos y de capital.

Considerando los bajos niveles tecnológicos que se emplean en la mayoría de los países del mundo, Buringh and Van Heemst (1977) estimaron que la producción potencial en el potencial de tierra utilizable apenas permitiría alimentar 20 % más de la población mundial actual. Al respecto, Byerly (1969) hace dos observaciones importantes de mencionar: (i) Por razones logísticas, la mayoría del alimento requerido por la población de los países en vías de desarrollo debe ser producido en estos países, y (ii) Por razones económicas y tecnológicas, la mayoría de los alimentos deben ser producidos mediante agricultura convencional.

14.2. Producción Bajo Riego.

Para obtener una adecuada producción bajo condiciones de riego, el primer requisito es disponer de agua suficiente para los cultivos y en el momento oportuno.

Existe una serie de factores complementarios que se deben proveer, también, para obtener el éxito que se espera de la agricultura bajo riego. Entre otros, se incluyen los fertilizantes, semillas de buen potencial genético, maquinaria e implementos agrícolas adecuados y disponibles oportunamente, facilidades de crédito y de comercialización de los productos, investigación aplicada, asistencia técnica continua y permanente, capacitación y organización de los agricultores, etc.

Para definir eficientemente la cantidad de agua para uso en producción agrícola es necesario conocer la relación entre el agua disponible y los rendimientos de los cultivos para las condiciones climáticas de interés y diferentes niveles de otros insumos, como fertilizantes. Estas funciones de producción permiten a los planificadores pronosticar las reducciones en el rendimiento de los cultivos frente a la disminución del insumo agua.

En forma general, para una situación hipotética se pueden relacionar los gastos con los insumos utilizados, con los ingresos agrícolas provenientes de los productos obtenidos (Figura 14.3). La ordenada de la Figura 14.3 representa el valor bruto por hectárea del cultivo en el mercado (rendimiento x precio), y la abscisa representa el costo de producción.

Suponiendo que el punto A respresenta el estado actual en que la productividad de la tierra es solamente una fracción de su potencial. Los agricultores, bajo esta condición, apenas pueden mantenerse con sus ingresos actuales. Ahora considerando la situación cuando se introducen algunos de los factores complementarios anteriormente mencionados, se obtiene un cambio expresivo.

Por ejemplo en el caso de la introducción del agua de riego, cada incremento de agua dará un incremente en la producción de los cultivos, hasta un cierto límite, tal como lo indica la curva "a". Si en vez de agua se agregan fertilizantes, se observa el mismo fenómeno. De nuevo se llega a un límite como se puede observar en la curva "b".

La situación anterior mejora si se efectua la combinación de agua y fertilizantes, como lo indica la curva "c".

La curva "d" muestra que si se invierte más y más capital y se cumplen con todos los factores complementarios, se puede incrementar la producción en forma considerable.

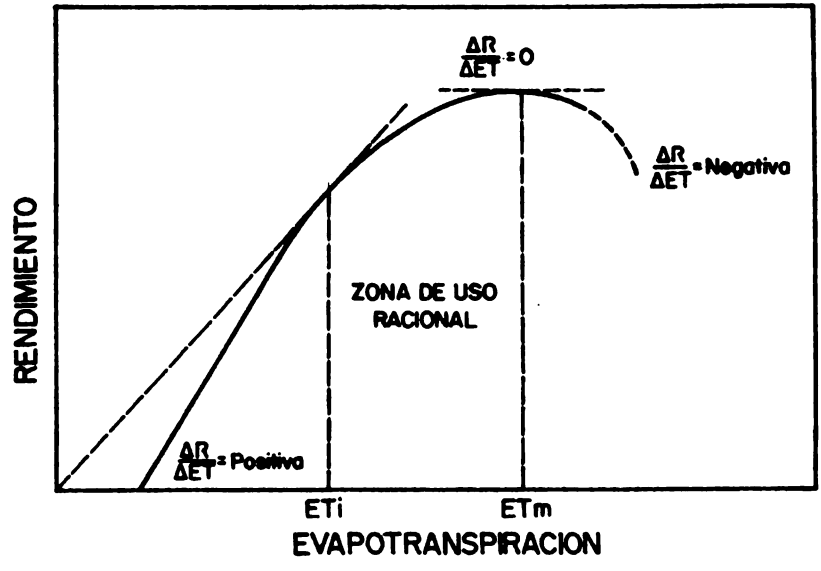


FIGURA 14.4. Función de producción para agua.

Trayendo una línea paralela a la relación 1:1 hasta tocar tangencialmente la curva "d" se encuentra un punto B a partir del cual cualquier incremento en los costos producirá un incremento proporcionalmente menor en los ingresos.

El punto práctico del problema consiste en encontrar la combinación óptima de los factores complemntarios que resulte en la curva "d" de manera que pueda situarse el punto B, que indica la maximización del retorno económico de la introducción de los insumos tecnológicos.

Lo que finalmente se busca con las funciones de producción es permitir el pronóstico, bajo condiciones dadas de clima, cultivo y operación, de los incrementos físicos en producción y el retorno económico de los cultivos.

14.3. Funciones de Producción para Riego.

14.3.1. Características

Las funciones de producción para agua son un elemento de decisión importante en el análisis de la producción agrícola, especialmente cuando el agua es un factor limitante, ya que se constituyen desde el punto de vista de planificación en un elemento de juicio para establecer los planes de desarrollo, y desde el punto de vista de operación en las áreas de riego, permite

tomar decisiones sobre planes de cultivos y áreas de siembra para lograr los rendimientos óptimos reales con el agua disponible.

Las funciones de producción del agua de riego representan la relación entre el rendimiento del cultivo y la lámina de agua consumida bajo determinadas condiciones de variedad, fertilización y manejo del cultivo (Figura 14.4).

La Figura 14.4 muestra que la función de producción para agua tiene las siguientes características: (i) Existe una lámina mínima de consumo de agua por debajo de la cual no hay producción, (ii) Sobre la lámina mínima, el rendimiento del cultivo (R) aumenta linealmente con la lámina de agua consumida o evapotranspirada (ET). Hasta el punto ETi la relación R/ET (pendiente de la curva) es constante. Esta relación se conoce como eficiencia de uso de agua del cultivo (Pendleton, 1965; Vieta, 1965), (iii) A partir de Eti, punto de máxima eficiencia de uso del agua, la relación disminuye hasta el punto ETm en que es igual a cero. Este punto corresponde al máximo rendimiento del cultivo, (iv) A partir del punto ETm el rendimiento disminuye con el incremento de la lámina consumida debido a problemas de exceso de agua lo cual crea condiciones de aireación deficiente. Esto se discute en detalle en el Capítulo 11.

14.3.2 Modelos

Se han desarrollado varios modelos para producción de los cultivos en función de la evapotranspiración, los cuales se resumen a continuación:

a. Modelos de Wit

Para climas áridos y de alta radiación, de Wit (1958) encontró que el rendimiento y la transpiración se relacionaban de la siguiente manera:

$$R/T = m/T_{max} \tag{14.1}$$

donde R es el rendimiento (materia seca por área), T es la transpiración total por área en el ciclo del cultivo y T_{max} es la evaporación potencial en el mismo período. T_{max} es calculado mediante la ecuación de Penman (1948) o se usa la evaporación de tanque.

Para climas húmedos, de Witt (1958) encontró que bajo condiciones no limitantes de agua, la relación T/T_{max} no variaba considerablemente, de tal forma que la relación entre las variables se simplificaba a

$$R/T = n \tag{14.2}$$

donde n es una constante.

El valor m de la ecuación (14.1) se puede obtener usando valores de eficiencia de uso (R/T) y datos diarios promedios de evaporación de tanque (E_t), como sigue (Tanner y Sinclair, 1983):

$$m = (R/T)\, Et \tag{14.3}$$

b. Modelos de Arkley

Según Arkley (1963), siguiendo la formulación de de Wit, se necesita mantener separado el término del clima que afecta el rendimiento, del término que se refiere a la demanda evaporante.

Arkley (1963) propuso la siguiente relación:

$$R/T = \alpha/(1 - HR) = \alpha[e_o/(e_o - e)] \tag{14.4}$$

donde α es una constante, HR es la humedad relativa promedio (fracción), e es la presión de vapor a la temperatura media y e_o es la presión de vapor saturado a la temperatura promedio.

c. Modelo de Stewart

Stewart y colaboradores (1977) desarrollaron un modelo para rendimiento de granos basado en el conocimiento de la evapotranspiración. Este modelo tiene la siguiente expresión:

$$R/R_{max} = 1 - Ky\, ET_d \tag{14.5}$$

donde Ky es la pendiente de la relación entre el rendimiento relativo y ET_d, y ET_d es déficit de evapotranspiración dado por (1-ET/ET_{max}).

La ecuación (14.5), normalmente se presenta de la siguiente forma (Doorenbos et al., 1979).

$$(1 - R/R_{max}) = Ky\, (1 - ET/ET_{max}) \tag{14.6}$$

Las únicas variables conocidas son R_{max}, rendimiento máximo, y Ky. Según Hanks (1983), el problema con la ecuación (14.6) es que el valor de Ky se debe determinar en experimentos de campo. En el Cuadro 14.1 se muestran los valores de Ky para diferentes cultivos y sus fases del desarrollo vegetativo.

CUADRO 14.1. Valores de Ky, R_{max} y m para maíz en varias regiones de los Estados Unidos (Hanks, 1983).

Lugar	Año	Ky	R_{max} (kg/ha)	ET_{max} (cm)	m
Davis, California	1974	1,22	22.000	67,4	310
	1975	1,24	22.000	61,6	324
Fort Collins,	1974	1,36	17.200	52,9	256
Colorado	1975	1,42	15.800	54,5	238
Logan, Utah	1974	1,38	17.900	64,4	241
	1975	1,40	18.100	56,2	248

d. Modelos de Hanks

Hanks (1974) propuso relacionar directamente el rendimiento relativo con la transpiración relativa.

$$R/R_{max} = T/T_{max} \tag{14.7}$$

Esta ecuación supone que la relación lineal se aplica sólo a un año y requiere del conocimiento del rendimiento máximo. No requiere valores de m (ecuación 14.3) o de Ky (ecuación 14.6).

Esta ecuación es de mayor utilidad cuando se requiere comparar condiciones o tratamientos en el mismo año, ya que el valor de R_{max} varía de año en año.

e. Modelos de Bierhuizen y Slatyer

Bierhuizen y Slatyer (1965), partiendo de relaciones básicas que describen los procesos de fotosíntesis y transpiración llegaron a definir una relación entre rendimiento y transpiración, como sigue

$$R/T = k/(e_o/e) \tag{14.8}$$

donde k es una constante.

Tanner y Sinclair (1983) presentan los detalles de la derivación del modelo y de los resultados de su uso.

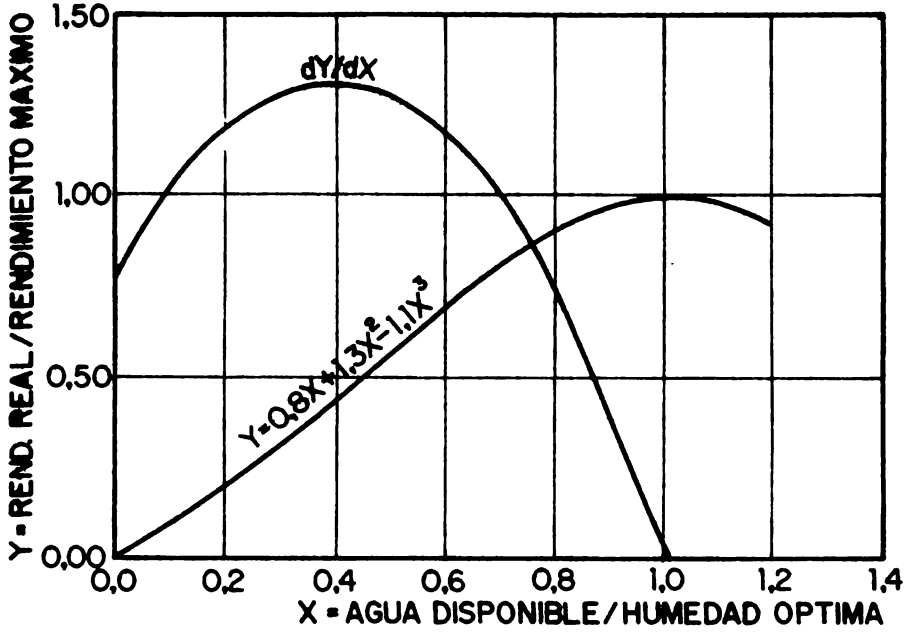


FIGURA 14.5. Rendimiento relativo en función del agua disponible relativa (Hargreaves y Christiansen, 1974).

f. Otros modelos

En la mayoría de los casos se ha tratado de buscar una relación entre el rendimiento relativo y la evapotranspiración relativa del cultivo. A los modelos indicados, y en esta línea de trabajo se puede agregar un número apreciable de soluciones propuestas, desde el tipo aditivo (Hiler y Clark, 1971) a expresiones multiplicativas (Jensen, 1968; Minhas et al., 1974).

Aún cuando la mayoría de los modelos se han basado en la relación de demanda evaporativa también se ha buscado la definición del rendimiento mediante la incorporación de las condiciones de humedad del suelo e incluso del potencial de agua de la planta (Childs et al, 1977).

Norero (1978) desarrolló un modelo para determinar el rendimiento relativo de los cultivos basados en la humedad del suelo y lo aplicó con éxito a la información publicada para varios cultivos.

Hargreaves y Christiansen (1974) resumieron la información existente en-

tre rendimiento y uso de agua de varios lugares y cultivos. El agua disponible correspondía al agua almacenada en el perfil del suelo más la precipitación y el riego adicionado en el ciclo del cultivo.

Para parametrizar y comparar la información de varios cultivos, Hargreaves y Christiansen (1974) usaron un procedimiento similar al propuesto por Downey (1972). Ellos expresaron los datos de rendimiento y de agua en el suelo en forma relativa respecto del máximo. Así, el valor real del rendimiento relativo varía entre 0 y 1 y el valor relativo de disponibilidad de agua desde 0 a 1 ó más. La mayoría de la información de rendimiento analizada se puede expresar por la ecuación siguiente (Figura 14.5):

$$Y = 0,8\,X + 1,3\,X^2 - 1,1\,X^3 \qquad (14.9)$$

con buena información existente entre X = 0,35 a X = 1,1.

El incremento de rendimiento en el agua disponible se obtiene por derivación de la ecuación (14.9):

$$dy/dx = 0,8 + 2,6\,X - 3,3\,X^2 \qquad (14.10)$$

donde para el rango X = 0,086 a 0,701, dy/dx = 1 ó más, con un valor máximo de 1,31 para X = 0,394. El máximo aumento en rendimiento por unidad de agua aplicada se obtiene a 40 % de disponibilidad relativa. Para valores menores de 70 % disponibilidad relativa dy/dx es menor que 1, disminuyendo a cero para completa disponibilidad relativa.

La importancia de este tipo de relación radica en el hecho que cambiando la ordenada para representar el valor de la producción y la abscisa para representar el costo del agua, se tiene un modelo económico que permite evaluar las decisiones técnicas, como lo han hecho Hargreaves y Samani (1984).

14.3.3. Informaciones para Algunos Cultivos

En la literatura existe información para varios cultivos y de diferentes regiones. La misma no siempre se presenta en términos de la relación entre rendimientos y evapotranspiración, lo cual en gran parte se debe a las dificultades de obtener la evapotranspiración real de los cultivos.

Las formas más comunes de presentación de la información se discuten a continuación, con indicación de resultados para algunos cultivos.

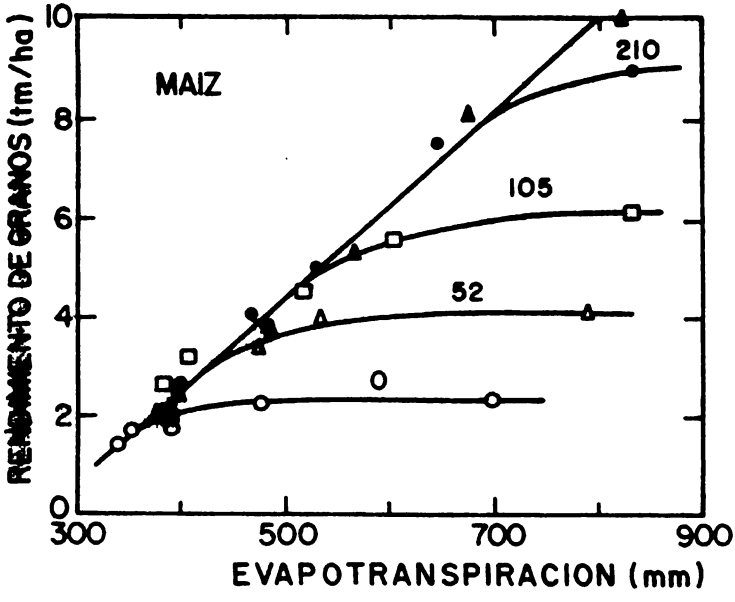


FIGURA 14.6. Relación entre rendimiento y evapotranspiración de maíz en función de la fertilización nitrogenada (Shalhevet et al., 1976). Los números en las curvas indican kg-N/ha.

a. Rendimiento versus Evapotranspiración Real de los Cultivos

Esta es la forma clásica de la función de producción para agua, como esquemáticamente se muestra en la Figura 14.4, la cual representa la situación de la producción de granos, raíces y tubérculos. Se necesita cierta cantidad mínima de agua para obtener alguna producción de granos, lo cual se hace más crítico en regiones áridas y semiáridas. En el caso de cultivos que producen follaje las funciones de producción tienen su inicio en el origen de los ejes de coordenadas.

El tipo de información ideal para programación es la función de producción para agua en función de la fertilización, especialmente nitrogenada (Figura 14.6), pero esta información es escasa, ya que proviene de un tipo de experimento cuya ejecución es muy laboriosa. Actualmente, existen metodologías apropiadas para simplificar la generación de la información, como se muestra en el Capítulo 16.

Por otra parte, como se indicó anteriormente, existe una apreciable va-

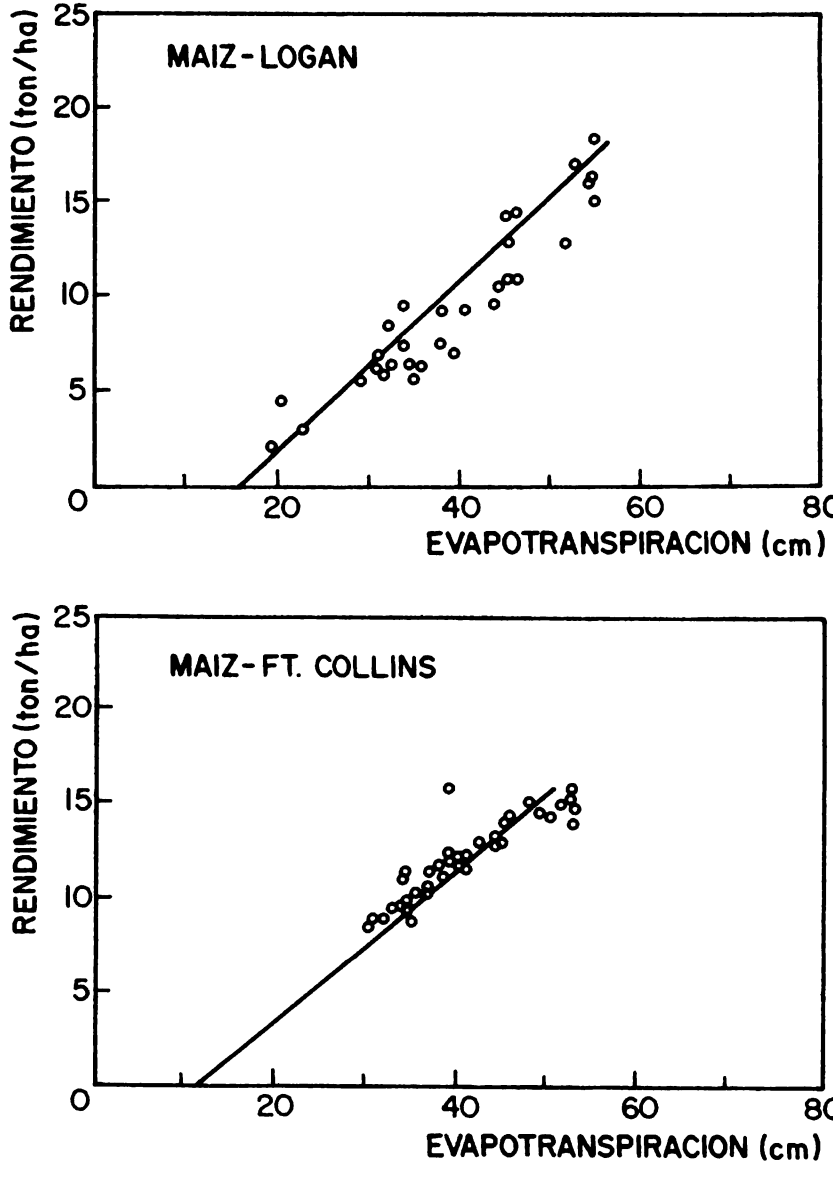


FIGURA 14.7 (a). Función de producción para agua en maíz en Logan, Utah y Ft. Collins, Colorado, Estados Unidos (Hanks, 1983).

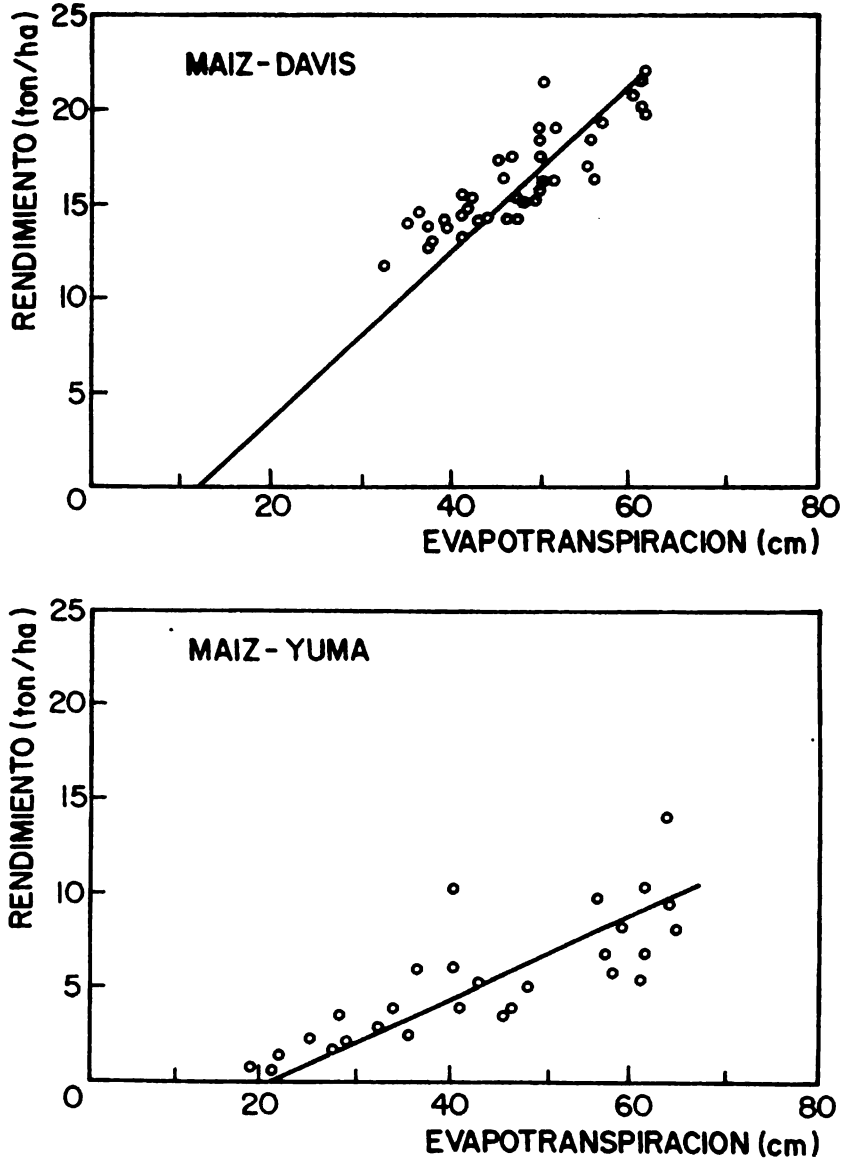


FIGURA 17.7 (b). Función de producción para agua en maíz en Davis y Yuma, California, Estados Unidos (Hanks, 1983).

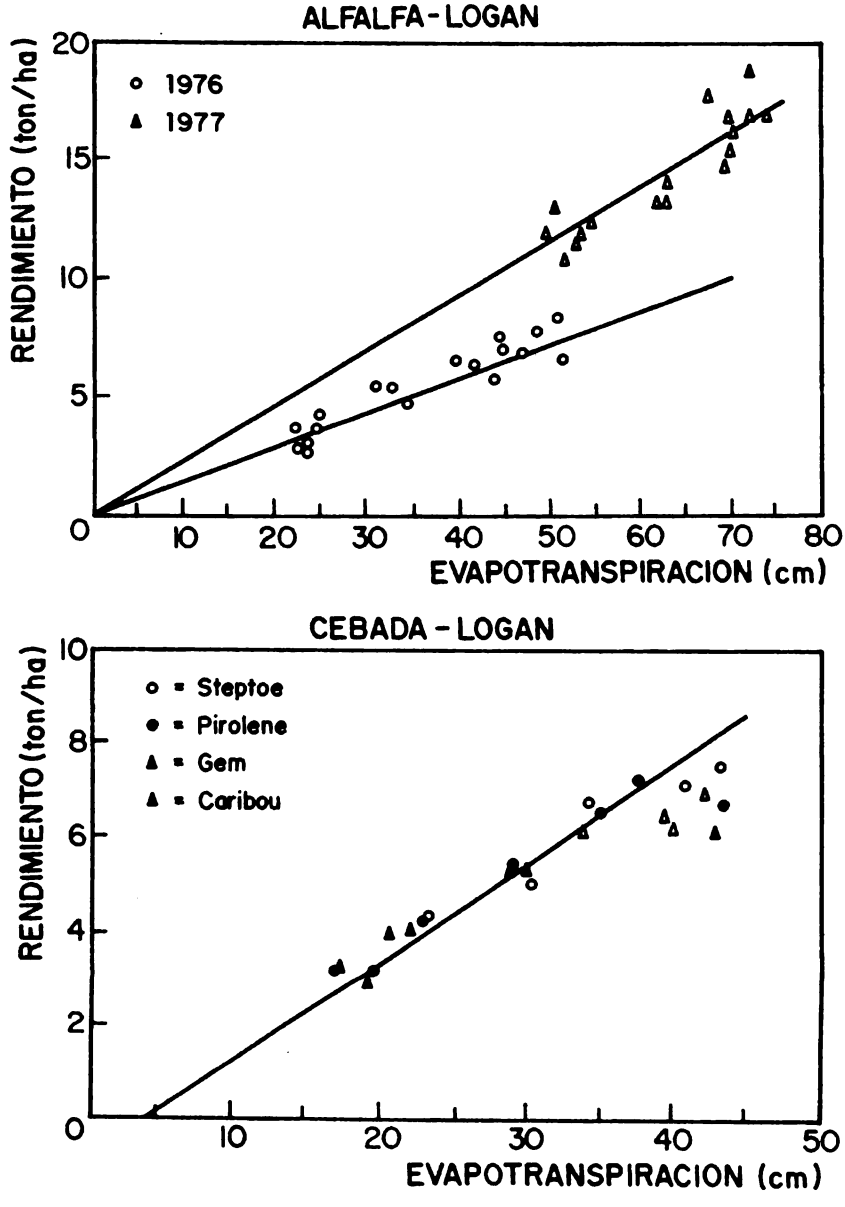


FIGURA 14.8. Funciones de producción para agua en alfalfa y cebada (Hanks, 1983).

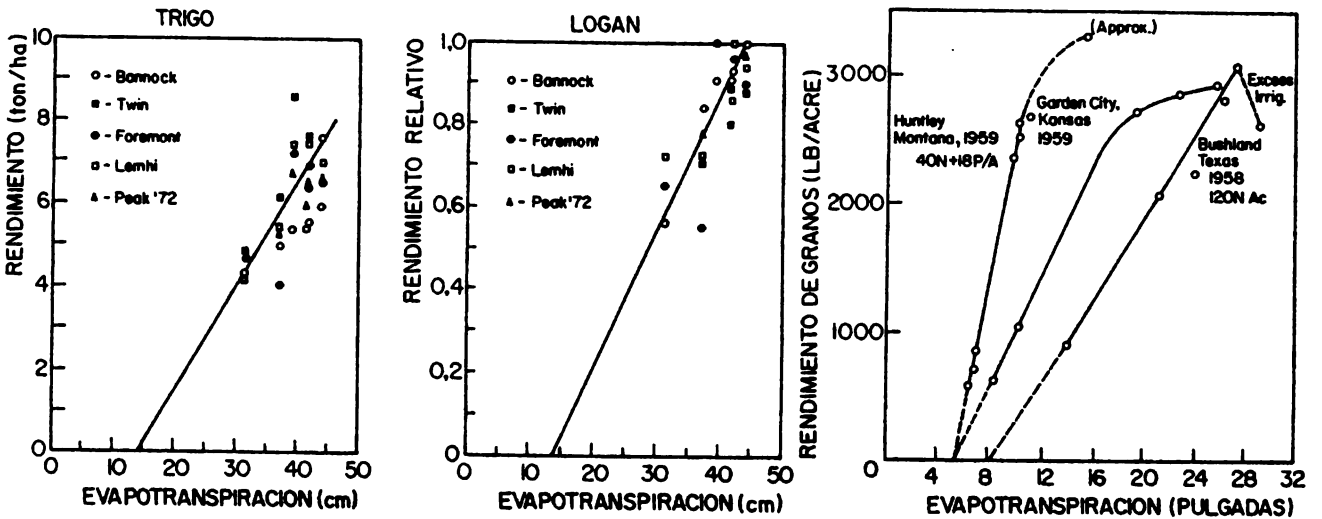


FIGURA 14.9. Funciones de producción para agua en trigo (Hanks, 1983; Hagan, 1970).

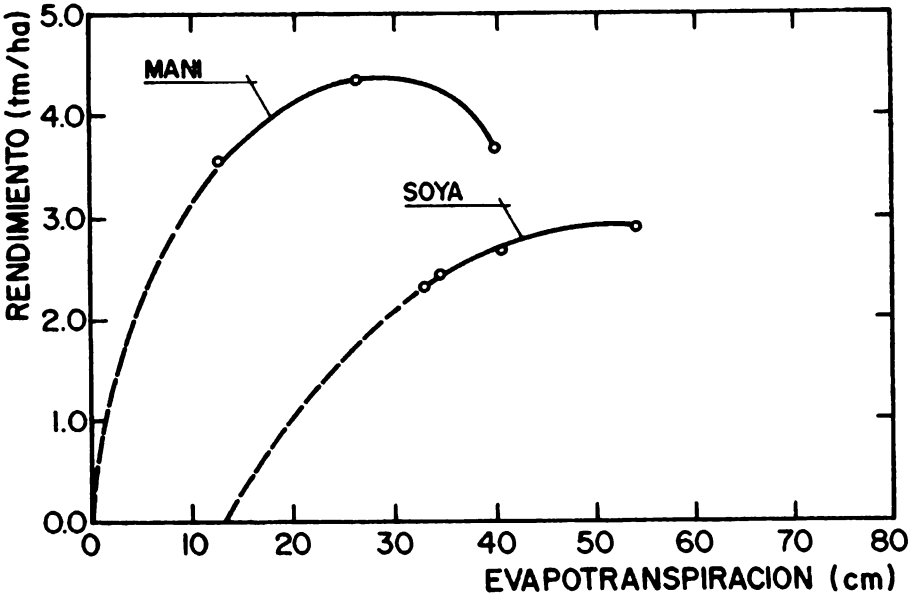


FIGURA 14.10. Funciones de producción para agua de maní y soya (Chang-Navarro y Cornejo, 1972).

riabilidad en la función de producción debido a factores varietales, climáticos y edafológicos, que inciden tanto en el rendimiento como en el uso de agua por el cultivo. Debido a ello existen dificultades en el análisis de largo plazo y con fines de extrapolación, por lo cual se hace necesario producir la información para cada región, especialmente en aquellas donde la variación climática es acentuada.

En las Figuras 14.7, 14.8 y 14.9 se presentan las funciones de producción para maíz, alfalfa, cebada y trigo obtenidas en diferentes regiones de los Estados Unidos. En las Figuras 14.10 a 14.13 se presentan las funciones de producción obtenidas en la costa peruana para maní, soya, frijol, papas y algodón (Chang-Navarro y Cornejo, 1972).

En el caso de los gráficos de rendimiento versus evapotranspiración, para determinado nivel de rendimiento permite obtener ET para el ciclo y dependiendo de la eficiencia del método de riego empleado se puede obtener la lámina de riego y el volumen de agua requerido por el cultivo.

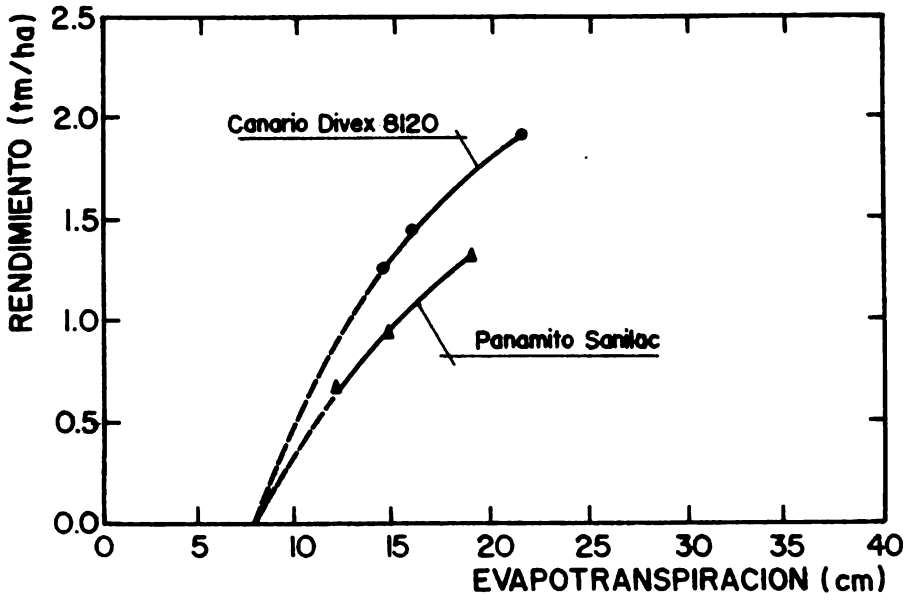


FIGURA 14.11. Función de producción para agua de dos variedades de frijol (Chang-Navarro y Cornejo, 1972).

b. Rendimiento Relativo en Función de la Lámina Neta de Riego

Esta relación constituye otra forma de presentar la información y fue usada por Shalhebet et al. (1976) para algunos cultivos.

En las Figuras 14.14 y 14.15 se muestra la relación entre rendimiento relativo y la lámina neta de riego para sorgo, maíz, trigo y tomate para varias regiones de Israel.

En estos casos, aún cuando se define la variable agua, como lámina neta de riego, no se incluye la contribución del agua almacenada en el suelo y de las lluvias. Debido a esto, algunos gráficos interceptan la ordenada, cuya producción sería debida al agua almacenada en el suelo por las lluvias (producción de secano).

c. Rendimiento Relativo en Función de la Lámina de Agua Aplicada

Este tipo de relación es una extensión de la relación de rendimiento relativo versus lámina neta de riego, que considera la eficiencia del método de riego utilizado.

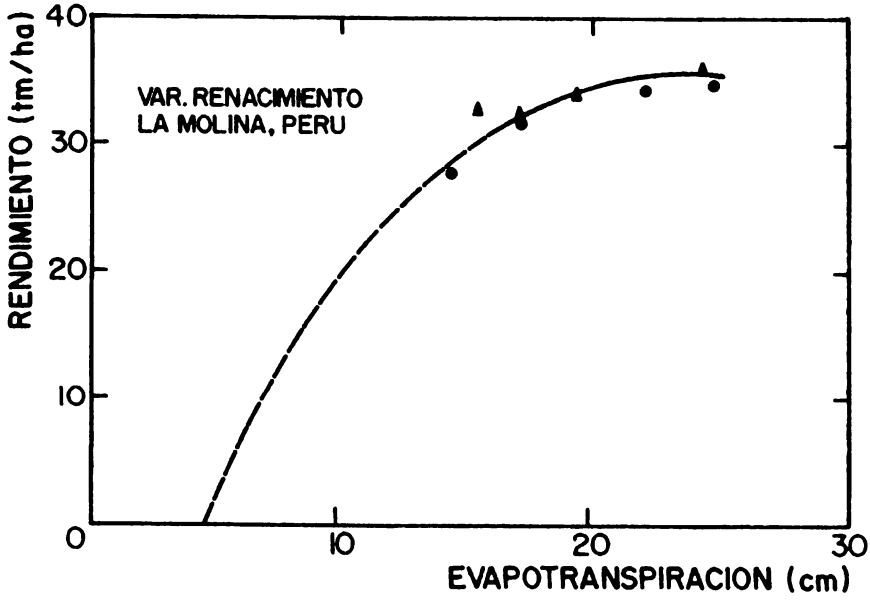


FIGURA 14.12. Función de producción para agua en papas (Chang-Navarro y Cornejo, 1972).

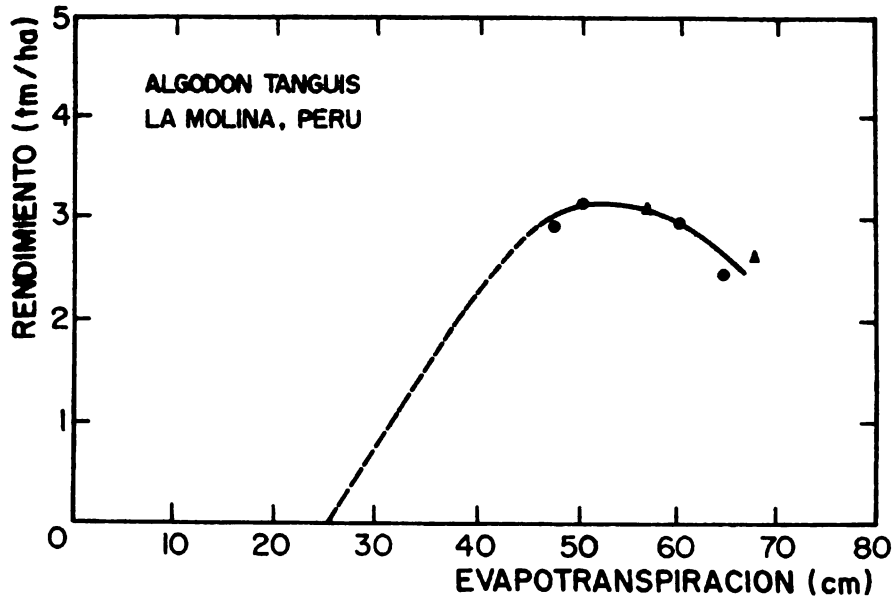


FIGURA 14.13. Función de producción para agua en algodón (Chang-Navarro y Cornejo, 1972).

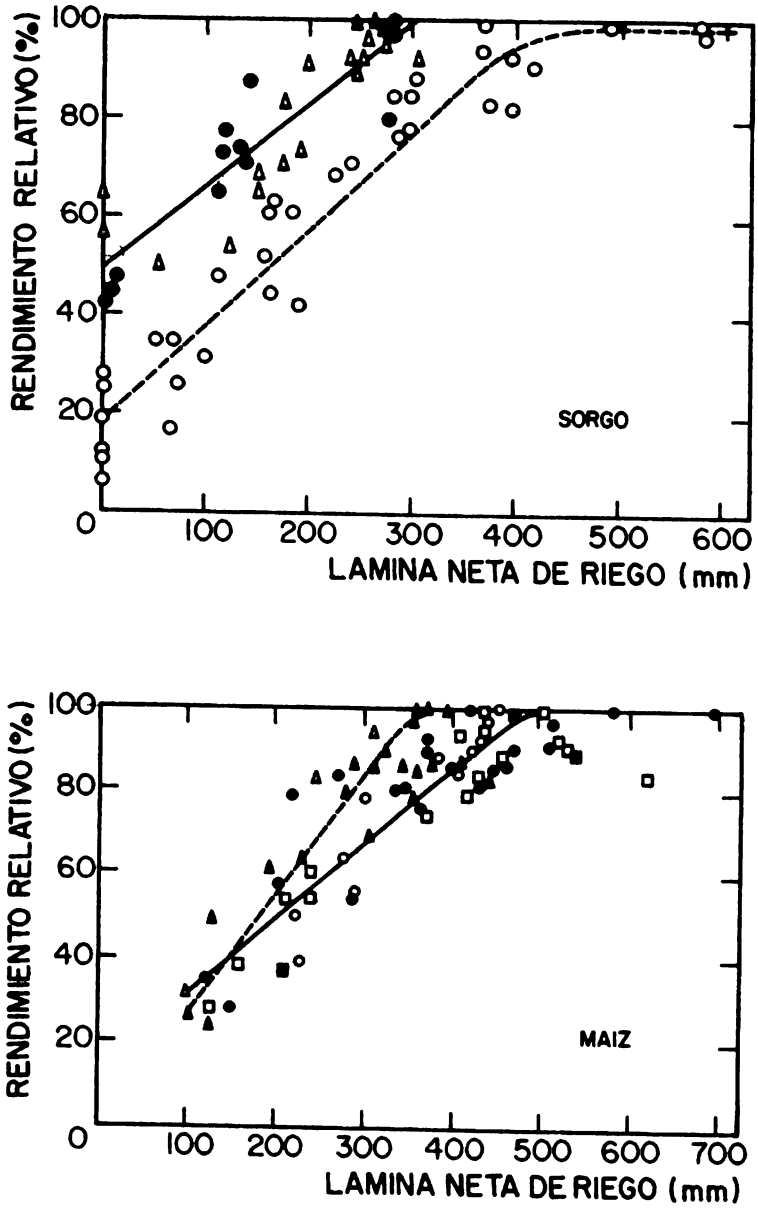
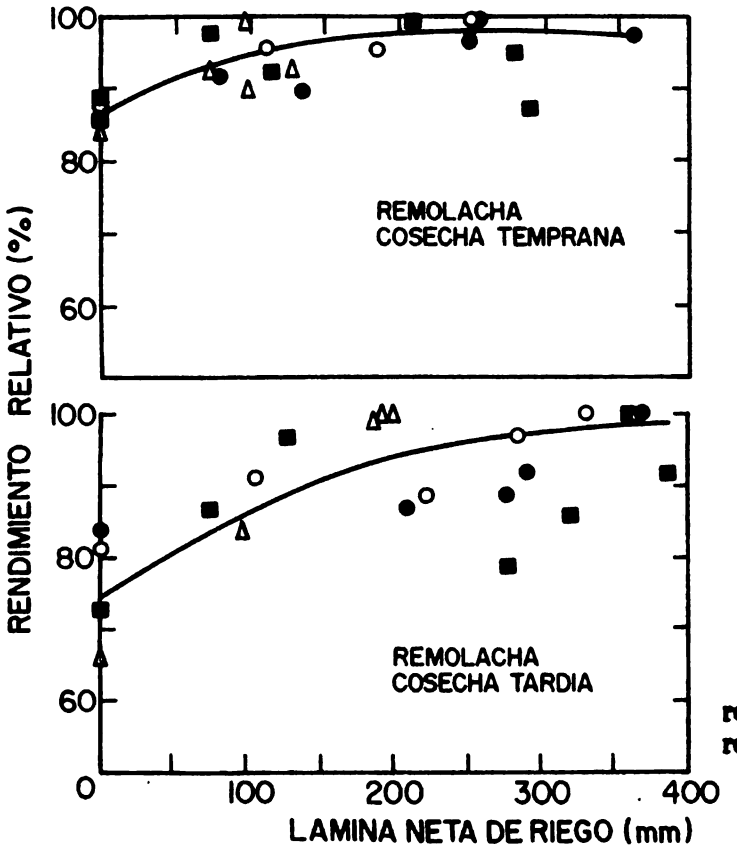


FIGURA 14.14. Relación entre rendimiento de sorgo y maíz y la lámina neta de riego para diferentes regiones de Israel (Shalhevet et al., 1976).



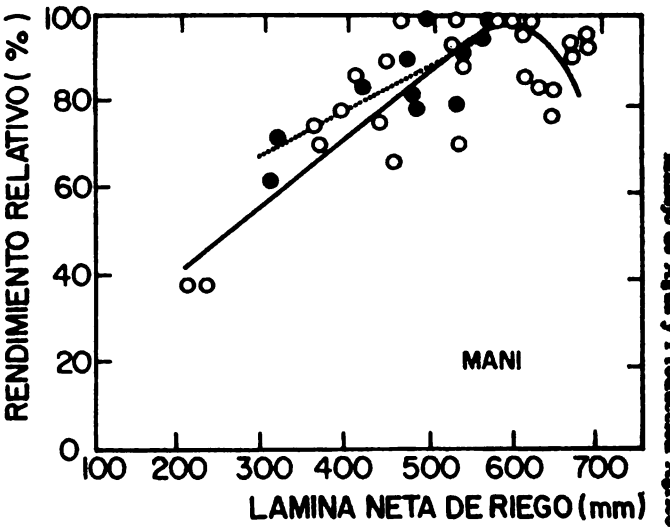


FIGURA 14.15. Relación entre rendimiento de remolacha y maní y la lámina neta de riego para diferentes regiones de Israel (Shalhevet et al., 1976).

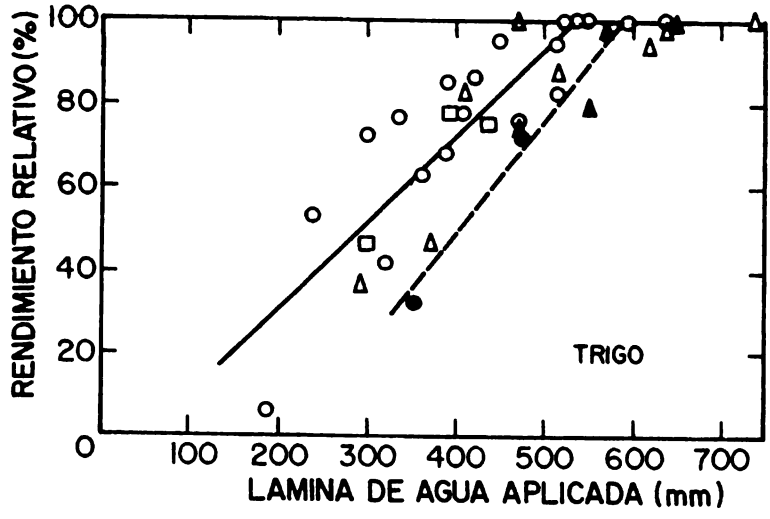


FIGURA 14.16. Relación entre el rendimiento de trigo y la lámina de agua aplicada para diferentes regiones de Israel (Shalhevet et al., 1976).

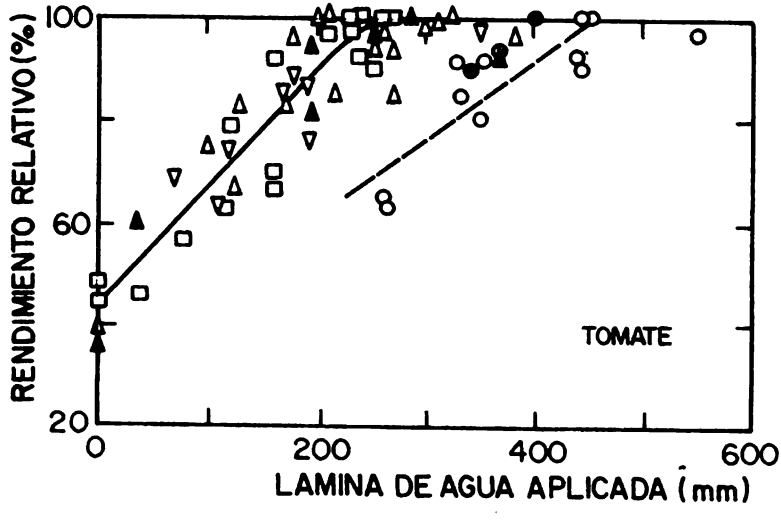


FIGURA 14.17. Relación entre el rendimiento de tomate y la lámina de agua aplicada para diferentes regiones de Israel (Shalhevet et al., 1976).

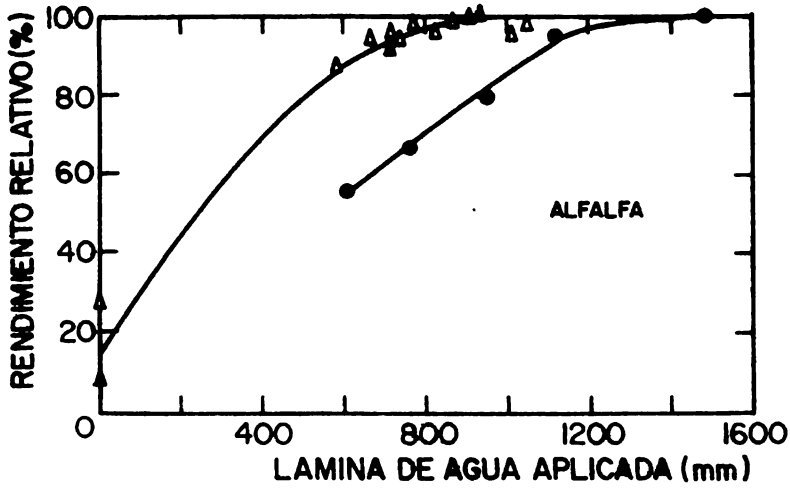


FIGURA 14.18. Relación entre el rendimiento de materia seca de alfalfa y la lámina de agua aplicada para diferentes regiones de Israel (Shalhevet et al., 1976).

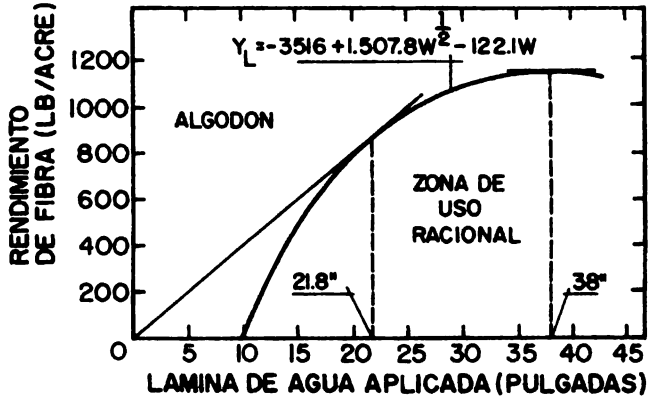


FIGURA 14.19. Relación entre el rendimiento de fibra de algodón y la lámina de agua aplicada (Grimes y Dickens, 1977).

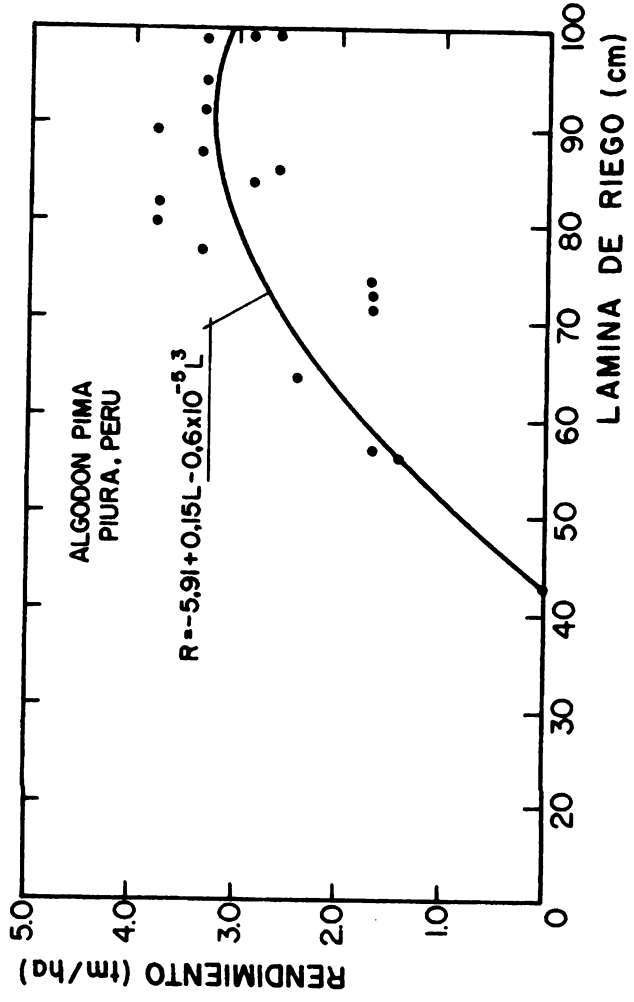


FIGURA 14.20. Relación entre rendimiento de algodón y lámina de riego (Chang-Navarro y Comejo, 1972).

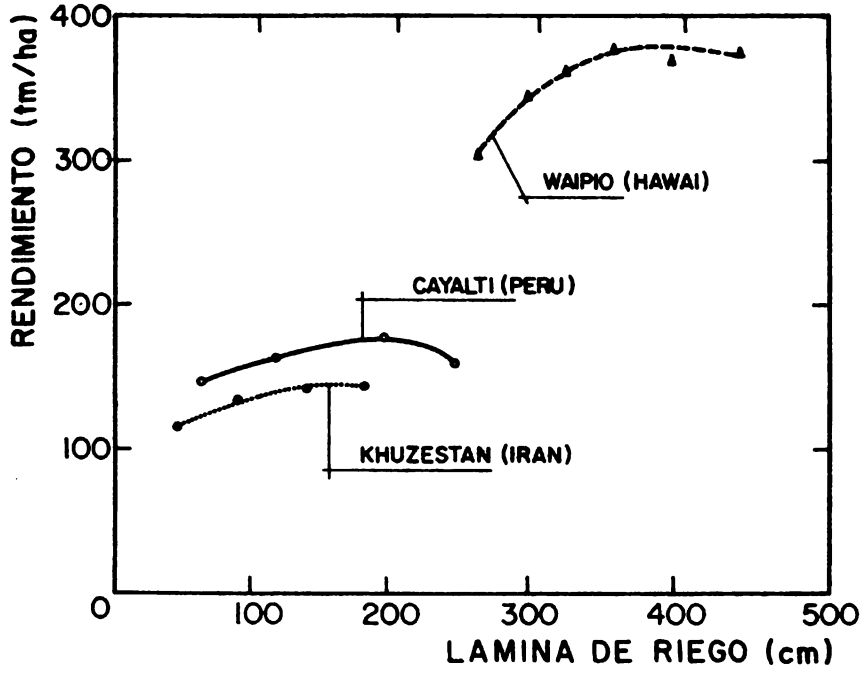


FIGURA 14.21. Relación entre rendimiento de caña de azúcar y lámina de riego en tres regiones de Hawai, Perú e Irán (Chang-Navarro y Cornejo, 1972).

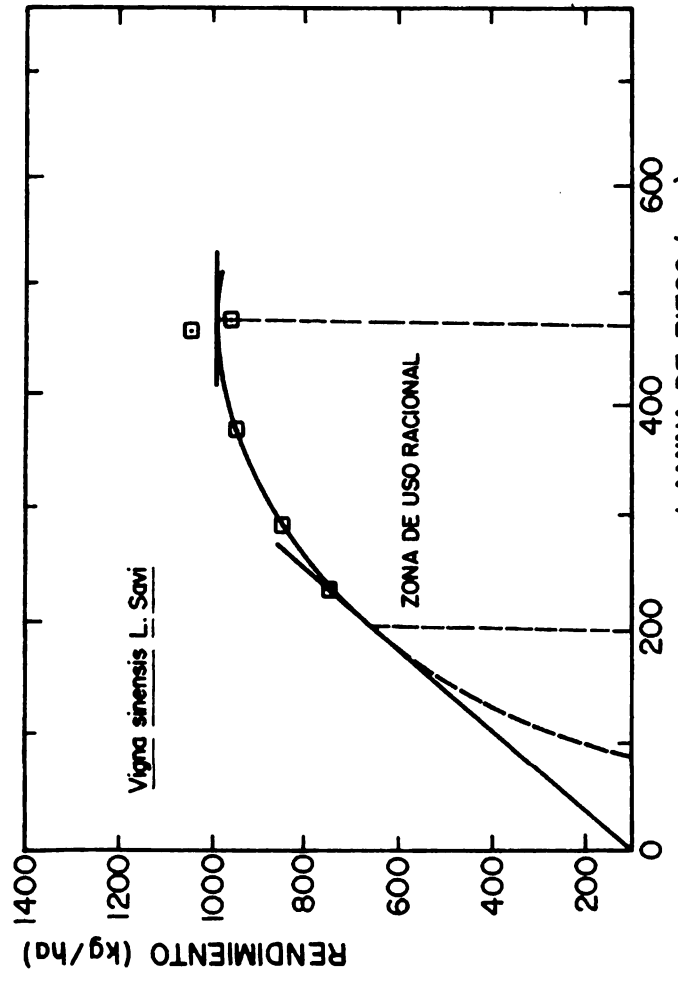


FIGURA 14.22. Relación entre rendimiento de caupi y lámina de riego (Silva et al., 1978).

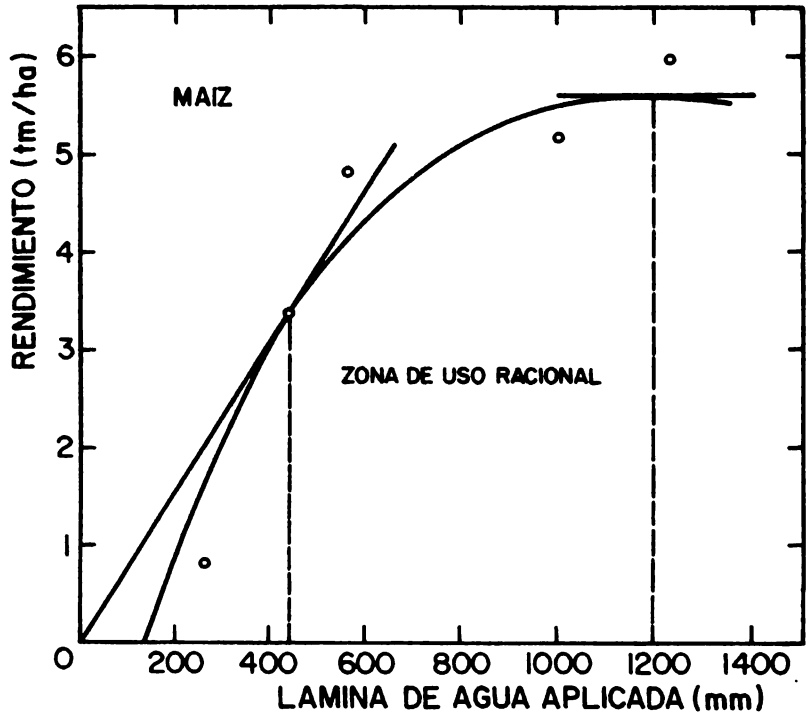


FIGURA 14.23. Relación entre rendimiento de maíz y lámina de agua aplicada (Silva et al., 1981).

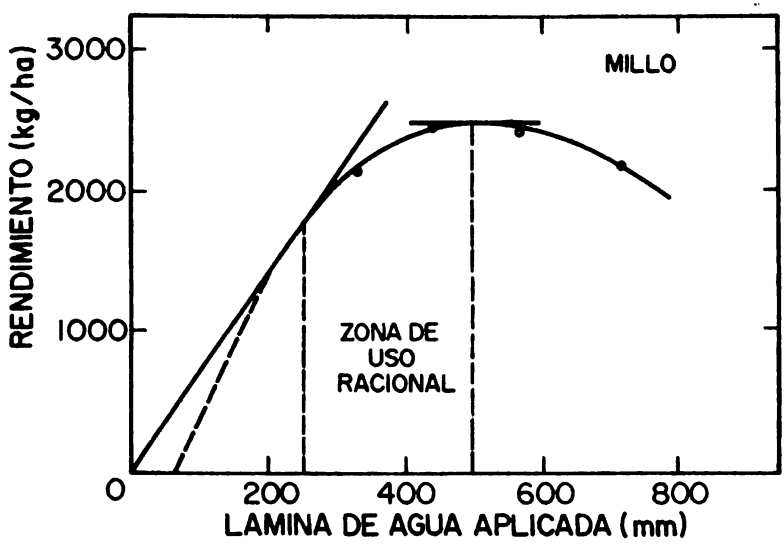


FIGURA 14.24. Relación entre rendimiento de millo y lámina de agua aplicada (Silva et al., 1981).

En las Figuras 14.16 a 14.18 se muestra la relación entre rendimiento relativo y de lámina de agua aplicada para trigo, tomate y alfalfa en diferentes regiones de Israel. En las Figuras 14.17 y 14.18 no se incluyó la contribución de las lluvias (lámina recibida) como lo demuestra la intercepción de las curvas en la ordenada del gráfico.

El mismo tipo de relación se muestra para algodón, caña de azúcar, caupi, maíz y millo en las Figuras 14.19 a 14.24, respectivamente. Estas informaciones representan la situación de zonas típicas de riego de regiones dependientes exclusivamente del agua de riego.

Cuando este tipo de gráfico se ha generado en las condiciones más adecuadas desde el punto de vista de eficiencia para el método de riego, se puede definir la zona de uso racional del agua para cada cultivo. Esto el lo que muestran las Figuras 14.19, 14.22, y 14.24 para algodón, caupi, maíz y millo, respectivamente. Estas figuras muestran los límites mínimos y máximos de láminas de riego que se deben considerar en el manejo de agua a nivel del sistema de producción del cultivo para el uso racional del agua.

14.4. Referencias Bibliográficas.

[1] ARKLEY, R.J. 1963 Relationships between plant growth and transpiration. Hilgardia 34:559–584.

[2] BIERHUIZEN, J.F. AND R.O. SLATYER. 1965. Effect of atmospheric concentration of water vapor and CO2 in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves. Agricultural Meteorology 2:259–270.

[3] BORLAUG, N.E., L NARVAEZ, O. ARESVIK AND R.G. ANDERSON. 1969. A green revolution yields a golden harvest. Columbia J. World Bus. Rpt. Sept- Oct. 1969 issue. p. 3–19.

[4] BURINGH, P., H.D.J. VAN HEEMST AND G.J. STARING. 1975. Computation of the absolute maximun food production of the world. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

[5]BURINGH, P. AND H.D.J. VAN HEEMST. 1977. An estimation of world food production based on labour-oriented agriculture. Centre for World Food Market Research, Wageningen, The Netherlands.

[6]BYERLY, T.C. 1969. Research to serve a mission. In: W.L. Nelson et. al. (ede), Research with a misión. pp. 15–37. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. (Special Publication N' 14).

[7]CHANG-NAVARRO, L. y A. CORNEJO. 1972. Funciones de producción del agua de riego de los principales cultivos de la costa peruana. Lima, Peru, Fundación para el Desarrollo de los Recursos de Aguas y Tierras. 31 p.

[8] CHILDS, S.W., J.R. GILLEY AND W.E. SPLINTER. 1977. A simplified model of corn growth under moisture stress. Transactions of the ASAE 20:858–865.

[9] de WIT, C.T. 1958. Transpiration and crop yield. Versl Landbouwk. Onderz. 64.6. Inst. of Biol. and Che. Res on Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands.

[10] DOORENBOOS, J. AND A.H. KASSAN. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma, FAO. 212 p. (Estudio FAO: Riego y Drenaje N' 33).

[11] DOWNEY, L.A. 1972. Water-yield relations for nonforage crops. Jounal of the Irrigation and Drainage división. Proceedings ASCE 98IR 1:107–115.

[12] GRIMES, D.W. AND W.L. DICKENS. 1977. Cotton responses to irrigation. California Agriculture 31:16–17.

[13] HAGAN, R.M. 1970. Water Management. Research for the World Food Crisis. pp 255–303.

[14] HANKS, R.J. 1974. Model for predicting plant growth as influenced by evapotranspiration and soil water. Agronomy Journal 66:660

[15] HANKS, R. J. 1983. Yeld and water use relationships: An overview. pp. 393–411. In: H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (eds), Limitations to efficient water use in crop production. Madson, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy Inc, Crop Science Society of America Inc. and Soil Science Society of America, Inc.

[16] HARGREAVES, G. H. AND J.E. CHRISTIANSEN. 1974. Water use, ERTS readout an climate. Logan Utah State University, Dept. of Agricultural and Irrigation Engineering. 50 p.

[17] HARGREAVES, G.H. AND Z.A. SAMANI. 1984. Economic considerations of deficit irrigation. Journal of Irrigation an Drainage Engineering 110 (4):343–358.

[18] HARGREAVES, G. H. 1975. Moisture availability and crop production. Transaction of the ASAE 18 (5): 980–984.

[19] HEADY, E.O. AND L. AUER. 1966. Imputations of production to technologies. Journal of Farm Economics 48:309–322.

[20] HILER, E.A. AND R.N. CLARK. 1971. Stress day index to characterize effects of water stress on crops yield. Transaction of ASAE 14 (4):757–761.

[21] JENSEN, M.E. 1968. Water consumption by agricultural plants. pp. 1–22. In: T.T. Kozlowski (ed.), Water deficits and plant growth. Vol. II. Plant water consumption and response. New York, Academic Press, Inc.

[22] MEHREN, G.L. 1971. World agronomy in the world economy. In: C. A. Blacl et al. (eds.), Agronomy in changing world and research needs for the seventies pp. 9-26 (Special Publication N' 19).

[23] MILLAR, A.A. 1974. Prospecto de la introducción de tenología en la agricultura. Petrolina, PE., Brasil, IICA. 12 p.

[24] MINHAS, B.S., K.S. PARIKH AND T.N. SRINIVASAN. 1974. Towards the structure of a production funtion of wheat yields with data inputs of irrigation water. Water Resources Research 10 (3):383–393.

[25] NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1977. Supporting Papers: World food and nutrition study. Vl. II, NAS, Washington, D.C.

[26] PENDLETON, J. W. 1965. Increasing water use efficiency by crop management. pp. 236–258. In: W.H Pierre, D. Kirkham, J. Pesek and R. Shaw (eds.), Plant evironment and efficient water use. Madison, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy and the Soil Science Society of America.

[27] PENMAN, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Royal Soc. London Ser. A. 193:120–146.

[28] SHALHEVET, J., A. MANTELL, H. BIELORAT AND D. SHIMSHI. 1976. Irrigation of field and orchard crops under semi-arid conditions Bet Dagan. Israel, International Irrigation Information Center. 110 p.

[29] SILVA, M. A. da, A.A. MILLAR, C.A.V. OLIVEIRA, C.E. MARTINS, R.E. BANDEIRA, e T. NASCIMENTO. 1981. Efeito da lâmina de irrigacão e da adubacão nitrogenada na producão de grãos de milho. Petrolina, PE., Brasil CPATSA/EMBRAPA. pp. 45–57 (Boletim de Pesquisa N' 4).

[30] SILVA, M.A. da, A.A. MILLAR, M.B. COELHO, C.A.V. OLIVEIRA, R.E. BANDEIRA e T. NASCIMENTO. 1981. Efeito do regime de irrigacão e da adubacão nitrogenada na producão de grãos de milheto. Petrolina, PE, Brasil, CPATS/EMBRAPA. pp. 58-69 (Boletim de Pesquisa N' 4).

[31] SILVA, M. A. da, A. A. MILLAR, S. BERNARDO e A. R. CONDE. 1978. Efeito da lâmina de água e da adubacão nitrogenada sobre a producão de feijão "Macassar" utilizando o sistema de irrigacão por aspersão em linha. Anais do IV Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem. 20 p.

[32] STEWART, J. T., R. M. HAGAN, W.D. PRUIT, R. J. HANKS, J. P. RILEY, R.E. DANIELSON, W.T. FRANKLIN AND E. B. JACKSON. 1977. Optimising crop production through control of water and salinity level in the soil. Utah Water Res. Lab., Utah State University, Logan. Pub. N' PRWG151-1.

[33] TANNER, C.B. AND T.R. SINCLAIR. 1983. Efficient water use in crop production: Research or Re-search. pp. 1–27. In: H.M. Taylor, W. R. Jordan and T. R. Sinclair (eds.), Limitations to efficient water use in crop production. Madison, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy Inc., Crop Science Society of America Inc. and Soil Science Society of America, Inc.

[34] VAN SCHILFGAARDE, J. AND S.L. RAWLINS. 1983. Water resources management in a growing society. p. 517. In: H.M. Taylor, W.R. Jordan

and T. R. Sinclair (eds.), Limitations to efficient water use in crop production. Madison Wisconsin, USA, American Society of Agronomy Inc, Crop Science Society of America Inc. and Soil Science Society America In.

[35] VIETS, F. G. 1965. Increasing water use efficiency by soil management. pp 259–274. In: W.H. Pierre, D. Kirkham, J. Pesek and R. Shaw (eds.), Plant environment and efficient water use. Madson, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy and the Soil Science Society of America.

CAPITULO 15

PRIORIDADES DE INVESTIGACION EN AREAS DE RIEGO

15.1. Consideraciones Generales.

En el esfuerzo de modernización del sector agropecuario, se considera como uno de los puntos básicos, la organización y el desarrollo de la investigación y experimentación agrícola por productos principales y de importancia económica. En este contexto, el programa de investigación para agricultura bajo riego debe estar en perfecta sintonía con las directrices fijadas por los organismos de desarrollo regional.

El riego exige un alto padrón tecnológico debido a la intensidad de las explotaciones agrícolas. Se necesita estudiar en profundidad las técnicas de uso y manejo de equipos de riego, metodologías de aplicación y de manejo de suelo, agua y cultivos que tengan por objetivo mejorar la eficiencia del riego, a mejorar la oportunidad de aplicación y a reducir los costos de inversión y de producción.

Para el montaje y ejecución de un programa de investigación para áreas regadas es necesario realizar lo siguiente:

a. Realizar un levantamiento detallado de los programas de investigación en ejecución en las instituciones de investigación y de enseñanza para definir QUE SE ESTA HACIENDO.

b. Definir las necesidades y prioridades de investigación por país y/o región, con amplia participación de los usuarios de la información (asistencia técnica y agricultores) para definir QUE SE NECESITA HACER.

c. Elaborar un programa de investigación para agricultura bajo riego basado en las líneas principales de investigación a nivel regional para definir EN QUE SE VA A CONCENTRAR LA ACCION.

d. Utilizar los recursos humanos y la capacidad instalada existente en las instituciones de investigación y de enseñanza para la ejecución del programa PARA DAR EFICIENCIA AL PROGRAMA Y LOGRAR UN COMPROMISO PARTICIPATIVO.

e. Crear y/o fortalecer mecanismos de coordinación institucional a nivel regional PARA EVITAR DUPLICACION.

f. Definir mecanismos e instrumentos adecuados y eficientes, para la transferencia de tecnología a través de la acción conjunta de los servicios de investigación y asistencia técnica PARA LOGRAR OBJETIVOS Y METAS del programa definido.

g. Definir mecanismos e instrumentos para realizar el monitoreo y la evaluacion sobre la efectividad de la transferencia de la tecnología generada en las áreas irrigadas PARA VERIFICAR LOGROS, DESVIACIONES Y DEFINIR SOLUCIONES.

15.2. Definiciones.

Con la finalidad de facilitar el análisis y discusión sobre investigación en tecnología para agricultura bajo riego es necesario establecer algunas definiciones.

Se define como investigación para agricultura bajo riego a los estudios agronómicos y de ingenieria de las prácticas y técnicas de riego. En la Figura 15.1 se presenta en forma esquemática, la subdivisión de la investigación para agricultura bajo riego.

En la investigación agronómica de riego se incluyen todas aquellas investigaciones de la relación suelo-agua-planta y sus interacciones e investigaciones en sistemas de producción bajo riego. En el primer caso, el factor agua es una variable experimental mientras que en el segundo caso es un factor constante ya optimizado por la investigación.

En la investigación de la relación suelo-agua-planta e interacciones, se incluyen los trabajos relacionados con estudios de caracterización hídrica de los suelos, estudios de láminas de riego, evapotranspiración, interacciones agua x fertilizantes, parámetros y prácticas de riego, etc.

En la investigación de sistemas de producción se introducen los mejores resultados, técnica y economicamente viables, de los estudios de variedades más adaptadas a las condiciones de riego, condiciones del medio físico-ambiental de los cultivos (fertilidad de suelos, salinidad, etc.), estudios de plagas y enfermedades, estudios de espaciamiento, control de malezas, niveles de riego, etc.

En ingeniería de suelos y aguas se incluyen todas las investigaciones relacionadas con sistemas de captación y almacenamiento de agua, conservación y manejo de suelo y agua, y drenaje y salinidad. En este segmento, se incluye, por ejemplo, investigaciones referentes a la construcción y manejo de pequeñas presas y reservorios, modalidades de captación y uso de agua,

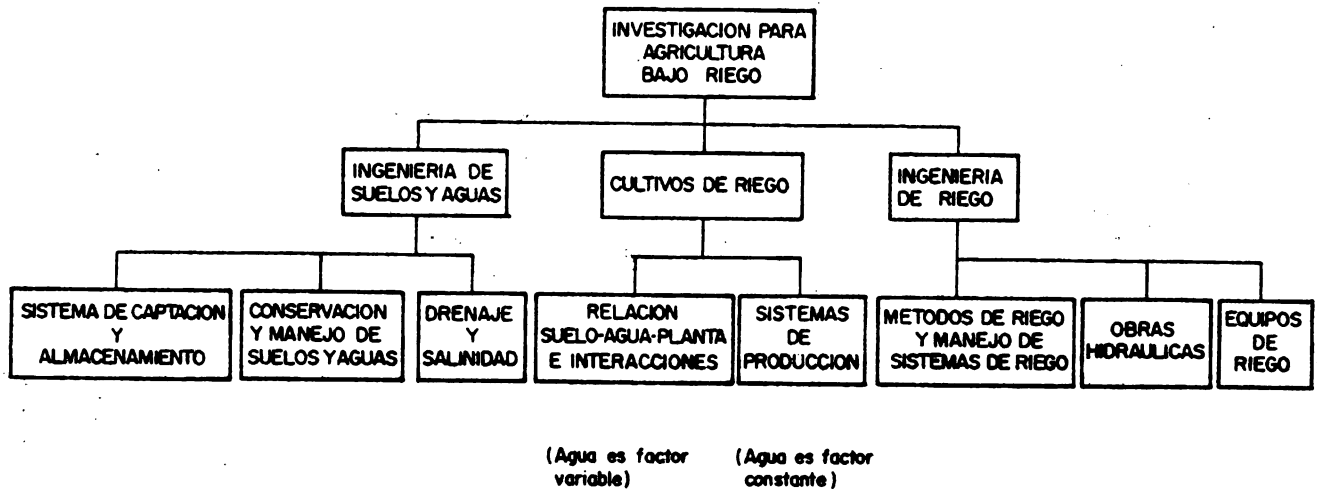


FIGURA 15.1. Esquematización de la investigación para agricultura bajo riego (Millar, 1978).

conservación y manejo de suelos bajo condiciones de riego, manejo y recuperación de suelos afectados por sales, técnicas de drenaje y materiales para drenaje, etc.

En ingeniería de riego se incluyen todas aquellas investigaciones relacionadas con infraestructura y equipos de riego, y manejo de sistemas. En esta área se incluyen, por ejemplo, estudios de metodología de riego, operacion y manejo de sistemas, equipos de riego, materiales de construcción de equipos, uniformidad y calidad de construcción de materiales y equipos, conservación de estructuras hidráulicas, etc.

15.3. Filosofía del Programa.

Cualquier programa de investigación para agricultura bajo riego debe estar orientado, principalmente, para encontrar métodos económicos para aumentar la productividad de los sistemas de producción, estudiándose los diversos aspectos de riego y sus interrelaciones con los demás factores de producción. Entre otros, deben considerarse la selección de variedades adaptadas, métodos y épocas de siembra, uso y manejo de fertilizantes, métodos y época de aplicación de fertilizantes, uso de herbicidas, rotación de cultivos, uso de equipos y máquinas, control de plagas y enfermedades, etc. También, se deberán conocer las expectativas de demanda y oportunidad de colocación de los productos en el mercado, identificación de los aspectos de padronización y embalaje y determinar la mejor relación beneficio/costo para cada sistema de producción en función del nivel tecnológico y capacidad de inversión de los agricultores.

En la formulación del programa de investigación se debe considerar el sistema de producción en uso, descrito en forma global, abordando los aspectos de mayor significado para tener una mejor visión de la interrelación de los diversos aspectos del sistema de producción para áreas irrigadas. En la Figura 15.2 se indica, en forma diagramática, la investigación dentro de un enfoque sistémico.

El concepto sistémico de la investigación para agricultura de riego implica en la concentración de los experimentos en lugares representativos, en la necesidad de un equipo técnico multidisciplinar, en la integración de los resultados de experimentos pequeños en experimentos mayores cuyos resultados sean fácilmente visibles y apreciados por el agricultor, y permitan una mejor evaluación económica (Figura 15.2). Como ejemplo de lo que se quiere obtener y mostrar, en el Cuadro 15.1 se presenta el aumento de la productividad de maíz y sorgo debido a tres pasos de tecnología en comparación con tres pasos combinados (ICRISAT, 1976).

Por otra parte, la investigación deberá concentrarse en la búsqueda inmediata de soluciones a los problemas de manejo de suelo y agua que se

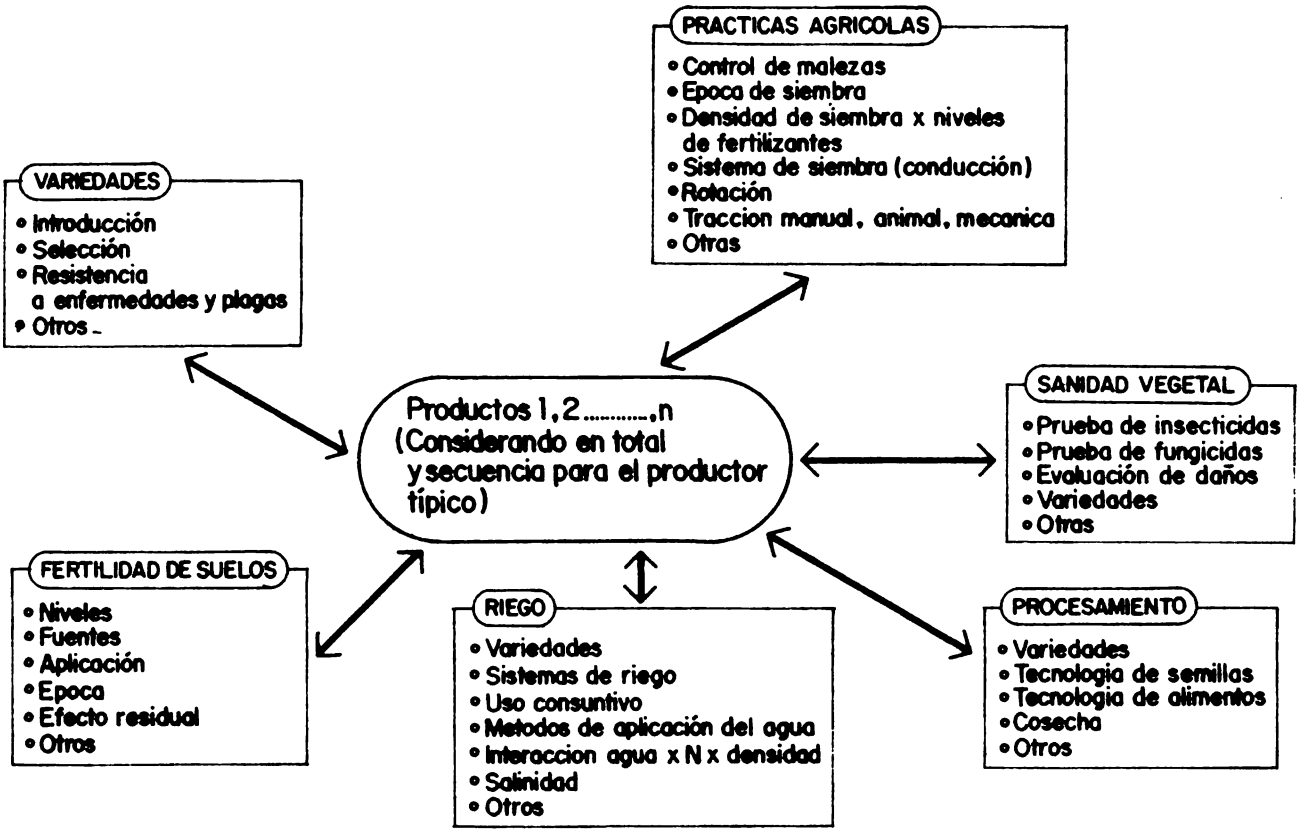


FIGURA 15.2. Diagrama de "experimento grande" y de algunos "experimentos pequeños" para el estudio de Sistemas de Producción en áreas bajo riego (Queiroz, 1976).

CUADRO 15.1. Aumento de la producción de maíz y sorgo (kg/ha) debido a 3 pasos de tecnología en comparación con los 3 pasos combinados (ICRISAT, 1976).

TRATAMIENTO	VARIEDAD	FERTILIZACION	MANEJO DEL CULTIVO	SORGO		MAIZ	
				Productividad (kg/ha)	Aumento sobre Trat.1	Productividad (kg/ha)	Aumento sobre Trat. 1
1	Local	Local	Local	333	-	452	-
5	Mejorada	Local	Local	635	302	629	177
3	Local	Mejorada	Local	1338	905	1902	1450
2	Local	Local	Mejorada	615	282	654	202
	Total del aumento de los 3 pasos individuales				1489		1829
8	Mejorada	Mejorada	Mejorada	3429	3096	3475	3023

presentan en la operación agrícola en las áreas regadas principalmente por los problemas adicionales que se derivan de la falta de su solución, entre otros, de salinidad y drenaje.

Otra premisa importante, es que todo programa de investigación debe centralizarse en los productos principales de la región con la finalidad de generar información básica de suelo, cultivo y clima que permitan aumentar la eficiencia de uso del agua, aumentar la productividad de los cultivos y reducir los costos de producción.

La investigación para agricultura bajo riego con enfoque sistémico debe incluir tres tipos de experimentos, los cuales se describen a continuación:

a. Experimentos pequeños o satelites

Los experimentos satélites comprenden el estudio de problemas específicos en ciertas áreas y que comprobadamente constituyen obstáculos para la obtención de productividades estables y elevadas.

Este tipo de experimentos cubren prácticamente todas las disciplinas de agronomía, pudiendo agruparse en áreas de mayor concentración o líneas de investigación, como por ejemplo: variedades, fertilidad y nutrición de plantas, manejo de suelos, riego y drenaje, sanidad vegetal, manejo del cultivo, etc.

En estos experimentos se usa la metodología convencional de conducción y los análisis siguen los procedimientos estadísticos comunmente utilizados.

b. Experimentos de sistemas de cultivo

Los experimentos de sistema de cultivo son basicamente constituidos de rotaciones, las cuales dependen fundamentalmente de los cultivos principales que presentan posibilidades de mercado.

En cada una de las rotaciones se intengran los principales resultados de los experimentos satélites, donde se evaluan todos los aspectos técnicos de las rotaciones.

Las mejores combinaciones son evaluadas en escala operacional en el experimento de sistema de producción.

c.Experimentos centrales de sistemas de producción

Los experimentos centrales de sistema de producción constan de los mejores tratamientos, económica, y técnicamente viables, de los experimentos satélites y de sistema de cultivo. Estos experimentos son conducidos en escala operacional y se computan todas las informaciones técnicas y económicas con

la finalidad de obtener sistemas de producción viables para los agricultores de pequeños, medios y grandes proyectos de riego.

Esta información se incluye con el objetivo de destacar que el problema de aumentar y estabilizar la productividad de los cultivos en áreas regadas no se resuelve con la centralización de la investigación en una disciplina o línea específica. Ello sólo será posible si se da un tratamiento global, de acuerdo a las principales de una región o país, y considerado bajo un enfoque sistémico.

Considerando que el tema principal de este capítulo se relaciona con la investigación para agricultura bajo riego, a continuación se realiza un análisis resumido del tipo y objetivo de las investigaciones que se deben realizar.

Por otra parte, en consideración a que las necesidades cambian según la región y/o país, se aborda el tema de forma general siendo que deben ser aplicadas las condiciones restrictivas o limitantes de cada caso.

15.4. Líneas Principales de Investigación.

A continuación se indica una serie de líneas de investigación que sirven de base para la elaboración de programas de investigación para áreas regadas.

Se presentan aquellas líneas de investigación de mayor prioridad, no siendo, por lo tanto exclusivas. En sí, constituye apenas un guía, basado en la experiencia y observaciones del autor, y que está dirigido a resolver problemas principales de producción de cultivos regados, y principalmente los problemas de manejo de agua de riego a nivel de finca.

La selección de líneas de investigación para programas de investigación en agricultura irrigada va a depender de la problemática de producción bajo riego de cada país o región, de las políticas agrícolas de cada gobierno y de las necesidades y prioridades definidas a través de un proceso consultivo y participativo entre las instituciones y técnicos de investigación, asistencia técnica y usuarios de la información.

15.4.1. Mejoramiento Genético

Uno de los factores que más contribuyen a los bajos índices de productividad de los cultivos bajo riego es el uso de las mismas variedades de secano, sin ninguna mejora genética. Para mantener una agricultura de riego altamente productiva y eficiente se necesita de variedades de alto capital genético y adaptadas a las condiciones ambientales locales. En una primera etapa se deberán realizar experimentos de competición de variedades, locales e introducidas, bajo condiciones de riego, para seleccionar algunos materiales genéticos promisorios y que puedan representar mejoría en la productividad

de los sistemas de producción utilizados por los agricultores. Esto debe ser entendido como un paliativo de corto plazo.

La investigación en esta área deberá estar principalmente dirigida a obtener los siguientes objetivos:

- Producir semilla genética y multiplicada hasta llenar los requerimientos de material básico.
- Obtener nuevas variedades, partiendo de las poblaciones existentes de centros y viveros internacionales.
- Estabilizar la productividad incrementada mediante la adaptación ecológica de variedades bajo condiciones de riego.
- Desarrollar, introducir y/o adaptar variedades con mayor resistencia o tolerancia a plagas y enfermedades y/o factores físico-ambientales restrictivos (temperatura, salinidad, etc.).

15.4.2. Uso y Manejo de Fertilizantes

Los fertilizantes son insumos que normalmente pesan en el costo de producción de los cultivos, por lo cual deben ser cuidadosamente definidos para cada cultivo en particular. Se deberá dar principal importancia al nivel tecnológico y de capital de los agricultores y al efecto residual.

La investigación en esta área debe tener los siguientes objetivos:

- Definir dosis eficientes de fertilizantes para proveer los requerimientos de macro y micronutrientes del cultivo, principalmente N, P, K.
- Definir las mejores épocas de aplicación y las parcelaciones requeridas.
- Definir el efecto residual de fertilizantes.

15.4.3. Control de Malezas

Bajo condiciones de riego y de buena fertilización, principalmente nitrogenada, hay gran proliferación de malezas, lo que representa una competición por agua y nutrientes con el cultivo. Su efecto puede llegar a ser de mayor importancia sobre la productividad que en cultivos de secano.

La investigación en el control de malezas debe tener los siguientes objetivos:

- Determinar las malezas de mayor importancia.
- Realizar la selección de herbicidas para su control.
- Definir dosis y especificidad de herbicidas.

- Definir dosis economicamente viables para los diferentes sistemas de producción.

15.4.4. Control de Plagas y Enfermedades

Objetivos:

- Determinar las plagas y enfermedades más importantes en cada cultivo.
- Determinar las pérdidas ocasionadas por las principales plagas y enfermedades de cada cultivo.
- Determinar métodos químicos y biológicos para el control de plagas y enfermedades.
- Definir dosis y formas de aplicación.

15.4.5. Relación Suelo-Agua-Planta-Clima

Para el manejo racional y eficiente del agua a nivel parcelar en las áreas bajo riego, se necesita del conocimiento de una serie de datos básicos que caracterizan el método de aplicación de agua a los cultivos en las condiciones de operación. Estos datos no siempre están disponibles en la cantidad y calidad deseables para el uso eficiente por los equipos de asistencia técnica a los agricultores.

En esta área se concentra una serie de tipos de investigaciones importantes, las cuales se describen a continuación:

a. Caracterización físico-hídrica de los suelos para fines de riego

Objetivos:

- Reunir información básica de los diferentes suelos de las áreas regadas para el manejo de riego.
- Facilitar el uso de los datos por el personal de asistencia técnica.
- Mejorar la eficiencia del riego parcelar.

b. Efecto del nivel de manejo del riego sobre la productividad de los cultivos.

Objetivos:

- Complementar la información mundial existente, especialmente de los cultivos de riego, prioritarios de la región o país. En el Capítulo 10 se

presenta información parametrizada para varios cultivos, lo cual permite disminuir la necesidad de investigación en esta área.

- Definir niveles operacionales de manejo del riego para maximizar la productividad de los sistemas de producción, de acuerdo con las características de suelo, cultivo y condiciones de operación del productor.
- Reunir información básica para parametrización y definición de modelos, con el objetivo de extrapolar los resultados.

c. Determinación de la evapotranspiración de los cultivos de riego

Las necesidades de agua de los cultivos, comunmente se calculan a través de fórmulas empíricas, especialmente en las etapas de planificación y elaboración de los proyectos de riego. Para fines de manejo del riego, especialmente a nivel parcelar, se necesitan datos de los principales cultivos, obtenidos a nivel de campo, en consideración a la gran variación en los resultados de las fórmulas empíricas, lo que imposibilita su aplicación (Dula, 1976).

Las investigaciones en evapotranspiración de los cultivos tienen los siguientes objetivos:

- Definir las necesidades de agua de los cultivos principales en función del nivel de manejo del riego y del ciclo fenológico del cultivo.
- Definir las láminas y frecuencia de riego para los cultivos principales en los diferentes tipos de suelo.
- Definir y calibrar las fórmulas empíricas de mayor aplicación en la región o país.
- Calibración de la Bandeja de Evaporación Clase A para extrapolación de los datos y uso en el manejo del riego parcelar.

d. Ciclo fenológico y períodos críticos de riego de los cultivos

Considerando que, normalmente, las disponibilidades de agua para riego son limitadas, se necesita aumentar la eficiencia de uso, lo cual se puede conseguir a través de la mejoría en la aplicación de agua a los cultivos. Para lograrlo, se necesita conocer detalladamente el ciclo fenológico de los cultivos y la respuesta a la falta de riego en las diferentes fases de su ciclo vegetativo (Millar, 1984).

Los cultivos presentan variación en la respuesta a la falta de riego a través de su ciclo fenológico lo cual modifica el manejo del riego, siendo necesario definir la situación de cada cultivo en particular (Millar, 1984). En los períodos críticos la falta de riego produce marcada reducción en los

rendimientos. Así, por ejemplo, la falta de agua en el período de inicio a fin de la polinización en el maíz provoca una reducción de 50 % en los rendimientos (Millar, 1984).

Las investigaciones en esta área tienen los siguientes objetivos:

- Definir el ciclo fenológico de los cultivos y los períodos críticos a la falta de agua.
- Cuantificar el efecto de los déficits fenológicos en la productividad del cultivo.
- Normalizar la distribución de agua en la operación de las áreas regadas y definir las necesidades de riego mínimas complementarias para los cultivos.
- Generar información básica para los programas de manejo de cultivo y de mejoramiento genético dirigidos para resistencia a la sequía, en condiciones de secano.

e. Estudios de interacción de láminas de riego y fertilización nitrogenada.

La eficiencia de uso de los fertilizantes, especialmente nitrogenados, está intimamente relacionada con el manejo del riego, siendo necesario definir la función de producción para lámina de agua en función de la fertilización. Esta es una información básica no sólo para áreas regadas sino también para áreas de secano (Millar, 1977).

Las metodologías actualmente disponibles para este tipo de investigación permiten que en un mismo experimento se puedan obtener varias informaciones importantes, inclusive para áreas de secano como se especifica en el Capítulo 16 (Millar, 1977; Silva et al.,1978).

Los objetivos de este tipo de investigación son:

- Determinar la función de producción para lámina de agua en los diferentes cultivos.
- Generar información para manejo de riego (lámina, frecuencia de riego, evapotranspiración).
- Generar información para agricultura de secano (zoneamiento de los cultivos, posibilidades de uso de fertilizantes nitrogenados).

f. Parametrización de la información de suelo-cultivo-clima para manejo de agua.

En el manejo del riego de los cultivos hay necesidad de definir dos aspectos: CUANTA AGUA Y CUANDO APLICAR. Para esto, se necesita

conocer en forma integrada las informaciones de suelo, cultivo y clima, y de las características del método de riego y condiciones operacionales de los agricultores (educación, conocimiento de las tecnologías y equipos, mano de obra, etc.).

En esta área de investigación se debe seleccionar y usar la información producida en las diferentes investigaciones de riego, con los siguientes objetivos:

- Parametrizar los datos y métodos de riego para uso por la asistencia técnica junto a los productores.
- Definir metodologías de adecuación de los resultados de investigaciones para realizar la extrapolación y uso en otras áreas ecológicas.
- Montar modelos de análisis de la información.

Como ejemplo de lo que se pretende obtener en esta área de investigación, en la Figura 10.27 del Capítulo 10, se muestra un fluxograma para determinar la frecuencia operacional de riego de los cultivos (Millar y Choudhury, 1980).

15.4.6. Metodología de Riego

Para obtener la máxima eficiencia en la aplicación el agua se deben definir adecuadamente las características de los métodos de riego para las condiciones de producción y de operación del agricultor, especialmente de aquellos métodos ya en uso en las áreas bajo riego.

El método de riego, en la mayoría de las áreas irrigadas ya está definido, pero la operación y manejo no está adecuadamente ecuacionado a los cultivos y sus características específicas.

La investigación en esta área esta dirigida a la parametrización de los métodos con el objetivo de mejorar el manejo del agua, introducción de nuevos métodos con la finalidad de aumentar la productividad de los cultivos, obtener un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles, y a la comparación técnico-económica de diferentes métodos con cultivos específicos y con primera prioridad.

Los trabajos en metodología de riego debe seguir esta secuencia: parametrización de los métodos en uso, introducir, conocer y parametrizar nuevos métodos y sólo entonces realizar los estudios comparativos. Al no seguir esta secuencia, muchas veces se introducen errores básicos de experimentación (Millar, 1982).

En el caso específico de la comparación de métodos de riego existen tres aspectos a los cuales se debe prestar atención en la planificación y conducción de los trabajos experimentales.

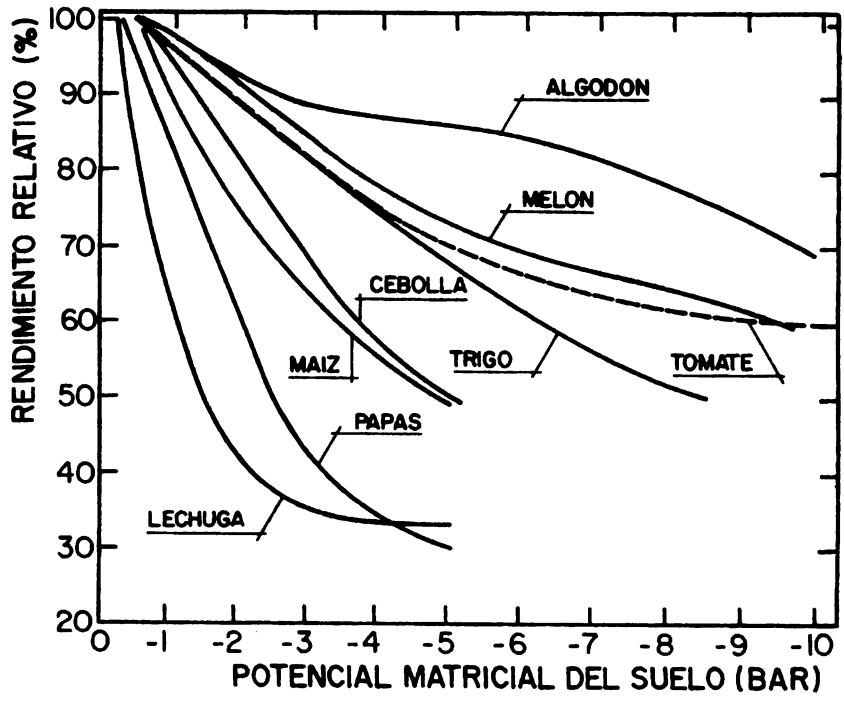


FIGURA 15.3. Relación entre rendimiento relativo y potencial matricial del suelo para varios cultivos (Millar, 1976).

El primer aspecto se refiere a la respuesta de los cultivos al déficit de agua, sobre lo cual se trató ampliamente en el Capítulo 10.

En la mayoría de los cultivos, la producción máxima se obtiene con el manejo del riego a potenciales matriciales en el suelo mayores de −0,5 bar (Millar, 1984; Millar y Choudhury, 1980). En el caso de algunos cultivos mas resistentes al déficit de agua, se pueden obtener altas producciones aún a menores potenciales matriciales de agua. La Figura 15.3 presenta la relación entre rendimiento relativo y potencial matricial del suelo para varios cultivos, a través de la cual se verifica que los cultivos mas sensibles al agua son lechuga y papas y el más resistente es el algodón. Estas informaciones corroboran los resultados de comparación de métodos de riego presentados en el Cuadro 15.2.

Debido a la alta sensibilidad de los cultivos de lechuga y papas al nivel del agua en el suelo, estos presentan mejor respuesta a las condiciones de

CUADRO 15.2. Resultados experimentales de la comparación de los métodos de riego por aspersión, goteo y surcos en varios cultivos (Millar, 1982).

		Rendimiento (Kg/Há)			Aumento Rendimiento
	CULTIVO	ASPERSION	GOTEO	SURCOS	
	HORTALIZAS				
1	Pimentón	-	71.4 1/	73.8 1/	-3,3
2	Tomate	-	83.200(29)	65.400(118,6)	27,2
3	Tomate	-	70.000(48)	67.200(122)	4,2
4	Repollo	-	76.800(50)	81.200(50)	-5,4
5	Cebolla	92.540(93)	98.650(68)	65.350(112)	51,0
6	Pepino	-	69.630(62)	78.770(100)	-11,6
7	Pepino	-	71.110(46)	64.940(84)	9,5
8	Lechuga	-	70.000	31.000	125,8
9	Lechuga	32.500	47.300	43.100	9,7
10	Zapallo italiano	-	29.140	33.090	-11,9
11	Zapallo italiano	-	26.400(38)	29.900(38)	-11,7
12	Papas (invierno)	-	23.900	14.400	66,0
13	Papas (primavera)	-	23.770	12.030	98,0
14	Papas	32.200	33.800	23.100	46,3
	GRANOS				
15	Maiz	8.800	7.100(39)	7.000(58)	1,4
	FRUTAS Y FRUTALES				
16	Frutillas	-	13.598	7.804	74,2
17	Frutillas	14.300	16.000	13.400	19,40
18	Cantaloupes	-	22.690	16.670	36,10
19	Melón	-	13.817	9.073	52,30
20	Melón	55,8 2/	84,7 2/	46,1 3/	83,70
21	Melón	13.000	35.000	16.700	109,60
22	Melón	-	43.385	32.000	35,60
23	Melón	23.800	43.000	24.200	77,7
24	Chinola (Maracujá)	-	808	495 3/ NS	63,2 NS
25	Cítricos	-	133.500	124.600	7,1
26	Naranja	-	85 4/	40 4/	112,5
27	Vid	-	20.750	18.770	10,6
28	Vid	-	23.120(75)	21.920(74)	5,5
	PLANTAS INDUSTRIALES				
29	Olivo	9.070	17.140	2.070	728,0
30	Algodón	-	1.680	1.702	-1,3

(CONTINUACION CUADRO 15.2).

	Características del Método Gravitacional	AUTOR
1	Surcos 8 m de largo	Caixeta et al. (1980)
2	Sin información	Hall (1974)
3	Sin información	Hall (1974)
4	Surcos de 3 m de largo	Bucks et al. (1973)
5	Surcos de 18 m de largo	Hanson and Patterson (1974)
6	Fotograf. muestra surcos largos	Hall (1974)
7	Fotograf. muestra surcos largos	Hall (1974)
8	Sin información	Moreno (1978)
9	Sin información	Howell et al. (1976)
10	Surcos de 33 m de largo	Davis and Pugh (1974)
11	Surcos de 37 m de largo	Davis and Pugh (1974)
12	Sin información	Singh et al. (1974)
13	Sin información	Singh et al. (1974)
14	Sin información	Howell et al. (1976)
15	Surcos de 18 m de largo	Hanson and Patterson (1974)
16	Surcos de 25 m de largo	Olitta and Minami (1975)
17	Sin información	Olitta et al. (1978)
18	Surcos de 42 m de largo	Davis and Pugh (1974)
19	Surcos de 18 m de largo y 0,2% de declive.	Olitta et al. (1978)
20	Sin información	Shmueli and Goldberg (1971)
21	Sin información	Golberg et al. (1971)
22	Surcos nivelados, 12 m largo	Coelho et al. (1978)
23	Sin información	Golberg et al. (1976)
24	Surcos de 12 m de largo	Coelho and Gomes (1980)
25	Sin información	Algibury et al. (1974)
26	Inundación	Bester et al. (1974)
27	Surcos de 10,5 m de largo	Bucks et al. (1974)
28	Surcos nivelados, 20 m largo	Oriolani et al. (1978)
29	Melgas	Dan (1974)
30	Surcos de 6 m de largo	Bucks et al. (1974)

1/ g/fruto 3/ g/planta NS: No significativo 5/ Goteo
2/ g/parcela 4/ kg/árbol () cm de agua aplicados respecto surcos

riego por goteo que bajo condiciones de riego por surcos. En el caso del algodón, por ser resistente a la falta de agua tiene la misma respuesta tanto bajo riego por goteo como por surcos, lo que se demuestra en los resultados del Cuadro 15.2.

El segundo aspecto a considerar es el nivel de manejo del riego, ya que este determina el nivel de productividad posible de obtenerse en los cultivos.

El nivel de manejo del riego es definido por las condiciones operacionales del método de riego, tipo de cultivo y características edafoclimáticas.

Mediante el riego por goteo es posible mantener altos potenciales de agua en el sistema radicular de los cultivos durante todo el ciclo vegetativo, razón por la cual se obtienen niveles máximos de productividad.

En el caso de riego por surcos no se pueden obtener producciones máximas potenciales debido a que, en condiciones operacionales es imposible manejar el agua a altas frecuencias de riego. Resultados obtenidos por Millar y Choudhury (1980), indican que bajo condiciones de riego por surcos se puede obtener sólo 80 % de la productividad potencial del cultivo.

En el caso del riego por goteo, el rango de manejo del riego - en términos de potenciales matriciales - es menor que en el caso de riego por surcos, bajo cuyas condiciones de manejo se permite extraer gran parte del agua almacenada en la zona radicular del cultivo.

Por otra parte llama la atención que los sistemas de riego por goteo sean operados en condiciones de frecuencias de riego, lo que coloca al método fuera de sus características operacionales básicas como lo es el mantenimiento de altos potenciales de agua en el suelo para obtención de producción máxima. Esta es una práctica que se debería analizar llevando en consideración las características del cultivo, conforme indican los resultados de la Figura 15.3. De acuerdo con la disponibilidad de agua y el cultivo a ser regado, se debería considerar la selección de otros métodos menos eficientes y de menor requerimientos energéticos.

El tercer aspecto se refiere a la metodología experimental. Los datos del Cuadro 15.2 indican que existe una gran disparidad en la metodología utilizada en los experimentos, especialmente en el caso del riego por surcos.

En las unidades experimentales usadas en el riego por surcos se utilizan largos de surcos que no representan las características del método y menos todavía las condiciones operacionales a nivel de finca. Se registran datos recopilados de varios trabajos de comparación de métodos donde se usaron surcos de 3 a 18 m de largo (Cuadro 15.2).

Debido al uso de surcos cortos y en muchos casos nivelados, se obtiene una alta eficiencia de aplicación del riego, lo que no representa las características del método, colocándolo prácticamente en las mismas condiciones

de manejo que el riego por goteo. Por esta razón los resultados hasta ahora obtenidos en las parcelas experimentales no representan una adecuada comparación entre los métodos de riego por goteo y surcos.

Sólo se obtiene una comparación adecuada cuando se utiliza el riego por surcos con largos de surco equivalentes a las condiciones operacionales de la finca del agricultor, lo que depende del suelo, cultivo y operaciones mecanizadas. Esto implica que la eficiencia de riego estará entre 35 y 65 %, en vez de superior a 85 % como en el caso de los resultados presentados en el Cuadro 15.2.

Debido a todo lo anterior es necesario definir la metodología experimental para la comparación de los métodos de riego por goteo y surcos, colocándolos en sus condiciones reales de operación.

a. Parametrización de los métodos de riego

Existen una serie de parámetros básicos en cada método de riego que se deben definir adecuadamente para el manejo eficiente del agua. Así, por ejemplo, para el manejo del riego por surcos es necesario conocer las condiciones de la parcela del agricultor (suelo, pendiente, infiltración, largo de los surcos, caudales apropiados, etc). El gran número de variables dificulta cualquier intento de dar recomendaciones de manejo de riego en frente del agricultor. Para ello es necesario realizar una adecuada parametrización del método envolviendo el mayor número de variables posibles.

La investigación en esta área tiene los siguientes objetivos:

- Definir los parámetros básicos de los métodos de riego en uso en las áreas irrigadas.
- Definir metodologías de presentación y uso de la información.
- Facilitar el manejo de riego y el trabajo del equipo de asistencia técnica a nivel del agricultor.

Algunas publicaciones realizadas en esta área de investigación ejemplifican los objetivos deseados (Queiroz et al, 1975; Millar et al., 1978; Millar y Choudhury, 1980).

b. Introducción de nuevos métodos de riego

En regiones dependientes de regímenes pluviométricos limitados y de distribución muy irregular o de recursos hídricos, subterráneos y superficiales escasos, es necesario realizar investigaciones para definir, evaluar e introducir nuevos métodos de riego con características de mayor eficiencia de aplicación y en lo posible de bajo costo y de fácil operación.

Las investigaciones en esta área tienen los siguientes objetivos:

- Estudiar nuevos métodos y sistemas de riego, de alta eficiencia, bajo costo y fácil operación.
- Aumentar la diversificación y la productividad de los cultivos.
- Evaluar técnica y economicamente, el uso de estos métodos.
- Proporcionar a los agricultores otras alternativas de selección de métodos de riego, además de los tradicionales.

c. Comparación de métodos de riego

La productividad que se puede obtener en la mayoría de los cultivos de riego depende en gran parte del método de aplicación de agua. Dependiendo de las características del suelo y de los cultivos, el método de riego puede propiciar el aumento de la eficiencia de los fertilizantes y puede aumentar o disminuir la calidad de los productos y la incidencia de enfermedades.

Las investigaciones en esta área tienen los siguientes objetivos.

- Evaluacion técnica y económica de los métodos de riego con diferentes cultivos.
- Definir el método de riego más apropiado a los cultivos, que posibilite un aumento en productividad, un mejor uso de los fertilizantes y menor incidencia de enfermedades.

15.4.7. Evaluación de Sistemas de Manejo de Riego

Hay una serie de factores que condicionan la definición del nivel de manejo del riego a nivel parcelar que se deben investigar en conjunto. Esta es una etapa intermedia entre el experimento satélite y los de sistemas de cultivo y de producción que permite realizar una comprobación de los resultados de manejo del agua y del método de riego obtenidos a nivel de experimento pequeño y compararlo al tipo de manejo usado por el agricultor. Su concepción se prende a la necesidad de evaluar el factor de eficiencia del método de aplicación del agua, lo cual fue optimizado en los experimentos pequeños.

De acuerdo con lo anterior, este tipo de investigación tiene los siguientes objetivos:

- Evaluar el método de riego y nivel de manejo del agua en condiciones semicomerciales.
- Evaluar el manejo del sistema de producción, incluyendo el factor eficiencia.

15.4.8. Sistemas de Producción

Como se indicó anteriormente, la investigación y definición de los sistemas de producción más adecuados a las condiciones del medio ambiente (factores naturales y socioeconómicos) se constituye en el cuerpo central de un Programa de Investigación para áreas regadas.

Partiendo de una realidad compleja, como lo es el sistema productivo en uso por el agricultor, se abstraen elementos específicos que constituyen objetos de la investigación temática. La ejecución de proyectos de investigación, aún partiendo de una idea más global, dará origen a conocimientos parciales. Obtenidos los conocimientos parciales e informaciones aisladas, a través de un proceso de síntesis, se deben organizar nuevos sistemas de producción, probarlos, y por medio de instrumentos adecuados (asistencia técnica, crédito, etc) difundirlo entre los agricultores.

El esfuerzo de síntesis se debe realizar no sólo del volumen de informaciones acumuladas por la investigación, sino también, que resulte de la confrontación de estas informaciones con la situación actual de las explotaciones que se dedican a la producción bajo riego del producto considerado, incluyendo en la descripción de esta última, la experiencia y los conocimientos acumulados por los productores y técnicos, conforme se indica en la Figura 15.4 por la flecha que viene de "REALIDAD".

La investigación en sistemas de producción para áreas regadas deberá contemplar las siguientes fases (Simões, 1983):

Primera Fase: Descripción de los sistemas de cultivo y de producción en uso por los agricultores, y la identificación de los factores que limitan la producción.

Segunda Fase: Solución de los problemas identificados a través de una investigación multifactorial, integrada, para continuamente alimentar los sistemas de cultivo en uso, y de esta manera, formular nuevos sistemas de producción.

Tercera Fase: Prueba de los sistemas, a nivel del agricultor, comparándose los sistemas tradicional (agricultor) y modificado por la acción de la investigación.

Con esta prueba de los sistemas se busca:

- Identificar los factores que están limitando la producción y que darán origen a nuevos trabajos de investigación.
- Obtener coeficientes técnicos que permitan realizar estudios de optimización mediante el uso de programación lineal.

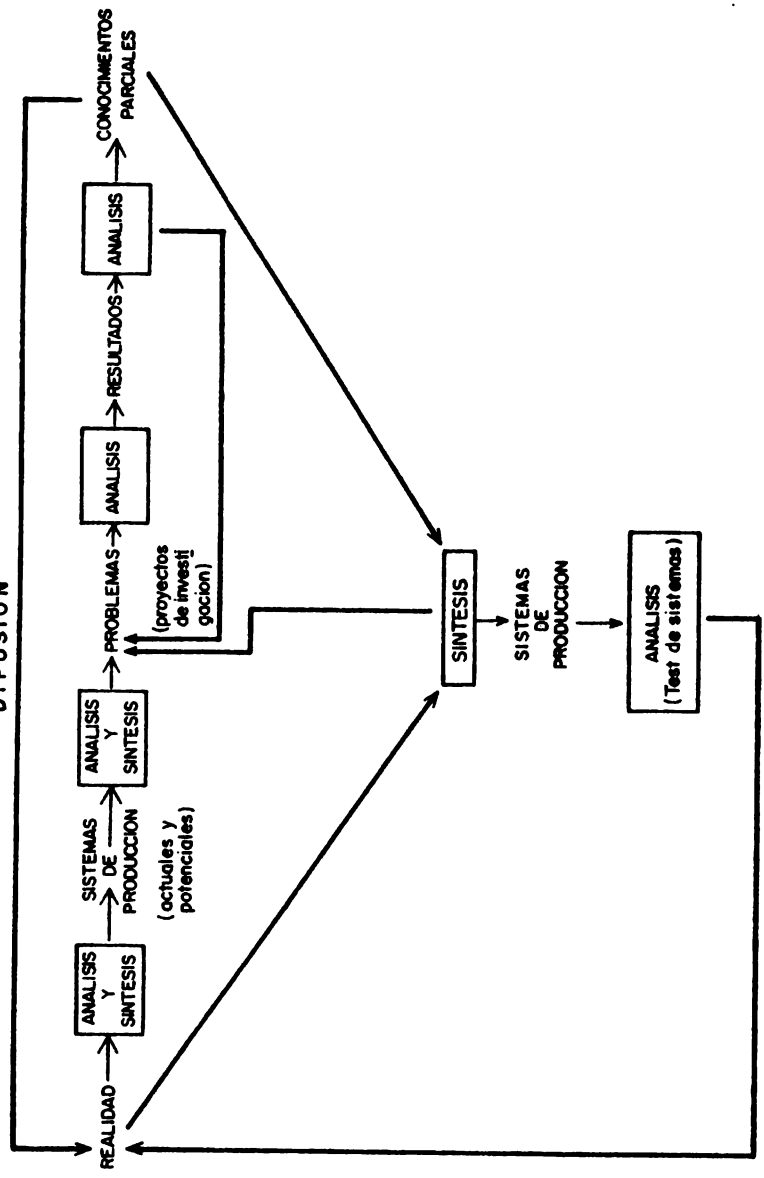


FIGURA 15.4. Esquema del enfoque "analítico-sintético" (Gastal, 1975).

- Evaluar en parcelas comerciales la eficacia de las tecnologías recomendadas.
- Servir de áreas demostrativas de los resultados para agricultores y extensionistas.

Cuarta fase: Optimización de los modelos de sistemas de producción

14.4.9. Drenaje

En esta área temática se ha producido gran cantidad de informaciones tecnológicas que deben ser aprovechadas mediante una adecuada y apropiada extrapolación. La investigación en drenaje esta principalmente dirigida a resolver problemas específicos de carácter local. Debido a esto se deberán realizar investigaciones, entre las cuales, las que se definen a continuación.

a. Determinación de la profundidad y espaciamiento de drenes a través de pruebas en áreas pilotos

Objetivos:

- Generar tecnología sobre drenaje subterráneo.
- Establecer normas de drenaje para el dimensionamiento de sistemas en áreas regadas.

b. Estudios de recarga subterránea

Objetivos:

- Estudiar la influencia de las precipitaciones naturales en los problemas de drenaje superficial y subterráneo.
- Verificar la fluctuación de la napa freática en áreas sometidas a diferente manejo de riego.
- Definir las condiciones de recarga en áreas regadas.

c. Efecto de la fluctuación de la napa freática en la distribución de sales en el perfil del suelo

Objetivos:

- Cuantificar el efecto de la profundidad de la napa freática en el proceso de salinización de los suelos.
- Evaluar el efecto de la demanda atmosférica en el transporte de sales para la superficie del suelo.

d. Necesidades de drenaje superficial de cultivos regados

Objetivos:

- Conocer el efecto de diferentes períodos de inundación sobre los cultivos.
- Determinar los períodos mas críticos a la inundación.
- Definir el tiempo de drenaje de los diferentes cultivos.

e. Necesidades de drenaje subterráneo de los cultivos de riego

Objetivos:

- Conocer el efecto de diferentes profundidades de la napa freática sobre la producción de los cultivos prioritarios.
- Definir los requerimientos de drenaje subterráneo para los diferentes cultivos.
- Completar la información mundial existente.

f. Materiales para drenaje subterráneo

Objetivos:

- Pruebas de tipos de material filtrante para drenes subterráneos (mineral, orgánico y sintético).
- Análisis económicos de materiales para drenes (plásticos, tubos de cerámica, bambú, etc.).

g. Evaluación de sistemas de drenaje

Objetivos:

- Evaluar las normas de diseño.
- Evaluar la eficiencia del sistema.
- Evaluar los procedimientos y metodologías utilizadas.

15.4.10. Salinidad y Manejo de Suelos Afectados por Sales

La ejecución de investigaciones en suelos afectados por sales implica en la selección y montaje de campos experimentales específicos para estos estudios, ya que normalmente tienen un largo período y se necesita un histórico detallado de las áreas en función del tiempo y de los cambios en el manejo y su tratamiento.

En general, la implantación de campos experimentales específicos para investigaciones de suelos salinos, salino-sódicos y sódicos tienen los siguientes objetivos:

- Concentración de los estudios abordando de forma integrada, los métodos de riego, métodos de recuperación de los suelos, introducción de plantas y/o métodos de cultivo que permitan el uso de las áreas afectadas por sales, considerando los sistemas de producción en uso en las áreas regadas.
- Concentración de recursos humanos y financieros de todas las instituciones que puedan directa o indirectamente contribuir para la ejecución de un programa integrado de investigación para solucionar los principales problemas de salinidad y drenaje.

Entre las investigaciones más comunes en suelos afectados por sales se consideran las siguientes.

a. Estudio de la evolución química de los suelos de las áreas regadas.

Objetivos:

- Análisis y evaluación de la fluctuación de sales en suelos regados en función de tiempo.
- Definir la necesidad de prácticas específicas de manejo, cuando necesario.
- Cuantificar la evolución de los problemas de sales.

b. Balance de sales y exigencias de lixiviación en áreas regadas.

Objetivos:

- Evaluación de la cantidad de sales incorporadas al perfil de suelo a través del riego y de la cantidad de sales eliminadas a través del drenaje.
- Estimar láminas de agua que se deben aplicar al suelo para el restablecimiento y mantención de un nivel adecuado de sales en el perfil del suelo.

c. Influencia del método de riego en la salinización o alcalinización de los suelos regados

Objetivos:

- Determinar la variación del contenido de sales en el perfil del suelo por la aplicación de agua a través de diferentes métodos de riego.

- Evaluar los métodos de riego desde el punto de vista del riesgo de salinizacion.

d. Uso de parcelas indicadoras para definir factores limitantes de la produccion de los diferentes cultivos de riego

Objetivos:

- Definir los factores de suelo-agua que limitan la producción de los diferentes cultivos en las áreas con problemas de sales.
- Generar información para definir y/o adecuar los planes agrícolas de las áreas bajo riego.

e. Fluctuación de los niveles de sales en las redes de drenaje de las áreas regadas

Objetivos:

- Análisis y evaluación de la fluctuación de los contenidos de sales en las redes de drenaje, en función del tiempo.
- Realizar una cuantificación del balance general de sales en las áreas de riego.
- Cuantificar el efecto de las prácticas de manejo y/o recuperación de los suelos afectado por sales.

f. Determinación del nivel económico del uso de correctivos químicos en suelos sódicos

Objetivos:

- Definir los tipos de correctivos químicos más adecuados para uso en la recuperación de suelos sódicos.
- Cuantificar el uso de correctivos químicos (dosis, formas de aplicación, tipo de lavados, etc.).

g. Prácticas de manejo en la recuperación de suelos salino- sódicos y sódicos.

Objetivos:

- Determinar el efecto combinado de la preparación del suelo, uso de correctivos y cultivos en la recuperación de suelos salino- sódicos y sódicos.

- Generar informaciones a nivel de parcelas experimentales y semicomerciales para uso por los agricultores de las áreas afectadas por sales.
- Colocar en producción agrícola los suelos abandonados de las áreas bajo riego.

15.4.11. Obras y Estructuras Hidráulicas

Objetivos:

- Estudiar materiales y procedimientos para abaratar el revestimiento de canales, principalmente para proyectos de pequeña irrigación.
- Desarrollar y construir pequeñas estructuras hidráulicas portátiles para riego superficial.
- Construcción simple y prueba de aforadores de agua.
- Evaluar la uniformidad y calidad de la construcción de estructuras hidráulicas.
- Pruebas de normalización de la construcción de obras y estructuras hidráulicas.
- Estudios económicos comparativos de procedimientos de construcción.

15.4.12. Materiales y Equipos de Riego

Objetivos:

- Diseño y prueba de sistemas simplificados de riego superficial y a presión (goteo, micro-aspersión).
- Pruebas de desempeño de los equipos de riego (bombas, aspersores, sistemas mecanizados, etc.).
- Evaluación de los sistemas de riego mecanizado.
- Estudios de la uniformidad de fabricación y durabilidad de aspersores, mangueras y otros componentes de los sistemas de riego.
- Estudios económicos comparativos del uso de diferentes sistemas de riego.

15.5. Control del Riego en Investigaciones.

La investigación en agricultura bajo riego tiende a ser más compleja que la agricultura de secano porque además de los factores de producción en estudio, se debe hacer un control del agua de riego.

El control del riego en un nivel determinado para cada cultivo es una necesidad con la finalidad de padronizar las investigaciones, así como para definir puntos de referencia que permitan hacer comparaciones de los resultados experimentales de diferentes años, regiones, variedades, épocas, etc.

El control del riego puede tener diferentes niveles de precisión dependiendo de la naturaleza del experimento. En los experimentos donde el factor agua es una variable experimental necesita ser controlado con mayor rigor que en aquellos donde el factor agua es mantenido constante, es decir el agua aparece sólo como un insumo. En este último caso, el nivel de aplicación del riego se debe definir para cada cultivo en el rango de las condiciones de operación del agricultor con la finalidad que las informaciones representen una situación real y tengan una utilización inmediata.

En las investigaciones con cultivos regados , en otras líneas de investigación fuera de la de uso y manejo de agua, el riego es un medio para obtener resultados sobre la influencia de otros factores de producción. Esta es la situación de la investigación en las lineas de mejoramiento y producción de semillas, uso y manejo de fertilizantes, manejo del cultivo, (tratamientos culturales, control fitosanitario, etc.). y sistemas de producción. En estos casos, es necesario definir una metodología práctica, simple y de fácil ejecución para conducir los experimentos en un nivel de aprovechamiento del agua del suelo que constituya un punto de referencia de la investigación para agricultura bajo riego, además de aquella realizada en uso y manejo del agua.

En esta sección se presenta una metodología para el control del riego en investigaciones donde el factor agua no es una variable experimental.

15.5.1. Aspectos Conceptuales

Existen varias alternativas para el control del riego, siendo que para el control del riego en investigaciones donde el factor agua no es una variable experimental se adapta bien el Calendario de Riego, el cual está basado en el balance de agua entre la evapotranspiración del cultivo y el agua aprovechable almacenada en el perfil del suelo.

La evapotranspiracion del cultivo se obtiene a partir de la información del tanque de evaporación y de coeficientes de desarrollo del cultivo (k). Este método se describe en detalles en la sección 13.5 del Capítulo 13.

La información diaria de evaporación del tanque debe existir o debería existir en todas las estaciones experimentales que desarrollan investigaciones con cultivos de riego.

El coeficiente de desarrollo del cultivo (k) es determinado en función del ciclo vegetativo para los diferentes cultivos, utilizando datos de evapotranspiración obtenidos a través de lisímetros o balances de agua en parcelas

experimentales o balances de energía y de la información de la evaporación del tanque en los mismos períodos. De esta forma k es el resultado de la relación entre estos datos como sigue:

$$k = ET/E_{tanque} \qquad (15.1)$$

Para el Calendario de Riego, el problema reside en definir la evapotranspiración (ET) o uso consuntivo del cultivo, lo cual es hecho a través de la relación anterior, siendo:

$$ET = k * E_{tanque} \qquad (15.2)$$

Cuando se desconocen los coeficientes k de los cultivos, se recomienda usar los coeficientes determinados por Hargreaves (1956 y 1976), los cuales deben ser substituidos a medida que los investigadores van determinando los referidos coeficientes para los cultivos en trabajos experimentales bajo las condiciones climáticas locales.

En el Cuadro 13.11 (Capítulo 13) se muestran los coeficientes k, definidos por Hargreaves (1956 y 1976), en función del porcentaje del ciclo vegetativo de diferentes cultivos.

En el Cuadro 13.11, los cultivos son divididos en grupos de acuerdo con su similitud en el consumo del agua. El ciclo de los cultivos está dividido en rangos de 5 %, siendo que se adopta el rango deseado (5 %, 10 %, 15 %...etc.).

Para el calculo de ET, se toma el coeficiente intermedio de cada rango. Así, si el ciclo se divide en fajas de 20 %, se tiene 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %. En este caso, los coeficientes corresponden a 10 %, 30 %, 50 %, 70 % y 90 %, respectivamente.

15.5.2. Operacionalización del Calendario de Riego

Con la finalidad de operacionalizar la metodología, se recomienda usar el Cuadro 15.3 en el control del Calendario de Riego.

El Cuadro 15.3 contiene 10 columnas con la siguiente información:

Columna A: Profundidad del suelo, en mm., considerada para la profundidad efectiva de las raíces en los diversos períodos de crecimiento del cultivo.

Columna B: Porcentaje del ciclo del cultivo, tomándose como 100 % el total de días del ciclo.

CUADRO 15.3. Información para el Calendario de Riego.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Profund. efectiva	Ciclo del cultivo	Nº de días	Coeficientes k	E_t	ET	LN	Balance	Precipitación efectiva	Fenología
mm	(%)	(días)	-	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	—

Columna C: Número de días del ciclo.

Columna D: Coeficientes de desarrollo del cultivo (k). Estos coeficientes se muestran en el Cuadro 13.11 para el porcentaje deseado del ciclo de cultivo. Para determinar estos coeficientes se divide el ciclo del cultivo en términos porcentuales de acuerdo con la finalidad del trabajo. En este caso, la división del ciclo en 10 partes es satisfactorio. Se toman los valores intermedios correspondientes a cada parte. Así, si se divide el ciclo del cultivo en 10 partes se tiene:

0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, y 100 %.

Para el invervalo de 0 a 10 %, se toma el coeficiente correspondiente a 5 %, para el intervalo de 10 a 20 %, se toma el coeficiente correspondiente a 15 %, y así sucesivamente.

Columna E: Evaporación del tanque, en mm.

Esta información debe ser recolectada y anotada diariamente. Los investigadores involucrados en investigación con cultivos de riego deben tener esta información disponible a su debido tiempo. En este sentido, se recomienda la colocación de un pizarrón en las estaciones experimentales para anotar esta información diaria de tal forma que los investigadores obtengan los datos con mayor facilidad.

Columna F: Evapotranspiración o uso consuntivo, en mm/día.

Esta información se obtiene multiplicando los valores correspondientes de las columnas D y E, es decir, el coeficiente k correspondiente al período considerado por la evaporación del día, medida en el tanque clase A.

Columna G: Lámina neta utilizable, en mm.

Para obtener esta informacion se debe definir un nivel de aprovechamiento de agua disponible en el perfil del suelo, es decir, cada vez que el cultivo llegue a este nivel de agua disponible, se debe regar.

De acuerdo con lo anterior, la lámina neta utilizable (LN) se calcula por la siguiente expresión:

$$LN = [F\ (CC - PM)\ D_e\ P]/100 \qquad (15.3)$$

donde:

LN: Lámina neta utilizable, en mm,

F: Factor que representa el nivel de agotamiento del agua disponible en el suelo, expresado como fracción porcentual.

CUADRO 15.4. Nivel de manejo del riego, en términos de potencial matricial del suelo, sugerido para varios cultivos cuando regados por métodos gravitacionales.

Cultivo	Nivel de Manejo del Riego (Bar)
Trigo	-3,2
Cebada	-3,2
Maíz	-1,6
Frijol	-2,0
Cebolla	-2,1
Papas	-1,6
Tomate	-2,0
Lechuga	-0,75
Melón	-2,2
Alfalfa	-1,65
Trébol	-3,1
Algodón	-2,5
Caña de azúcar	-1,6

En el Cuadro 15.4 se presentan los umbrales de riego sugeridos para diferentes cultivos, en términos de potenciales matriciales, cuando regados por métodos gravitacionales. Utilizando la curva de retención de agua del suelo del área experimental se calcula el nivel de agotamiento correspondiente.

CC: Agua retenida en el suelo,en porcentaje en peso seco, cuando el potencial matricial es de – 0,33 bar (suelos arcillosos) o – 0,1 bar (suelos arenosos). Este punto corresponde al límite superior de aprovechamiento de agua por las plantas, conocido como Capacidad de Campo.

PM : Agua retenida en el suelo, en porcentaje en peso seco, cuando el potencial matricial es de – 15 bar. Este punto corresponde al límite inferior de aprovechamiento de agua por las plantas, conocido como Punto de Marchitez Permanente.

Da : Densidad aparente del perfil de suelo considerado, en g/cm^3.

P : Profundidad efectiva de extracción de agua por el sistema radicular del cultivo, en mm. El valor de P varía con el desarrollo vegetativo del cultivo, y se deberá usar aquel valor que corresponde al período considerado del ciclo fenológico.

Es del caso resaltar que la lámina neta utilizable (Columna G), aunque sea previamente calculada a través de la fórmula de "cálculo de lámina", para los efectos de la aplicación del agua, el valor de LN debe ser colocado en el calendario, corregido por muestreo de la humedad del suelo, lo cual se deberá realizar luego después de cada riego. Esta operación permite corregir desviaciones del uso del balance de agua.

El muestreo de suelo se debe realizar por camadas de 30 cm del perfil, hasta la profundidad efectiva del sistema radicular, con lo cual se puede determinar la lámina de agua almacenada (LA) del perfil, de la siguiente manera:

$$LA = L_1 + L_2 + \ldots\ldots\ldots + L_n \qquad (15.4)$$

$$LA = \Theta_1 * D_{s_1} * Z_1 + \Theta_2 * D_{s_2} * Z_2 + \ldots\ldots\ldots + \Theta_n * D_{s_n} * Z_n \qquad (15.5)$$

donde:

LA : Lámina de agua almacenada en el perfil del suelo, en mm.

$L_1, L_2, \ldots, L_n$: Láminas de agua almacenadas en las diferentes camadas del perfil del suelo, en mm.

$\Theta_1, \Theta_2, \ldots, \Theta_n$: Porcentaje de humedad en base seca en las diferentes camadas.

$D_{s_1}, D_{s_2}, \ldots, D_{s_n}$: Densidad aparente de las diferentes camadas, en g/cm^3

$Z_1, Z_2, \ldots Z_n$: Espesura de las diferentes camadas, en mm.

El muestreo de suelo para la determinación de la humedad del suelo se deberá realizar al mismo nivel en que se efectua el riego. Si el riego se realiza por parcela, entonces el muestreo se debe hacer por parcela. Si el riego se realiza por bloque, el muestreo debe representar el bloque. En el caso de parcelas, se recomienda tomar una media de muestreo de dos perfiles. En el caso del riego por bloque, por tratarse de un área mayor, se recomienda muestrear un bloque diferente en cada riego.

En el caso de la aplicación de agua por gravedad (surcos, melgas, etc.) se deberá muestrear cerca de la entrada del agua, en el centro del bloque y cerca de la salida. Para fines de cálculos, se deberá tomar el promedio de los datos por camada de los tres perfiles.

Columna H: Balance entre la evapotranspiración (Columna F) y el agua utilizable (Columna G).

En esta columna (H), se inicia con el valor de la lámina neta utilizable(Columna G) y se van restando los usos consuntivos diarios de la columna F hasta agotar la lámina neta utilizable. Cuando se llega a este punto, se debe aplicar un nuevo riego.

La lámina a reponer al suelo a través del riego corresponde a la lámina neta utilizable excepto en el caso de cambio de la profundidad efectiva del sistema radicular y/o del coeficiente k. Dependiendo del método de aplicación de agua se debe tomar en consideración la eficiencia correspondiente.

Columna I: Precipitación efectiva (PE), en mm.

La precipitación efectiva puede ser medida en el perfil del suelo explorado por el sistema radicular a través de muestreo después de la lluvia. El resultado del muestreo, en láminas en mm, se coloca en la columna de lámina neta utilizable (G). De este modo el incremento de agua debido a la lluvia estará considerado en el balance. El muestreo se realiza como se explicó anteriormente . Cuando se trabaja con parcelas con bordes de tierra (diques) se puede considerar la lluvia recibida como 100 % efectiva, es decir no hay escurrimiento superficial y se infiltra toda la lluvia recibida, salvo en los casos en que hay pérdidas por percolación.

Columna J: Control fenológico de los riegos.

En esta columna se debe indicar el período del ciclo vegetativo del cultivo en que se realiza el riego. Esta es una información valiosa para la discusión de los resultados experimentales.

Un buen ejemplo del uso de la fenología en relación al uso del agua por las plantas se encuentra en el trabajo de Brown (1971). En el caso de los cereales, existe información para definir los períodos fenológicos del ciclo vegetativo, lo cual es conocido como Escala de Feekes (Peterson, 1965).

15.5.3. Ejemplo de Uso de la Metodología

Con la finalidad de mostrar el uso de la metodología propuesta, se presenta un ejemplo para la elaboración de un Calendario de Riego.

Para fines de cálculos y confección del Calendario de Riego se supone la situación prevaleciente en 1972 con un cultivo de tomate en el Proyecto de Riego de Bebedouro, en Petrolina, Pernambuco, Brasil.

Los datos básicos necesarios para los cálculos son los siguientes:

a.Información físico-hídrica del suelo

Los datos para las dos camadas importantes del perfil del suelo Oxisol son los siguientes:

Camada (cm)	CC (%)	PMP (%)	D_s (g/cm^3)	A_d (mm)	LN=0,40 * A_d (mm)
0 - 30	10,68	2,86	1,65	38,71	15,48
30-60	11,62	4,92	1,61	32,36	12,94

CC:Capacidad de Campo; PMP:Punto de Marchitez Permanente
A_d:Agua Disponible

b. Información del cultivo de tomate

Desarrollo del sistema radicular: Las profundidades efectivas del sistema radicular del cultivo de tomate en función del ciclo vegetativo son los siguientes:

Ciclo Vegetativo (%)	Profundidad Efectiva (mm)
0 - 10	150
10 - 20	300
20 -100	400

Coeficiente del cultivo (k): Los coeficientes son calculados para cada 10 % del ciclo vegetativo lo cual corresponde a 12 días, considerando que el ciclo del tomate es de 120 días.

Ciclo del tomate: 120 días
Fecha de siembra: 1 de marzo

c.Información de Demanda Evaporativa

-En el inicio del cultivo mediante riego se lleva a capacidad de campo el perfil de suelo de 60 cm de profundidad.

-El aprovechamiento por las plantas del agua disponible en el suelo que se consideró fue de 40 %.

–Utilizando las informaciones anteriores se reorganizó el Calendario de Riego del cultivo del tomate, con inicio del cultivo el día 1 de marzo de 1972.

El calendario de riego que resultó se muestra en el Cuadro 15.5. Es del caso aclarar que en este ejemplo el coeficiente (k) utilizado, entre 0 % y 10 %, no fue el correspondiente a 5 % del ciclo, como se indicó anteriormente, y si el correspondiente al 10 %. La razón esta en que en el inicio del cultivo las plantas están con un sistema radicular muy superficial y frente a las condiciones de alta demanda evaporativa, es aconsejable aumentar la disponibilidad de agua en esta fase, es decir aumentando el número de riegos.

15.5.4. Consideraciones Finales

Las informaciones contenidas en el Calendario de Riego, además de indicar el momento en que se debe aplicar el riego, permite obtener varias conclusiones de utilidad para la discusión de los resultados experimentales.

Entre algunas consideraciones importantes de destacar del Calendario de Riego estan las siguientes:

a. Frecuencia de Riego

La información contenida en un Calendario de Riego permite definir la variación del intervalo de riego durante el ciclo vegetativo del cultivo. Para el ejemplo del Cuadro 15.5, la frecuencia de riego varía entre 3 y 7 días, siendo que los menores intervalos se presentan durante la etapa inicial del cultivo y durante períodos de alta demanda evaporativa.

b. Agua utilizada por el cultivo en el ciclo vegetativo

Los datos del Calendario de Riego permiten estimar la cantidad de agua utilizada por el cultivo durante todo el ciclo vegetativo. En el caso del ejemplo, sumando los datos de la Columna G se tiene que el agua consumida en el ciclo fue de 662,6 mm, lo cual representa una evapotranspiración media de 662,6:120 = 5,52 mm/día.

c. Ciclo fenológico y efecto del riego

Las indicaciones del período del ciclo del cultivo en que se aplicaron los riegos permite definir dos informaciones básicas:

- Definición del tiempo para alcanzar determinados períodos del ciclo fenológico del cultivo. Esta es una información importante para determinar las regiones similares de desarrollo posibilitando el intercambio y uso de datos experimentales.

CUADRO 15.5. Calendario de Riego para el cultivo de tomate en el Proyecto de riego de Bebedouro (Brasil) en 1972.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Profundidad del suelo (mm)	I del ciclo del cultivo	No. de dias	Kc	Evap. tanque (mm)	ET (mm/dia)	Lamina Neta Utilizable LN (mm)	Balance entre ET y agua utilizable (mm)	PE (mm)	Fenologia del cultivo
150		1	0.36	5.8	2.09	7.74 R	2.09		
		2		6.0	2.16		4.25		
		3		5.4	1.94		6.19		
		4		4.5	1.62		7.81		
		5		5.7	2.05	7.74 R	2.05		
		6		6.0	2.16		4.21		
		7		4.1	1.48		5.69		
		8		4.3	1.55	7.74 R	7.24		
		9		3.7	1.33		1.33		
		10		7.3	2.63		3.96		
		11		5.0	1.80		5.76		
		12		7.0	2.52	7.74 R	8.28		
300	10	13	0.50	6.0	3.00	12.28	3.00		
		14		7.7	3.85		6.85		
		15		5.0	2.50		9.35		
		16		10.0	5.00		14.35		
		17		6.0	3.00	15.48 R	3.00		
		18		7.0	3.50		6.50		
		19		6.5	3.25		9.75		
		20		4.2	2.10		11.85		
		21		6.0	3.00		14.85		
		22		5.0	2.50	15.48 R	2.50		
		23		5.7	2.85		5.35		
	20	24		4.0	2.00		7.35		
600		25	0.75	3.5	2.63	20.00 R	2.63		
		26		5.0	3.75		6.38		
		27		7.0	5.25		11.63		
		28		5.0	3.75		15.38		
		29		7.5	5.63		21.01		
		30		7.2	5.40		26.41		
		31		7.0	5.25	28.42 R	5.25		
		32		5.0	3.75		9.00		
		33		6.3	4.73		13.73		
		34		7.0	5.25		18.98		
		35		4.0	3.00		21.98		
	30	36		7.0	5.25		27.23		
		37	0.92	3.0	2.76	28.42 R	2.76		
		38		5.0	4.60		7.36		
		39		5.5	5.06		12.42		
		40		4.0	3.68		16.10		

CUADRO 15.5. (Continuación).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Profundidad del suelo (mm)	% del ciclo del cultivo	No. de dias	k	Evap. tanque (mm)	ET (mm/dia)	Lamina Neta Utilizable LN (mm)	Balance entre ET y agua utilizable (mm)	PE (mm)	Fenologia del cultivo
		41		3.0	2.76		18.86		
		42		6.2	5.70		24.56		
		43		4.0	3.68	28.42 R	3.68		
		44		4.0	3.68		7.28		
		45		6.0	5.52		12.80		
		46		6.0	5.52		18.32		
		47		5.0	4.60		22.92		
	40	48		7.0	6.44	28.42 R	6.44		
		49		7.0	6.44		12.88		
		50	0.99	7.0	6.93		19.81		
		51		6.5	6.44		26.25		
		52		6.0	5.94	28.42 R	5.94		
		53		6.2	6.14		12.08		
		54		7.0	6.93		19.01		
		55		6.0	5.94		24.95		
		56		8.0	7.92	28.42 R	7.92		
		57		8.2	8.12		16.04		
		58		2.0	1.98		18.02		
		59		6.8	6.73		24.75		
	50	60		3.4	3.37		28.12		
		61	1.00	8.0	8.00	28.42 R	8.00		
		62		6.5	6.50		14.50		
		63		6.8	6.80		21.30		
		64		8.0	8.00		29.30		
		65		8.0	8.00	28.42 R	8.00		
		66		5.6	5.60		13.60		
		67		7.0	7.00		20.60		
		68		7.0	7.00		27.60		
		69		5.0	5.00	28.42 R	5.00		
		70		6.0	6.00		11.00		
		71		8.9	8.90		19.90		
	60	72		8.0	8.00		27.90		
		73	0.96	7.0	6.72	28.42 R	6.72		
		74		6.0	5.76		12.48		
		75		7.0	6.72		19.20		
		76		9.0	8.64		27.84		
		77		8.9	8.54	28.42 R	8.54		
		78		8.0	7.68		16.22		
		79		7.2	6.91		23.13		
		80		8.0	7.68	28.42 R	7.68		
		81		8.0	7.68		15.36		
		82		8.0	7.68		23.04		

CUADRO 15.5. (Continuación).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Profundidad del suelo (mm)	% del ciclo del cultivo	No. de días	k	Evap. tanque (mm)	ET (mm/día)	Lamina Neta Utilizable LN (mm)	Balance entre ET y agua utilizable (mm)	PE (mm)	Fenología del cultivo
		83		7.0	6.72	28.42 R	6.72		
	70	84		7.7	7.40		14.12		
		85	0.85	8.0	6.80		20.92		
		86		8.0	6.80		27.72		
		87		9.0	7.65	28.42 R	7.65		
		88		7.8	6.63		14.28		
		89		8.0	6.80		21.08		
		90		10.0	8.50	28.42 R	8.50		
		91		9.0	7.65		16.15		
		92		10.0	8.50		24.65		
		93		7.7	6.55	28.42 R	6.55		
		94		7.6	6.46		13.01		
		95		7.4	6.29		19.30		
	80	96		5.4	4.59		23.89		
		97	0.60	4.2	2.52		26.41		
		98		6.8	4.08	28.42 R	4.08		
		99		7.8	4.68		8.76		
		100		8.0	4.80		13.56		
		101		9.0	5.40		18.96		
		102		8.7	5.22		24.18		
		103		8.5	5.10	28.42 R	5.10		
		104		6.5	3.90		9.00		
		105		7.0	4.20		13.20		
		106		4.9	2.94		16.14		
		107		5.3	3.18		19.32		
	90	108		10.3	6.18		25.50		
		109	0.28	8.1	2.27	28.42 R	2.27		
		110		8.1	2.27		4.54		
		111		9.8	2.74		7.28		
		112		11.0	3.08		10.36		
		113		9.0	2.52		12.88		
		114		10.0	2.80		15.68		
		115		7.1	1.99		17.67		
		116		10.0	2.80		20.47		
		117		10.2	2.86		23.33		
		118		10.7	3.00		26.33		
		119		9.2	2.58	28.42 R	2.58		
	100	120		6.4	1.79		4.37		

- Permite aislar el efecto de los riegos fenológicos en los resultados experimentales de diferentes años, épocas, variedades, etc.

d. Control de riego en un nivel determinado de aprovechamiento

La mayor utilidad del Calendario de Riego reside en el hecho que posibilita el control del riego en un nivel determinado de aprovechamiento del agua almacenada en el perfil del suelo. Con esto se facilita la comparación de los resultados experimentales provenientes de regiones similares y obtenidos en años diferentes. El Calendario de Riego es una metodología simple y de fácil ejecución que contribuye a la padronización de la investigación para agricultura bajo riego, recomendándose su uso en toda investigación con riego donde el factor agua no es una variable experimental.

15.6. Referencias Bibliográficas.

[1] ALJIBURY,F.K., M. GERDTS, A. LANGE, J. HUNTAMER AND H. LEAVITT. 1974. Performance of plants with drip irrigation. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 479–502.

[2] BESTER, D.H., D.C. LUTTER AND G.H. VELDMAN. 1974. Drip irrigation on citrus. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 58–64.

[3] BUCKS, D.A., L.J. ERIE, AND O.F. FRENCH. 1973. Quantity and frequency of trickle and furrow irrigation for efficient cabbage production. Agronomy Journal 38(1):53–57.

[4] BUCKS, D.A. L.J. ERIE, F.S. NAKAYAMA AND O. FRENCH. 1974. Trickle irrigation management for grapes. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 503–511.

[5] BROWN, PAUL L. 1971. Water use and soil water depletion by dryland winter wheat as affected by nitrogen fertilization. Agronomy Journal 63(1):43–46.

[6] CAIXETA, T.J., S. BERNARDO, W.D.C. CASALI e L.M. OLIVEIRA. 1980. Estudo comparativo entre sistemas de irrigacão por sulcos e gotejamento na cultura do pimentão. Anais do 9o. Congresso Brasileiro de Engenharia Agricola I:15–25.

[7] COELHO, M. e G. GOMES CORDEIRO. 1980. Comparacão do método de irrigacao por sulcos e gotejo no maracujá. Costa Rica, IICA, Anales del III Seminario Latinoamericano sobre Riego por Goteo. pp. 491–489.

[8] COELHO, M.B., A.F.L. OLITTA e J.P. ARAUJO. 1978. Influencia dos métodos de irrigação por sulco e gotejo na cultura do melão. Salvador, Brasil, IV Congresso de Irrigação e Drenagem. 20p.

[9] DAVIS, S. AND W.J. PUCH. 1974. Drip irrigation: Surface and subsurface compared with sprinkler and furrow. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 109–114.

[10] DAN, C. 1974. The irrigation of olives by drip and other irrigation methods. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 491–496.

[11] DULA, J. 1976. Parâmetros do uso da água para planejamento da irrigação. Brasília. D.F, Brasil, CODEVASF/FAO/ABID. 17p. (Conferencia presentada en el Seminario de Manejo de Agua, Mayo 3–5, 1976).

[12] GASTAL, E. L975. Sistemas de Producción en la programación de la Investigación Agropecuaria. Brasília, D.F, EMBRAPA. 42 p.

[13] GOLBERG, D., B. GORNAT AND D. RIMON. Drip irrigation principles, design and agricultural practices. Drip Irrigation Scientific Publications.

[14] GOLDBERG. D., B. GORNAT, M. SHMUELI, I. BEN-ASHER AND M. RINOT. 1971. Increasing the agricultural use of saline water by means of trickle irrigation. Water Resources Bulletin 7(4):803–809.

[15] HALL,B.J. 1974. Staked tomato drip irrigation in California. San Diego, California, Second International Drip Irrigation Congress. pp. 480–485.

[16] HALL, B.J. 1974. Spring cucumber drip vs. furrow irrigation. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 486–489.

[17] HANSON, E.G. AND T.C. PATTERSON. 1974. Vegetable production and water-use efficiency as influenced by drip, sprinkler, subsurface, and furrow irrigation method. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 97–102.

[18] HARGREAVES, G.H. 1956. Irrigation requirement based on climatic data. Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers Proceedings 1105: 1–10.

[19] HARGREAVES, G.H. 1976. Manual de requerimiento de água para culturas irrigadas e agricultura seca. Logan, Utah State University, Contrato No. AID/ta – c – 1108. 41 p.

[20] HOWELL, T.A. AND E.G. HANSON. Potato and lettuce response to irrigation methods and management. American Society of Agricultural Engineering (Paper 76-2010).

[21] ICRISAT. 1976. International Workshop on Farming Systems. Hyderabad, India ICRISAT. 548p.

[22] MILLAR, A.A., E.L.POSSIDIO e L.B. OLIVEIRA. 1976. Pesquisas prioritarias en agricultura irrigada para o Baixo Sao Francisco. Petrolina, Pernambuco,Brasil, CPATSA. 37 p.

[23] MILLAR, A.A. 1976. Respuesta de los Cultivos al déficit de agua como información básica para el manejo del riego. Brasilia, D.F., Brasil, CODEVASF/FAO/ABID. 62 p. (Conferencia presentada en el Seminario de Manejo de Agua, Mayo 3-5, 1976).

[24] MILLAR, A.A. 1977. Uso de algunos métodos e resultados de pesquisas de irrigacão em programas de pesquisa para as áreas de sequeiro. Petrolina,Pernambuco, Brasil, PNUD/FAO, Projeto BRA/73/008. 23 p. (Documento de orientacão para pesquisadores).

[25] MILLAR, A.A., P.C.F.GOMES, J. MATIAS e E.S. DE GOES. 1978. Recomendacões de pesquisas de solo e água para áreas irrigadas do Nordeste con problemas de sais. Anais da Reuniao sobre salinidade em areas irrigadas. pp. 124-176. Recife,Pernambuco, Brasil, SUDENE.

[26] MILLAR, A.A. 1978. Programa de pesquisas prioritarias em tecnología de irrigacão para o Nordeste. pp. C4-39. Anais do Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. Sao Paulo, UNESP, Volume I.

[27] MILLAR, A.A. 1978. Parametros do método de irrigacão por sulcos para manejo da água no Projeto Sao Desiderio. Brasilia, D.F, Brasil, Convenio IICA/CODEVASF. 13 p.

[28] MILLAR, A.A. H.M. AZEVEDO e E.L.POSSIDIO. 1978. Metodologia para adequacão de parâmetros do método de irrigacão por sulcos para uso pela assistência técnica. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 13(2):75-82.

[29] MILLAR, A.A. 1978. Pesquisa em tecnologia de irrigacão no Vale do Rio Sao Francisco. Petrolina, Projeto FAO/BRA/74/008, Relatorio Final. 53 p. (4 anexos).

[30] MILLAR, A.A. e S. CAVALCANTE. 1979 . Subsidios para a Conformacão de un Programa prioritario de pesquisas em engenharia de irrigacão. Brasilia, D.F, Brasil, Convênio IICA/CODEVSF. 16 p.

[31] MILLAR, A.A. AND E.N. CHOUDHURY. 1980. A model to define operational irrigation frequency for maximum yield of crops. Turrialba, Costa Rica, 30(4):391-398.

[32] MILLAR, A.A. 1982. Analise de resultados experimentais de estudos comparativos entre irrigacão por sulcos e gotejamento. In: Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, 6, Sao Paulo, 1982. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, Sao Paulo, Associacão Brasileira de Irrigacão e Drenagem. 14 p.

[33] MILLAR, A.A. 1984. Manejo racional da irrigacão: Uso de informacões básicas sobre diferentes culturas. Brasilia, D.F, Brasil, IICA. 56 p. (Série Miscelâneas No. 461).

[34] MILLAR, A.A. 1984. Servicios técnicos de apoyo a la producción en áreas irrigadas. Antigua, Guatemala, Seminario-Taller sobre Proyectos de Riego de Centroamérica y Panamá, RUTA/BIRF/GUATEMALA, 64 p. (Conferencia invitada).

[35] MORENO, L. 1978. Evolución de la investigación en lechuga (Lactuca sativa L.) utilizando el método de riego por goteo en la región Lagunera. Ciudad Lerdo, Durango, Segundo Seminario Latinoamericano de Riego por Goteo. (Anexo No. 16).

[36] OLITTA, A.F. 1974. Irrigacão por gotejo em morango. Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz 31:711-718.

[37] OLITTA, A.F., T.A. ABREU e D.A.B. MARCHETTI. 1978. Comparacão dos métodos de irrigacão por sulco e gotejo na cultura do melão do Vale do São Francisco. Mexico, IICA/SARH, Anales del Segundo Seminario Latinoamericano de Riego por Goteo, Volumen 2, 21 p. (Anexo 27).

[38] ORIOLANI, M.J.C., R.BAGINI, O.C. PIZARRO, M.GONZALEZ, R. LECUONA Y M.E.QUIROGA DE ORIOLANI. 1978. Ensayo comparativo de métodos de riego en vid, variedad Cereza. Mexico, IICA/SARH, Anales del 2o. Seminario Latinoamericano de Riego por Goteo, Volumen II, 8 p. (Anexo 12).

[39] PETERSON, R.F. 1965. Wheat-botany, cultivation and utilization, pp. 22-23. Interscience Publishers, Inc. New York.

[40] QUEIROZ FILHO, S.C. DE e A.A. MILLAR. 1975. Parâmetros para irrigacão por sulcos dos vertissolos de submedio São Francisco. Anais do Crongresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, III: 18-29.

[41] QUEIROZ, M.A. 1976. Algunas consideracões sobre execucão de pesquisas com enfoque sistêmico em áreas irrigadas do Trópico Semi-Árido. Brasilia, D.F, Brasil CODEVASF/FAO/ABID, 1976. 23 p. Conferencia presentada en el Seminario de Manejo de Agua, mayo 3-5, 1976).

[42] SILVA, M.A. DA, E.N. CHOUDHURY, L.A. GUROVICH e A.A. MILLAR. 1981. Metodologia para determinar as necessidades de agua das

culturas irrigadas. Petrolina, PE. CPATSA/EMBRAPA, 1981. PP. 25–44 (Boletim de Pesquisa No. 4).

[43] SILVA, M.A. da, A.A. MILLAR, S. BERNARDO e A.R. CONDE. 1978. Efeito da lâmina de água e adubacão nitrogenada sobre a producão de feijão "Macassar", utilizando o sistema de irrigacão por aspersão em linha. Anais do IV Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem. 20 p.

[44] SIMOES, A.J. 1983. Agricultura Irrigada. Pesquisa em sistema de producão. Petrolina, PE., CPATSA/EMBRAPA. (Série Documentos No. 19).

[45] SINGH, N.T., S.S. GREWAL AND A.S. JOSAN. 1974. Drip vs. furrow irrigation trials in potato under subtropical conditions. San Diego, California, Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. pp. 515–520.

CAPITULO 16

USO DE DATOS DE RIEGO EN REGIONES DE SECANO

La producción agrícola en regiones semiáridas depende principalmente de la pluviometría y de su distribución.

La precipitación es un fenómeno metereológico y como tal es variable en cuanto a cantidad, duración y tiempo de ocurrencia. No obstante lo anterior, un análisis probabilístico mensual o quincenal de la información de precipitación recolectada durante varios años permite, dentro de ciertos límites, determinar la probabilidad de recibir una precipitación dada que vendría a reemplazar una lámina de riego.

En regiones de limitada disponibilidad de agua de riego, el conocimiento probabilístico de láminas de precipitación se puede usar para economizar agua de riego sólo manejando la época de siembra, de forma tal de hacer coincidir el período crítico del cultivo principal al agua con aquel período calendario con más de un 75% de probabilidad de recibir una precipitación equivalente a un riego.

La otra alternativa existente para maximizar la producción en condiciones limitadas de agua cae dentro del campo agronómico a través del mejoramiento genético para resistencia a la sequía e introducción de prácticas adecuadas de manejo del cultivo y del suelo.

En este capítulo se discuten aspectos relacionados con la tolerancia a la sequía y el uso de algunos métodos y resultados de investigación bajo riego en programas de investigación para secano.

16.1. Efecto de la Sequía y Tolerancia de los Cultivos.

Se define como plantas resistentes a la sequía aquellas que durante el proceso de ontogénesis son capaces de adaptarse al efecto de la sequía y pueden crecer, desarrollarse y reproducirse en condiciones deficitarias de agua debido a un número de propiedades adquiridas en el proceso de evolución bajo la influencia de condiciones ambientales y selección natural (Henckel, 1964).

Según varios autores, la resistencia a la sequía es una propiedad formada y desarrollada en el proceso de ontogénesis y está basada en toda la descendencia anterior.

Durante el período de sequía se produce la deshidratación de las células y tejidos y aumento de la temperatura debido a la falta de enfriamiento por transpiración.

Las plantas responden a la deshidratación progresiva cambiando el estado químico coloidal del protoplasma. Según Henckel (1974), la deshidratación causa la misma alteración en el sistema coloidal como sucede en las células viejas, bajando la capacidad de almacenar agua y la habilidad de expansión.

La sequía causa varios cambios bioquímicos en la planta. La deshidratación causa la hidrólisis del almidón y segun Heckel (1964), las plantas tolerantes a la sequía mantienen el proceso de síntesis en un nivel más alto durante la sequía que bajo condiciones normales.

Usando carbón marcado se ha demostrado que la traslocación de carbohidratos desde las hojas del trigo para la espiga en cultivos regados se desarrollaba a una velocidad 2,5 veces mayor que en plantas sin riego. La deshidratación inhibe el proceso de traslocación de carbohidratos solubles.

Las plantas en condiciones de deshidratación tienen una tasa de respiración más alta que plantas regadas. Por otra parte, el efecto de la sequía causa cambios acentuados en el metabolismo del nitrógeno, siendo que se inhibe la síntesis de proteínas.

Las propiedades químico coloidales del protoplasma tales como viscosidad, elasticidad, presión osmótica y cantidad de agua "ligada" (fuertemente retenida) son características importantes en tolerancia a la sequía. Estas propiedades varían con el ciclo vegetativo del cultivo, de tal forma que se presentan períodos fenológicos que son más críticos, en los cuales se producen cambios bioquímicos a nivel del protoplasma que afectan seriamente la productividad. Estos períodos críticos a la falta de agua son conocidos para la mayoría de los cultivos como se indicó en el Capítulo 10. Esta información de déficit fenológico de agua de los cultivos constituye material de mucha importancia, por la aplicación inmediata en programas de investigación con cultivos de secano, lo cual se discute en este Capítulo.

16.2. Tolerancia a la Sequía por Adaptación.

En algunos países como México y Brasil se ha usado la introducción de regímenes de riego (niveles alto, medio y bajo) para seleccionar variedades con tolerancia a la sequía (Fischer, 1974; Fischer et al., 1984). Este es un

procedimiento válido, sólo que no discrimina el efecto aislado de las fases fenológicas de los cultivos.

Anteriormente, en el Capítulo 10, se mencionó que las plantas tienen períodos críticos donde el efecto del déficit de agua reduce marcadamente la productividad de los cultivos. En la Figura 10.6 se presentó la información de rendimiento relativo en función del ciclo fenológico para maíz, la cual se usará más adelante para explicitar algunas metodologías. Esta figura la preparó Millar (1984), a partir de información experimental, para uso en manejo del agua de riego.

La Figura 10.6 muestra que existe un cierto período, conocido como crítico, donde la falta de agua produce una reducción acentuada de la productividad. Así por ejemplo, en maíz la falta de agua entre las fases de inicio de la inflorecencia femenina y término de la polinización causa una reducción de 50% en la productividad.

La información anterior y toda aquella incluída en el Capítulo 10 es muy importante para el manejo del riego y uso del agua complementar. Conociendo lo que representa este volumen de información salta la interrogante de como se podría utilizar en programas relacionados con agricultura de secano.

En primer lugar, esta información se podría usar para seleccionar variedades tolerantes a la sequía. En la literatura se define resistencia a la sequía como la relación entre rendimiento bajo condiciones limitadas de agua y el rendimiento bajo condiciones de riego y se utiliza en programas de mejoramiento genético como "indice de sequía" (Fischer et al., 1974). Esto es lo que muestra la Figura 16.1 y la de varios cultivos en el Capítulo 10, con la diferencia que ellas muestran la respuesta de la planta para las diferentes fases del ciclo fenológico.

La metodología consistiría en someter todas la variedades disponibles de un cultivo a déficit de agua solamente en el período mas crítico, obteniéndose la productividad al final del ciclo. Aquellas variedades que son capaces de soportar el déficit y dar una mayor productividad están más adaptadas, siendo por lo tanto más tolerantes a la sequía.

En resumen, la metodología a seguir deberá considerar lo siguiente:

16.2.1. Definición de la Fenología del Cultivo

Este procedimiento parte de la base del conocimiento previo de la fenología de la planta en las condiciones ambientales donde serán introducidas. Normalmente, dependiendo del clima, las plantas demoran más o menos días en llegar a determinados períodos fenológicos. Debido a lo anterior es

extremadamente importante fijar la fenología del cultivo para cada región ecológica.

El conocimiento de la fenología permitirá la separación de variedades precoces y tardías. Esto es muy importante porque como esta selección se debe realizar en condiciones de riego, permite suspender los riegos en tiempo adecuado para llegar al período crítico en el momento que se requiere.

Por otro lado, para lograr un mayor aprovechamiento del corto período de lluvias en condiciones de secano es muy importante combinar los factores de resistencia a la sequía con el de precocidad del cultivo.

16.2.2. Definición del Período Crítico al Déficit de Agua

En la literatura existen informaciones suficientes para la mayoría de los cultivos, que permiten obtener gráficos similares al de la Figura 16.1 (Salter y Goode, 1967; Millar, 1984). Cuando no existe este tipo de información, se deben obtener los datos necesarios a través de un experimento con déficit de agua, diferidos a lo largo del ciclo vegetativo del cultivo, como se indica como ejemplo, para cebada en la Figura 16.1.

A través de la información gráfica, como en la Figura 16.1, se obtiene el período más crítico para productividad, el cual se debe usar como el "período de prueba" para las variedades que serán sometidas a la competición para tolerancia a la sequía.

16.2.3. Manejo de la Competición para Tolerancia a la Sequía

El manejo de la competición de variedades para tolerancia a la sequía se muestra esquemáticamente en la Figura 16.2 para maíz. Un gran número de variedades, con ciclo fenológico homogéneo, se mantienen regadas adecuadamente hasta aproximadamente 10 días antes del inicio del período más crítico al agua, definido como "período de prueba". Durante todo este período las plantas se mantienen sin riego. Luego que se llega al fin del "período de prueba" se coloca agua nuevamente y se riega en forma adecuada hasta la cosecha.

Para el desarrollo adecuado de esta etapa es importante que se conozca detalladamente el ciclo fenológico del cultivo con la finalidad de suspender el riego en el momento oportuno. Con el objeto de conocer el nivel del déficit de agua impuesto al cultivo, es recomendable determinar la humedad del suelo al final del "período de prueba", antes de volver a regar.

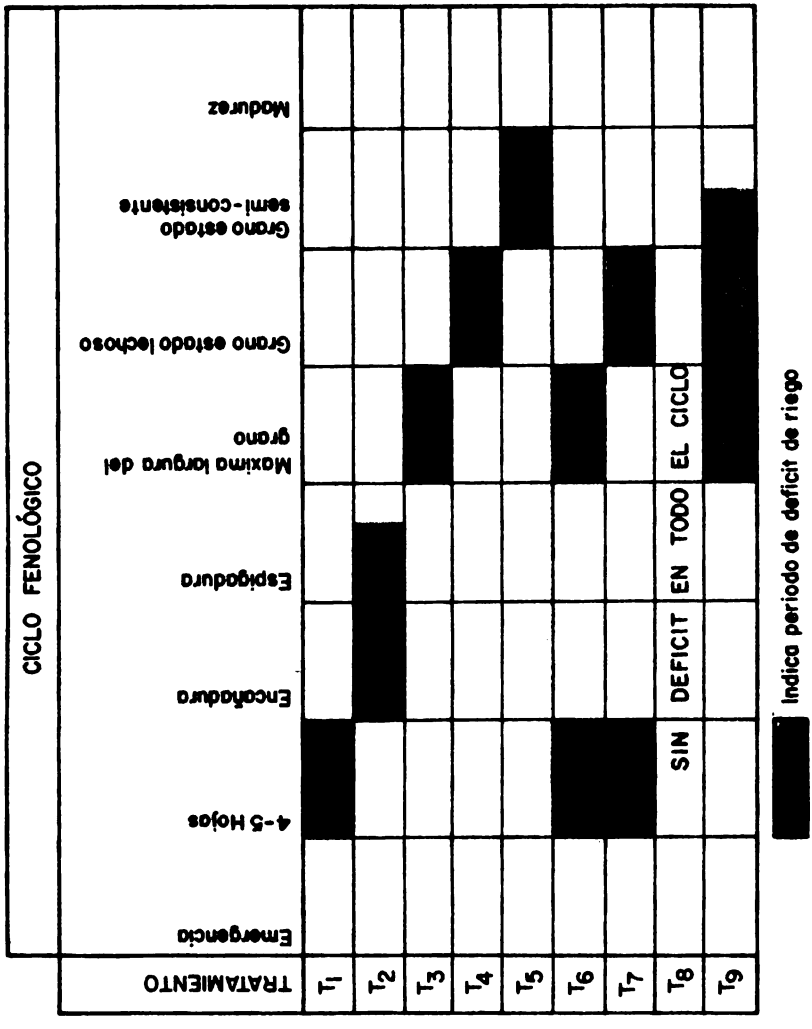


FIGURA 16.1. Tratamientos de déficit de riego usados en cebada por Jensen, Millar y Bauer (1967).

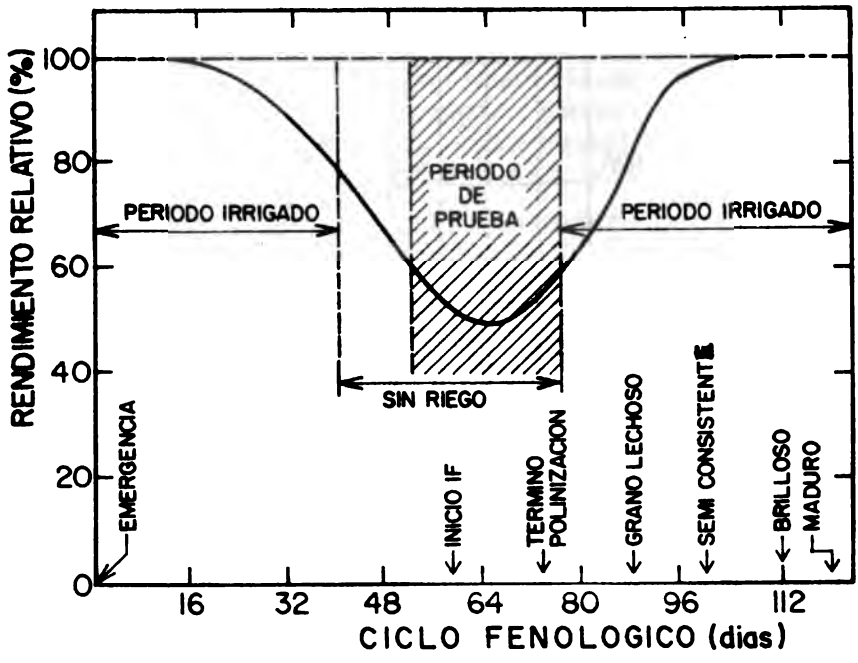


FIGURA 16.2. Representación esquemática, usando la curva de respuesta para maíz, para el manejo de competiciones de variedades para tolerancia a la sequía.

16.2.4. Selección de las Variedades más Tolerantes a la Sequía

La selección de las variedades más tolerantes a la sequía se realiza exclusivamente en base a la productividad. Considerando que las diferentes variedades se someten a un período de déficit de agua, el cual provoca cambios acentuados en los procesos bioquímicos a nivel de célula y que afectan la productividad, las variedades de mayor productividad, en estas condiciones, son las más adaptadas a la sequía.

La metodología anterior, no discrimina el nivel de déficit de agua, medido en el suelo por ejemplo, hasta donde pueden soportar las variedades de mayor productividad. Para obtener información sobre esto, es necesario realizar otros tipos de experimentos con las variedades ya definidas como las más tolerantes, lo cual implica, además de la medición del agua en el suelo y del indice de sequia, en la medición de parámetros de la planta como potencial de agua, resistencia estomática, relación follaje/raices (Fischer et al., 1984).

16.3. Tolerancia a la Sequía por Inducción.

Además de la metodología descrita anteriormente, se pueden utilizar otras alternativas para aumentar la resistencia a la sequía. Una de ellas, se refieren al método de inducción el cual es discutido en detalles por Henckel (1964).

El método consiste en lo siguiente:

- Las semillas del cultivo se colocan a remojar durante 48 horas.
- Luego, las semillas son colocadas a secar al aire en la sombra.
- La temperatura durante el período de secado debe estar entre 15 y 25 ^{o}C.
- El contenido de agua de las semillas al final del período de secado varía con la especie. Así por ejemplo, debe llegar a 45% en trigo, 60% en girasol y 30% en millo.

La deshidratación de las semillas después de un período de remojo les confiere una alta resistencia a la sequía, sin interferir con la germinación, crecimiento y rendimiento. Todos estos procesos son afectados cuando plantas, de semillas no tratadas, son sometidas a déficit de agua durante el período de crecimiento (Henckel, 1964).

El tratamiento de remojo-secado provoca una gran reorganización fisiológica inducida por el proceso de deshidratación. Este proceso provoca un aumento significativo en las propiedades hidrofílica de los coloides protoplasmáticos. También afecta la viscosidad hidrofílica, la elasticidad protoplasmática y la presión osmótica, las cuales son características importantes en la tolerancia a la sequía. Henckel (1964) encontró que estos cambios se producían en plantas de tomate, pasto, girasol, maíz, trigo y millo, cuando se les sometía al tratamiento de remojo-secado.

El aumento en la capacidad hidrofílica, viscosidad y presión osmótica aumentan la capacidad de retención de agua de la planta durante el período de déficit. Henckel (1964) presenta información que muestra que el rendimiento y la resistencia a la sequía del maíz aumentaban con el tratamiento de inducción y la aplicación de fertilizantes fosforados.

Henckel (1964), resumiendo, dice: "Los resultados de muchos años de trabajo sobre tolerancia a la sequía en plantas lleva a la conclusión que el procedimiento que aumenta la tolerancia a la sequía, también aumenta significativamente la productividad bajo condiciones áridas, y como tal se puede aplicar tanto en condiciones regadas como de secano. Finalmente, el método se puede usar en mejoramiento genético para obtener nuevas variedades resistentes a la sequía".

16.4. Déficit Fenológico de Agua y Régimen Pluviométrico.

En el Capítulo 10, ya se esquematizó como se podría utilizar la información de la respuesta fenológica de la planta en condiciones de régimen pluviométrico. El procedimiento consistiría en obtener un máximo aprovechamiento de la distribución de las lluvias. En aquellas regiones donde la pluviometría se concentra en determinados períodos sería posible manejar la época de siembra del cultivo con la finalidad de hacer coincidir el período crítico con aquél período donde un análisis de los datos de lluvia muestra mas de 75% de probabilidad de ocurrencia de una lámina adecuada de agua.

Para obtener el máximo provecho de esta situación en condicones de secano, se necesitan las siguientes informaciones a nivel de región:

- Conocimiento del ciclo fenológico de los cultivos sembrados en condiciones de secano.

- Profundidad del suelo (Profundidad efectiva del sistema radicular).

- Balance hidrológico, con especial referencia a la cantidad de agua almacenada en el perfil del suelo y a la profundidad de almacenamiento.

- Distribución, frecuencia y probabilidad de ocurrencia de las lluvias de una lámina determinada.

En regiones semiáridas, la combinación de variedades precoces y tolerantes a la sequía, con un conocimiento más detallado del balance hidrológico ayudará notablemente a programar la producción de la región.

16.5. Experimentos de Riego y su Uso en Secano.

Algunos experimentos básicos realizados con el propósito de generar información para manejo del riego se pueden usar para generar información para las áreas de secano.

A continuación se discuten dos tipos de experimentos que generan informaciones útiles para el manejo de la agricultura de secano, los cuales son conducidos bajo condiciones de riego.

16.5.1. Experimento Discriminatorio del Nivel de Tolerancia a la Sequía de los Cultivos

Para la realización de este tipo de experimento se necesita conocer el ciclo fenológico del cultivo.

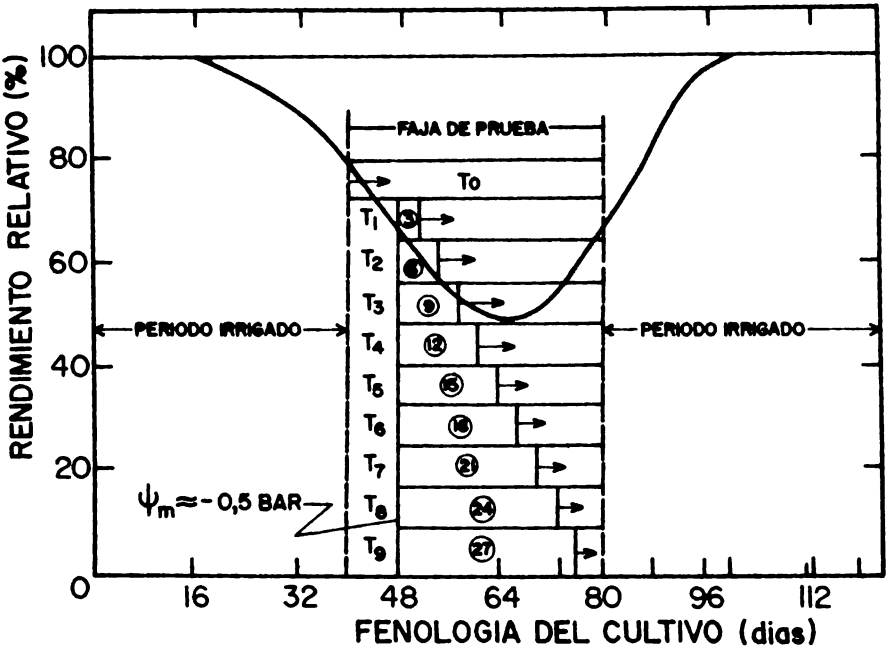


FIGURA 16.3. Representación esquemática, usando la curva de respuesta para maíz, de los tratamientos para discriminación de tolerancia a la sequía.

Haciendo uso de una "faja fenológica" alrededor del período más crítico se provocan diferentes tratamientos de déficit de agua con diferentes números de días de déficit.

La información básica para la conducción de este experimento se muestra esquemáticamente en la Figura 16.3 para el caso del maíz. El número de días de déficit después de un nivel de potencial matricial de – 0,5 bar está indicado dentro de un círculo.

En este caso se necesita llevar un control de la humedad del suelo con la finalidad de definir el nivel del potencial matricial a que se llegó en el momento de la liberación del déficit de agua (aplicación de riego).

Al final del ciclo del cultivo se determina la productividad de los diferentes tratamientos y se pueden obtener dos gráficos importantes:

(i) Productividad en función del número de días de déficit de agua des-

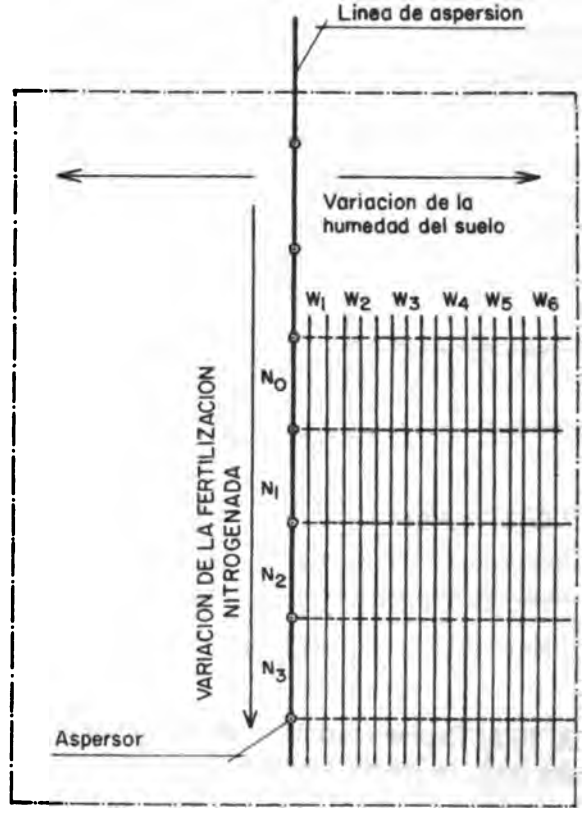


FIGURA 16.4. Representación esquemática del experimento de aspersión en línea ("line source") desarrollado por la Universidad del Estado de Utah (Bauder et al., 1975; Hanks et al., 1976).

pués del nivel de – 0,5 bar de potencial matricial, y

(ii) Productividad en función del nivel de potencial matricial en el suelo.

Magalhães y Millar (1978) presentan los detalles del experimento y resultados obtenidos con frijol.

La información obtenida a través de este experimento permite definir las posibilidades de las variedades más tolerantes a la sequía en regiones con diferentes regímenes pluviométricos.

16.5.2. Experimento de Aspersión en Línea ("line source")

Este tipo de experimento fue desarrollado por la Universidad del Estado de Utah (Bauder et al., 1975; Hanks et al., 1976) y su uso se expandió rápidamente en latinoamérica por las bondades del experimento y la gran cantidad de información que se puede obtener cuando se conduce adecuadamente.

En la Figura 16.4 se muestra una representación esquemática del experimento. El esquema de campo consiste en colocar una línea central de aspersión, introduciéndose la variable de fertilidad en el sentido de la línea de aspersión y la variable de humedad en el suelo se produce por la diferente distribución de agua a partir del eje del aspersor. El campo con el cultivo se maneja en forma continua, sin separación entre parcelas.

Las mediciones más comunes se refieren a la determinación de la humedad del suelo, la cual se debe hacer por el método gravimétrico o con la sonda de neutrones, distribución del agua por los aspersores y productividad.

Mayores detalles sobre el experimento, control y mediciones son presentados por Bauder et al. (1975), Hanks et al. (1976) y Silva et al. (1978, 1981).

Con este experimento se pueden obtener varias informaciones no solo de utilidad para las áreas regadas sino también para los programas de agricultura de secano. Entre las informaciones de mayor utilidad, cabe mencionar:

a. Productividad del cultivo en función de la lámina de agua recibida para diferentes condiciones de fertilización nitrogenada.

b. Efecto del nivel de humedad del suelo en la productividad para diferentes niveles de fertilización.

c. Efecto de la fertilización nitrogenada en la productividad para diferentes niveles de humedad.

d. Evapotranspiración del cultivo en diferentes regímenes de riego y fertilización.

e. Función de producción para agua (rendimiento versus evapotranspiración), lo cual se discute en detalles en el Capítulo 14.

Los resultados de este tipo de experimento, especialemnte el ítem a, son muy importantes para delimitar las áreas que permitirían el adecuado desarrollo de un determinado cultivo en una región de secano. En otras palabras permite realizar el zoneamiento para producción del cultivo.

Considerando que esta delimitación se basa en el balance hidrológico y en la respuesta del cultivo, los resultados del experimento se deben usar en

combinación con estudios de probabilidades de lluvias y almacenamiento de agua en el suelo.

16.5. Referencias Bibliográficas.

[1] BAUDER, J. W., R. J. HANKS, AND D. W. JAMES, 1975. Crop production function determinations as influenced by irrigation and nitrogen fertilization using a continuous variable design. Soil Science Society of America Journal 39:1187–1192.

[2] CLAASSEN, M. M. AND R. H. SHAW. 1970. Water deficit effects on corn. II. Yield components. Agronomy Journal 62(5):625–655.

[3] CHANG, JEN-HU. 1968. Climate and agriculture. An ecological survey. Chicago, Aldine Publishing Company. 304 p.

[4] DENMEAD, O. T. AND R. H. SHAW. 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. Agronomy Journal 52:272–273.

[5] FISCHER, K. S., E. C. JOHNSON y G. O.EDMEADES. 1984. Mejoramiento y selección de maíz tropical para incrementar en resistencia a la sequía. El Batán, México, CIMMYT. 20 p.

[6] FISCHER, K. S. 1974. Potential for genetic improvement in the performance of maize grown under limited moisture. México, CIMMYT. 10p.

[7] HANKS, R. J., J. KELLER, V. P. RASMUSSEN AND G. D. WILSON. 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. Soil Science Society of America Journal 40:426–429.

[8] HENCKEL, P.A 1974. Physiology of plants under drought. Annual Review of Plant Physiology 15:363–386.

[9] HOWE, O. W. AND H. F. RHOADES. 1955. Irrigation practice for corn production in relation to stage of plant development. Soil Science Society of America Proceedings 19:94–98.

[10] JENSEN, R. E., A. A. MILLAR AND A. BAUER. 1967. The effect of water deficits at different stages of growth on the barley yield. Fargo, North Dakota, Soils Department, N. Dakota State University. (Unpublished data).

[11] MAGALHAES, A. A. e A. A. MILLAR. 1978. Efeito do déficit de água no periodo reprodutivo sobre a producão do feijão. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 13(2):55–60.

[12] MILLAR, A. A. 1984, Manejo racional da irrigacão: Uso de informacões básicas sobre diferentes culturas. Brasilia, D.F., Brasil, IICA. 56p. (Série Publicacões Miscelâneas No. 461).

[13] ROBINS, G. S. AND C. E. DOMINGO. 1953. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth of corn. Agronomy Journal 45:618–621.

[14] SALTER, P. J. AND J. E. GOODE. 1967. Crop response to water at different stages of growth. Bucks, England, Commonweath Agricultural Bureaux, Farnham Royal. 246 p.

[15] SILVA, M. A. da, A. A. MILLAR, O. BERNARDO e A. R. CONDE. 1978. Efeito da lâmina de água e da adubacão nitrogenada sobre a producão de feijão "Macassar", utilizando o sistema de irrigacão por aspersão em linha. Anais do IV Congresso Brasileiro de Irrigacão e Drenagem, 20 p.

[16] SILVA, M. A. da., A. A. MILLAR, C. A. V. OLIVEIRA, C. E. MARTINS, R. E. BANDEIRA e E. T. NASCIMENTO. 1981. Efeito da lâmina de irrigacão e da adubacão nitrogenada na producão de grãos de milho. Petrolina, Pernambuco, Brasil, Centro de Pesquisa Agropecuaria do Trópico Semi Arido, 1981. pp. 45–57 (Boletim de Pesquisa No. 4).

[17] STEWART, J. I., R. D. MISRA, W. O.PRUITT y R. M. HAGAN. 1975. Irrigating corn and grain sorghum with a deficient water supply. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 18(2):270–280.

CAPITULO 17

INFORMACION TECNICA PARA EXTENSION EN RIEGO

17.1. Consideraciones Generales.

La actuación de los servicios técnicos de extensión debe entenderse como un proceso integrado en el tratamiento de los problemas y de las soluciones. De no ser así, la deficiencia programática y operacional de un servicio crea deficiencias operacionales en otro, resultando en una cadena interminable de acción-efecto que descaracteriza el proceso de apoyo a la producción dentro de un marco referencial de problema solución y oportunidad-efectividad.

La función básica de los servicios técnicos de extensión en áreas regadas es la de proporcionar a los agricultores, las facilidades, el conocimiento, la tecnología apropiada y el entrenamiento para el uso de las técnicas mas eficientes y adecuadas que les permita obtener altos niveles de productividad de los cultivos en las diversas condiciones del medio físico-ambiental en que se desarrollan sus actividades.

Las funciones y relaciones entre los servicios técnicos de investigación, extensión, operación – infraestructura de riego y agrícola – y los agricultores se presenta en forma esquemática en la Figura 17.1.

En el esquema se incluyen separadamente las actividades de operación de la infraestructura de riego y operación agrícola, lo cual representa, generalmente, el caso de los proyectos públicos de riego. En el caso de proyectos de riego privado, el propio agricultor asume estas funciones.

Desde el punto de vista operacional, los servicios técnicos de extensión en riego tienen, entre otras, las siguientes funciones:

– Definir conocimientos y tecnología y realizar su transferencia a través de demostraciones y capacitación

– Orientar a los agricultores sobre las técnicas y prácticas más adecuadas de métodos de cultivo y preparación de suelos, siembras, riego y manejo de agua, aplicación de fertilizantes, insecticidas, fungicidas, herbicidas, rotación de cultivos, combate de plagas, prevención de enfermedades y

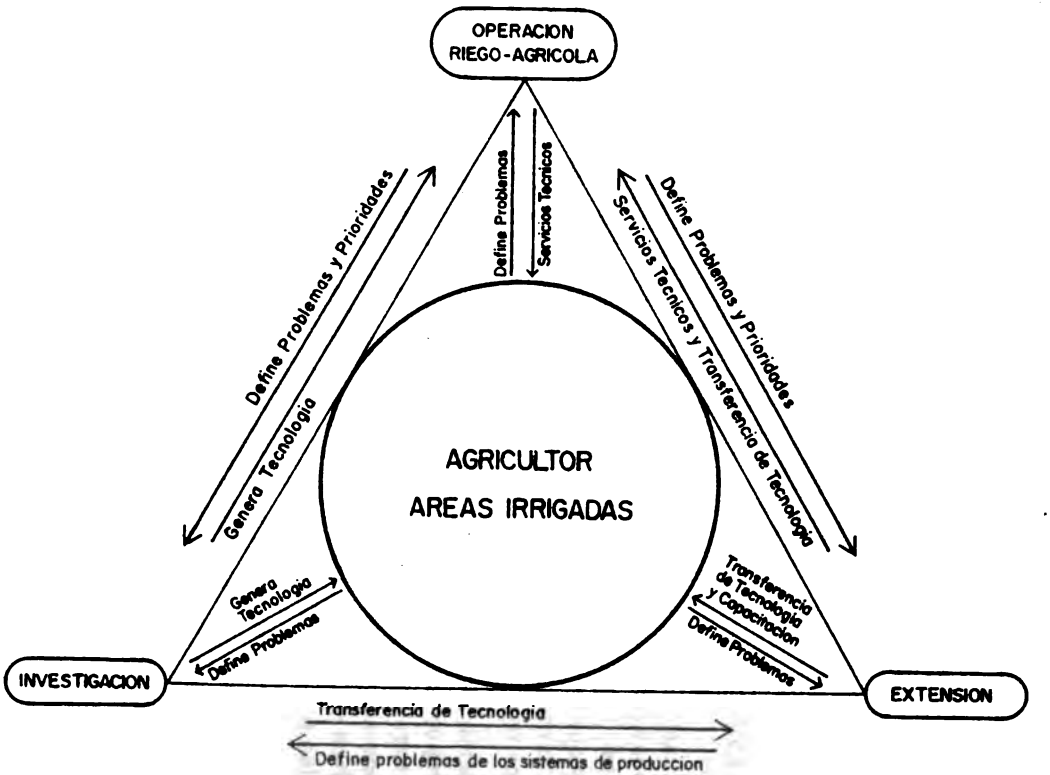


FIGURA 17.1. Esquematización de las funciones y relaciones entre los servicios de investigación, extensión, operación (infraestructura de riego y agrícola) y los agricultores (Millar et al., 1978).

en general, de toda técnica moderna para lograr altos rendimientos de los cultivos.

– Orientar a los agricultores sobre el calendario de siembra en función de las condiciones climáticas, el mejor aprovechamiento de los recursos e insumos, siguiendo los lineamientos técnicos inherentes al desarrollo de un plan agrícola definido

– Orientar a los agricultores para fijar en cada ciclo agrícola, los cultivos más adecuados, las semillas más convenientes, rotación de cultivos recomendados y definir los volumenes de agua necesarios de aplicar a cada cultivo de acuerdo a las disponibilidades existentes

– Realizar el entrenamiento operacional (entrenamiento a través de cursos cortos, visitas, conferencias, etc.) de técnicos y agricultores, sobre técnicas y prácticas de los sistemas de producción bajo riego y tecnología de riego y manejo de agua a nivel de finca

– Ejecutar algunos trabajos técnicos sobre rehabilitación y mejoramiento de los sistemas de riego, especialmente a nivel parcelar o de finca.

En la mayoría de los paises latinoamericanos el servicio de extensión en las áreas regadas es la expresión de la tradición que tiene el país en agricultura bajo riego.

En los paises sin tradición de riego la formación profesional y técnica está dirigida principalmente hacia los diferentes aspectos del desarrollo de la agricultura de secano sin que los profesionales hayan aprendido a apreciar la importancia del insumo agua en el proceso de producción agrícola. Si ello no se adquirió a lo largo del proceso formativo resulta difícil sentirlo y transmitirlo en el ejercicio de la vida profesional a no ser que sean adecuadamente capacitados para hacerlo.

Debido a la falta de concentración formativa en los aspectos agronómicos y de ingenieria de riego, en la mayoría de los casos, quienes ejecutan las actividades de asistencia técnica carecen del intrumental básico para ofrecer una asistencia técnica de calidad, oportuna y efectiva.

Si a lo anterior se adiciona la figura del agricultor, carente de tradición en el manejo del agua de riego y de los conocimientos tecnológicos de una agricultura altamente tecnificada, se puede entender la dificultad que existe para obtener altos rendimientos y eficiencia en el proceso de producción agrícola bajo riego si no se cuenta con un programa efectivo de capacitación operacional de técnicos y agricultores.

Para la acción efectiva del servicio de extensión en riego no sólo basta tener personal capacitado, se requiere, también, de una adecuada organi-

zación y programación, y principalmente de mecanismos e instrumentos adecuados de transferencia de tecnología.

La tecnología a ser transferida debe ser adecuada a las condiciones socioeconómicas del agricultor y estar en un nivel de transferencia que permita su rápida comprensión y asimilación. Norman y Haya, citados en Irrinews (1979), ofrecen una definición de la tecnología "adecuada", enumerando cuatro requisitos básicos:

a. Viabilidad técnica. Dados los elementos técnicos, tiene que ser capaz de incrementar la productividad.

b. Viabilidad económica, seguridad y compatibilidad con el sistema agrícola. Tiene que ser rentable y poseer un nivel de riesgo que pueda ser aceptado por el agricultor. Al mismo tiempo tienen que existir las condiciones que permitan a la tecnología acomodarse al sistema agrícola existente.

c. Aceptación social. Tiene que ser compatible con las estructuras de la comunidad y sus normas.

d. Compatibilidad de infraestructura. Debe ofrecer requisitos que puedan adaptarse al nivel actual de infraestructura.

Finalmente, es del caso indicar que el servicio de extensión a nivel operacional sólo tendrá éxito en las áreas regadas si se cuenta con una adecuada organización de los agricultores. Esto es principalmente válido en áreas de riego público, pero aún en áreas de riego privado, principalmente de proyectos de pequeña irrigación, la presencia de organización de agricultores facilita el trabajo y obtención de logros de la transferencia de tecnología.

17.2. Tecnología a Transferir.

Los agricultores necesitan tecnología adecuada de riego y manejo de agua, y de los sistemas de producción de los cultivos para realizar una actividad agrícola eficiente y remunerativa.

El problema que normalmente enfrenta el servicio de extensión en áreas regadas no es de falta de tecnología sino de decisión sobre que tecnología se va a transferir y de como va a ser transferida.

La tecnología a transferir es aquella generada, en carácter prioritario y de acuerdo a las líneas de investigación indicadas en el Capítulo 16, por el servicio de investigación, la extrapolada de otras regiones, la comprobada en parcelas de pruebas de los sistemas de producción y en áreas demostrativas implantadas para este fin (Millar, Becerra y Tejero, 1981).

Transferir tecnología de riego y de manejo de agua no es tarea fácil debido al gran número de variables que tienen que ser consideradas al mismo tiempo para llegar a definir una recomendación operacional.

En este nivel es donde se necesita realizar un trabajo coordinado e integrado de los servicios de investigación y de extensión.

Normalmente, a través de las varias líneas de investigación indicadas en el Capítulo 15, se genera una apreciable cantidad de información básica, de metodologías, de manejo, etc. También, es tradicional que esta información aparezca publicada en la forma de trabajos científicos formales y boletines técnicos. El problema está en que en la mayoría de los casos el servicio de investigación cree haber cumplido con su papel al haber publicado los resultados. La realidad es que generalmente aquí es donde comienzan los problemas de transferencia de tecnología ya que las publicaciones realizadas por los investigadores carecen de la practicidad requerida para efectuar la diseminación de la información en forma rápida y efectiva.

En la línea de transferencia, del investigador hacia el agricultor, lo anterior constituye un vacío que debe ser solucionado no a nivel operacional en el campo sino en una instancia superior, por un grupo especializado de técnicos con conocimientos teóricos y experiencia práctica de uso y manejo de la información de riego a nivel de campo.

A este proceso de adecuación de los resultados de investigación este autor lo denomina PARAMETRIZACION de la información, para el uso rápido y eficiente por el personal técnico de extensión y aún por los agricultores mas instruidos.

Usando la metodología de parametrización de la información es posible, en muchos casos, realizar extrapolación de la información a otras áreas ecológicas.

Esta metodología de adecuación de la información utiliza hasta donde sea posible el proceso gráfico de presentación de los datos, principalmente, para facilitar el uso por el personal de extensión.

Se debe partir de la premisa que los agentes de extensión en áreas regadas tienen que ser capaces de dar recomendaciones de riego y de manejo de agua frente al agricultor y de acuerdo a las características de la finca.

17.3. Ejemplos de Adecuación de la Información Técnica.

Como ejemplo, a continuación se presentan tres casos de parametrización de información que demuestran la utilidad y la simplicidad que se puede introducir, y la rapidez y efectividad que se puede lograr en la transferencia de tecnología de riego.

17.3.1. Ejemplo No. 1: Uso de Informaciones Básicas Sobre Diferentes Cultivos para el Manejo Racional de Riego

En el Capítulo 10 se presentan los gráficos de un trabajo realizado por Millar (1984) donde se utilizó informacion mundial de resultados de investigación de niveles de manejo de riego y de falta de riego en periodos específicos del ciclo fenológico de diferentes cultivos para fines de manejo del agua de riego.

A través del proceso de parametrización de la información mundial, se prepararon dos gráficos básicos para cada cultivo, de importancia para el manejo del riego y toma de decisión a nivel de operación en un área bajo riego. Los gráficos contienen la siguiente información:

- Rendimiento relativo del cultivo en función del nivel de manejo del riego, y

- Rendimiento relativo del cultivo en función del déficit fenológico de agua.

Estos gráficos permiten definir cuantitativamente la reducción de rendimiento a cualquier nivel de manejo de riego, la reducción del rendimiento por efecto de la falta de agua en cualquier fase del ciclo vegetativo del cultivo y nivel de productividad real que se puede obtener en determinadas condiciones de operación (método de riego, mano de obra, equipos, etc.) y de clima.

Con el conocimiento de la curva de retención de agua del suelo y de la extracción de agua por el cultivo se puede preparar otro gráfico que conjuntamente con la información de los gráficos anteriores permite definir el intervalo de riego.

Las Figuras 10.5 y 10.6 del Capítulo 10 muestran la información parametrizada para maíz y el Cuadro 10.3 muestra la información de niveles de riego para lograr diferentes niveles de rendimiento de varios cultivos.

Las Figuras 10.30 y 10.31 muestran la relación entre extracción de agua (evapotranspiración), nivel de riego e intervalo de riego para suelos arcilloso y arenoso, respectivamente.

Suposición práctica de uso de la información:

- Nivel de producción deseada: 80 % de la producción potencial.

- Utilizando la Figura 10.5 y Cuadro 10.2, se obtiene que el nivel de manejo de riego para obtener 80 % de la producción potencial es −1,6 bar.

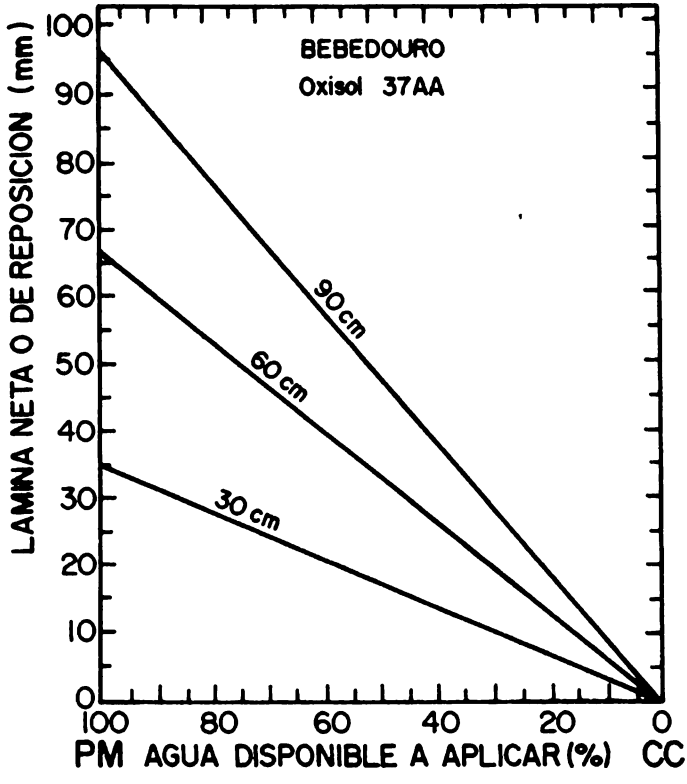


FIGURA 17.2. Lámina neta en función del agua disponible y la profundidad del suelo (Choudhury y Millar, 1979).

- Para un período de evapotranspiración de 4 mm/día el intervalo de riego es de 8 días en el suelo arcilloso (Figura 10.30) y de 7 días en el suelo arenoso (Figura 10.31).

Así se daría respuesta a la clásica pregunta de CUANDO REGAR, utilizando información parametrizada del sistema suelo-agua planta- atmósfera.

17.3.2. Ejemplo No. 2: Como Definir CUANTO REGAR

CUANTO REGAR es otra de las preguntas básicas de riego. Nuevamente a través de una parametrización adecuada de los datos se resuelve el problema en forma gráfica, teniendo como variables el nivel de manejo de riego y la profundidad radicular del cultivo. Basta tomar la información de

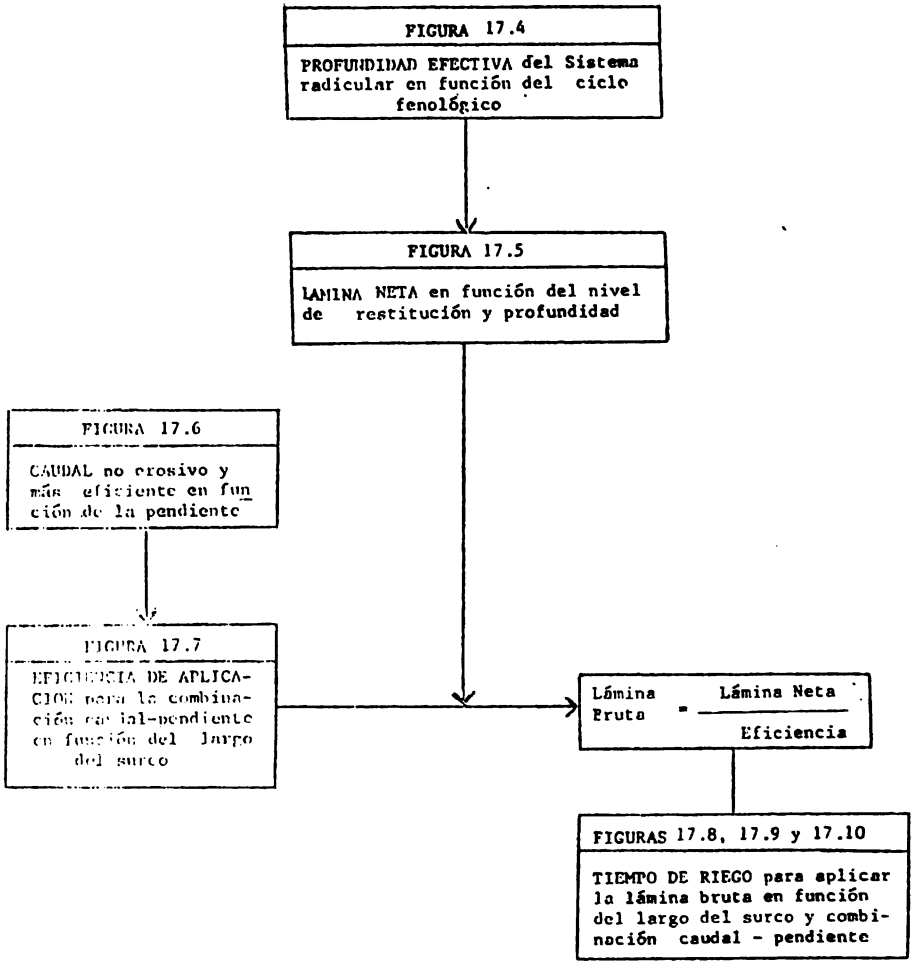


FIGURA 17.3. Secuencia de uso de Nomogramas en riego por surcos (Millar et al., 1978).

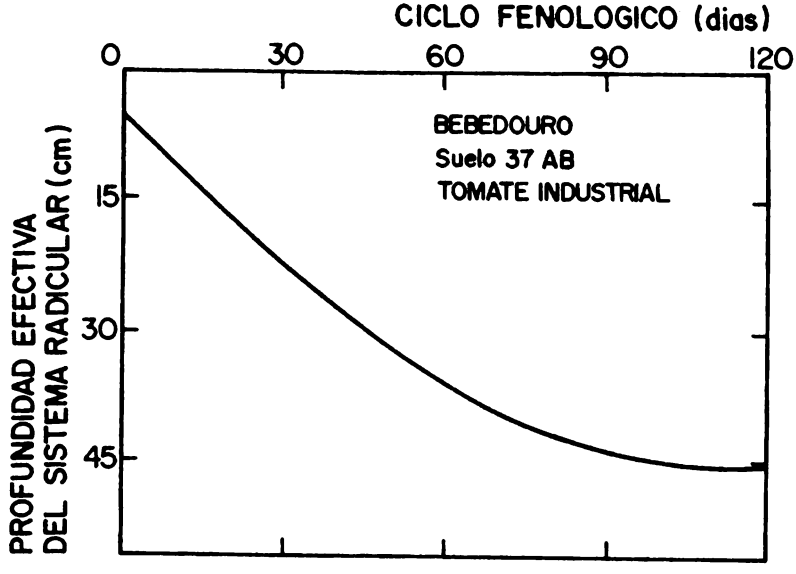


FIGURA 17.4. Profundidad efectiva del sistema radicular del tomate industrial en un oxisol, en función del ciclo fenológico (Millar et al., 1978).

la curva de retención de agua y densidad aparente del suelo que corresponda y se prepara un gráfico como el indicado en la Figura 17.2.

Suposición práctica de uso de la información:

- Suponga un cultivo de maíz con 60 cm de profundidad efectiva del sistema radicular. Con esta información esta definida la profundidad de suelo que se debe regar.

- Nivel de manejo de riego: 45 % de agua disponible utilizada.

- En la Figura 17.2 se entra en el punto de 45 % de agua disponible a aplicar, se corta la recta de 60 cm de profundidad y en la ordenada se obtiene la lámina neta o de reposición (30 mm).

17.3.3. Ejemplo No. 3: Manejo del Riego por Surcos

El riego por surcos es uno de los métodos mas utilizados en el mundo y los parámetros más importantes que lo caracterizan son: caudal, tasa de infiltración, déficit de agua en el suelo, largo de los surcos, pendiente y tiempo de riego.

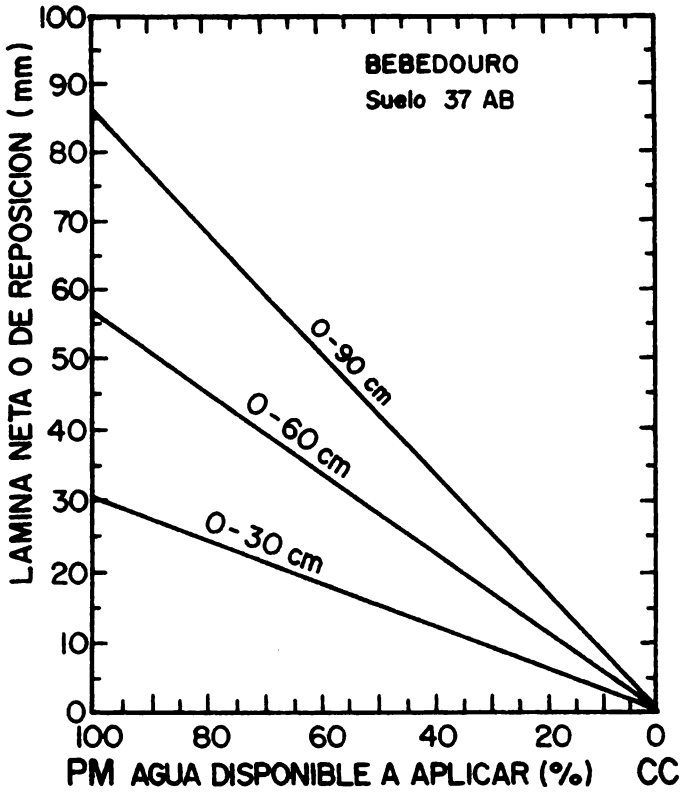


FIGURA 17.5. Lámina neta de riego en función del nivel de restitución de agua disponible y profundidad efectiva (Millar et al., 1978).

Debido al gran número de variables y de cálculos, el personal de extensión no dispone de un método práctico para definir rápidamente en el campo, la lámina, el caudal y el tiempo de riego para uso por el agricultor.

Nuevamente, del servicio de investigación tiene una serie de informaciones del método de riego por surcos que deben ser adecuadamente parametrizadas para uso rápido por el personal de extensión.

En la Figura 17.3 se muestra la secuencia de uso de varios nomogramas que fueron preparados con la información proveniente del servicio de investigación (Millar et al., 1978). Las Figuras 17.4 a 17.10 muestran la información parametrizada para el caso del riego por surcos en el cultivo de tomate.

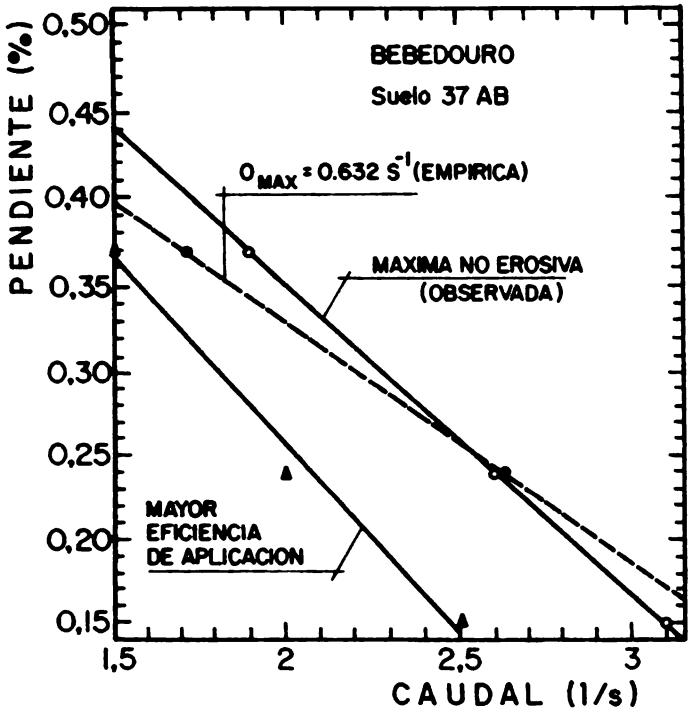


FIGURA 17.6. caudal máximo no erosivo y caudal no erosivo más eficiente en función de la pendiente de los surcos (Millar et al., 1978).

– En la Figura 17.4 se define la profundidad efectiva del sistema radicular, consecuentemente la profundidad de riego queda definida.

– En la Figura 17.5 se define la lámina neta para la profundidad de riego definida en la Figura 17.4.

– En la Figura 17.6 se define el caudal que se debe usar para la pendiente observada en la finca.

– En la Figura 17.7 se define la eficiencia média de aplicación para el largo de surcos que tiene la parcela del agricultor.

– La lámina bruta de riego se obtiene dividiendo el valor obtenido en la Figura 17.5 por el valor obtenido en la Figura 17.7. Este es el único cálculo que realiza el agente de extensión en riego.

– Las Figuras 17.8, 17.9 y 17.10 definen el tiempo de riego (tiempo de avance más el tiempo de infiltración) para el largo de surcos que tiene

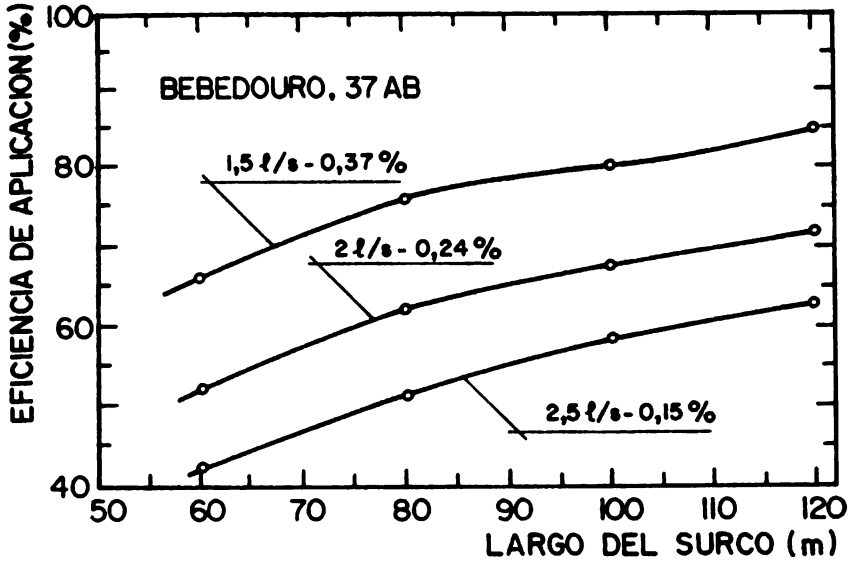


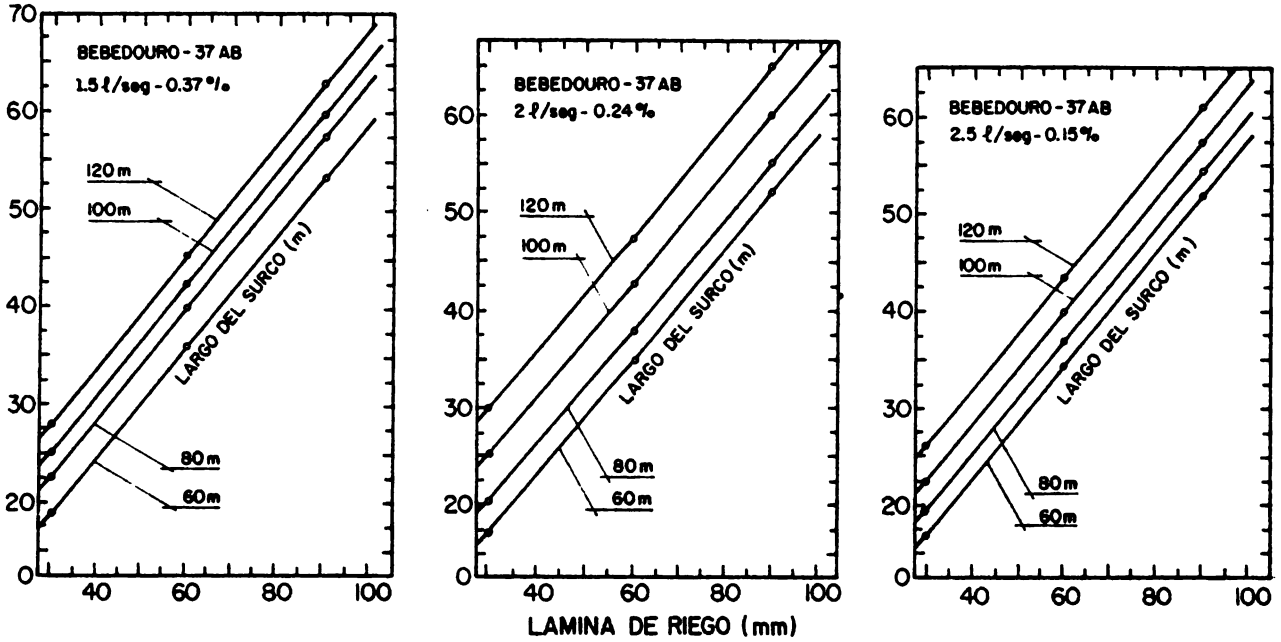
FIGURA 17.7. Eficiencia de aplicación para diferentes combinaciones de caudal-pendiente en función del largo de los surcos (Millar et al., 1978).

el agricultor y en función de la combinación caudal-pendiente definida previamente (Figura 17.6).

Luego, si se utilizan sifones de diferentes diámetros para los cuales se conoce la relación entre carga de agua (cm) y caudal (litros/segundo) se puede definir el tipo de sifón y con que carga de agua se debe operar (Figuras 17.11 y 17.12).

El riego por platabandas o melgas depende de los mismos parámetros que el riego por surcos, pudiéndose, por lo tanto, aplicar la misma metodología de parametrización de los datos. Los detalles metodológicos de la adecuación de la información del método de riego por surcos se encuentran en la publicación de Millar, Azevedo y Possidio (1978).

Los tres ejemplos anteriores demuestran el beneficio y la necesidad de realizar una parametrización adecuada de la información del sistema suelo-agua-planta-atmósfera y de los métodos de riego para obtener rapidez y eficiencia en el proceso de transferencia de tecnología en las áreas regadas.



FIGURAS 17.8, 17.9 y 17.10. Tiempo de riego en función de la lámina bruta de riego y largo del surco para las combinaciones caudal-pendiente de 1,5 l/s–0,37 %, 2 l/s–0,24 % y 2,5 l/s–0,15 %, respectivamente (Millar et al., 1978).

SIFON CON DESCARGA SUMERGIDA

SIFON CON DESCARGA LIBRE

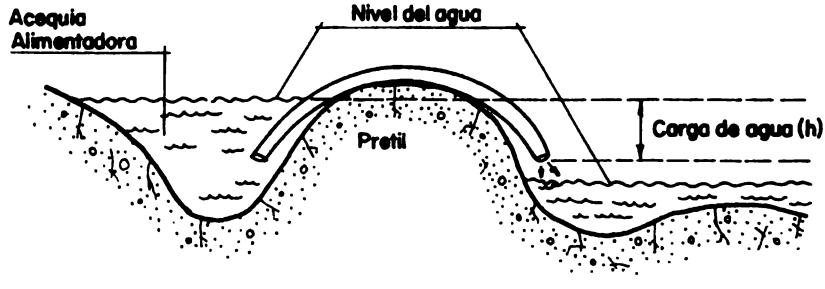


FIGURA 17.11. Uso de sifones portátiles para riego por surcos.

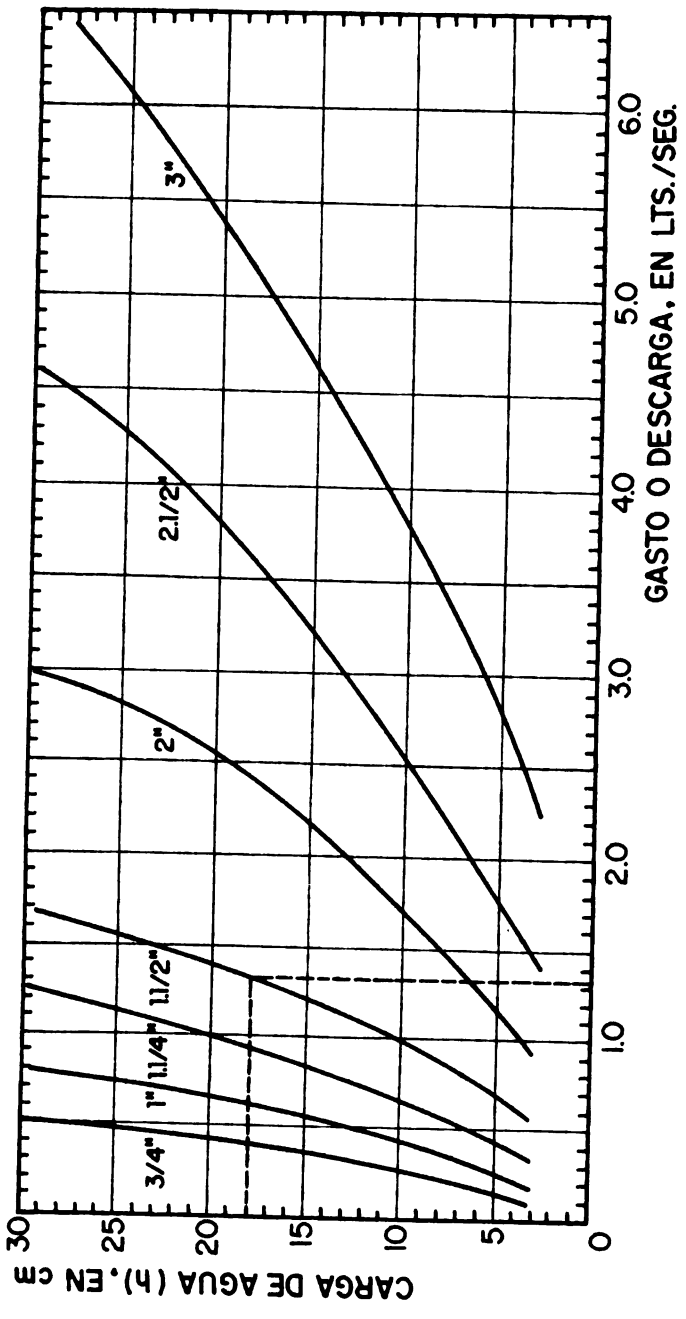


FIGURA 17.12. Caudal en función de la carga de agua para sifones con diámetro variable entre 3/4" y 3". **EJEMPLO** (Línea punteada): Para diámetro del sifón de 1 1/2" y carga de agua de 18 cm, la descarga es de 1,3 l/s.

17.4. Referencias Bibliográficas.

[1] CHOUDHURY, E. N. e A. A. MILLAR. 1979. Características físico-hídricas de tres latossolos irrigados do Projeto Bebedouro. Petrolina, PE., CPATSA/EMBRAPA. pp. 1–14 (Boletim de Pesquisas No. 4).

[2] IRRINEWS. 1979. Tecnología intermedia: Es realmente adecuada? Irrinews 17:1–2.

[3] MILLAR, A. A. 1978. Parâmetros do método de irrigação por sulcos para manejo de agua no Projeto São Desiderio. Brasília, DF, Brasil, Convênio IICA/CODEVASF. 13 p.

[4] MILLAR, A. A., H. M. AZEVEDO e E. L. POSSIDIO. 1978. Metodologia para adequação de parâmetros do método de irrigação por sulcos para uso pela assistência técnica. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 13(2):75–82.

[5] MILLAR, A. A. AND E. N. CHOUDHURY. 1980. A model to define operational irrigation frequency for maximum yield of crops. Turrialba (Costa Rica) 30(4):391–398.

[6] MILLAR, A. A., J. BECERRA e L. TEJERO. 1981. Areas demonstrativas como instrumento básico para a promoção da pequena irrigação. Brasília, DF, MINTER/MINAGRI/ABID/ IICA. 15 p. (Trabalho apresentado na Reunião Técnica sobre Pequena Irrigação).

[7] MILLAR, A. A. 1984. Manejo racional da irrigação: Uso de informações básicas sobre diferentes culturas. Brasilia,DF, Brasil, IICA. 56 p. (Série Miscelâneas No. 461).

[8] MILLAR, A. A. 1984. Servicios técnicos de apoyo a la producción en áreas irrigadas. Santo Domingo, República Dominicana, IICA. 64 p. (Documento presentado en el Seminario-Taller sobre Agricultura de Riego y Pequeñas Obras de Riego y Drenaje en Centroamérica y Panamá, realizado en Antigua, Guatemala entre el 27 de setiembre y 3 de octubre de 1984).

[9] QUEIROZ FILHO, S. de e A. A. MILLAR. 1975. Parâmetros para irrigação por sulcos dos vertissolos do submédio São Francisco. Anais do Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem III:18–29.

APENDICE

INFORMACIONES TABULADAS PARA CALCULOS METEOROLOGICOS

TABLA 1. Presión de saturación de vapor de agua (milibares) en función de la temperatura.

°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
.0	6.10	6.15	6.19	6.24	6.28	6.33	6.37	6.42	6.47	6.51
1.0	6.56	6.61	6.66	6.70	6.75	6.80	6.85	6.90	6.95	7.00
2.0	7.05	7.10	7.15	7.20	7.25	7.30	7.35	7.41	7.46	7.51
3.0	7.57	7.62	7.67	7.73	7.78	7.84	7.89	7.95	8.01	8.06
4.0	8.12	8.18	8.23	8.29	8.35	8.41	8.47	8.53	8.59	8.65
5.0	8.71	8.77	8.83	8.89	8.95	9.01	9.08	9.14	9.20	9.27
6.0	9.33	9.40	9.46	9.53	9.59	9.66	9.73	9.79	9.86	9.93
7.0	10.00	10.07	10.13	10.20	10.27	10.34	10.41	10.49	10.56	10.63
8.0	10.70	10.78	10.85	10.92	11.00	11.07	11.15	11.22	11.30	11.37
9.0	11.45	11.53	11.61	11.69	11.76	11.84	11.92	12.00	12.08	12.17
10.0	12.25	12.33	12.41	12.49	12.58	12.66	12.75	12.83	12.92	13.00
11.0	13.09	13.18	13.26	13.35	13.44	13.53	13.62	13.71	13.80	13.89
12.0	13.98	14.08	14.17	14.26	14.36	14.45	14.55	14.64	14.74	14.83
13.0	14.93	15.03	15.13	15.23	15.33	15.43	15.53	15.63	15.73	15.83
14.0	15.93	16.04	16.14	16.25	16.35	16.46	16.56	16.67	16.78	16.89
15.0	17.00	17.11	17.22	17.33	17.44	17.55	17.66	17.78	17.89	18.00
16.0	18.12	18.24	18.35	18.47	18.59	18.71	18.82	18.94	19.06	19.19
17.00	19.31	19.43	19.55	19.68	19.80	19.93	20.05	20.18	20.31	20.43
18.0	20.56	20.69	20.82	20.95	21.09	21.22	21.35	21.48	21.62	21.75
19.0	21.89	22.03	22.16	22.30	22.44	22.58	22.72	22.86	23.00	23.15
20.0	23.29	23.43	23.58	23.73	23.87	24.02	24.17	24.32	24.47	24.62
21.0	24.77	24.92	25.07	25.23	25.38	25.54	25.69	25.85	26.01	26.17
22.0	26.33	26.49	26.65	26.81	26.98	27.14	27.31	27.47	27.64	27.81
23.0	27.97	28.14	28.31	28.48	28.66	28.83	29.00	29.18	29.35	29.53
24.0	29.71	29.89	30.06	30.25	30.43	30.61	30.79	30.98	31.16	31.35
25.0	31.53	31.72	31.91	32.10	32.29	32.48	32.68	32.87	33.06	33.26
26.0	33.46	33.66	33.85	34.05	34.25	34.46	34.66	34.86	35.07	35.28
27.0	35.48	35.69	35.90	36.11	36.32	36.53	36.75	36.96	37.18	37.39
28.0	37.61	37.83	38.05	38.27	38.50	38.72	38.94	39.17	39.40	39.61
29.0	39.85	40.08	40.32	40.55	40.78	41.02	41.25	41.49	41.73	41.97

(CONTINUACION TABLA 1.)

°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
30.0	42.21	42.45	42.70	42.94	43.19	43.43	43.68	43.93	44.18	44.43
31.0	44.69	44.94	45.20	45.45	45.71	45.97	46.23	46.49	46.76	47.02
32.0	47.29	47.55	47.82	48.09	48.36	48.64	48.91	49.18	49.46	49.74
33.0	50.02	50.30	50.58	50.86	51.15	51.43	51.72	52.01	52.30	52.59
34.0	52.88	53.18	53.47	53.77	54.07	54.37	54.67	54.97	55.28	55.58
35.0	55.89	56.20	56.51	56.82	57.14	57.45	57.77	58.08	58.40	58.72
36.0	59.05	59.37	59.69	60.02	60.35	60.68	61.01	61.34	61.68	62.01
37.0	62.35	62.69	63.03	63.38	63.72	64.07	64.41	64.76	65.11	65.46
38.0	65.82	66.17	66.53	66.89	67.25	67.61	67.98	68.34	68.71	69.08
39.0	69.45	69.82	70.19	70.57	70.95	71.33	71.71	72.09	72.48	72.86
40.0	73.34	73.74	74.13	74.52	74.92	75.31	75.71	76.12	76.52	76.92
41.0	77.33	77.74	78.15	78.56	78.98	79.39	79.81	80.23	80.65	81.08
42.0	81.50	81.93	82.36	82.79	83.22	83.66	84.10	84.53	84.98	85.42
43.0	85.86	86.31	86.76	87.21	87.66	88.12	88.58	89.04	89.50	89.96
44.0	90.43	90.89	91.36	91.84	92.31	92.78	93.26	93.74	94.22	94.71
45.0	95.20	95.68	96.17	96.67	97.16	97.66	98.16	98.66	99.16	99.67
46.0	100.18	100.69	101.20	101.72	102.23	102.75	103.27	103.80	104.32	104.85
47.0	105.38	105.92	106.45	106.99	107.53	108.07	108.61	109.16	109.71	110.26
48.0	110.82	111.37	111.93	112.49	113.06	113.62	114.19	114.76	115.34	115.91
49.0	116.49	117.07	117.65	118.24	118.83	119.42	120.01	120.61	121.20	121.81
50.0	122.41	123.01	123.62	124.23	124.85	125.46	126.08	126.70	127.33	127.95
51.0	128.58	129.21	129.85	130.49	131.13	131.77	132.41	133.06	133.71	134.36
52.0	135.02	135.68	136.34	137.00	137.67	138.34	139.01	139.69	140.37	141.05
53.0	141.73	142.42	143.11	143.80	144.49	145.19	145.89	146.60	147.30	148.01
54.0	148.72	149.44	150.16	150.88	151.60	152.33	153.06	153.79	154.53	155.27
55.0	156.01	156.75	157.50	158.25	159.01	159.76	160.52	161.29	162.05	162.82
56.0	163.60	164.37	165.15	165.93	166.72	167.50	168.30	169.09	169.89	170.69
57.0	171.49	172.30	173.11	173.92	174.74	175.56	176.38	177.21	178.04	178.88
58.0	179.71	180.55	181.40	182.24	183.09	183.95	184.80	185.66	186.53	187.39
59.0	188.26	189.14	190.01	190.89	191.78	192.67	193.56	194.45	195.35	196.25
60.0	197.16	198.07	198.98	199.89	200.81	201.74	202.66	203.59	204.53	205.46

(CONTINUACION TABLA 1.)

°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
30.0	42.21	42.45	42.70	42.94	43.19	43.43	43.68	43.93	44.18	44.43
31.0	44.69	44.94	45.20	45.45	45.71	45.97	46.23	46.49	46.76	47.02
32.0	47.29	47.55	47.82	48.09	48.36	48.64	48.91	49.18	49.46	49.74
33.0	50.02	50.30	50.58	50.86	51.15	51.43	51.72	52.01	52.30	52.59
34.0	52.88	53.18	53.47	53.77	54.07	54.37	54.67	54.97	55.28	55.58
35.0	55.89	56.20	56.51	56.82	57.14	57.45	57.77	58.08	58.40	58.72
36.0	59.05	59.37	59.69	60.02	60.35	60.68	61.01	61.34	61.68	62.01
37.0	62.35	62.69	63.03	63.38	63.72	64.07	64.41	64.76	65.11	65.46
38.0	65.82	66.17	66.53	66.89	67.25	67.61	67.98	68.34	68.71	69.08
39.0	69.45	69.82	70.19	70.57	70.95	71.33	71.71	72.09	72.48	72.86
40.0	73.34	73.74	74.13	74.52	74.92	75.31	75.71	76.12	76.52	76.92
41.0	77.33	77.74	78.15	78.56	78.98	79.39	79.81	80.23	80.65	81.08
42.0	81.50	81.93	82.36	82.79	83.22	83.66	84.10	84.53	84.98	85.42
43.0	85.86	86.31	86.76	87.21	87.66	88.12	88.58	89.04	89.50	89.96
44.0	90.43	90.89	91.36	91.84	92.31	92.78	93.26	93.74	94.22	94.71
45.0	95.20	95.68	96.17	96.67	97.16	97.66	98.16	98.66	99.16	99.67
46.0	100.18	100.69	101.20	101.72	102.23	102.75	103.27	103.80	104.32	104.85
47.0	105.38	105.92	106.45	106.99	107.53	108.07	108.61	109.16	109.71	110.26
48.0	110.82	111.37	111.93	112.49	113.06	113.62	114.19	114.76	115.34	115.91
49.0	116.49	117.07	117.65	118.24	118.83	119.42	120.01	120.61	121.20	121.81
50.0	122.41	123.01	123.62	124.23	124.85	125.46	126.08	126.70	127.33	127.95
51.0	128.58	129.21	129.85	130.49	131.13	131.77	132.41	133.06	133.71	134.36
52.0	135.02	135.68	136.34	137.00	137.67	138.34	139.01	139.69	140.37	141.05
53.0	141.73	142.42	143.11	143.80	144.49	145.19	145.89	146.60	147.30	148.01
54.0	148.72	149.44	150.16	150.88	151.60	152.33	153.06	153.79	154.53	155.27
55.0	156.01	156.75	157.50	158.25	159.01	159.76	160.52	161.29	162.05	162.82
56.0	163.60	164.37	165.15	165.93	166.72	167.50	168.30	169.09	169.89	170.69
57.0	171.49	172.30	173.11	173.92	174.74	175.56	176.38	177.21	178.04	178.88
58.0	179.71	180.55	181.40	182.24	183.09	183.95	184.80	185.66	186.53	187.39
59.0	188.26	189.14	190.01	190.89	191.78	192.67	193.56	194.45	195.35	196.25
60.0	197.16	198.07	198.98	199.89	200.81	201.74	202.66	203.59	204.53	205.46

TABLA 2. Pendiente (s) de la curva presión de saturación de vapor versus temperatura en función de la temperatura (s en mb/°C).

°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
.0	.443	.446	.448	.451	.454	.457	.460	.463	.456	.469
1.0	.472	.475	.478	.481	.484	.487	.490	.493	.497	.500
2.0	.503	.506	.509	.512	.516	.519	.522	.525	.529	.532
3.0	.535	.539	.542	.546	.549	.552	.556	.559	.563	.566
4.0	.570	.573	.577	.581	.584	.588	.591	.595	.599	.602
5.0	.606	.610	.614	.617	.621	.625	.629	.633	.637	.641
6.0	.644	.648	.652	.656	.660	.664	.668	.672	.677	.681
7.0	.685	.689	.693	.697	.701	.706	.710	.714	.719	.723
8.0	.727	.732	.736	.740	.745	.749	.754	.758	.763	.767
9.0	.772	.776	.781	.786	.790	.795	.800	.805	.809	.814
10.0	.819	.824	.829	.833	.838	.843	.848	.853	.858	.863
11.0	.868	.873	.878	.884	.889	.894	.899	.904	.910	.915
12.0	.920	.926	.931	.936	.942	.947	.953	.958	.964	.969
13.0	.975	.980	.986	.992	.997	1.003	1.009	1.015	1.020	1.026
14.0	1.032	1.038	1.044	1.050	1.056	1.062	1.068	1.074	1.080	1.086
15.0	1.092	1.098	1.104	1.111	1.117	1.123	1.130	1.136	1.142	1.149
16.0	1.155	1.162	1.168	1.175	1.181	1.188	1.194	1.201	1.208	1.214
17.0	1.221	1.228	1.235	1.242	1.249	1.255	1.262	1.269	1.276	1.283
18.0	1.290	1.298	1.305	1.312	1.319	1.326	1.334	1.341	1.348	1.356
19.0	1.363	1.370	1.378	1.385	1.393	1.401	1.408	1.416	1.424	1.431
20.0	1.439	1.447	1.455	1.462	1.470	1.478	1.486	1.494	1.502	1.510
21.0	1.518	1.527	1.535	1.543	1.551	1.560	1.568	1.576	1.585	1.593
22.0	1.602	1.610	1.619	1.627	1.636	1.645	1.653	1.662	1.671	1.680
23.0	1.689	1.697	1.706	1.715	1.724	1.734	1.743	1.752	1.761	1.770
24.0	1.779	1.789	1.798	1.807	1.817	1.826	1.836	1.845	1.855	1.865
25.0	1.874	1.884	1.894	1.904	1.914	1.923	1.933	1.943	1.953	1.963
26.0	1.974	1.984	1.994	2.004	2.014	2.025	2.035	2.046	2.056	2.066
27.0	2.077	2.088	2.098	2.109	2.120	2.130	2.141	2.152	2.163	2.174
28.0	2.185	2.196	2.207	2.218	2.230	2.241	2.252	2.263	2.275	2.286
29.0	2.298	2.309	2.321	2.332	2.344	2.356	2.368	2.379	2.391	2.403

(CONTINUACION TABLA 2.)

°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
30.0	2.415	2.427	2.439	2.451	2.463	2.476	2.488	2.500	2.513	2.525
31.0	2.538	2.550	2.563	2.575	2.588	2.601	2.613	2.626	2.639	2.652
32.0	2.665	2.678	2.691	2.704	2.718	2.731	2.744	2.757	2.771	2.784
33.0	2.798	2.811	2.825	2.839	2.852	2.866	2.880	2.894	2.908	2.922
34.0	2.936	2.950	2.964	2.979	2.993	3.007	3.022	3.036	3.051	3.065
35.0	3.080	3.095	3.109	3.124	3.139	3.154	3.169	3.184	3.199	3.214
36.0	3.230	3.245	3.260	3.276	3.291	3.307	3.322	3.338	3.354	3.369
37.0	3.385	3.401	3.417	3.433	3.449	3.465	3.481	3.498	3.514	3.530
38.0	3.547	3.563	3.580	3.597	3.613	3.630	3.647	3.664	3.681	3.698
39.0	3.715	3.732	3.749	3.767	3.784	3.801	3.819	3.836	3.854	3.872
40.0	3.896	3.914	3.932	3.950	3.968	3.986	4.004	4.022	4.040	4.059
41.0	4.077	4.096	4.114	4.133	4.152	4.171	4.190	4.209	4.228	4.247
42.0	4.266	4.285	4.304	4.324	4.343	4.363	4.382	4.402	4.422	4.441
43.0	4.461	4.481	4.501	4.521	4.542	4.562	4.582	4.602	4.623	4.644
44.0	4.664	4.685	4.706	4.726	4.747	4.768	4.789	4.811	4.832	4.853
45.0	4.874	4.896	4.917	4.939	4.961	4.982	5.004	5.026	5.048	5.070
46.0	5.092	5.115	5.137	5.159	5.182	5.204	5.227	5.250	5.272	5.295
47.0	5.318	5.341	5.364	5.387	5.411	5.434	5.458	5.481	5.505	5.528
48.0	5.552	5.576	5.600	5.624	5.648	5.672	5.696	5.721	5.745	5.770
49.0	5.794	5.819	5.844	5.869	5.894	5.919	5.944	5.969	5.994	6.020
50.0	6.045	6.071	6.096	6.122	6.148	6.174	6.200	6.226	6.252	6.278
51.0	6.304	6.331	6.357	6.384	6.411	6.438	6.464	6.491	6.518	6.546
52.0	6.573	6.600	6.628	6.655	6.683	6.710	6.738	6.766	6.794	6.822
53.0	6.850	6.879	6.907	6.935	6.964	6.993	7.021	7.050	7.079	7.108
54.0	7.137	7.167	7.196	7.225	7.255	7.284	7.314	7.344	7.374	7.404
55.0	7.434	7.464	7.494	7.525	7.555	7.586	7.617	7.647	7.678	7.709
56.0	7.740	7.771	7.803	7.834	7.866	7.897	7.929	7.961	7.993	8.025
57.0	8.057	8.089	8.121	8.154	8.186	8.219	8.251	8.284	8.317	8.350
58.0	8.383	8.417	8.450	8.483	8.517	8.551	8.585	8.618	8.652	8.687
59.0	8.721	8.755	8.789	8.824	8.859	8.893	8.928	8.963	8.998	9.033
60.0	9.069	9.104	9.140	9.175	9.211	9.247	9.283	9.319	9.355	9.391

TABLA 3. Combinaciones del cambio de presión de vapor con punto de rocío (s = de/dt, en mb/°C) y la constante sicrométrica (γ en mb/°C) a diferentes temperaturas de rocío y a 1050 mb de presión barométrica.

°C	s	γ	s+γ	s/γ	$\frac{s}{s+\gamma}$	$\frac{\gamma}{s+\gamma}$	$\frac{s\gamma}{s+\gamma}$
.0	.443	.678	1.121	.653	.395	.604	.267
1.0	.472	.678	1.151	.695	.410	.589	.278
2.0	.503	.679	1.183	.740	.425	.574	.289
3.0	.535	.680	1.216	.787	.440	.559	.299
4.0	.570	.681	1.252	.836	.455	.544	.310
5.0	.606	.682	1.289	.888	.470	.529	.321
6.0	.644	.683	1.328	.943	.485	.514	.331
7.0	.685	.684	1.369	1.001	.500	.499	.342
8.0	.727	.685	1.413	1.061	.514	.485	.352
9.0	.772	.686	1.458	1.125	.529	.470	.363
10.0	.819	.687	1.506	1.192	.543	.456	.373
11.0	.869	.688	1.557	1.262	.558	.441	.384
12.0	.920	.689	1.610	1.336	.571	.428	.394
13.0	.975	.690	1.665	1.413	.585	.414	.404
14.0	1.032	.691	1.723	1.494	.599	.400	.414
15.0	1.093	.691	1.784	1.579	.612	.387	.423
16.0	1.156	.692	1.848	1.668	.625	.374	.433
17.0	1.222	.693	1.916	1.761	.637	.362	.442
18.0	1.291	.694	1.986	1.859	.650	.349	.451
19.0	1.364	.695	2.059	1.960	.662	.337	.460
20.0	1.440	.696	2.136	2.067	.673	.326	.469
21.0	1.519	.697	2.217	2.178	.685	.314	.478
22.0	1.602	.698	2.301	2.294	.696	.303	.486
23.0	1.689	.699	2.389	2.416	.707	.292	.494
24.0	1.780	.700	2.481	2.542	.717	.282	.502
25.0	1.875	.701	2.577	2.675	.727	.272	.510
26.0	1.975	.702	2.677	2.812	.737	.262	.518
27.0	2.078	.703	2.781	2.956	.747	.252	.525
28.0	2.186	.704	2.890	3.106	.756	.243	.532
29.0	2.299	.704	3.004	3.261	.765	.234	.539
30.0	2.417	.705	3.122	3.424	.773	.226	.546
31.0	2.539	.706	3.246	3.592	.782	.217	.552
32.0	2.667	.707	3.374	3.768	.790	.209	.559
33.0	2.800	.708	3.508	3.951	.798	.201	.565
34.0	2.938	.709	3.648	4.140	.805	.194	.571

(CONTINUACION TABLA 3.)

°C	s	y	s+y	s/y	$\frac{s}{s+y}$	$\frac{y}{s+y}$	$\frac{sy}{s+y}$
35.0	3.082	.710	3.792	4.338	.812	.187	.577
36.0	3.232	.711	3.943	4.542	.819	.180	.583
37.0	3.387	.712	4.100	4.755	.826	.173	.588
38.0	3.549	.713	4.263	4.976	.832	.167	.593
39.0	3.717	.714	4.432	5.205	.838	.161	.599
40.0	3.898	.715	4.614	5.451	.844	.155	.604
41.0	4.080	.716	4.796	5.698	.850	.149	.609
42.0	4.269	.717	4.986	5.953	.856	.143	.613
43.0	4.464	.717	5.182	6.218	.861	.138	.618
44.0	4.667	.718	5.386	6.492	.866	.133	.622
45.0	4.878	.719	5.598	6.776	.871	.128	.627
46.0	5.096	.720	5.817	7.070	.876	.123	.631
47.0	5.322	.721	6.044	7.374	.880	.119	.635
48.0	5.556	.722	6.279	7.689	.884	.115	.639
49.0	5.799	.723	6.522	8.014	.889	.110	.643
50.0	6.049	.724	6.774	8.350	.893	.106	.647
51.0	6.309	.725	7.035	8.697	.896	.103	.650
52.0	6.578	.726	7.304	9.056	.900	.099	.654
53.0	6.856	.727	7.583	9.426	.904	.095	.657
54.0	7.143	.728	7.871	9.809	.907	.092	.660
55.0	7.439	.729	8.169	10.203	.910	.089	.664
56.0	7.746	.730	8.476	10.610	.913	.086	.667
57.0	8.063	.731	8.794	11.030	.916	.083	.670
58.0	8.390	.731	9.122	11.463	.919	.080	.673
59.0	8.727	.732	9.460	11.909	.922	.077	.676
60.0	9.076	.733	9.809	12.368	.925	.074	.678

TABLA 4. Combinaciones del cambio de presión de vapor con punto de rocío ($s = de/dt$, en mb/°C) y la constante sicrométrica (γ en mb/°C) a diferentes temperaturas de rocío y a 1000 mb de presión barométrica.

°C	s	γ	s+γ	s/γ	$\frac{s}{s+\gamma}$	$\frac{\gamma}{s+\gamma}$	$\frac{s\gamma}{s+\gamma}$
.0	.443	.646	1.089	.685	.406	.593	.262
1.0	.472	.646	1.119	.730	.422	.577	.272
2.0	.503	.647	1.151	.776	.437	.562	.283
3.0	.535	.648	1.184	.826	.452	.547	.293
4.0	.570	.649	1.219	.878	.467	.532	.303
5.0	.606	.650	1.257	.932	.482	.517	.313
6.0	.644	.651	1.296	.990	.497	.502	.324
7.0	.685	.652	1.337	1.050	.512	.487	.334
8.0	.727	.653	1.380	1.114	.527	.472	.344
9.0	.772	.653	1.426	1.181	.541	.458	.354
10.0	.819	.654	1.474	1.251	.555	.444	.363
11.0	.869	.655	1.524	1.325	.569	.430	.373
12.0	.920	.656	1.577	1.402	.583	.416	.383
13.0	.975	.657	1.632	1.483	.597	.402	.392
14.0	1.032	.658	1.691	1.568	.610	.389	.402
15.0	1.093	.659	1.752	1.658	.623	.376	.411
16.0	1.156	.660	1.816	1.751	.636	.363	.420
17.0	1.222	.660	1.883	1.849	.649	.350	.428
18.0	1.291	.661	1.953	1.951	.661	.338	.437
19.0	1.364	.662	2.026	2.058	.673	.326	.446
20.0	1.440	.663	2.103	2.170	.684	.315	.454
21.0	1.519	.664	2.184	2.287	.695	.304	.462
22.0	1.602	.665	2.268	2.409	.706	.293	.470
23.0	1.689	.666	2.356	2.536	.717	.282	.477
24.0	1.780	.667	2.448	2.669	.727	.272	.485
25.0	1.875	.668	2.543	2.808	.737	.262	.492
26.0	1.975	.668	2.644	2.952	.747	.252	.499
27.0	2.078	.669	2.748	3.103	.756	.243	.506
28.0	2.186	.670	2.857	3.260	.765	.234	.513
29.0	2.299	.671	2.971	3.424	.773	.226	.519
30.0	2.417	.672	3.089	3.594	.782	.217	.526
31.0	2.539	.673	3.212	3.771	.790	.209	.532
32.0	2.667	.674	3.341	3.956	.798	.201	.538
33.0	2.800	.675	3.475	4.148	.805	.194	.543
34.0	2.938	.675	3.614	4.347	.812	.187	.549

(CONTINUACION TABLA 4.)

°C	s	y	s+y	s/y	$\frac{s}{s+y}$	$\frac{y}{s+y}$	$\frac{sy}{s+y}$
35.0	3.082	.676	3.759	4.554	.819	.180	.554
36.0	3.232	.677	3.909	4.769	.826	.173	.560
37.0	3.387	.678	4.066	4.992	.833	.166	.565
38.0	3.549	.679	4.229	5.224	.839	.160	.570
39.0	3.717	.680	4.398	5.464	.845	.154	.575
40.0	3.898	.681	4.580	5.723	.851	.148	.579
41.0	4.080	.682	4.762	5.982	.856	.143	.584
42.0	4.269	.682	4.952	6.251	.862	.137	.588
43.0	4.464	.683	5.148	6.529	.867	.132	.593
44.0	4.667	.684	5.352	6.817	.872	.127	.597
45.0	4.878	.685	5.563	7.115	.876	.123	.601
46.0	5.096	.686	5.782	7.424	.881	.118	.604
47.0	5.322	.687	6.009	7.743	.885	.114	.608
48.0	5.556	.688	6.244	8.073	.889	.110	.612
49.0	5.799	.689	6.488	8.415	.893	.106	.615
50.0	6.049	.690	6.739	8.768	.897	.102	.619
51.0	6.309	.690	7.000	9.132	.901	.098	.622
52.0	6.578	.691	7.270	9.509	.904	.095	.625
53.0	6.856	.692	7.548	9.898	.908	.091	.629
54.0	7.143	.693	7.836	10.299	.911	.088	.632
55.0	7.439	.694	8.134	10.714	.914	.085	.635
56.0	7.746	.695	8.441	11.141	.917	.082	.638
57.0	8.063	.696	8.759	11.582	.920	.079	.640
58.0	8.390	.697	9.087	12.037	.923	.076	.643
59.0	8.727	.697	9.425	12.505	.925	.074	.646
60.0	9.076	.698	9.774	12.988	.928	.071	.648

TABLA 5. Combinaciones del cambio de presión de vapor con punto de rocío ($s = de/dt$, en mb/°C) y la constante sicrométrica (γ en mb/°C) a diferentes temperaturas de rocío y a 950 mb de presión barométrica.

°C	s	y	s+y	s/y	$\frac{s}{s+y}$	$\frac{y}{s+y}$	$\frac{sy}{s+y}$
.0	.443	.613	1.056	.722	.419	.580	.257
1.0	.472	.613	1.086	.769	.434	.565	.266
2.0	.503	.614	1.118	.818	.450	.549	.276
3.0	.535	.615	1.151	.870	.465	.534	.286
4.0	.570	.616	1.186	.925	.480	.519	.296
5.0	.606	.617	1.224	.982	.495	.504	.305
6.0	.644	.618	1.263	1.043	.510	.489	.315
7.0	.685	.619	1.304	1.106	.525	.474	.325
8.0	.727	.620	1.347	1.173	.539	.460	.334
9.0	.772	.620	1.393	1.244	.554	.445	.344
10.0	.819	.621	1.441	1.318	.568	.431	.353
11.0	.869	.622	1.491	1.395	.582	.417	.362
12.0	.920	.623	1.544	1.476	.596	.403	.371
13.0	.975	.624	1.599	1.562	.609	.390	.380
14.0	1.032	.625	1.658	1.651	.622	.377	.389
15.0	1.093	.626	1.719	1.745	.635	.364	.398
16.0	1.156	.627	1.783	1.843	.648	.351	.406
17.0	1.222	.627	1.850	1.946	.660	.339	.414
18.0	1.291	.628	1.920	2.053	.672	.327	.422
19.0	1.364	.629	1.993	2.166	.684	.315	.430
20.0	1.440	.630	2.070	2.283	.695	.304	.438
21.0	1.519	.631	2.151	2.406	.706	.293	.446
22.0	1.602	.632	2.235	2.534	.717	.282	.453
23.0	1.689	.633	2.323	2.668	.727	.272	.460
24.0	1.780	.634	2.415	2.808	.737	.262	.467
25.0	1.875	.635	2.510	2.954	.747	.252	.474
26.0	1.975	.635	2.611	3.106	.756	.243	.481
27.0	2.078	.636	2.715	3.264	.765	.234	.487
28.0	2.186	.637	2.824	3.429	.774	.225	.493
29.0	2.299	.638	2.938	3.601	.782	.217	.499
30.0	2.417	.639	3.056	3.780	.790	.209	.505
31.0	2.539	.640	3.179	3.966	.798	.201	.511
32.0	2.667	.641	3.308	4.159	.806	.193	.516
33.0	2.800	.642	3.442	4.361	.813	.186	.522
34.0	2.938	.642	3.581	4.570	.820	.179	.527

(CONTINUACION TABLA 5.)

°C	s	y	s+y	s/y	$\frac{s}{s+y}$	$\frac{y}{s+y}$	$\frac{sy}{s+y}$
35.0	3.082	.643	3.726	4.787	.827	.172	.532
36.0	3.232	.644	3.876	5.013	.833	.166	.537
37.0	3.387	.645	4.033	5.247	.839	.160	.542
38.0	3.549	.646	4.196	5.491	.845	.154	.546
39.0	3.717	.647	4.365	5.743	.851	.148	.551
40.0	3.898	.648	4.547	6.015	.857	.142	.555
41.0	4.080	.649	4.729	6.286	.862	.137	.560
42.0	4.269	.649	4.919	6.568	.867	.132	.564
43.0	4.464	.650	5.115	6.860	.872	.127	.568
44.0	4.667	.651	5.319	7.162	.877	.122	.571
45.0	4.878	.652	5.530	7.475	.882	.117	.575
46.0	5.096	.653	5.749	7.799	.886	.113	.579
47.0	5.322	.654	5.976	8.133	.890	.109	.582
48.0	5.556	.655	6.211	8.480	.894	.105	.586
49.0	5.799	.656	6.455	8.838	.898	.101	.589
50.0	6.049	.657	6.706	9.208	.902	.097	.592
51.0	6.309	.657	6.967	9.590	.905	.094	.595
52.0	6.578	.658	7.237	9.985	.908	.091	.598
53.0	6.856	.659	7.515	10.393	.912	.087	.601
54.0	7.143	.660	7.803	10.814	.915	.084	.604
55.0	7.439	.661	8.101	11.248	.918	.081	.607
56.0	7.746	.662	8.408	11.696	.921	.078	.610
57.0	8.063	.663	8.726	12.158	.924	.075	.612
58.0	8.390	.664	9.054	12.635	.926	.073	.615
59.0	8.727	.664	9.392	13.126	.929	.070	.617
60.0	9.076	.665	9.741	13.632	.931	.068	.620

TABLA 6. Combinaciones del cambio de presión de vapor con punto de rocío ($s = de/dt$, en mb/°C) y la constante sicrométrica (γ en mb/°C) a diferentes temperaturas de rocío y a 900 mb de presión barométrica.

°C	s	y	s+y	s/y	$\frac{s}{s+y}$	$\frac{y}{s+y}$	$\frac{sy}{s+y}$
.0	.443	.581	1.024	.762	.432	.567	.251
1.0	.472	.581	1.054	.811	.448	.551	.260
2.0	.503	.582	1.085	.863	.463	.536	.270
3.0	.535	.583	1.119	.918	.478	.521	.279
4.0	.570	.584	1.154	.976	.493	.506	.288
5.0	.606	.585	1.191	1.036	.509	.490	.297
6.0	.644	.585	1.230	1.100	.523	.476	.307
7.0	.685	.586	1.272	1.167	.538	.461	.316
8.0	.727	.587	1.315	1.238	.553	.446	.325
9.0	.772	.588	1.360	1.312	.567	.432	.334
10.0	.819	.589	1.408	1.390	.581	.418	.342
11.0	.869	.590	1.459	1.472	.595	.404	.351
12.0	.920	.590	1.511	1.558	.609	.390	.359
13.0	.975	.591	1.567	1.648	.622	.377	.368
14.0	1.032	.592	1.625	1.742	.635	.364	.376
15.0	1.093	.593	1.686	1.841	.648	.351	.384
16.0	1.156	.594	1.750	1.945	.660	.339	.392
17.0	1.222	.595	1.817	2.053	.672	.327	.400
18.0	1.291	.595	1.887	2.167	.684	.315	.407
19.0	1.364	.596	1.960	2.285	.695	.304	.415
20.0	1.440	.597	2.037	2.409	.706	.293	.422
21.0	1.519	.598	2.118	2.539	.717	.282	.429
22.0	1.602	.599	2.202	2.674	.727	.272	.436
23.0	1.689	.600	2.290	2.816	.737	.262	.442
24.0	1.780	.600	2.381	2.963	.747	.252	.449
25.0	1.875	.601	2.477	3.117	.757	.242	.455
26.0	1.975	.602	2.577	3.277	.766	.233	.461
27.0	2.078	.603	2.682	3.444	.775	.224	.467
28.0	2.186	.604	2.791	3.619	.783	.216	.473
29.0	2.299	.605	2.904	3.800	.791	.208	.479
30.0	2.417	.605	3.022	3.989	.799	.200	.484
31.0	2.539	.606	3.146	4.185	.807	.192	.489
32.0	2.667	.607	3.274	4.390	.814	.185	.494
33.0	2.800	.608	3.408	4.602	.821	.178	.499
34.0	2.938	.609	3.547	4.823	.828	.171	.504

(CONTINUACION TABLA 6.)

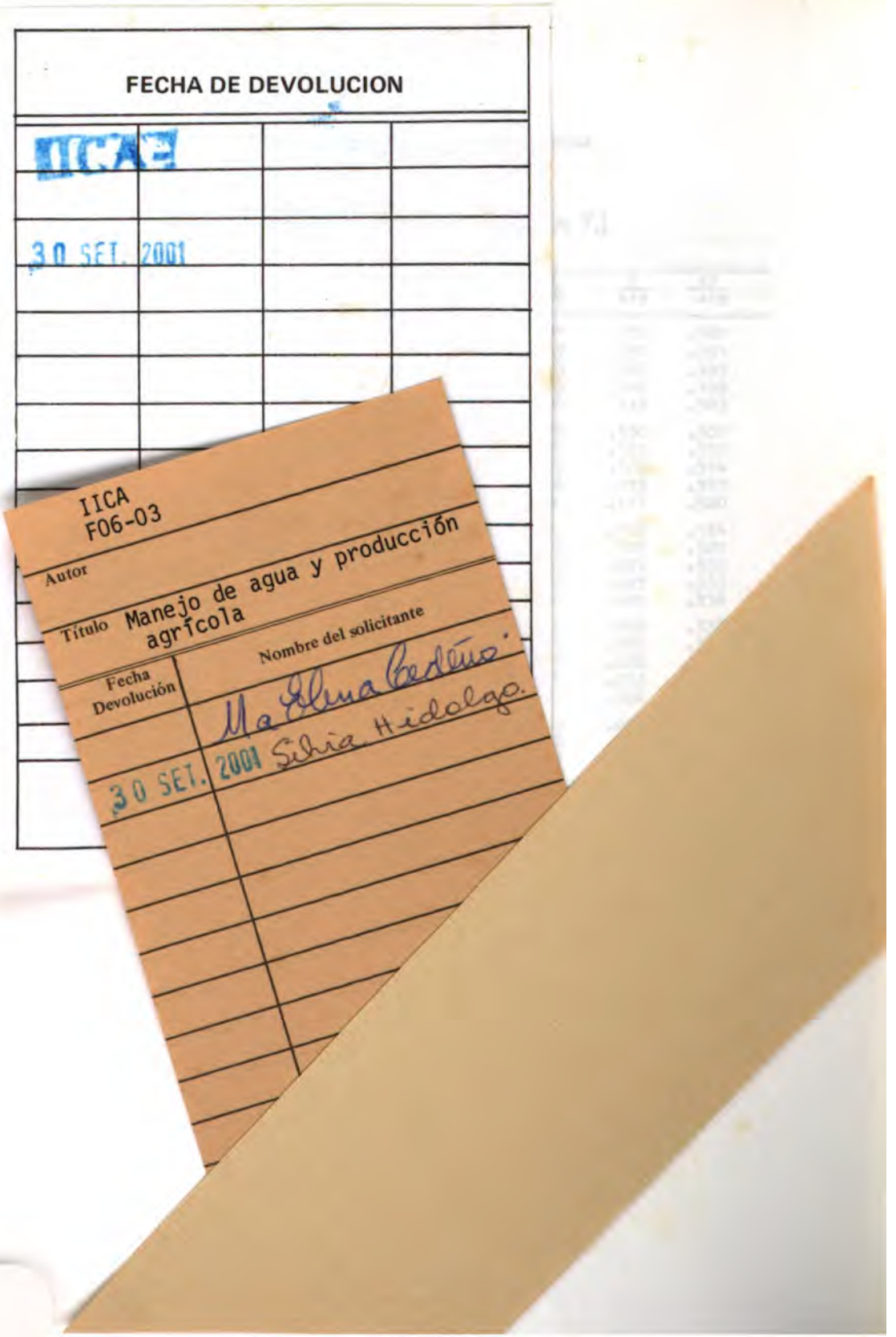
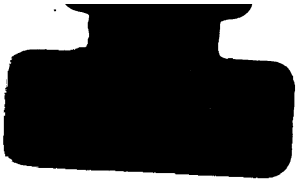
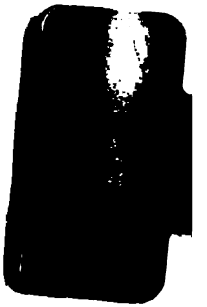
°C	s	y	s+y	s/y	$\frac{s}{s+y}$	$\frac{y}{s+y}$	$\frac{sy}{s+y}$
35.0	3.082	.610	3.692	5.052	.834	.165	.509
36.0	3.232	.610	3.843	5.291	.841	.158	.513
37.0	3.387	.611	3.999	5.538	.847	.152	.518
38.0	3.549	.612	4.162	5.795	.852	.147	.522
39.0	3.717	.613	4.331	6.061	.858	.141	.526
40.0	3.898	.614	4.513	6.348	.863	.136	.530
41.0	4.080	.615	4.695	6.634	.869	.130	.534
42.0	4.269	.615	4.885	6.932	.873	.126	.538
43.0	4.464	.616	5.081	7.240	.878	.121	.541
44.0	4.667	.617	5.285	7.559	.883	.116	.545
45.0	4.878	.618	5.496	7.889	.887	.112	.548
46.0	5.096	.619	5.715	8.231	.891	.108	.552
47.0	5.322	.620	5.942	8.584	.895	.104	.555
48.0	5.556	.620	6.177	8.950	.899	.100	.558
49.0	5.799	.621	6.420	9.328	.903	.096	.561
50.0	6.049	.622	6.672	9.718	.906	.093	.564
51.0	6.309	.623	6.932	10.122	.910	.089	.567
52.0	6.578	.624	7.202	10.539	.913	.086	.570
53.0	6.856	.624	7.481	10.969	.916	.083	.572
54.0	7.143	.625	7.769	11.414	.919	.080	.575
55.0	7.439	.626	8.066	11.872	.922	.077	.577
56.0	7.746	.627	8.374	12.345	.925	.074	.580
57.0	8.063	.628	8.691	12.833	.927	.072	.582
58.0	8.390	.629	9.019	13.336	.930	.069	.585
59.0	8.727	.629	9.357	13.854	.932	.067	.587
60.0	9.076	.630	9.706	14.388	.935	.064	.589

TABLA 7. Combinaciones del cambio de presión de vapor con punto de rocío ($s = de/dt$, en mb/°C) y la constante sicrométrica (γ en mb/°C) a diferentes temperaturas de rocío y a 850 mb de presión barométrica.

°C	s	γ	s+γ	s/γ	$\frac{s}{s+\gamma}$	$\frac{\gamma}{s+\gamma}$	$\frac{s\gamma}{s+\gamma}$
.0	.443	.549	.992	.807	.446	.553	.245
1.0	.472	.549	1.022	.859	.462	.537	.254
2.0	.503	.550	1.053	.913	.477	.522	.262
3.0	.535	.551	1.087	.971	.492	.507	.271
4.0	.570	.552	1.122	1.032	.507	.492	.280
5.0	.606	.553	1.159	1.096	.523	.476	.289
6.0	.644	.554	1.199	1.164	.537	.462	.298
7.0	.685	.554	1.240	1.234	.552	.447	.306
8.0	.727	.555	1.283	1.309	.567	.432	.315
9.0	.772	.556	1.329	1.387	.581	.418	.323
10.0	.819	.557	1.377	1.470	.595	.404	.331
11.0	.869	.558	1.427	1.556	.608	.391	.339
12.0	.920	.559	1.480	1.646	.622	.377	.347
13.0	.975	.560	1.535	1.741	.635	.364	.355
14.0	1.032	.560	1.593	1.841	.648	.351	.363
15.0	1.093	.561	1.654	1.945	.660	.339	.371
16.0	1.156	.562	1.718	2.054	.672	.327	.378
17.0	1.222	.563	1.785	2.169	.684	.315	.385
18.0	1.291	.564	1.855	2.288	.695	.304	.392
19.0	1.364	.565	1.929	2.413	.707	.292	.399
20.0	1.440	.566	2.006	2.544	.717	.282	.406
21.0	1.519	.566	2.086	2.680	.728	.271	.412
22.0	1.602	.567	2.170	2.823	.738	.261	.419
23.0	1.689	.568	2.258	2.972	.748	.251	.425
24.0	1.780	.569	2.350	3.127	.757	.242	.431
25.0	1.875	.570	2.446	3.289	.766	.233	.437
26.0	1.975	.571	2.546	3.458	.775	.224	.443
27.0	2.078	.571	2.650	3.634	.784	.215	.448
28.0	2.186	.572	2.759	3.817	.792	.207	.453
29.0	2.299	.573	2.873	4.008	.800	.199	.459
30.0	2.417	.574	2.991	4.207	.807	.192	.464
31.0	2.539	.575	3.114	4.413	.815	.184	.469
32.0	2.667	.576	3.243	4.628	.822	.177	.473
33.0	2.800	.577	3.377	4.852	.829	.170	.478
34.0	2.938	.577	3.516	5.084	.835	.164	.482

(CONTINUACION TABLA 7.)

°C	s	y	s+y	s/y	$\frac{s}{s+y}$	$\frac{y}{s+y}$	$\frac{sy}{s+y}$
35.0	3.082	.578	3.661	5.326	.841	.158	.487
36.0	3.232	.579	3.811	5.576	.847	.152	.491
37.0	3.387	.580	3.968	5.836	.853	.146	.495
38.0	3.549	.581	4.131	6.106	.859	.140	.499
39.0	3.717	.582	4.300	6.386	.864	.135	.503
40.0	3.898	.583	4.481	6.687	.869	.130	.507
41.0	4.080	.583	4.664	6.989	.874	.125	.510
42.0	4.269	.584	4.853	7.301	.879	.120	.514
43.0	4.464	.585	5.050	7.625	.884	.115	.517
44.0	4.667	.586	5.254	7.960	.888	.111	.520
45.0	4.878	.587	5.465	8.307	.892	.107	.524
46.0	5.096	.588	5.684	8.666	.896	.103	.527
47.0	5.322	.588	5.911	9.037	.900	.099	.530
48.0	5.556	.589	6.146	9.421	.904	.095	.533
49.0	5.799	.590	6.389	9.818	.907	.092	.536
50.0	6.049	.591	6.641	10.228	.910	.089	.538
51.0	6.309	.592	6.901	10.651	.914	.085	.541
52.0	6.578	.593	7.171	11.089	.917	.082	.544
53.0	6.856	.594	7.450	11.541	.920	.079	.546
54.0	7.143	.594	7.738	12.007	.923	.076	.549
55.0	7.439	.595	8.035	12.488	.925	.074	.551
56.0	7.746	.596	8.343	12.984	.928	.071	.553
57.0	8.063	.597	8.660	13.496	.931	.068	.556
58.0	8.390	.598	8.988	14.023	.933	.066	.558
59.0	8.727	.599	9.327	14.567	.935	.064	.560
60.0	9.076	.600	9.676	15.126	.937	.062	.562


FECHA DE DEVOLUCION
IICA
30 SET. 2001
IICA
F06-03
Autor
Título Manejo de agua y producción agrícola
Fecha Devolución
Nombre del solicitante
30 SET. 2001
Ma Elena Cedeño
Silvia Hidalgo.