



COMISION NACIONAL
DEL AGUA

ANEXO TECNICO, CUANDO Y CUANTO REGAR

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA 

Colección manuales

G
631.587
E55
23454



COMISION NACIONAL
DEL AGUA

**Anexo técnico, cuándo y cuánto
regar**

1a. edición

*INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA*

IMTA 
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

**Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje
Subcoordinación de Uso Eficiente del Agua
Dr. Juan Enciso Medina
Julio, 1993**

DIRECTORIO DE LA COMISION NACIONAL DEL AGUA

DIRECTOR GENERAL

DR. FERNANDO J. GONZALEZ VILLARREAL

SUBDIRECTOR GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRICOLA

ING. MANUEL CONTIJOCH ESCONTRIA

GERENTE DE DISTRITOS DE RIEGO

DR. JOSE LUIS TRAVA MANZANILLA

SUBGERENTE DE RIEGO Y DRENAJE

ING. CARLOS BAROCIO FREGOSO

DIRECTORIO DEL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

PRESIDENTE

DR. FERNANDO J. GONZALEZ VILLARREAL

VOCAL EJECUTIVO

DR. ALVARO A. ALDAMA RODRIGUEZ

COORDINADOR DE TECNOLOGIA DE RIEGO Y DRENAJE

DR. LUIS RENDON PIMENTEL

SUBCOORDINADOR DE USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO

MC. EFREN PEÑA PEÑA

JEFE DEL PROYECTO ANEXOS TECNICOS

DR. CARLOS RODRIGUEZ ZAVALETA

REVISION DE LA PRIMERA EDICION

ING. LUIS OSCAR RAMIREZ ALCAZAR

DR. CARLOS RODRIGUEZ ZAVALETA

MC. EFREN PEÑA PEÑA

LIC. JAVIER SICILIA ZARDAIN

Adqs. 1993
Precio
Diseño
Fecha

Título

Anexo técnico, cuándo y cuánto regar

Diseño y Producción

Subcoordinación Editorial y Gráfica, IMTA

Colección Manuales

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1993

Reservados todos los derechos

Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos

Tel.: 19-40-00 ext. 131

Fax: (73) 19-39-46

Hecho en México

Made in Mexico

INDICE

INTRODUCCION	1
1 EL BALANCE HÍDRICO	2
2 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO QUE DEBERÁN CONSIDERARSE PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO	5
3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO QUE DEBERÁN CONSIDERARSE PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO	9
3.1 <u>Determinación de la capacidad de campo</u>	12
3.2 <u>Determinación del punto de marchitación permanente</u>	12
4 DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA	15
4.1 <u>Método del tanque evaporímetro</u>	15
4.1.1 Ejemplo	19
4.2 <u>Métodos basados en temperatura</u>	20
4.2.1 Método de Blaney-Cridle, versión del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos	20
4.2.1.1 Ejemplo	22
4.2.2 Método de Blaney-Cridle, versión FAO-24	24
4.2.2.1 Ejemplo	25
4.3 <u>Método basado en radiación (FAO-24)</u>	26
4.3.1 Ejemplo	28
4.4 <u>Método de Penman</u>	31
4.4.1 Método de Penman (versión propuesta por la FAO)	31
4.4.1.1 Ejemplo	36
4.4.2 Método de Penman-Monteith	39
4.4.2.1 Ejemplo	41
5 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO	45
5.1 <u>Ejemplo</u>	48
6 DETERMINACIÓN DE LA LLUVIA EFECTIVA	51
6.1 <u>Selección del año promedio de un registro historico de datos</u>	52
6.2 <u>Ejemplo</u>	53
7 DETERMINACIÓN DE LAS CONTRIBUCIONES DEL SUBSUELO	55
7.1 <u>Ejemplo</u>	56
8 CÁLCULOS DE LAS LAMINAS BRUTAS DE RIEGO EN LA PARCELA	57
8.1 <u>Ejemplo</u>	58

9	CÁLCULOS DE LAS LAMINAS DE LAVADO DE SALES	59
9.1	<u>Ejemplo</u>	62
10	DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE RIEGO	63
10.1	<u>Ejemplo del método analítico</u>	63
10.2	<u>Ejemplo del método gráfico</u>	65
11	DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE RIEGO UTILIZANDO INFORMACIÓN EN TIEMPO REAL	67
11.1	<u>Ejemplo</u>	67
12	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CON EL METODO DEL TACTO Y LA APARIENCIA	69
12.1	<u>Cálculo del estado de húmedad del suelo</u>	69
13	DETERMINACIÓN DE CUÁNDO Y CUÁNTO REGAR POR MEDIO DEL TENSIÓMETRO	75
13.1	<u>Preparación de los tensiómetros</u>	75
13.2	<u>Colocación del tensiómetro</u>	76
13.3	<u>Procedimiento de instalación</u>	78
13.4	<u>Ejemplo</u>	79
14	DETERMINACIÓN DE CUÁNDO Y CUÁNTO REGAR POR MEDIO DE LOS BLOQUES DE YESO	83
14.1	<u>Preparación de los bloques de yeso</u>	84
14.2	<u>Colocación de los bloques de yeso</u>	84
14.3	<u>Procedimiento de instalación</u>	85
14.4	<u>Ejemplo</u>	86
15	DETERMINACIÓN DE CUÁNDO Y CUÁNTO REGAR POR MEDIO DEL MÉTODO GRAVIMETRICO	91
15.1	<u>Equipo necesario</u>	91
15.2	<u>Procedimiento</u>	91
15.3	<u>Ejemplo</u>	92
16	BIBLIOGRAFÍA	95

INDICE DE LAMINAS

1	Ejemplo de los entornos para calcular evapotranspiración por el método del tanque evaporímetro (Doorenbos y Pruitt, 1984)	17
2	Coefficientes generales del cultivo y sus variaciones con diferentes etapas de desarrollo	46
3	Contribución de las aguas subterráneas a los requerimientos de riego, mm/día	55
4	Curvas de consumo y definición de fechas de riego	65
5	Método del tacto y del aspecto para determinar la humedad del suelo	71
6	Componentes del tensiómetro	77
7	Localización de los tensiómetros	77
8	Bloque de yeso y medidor de resistencia	84

INDICE DE CUADROS

1	Profundidad de raíces para varios cultivos	5
2	Fases críticas del cultivo en el que el estrés de humedad debe evitarse	6
3	Humedades disponibles para varios tipos de cultivos	10
4	Información del factor de abatimiento permisible en diferentes cultivos	11
5	Clasificación de los métodos para estimar evapotranspiración y sus variables requeridas	16
6	Valores del coeficiente k_p propuesto por el método del tanque evaporímetro tipo "A" (FAO-24)	18
7	Datos climatológicos para el año 1980 Torreón Coah	19
8	Coeficientes del cultivo, método de Blaney-Criddle (SCS)	21
9	Fotoperiodo o promedio mensual de las máximas horas luz diarias posibles para cada mes y diferentes latitudes	23
10	Radiación solar promedio para cielos sin nubes, despejados, R_{so} . Calculados de Budyko (1963)	30
11	Factor de ajuste (c) en el método de Penman modificado por la FAO	33
12	Coeficientes experimentales para la ecuación de Jensen (a_1 y b_1)	35
13	Coeficientes del cultivo (KC)	47

14	Promedio de lluvia efectiva mensual en relación con el promedio mensual de evapotranspiración y promedio mensual de lluvia	52
15	Eficiencia de aplicación para diferentes métodos de riego	57
16	Grados de tolerancia de los cultivos según las cosechas	60
17	Guía para estimar la humedad del suelo por medio del tacto y la apariencia del suelo	70
18	Capacidad de almacenamiento del suelo y balances mínimos permitidos para diferentes clases texturales y cultivos cuando se utilizan tensiómetros	75
19	Humedad disponible (cm. de agua en 30 cm de suelo) contra lecturas del tensiómetro	76
20	Capacidad de almacenamiento del suelo y balances mínimos permitidos para diferentes clases texturales y cultivos cuando se utilizan bloques de yeso	83
21	Humedad disponible (cm. de agua en 30 cm. de suelo) contra lecturas de los bloques de yeso	85

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Definición</u>	<u>Dimensiones</u>
Abat	Descenso o abatimiento permitido de la humedad aprovechable.	(ninguna)
As	Es la contribución del agua subterránea al requerimiento del cultivo.	(mm)
a, b	Factores de calibración que están en función de las humedades relativas mínimas (HRmin), de la relación entre las horas reales de luz diaria de las máximas posibles (n/N) y de la velocidad del viento durante el día (U_d).	(ninguna)
a_1, b_1	Coefficientes experimentales que dependen de la región climática.	(ninguna)
B	Constante de calibración del método de la radiación-FAO-24.	(ninguna)
Entorno	Distancia desde el evaporímetro hasta el área de cultivo.	(m)
E	Elevación del lugar.	(m)
Ep	Evaporación medida del tanque evaporímetro.	(mm/día)
ET	Evapotranspiración del cultivo.	(mm)
ET _r	Evapotranspiración del cultivo de referencia.	(mm/día)
e_a	Es la presión de vapor tomada a la temperatura a punto de rocío.	(mb)
e_s	Es la presión de vapor saturado a la temperatura promedio del aire.	(mb)
$e_s - e_a$	Déficit de presión de vapor.	(mb)
F	Suma de los f de los meses individuales durante la temporada del cultivo.	(ninguna)

f	Factor de consumo mensual del cultivo.	(ninguna)
f (U ₂)	Función del viento.	
HA	Humedad aprovechable.	(mm/mm)
HRmax	Es la máxima humedad relativa diaria.	(%)
HRmin	Es la mínima humedad relativa diaria.	(%)
HRprom	Humedad relativa promedio, (HR mínima + HR máxima)/2.	(%)
K	Coefficiente de crecimiento de Blaney-Criddle durante la temporada del cultivo.	(ninguna)
K _{ci}	Coefficiente mensual del cultivo de Blaney Criddle.	(ninguna)
Kt	Coefficiente de corrección por temperatura $kt = 0.0173 T - 0.314$.	(ninguna)
kp	Coefficiente del tanque evaporimetro que depende de la humedad relativa mínima, de la velocidad promedio del viento en 24 horas y del tipo de cobertura que se encuentra alrededor del tanque.	(ninguna)
L	Calor latente de vaporización.	(cal/gr)
La	Es la porción del agua almacenada al comienzo del periodo y que puede usarse para satisfacer los requerimientos de ET del cultivo.	(mm)
Lle	Lluvia efectiva o porción de la lluvia que es utilizada por la planta.	(mm)
Ln	Lámina neta de riego para un intervalo considerado.	(mm)
m	Número de meses durante la temporada del cultivo.	(ninguna)
N	Fotoperiodo o horas máximas de insolación diaria. Son las horas si no hubiera nubosidad.	(ninguna)

n	Horas reales de luz diarias. Estas pueden medirse con el heliógrafo de Campbell.	(horas)
P	Es el promedio de horas luz diarias durante un año divididas por el número de días que contiene el mes.	(ninguna)
Pb	Presión barométrica promedio.	(mb)
Pr	Profundidad de raíces.	(mm)
Pss	Peso del suelo seco.	(g)
P	Promedio mensual de horas luz diarias durante un año, fotoperiodo.	(ninguna)
R _{bo}	La radiación neta de onda larga en un día sin nubes $= \epsilon \sigma T_k^4$.	(cal/cm ²)
R _n	Energía de radiación neta.	(cal/(cm ² día))
Rn _{oc}	Radiación de onda corta.	(cal/(cm ² día))
Rn _{ol}	Radiación de onda larga.	(cal/(cm ² día))
R _s	Radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra en un plano horizontal.	(cal/(cm ² día))
Rso	Radiación solar total recibida en la superficie del suelo en un día sin nubes.	(cal/cm ²)
T	Temperatura promedio del aire.	(°C)
T _k	Temperatura promedio, $((T^4 \text{ max} + T^4 \text{ min})/2)$ donde las temperaturas deben expresarse en grados kelvin ($T_k = C + 273$).	(°K)
U ₂	Velocidad promedio del viento de un día a una altura de 2 m.	(Km/día)
U _d	Velocidad del viento durante el día a una altura de 2 m.	(m/s)
U _d / U _n	Es el cociente entre la velocidad del viento del día (7:00 AM - 7:00 PM) y de la noche (7:00 PM - 7:00 AM).	(ninguna)

U_z	Es la velocidad del viento a una altura diferente a 2 m.	(m/s)
V_t	Volúmen total del suelo.	(cm ³)
W	Contenido de agua con base en peso.	(%)
α	Albedo ($\alpha = 0.25$).	(ninguna)
ρ_a	Densidad aparente del suelo.	(g/cm ³)
Δ	Es la pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica.	(mbar/°C)
θ_{cc}	Contenido volumétrico de agua a capacidad de campo, (agua con base en peso).	(cm ³ /cm ³)
θ_{PMP}	Contenido volumétrico de agua a punto de marchitación permanente.	(cm ³ /cm ³)
γ	Constante psicrométrica.	(mbar/°C)
ϵ	Emisividad.	(ninguna)
σ	Constante de Stefan Boltzman, ($\sigma = 11.71 \times 10^{-8}$).	(cal/(cm ² °K ⁴ día)

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que afronta nuestro país es la sobreexplotación de los acuíferos, el aumento de los costos de energía, el ensalitramiento de tierras y el deterioro de la calidad de nuestras aguas. Muchos de estos problemas se deben al mal manejo del agua dentro de la parcela.

Estos problemas deben resolverse debido a que el desarrollo económico de nuestro país depende del manejo eficiente del recurso agua, y a que aproximadamente dos terceras partes del territorio se encuentran en las zonas áridas y semiáridas donde prevalece la escasez de este recurso. Bajo estas condiciones la estrategia nacional debe ser la de maximizar la producción por unidad de agua utilizada. Por ello es necesario que el agricultor mejore los métodos de riego (Cómo regar) y determine con precisión cuándo y cuánto regar.

El determinar cuándo y cuánto regar adecuadamente permite mejorar los rendimientos del cultivo, aumentar las ganancias y hacer un uso más eficiente del agua y de la energía. Regar adecuadamente significa evitar el riego en exceso y el riego deficiente. Cuando el riego se aplica en exceso, el agua se percola arrastrando los fertilizantes fuera de la zona de las raíces y aumentando los costos de fertilización y de bombeo: además, el oxígeno del suelo disminuye produciendo pudriciones en la raíz, y el proceso de ensalitramiento en suelos con mal drenaje se acelera. Cuando el riego no es suficiente la planta se estresa y el rendimiento disminuye.

Este anexo tiene como objetivo el de servir de instructivo para capacitar a técnicos y usuarios en el manejo del agua dentro de la parcela mediante la contestación de las preguntas de cuándo y cuánto regar y así apoyar el proceso de transferencia de los distritos de riego a los usuarios.

Los métodos que existen para contestar estas preguntas son:

1. Balance hídrico del sistema suelo-planta-clima-riego.
2. Mediciones de la humedad del suelo.
3. Mediciones en la planta
4. Uso de lisímetro.

Los métodos más utilizados para determinar el momento y la cantidad del riego para grandes extensiones de tierra es el método del balance hídrico y el método de medir la humedad del suelo, los cuales serán cubiertos en este anexo.

1 EL BALANCE HIDRICO

El método del balance hidrico consiste en observar los cambios de almacenamiento de agua en el suelo. El agua del suelo puede perderse por evaporación directa y por transpiración de la planta. A la combinación de evaporación y transpiración se les llama evapotranspiración o simplemente ET. La función del riego es reponer la ET en intervalos dados de tiempo.

La evapotranspiración dependerá de varios factores como son: horas de sol, viento, temperatura, tipo de cultivo, etapa de desarrollo, estado de la planta, tipo de suelo, nivel de humedad, etc. Se han desarrollado varias fórmulas y métodos para estimar la demanda del cultivo a partir de estos factores, presentándose ventajas y desventajas en cada fórmula o método utilizado.

El balance hidrico puede verse como si fuera una cuenta de cheques: si el agua es removida del suelo (ET) existirá un déficit, si se adiciona por lluvia o riego existirá un abono. El riego se aplica cuando el déficit llega a un nivel predeterminado.

La ecuación del balance hidrico es:

$$L_n = \sum (ET - L_{le} - A_s) - L_a \quad (1)$$

- L_n = Lámina neta de riego para un intervalo considerado (mm)
 ET = Evapotranspiración del cultivo (mm)
 L_{le} = Lluvia efectiva o porción de la lluvia que es utilizada por la planta (mm)
 A_s = Es la contribución del agua subterránea al requerimiento del cultivo (mm)
 L_a = Es la porción del agua almacenada al comienzo del periodo y que puede usarse para satisfacer los requerimientos de la ET del cultivo (mm)

NOTA: En este anexo las variables del balance hidrico se expresarán en términos de lámina. Para convertir de lámina a volumen es necesario multiplicar la lámina por el área que se requiere mojar. Ejemplo: Se requiere regar 1 ha con una lámina de 15 mm. (1 ha = 10,000 m²)

$$\text{Volumen} = .015 \text{ m} \times 10,000 \text{ m}^2 = 150 \text{ m}^3$$

150 m³ -- Volumen
1 m³ -- 1,000 litros

$$\text{Volumen} = \frac{150\text{m}^3 \times 1,000 \text{ litros}}{1 \text{ m}^3} = 150,000 \text{ litros (2)}$$

Los balances hídricos se calculan de dos formas. La primera es utilizando datos mensuales que representan el promedio de varios años de un registro climatológico. Los componentes del balance hídrico se presentan separadamente en los capítulos 4 al 10, explicándose cuánto regar en los capítulos 8 y 9, y cuándo regar en el 10. La segunda forma de cálculo es utilizando información obtenida en tiempos reales, es decir información que será utilizada para pronosticar cuánto y cuándo regar para el año en curso, (capítulo 11).

Los métodos para estimar cuándo y cuánto regar por medio de la medición de la humedad del suelo son: método del tacto y de la apariencia del suelo (capítulo 12), uso de tensiómetros (capítulo 13), uso de bloques de yeso (capítulo 14) y método gravimétrico (capítulo 15).

2 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO QUE DEBERAN CONSIDERARSE PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO

Una de las características fundamentales de la planta que hay que considerar para determinar cuándo y cuánto regar es la profundidad de las raíces. Esta determinará la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la cual cambiará a medida que las raíces crezcan. Su crecimiento dependerá del tipo de cultivo, variedad, fase de crecimiento, química del suelo, estructura del suelo, drenaje y manejo del agua.

La profundidad de las raíces representativa de varios cultivos se muestra en el cuadro 1. Observe que las hortalizas tienen un sistema radicular más superficial, lo que provoca una menor capacidad de las raíces para extraer agua.

Cuadro 1. Profundidad de las raíces en varios cultivos

Profundidad de raíces (m)	Cultivo
0.3-0.5	Repollo, apio, lechuga, cebolla, piña, papa, espinaca, hortalizas.
0.5-1.0	Plátano, frijol, remolacha, zanahoria, trébol, cacahuete, pimiento, soya, remolacha azucarera.
1.0-1.5	Cebada, cítricos, pepino, lino, granos pequeños, maíz, melón, girasol, camote, trigo.
1.5-2.0	Alfalfa, algodón, frutales deciduos, uva, girasol, sorgo, caña de azúcar.

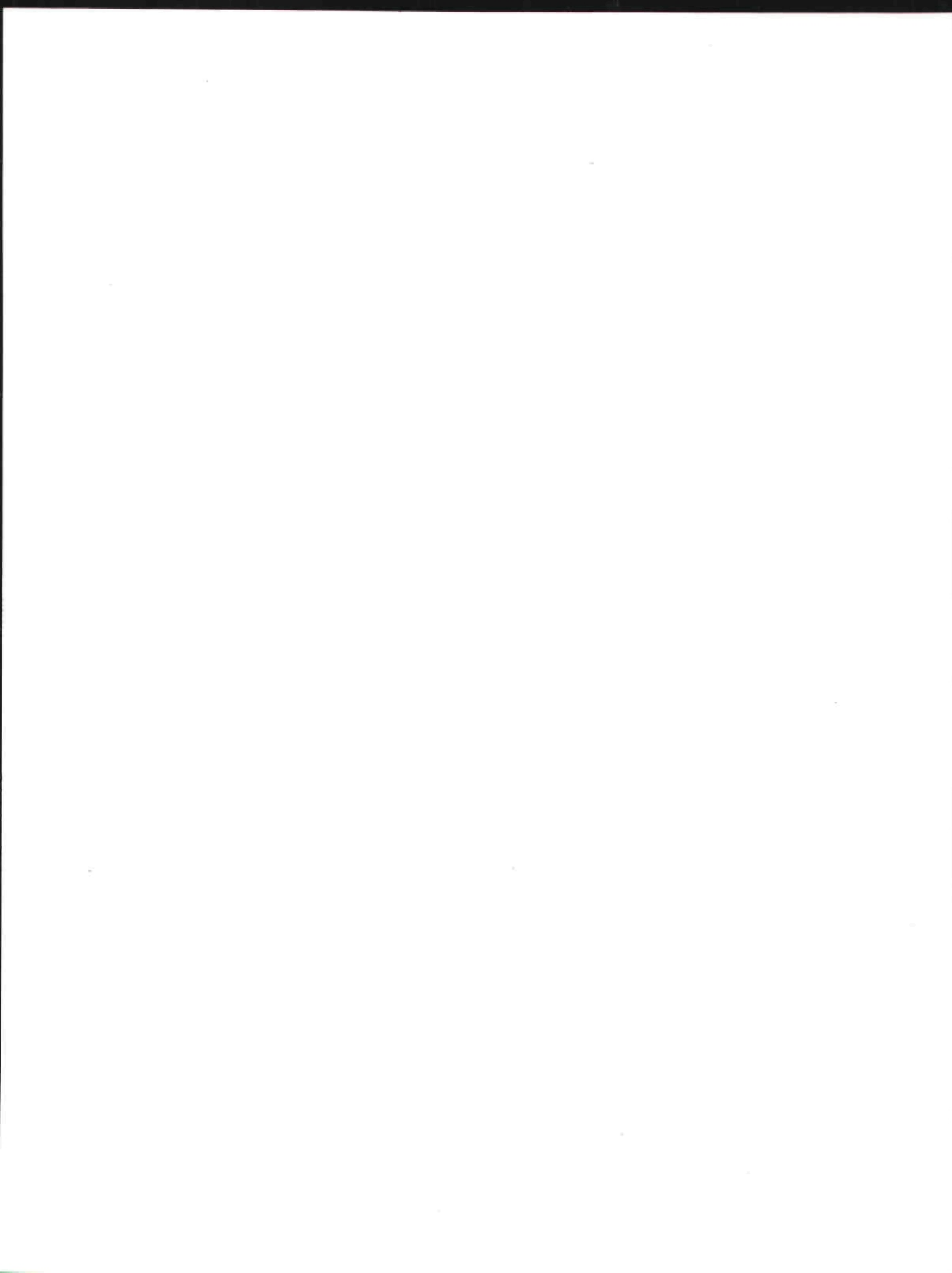
La sensibilidad a las deficiencias hídricas varía de acuerdo con las fases del crecimiento y de acuerdo con el cultivo. Las fases más críticas al contenido de humedad del suelo para varios cultivos se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Fases críticas del cultivo en el que el estrés de humedad debe evitarse

Cultivo	Fase crítica
Alfalfa (forraje)	Después del corte.
Alfalfa (semilla)	Al empezar la floración.
Algodón	Floración, formación del capullo, vegetativa temprana y llenado del fruto.
Arroz	Vegetativa, formación de la cabeza, y maduración.
Brocoli	Formación de la cabeza y durante su alargamiento.
Cacahuete	Floración, desarrollo de la semilla, establecimiento y vegetativa.
Café	Floración y desarrollo del fruto. Un estrés antes de la floración es deseable.
Caña de azúcar	Vegetativa y formación del rendimiento.
Cebada	Amacollamiento temprano.
Cebolla	Periodo vegetativo y alargamiento del bulbo.
Cebolla, semilla	Floración.
Cítricos	Floración, establecimiento del fruto, alargamiento del fruto. La caída de frutos débiles se puede controlar manteniendo altos contenidos de humedad.
Coliflor	Requiere de riegos frecuentes todo el tiempo.
Durazno	Periodo de rápido crecimiento del fruto antes de la maduración.
Fresa	Desarrollo del fruto en la maduración.
Granos pequeños	De embuchamiento a espigamiento.
Lechuga	Requiere el suelo húmedo, particularmente antes de la cosecha.
Limón	Floración y establecimiento del fruto, alargamiento del fruto. Una muy buena floración puede inducirse estresando el suelo antes de la floración.

Continuación del cuadro 2

Maíz	Polinización, antes del espigamiento y llenado del grano.
Mango	Floración. Algo de estrés de humedad antes de la floración es deseable.
Naranja	Floración, establecimiento del fruto, alargamiento del fruto.
Papa	Vegetativa, iniciación del tubérculo, formación del fruto y maduración.
Pepino	Todos los periodos, particularmente floración.
Piña	Vegetativa.
Plátano	Todos los periodos de crecimiento.
Repollo	Formación de la cabeza y, durante su alargamiento, maduración.
Sandía	Vegetativa, floración y formación del fruto.
Sorgo	Vegetativa, floración y formación del fruto.
Soya	Vegetativa, floración y formación del fruto.
Tomate	Floración y formación del fruto.
Toronja	Floración, establecimiento y alargamiento del fruto.
Trigo	Periodo vegetativo, florecimiento y llenado del fruto.
Uva	Periodo vegetativo, florecimiento y llenado del fruto.



3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO QUE DEBERÁN CONSIDERARSE PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO

La planta no aprovecha toda el agua que se almacena en el suelo, la que si aprovecha se encuentra entre un límite máximo llamado capacidad de campo (CC) y un límite inferior llamado punto de marchitez permanente (PMP), sus definiciones son:

Capacidad de campo es el contenido de humedad del suelo una vez que el exceso de agua es drenada naturalmente por las fuerzas de gravedad.

Punto de marchitez permanente es el contenido de humedad al que la planta no puede acceder para extraer agua del suelo y sobrevivir.

Para fines prácticos el contenido de humedad se ha relacionado con la tensión con la que las partículas del suelo retienen agua. La tensión dependerá del tamaño de las partículas (textura) y de su arreglo (estructura). Considerando la tensión, la CC y el PMP se han definido:

Capacidad de campo es el contenido volumétrico de agua que retiene a una tensión de 1/3 de atm.

Punto de marchitez permanente es el contenido volumétrico de agua que se retiene a una tensión de 15 atm.

La humedad aprovechable es el agua que se encuentra entre estos dos límites dentro de la profundidad de las raíces. La formula es la siguiente:

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Pr \quad (3)$$

donde:

- HA = Humedad aprovechable (mm).
- θ_{CC} = Contenido volumétrico de agua a capacidad de campo, (agua con base en peso).
- θ_{PMP} = Contenido volumétrico de agua a punto de marchitez permanente (agua con base en peso).
- Pr = Profundidad de las raíces (mm).

El contenido volumétrico de agua se determina así:

$$\theta_{CC} = W \rho_a \quad (4)$$

donde:

W = Contenido de agua con base en peso (%).

ρ_a = Densidad aparente del suelo (gr/cm^3).

El contenido de agua con base en peso se puede determinar directamente utilizando un barrena, tomando la muestra para llevarla a secar a un horno y utilizando la siguiente relación:

$$W = \frac{\text{Peso del suelo húmedo} - \text{Peso del suelo seco}}{\text{Peso del suelo seco}} \quad (5)$$

La densidad aparente se calcula obteniendo una muestra del suelo, midiendo su volumen (V_t) para posteriormente secarlo y pesarlo (P_{ss}), la relación que se utiliza es:

$$\rho_a = \frac{P_{ss}}{V_t} \quad (6)$$

Los valores de humedad disponible para diferentes tipos de suelo se muestran en el cuadro 3. Es importante que el lector entienda que estos valores promedio son estimativos, que se basan en la textura del suelo cuya estructura no está considerada.

Cuadro 3. Humedades aprovechables para varios tipos de suelos

Textura del suelo	Humedad aprovechable (mm por metro).
Arenas gruesas-gravas	40-70
Arenas finas- arenoso franco	70-100
Franco arenoso	120-160
Franco	180-220
Franco limoso	230-270
Franco arcilloso , arcillo-arenoso, arcillas pesadas	160-200

De acuerdo con la definición, si se aplica más agua de la que el suelo puede retener, el exceso de agua se drenará a mayor profundidad y quedará lejos del alcance de las raíces. Si se aplica muy poca agua es probable que la planta no pueda extraerla agua óptimamente causando estrés y reducción en su producción.

El grado de estrés y la baja productividad dependerán del cultivo, ya que las plantas tienen diferentes habilidades para realizar esfuerzos y extraer la humedad aprovechable del suelo. El descenso o abatimientos permitidos de la humedad aprovechable para varios cultivos se presenta en el cuadro 4. (Doorenbos y Pruitt, 1984).

Cuadro 4. Información del factor de abatimiento permisible en diferentes cultivos (Abat)

Cultivo	Factor de abatimiento o (%)
Fresa.	15
Apio, cacao, espinaca	20
Cebolla, papa	25
Melón, plátano, tabaco temprano, trébol, uva, zanahoria	35
Alfalfa	55
Tomate	40
Repollo, frijol	45
Frutales deciduos, maíz para silo, pasto, pepino, piña, soya	50
Sorgo, trigo	55
Granos de invierno, granos pequeños, maíz	60
Algodón, caña de azúcar, camote, tabaco tardío	65
Trigo, maduración	90

La lámina de riego requerida por el cultivo se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_n = HD * Pr * Abat \quad (7)$$

Abat = Descenso o abatimiento permitido de la humedad aprovechable.

Ejemplo:

Calcular la lámina neta de riego que es necesario aplicar a una ha de tierra cultivada de maíz en un suelo franco.

INFORMACIÓN

HA = 200 mm/m
Pr = 1.25 m (cuadro 1)
Abat = 60% (cuadro 2)

Calculo:

$Ln = HA \ Pr \ Abat$
 $= 200 \text{ mm/m} * 1.25 \text{ m} * 0.60$
 $= 150 \text{ mm}$

3.1 Determinación de la capacidad de campo.

Para determinar la capacidad de campo observe los siguientes pasos:

1. Prepare un cuadro en el terreno de 3 x 3 m, levantando bordos sus orillas.
2. Moje el cuadro hasta que alcance saturación.
3. Cubra el cuadro con plásticos para evitar la evaporación.
3. Utilice una barrena para muestrear a profundidades de 15, 45, 75 y 105 cm. Los muestreos se deben hacer a intervalos de 4 a 6 horas en suelos ligeros y de 12 a 24 horas en suelos de textura pesada.
4. Inmediatamente después de hacer un muestreo determine el contenido de humedad con base en peso (fórmula 5).
5. Determine la densidad aparente del área muestreada (fórmula 6).
6. Determine el contenido de humedad del suelo con base en volumen (fórmula 7).
7. Cuando el contenido de humedad no cambie con respecto al tiempo, el suelo ha llegado a su capacidad de campo.

Nota:

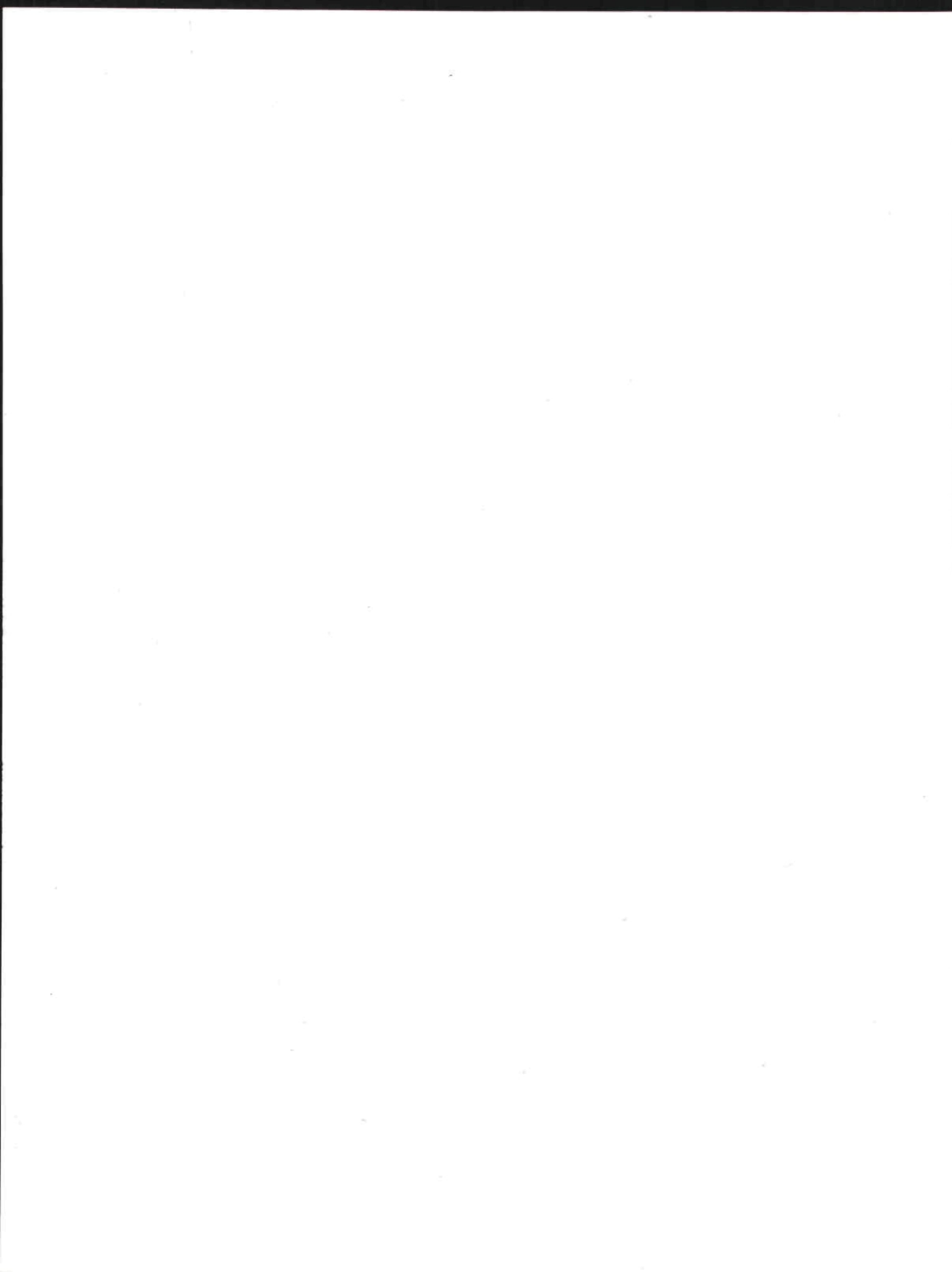
La capacidad de campo también puede estimarse en el laboratorio por el método de las ollas de presión.

3.2 Determinación del punto de marchitez permanente.

El contenido de humedad en el punto de marchitez permanente no sólo depende de la textura del suelo y de su estructura, sino que también de la demanda atmosférica, de la variedad del cultivo, de la profundidad del suelo y de la distribución radicular. En

algunas ocasiones el punto de marchitez permanente se determina como la mitad del valor de la capacidad de campo.

Se recomienda determinar el punto de marchitez permanente mediante muestreos con barrena en las áreas en que el cultivo ha sufrido una severa sequía.



4 DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO DE REFERENCIA

Para calcular la evapotranspiración de un cultivo es necesario calcular primeramente la evapotranspiración del cultivo de referencia. Dichos cultivos normalmente son el pasto y la alfalfa. En este anexo, siguiendo los lineamientos de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977), se considera al pasto como el cultivo de referencia. La ET del pasto se define como la evapotranspiración de una superficie extensiva que crece vigorosamente, con una altura uniforme de 8 a 15 cm de alto, que sombrea completamente el suelo y que no tiene deficiencias hídricas.

Existen más de 80 métodos para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia. La elección del método dependerá de la información climática disponible y de la precisión que se requiere para determinar las necesidades de agua de los cultivos. En México, el método más utilizado es el de Blaney-Criddle (versión del Soil Conservation Service) ya que requiere de muy poca información climática y porque se desarrolló para las zonas áridas (aproximadamente dos terceras partes del territorio mexicano se encuentran dentro de estas zonas). El método más aceptado por la comunidad internacional es el Penman-Monteith, sin embargo, dicho método requiere de mucha información climática que es difícil de obtener en la mayoría de las estaciones climáticas del mundo. En esta sección se hará una revisión de los métodos recomendados internacionalmente. Se sugiere que el lector escoja el método de acuerdo con la disponibilidad de información climática. La precisión de las estimaciones de los métodos predictores de la ET ha sido comparada contra lecturas tomadas en lisímetros en varias regiones, por varios científicos de todo el mundo, lo que ha resultado en la clasificación de los métodos de acuerdo con su precisión (ver cuadro 5, Jensen et al, 1990).

En este anexo se presentarán 6 de los métodos más precisos que han sido comunmente utilizados.

4.1. Método del evaporímetro

El método del tanque evaporímetro ha sido usado extensivamente en las áreas de riego, cuando no se tiene suficiente información climática. Este método debe utilizarse sólo cuando esté calibrado apropiadamente.

El método del tanque evaporímetro puede estimar la evapotranspiración de un cultivo para periodos moderados de tiempo (aproximadamente de 10 días). Existen varios tipos de tanques evaporímetros en el mundo. El más conocido es el tanque evaporímetro tipo "A". Este tanque es circular, tiene un diámetro

Cuadro 5. Clasificación de los métodos para estimar evapotranspiración y sus variables requeridas

Método	Posición Zonas Áridas	Posición Zonas Húmedas	Posición General	Variables requeridas
Penman-Monteith	1	1	1	Horas luz actuales Latitud y mes Albedo Temperatura promedio Temperatura punto de rocío Humedad relativa Elevación Velocidad del viento (día) Velocidad del viento (noche)
Radiación (FAO-24)	2	3	2	Velocidad del viento Temperatura promedio del aire Elevación Humedad relativa promedio Velocidad del viento (día) Horas luz actuales Latitud y mes
Blaney-Criddle (FAO-24)	3	2	3	Temperatura promedio Latitud y mes Horas de luz actuales Velocidad del viento (día) Humedad relativa mínima
Penman (FAO-24)	4	6	4	Horas luz actuales Latitud y mes Albedo Temperatura promedio Temperatura punto de rocío Humedad relativa promedio Elevación Velocidad del viento (día) Velocidad del viento (noche) Altura de las mediciones
Tanque evaporímetro	5	5	5	Evaporación Horas de luz actuales Velocidad del viento (día) Humedad relativa promedio
Blaney-Criddle (SCS)	6	4	6	Temperatura promedio Latitud y mes

de 121 cm, una profundidad de 25.5 cm y el nivel de agua se mantiene 6 a 8 cm debajo del borde. El tanque está construido de hierro galvanizado y está montado 15 cm arriba de la superficie del suelo sobre una tarima de madera. Los cultivos que se encuentran

alrededor del tanque evaporímetro no deberán ser mas altos de 1 m. La ET del cultivo de referencia se calcula con la siguiente fórmula:

$$ET_r = K_p E_p \quad (8)$$

donde:

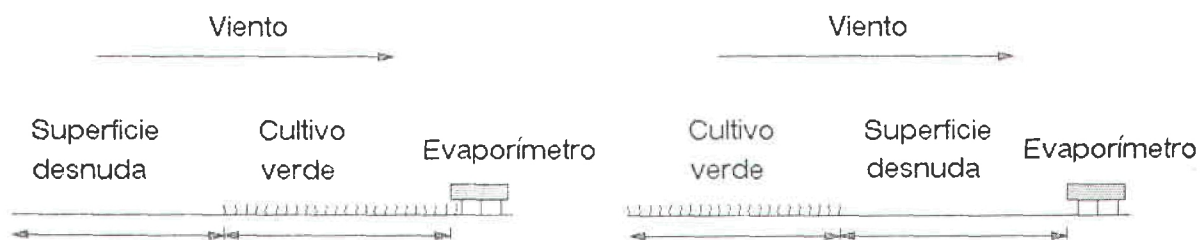
ET_r = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).

k_p = Coeficiente del tanque evaporímetro que depende de la humedad relativa mínima, de la velocidad promedio del viento en 24 hrs y del tipo de cobertura que se encuentra alrededor del tanque.

E_p = Evaporación medida del tanque evaporímetro, (mm/día).

El coeficiente k_p se puede obtener del cuadro 6 para dos condiciones: cuando el tanque está rodeado de pasto o cuando el tanque está rodeado con suelo desnudo (ver lámina 1).

Lámina 1. Ejemplo de los entornos para calcular evapotranspiración por el método del tanque evaporímetro (Doorenbos y Pruitt, 1984)



Los valores del cuadro 6 se pueden estimar usando las relaciones propuestas por Allen y Pruitt (1991). La primera, cuando el tanque está rodeado de pasto, y es:

$$k_p = 0.108 - 0.000331 U_2 + 0.0422 \ln(\text{entorno}) + 0.1434 \ln(\text{HR prom}) - 0.000631 [\ln(\text{entorno})]^2 \ln(\text{HR prom}) \quad (9)$$

donde:

entorno = Distancia desde el evaporímetro hasta el área de cultivo.

HRprom = Humedad relativa promedio, $(\text{HR mínima} + \text{HR máxima})/2$.

U_2 = Velocidad diaria promedio del viento a 2 m de altura (km/día).

La segunda, cuando el tanque evaporimetro está rodeado de suelo desnudo, es:

$$\begin{aligned}
 k_p = & 0.61 - 0.00341 \text{ HR promedio} - 0.00000187 U_2 \text{ HRpromedio} \\
 & - 0.000000111 U_2 (\text{entorno}) + 0.0000378 U_2 \ln(\text{entorno}) \quad (10) \\
 & - 0.0000332 U_2 \ln(U_2) - 0.0106 \ln(U_2) \ln(\text{entorno}) \\
 & + 0.00063 [\ln(\text{entorno})]^2 \ln(U_2)
 \end{aligned}$$

Cuadro 6. Valores del coeficiente k_p propuestos por el método del tanque evaporimetro tipo "A" FAO-24 (Doorenbos y Pruitt, 1977)

Viento (km/día)	Entorno (m)	Para el tanque evaporimetro tipo "A", cuando el tanque está rodeado de pasto			Para el tanque evaporimetro tipo "A", cuando el tanque está rodeado de suelo desnudo		
		HR promedio			HR promedio		
		30%	57%	84%	30%	57%	84%
84	1	0.55	0.65	0.75	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	0.50	0.60	0.70
260	1	0.50	0.50	0.65	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	0.50	0.60	0.65
	1000	0.70	0.80	0.80	0.45	0.55	0.60
465	1	0.45	0.50	0.60	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	0.45	0.50	0.60
	1000	0.65	0.70	.75	0.40	0.45	0.55
700	1	0.40	0.45	0.50	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	0.40	0.45	0.50
	1000	0.55	0.60	0.65	0.35	0.40	0.45

4.1.1. Ejemplo

Calcular la ET del cultivo de referencia para el mes de mayo en la ciudad de Torreón, Coah (Latitud: 25° 33' N. Elevación sobre el nivel del mar: 1130 m), dada la siguiente información:

Cuadro 7. Datos climatológicos para el año 1980, Torreón, Coah.

Mes	Temp min °C	Temp max °C	Precip mm	Evapor mm	Humedad Relativa %	Vel viento m/s	Horas luz hr
Ene	3.4	22.6	5.5	105.5	50.4	0.6	7.6
Feb	5.3	23.6	11.2	135.2	54.7	2.6	8.4
Mar	9.3	28.8	0.0	221.9	39.1	8.1	7.1
Abr	10.4	30.2	0.0	272.3	42.0	8.6	8.9
May	20.0	34.6	24.9	312.7	52.4	6.6	9.0
Jun	18.7	32.3	87.6	227.4	61.5	7.5	8.0
Jul	18.1	32.8	11.2	209.0	60.1	5.9	9.5
Agos	12.7	27.6	7.1	151.3	60.9	5.3	7.5
Sep	4.2	21.2	11.0	102.3	63.3	5.3	8.0
Oct	5.1	22.4	1.1	88.9	63.0	5.2	6.8
Nov	4.2	17.9	61.2	69.6	72.3	3.8	5.7
Dic	7.9	23.3	1.1	133.6	55.3	6.4	7.3

SOLUCION

Información requerida:

Evaporación, Evap = 312.7 mm

Velocidad del viento = 6.6 m/seg

Humedad relativa promedio, HR prom = 52.4%

Entorno = tanque rodeado con un radio de 1,000 m de áreas verdes.

Cálculos:

Evap tanque = 312.7 mm / 31 días = 10.08 mm/día

Velocidad del viento (U_2) = 6.6 m/s = 342 km/día

HR promedio = 52.4%

K_p = 0.75 (cuadro 6, interpolando).

Si se utiliza fórmula para calcular k_p ,

$$\begin{aligned} k_p &= 0.108 - 0.000331 (342) + 0.0422 \ln(1000) \\ &+ 0.1434 \ln(52.4) - 0.000631 [\ln(1000)]^2 \ln(52.4) \quad (11) \\ &= 0.735 \end{aligned}$$

Calculando la evapotranspiración del cultivo de referencia:

$$ET_r = K_p (\text{Evap}) = 0.735 (10.08 \text{ mm/día}) = 7.4 \text{ mm/día} \quad (12)$$

4.2. Métodos basados en temperatura

4.2.1. Método de Blaney-Criddle, versión del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos.

El método de Blaney-Criddle fue desarrollado con base en mediciones de campo tomadas en la parte occidental de los Estados Unidos. Blaney y Morin (1942) desarrollaron primeramente este método que después modificó Blaney y Criddle (1950). La primera revisión fue la técnica No. 21 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-SCS, 1970). El punto básico fue que la ET varía directamente con la suma de los productos de la temperatura promedio del aire y el promedio mensual de las horas diarias de luz, para un cultivo que crece vigorosamente con una humedad adecuada. La fórmula es la siguiente:

$$ET_r = \sum_{i=1}^m k_{t_i} k_{c_i} f_i = KF \quad (13)$$

donde:

- ET_r = Evapotranspiración potencial del cultivo (pulgadas).
- m = Número de meses durante la temporada del cultivo.
- K = Coeficiente de crecimiento de Blaney-Criddle durante la temporada del cultivo.
- k_c = Coeficiente mensual del cultivo (cuadro 8).
- k_t = Coeficiente de corrección por temperatura = 0.0173 T - 0.314.
- F = Suma de los f de los meses individuales durante la temporada del cultivo.
- f = Factor de consumo mensual del cultivo.

Cuadro 8. Coeficientes del cultivo para el método de Blaney-Criddle-SCS

Cultivo	Periodo de la temporada del cultivo	Coeficiente del uso consuntivo K	Máximo mensual K
Alfalfa	Entre heladas	0.8 a 0.9	0.95 a 1.25
Plátano	Todo el año	0.8 a 1.0	
Frijol	3 meses	0.6 a 0.7	0.75 a 0.85
Cocoa	Todo el año	0.7 a 0.8	
Café	Todo el año	0.7 a 0.8	
Maíz	4 meses	0.75 a 0.85	0.80 a 1.20
Algodón	7 meses	0.6 a 0.70	0.75 a 1.10
Granos pequeños	3 meses	0.75 a 0.85	
Granos, sorgo	4 a 5 meses	0.70 a 0.8	
Oleaginosas	3 a 5 meses	0.65 a 0.75	
<u>Cultivos frutales:</u>			
Aguacate	Todo el año	0.50 a 0.55	
Toronja	Todo el año	0.55 a 0.65	
Cítricos	Todo el año	0.45 a 0.55	0.65 a 0.75
Nueces	Entre heladas	0.60 a 0.70	
Deciduos	Entre heladas	0.60 a 0.70	0.70 a 0.95
<u>Pasturas:</u>			
Pasto	Entre heladas	0.75 a 0.85	0.85 a 1.15
Trébol	Entre heladas	0.80 a 0.85	
Papa	3 a 5 meses	0.65 a 0.75	0.85 a 1.00
Arroz	3 a 5 meses	1.00 a 1.10	1.00 a 1.30
Soya	140 días	0.65 a 0.70	
Remolacha	6 meses	0.65 a 0.75	0.85 a 1.00
Caña	Todo el año	0.80 a 0.90	
Tabaco	4 meses	0.70 a 0.80	
Tomate	4 meses	0.65 a 0.75	
Legumbres	2 a 4 meses	0.60 a 0.70	
Uva y Kiwi	5 a 7 meses	0.50 a 0.60	

FUENTE: "Irrigation Water Requirements", technical release No. 21. Servicio de Conservación de Suelos. E. U. A.

Originalmente el factor de consumo mensual del cultivo r , se definió como,

$$f = \frac{T p}{100} \quad (14)$$

donde:

p = Promedio mensual de horas luz diarias durante un año, Fotoperiodo. (cuadro 9).

T = Temperatura promedio del aire, ($^{\circ}\text{F}$).

Los coeficientes del cuadro 8 no deben utilizarse para métodos diferentes al del SCS de Blaney-Criddle. Sobre este cuadro es importante señalar los siguientes puntos. 1) La longitud del periodo depende de la variedad y tiempo del año en el que crece el cultivo. 2) Los valores más bajos de K son para usarse en las zonas húmedas, y los valores altos para las zonas áridas. 3) El valor máximo mensual de K depende de la fase de cultivo. El método del SCS de Blaney-Criddle aumentó el grado de precisión sin aumentar el número de variables requeridas.

4.2.1.1. Ejemplo

Calcule la evapotranspiración del cultivo de referencia para el mes de mayo por el método de Blaney-Criddle versión del SCS, utilizando la información del ejemplo 4.1.1.

SOLUCION

Información requerida:

Latitud = $25^{\circ} 33' \text{ N}$

Temperatura promedio = $(20+34.6)/2 = 27.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Factor del cultivo, $K_c = 1.15$ (cuadro 8, pasto en climas áridos)

Cálculos:

$$T \text{ }^{\circ}\text{F} = 1.8 * 27.3 + 32 = 81.14$$

$$k_t = 0.0173 T - 0.314, \text{ T en } ^{\circ}\text{F}$$

$$k_t = 0.0173 (81.14) - 0.314, \text{ T en } ^{\circ}\text{F}$$

$$K_t = 1.09$$

$$p = 9.33 \text{ (cuadro 9, con latitud y mes)}$$

Cuadro 9. Fotoperiodo o promedio mensuales de las máximas horas diarias de luz posibles para cada mes y diferentes latitudes

Lat N	Ene	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oc	Nov	Dic
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.60	8.23	8.42	8.07	8.30
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
14	7.98	7.39	8.43	8.43	8.94	8.77	9.00	8.80	8.27	8.27	7.79	7.93
16	7.91	7.35	8.42	8.47	9.01	8.85	9.08	8.85	8.28	8.23	7.72	7.83
18	7.83	7.31	8.41	8.50	9.08	8.93	9.16	8.90	8.29	8.20	7.65	7.74
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
22	7.67	7.21	8.40	8.56	9.22	9.11	9.32	9.01	8.30	8.13	7.51	7.56
24	7.58	7.16	8.39	8.60	9.30	9.19	9.40	9.06	8.31	8.10	7.44	7.47
26	7.49	7.12	8.38	8.64	9.37	9.29	9.49	9.11	8.32	8.06	7.36	7.37
28	7.40	7.07	8.37	8.67	9.46	9.39	9.58	9.17	8.32	8.02	7.28	7.27
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
32	7.20	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.52
46	6.34	6.50	8.29	9.12	10.39	10.54	10.64	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.99	10.11	8.46	7.45	6.10	6.65
56	5.30	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.40	8.53	7.21	5.54	4.89
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.57	6.98	5.04	4.22
56	5.30	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.40	8.53	7.21	5.54	4.89
58	5.02	5.84	8.14	9.59	11.50	12.00	11.96	10.52	8.53	7.06	5.30	4.54
60	4.70	5.67	8.11	9.69	11.78	12.41	12.31	10.68	8.54	6.95	5.02	4.14
Lat S												
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.68	7.76	8.51	8.15	8.34	8.05	8.33	8.38	8.19	8.56	8.37	8.68
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.18	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.88
15	9.05	7.98	8.55	8.02	8.02	7.65	7.95	8.15	8.15	8.68	8.70	9.10
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.87	9.33
25	9.46	8.21	8.60	7.84	7.66	7.20	7.54	7.90	8.11	8.86	9.04	9.58
30	9.70	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	8.97	9.24	9.85
32	9.81	8.39	8.63	7.69	7.36	6.85	7.21	7.70	8.06	9.01	9.33	9.96
34	9.92	8.45	8.64	7.64	7.27	6.74	7.10	7.63	8.05	9.06	9.42	10.08
36	10.03	8.51	8.65	7.59	7.18	6.62	6.99	7.56	8.04	9.11	9.51	10.21
38	10.15	8.57	8.66	7.54	7.08	6.50	6.87	7.49	8.03	9.16	9.61	10.34
40	10.27	8.63	8.67	7.49	6.97	6.37	6.76	7.41	8.02	9.21	9.71	10.49

Continuación cuadro 9

42	10.40	8.70	8.68	7.44	6.85	6.23	6.64	7.33	8.01	9.26	9.82	10.64
44	10.54	8.78	8.69	7.38	6.73	6.08	6.51	7.25	7.99	9.31	9.94	10.80
46	10.69	8.86	8.70	7.32	6.61	5.92	6.37	7.16	7.96	9.37	10.07	1.97

Evapotranspiración mensual del cultivo:

$$\begin{aligned}
 ET_r &= K_t K_c f = K_t K_c \frac{p T}{100} \\
 &= 1.09 * 1.15 * \frac{(9.33 * 81.14)}{100} = 9.49 \text{ pulgadas/mes} \quad (15) \\
 &= 7.8 \text{ mm/día}
 \end{aligned}$$

4.2.2. Método de Blaney-Criddle, versión FAO-24

La modificación de la FAO se basó en información tomada en 20 lugares con diversas condiciones climatológicas. El método de Blaney-Criddle modificado por la FAO es el más conocido y difundido en el mundo. La información requerida para estimar la ET incluye temperaturas mensuales promedio ($^{\circ}\text{C}$) y el porcentaje promedio de horas de luz diarias durante un año. Para calibrar la evapotranspiración en condiciones locales se requieren datos de humedades relativas mínimas, la relación entre las horas diarias de luz y las máximas posibles, y la velocidad del viento. La ecuación de Blaney-Criddle (Doorenbos y Pruitt, 1984) tiene la siguiente forma:

$$ET_r = a + b [P (0.46T + 8.13)] \quad (16)$$

donde:

- a, b = Factores de calibración que están en función de las humedades relativas mínimas (HR_{min}), de la relación entre las horas reales de luz diarias y las máximas posibles (n/N) y de la velocidad del viento durante el día (U_d).
- P = Es el promedio de horas de luz diarias durante un año divididas por el número de días que contiene el mes.
- T = Temperatura promedio del aire, ($^{\circ}\text{C}$).
- n = Horas reales de luz diarias. Estas pueden medirse con el heliógrafo de Campbell.
- N = Fotoperiodo u horas máximas de insolación diaria. Son las horas si no hubiera nubosidad, (cuadro 9).

La relación n/N puede calcularse cualitativamente de la siguiente manera:

- $n/N > 0.8$: Insolación fuerte casi todo el día.
- $n/N = 0.6$ a 0.8 : En cielos totalmente cubiertos durante 40% de las horas luz del día. También cuando el cielo está parcialmente cubierto durante el 70% del día.

El coeficiente a puede calcularse de acuerdo con la relación propuesta por Allen y Pruitt (1986):

$$a = 0.0043 \text{ HR min} - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (17)$$

El coeficiente b puede calcularse de acuerdo con la relación propuesta por Cuenca (1989):

$$\begin{aligned} b = & 0.82 - 0.41 \cdot 10^{-2} (\text{HR min}) + 1.07 \left(\frac{n}{N} \right) \\ & + 0.066 (U_d) - 0.60 \cdot 10^{-2} (\text{HR min}) \left(\frac{n}{N} \right) \\ & - 0.60 \cdot 10^{-3} (\text{HR min}) (U_d) \end{aligned} \quad (18)$$

donde:

U_d = Velocidad del viento durante el día a una altura de 2 m (m/s).

4.2.2.1. Ejemplo

Calcular la evapotranspiración mensual del cultivo de referencia para el mes de mayo en la ciudad de Torreón por el método de Blaney-Criddle versión de la FAO, tomando la información del ejemplo 4.1.1.

SOLUCION:

Información requerida:

Temperatura promedio = 27.3
Latitud y mes = lat $25^{\circ} 33'$, mayo
Horas de luz actuales = 9.0
Velocidad del viento (durante el día) = 6.6 m/seg
Humedad relativa mínima = No disponible

Cálculos:

$$P = 9.3/31 = 0.3 \text{ (cuadro 9, lat } 25^\circ, \text{ mayo)}$$

$$f = P(0.46T + 8.13) = 0.3 (0.46(27.3) + 8.13) = 6.2$$

Horas luz máximas posibles, $N = 9.33$ (cuadro 9).

Cociente entre horas luz actuales y máximas posibles

$$n/N = 9/9.33 = 0.96.$$

El dato de humedad relativa mínima no fue proporcionado, pero se asume que sea de 32.65%.

Factores de calibración a y b:

$$\begin{aligned} a &= 0.0043 \text{ HR min} - \frac{n}{N} - 1.41 \\ &= 0.0043 * 32.65 - 0.96 - 1.41 \\ &= -2.230 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} b &= 0.82 - 0.41 * 10^{-2} (32.65) + 1.07 (0.96) \\ &\quad + 0.066(6.6) - 0.60 * 10^{-2} (32.65) (0.96) \\ &\quad - 0.60 * 10^{-3} (32.65) (6.6) \\ &= 1.8315 \end{aligned} \quad (20)$$

La evapotranspiración del cultivo de referencia se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} ET_r &= a + b P [0.46 T + 8.13] \\ &= -2.230 + 1.8315 * 0.3 [0.46 (27.3) + 8.13] \\ &= 9.14 \text{ mm/día} \end{aligned} \quad (21)$$

4.3. Método basado en radiación (FAO-24)

La evapotranspiración del cultivo de referencia se calcula mediante la siguiente relación:

$$ET_r = B \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\left(\frac{L}{10}\right)} \right] - 0.3 \quad (22)$$

donde:

- ETr = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).
B = Constante de calibración.
R_s = Radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra en un plano horizontal, (cal/(cm² día)).
L = Calor latente de vaporización, (cal/gr).
Δ = Es la pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica (mbar/°C).
γ = Constante psicrométrica (mbar/°C).

La pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica Δ, (mbar/°C), se calcula de acuerdo con una relación de Bosen (1960)

$$\Delta = 2.0 (0.00738 * T_{prom} + 0.8072)^7 - 0.00116 \quad (23)$$

donde:

T = Temperatura promedio en °C

La constante psicrométrica, γ, (mbar/°C), se calcula de acuerdo con una expresión propuesta por Brunt (1952):

$$\gamma = \frac{0.386 * P_b}{L} \quad (24)$$

donde:

P_b = Presión barométrica promedio, (mb).

L = Calor latente de vaporización, (cal/gr).

La presión barométrica se puede calcular con la elevación en metros, E, del lugar. La relación es la siguiente:

$$P_b = 1013 - 0.1055 * E \quad (25)$$

El calor latente de vaporización puede calcularse de acuerdo con Brunt (1952)

$$L = 595 - 0.51 T_{prom} \quad (26)$$

El otro factor de ajuste por temperatura se calcula:

$$\left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) = 1 - \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \quad (27)$$

La constante B se puede calcular de acuerdo con la relación propuesta por Frevert (1983), ésta es

$$B = 1.066 - 0.13 \cdot 10^{-2} \text{ HR prom} + 0.045 \text{ Udia} - 0.20 \cdot 10^{-3} (\text{HR prom Udia}) - 0.315 \cdot 10^{-4} (\text{HR prom})^2 - 0.11 \cdot 10^{-2} \text{ Udia}^2 \quad (28)$$

La radiación solar puede medirse mediante pyranómetros, los cuales son una forma de actinómetros. Varían por su complejidad desde receptores bimetalicos hasta células de silicón integradas con microprocesadores y registradores electrónicos, (Torres, 1984). La radiación solar también puede estimarse con la relación propuesta por Fritz y Mc Donald (1949). Para utilizar la relación de Campbell y Stokes se necesita medir la insolación, n, y el fotoperiodo, N. La relación es la siguiente:

$$R_s = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) R_{so} \quad (29)$$

donde:

Rso = Radiación solar total recibida en la superficie del suelo en un día sin nubes (cal/cm²) (cuadro 10).

4.3.1. Ejemplo

Calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia con el método de la radiación para el mes de mayo en la ciudad de Torreón, según la información presentada en el cuadro 7.

SOLUCION:

Información requerida:

Humedad relativa promedio (%) = 52.4
Velocidad del viento durante el día = 6.6 m/seg
Latitud y mes = Lat 25° 33', Mayo
Elevación sobre el nivel del mar = 1,130 m

Cálculos:

La constante B se calcula:

$$\begin{aligned} B &= 1.066 - 0.13 \cdot 10^{-2} (52.4) \\ &+ 0.045 (6.6) - 0.20 \cdot 10^{-3} (52.4) (6.6) \\ &- 0.315 \cdot 10^{-4} (52.4)^2 - 0.11 \cdot 10^{-2} (6.6)^2 \\ &= 1.09 \end{aligned} \quad (30)$$

La radiación solar se calcula:

$N = 9.33$ (cuadro 9, con latitud y mes)

$R_{so} = 742 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ (cuadro 10, con latitud y mes)

$$\begin{aligned} R_s &= \left[0.25 + 0.50 \left(\frac{9.0}{9.33} \right) \right] 742 \\ &= 543.4 \text{ cal/cm}^2/\text{día} \end{aligned} \quad (31)$$

Factores de ajuste de temperatura y humedad:

$$\begin{aligned} \Delta &= 2.0 (0.00738 \cdot T_{prom} + 0.8072)^7 - 0.00116 \\ \Delta &= 2.0 (0.00738 \cdot 27.3 + 0.8072)^7 - 0.00116 \\ &= 2.12 \text{ mb/}^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (32)$$

Presión barométrica promedio, (mb)

$$\begin{aligned} P_b &= 1013 - 0.1055 \cdot E \\ &= 1013 - 0.1055 \cdot 1130 \\ &= 893.8 \text{ mb} \end{aligned} \quad (33)$$

El calor latente de vaporización, (cal/gr)

$$\begin{aligned} L &= 595 - 0.51 T_{prom} \\ &= 595 - 0.51 (27.3) \\ &= 581.077 \end{aligned} \quad (34)$$

La constante psicrométrica, γ , (mbar/ $^\circ\text{C}$),

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{0.386 \cdot P}{L} \\ &= \frac{0.386 \cdot 893.8}{581.077} \\ &= 0.5937 \end{aligned} \quad (35)$$

Cuadro 10. Radiación solar promedio para
 cielos sin nubes espejados,
 Rso. Calculados de Budyko (1963)
 expresados en $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$

Lat	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
60	58	152	319	533	671	763	690	539	377	197	87	35
55	100	219	377	558	690	780	706	577	430	252	133	74
50	155	290	429	617	716	790	729	616	480	313	193	126
45	216	365	477	650	729	797	748	648	527	371	260	190
40	284	432	529	677	742	800	755	674	567	426	323	248
35	345	496	568	700	742	800	761	697	603	474	380	313
30	403	549	600	713	742	793	755	703	637	519	437	371
25	455	595	629	720	742	780	745	703	660	561	486	423
20	500	634	652	720	726	760	729	697	680	597	537	474
15	545	673	671	713	706	733	706	684	697	623	580	519
10	584	701	681	707	684	700	681	665	707	648	617	565
5	623	722	690	700	652	663	645	645	710	665	650	606
0	652	740	694	680	623	627	616	623	707	684	680	619
5	648	758	690	663	590	587	577	590	693	690	727	677
10	710	772	681	640	571	543	526	558	680	690	727	710
15	729	779	665	610	516	497	497	519	657	687	747	739
20	748	779	645	573	474	447	445	481	630	677	753	761
25	761	779	626	533	419	400	406	439	600	665	767	777
30	771	772	600	497	384	353	358	390	567	648	767	793
35	774	754	568	453	335	300	310	342	530	629	767	806
40	774	729	529	407	281	243	261	290	477	603	760	813
45	774	704	490	357	229	187	203	235	477	571	747	813
50	761	669	445	307	174	127	148	177	400	535	727	806
55	748	630	397	250	123	77	97	123	343	497	707	794
60	729	588	348	187	77	33	52	74	283	455	700	787

Finalmente, el factor de ajuste por temperatura y humedad,

$$\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) = \left(\frac{2.12}{2.12 + 0.5937} \right) \quad (36)$$

$$= 0.7812$$

La evapotranspiración del cultivo de referencia se calcula con la siguiente relación:

$$E_{Tr} = B \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{L * \frac{1}{10}} \right] - 0.3 \quad (37)$$

$$E_{Tr} = 1.09 \left[0.7812 \frac{543.37}{\left(581.1 * \frac{1}{10} \right)} \right] - 0.3$$

$$= 7.7 \text{ mm}$$

4.4. Método de Penman

Este método estima la evapotranspiración de un cultivo de referencia utilizando la combinación de dos componentes: el componente del balance de la energía radiante y el componente aerodinámico (viento y humedad relativa). El componente del balance de energía cuantifica el agua que se evapora del suelo, mientras que el componente aerodinámico estima el agua que se remueve en forma de vapor de agua de la superficie de las hojas del cultivo.

Existen varias versiones del método de Penman. Las versiones que se cubren en este anexo son la de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1984) y la Penman-Monteith (Allen et al., 1989).

4.4.1. Método de Penman (Versión propuesta por la FAO)

El método de la FAO considera al pasto como el cultivo de referencia. Este método se desarrolló para varios lugares del mundo, comparando la ET estimada con datos climatológicos con la ET medida con lisímetros. La ecuación del método de Penman-FAO-24 es la siguiente:

$$ET_r = C \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n * \frac{1}{L * \frac{1}{10}} + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} f(U_z) (e_s - e_a) \right) \quad (38)$$

donde:

- ET_r = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).
 R_n = Energía de radiación neta (cal/(cm² día)),
 (1 cal/(cm² día) = 1 lg/día).
 $f(U_z)$ = Función del viento.
 $e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor, (mb).
 e_s = Presión de vapor a saturación a la temperatura promedio del aire, (mb).
 e_a = Presión de vapor tomada a la temperatura a punto de rocío (mb).

El término C de la Ec. (18) es un coeficiente de calibración determinado mediante un análisis estadístico de datos climatológicos y datos obtenidos de un lisímetro. La constante de calibración "C" puede obtenerse del cuadro 11, la ecuación fue desarrollada por Allen y Pruitt (1991) utilizando regresión lineal múltiple; la ecuación resultante es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 C = & 0.892 - 0.0781 U_d + 0.00219 U_d R_s + 0.000402 HR_{\max} R_s \\
 & + 0.000196 \frac{U_d}{U_n} U_d HR_{\max} + 0.0000198 \frac{U_d}{U_n} U_d HR_{\max} R_s \\
 & + 0.00000236 (U_d)^2 HR_{\max} R_s - 0.0000086 \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2 U_d RH_{\max} \\
 & - 0.000000292 \frac{U_d}{U_n} (U_d)^2 (HR_{\max})^2 R_s - 0.0000161 HR_{\max} (R_s)^2
 \end{aligned} \quad (39)$$

donde:

- U_d/U_n = Es el cociente entre la velocidad del viento del día (7:00 AM - 7:00 PM) y de la noche (7:00 PM - 7:00 AM). Doorenbos y Pruitt recomendaron fijar el cociente U_d/U_n en 2 cuando éste es desconocido.
 HR_{\max} = Es la máxima humedad relativa diaria (%).

Cuadro 11. Factor de ajuste (c) en el método de Penman modificado por la FAO

	HRmax = 30%				HRmin = 60%				HRmin = 90%			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
Udía/Unoché = 4.0												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.79	0.84	0.92	0.97	0.92	1.00	1.11	1.19	0.99	1.10	1.27	1.27
6	0.68	0.77	0.87	0.93	0.85	0.96	1.11	1.19	0.94	1.10	1.26	1.33
9	0.55	0.65	0.78	0.90	0.76	0.88	1.02	1.14	0.88	1.01	1.16	1.27
Udía/Unoché = 3.0												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.76	0.81	0.88	0.94	0.87	0.96	1.06	1.12	0.94	1.04	1.18	1.28
6	0.61	0.68	0.81	0.88	0.77	0.88	1.02	1.10	0.86	1.01	1.15	1.22
9	0.46	0.56	0.72	0.82	0.67	0.79	0.88	1.05	0.78	0.92	1.06	1.18
Udía/Unoché = 2.0												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.69	0.76	0.85	0.92	0.83	0.91	0.99	1.05	0.89	0.98	1.10	1.14
6	0.53	0.61	0.74	0.84	0.70	0.80	0.94	1.02	0.79	0.92	1.05	1.12
9	0.37	0.48	0.65	0.76	0.59	0.70	0.84	0.95	0.71	0.81	0.96	1.06
Udía/Unoché = 1.0												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.64	0.71	0.82	0.89	0.78	0.86	0.94	0.99	0.85	0.92	1.01	1.05
6	0.43	0.53	0.68	0.79	0.62	0.70	0.84	0.93	0.72	0.82	0.95	1.00
9	0.27	0.41	0.59	0.70	0.50	0.60	0.75	0.87	0.62	0.72	0.87	0.96

Los parámetros de entrada de la ecuación se calculan de la siguiente manera:

Presión de vapor, mb:

La presión de vapor (e_s) puede calcularse con la siguiente relación propuesta por Kincaid y Heerman (1974):

$$e_s = 6.328 + 0.424T + 0.01085T^2 + 0.000519T^3 \quad (40)$$

Déficit de la presión de vapor ($e_s - e_a$), mb:

El déficit de la presión de vapor ($e_s - e_a$) es calculado así:

$$(e_s - e_a) = e_s \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - e_s(T_{prom}) * \frac{HR_{prom}}{100} \quad (41)$$

Función del viento:

La función del viento puede aproximarse mediante la siguiente relación:

$$f(U) = 0.27 \left(1 + \frac{U_d}{100} \right) \quad (42)$$

La velocidad del viento es frecuentemente medida a 2 m de altura sobre la superficie del suelo. La velocidad del viento que se tome a otra altura debe extrapolarse a 2 m usando la siguiente expresión que aproxima el perfil logarítmico de velocidad:

$$U_d = U_z \left(\frac{2}{z} \right)^2 \quad (43)$$

donde:

U_z = Velocidad del viento a una altura diferente a 2 m (m/s).

La radiación neta, mm/día:

La radiación solar neta puede medirse directamente usando un radiómetro neto hemisférico o estimarse a partir de los componentes de las radiaciones netas de onda corta y de onda larga que son absorbidas por la superficie del suelo. La radiación neta es la diferencia entre la radiación que se recibe en la superficie del suelo y la radiación que ella refleja. Debido a que rara vez la información de radiación está disponible para su uso, es necesario estimarla. Se puede estimar con la siguiente relación:

$$Rn = Rn_{oc} - Rn_{ol} \quad (44)$$

donde:

Rn_{oc} = Radiación de onda corta.

Rn_{ol} = Radiación de onda larga.

La radiación de onda corta se estima:

$$Rn_{OC} = (1-\alpha)R_s \quad (45)$$

donde:

α = Albedo ($\alpha = 0.25$)

La radiación de onda larga se estima:

$$Rn_{OL} = \left(a_1 \frac{R_s}{R_{so}} + b_1 \right) R_{bo} \quad (46)$$

donde:

- a_1, b_1 = Coeficientes experimentales que dependen de la región climática. (cuadro 12).
- R_{bo} = La radiación neta de onda larga en un día sin nubes, (cal/cm²).
- = $\epsilon \sigma T_k^4$
- R_s = La radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra en un plano horizontal, (cal/(cm² día)), calculada con la Ec. (31).
- ϵ = Emisividad
- σ = Constante de Stefan Boltzman, ($\sigma = 11.71 \times 10^{-8}$ cal/(cm² °K⁴ día))
- T_k = Temperatura promedio, ((T⁴max + T⁴min)/2), donde las temperaturas deben expresarse en grados Kelvin ($T_k = ^\circ C + 273$).

Cuadro 12. Coeficientes experimentales para la ecuación (a_1 y b_1) Jensen (1974)

Región	a_1	b_1
Davis, California	1.35	-0.3
Sur de Idaho	1.22	-0.18
Regiones áridas	1.2	-0.2
Regiones húmedas	1.0	0
Regiones semi-húmedas	1.1	-0.1

La emisión se puede calcular así:

$$e = - 0.02 + 0.261 \exp[-7.77 \times 10^{-4} (T^2)] \quad (47)$$

4.4.1.1. Ejemplo

Calcular la evapotranspiración para el mes de mayo por el método de Penman-FAO-24 en la ciudad de Torreón, según la información del cuadro 7.

SOLUCION:

Información requerida:

Horas luz actuales = 9.0
Latitud y mes = Lat 25° 33', Mayo
Albedo = 0.25
Temperatura promedio = 27.3
Temperatura punto de rocío = No es disponible
Humedad relativa promedio (%) = 52.4
Elevación sobre el nivel del mar = 1130 m
Velocidad del viento (día) = 6.6 m/seg
Velocidad del viento (noche) = no es disponible
Altura de las mediciones = 2 m

Cálculos:

Radiación solar neta:

Se calculó en el ejemplo 4.3.1. del método de la radiación FAO-24

Radiación solar = 543.38 lg/día
Radiación de onda corta = 407.53 lg/día
Constante de emisión = 0.126
Radiación de onda larga (día sin nubes) = 120.2 lg/día
Radiación de onda larga (día normal) = 81.61 lg/día
Radiación neta = 325.91 lg/día

Déficit de presión de vapor:

Para calcular ésta, primero es necesario calcular las presiones de vapor a la temperaturas promedio,

$$\begin{aligned} e_s(27.3) &= 6.328 + .424(27.3) + 0.01085 (27.3)^2 \\ &+ 0.000519 (27.3)^3 \\ &= 36.55 \text{ mb} \end{aligned} \quad (48)$$

Déficit de presión de vapor:

$$\begin{aligned} e_s - e_a &= e_s (27.3) - e_s (27.3) * \frac{52.4}{100} \\ &= 36.55 - 36.55 * \frac{52.4}{100} \\ &= 17.39 \text{ mb} \end{aligned} \quad (49)$$

Función del viento:

$$\begin{aligned} f(U_2) &= 0.27 \left(1.0 + \frac{(6.6 * 86.4)}{100} \right) \\ &= 1.809 \end{aligned} \quad (50)$$

Factores de ajuste por temperatura y humedad:

La pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor Δ , (mbar/°C), se calculó en el ejemplo 4.3.1. por el método de la Radiación de la FAO. La constante psicrométrica, γ , (mbar/°C) también se calculó con el mismo ejemplo.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) &= \left(\frac{2.12}{2.12 + 0.5937} \right) \\ &= 0.7812 \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) &= 1 - \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \\ &= 0.2188 \end{aligned} \quad (52)$$

Factor de ajuste general:

La evapotranspiración se ajusta por humedad relativa máxima, velocidad máxima del viento durante el día y durante la noche, y radiación solar.

Como los datos de humedades máximas relativas durante el día no se

proporcionarón, ésta puede estimarse así:

$$HR \max = 100 \left[\frac{112 - 0.2 T \min + T \text{ pr}}{112 + 0.9 T \min} \right]^8 \quad (53)$$

donde:

T min = Temperatura mínima, °C.

T pr = Temperatura a punto de rocío, °C.

El dato de la temperatura a punto de rocío, tampoco fue proporcionado, por lo que se asumirá que la temperatura a punto de rocío es igual a la temperatura mínima. Esto se justifica, ya que la temperatura a punto de rocío se logra en las primeras horas de la mañana (entre 6:00 AM y 8:00 AM), cuando se alcanza la temperatura mínima.

$$\begin{aligned} HR \max &= 100 \left[\frac{112 - 0.2 (20) + (20)}{112 + 0.9 (20)} \right]^8 \\ &= 88.33 \% \end{aligned} \quad (54)$$

Cuando el cociente entre la velocidad del viento durante el día y la noche se desconoce, se recomienda utilizar el cociente de 2.0 (Doorenbos y Pruitt, 1984). Entonces el factor de ajuste se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} c &= 0.68 + 0.0028 (52.4) + 0.018 \left(\frac{543.37}{581.077} * 10 \right) \\ &\quad - 0.068(6.6) + 0.013(2.0) + 0.0097 (6.6) 2.0 \\ &\quad + 0.43 * 10^{-4} (52.4) \left(\frac{543.37}{581.077} * 10 \right) (6.6) \\ &= 0.839 \end{aligned} \quad (55)$$

Finalmente, la evapotranspiración se calcula así:

$$\begin{aligned} ET_r &= 0.839 \left(0.781 \left(\frac{325.37}{581.077} * 10 \right) + 0.219 * 1.809 (17.4) \right) \\ &= 0.839 (4.38 + 6.89) \\ &= 9.5 \text{ mm/día} \end{aligned} \quad (56)$$

4.4.2. Ecuación de Penman-Monteith

El método de Penman-Monteith puede considerarse como el método estándar de todos los métodos combinados para estimar la ET del cultivo de referencia. La mayoría de los métodos combinados presentan ligeras variaciones dependiendo del tipo de cultivo (pasto o alfalfa), de la variedad del cultivo y de la localización de los instrumentos meteorológicos. Por esta razón, el método de Penman-Monteith utiliza términos como la resistencia aerodinámica del follaje (r_a) para relacionar la altura de los instrumentos meteorológicos con la altura del cultivo y la resistencia estomática a la transpiración mínima que dependerá del tipo de cultivo y de su altura.

La ecuación de Penman-Monteith se define:

$$ET = ET \text{ radiacion} + ET \text{ aereodinámico} \quad (57)$$

La ecuación completa es:

$$ET_r = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{L + \frac{1}{10}} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{18,720}{(T + 275)} \frac{1}{r_a} (e_s - e_a) \right) \quad (58)$$

donde:

- $ET_r =$ Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).
- $\gamma^* =$ Constante psicrométrica modificada utilizada en el método de Penman-Monteith (mbar C_{p1}).
- $r_a =$ Resistencia aerodinámica (s/m).

Para calcular la constante psicrométrica modificada es necesario calcular la resistencia del follaje que ofrece al flujo de agua y la resistencia aerodinámica del follaje.

Resistencia del follaje del cultivo:

$$r_c = \frac{R_t}{0.5 \text{ LAI}} \quad (59)$$

donde:

- $R_t =$ Resistencia promedio diaria estomal de una sola hoja (s/m).
- $\text{LAI} =$ Índice de área foliar.

Para pasto recién cortado:

$$\text{LAI} = 24 h_c \quad (60)$$

El cultivo de referencia se define como:

$$\begin{aligned} h_c &= 0.12\text{m} \\ \text{LAI} &= 24 * 0.12 = 2.88 \end{aligned}$$

entonces

$$r_c = \frac{100}{0.5 * 2.88} = 69 \quad (62)$$

Resistencia aerodinámica, r_a :

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_p - d}{z_{op}}\right)}{k^2 U_z} \quad (63)$$

- z_m = Altura de medición del viento (m).
- z_p = Altura de medición de la temperatura y de la humedad (m).
- k = Constante de Von Karman ($k = 0.41$).
- U_z = Medición de la velocidad del viento a la altura z_m .
- z_{om} = Parámetro de rugosidad para el viento, (m).
- z_{op} = Parámetro de rugosidad para el calor y para el vapor de agua (m).
- d = Plano de cero desplazamiento del perfil de aire (m).

Considerando al pasto como el cultivo de referencia y considerando que este tiene una altura de 12 cm.

d , Plano de desplazamiento cero del perfil de aire (m)

$$d = \frac{2}{3} h_c = 0.08 \quad (64)$$

z_{om} , Parámetro de rugosidad para el viento (m)

$$z_{om} = 0.123 h_c = 0.01476$$

z_{op} , Parámetro de rugosidad para el calor y para el vapor de agua
(m)

$$z_{op} = 0.1 z_{om} = 0.0123 h_c = 0.001476 \quad (66)$$

Si las mediciones de velocidad del viento, temperatura y humedad relativa se realizan a la altura estándar de 2 m, el factor aerodinámico de resistencia para el cultivo de referencia, que tiene una altura de 12 cm es:

$$r_a = \frac{208}{U_2} \quad (67)$$

donde:

U_2 = Velocidad del viento a una altura de 2 m (m/s).

La constante psicrométrica modificada (γ^*):

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \quad (68)$$

Si se aplica las Ecs. (38) y (43) para el cultivo de referencia la constante psicrométrica puede calcularse de la siguiente manera:

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0.33 U_2) \quad (69)$$

La ecuación final es,

$$ET_x = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{10}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{90}{(T + 275)} U_2 (e_s - e_a) \right) \quad (70)$$

4.4.2.1. Ejemplo

Calcular la evapotranspiración para el mes de mayo por el método de Penman-Monteith, para la ciudad de Torreón, utilizando la información del cuadro 7.

SOLUCION:

Información requerida:

Horas luz actuales = 9.0.
Latitud y mes = Lat 25° 33', mayo.
Albedo = 0.25.
Temperatura promedio = 27.3.
Temperatura punto de rocío = no está disponible.
Humedad relativa promedio (%) = 52.4.
Elevación sobre el nivel del mar = 1130 m.
Velocidad del viento (día) = 6.6 m/seg.
Velocidad del viento (noche) = no está disponible.
Altura de las mediciones = 2 m.

Cálculos:

Radiación solar neta:

Se calculó en el ejemplo 4.3.1. del método de la radiación FAO-24.

Radiación solar = 543.38 lg/día.
Radiación de onda corta = 407.53 lg/día.
Constante de emisividad = 0.126.
Radiación de onda larga (día sin nubes) = 120.2 lg/día.
Radiación de onda larga (día normal) = 81.61 lg/día.
Radiación neta = 325.91 lg/día.

Déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$):

Se calculó en el ejemplo 4.4.1 del método de Penman-FAO-24, ($e_s - e_a$) = 17.39 mb.

Factores de ajuste por temperatura y humedad:

La pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor Δ , (mbar/°C), se calculó en el ejemplo 4.3.1. del método de la Radiación de la FAO, $\Delta = 2.12$ mb/°C. La constante psicrométrica, γ , (mbar/°C) también se calculó en el mismo ejemplo, $\gamma = 0.5937$ mbar/°C.

La constante psicrométrica modificada, γ^* , (mbar/°C), se calcula:

$$\begin{aligned}\gamma^* &= \gamma (1 + 0.33 U_2) \\ \gamma^* &= 0.5937 (1 + 0.33 * 6.6) \\ &= 1.8867\end{aligned}\tag{71}$$

Finalmente, se calculan los factores de ajuste por temperatura y humedad considerando la constante psicrométrica modificada, γ^* :

$$\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \right) = \left(\frac{2.12}{2.12 + 1.8867} \right) \quad (72)$$

$$= 0.5291$$

$$\left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \right) = \left(\frac{0.5937}{2.12 + 1.8867} \right) \quad (73)$$

$$= 0.1481$$

Asumiendo $G = 0$

$$ET_r = \left(0.53 \left(\frac{325.9}{581.1 * \frac{1}{10}} - 0 \right) + 0.15 \frac{90}{(27.3 + 275)} (6.6) (28.4) \right)$$

$$= 2.97 + 8.3$$

$$= 11.27 \text{ mm/dia}$$

(74)

5 EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO

Para estimar la evapotranspiración de un cultivo diferente al cultivo de referencia, se multiplica la evapotranspiración de éste por un coeficiente que indica el grado de desarrollo del cultivo. Esto da por resultado la siguiente fórmula:

$$ET_c = K_{cc} ET_r \quad (75)$$

donde:

KC = Coeficiente de desarrollo del cultivo.

Los valores de KC pueden representarse por una curva, pero para propósitos prácticos dicha curva se representa por líneas (lámina 2). Los valores de KC para cada etapa de desarrollo y para cada cultivo se muestran en el cuadro 13 (Snyder, 1981).

Los coeficientes de cultivo variarán con la densidad de las plantas, el crecimiento, métodos de riego, la influencia advectiva del clima y de los intervalos de riego. Los tres valores de KC y la definición de su relación con la etapa de desarrollo, es:

Valor KC	Etapa	Descripción
KC1	Crecimiento inicial / A-B	El valor promedio de KC desde la siembra hasta cerca de un 10% de cobertura vegetal.
KC1 a KC2	Crecimiento rápido / B-C	Desde un 10% de cobertura hasta un 75% o al punto máximo de uso del agua, el que se logre primero o desde el inicio del crecimiento de las hojas hasta la cobertura completa para los frutales o uvas.
KC2	Estación media / C-D	El valor promedio desde que finaliza la etapa de crecimiento rápido hasta que el uso del agua empieza a descender debido al envejecimiento del cultivo.
KC2 a KC3	Estación tardía / D-E	Desde que KC empieza a reducirse hasta la cosecha o cuando el uso del agua cesa o es mínimo.
KC3	Cosecha	El valor promedio al momento de la cosecha o al final de la época de uso de agua.

Para los árboles de hoja caduca, el coeficiente KC2 corresponde a una cobertura del 60 al 70% de la vegetación. Para árboles jóvenes, los coeficientes KC2 y KC3 deben disminuir.

El intervalo de riego influye más en el coeficiente del cultivo durante la etapa inicial de su desarrollo. El coeficiente de desarrollo en la etapa inicial se puede calcular con la siguiente fórmula:

Para intervalos de riego menores de 4 días:

$$KC1 = (1.286 - 0.27 \ln I_r) \cdot \exp[(-0.01 - 0.042 \ln I_r) ET_r] \quad (76)$$

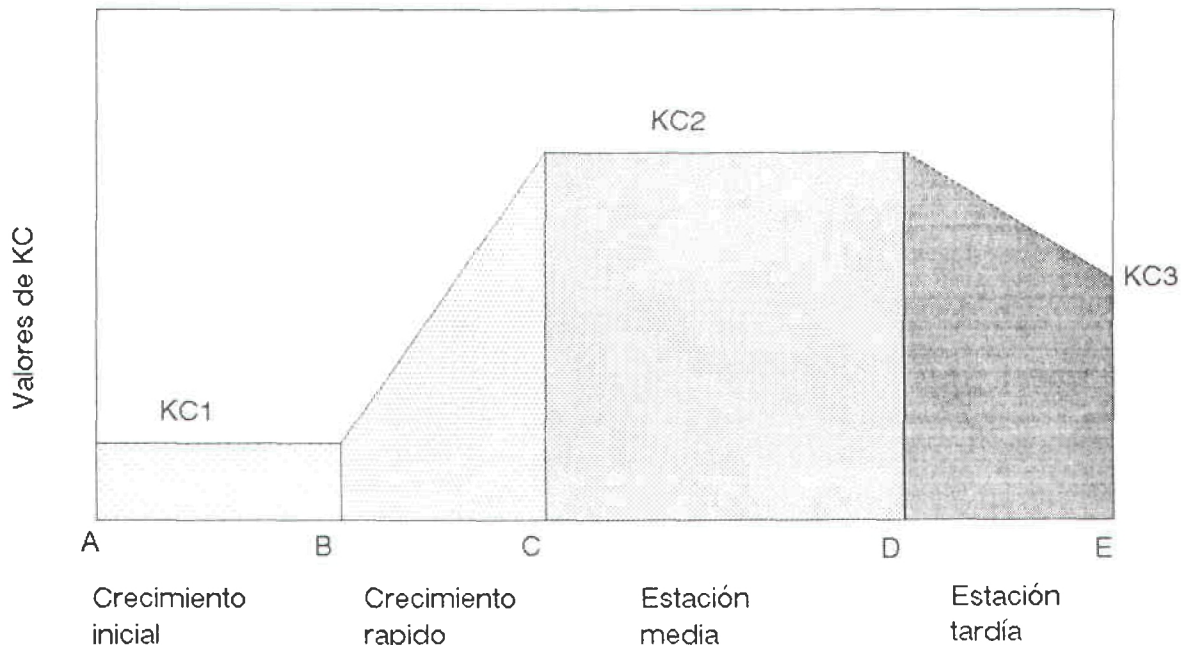
Para intervalos de riego mayores de 4 días:

$$KC1 = 2 I_r^{-0.49} \exp[(-0.02 - 0.04 \ln I_r) ET_r] \quad (77)$$

donde:

- I_r = Intervalo entre riegos.
- $KC1$ = Coeficiente inicial del cultivo.
- ET_r = Evapotranspiración del cultivo de referencia.
- \ln = Logaritmo natural.

Lámina 2 Coeficientes generales del cultivo y sus variaciones con diferentes etapas de desarrollo



Cuadro 13. Coeficientes del cultivo (KC)

Cosecha	KC1	KC2	KC3
Alfalfa	0.40 - 0.50	1.00 - 1.40	0.95 - 1.35
Alcachofa	0.90 - 1.00	0.95 - 1.05	0.90 - 1.00
Espárrago	0.25 - 0.30	0.95	0.25
Banana	0.40 - 0.65	1.00 - 1.20	0.75 - 1.15
Cebada	0.25 - 0.30	1.00 - 1.10	0.10 - 0.20
Frijol (verde)	0.30 - 0.40	0.95 - 1.05	0.85 - 0.95
Frijol (seco)	0.30 - 0.40	1.05 - 1.20	0.25 - 0.30
Remolacha	0.25 - 0.40	1.05 - 1.20	0.25 - 0.30
Repollo	0.30 - 0.50	0.95 - 1.10	0.80 - 0.95
Melón	0.15 - 0.40	1.00 - 1.10	0.30 - 0.90
Zanahoria	0.40 - 0.50	1.05	0.75
Frijol castor	0.30 - 0.40	1.05 - 1.20	0.50
Apio	0.25 - 0.35	1.00 - 1.15	0.90 - 1.05
Cítricos	0.65	0.65 - 0.75	0.65
Maíz (cereal)	0.20 - 0.50	1.05 - 1.20	0.35 - 0.60
Maíz (dulce)	0.20 - 0.50	1.05 - 1.20	0.95 - 1.10
Algodón	0.20 - 0.50	1.05 - 1.30	0.30 - 0.60
Pepino	0.20 - 0.40	0.90 - 1.00	0.70 - 0.80
Huerta decidua	0.50	0.85 - 1.20	0.50 - 0.85
Huerta decidua con cultivos	0.75 - 0.85	1.10 - 1.25	0.70 - 1.10
Berenjena	0.25 - 0.50	0.95 - 1.10	0.80 - 0.90
Linaza	0.20 - 0.40	1.00 - 1.15	0.20 - 0.25
Uva	0.20 - 0.50	0.74 - 0.85	0.20 - 0.45
Cacahuete	0.30 - 0.50	0.95 - 1.00	0.50 - 0.60
Kiwi	0.30	1.05	1.05
Lenteja	0.20 - 0.30	1.05 - 1.20	0.25 - 0.30
Lechuga	0.20 - 0.30	0.85 - 1.05	0.45
Mijo	0.20 - 0.40	1.00 - 1.15	0.25 - 0.30
Avena	0.20 - 0.40	1.05 - 1.20	0.20 - 0.25
Aceituna	0.60	0.80	0.80
Cebolla (seca)	0.40 - 0.60	0.95 - 1.10	0.75 - 0.85
Cebolla (verde)	0.40 - 0.60	0.95 - 1.05	0.95 - 1.05
Guisante	0.40 - 0.50	1.05 - 1.20	0.95 - 1.10
Chile verde o pimiento	0.30 - 0.40	0.95 - 1.10	0.80 - 0.90
Pistacho	0.10	0.10	0.35

Continuación del cuadro 13

Papa	0.40 - 0.55	1.10 - 1.20	0.40 - 0.75
Legumbre	0.20 - 0.40	1.05 - 1.20	0.25 - 0.30
Rábano	0.20 - 0.30	0.80 - 0.90	0.75 - 0.85
Arroz	1.10 - 1.15	1.10 - 1.30	1.10
Cártamo	0.30 - 0.40	1.05 - 1.20	0.20 - 0.25
Cereal pequeño	0.20 - 0.40	1.10 - 1.30	0.20 - 0.35
Sorgo	0.15 - 0.40	1.05 - 1.20	0.30 - 0.50
Soya	0.30 - 0.40	1.00 - 1.15	0.45 - 0.55
Espinaca	0.20 - 0.30	0.95 - 1.05	0.90 - 1.00
Calabacita	0.20 - 0.40	0.90 - 1.00	0.70 - 0.80
Remolacha azucarera	0.20 - 0.40	1.05 - 1.20	0.70 - 1.00
Caña de azúcar	0.40 - 0.50	1.00 - 1.30	0.50 - 0.60
Girasol	0.30 - 0.40	1.05 - 1.20	0.35 - 0.45
Tabaco	0.30 - 0.40	1.00 - 1.20	0.75 - 0.85
Tomate	0.25 - 0.50	1.05 - 1.25	0.60 - 0.85
Sandía	0.25 - 0.50	1.00 - 1.10	0.20 - 0.70
Trigo	0.20 - 0.40	1.05 - 1.25	0.20 - 0.30

5.1. Ejemplo

Obtener la ET del cultivo de maíz que se sembró el día 1 de mayo en Torreón, Coah. Las evapotranspiraciones del cultivo de referencia calculadas por Blaney-Criddle (FAO-24) son dadas a continuación:

Mes	ETr mm/día
Mayo	9.14
Junio	7.66
Julio	7.71
Agosto	5.40
Septiembre	3.95

Los periodos de crecimiento para el cultivo de maíz son los siguientes:

Periodo de crecimiento	Número de días	Fechas
Crecimiento inicial	20	1 mayo - 20 mayo
Crecimiento rápido	30	20 mayo - 19 junio
Estación media	50	19 junio - 9 agosto
Estación tardía	20	9 agosto - 29 agosto

Solución:

En el mes de mayo tenemos:

20 días en el periodo crecimiento inicial
11 días en el periodo de crecimiento rápido

Para calcular el coeficiente de cultivo del periodo de crecimiento inicial (KC1), se asume un intervalo entre riegos de 10 días y una evapotranspiración del cultivo de referencia de 9.43 mm/día.

$I_r = 10$ días.

$E_{Tr} = 9.14$ mm/día.

$$KC1 = 2 * 10^{-0.49} \exp[(-0.02 - 0.04 \ln 10) 9.14] \quad (78)$$

$$= 0.23$$

El coeficiente de cultivo del periodo de crecimiento rápido (KC2), se obtiene del cuadro 13.

$$KC \text{ mayo} = 0.23 + \frac{11 \text{días}}{30 \text{días}} (1.125 - 0.23) \quad (79)$$

$$= 0.53$$

El promedio ponderado para el mes de mayo es:

$$KC \text{ mayo} = 0.23 \frac{20 \text{días}}{30 \text{días}} + \frac{11 \text{días}}{30 \text{días}} \left(\frac{0.53 + 0.23}{2} \right) \quad (80)$$

$$= 0.29$$

En el mes de junio tenemos:

19 días en el periodo de crecimiento rápido.
11 días en la estación media del cultivo.

$$\begin{aligned}
 \text{KC junio} &= \left(\frac{0.34 - 1.125}{2} \right) \frac{19\text{días}}{30\text{días}} + \frac{11\text{días}}{30\text{días}} 1.125 \\
 &= 0.875
 \end{aligned}
 \tag{81}$$

Para el mes de julio

$$\begin{aligned}
 \text{KC julio} &= \text{KC2} \\
 &= 1.125
 \end{aligned}
 \tag{82}$$

Para el mes de agosto

$$\begin{aligned}
 \text{KC agosto} &= 1.125 \frac{9 \text{ días}}{31 \text{ días}} - \frac{20 \text{ días}}{31 \text{ días}} \left(\frac{1.125 + 1.025}{2} \right) \\
 &= 0.875
 \end{aligned}
 \tag{83}$$

Resultados

Mes	ETr mm/día	KC	ETc mm/día
Mayo	9.14	0.29	2.65
Junio	8.56	0.875	7.5
Julio	8.72	1.125	9.8
Agosto	6.59	1.02	6.7
Septiembre	5.21	-----	

6 DETERMINACION DE LA LLUVIA EFECTIVA

La lluvia efectiva para fines agrícolas se define como la porción del agua de lluvia que contribuye a satisfacer los requerimientos de evapotranspiración de los cultivos. Esto difiere de la definición hidrológica que describe a la lluvia efectiva como la porción de lluvia que produce escurrimiento.

La cantidad de lluvia efectiva dependerá de la tasa de lluvia, de la condición de la humedad del suelo, de la cobertura vegetal y de la profundidad de la zona de raíces. La lluvia que escurre fuera del terreno o que escurre por debajo de la zona de raíces de la planta no se considera efectiva para reducir los requerimientos de riego.

Existen varios métodos para estimar la lluvia efectiva. Una revisión muy completa de estos métodos es la publicada por la FAO (Pastane, 1974). Para propósitos de riego agrícola el método más utilizado es el del Servicio de Conservación de suelos de Estados Unidos. Este método es completamente empírico y está basado en un análisis de 50 años de información de agua almacenada en el suelo, lluvia y ET de 22 lugares de Estados Unidos que van desde zonas áridas hasta zonas húmedas. El Método del SCS realiza estimaciones mensuales de lluvia efectiva y no es teóricamente válido para periodos más cortos. Los valores de lluvia efectiva se muestran en el cuadro 15 cuando el déficit de agua en el suelo es de 75 mm. Para otros déficit del suelo al momento del riego, los valores dados en el cuadro deben multiplicarse por un factor de almacenamiento que se encuentra en la parte inferior del cuadro. Mediante un análisis de regresión, Cuenca (1988) desarrolló una relación empírica de los valores del cuadro 14. La relación está dada por:

$$Lle = f(D) [1.25 (P_t)^{0.824} - 2.93] 10^{(0.000355 ET_c)} \quad (84)$$

donde:

- Lle = Lluvia efectiva, mm/mes.
f(D) = Función que contabiliza la lámina de déficit del suelo, cuando el déficit es diferente a 75 mm.
P_t = Lluvia total, mm/mes.
ET_c = Evapotranspiración del cultivo, mm/mes.

La función $f(D)$ está dada por:

$$f(d) = 0.53 + 0.0116 D - 8.94 * 10^{-5} (D)^2 + 2.32 * 10^{-7} (D)^3 \quad (85)$$

donde:

$D =$ Función que contabiliza la lámina de déficit del suelo, mm.

La Ec. (86) solamente debe usarse para valores que se encuentran dentro de los límites del cuadro 14.

Cuadro 14. Promedio de lluvia efectiva mensual en relación con el promedio mensual de evapotranspiración y promedio mensual de lluvia

P_t mm	12.5	25	37.5	50	62.5	75	84.5	100	112.5	125	137.5	150	162.5	175	187.	200
ET _c	Lluvia efectiva mensual promedio en mm D = 75 mm															
25	8	16	23													
50	8	17	24	32	39	46										
75	8	18	26	34	41	48	55	62	69							
100	9	18	27	36	44	51	58	66	73	80	87	93	100			
125	9	20	29	38	46	54	62	70	77	84	92	99	106	112	119	
150	10	21	30	40	48	57	65	73	81	89	97	104	112	119	126	133
175	10	22	32	42	51	60	69	78	86	94	102	110	118	126	133	141
200	11	23	34	44	54	64	73	82	91	99	108	116	124	133	141	149
225	12	24	36	47	57	67	77	87	96	105	114	123	132	140	149	157
250	12	26	38	50	60	71	81	92	101	111	120	130	139	148	157	166
Factor de corrección (f) para láminas de déficit de agua (D) que son diferentes a 75 mm.																
	20	25	37.5	50	60	75	100	160	175	200						
	0.73	.77	0.85	0.92	0.96	1.00	1.03	1.05	1.07	1.14						

6.1. Selección del año promedio de un registro histórico

Considerar la contribución del agua de lluvia para complementar el riego de los cultivos es muy importante en varias regiones de nuestro país, especialmente en las zonas áridas, donde existen grandes extensiones de tierra disponibles y poca agua. Para la planeación del riego generalmente se asume que la lluvia que se recibirá estará próxima al promedio histórico de un registro de datos climáticos.

6.2. Ejemplo

Calcular la lluvia efectiva para un año promedio en la región de Torreón, Coah, en la que se consideró un registro climático de 25 años.

Mes	Lluvia recibida mm	Lluvia efectiva mm
Mayo	21.18	16.21
Junio	45.26	44.38
Julio	34.9	34.9
Agosto	26.18	25.52

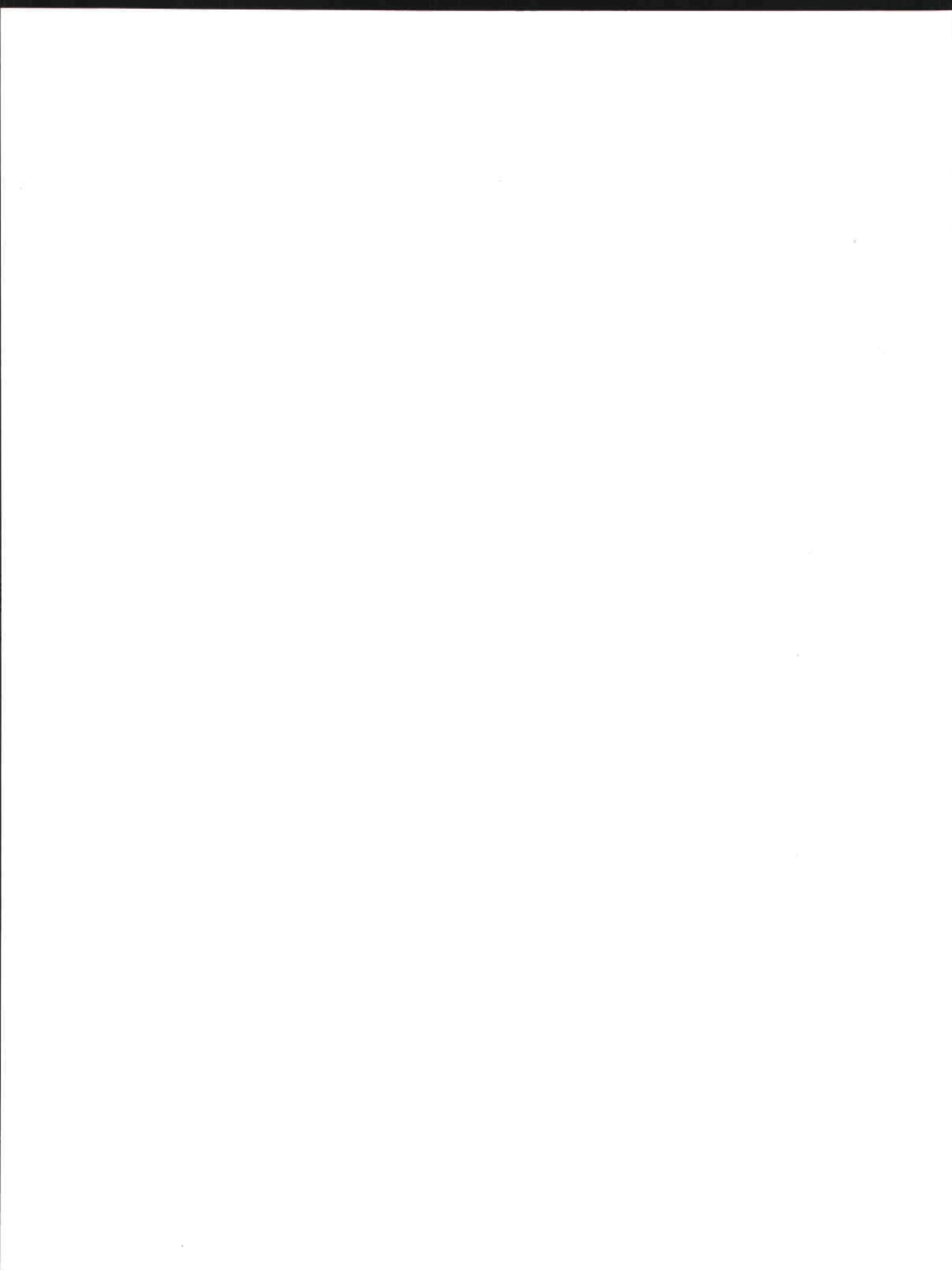
Cálculos para el mes de mayo.

$D =$ Lámina neta ($D = 150$ mm)

$ET_c = 98.21$

$$\begin{aligned} f(d) &= 0.53 + 0.0116 (150) - 8.94 * 10^{-5} (150)^2 \\ &\quad + 2.32 * 10^{-7} (150)^3 \\ &= 1.0415 \end{aligned} \quad (86)$$

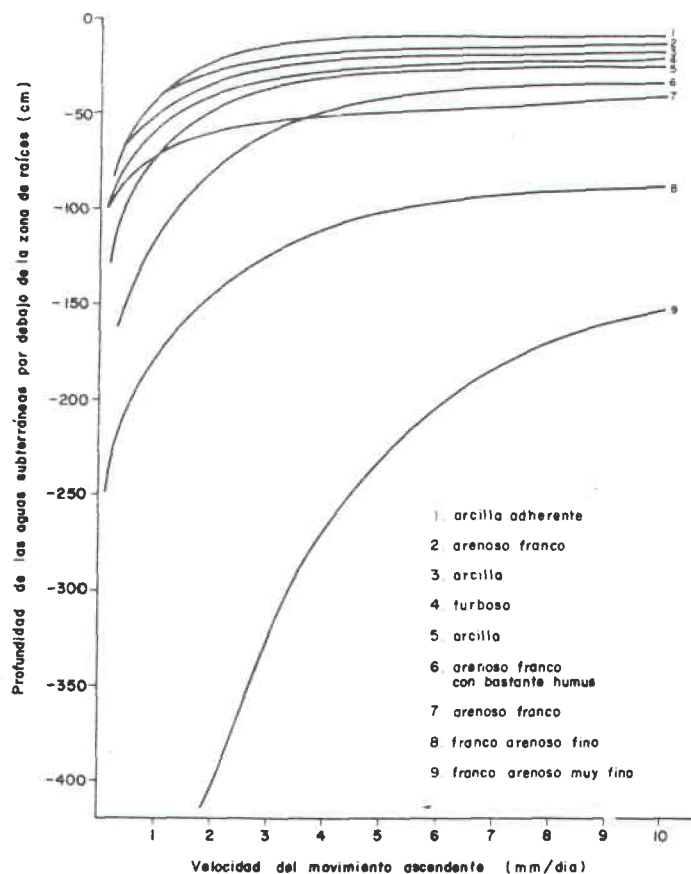
$$\begin{aligned} Lle &= 1.04 [1.25 (21.18)^{0.824} - 2.93] 10^{(0.000955 * 98.21)} \\ &= 16.21 \text{ mm} \end{aligned} \quad (87)$$



7 DETERMINACION DE LAS CONTRIBUCIONES DEL SUBSUELO

La profundidad del manto freático y el tipo de suelo influirán en la tasa de ascenso del agua desde el manto freático hasta la zona de raíces (ver lámina 3). El manto freático oscila durante el año: está más cerca de la zona radicular durante la temporada de lluvias, y desciende en el periodo seco. La contribución del agua del subsuelo al requerimiento de riego, debe considerarse para un mejor uso del agua.

Lámina 3. Contribución de las aguas subterráneas a la zona radicular, mm/día, con respecto a diferentes profundidades del manto freático y texturas del suelo, en condiciones húmedas del suelo en la zona radicular (tensión = 0.5 atm).



Fuente: Doorenbos y Pruitt (1984).

7.1. Ejemplo

Calcular la contribución mensual de agua del subsuelo en un cultivo de maíz que contiene un suelo franco-arenoso-fino, en el que el manto freático se encuentra a una profundidad de 100 cm de la zona radicular.

Solución

En la Lámina 3 se observa que el suelo franco-arenoso-fino tiene un movimiento ascendente de 5.25 mm/día.

En un mes la contribución del agua del subsuelo será:
 $5.25 \text{ mm/día} * 30 \text{ días} = 158 \text{ mm.}$

8. CALCULO DE LAS LAMINAS BRUTAS DE RIEGO EN LA PARCELA.

Para calcular las láminas brutas a nivel parcelario es necesario conocer la eficiencia con la que se maneja el sistema de riego (¿Cómo regar?). La lámina bruta se calcula:

$$Lb = \frac{Ln}{Ea} \quad (88)$$

donde:

Lb = Lámina bruta que necesita entregarse a la parcela.

Ea = Eficiencia de aplicación o manejo del agua en la parcela.

Si los sistemas se manejan adecuadamente (buena selección de gastos y tiempos de riego), las pérdidas por percolación profunda y por escurrimiento pueden minimizarse. En el cuadro 15 se presentan datos generales de eficiencias para diferentes sistemas cuando la eficiencia de aplicación no se conoce.

Cuadro 15. Eficiencia de aplicación para diferentes métodos de riego

Eficiencia de aplicación (Ea)	Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID)	Departamento de Conservación de Estados Unidos (US-SCS)
Melgas	0.60-0.75	0.58
Bordos a nivel o fajas	0.60-0.80	0.53
Surcos en contorno	0.50-0.55	
Surcos	0.55-0.70	0.57
Surcos pequeños-corrugaciones	0.5-0.7	
Subsuperficial	Arriba de 0.8	
Aspersión, clima árido seco	0.6	
Aspersión, clima moderado	0.7	0.67
Aspersión, húmedo y frío	0.8	
Arroz		0.32

3.1 Ejemplo

Calcular la lámina bruta para el riego por surcos, si la lámina neta es de 150 mm.
Del cuadro 16, $Ea = 62.5\%$

$$\begin{aligned} Lb &= \frac{150\text{mm}}{0.625} \\ &= 240\text{mm} \end{aligned} \qquad (89)$$

9. CALCULO DE LAS LAMINAS DE LAVADO DE SALES.

Cuando existe exceso de sales en la superficie del suelo, éstas pueden causar toxicidad a la planta y a la vez aumentar la fuerzas de retención con la que el suelo retiene afectando su disponibilidad para la planta, (ver anexo técnico de salinidad analizada). Por esta razón se hace necesario remover las sales de la zona radicular mediante el sobre-riego. Por lo que es necesario que el suelo tenga un buen drenaje natural o artificial. La lámina de sobre-riego que necesita aplicarse se calcula con la siguiente fórmula:

$$L_n = (ET_c - L_{le}) * \frac{1}{1 - RL} \quad (90)$$

donde:

RL = Requerimiento de lavado, (fracción).

De acuerdo con Doorenbos y Pruitt (1984) la fracción del requerimiento de lavado para suelos areno-limosos y arcillo-limosos, con lluvias pequeñas, se obtiene:

Para riego por superficie y aspersion

$$LR = \frac{CE_w}{5 CE_e - CE_w} \quad (91)$$

Para riego por goteo y aspersion con riego frecuente (diario)

$$LR = \frac{CE_w}{2 \text{Max } CE_e} \quad (92)$$

donde:

CE_w = Conductividad eléctrica del agua de riego, mmhos/cm.

CE_e = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, mmhos/cm (cuadro 16).

Max CE_e = Máxima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que un cultivo dado puede tolerar, mmhos/cm (cuadro 17).

Los efectos de la salinidad del suelo en las reducciones de los rendimientos se muestran en el cuadro 16. La salinidad del suelo se mide de acuerdo con la CE del extracto de saturación del suelo (CE_e), y se puede medir con un aparato comercial llamado Puente de Wheatstone. Obsérvese en el cuadro 16 que los cultivos forrajeros

son más tolerantes a las sales, seguidos por los cultivos extensivos, los hortícolas y, finalmente, por los frutales. Las láminas de sobre-riego que se apliquen influirán en el rendimiento y las reducciones variarán de cultivo a cultivo.

Cuadro 16. Grado de tolerancia de los cultivos a las sales según las cosechas

Cultivo	Rendimiento potencial								Max CE _d w
	100%		90%		75%		50%		
	CE _e	CE _w	CE _e	CE _w	CE _e	CE _w	CE _e	CE _w	
Cultivos extensivos									
Cebada 1/	8.0	5.3	10.0	6.7	13.0	8.7	18.0	12.0	28.0
Frijol	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	7.0
Haba	1.6	1.1	2.6	1.8	4.2	2.0	6.8	4.5	12.0
Maíz	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Algodón	7.7	5.1	9.6	6.4	13.0	8.4	17.0	12.0	27.0
Lino	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Cacahuete	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	7.0
Arroz	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	12.0
Cartamo	5.3	3.5	6.2	4.1	7.6	5.0	9.9	6.6	15.0
Sorgo	4.0	2.7	5.1	3.4	7.2	4.8	11.0	7.2	18.0
Soja	5.0	3.3	5.5	3.7	6.2	4.2	7.5	5.0	10.0
Remolacha azucarera	7.0	4.7	8.7	5.8	11.0	7.5	15.0	10.0	10.0
Trigo	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13.0	8.7	20.0
Cultivos hortícolas									
Frijol	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	7.0
Remolacha	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15.0
Brocoli	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14.0
Col	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12.0
Melón	2.2	1.5	3.6	2.4	5.7	3.8	9.1	6.1	16.0
Zanahoria	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.1	8.0
Pepino	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10.0
Lechuga	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.2	3.4	9.0
Cebolla	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	8.0
Pimiento	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	9.0

Continuación del cuadro 16

Papa	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Rábano	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	9.0
Espinaca	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15.0
Maíz dulce	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Tomate	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13.0
Cultivos forrajeros									
Alfalfa	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16.0
Cebada forrajera	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13.0	8.7	8.7
Pasto bermuda	6.9	4.6	8.5	5.7	10.8	7.2	14.7	9.8	23.0
Maíz forrajero	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	16.0
Pasto Harding	4.6	3.1	5.9	3.9	7.9	5.3	11.1	7.4	18.0
Pasto ovinillo	1.5	1.0	3.1	2.1	5.5	3.7	9.6	6.4	18.0
Centeno forrajero	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12.2	8.1	19.0
Pasto Sudán	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14.4	9.6	26.0
Gramma del norte	7.5	5.0	9.9	6.6	13.3	9.0	19.4	13.0	32.0
Trébol grande	2.3	1.5	2.8	1.9	3.6	2.4	4.9	3.3	8.0
Trébol pequeño	5.0	3.3	6.0	4.0	7.5	5.0	10.0	6.7	15.0
Trigo forrajero	7.5	5.0	9.0	6.0	11.0	7.4	15.0	9.8	22.0
Cultivos frutales									
Almendra	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.7	7.0
Manzana, pera	1.7	1.0	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0
Aguacate	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	3.7	2.4	6.0
Dátil	4.0	2.7	6.8	4.5	10.9	7.3	17.9	12.0	32.0
Higo, aceituna, granada	2.7	1.8	3.8	2.6	5.5	3.7	8.4	5.6	14.0
Uva	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12.0
Toronja	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0
Limón	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0
Naranja	1.7	1.1	2.3	1.6	3.2	2.2	4.8	3.2	8.0
Durazno	1.7	1.1	2.2	1.4	2.9	1.9	4.1	2.7	7.0
Ciruela	1.5	1.0	2.1	1.4	2.9	1.9	4.3	2.8	7.0
Fresa	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4.0
Nueces	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0

9.1 Ejemplo

Calcular el requerimiento de lavado y la lámina neta a aplicarse para el cultivo de maíz en la zona de Torreón, durante el mes de mayo si

la evapotranspiración del cultivo es de 96.1 mm (ETC = 96.1 mm) y la lluvia efectiva es de 21.2 mm (LLe = 21.2 mm). El análisis químico del lugar indica que la conductividad eléctrica del agua es 3 mmhos/cm, (ECw = 3 mmhos/cm) y la conductividad del extracto de saturación del suelo es de 7.7 mmhos/cm (ECe = 7.7 mmhos/cm).

El requerimiento de lavado se calcula obteniendo primero la CE_e del extracto de saturación para diferentes rendimientos del cultivo de maíz (cuadro 16)

CE_e = 1.7, para un rendimiento del 100%

CE_e = 2.5, para un rendimiento del 90%

CE_e = 3.8, para un rendimiento del 70%

Finalmente el requerimiento de lavado

$$\begin{aligned} RL &= \frac{3}{5 * 1.7 - 3} = 0.54 \text{ para 100\% Rendimiento} \\ &= \frac{3}{5 * 2.5 - 3} = 0.32 \text{ para 90\% Rendimiento} \\ &= \frac{3}{5 * 3.8 - 3} = 0.19 \text{ para 70\% Rendimiento} \end{aligned} \quad (93)$$

La lámina neta que se necesita aplicar para obtener un 100% de rendimiento se calcula:

$$Ln = (96.1 - 21.2) * \frac{1}{1 - 0.54} = 162.8 \text{ mm} \quad (94)$$

10 DETERMINACION DE LA FRECUENCIA DE RIEGO

La frecuencia con la que se debe aplicar el riego depende del contenido de humedad que descienda el suelo. Este nivel de humedad dependerá del estrés hídrico que pueda soportar el cultivo y de la capacidad de almacenamiento del suelo. La frecuencia de riego se calcula analíticamente o gráficamente. En el caso de que el suministro de agua provenga de presas de almacenamiento se recomienda utilizar factores de abatimiento más pequeños, ya que en el proceso de operación de la red de canales no siempre se puede suministrar el agua con oportunidad.

10.1. Ejemplo del método analítico

Calcular el intervalo de riego que es necesario aplicar a una ha de tierra cultivada de maíz en un suelo franco, dada la siguiente información:

INFORMACIÓN

HA = 200 mm/m.

Pr = 1.20 m (cuadro 1).

Abatimiento o descenso de la humedad -
disponible antes del primer riego = 80%.

Abatimiento o descenso de la humedad -
disponible que se permitirá = 50% (Cuadro 4).

Ea = 80%.

Fecha de siembra = 1 de mayo.

Fecha de cosecha = 29 de agosto.

Mes	Evapotranspiración mm (2)	Lluvia efectiva mm (3)	Necesidades de riego mm (2) - (3)
Mayo	96.1	16.4	79.7
Junio	225.0	44.4	180.6
Julio	303.8	34.9	268.9
Agosto	207.7	25.5	182.2

Cálculo:

Durante el primer riego se perdió un 80% de la humedad disponible por lo que la lámina que se aplica será:

$$Lb = HA \text{ Pr Abat}$$

$$= (200 \text{ mm/m} * 1.20 \text{ m} * 0.80) / 0.8$$

$$= 240 \text{ mm}$$

En los riegos subsecuentes se va a aplicar el riego cuando se pierda o se abata el 50% de la humedad aprovechable, por lo que se aplicará una lámina bruta de:

$$Lb = HA \text{ Pr Abat}$$

$$= (200 \text{ mm/m} * 1.20 \text{ m} * 0.50) / 0.8$$

$$= 150 \text{ mm}$$

<u>Primer riego</u>	Día 1 de mayo	Lb = 180 mm
	Riegos subsecuentes cuando se pierdan	150mm
	Necesidades de riego	NR = 79.7 mm
	Humedad disponible para junio	70.3 mm

$$\text{Necesidades de riego-junio} = 180.6 \text{ mm} / 31 \text{ días} = 5.8 \text{ mm/día};$$

$$\text{Fecha del siguiente riego} = 70.3 \text{ mm} / 5.8 \text{ mm/día} = 12 \text{ días}$$

<u>Segundo riego</u>	Día 13 de junio	Lr = 150 mm
----------------------	-----------------	-------------

$$\text{Consumo del 13 al 31 de junio} = 18 \text{ días} * 5.8 \text{ mm/día} = 104 \text{ mm}$$

$$\text{Humedad disponible para julio} = 46 \text{ mm}$$

$$\text{Necesidades de riego-julio} = 268.4 \text{ mm} / 31 \text{ días} = 8.66 \text{ mm/día}$$

$$\text{Fecha del siguiente riego} = 46 \text{ mm} / 8.66 \text{ mm/día} = 5.3 \text{ días}$$

<u>Tercer riego</u>	Día 7 de julio	Lr = 150 mm
---------------------	----------------	-------------

$$\text{Lámina riego / uso consuntivo} = \text{día de riego};$$

$$150 \text{ mm} / 8.66 \text{ mm/día} = 17.3 \text{ días}$$

<u>Cuarto Riego</u>	Día 25 de julio	Lr = 150 mm
	Consumo del 25 al 31 de julio	
	= 6 días * 8.66 mm/día =	52 mm
	Humedad disponible para agosto	98 mm

$$\text{Fecha del siguiente riego} = 98 \text{ mm} / 8.66 \text{ mm/día} = 11.3 \text{ días}$$

<u>Quinto riego</u>	Día 12 de agosto	Lr = 150 mm
---------------------	------------------	-------------

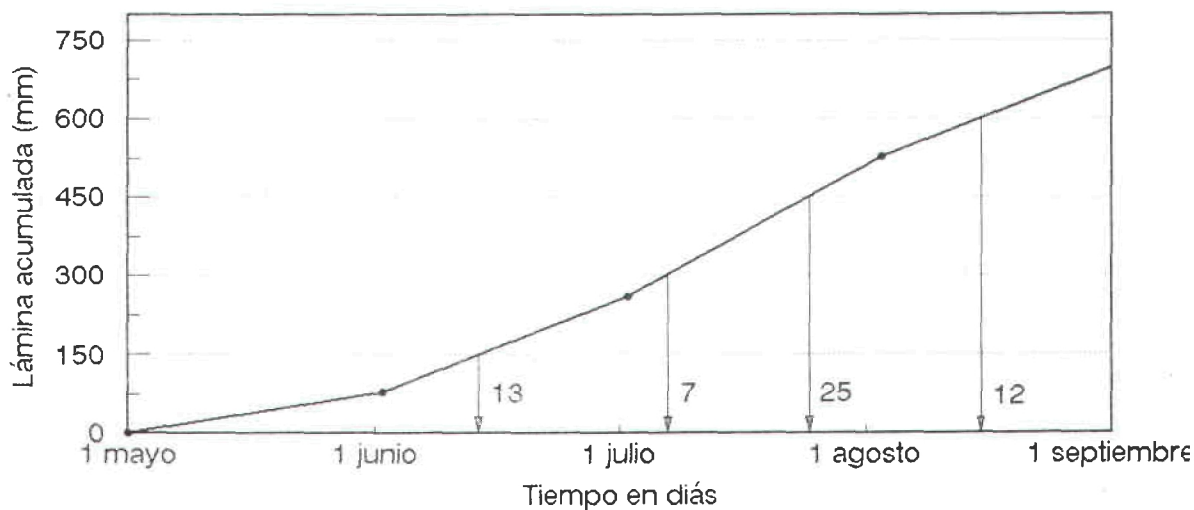
$$\text{Necesidades de riego-agosto} = 182.2 \text{ mm} / 31 \text{ días} = 5.88 \text{ mm/día}$$

Lámina riego / uso consuntivo = día de riego;
 $150 \text{ mm} / 5.88 \text{ mm/día} = 25.5 \text{ días}$

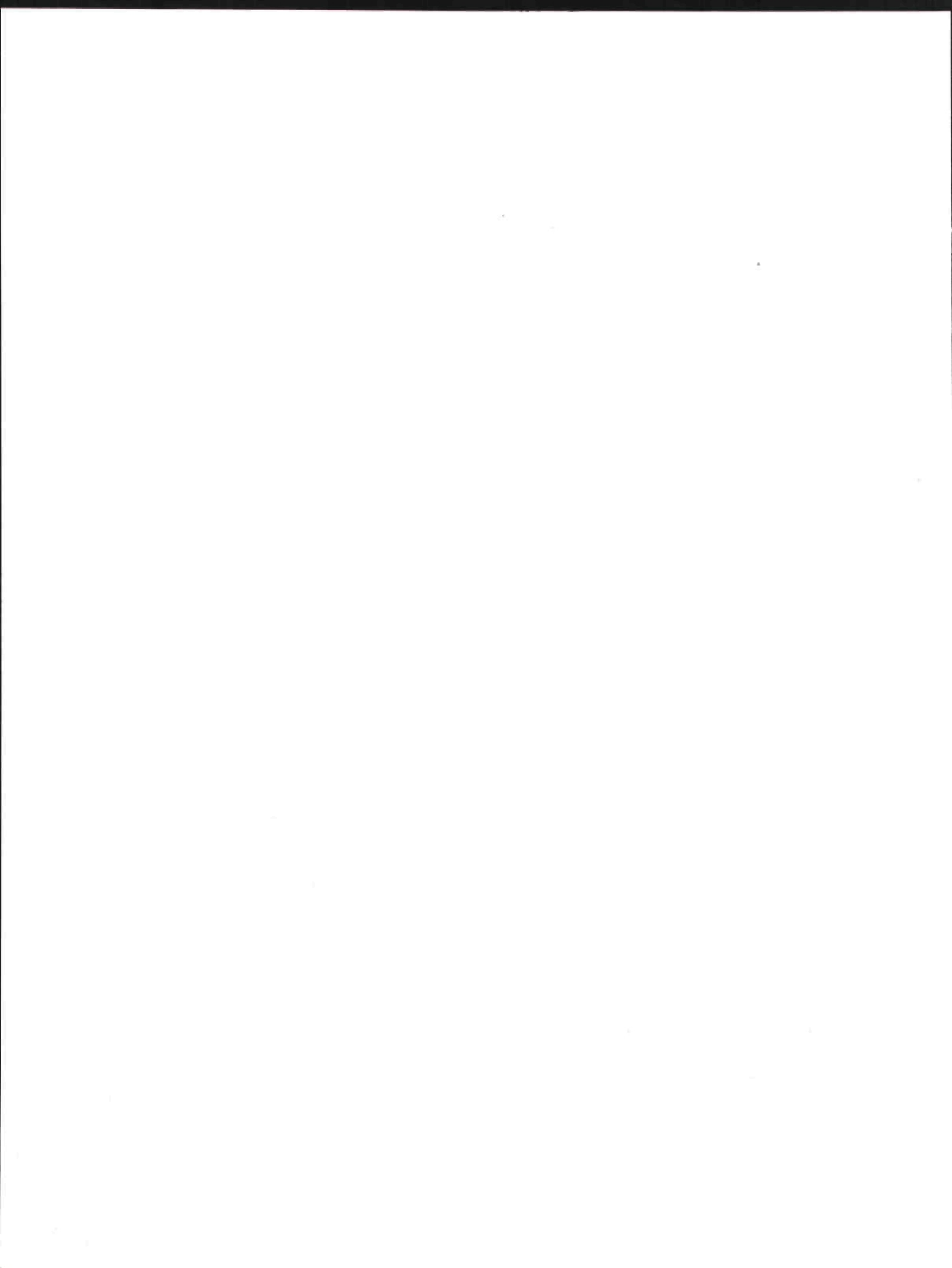
10.2. Ejemplo del método gráfico

Para calcular la frecuencia de riegos por este método es necesario graficar en papel milimétrico las necesidades de riego en el eje de las "y" y el tiempo de desarrollo en el eje de las "x". Posteriormente la lámina neta de riego se proyecta en el eje de las "y", acumulándose hasta completar sus necesidades y así definir las fechas de riego (lámina 4).

Lámina 4. Curva de consumo y definición de fechas



Primer riego	1 de mayo (presiembr)	Cuarto riego	25 de julio
segundo riego	13 de junio	Quinto riego	12 de agosto
Tercer riego	7 de julio		



11 DETERMINACION DE LA FRECUENCIA DE RIEGO UTILIZANDO INFORMACION OBTENIDA EN TIEMPOS REALES

El balance hidrico también puede utilizarse para determinar la frecuencia de riego cuando se emplea información diaria obtenida en tiempos reales. Bajo estas condiciones el riego se aplica cuando el nivel de agua en el suelo alcanza el descenso o déficit permitido. La forma de calculo del riego en tiempos reales se presentará con el siguiente ejemplo:

11.1. Ejemplo

Pronosticar cuánto y cuándo regar, para el caso en el que el suelo tiene una humedad aprovechable de 120 mm por metro de profundidad de suelo: se regará cuando se abata el 50% de la humedad (la humedad descienda un 50%), la eficiencia del riego es de 80% y se presentan la siguiente información:

Día	ET (mm)	Lluvia efectiva (mm)	Abatimiento acumulado (mm)
1	7.0	0	7.0
2	7.4	0	14.4
3	7.0	8.0	13.4
4	8.0	0	21.4
5	8.5	0	29.9
6	8.4	0	38.3
7	7.5	0	45.8
8	7.0	0	52.8
9	7.5	0	60.3
10	8.0		

Calculo:

$$L_n = HA \text{ Pr Abat} = 120 \text{ mm/mm} * 1 \text{ m} * 0.5 = 60 \text{ mm}$$

$$L_b = L_n/E_a = 60 \text{ mm} / .8 = 75 \text{ mm}$$

Solución

Se requiere regar cuando el suelo pierda 60 mm de humedad. Esta condición se alcanza el día 9, por lo que se necesita aplicar una lámina bruta de 75 mm ese día.



12 DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CON EL METODO DEL TACTO Y LA APARIENCIA

Este método es muy demandado debido a que no requiere de ningún equipo especial, aunque una buena barrena del suelo es muy útil para estimar los contenidos de humedad a profundidades mayores de 30 cm. Este método requiere de un poco de experiencia y práctica para estimar el contenido de humedad del suelo con una precisión aceptable. La humedad se estima observando las características y el aspecto del suelo cuando se analiza con la palma de la mano (cuadro 17). El lector puede ayudarse de la lámina 5 para determinar la humedad en suelos de textura gruesa, media, y fina.

La zona radicular activa para la mayoría de los cultivos es de 0.9 m. Por esta razón solamente se recomienda hacer la muestra del suelo hasta una profundidad máxima de 1.2 m. Para familiarizarse con el empleo de este método se recomienda hacer su muestra de 1 a 2 días después de una lluvia fuerte. En este punto el suelo debe tener un contenido de humedad del 100%. También se recomienda hacer la muestra al final de la temporada de cultivo, cuando el suelo este seco. El conocer su apariencia y su condición en los extremos húmedos y secos ayudará a tomar decisiones a la mitad de la temporada del cultivo. El número y el lugar de los muestreos dependen de la uniformidad del suelo y del procedimiento del riego, pero en general se recomienda hacer la muestra por lo menos en 4 lugares del terreno, insertando la barrena en incrementos de 30 cm.

12.1 Cálculo del estado de humedad del suelo

El siguiente procedimiento ilustra los cálculos:

1. Suelo: franco limoso.
2. Humedad del suelo a capacidad de campo: $230\text{mm/m} = 69\text{ mm/ } 30\text{ cm}$.
3. Las muestras del suelo y los cálculos se presentan en el siguiente cuadro.

Profundidad del suelo (cm)	Humedad aprovechable (mm)	Déficit de humedad (%)	Agua necesaria para llevar el suelo a capacidad de campo (mm)
0-15	35	75	26
15-30	35	75	26
30-60	69	50	34
60-90	69	25	17
90-120	69	25	17

Cuadro 17. Guía para estimar la humedad del suelo por el método del tacto y la apariencia del suelo

Humedad que queda en el suelo	Tacto y aspecto de la humedad del suelo			
	Gruesa	Ligeramente gruesa	Media	Fina y muy fina
0 a 25%	Seca, partículas sueltas, se disgrega entre los dedos	Seca, suelta, se disgrega entre los dedos	Seca y polvorienta, algunas veces ligeramente encostrada, pero se quiebra fácilmente	Dura, muy reseca, algunas veces tiene terrones sueltos en la superficie del suelo
25 a 50%	Seca en apariencia, no se puede formar una bola al apretarla	Tiene un aspecto seco, no se forma una bola al apretarla	Algo terrosa, pero se mantiene junta cuando se le aplica presión	Relativamente moldeable, se puede formar una bola cuando se le aplica presión
50 a 75%	Seca en apariencia, se puede formar una bola muy débil al amasarse	Tiende a hacerse una bola cuando se le aplica presión, pero rara vez se mantiene junta	Se forma una bola algo plástica, se desliza un poco en la mano al aplicársele presión	Se forma una bolita ó pequeño cilindro cuando se amasa entre los dedos.
75%	Tiende a pegarse ligeramente en la mano, algunas veces forma una bola muy débil al apretarse	Se forma una bola muy débil, se rompe fácilmente y no se resbala al apretarse	Se forma una bola, es muy moldeable, se resbala ligeramente cuando se le aplica presión	Se forman cilindros fácilmente entre los dedos, se siente pegajosa al tacto
100%	Al apretarse no suelta agua, sin embargo deja una huella de humedad en la mano	Al apretarse y exprimirse no suelta agua, pero deja una huella húmeda en la mano	Al apretarse no suelta agua, pero deja una huella húmeda en la mano	Al apretarse no suelta agua, pero queda una huella húmeda en la mano

LAMINA 5. Método del tacto y del aspecto para determinar la humedad en los suelos de textura gruesa (franco-arenosa y arena francosa)



0 a 25% de humedad disponible
Seco, suelto fluye entre los dedos.



25 a 50% de humedad disponible
De aspecto seco, no forma una bola cuando se le aplica presión.



50 a 75% de humedad disponible
Se forma una bola suelta cuando se le aplica presión, no se mantiene junto aún cuando es fácilmente manajable.



50 a 75% de humedad disponible
Se forma una bola débil, se rompe fácilmente, no se resbala.

LAMINA 5. (Continuación) Método del tacto y del aspecto para determinar la humedad en los suelos de textura media (francos y francos limosos)



0 a 25% de humedad disponible
Se desmorona fácilmente, tiende a mantenerse junto cuando se le aplica presión con la mano.



25 a 50% de humedad disponible
Suceptible de desmoronarse pero se mantiene junto en la mano cuando se le aplica presión.



50 a 75% de humedad disponible
Se forma una bola fácil ligeramente plastica, se resbala suavemente - cuando se le presiona.



50 a 75% de humedad disponible
Se forma una bola que se resbala con facilidad.

LAMINA 5. (Continuación) Método del tacto y del aspecto para determinar la humedad en los suelos de textura moderadamente fina (franco-arcilloso y franco-arcillo-limoso)



0 a 25% de humedad disponible
Se desmorona fácilmente, se mantiene junto, pero se amasa con dificultad y se rompe con facilidad.



25 a 50% de humedad disponible
No se desmorona, se moldea fácilmente; se forma una bola cuando se le aplica presión.



50 a 75% de humedad disponible
Se forma una bola fácilmente; se forman cilindros entre los dedos. Algo pegajoso al tacto.



50 a 75% de humedad disponible
Se forman cilindros fácilmente. Es pegajoso al tacto.

13 DETERMINACION DE CUANDO Y CUANTO REGAR POR MEDIO DE TENSIOMETROS

Los tensiómetros se recomiendan para monitorear la humedad del suelo y determinar cuándo y cuánto regar en suelos de textura gruesa tales como: arenosa, arena francosa y franco arenoso, (ver cuadro 18). Los tensiómetros miden la tensión con la cual el suelo retiene agua, por lo que indirectamente miden la humedad del suelo, (ver cuadro 19). Los tensiómetros miden la humedad que queda en el suelo en un momento dado, es decir miden la humedad en tiempos reales. Para que los tensiómetros funcionen bien deben prepararse adecuadamente, deben colocarse en lugares representativos y deben estar correctamente instalados.

Cuadro 18. Capacidad de almacenamiento del suelo y balances mínimos permitidos para diferentes clases de texturas y cultivos cuando se utilizan tensiómetros.

Clasificación del suelo	Humedad disponible (cm /30cm de suelo)	Balance mínimo permisible (cm / 30 cm de suelo)		
		Papas	Maiz, granos	Pastos, alfalfa
Arenas finas	2.5	1.8	1.3	1.1
Arena francosa	2.8	1.8	1.5	1.1
Franco arenosa	3.6	2.0	1.8	1.5
Franco arenosa fina	4.6	3.0	1.3	1.8

13.1 Preparación de los tensiómetros.

El tensiómetro consiste en un tubo lleno de agua equipado con un manómetro en la parte superior y una cápsula de cerámica en la parte inferior (ver lámina 6). Los tensiómetros se preparan llenando el tubo con agua y cerrándolo herméticamente con un tapón. Algunos fabricantes proporcionan una bomba para extraer el aire que se encuentra dentro del tubo antes de taparlo. Es muy probable que al llenarse el tensiómetro, no marque cero debido a que la gravedad ejerce una tensión sobre la columna de agua. En general, cuando los tensiómetro son nuevos marcarán 3 centibares por cada 30 cm de su longitud, por lo que se debe reducir la lectura antes utilizarlos. La escala del manómetro marca de 0 a 100 centibares.

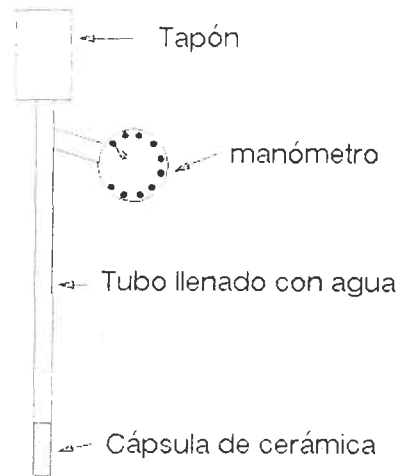
13.2. Colocación del tensiómetro

Debido a que la cápsula de cerámica es la que mide la humedad del suelo es muy pequeña, hay que colocar varios tensiómetros a diferentes profundidades del suelo. Al conjunto de tensiómetros se le llama "estación de tensiómetros". Se recomienda tener 3 tensiómetros por estación, instalándose a 15 cm, 45 cm y 75 cm de profundidad. Se recomienda colocar 4 estaciones por terreno de 40 hectareas.

Cuadro 19. Humedad disponible (cm de agua en 30 cm de suelo) contra lecturas del tensiómetro

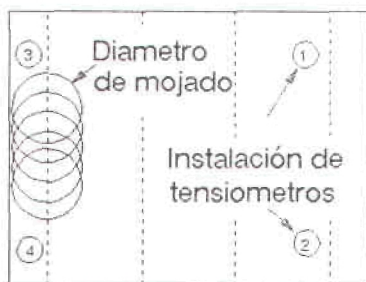
Textura del suelo	Arena fina	Arena-francosa	Franco-arenoso	Franco-arenoso fino
Tension de humedad del suelo (cb)	(2.5cm/30cm)	(2.8cm/30cm)	(2.5cm/30cm)	(2.8cm/30cm)
0	2.5	2.8	3.6	4.6
5	2.5	2.8	3.6	4.6
10	2.3	2.8	3.6	4.6
15	2.0	2.3	3.0	4.6
20	1.8	2.0	2.8	4.1
25	1.5	1.8	2.5	3.8
30	1.3	1.8	2.3	3.3
35	1.0	1.5	2.3	3.0
40	1.0	1.5	2.0	2.8
45	1.0	1.3	2.0	2.5
50	0.8	1.3	1.8	2.5
55	0.8	1.0	1.8	2.3
60	0.8	1.0	1.5	2.0
65	0.5	1.0	1.5	2.0
70	0.5	0.8	1.5	1.8
75	0.5	0.8	1.3	1.8

Lámina 6. Componentes de un tensiómetro

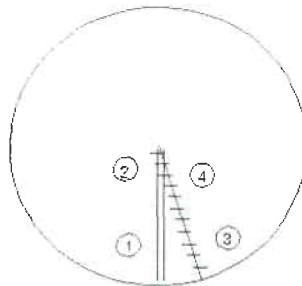


En los sistemas de riego por surcos, aspersión portátil, movimiento lateral y cañón, las estaciones se deben colocar en los extremos de los terrenos para monitorear el riego (ver lámina 7). Para los sistemas de riego de pivote central la estación 1 y 3 deben colocarse de 60 a 75 m del margen de afuera del terreno y las estaciones 2 y 4 de 60 a 75 m de centro del pivote. Hay que asegurarse que las estaciones queden lejos de donde se estaciona el pivote para que no les escurra agua. Las posiciones mostradas en la lámina 7a y 7b deben usarse cuando todo el terreno del pivote central tenga el mismo cultivo y suelos uniformes. Si el terreno tiene 2 cultivos separados o si existen grandes distancias entre el tipo de suelos, lo correcto es usar el indicado en la lámina 7c.

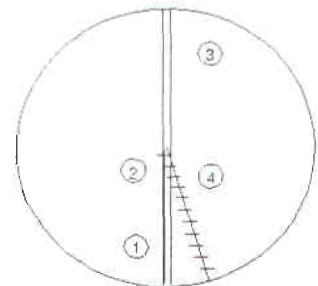
Lámina 7. Localización de los tensiómetros



A) Aspersión portátil



B) Pivote central (un sólo cultivo)



C) Pivote central (dos cultivos)

13.3 Procedimiento de instalación

El equipo que se necesita es:

1. Barrena.
2. Varilla de metal con una longitud mínima de 1.2 m, que tenga el mismo diámetro que la cápsula del tensiómetro y una forma redondeada parecida a la de la cápsula de cerámica.
3. Martillo de madera.
4. Banderillas.
5. Cubeta con agua.
6. Una botella con agua con una salida que tenga un tubo en forma de spaguetti.
7. Líquido inhibidor de algas.
8. Tensiómetro (4 juegos para cada terreno. Cada uno de ellos debe tener 3 tensiómetros de diferentes longitudes).

Antes de llevar los tensiómetros al campo hay que seguir el siguiente procedimiento:

1. Verifique que los componentes del tensiómetro estén en buenas condiciones: tubos empaques, cápsulas, manómetros. Reponga los componentes que no estén en buenas condiciones.
2. Lea las instrucciones del fabricante y arme los tensiómetros si es necesario.
3. Llene cada tubo con agua y con el inhibidor de algas.
4. Evacúe el aire que este dentro del tensiómetro según lo indique el fabricante.
5. Coloque los tensiómetros en una cubeta con agua. La cápsula del tensiómetro debe permanecer bajo el agua o debe estar envuelta con un trapo húmedo y con una bolsa de plástico hasta que sean instalados.
6. Si se puede ajustar el manómetro, ajústelo manteniendolo en posición vertical con la cápsula de cerámica sumergida en el agua.

Procedimiento de campo:

1. Lleve los tensiómetros al campo. Deben encontrarse sumergidos en una cubeta llena de agua o envueltos en un trapo húmedo que a su vez debe estar envuelto en una bolsa de plástico.
2. Utilice la barrena para hacer un hoyo en el área de cultivo. Este debe hacerse a una profundidad que tenga 10 cm menos que la profundidad que ocupe la cápsula de

- cerámica del tensiómetro.
3. Termine el hoyo con la varilla de metal utilizando el martillo de madera.
 4. Coloque el tensiómetro en el hoyo, empujándolo hasta el fondo y asegurándose de que entre ajustadamente, de otra manera las lecturas que se tomen serán erróneas.
 5. Compacte el suelo alrededor del tensiómetro para que le dé fuerza al tubo. El tubo debe quedar ligeramente elevado.
 6. Identifique la profundidad del tensiómetro con etiquetas a prueba de agua.
 7. Coloque las banderillas cerca de cada estación para que se localicen una vez que crezca el cultivo. Se recomienda colocarlas a orillas del terreno.
 8. Instale los tensiómetros unos días después de la plantación para permitir que las raíces del cultivo crezcan. Si se instalan después las lecturas registradas en el manómetro no serán representativas.
 9. Algunos tensiómetros rompen la succión cuando el manómetro registra arriba de 50 centibares. Esta condición se identifica observando que el nivel de agua del tubo ha bajado y que se ha formado una bolsa de aire dentro de el tubo por arriba del manómetro. Si la tensión se rompe por debajo de 50 centibares es necesario inspeccionar el estado de los empaques. Los empaques tienen forma de anillo y se encuentran en los extremos de los tensiómetros. Para poner los tensiómetros otra vez en servicio rellene el tubo del tensiómetro con agua, en el mismo lugar y evacúe el aire como lo indique el fabricante.
 10. Si el nivel de agua baja por debajo del manómetro asegúrese de remover el aire del mismo, de otra manera las lecturas no serán precisas.

13.4 Ejemplo

Para ejemplificar cuándo y cuánto regar con la ayuda de los tensiómetros, se describirá el siguiente ejemplo:

Asuma que las lecturas de los tensiómetros fueron tomadas el 30 de julio durante el espigamiento del maíz. El terreno (60 has) se riega con un pivote central, aplicándose un caudal de 50 LPS. El surtidor generalmente aplica una lámina de 2.5 cm en una revolución. Cada revolución tarda 69 hrs. El suelo es de textura franco arenosa. El surtidor desea reservar 1.5 cm de espacio en el suelo para captar una posible lluvia.

Información de campo:

1. Llenar la información de la hoja de cálculo (mostrada en la siguiente página).
2. Encontrar en el cuadro 18 las características de la textura.
3. Encontrar la profundidad radicular del cultivo (cuadro 1).
4. Calcular la humedad disponible total, multiplicando la humedad disponible (cuadro 18) por la profundidad radicular (cuadro 1).
5. Registrar las lecturas del tensiómetro para cada profundidad del suelo en la hoja de cálculo.
6. Convertir la lectura de cada tensiómetro a humedad disponible (cm de agua /30 cm del suelo, cuadro 19)
7. Calcular la humedad actual promedio para cada posición.

Pronostico del riego (ver hoja de cálculo).

1. Encuentre el balance permitido para el cultivo (Abat = 50%, cuadro 4).
2. Transfiera la humedad actual del paso 6.
3. Calcule la humedad restante que la planta utiliza.
4. Calcule la cantidad de agua removida del suelo, restando la la humedad actual de la capacidad de almacenamiento total.
5. Reserve una parte de la capacidad de almacenamiento del suelo para captar una posible lluvia. Se recomienda dejar 2.5 cm cuando el sistema radicular este completamente desarrollado.
6. Encuentre la ET promedio o utilice predicciones reportadas por el consultor.
7. Registre la lámina neta aplicada durante el riego.
8. Determine el primer día que se debe regar para evitar perdidas por escurrimiento y deje espacio para captar una posible lluvia (no mas temprano que esta fecha). Esta fecha se calcula sumando la lámina neta de aplicación (paso 7) con la lámina de reserva para captar una lluvia (paso 5) y restándole la lámina de agua removida del suelo (paso 4). Este resultado se divide por ET (paso 6).
9. Determine la fecha a la cual es posible retardar el riego sin causar estrés al cultivo, (no mas tarde que esta fecha). Esta fecha se calcula dividiendo la humedad restante que utiliza el cultivo (paso 3) por la tasa diaria de ET (paso 6).

Hoja de calculo
Información de campo

Identificación de campo NW-1 Fecha 7/30
 Cultivo Maíz Fase de crecimiento Espigamiento
 Textura del suelo Franco arenosa Cuadro 18
 Humedad disponible 36 mm/30 cm de suelo Cuadro 18
 Raíz radicular estimada 1.25 m Cuadro 18
 Humedad disponible total 150 mm

Mediciones de humedad del suelo

Profundidad del sensor	Posición 1		Posición 2		Posición 1		Posición 2	
	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4
	Lectura	Humedad disponible (cm)	Lectura	Humedad disponible (cm)	Lectura	Humedad disponible (cm)	Lectura	Humedad disponible (cm)
15	35	2.3	15	3.0	25	2.5	25	2.5
45	30	2.3	20	2.8	25	2.5	20	2.8
75	15	3.0	15	3.0	10	3.6	10	3.6
*	10	4.2	10	4.2	10	4.2	10	4.2
		11.8		13.0		12.8		13.1
	Pos. 1	(11.8+13.0)/2	12.4	Pos. 2	(12.8+13.1)/2	13.0		

* Como la profundidad radicular es de 1.25 m y la lectura que se hace a 75 cm de profundidad es de 10.0, se asume que para el resto del suelo (de 90 cm a 1.25 m) la lectura es igual.

Información del manejo del agua

	Posición 1	Posición 2
1. Balance mínimo en la zona radicular (Cuadro 19) 150 mm*0.5 = 75 mm	75 mm	75 mm
2. Humedad disponible actual	124 mm	130 mm
3. Agua que queda en el suelo (#2-#1)	49 mm	55 mm
4. Agua removida de la zona radicular (HD-#2)	26 mm	20 mm
5. Capacidad del suelo reservado para una lluvia	30 mm	30 mm
6. ET estimada (diaria)	9 mm	9 mm
7. Lámina de riego	25 mm	25 mm
8. Regar no más temprano que (#7+#5-#4)/#6	3 días	4 días
9. Regar no más tarde que (#3/#6)	5 días	6 días

Si se considera que el pivote tarda 3 días en dar una vuelta, se recomienda empezar el riego el día 2 o el día 3, de esta manera la última posición se regaría el día 5 ó el 6.

14 DETERMINACION DE CUANDO Y CUANTO REGAR POR MEDIO DE LOS BLOQUES DE YESO

Los bloques de yeso se recomiendan para monitorear el agua en suelos de textura fina tales como: franco limoso, limo, franco arcillo limoso, franco arcillo arenoso, franco arcilloso, franco y franco arenoso (ver cuadro 20).

Los bloques trabajan bien en suelos de textura fina porque el tamaño de las partículas es muy parecido al de los bloques de yeso. El bloque tiene como base una malla de alambre muy fino que le sirve de armazón y sobre la cual se incrustan dos cables. Cuando las puntas del extremo de los cables se insertan en dos pequeños hoyos del medidor de resistencia y se aprieta el botón izquierdo, se registra una lectura (ver lámina 8). Los bloques de yeso funcionan bajo el principio de que los cambios de humedad producen cambios en las propiedades eléctricas del suelo.

Cuadro 20. Capacidad del almacenamiento del suelo y balances mínimos permitidos para diferentes clases de texturas y cultivos cuando se utilizan bloques de yeso

Clasificación de textura del suelo	Numero de textura	Capacidad de agua disponible	Papas	Frijoles, maiz, sorgo, soya, granos pequeños	Pasto, alfalfa
Franco arcillo arenoso	1	5.0	3.3	2.5	3.0
Franco arcillo limoso	2	4.5	3.0	2.3	2.8
Franco arcilloso	3	4.5	3.0	2.3	2.8
Franco, muy fino, franco arenoso con subsuelo arcillo limoso	4	5.0	3.3	2.5	3.0
Franco, muy fino, franco arenoso con subsuelo franco o franco arenoso	5	6.4	4.1	3.3	3.8

Los cambios de humedad en el suelo se transmiten al bloque de yeso donde los registra el medidor de resistencia (tipo boyoucos). La relación entre la resistencia registrada por el medidor y el contenido de humedad del suelo se muestra en el cuadro 21.

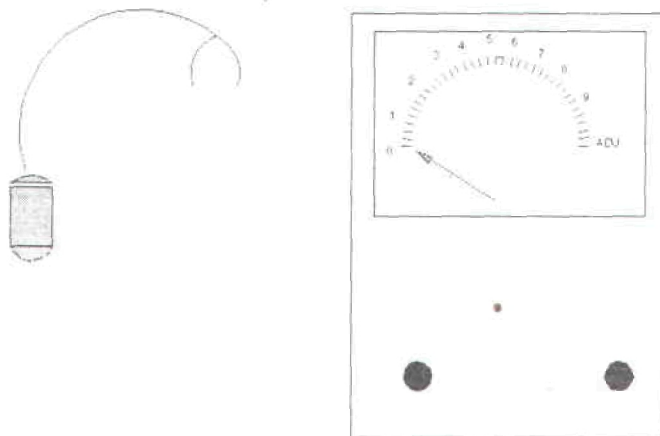
14.1 Preparación de los bloques de yeso

Los bloques de yeso se deben mojar en una cubeta de agua de 1 a 2 horas para posteriormente secarlos al aire por 24 horas. Este ciclo, de mojado de 1 a 2 horas y de secado por 24 horas, debe repetirse 2 o 3 veces antes de instalarlos. Esto permite que se remueva el aire del bloque y que las lecturas sean correctas.

14.2 Colocación de los bloques de yeso

Se recomienda colocar 3 bloques de yeso por estación, instalándolos a profundidades de 15 cm, 45 cm y 75 cm. Al conjunto de 3 bloques se le llama estación. Se recomienda colocar 4 estaciones por terreno de 40 has. Para monitorear el riego en los sistemas de riego por surcos, aspersión portátil, movimiento lateral y cañón, las estaciones se deben colocar en los extremos de los terrenos, al igual que se colocaron los tensiómetros, (ver lámina 7). Para los sistemas de riego de pivote central las estaciones 1 y 3 deben colocarse de 60 a 75 m del margen de afuera del terreno y las estaciones 2 y 4 de 60 a 75 m de centro del pivote. Hay que asegurarse que las estaciones queden lejos de donde se estaciona el pivote. Las posiciones mostradas en las láminas 7a y 7b deben usarse cuando todo el terreno del pivote central tenga el mismo cultivo y suelos uniformes. Si el terreno tiene 2 cultivos separados o si existen grandes distancias entre el tipo de suelos, lo mas apropiado es usar lo indicado en la lámina 7c.

Lámina 8. Bloque de yeso y medidor de resistencia



Cuadro 21. Humedad disponible (cm de agua en 30 cm de suelo) contra lecturas de los bloques de yeso

Textura del suelo		cm de agua/ 30 cm de profundidad del suelo				
Bloque escala nueva	Bloque escala vieja	1	2	3	4	5
10.0	200	5.1	4.6	4.6	5.1	6.4
9.5	190	5.1	4.6	4.3	5.1	6.4
9.0	180	5.1	4.6	4.3	5.1	6.4
8.5	170	4.8	4.3	4.1	4.8	5.8
8.0	160	4.3	4.1	3.8	4.6	5.6
7.5	150	4.1	3.8	3.6	4.6	5.3
7.0	140	3.8	3.6	3.3	4.3	5.1
6.5	130	3.6	3.3	3.3	4.1	4.8
6.0	120	3.3	3.0	3.0	3.8	4.6
5.5	110	3.0	3.0	3.0	3.8	4.6
5.0	100	2.8	2.8	2.8	3.6	4.3
4.5	90	2.5	2.5	2.8	3.3	4.1
4.0	80	2.3	2.3	2.5	3.0	3.8
3.5	70	2.0	2.3	2.3	2.8	3.6
3.0	60	1.8	1.8	2.3	2.5	3.0
2.5	50	1.5	1.3	1.8	2.3	2.5
2.0	40	1.3	0.8	1.3	1.8	2.0
1.5	30	0.8	0.5	1.0	1.0	1.3
1.0	20	0.0	0.3	0.3	0.5	0.8
0.5	10	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3
0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

14.3 Procedimiento de instalación de los bloques de yeso

El equipo necesario es:

1. Una barrena con un diámetro de 2 cm.
2. Una varilla de metal con diámetro de 1.2 cm, que tenga una muesca a 1 cm del final.
3. Listones.
4. Banderas.
5. Cubeta con agua.
6. Medidor de resistencia.
7. Una pala chiquita.
8. Bloques de yeso (12 por terreno).

Procedimiento de campo

1. Moje los bloques de 1 a 2 horas antes de su instalación (esto debe hacerse después de darse los ciclos de mojado y secado previos a la instalación). Ajuste el medidor de resistencia presionando su botón derecho (la aguja debe coincidir con la marca ADJ). Verifique que los bloques estén en buenas condiciones, insertando las puntas del cable en el medidor. Si el bloque está en buenas condiciones deberá marcar 10.0, en caso contrario el bloque hay que desecharlo.
2. Utilice la barrena para hacer un hoyo en el campo del cultivo. Los hoyos deben hacerse a profundidades de 15, 45 y 75 cm.
3. Vierta un poco de agua en el hoyo para humedecer el fondo del pozo.
4. Inserte las puntas del bloque en la muesca de la varilla de aluminio. Utilice la varilla para presionar firmemente el bloque contra el fondo del pozo. **Un buen contacto entre el suelo y el bloque es esencial para obtener una buena lectura.**
5. Rellene el pozo con tierra poco a poco y apisonela con la pala. Asegúrese de que el suelo esté bien compactado alrededor. Los bloques deben tener un espacio de 30 cm entre cada estación.
6. Con los listones identifique la profundidad del pozo. Otra manera de hacerlo es hacer nudos al cable (un nudo representa 15 cm de profundidad, 2 nudos 45 cm y 3 nudos 75).
7. Coloque las banderillas cercas de cada estación para que puedan localizarse cuando el cultivo haya crecido. Se recomienda colocar las banderillas en la orillas del terreno.
8. Instale los bloques días después de la plantación. Si se instalan más tarde las lecturas no serán representativas.
9. Verifique los bloques inmediatamente después de la instalación. Estos deben marcar una lectura cercana a 10.

14.4 Ejemplo

Para ejemplificar cuándo y cuánto regar con la ayuda de los bloques de yeso, se utilizará el siguiente ejemplo:

Asuma que las lecturas de los bloques de yeso se tomarón el 30 de julio durante el espigamiento del maíz. El terreno (40 has) se riega por surcos y el suelo es de textura franco-limosa con

subsuelo franco. Aplicándose un caudal de 50 LPS, y una lámina promedio de 6.5 cm de agua, todo el terreno se riega en 6 días. Hay que dejar 3 cm de espacio en el suelo para almacenar una posible lluvia.

SOLUCION:

1. Encontrar la profundidad de raíces ($Z_r = 1.25$ m, cuadro 1).
2. Encontrar la humedad aprovechable para la textura mas representativa del terreno ($HD = 6.4$ cm/30 cm de suelo, cuadro 20).
3. Calcular la humedad que el suelo puede retener, multiplicando la humedad aprovechable por la profundidad radicular del cultivo:
 $HD = 1.25m * 64 \text{ mm} / 0.3 \text{ m} = 267 \text{ mm}.$
4. Registre la lectura del bloque para cada profundidad y para cada estación.
5. Convierta la lectura del bloque de yeso a agua restante en el suelo (cm de agua por cada 30 cm de profundidad de suelo), utilizando el cuadro 21.
6. Calcule la humedad actual para cada estación.

Pronostico del riego (ver hoja de cálculo).

1. Encuentre el balance permitido para el cultivo ($Abat = 50\%$, cuadro 4).
2. Transfiera la humedad actual del paso 6.
3. Calcule la humedad restante que utiliza la planta.
4. Calcule la cantidad de agua removida del suelo, restando de la humedad actual la capacidad de almacenamiento total.
5. Reserve una parte de la capacidad de almacenamiento del suelo para captar una posible lluvia. Se recomienda dejar 2.5 cm cuando el sistema radicular esté completamente desarrollado.
6. Encuentre la ET promedio o utilice predicciones reportada por el consultor.
7. Registre la lámina neta aplicada durante el riego.
8. Determine el primer día que se debe regar para evitar que se llene la zona radicular y se realice pérdidas por escurrimiento, (no más temprano que esta fecha). Esta se calcula sumando la lámina neta de aplicación (paso 7) con la lámina reservada para captar una lluvia (paso 5) y restandole la lámina de agua removida (paso 4). El resultado se divide por ET (paso 6).
9. Determine la fecha más tarde que se puede regar sin causar estrés en el cultivo. (no más tarde que esta

fecha). Esta fecha se encuentra dividiendo la humedad restante que es utilizable por el cultivo (paso 3) por la tasa diaria de ET (paso 6).

Hoja de cálculo

Información de campo

Identificación de campo NW-2 Fecha 7/30
 Cultivo Maíz Fase de crecimiento Espigamiento
 Textura del suelo Franco (5) Cuadro 20
 Humedad disponible 64 mm/30 cm de suelo Cuadro 20
 Raíz radicular estimada 1.25 m Cuadro 1
 Humedad disponible total 267 mm

Mediciones de humedad del suelo

Profundidad del sensor	Posición 1		Posición 2		Posición 3		Posición 4	
	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4
	Lectura	Humedad disponible (cm)	Lectura	Humedad disponible (cm)	Lectura	Humedad disponible (cm)	Lectura	Humedad disponible (cm)
15	1.5	1.3	5.0	4.3	6.0	4.6	6.5	4.8
45	3.5	3.6	2.5	2.5	3.5	3.6	4.0	3.8
75	10.0	6.4	10.0	6.4	10.0	6.4	10.0	6.4
*	10.0	7.5	10.0	7.5	10.0	7.5	10.0	7.5
		18.8		20.7		22.1		22.5
	Pos. 1	(18.8+20.7)/2		19.8	Pos. 2	(22.1+22.5)/2		22.3

* Como la profundidad radicular es de 1.25 m y la lectura que se realiza a 75 cm de profundidad es de 10, por lo que se asume que para el resto del suelo (de 90 cm a 1.2 m) la lectura es la misma.

Información del manejo del agua

	Posición 1	Posición 2
1. Balance mínimo en la zona radicular (cuadro 19) 267 mm * 0.5 = 133 mm.	133 mm	133 mm
2. Humedad disponible actual.	198 mm	223 mm
3. Agua que queda en el suelo (#2-#1).	65 mm	90 mm
4. Agua removida de la zona radicular.	69 mm	44 mm
5. Capacidad del suelo reservado para una lluvia.	30 mm	30 mm
6. ET estimada (diaria).	9 mm	9 mm
7. Lámina de riego	65 mm	65 mm
8. Regar no más temprano que (#7+#5-#4)/#6	3 días	6 días
9. Regar no más tarde que (#3/#6)	7 días	10 días

En este ejemplo, hay que considerar que el riego tarda 6 días en moverse de un extremo del terreno al otro. Por esta razón se debe empezar antes del día 8 para que la posición 2 no se riege más allá del día 14.

15 DETERMINACION DE CUANDO Y CUANTO REGAR POR MEDIO DEL METODO GRAVIMETRICO

Este método consiste en realizar muestreos directos del suelo para determinar su contenido de humedad.

15.1 Equipo necesario

1. Latas de aluminio que se utilizarán para secar las muestras.
2. Balanza con capacidad de 200 g. y con una precisión de 0.01 g.
3. Horno de secado capaz de mantener una temperatura de 105 a 115°C.
4. Termómetro para introducirlo en horno.

15.2 Procedimiento

1. Obtenga una muestra de un lugar representativo y colóquela en una lata de aluminio. Tape y pese la muestra con la lata.

$$PSA = \text{Peso de la lata} + \text{suelo} + \text{agua}$$

(Se recomienda hacer el muestreo de 4 lugares del terreno, y se hace la muestra de 3 profundidades por lugar).

2. Coloque la lata con la muestra de suelo en el horno. La temperatura debe mantenerse entre 105 y 115°C. Hay que dejar la lata en el horno hasta que alcance un peso constante, lo que se logra por lo general en un periodo de 24 horas.
3. Saque la lata del horno, espere a que se enfríe y pesela con la tapa puesta.

$$PSD = \text{Peso de la lata} + \text{suelo}$$

4. Vacíe la lata, límpiela y después pesela.

$$PL = \text{Peso de la lata}$$

5. El contenido gravimétrico (contenido de agua con base en el peso) se calcula:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{PSA - PSD}{PSD - PL} * 100$$

6. Una alternativa adicional para secar el suelo en forma más rápida es la utilización de un micro horno de ondas. La muestra del suelo se seca poniéndola en un plato de plástico y metiéndolo en el micro horno. El plato con el suelo se debe secar en tiempos alternados de 20 a 30 s y de 30 a 40 s. Las alternancias permiten evaporar el agua residual sin cambiar las características del suelo. Después de 4 a 5 ciclos, la muestra se debe pesar. Si el peso se mantiene constante después de dos mediciones, la muestra se ha secado.
7. Para obtener el contenido de humedad con base en el volumen, hay que multiplicar el % de humedad por la densidad aparente de la muestra (ver capítulo 3 para mayor información).

15.3 Ejemplo

Calcular la lámina de riego que se necesita aplicar para llevar el suelo a capacidad de campo, dada la siguiente información.

$$\theta_{cc} = 0.33$$

$$\theta_{PMP} = 0.21$$

Profundidad del suelo. (cm)	Peso de la lata. (g)	Peso de la muestra de suelo + lata. (g)	Peso del suelo + lata después del secado. (g)	Densidad aparente (g/cc)
0-30	30	270	233	1.35
30-60	32	275	239	1.40
60-90	34	280	240	1.40
90-120	30	295	245	1.45

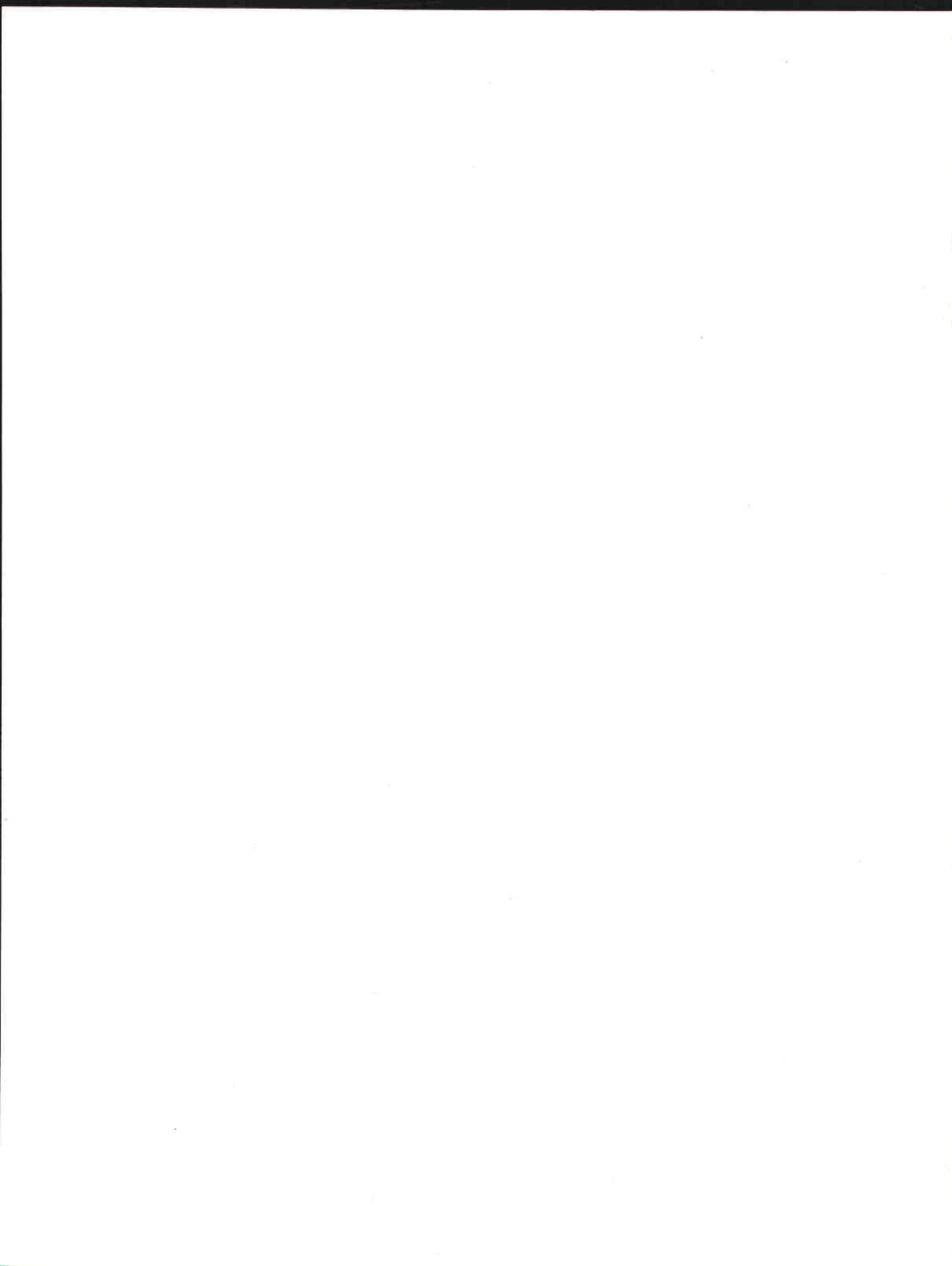
SOLUCION:

Profundidad del suelo (cm).	% del humedad (gravimétrico)	% de humedad (volumétrico)
0-30	.18	.24
30-60	.17	.24
60-90	.19	.27
90-120	.19	.27

Calculo de la lámina de riego:

$$L_n = (.33 - .2578) * 1.2m = .0866$$

$$L_n = 8.7 \text{ cm}$$



16 BIBLIOGRAFIA.

Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., y Burman, R.D., "Operational estimates of evapotranspiration", Journal of Agronomy, vol. 81, Estados Unidos, 1989, pp. 650-662.

Allen R. y W.O. Pruitt., "Rational use of the FAO Blaney-Criddle fórmula", Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division ASCE, vol. 112, núm 2, Estados Unidos, 1986, pp. 139-155.

Allen R. y W. O. Pruitt., "FAO-24 Reference evapotranspiration factors", Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division ASCE, vol. 117, núm 5, Estados Unidos, 1991, pp. 758-773.

Blaney, H.F. y W.D. Criddle, "Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data", U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Report No. 96, Estados Unidos, 1950.

Blaney, H.F., y Morin, K.V., "Evaporation and consumptive use of water empirical fórmulas", Am Geophys. Union Trans., Estados Unidos, 1942, pp. 76-83.

Bosen, J.F., "A formula for approximation of saturation vapour pressure over water", Monthly weather rev., Estados Unidos, vol. 88 núm 8, pp. 275-276.

Brunt D., Physical and dynamical metereology, Editorial University Press, Cambridge, Inglaterra, 1960, 2a. ed., 428 pp.

Budyko, M.I., "The heat balance of the earth's surface", (Translated from Russian), U.S. Dept. com. WB/t-106, 1956.

Cuenca R. H. Irrigation system design, "An engineering approach", Estados Unidos, Editorial Prentice Hall, 1989, 1era ed., 552 pp.

Dastane, N.G., Effective rainfall in irrigated agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper 25, Rome, Italy, Editorial Food Agricultural Organization of the United Nations, 1974.

Doorenbos, J. y W.O. Pruitt., Crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, Italy, Editorial Food Agricultural Organization of the United Nations, 1984.

Frevert, D. K., Hill, R.W. y Braaten, B.C., "Estimation of FAO evapotranspiration coeficientes", Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division ASCE, vol. 109 núm 2, Estados Unidos, 1983, pp. 265-270.

Fritz, S. y MacDonald, J.H., "Average solar radiation in the United States", Heating and ventilating, vol. 46, Estados Unidos, 1949, pp. 61-64.

Jensen, M.E. Burman R.D. y Allen R.G., Evapotranspiration and irrigation water requirements, Manuals and reports on engineering practice No. 70, Estados Unidos, Editorial ASCE, 1990, 331 pp.

_____, Consumptive use of water and irrigation water requirements, Report of the irrigation water requirements committee New York, Estados Unidos, Editorial ASCE, 1974, 215 pp.

Kincaid, D.C. y D.F. Heerman., Scheduling irrigations using a programmable calculator, Estados Unidos, Editorial U.S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service, ARS-NC-12, Febrero, 1974.

Snyder, R.L., Lanini, B.J., Shaw, D.A. y W.O. Pruitt, Using reference evapotranspiration (ET_r) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for trees and vines, Estados Unidos, Publicaciones ANR, Oakland, CA, Panfleto 21428 de la Universidad de California, 1987.

Torres Ruiz Edmundo, Agrometeorología, México, Editorial Diana, 1984, 2a. ed.

U.S. Dept. of Agriculture, Technical Release no. 21, Estados Unidos, Editorial Soil Conservation Service (revision 2), 1970.

Anexo técnico, cuándo y cuánto regar 1a. edición, se terminó de imprimir en el mes de agosto de 1993 en los talleres de Línea Z. La edición consta de 500 ejemplares y su cuidado estuvo a cargo de la Subcoordinación de Editorial y Gráfica.

CBCNK 36298



CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA



36298



IMTA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA



36298