

## Parte C

# Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar

En campos bien manejados, las condiciones reales generalmente se asemejan a las condiciones estándar. El valor de  $ET_c$  calculado a través de los procedimientos descritos en la Parte B representa la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar de campo.

En los casos donde las condiciones encontradas en el campo difieran de las condiciones estándar se requerirá de correcciones del valor de  $ET_c$ . Condiciones de baja fertilidad del suelo, toxicidad salina, suelos inundados, plagas, enfermedades y la presencia de horizontes duros o impenetrables en la zona radicular, pueden generar un crecimiento deficiente de la planta y una reducción de la evapotranspiración. Asimismo, condiciones de falta de agua y salinidad en el suelo pueden reducir la absorción del agua y limitar la evapotranspiración del cultivo. Por otra parte, la evapotranspiración que ocurre en superficies pequeñas y aisladas de vegetación, la que ocurre en áreas donde dos cultivos diferentes se desarrollan conjuntamente o la que ocurre en superficies donde se utiliza el mantillo para reducir la evaporación, puede ser distinta a la evapotranspiración de un cultivo que crece bajo condiciones estándar.

En esta parte se discute el efecto que producen condiciones de manejo y ambientales, diferentes a las condiciones estándar, sobre el valor de  $ET$ . Los efectos ambientales se incorporan a través del coeficiente de estrés y ajustando el valor de  $K_c$  a las condiciones de campo.

## Capítulo 8

# ET<sub>c</sub> bajo condiciones de estrés hídrico

Las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por parte de las raíces de las plantas. Cuando el suelo se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, teniendo libertad de movimiento y pudiendo ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo.

Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico,  $K_s$ :

$$ET_{c,aj} = (K_s K_{cb} + K_c) ET_o \quad (80)$$

Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo,  $K_s < 1$ . Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo,  $K_s = 1$ .

El coeficiente  $K_s$  describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo. Cuando se utiliza el coeficiente único del cultivo, el efecto del estrés hídrico se incorpora en el valor de  $K_c$  de la siguiente forma:

$$ET_{c,aj} = K_s K_c ET_o \quad (81)$$

Debido a que el coeficiente de estrés hídrico afecta solamente a la transpiración del cultivo y no a la evaporación en el suelo, la aplicación del coeficiente  $K_s$  utilizando la Ecuación 80 es, en general, de mayor validez que su aplicación a través de la Ecuación 81. Sin embargo, en los casos donde la evaporación en el suelo no sea un componente importante de la  $ET_c$ , se obtendrán resultados razonables a través de la Ecuación 81.

### DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO

#### Agua Disponible Total (ADT)

La disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo. La capacidad de campo representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, ósea la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente.

En ausencia de una fuente de agua, el contenido de humedad en la zona radicular del cultivo se reducirá como resultado del consumo de agua por el cultivo. A medida que aumenta el consumo de agua, el agua remanente será retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo que reducirá su energía potencial y hará más difícil su extracción por las plantas. Eventualmente, se alcanzará un punto donde el cultivo no podrá extraer el agua remanente. En este momento la extracción de agua será nula y se habrá alcanzado el punto de marchitez permanente. El punto de marchitez permanente es el contenido de humedad en el suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente.

Debido a que contenidos de humedad por encima de capacidad de campo no pueden ser retenidos en contra de las fuerzas de gravedad y son drenados y debido a que contenidos de humedad por debajo del punto de marchitez permanente no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, el total de agua disponible en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$ADT = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (82)$$

donde

ADT total de agua disponible en la zona radicular del suelo [mm],  
 $\theta_{FC}$  contenido de humedad a capacidad de campo [ $m^3 m^{-3}$ ],  
 $\theta_{WP}$  contenido de humedad en el punto de marchitez permanente [ $m^3 m^{-3}$ ],  
 $Z_r$  profundidad de las raíces [m].

La lámina ADT representa la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular y cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular. En el Cuadro 19 se presentan valores típicos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para varias texturas de suelos. En el Cuadro 22 se presentan valores máximos de la profundidad radicular para varios cultivos.

#### Agua fácilmente aprovechable (AFA)

A pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la  $ET_c$ . A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo:

$$AFA = p ADT \quad (83)$$

donde

AFA agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo [mm],  

p fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) [0 - 1].

En el Cuadro 22 se presentan los valores de p. El factor p varía de un cultivo a otro. El factor p varía normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de  $ET_c$  ( $> 8 \text{ mm d}^{-1}$ ), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de  $ET_c$  ( $< 3 \text{ mm d}^{-1}$ ). Un valor de 0,50 para p es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos.

El valor de p está en función del poder evaporante de la atmósfera. Los valores de p presentados en el Cuadro 22 serán mayores a tasas bajas de  $ET_c$  que a tasas altas de  $ET_c$ . Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de  $ET_c$  es alto, p será 10-25% menor que los valores presentados en el Cuadro 22, y el suelo se encontrará

relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la evapotranspiración del cultivo es baja, el valor de  $p$  será hasta 20% mayor que los valores tabulados. Generalmente se utiliza un valor constante de  $p$  para cada período específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de  $p$  de acuerdo a la tasa de  $ET_c$  es  $p = p_{\text{Cuadro 22}} + 0,04(5 - ET_c)$  donde el valor ajustado de  $p$  es limitado a  $0,1 \leq p \leq 0,8$  y el valor de  $ET_c$  es en  $\text{mm día}^{-1}$ . La influencia de este ajuste numérico se ilustra en la Figura 41.

CUADRO 22

**Rangos de profundidad máxima efectiva de las raíces (Z) y fracción de agotamiento de la humedad en el suelo (p) para condiciones sin estrés hídrico, para cultivos comunes**

Cultivo	Profundidad radicular máxima <sup>1</sup> (m)	Fracción de agotamiento <sup>2</sup> (para $ET \approx 5 \text{ mm día}^{-1}$ ) $p$
<b>a. Hortalizas Pequeñas</b>		
Brócoli	0,4-0,6	0,45
Col de Bruselas	0,4-0,6	0,45
Repollo	0,5-0,8	0,45
Zanahorias	0,5-1,0	0,35
Coliflor	0,4-0,7	0,45
Apio (Céleri)	0,3-0,5	0,20
Ajo	0,3-0,5	0,30
Lechuga	0,3-0,5	0,30
Cebolla	– seca	0,3-0,6
	– verde	0,3-0,6
	– semilla	0,3-0,6
Espinaca	0,3-0,5	0,20
Rábano	0,3-0,5	0,30
<b>b. Hortalizas – Familia de la Solanáceas</b>		
Berenjena	0,7-1,2	0,45
Pimiento Dulce (campana)	0,5-1,0	0,30
Tomate	0,7-1,5	0,40
<b>c. Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas</b>		
Melón	0,9-1,5	0,45
Pepino	– cosechado fresco	0,7-1,2
	– cosechado a máquina	0,7-1,2
Calabaza de Invierno	1,0-1,5	0,35
Calabacín (zucchini)	0,6-1,0	0,50
Melón dulce	0,8-1,5	0,40
Sandía	0,8-1,5	0,40
<b>d. Raíces y Tubérculos</b>		
Remolacha, mesa	0,6-1,0	0,50
Yuca o Mandioca	– año 1	0,5-0,8
	– año 2	0,7-1,0
Chirivía	0,5-1,0	0,40
Papa o patata	0,4-0,6	0,35
Camote o Batata	1,0-1,5	0,65
Nabos (y Rutabaga)	0,5-1,0	0,50
Remolacha Azucarera	0,7-1,2	0,55 <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Los valores mayores de  $Z$ , son para suelos que no posean capas u otras características que puedan restringir el desarrollo radicular. Los valores menores de  $Z$ , pueden ser usados para calendarios de riego y los valores mayores para simular condiciones de estrés hídrico o para condiciones de cultivos de secano.

<sup>2</sup> Los valores de  $p$  son válidos para  $ET_c \approx 5 \text{ mm día}^{-1}$ . El valor de  $p$  puede ser ajustado para diferentes valores de  $ET_c$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$p = p_{\text{Cuadro 22}} + 0,04(5 - ET_c)$$

donde  $p$  está expresado como una fracción y  $ET_c$  en  $\text{mm día}^{-1}$ .

<sup>3</sup> Con frecuencia la remolacha azucarera experimenta cierto marchitamiento al final de la tarde en climas áridos y con valores de  $p < 0,55$ , con poco impacto en la producción de azúcar.

CUADRO 22 (continuación)

Cultivo	Profundidad radicular máxima <sup>1</sup> (m)	Fración de agotamiento <sup>2</sup> (para ET= 5 mm día <sup>-1</sup> ) p
<b>e. Leguminosas (Leguminosae)</b>		
Frijoles o judías verdes	0,5-0,7	0,45
Frijoles o judías, secos y legumbres	0,6-0,9	0,45
Frijoles o judías, lima del Perú, vainas largas	0,8-1,2	0,45
Garbanzo (Chick pea)	0,6-1,0	0,50
Habas – Frescas	0,5-0,7	0,45
– Secas/Semilla	0,5-0,7	0,45
Garbanzo hindú	0,6-1,0	0,45
Caupís (cowpeas)	0,6-1,0	0,45
Maní o cacahuete	0,5-1,0	0,50
Lentejas	0,6-0,8	0,50
Guisantes o arveja – Frescos	0,6-1,0	0,35
– Secos/Semilla	0,6-1,0	0,40
Soya o soja	0,6-1,3	0,50
<b>f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)</b>		
Alcachofa	0,6-0,9	0,45
Espárragos	1,2-1,8	0,45
Menta	0,4-0,8	0,40
Fresas	0,2-0,3	0,20
<b>g. Cultivos Textiles</b>		
Algodón	1,0-1,7	0,65
Lino	1,0-1,5	0,50
Sisal	0,5-1,0	0,80
<b>h. Cultivos Oleaginosos</b>		
Ricino	1,0-2,0	0,50
Canola (colza)	1,0-1,5	0,60
Cártamo	1,0-2,0	0,60
Sésamo	1,0-1,5	0,60
Girasol	0,8-1,5	0,45
<b>i. Cereales</b>		
Cebada	1,0-1,5	0,55
Avena	1,0-1,5	0,55
Trigo de Primavera	1,0-1,5	0,55
Trigo de Invierno	1,5-1,8	0,55
Maíz, (grano)	1,0-1,7	0,55
Maíz, (dulce)	0,8-1,2	0,50
Mijo	1,0-2,0	0,55
Sorgo – grano	1,0-2,0	0,55
– dulce	1,0-2,0	0,50
Arroz	0,5-1,0	0,20 <sup>4</sup>

<sup>4</sup> El valor de p para el arroz es 0,20 de saturación.

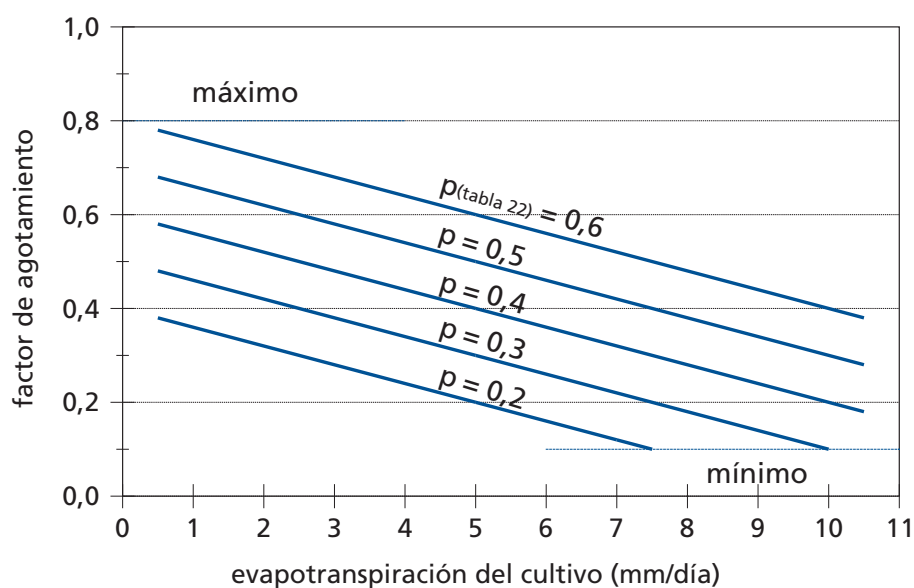
CUADRO 22 (continuación)

Cultivo	Profundidad radicular máxima <sup>1</sup> (m)	Fracción de agotamiento <sup>2</sup> (para $ET \approx 5 \text{ mm día}^{-1}$ ) p
<b>j. Forrajes</b>		
Alfalfa	1,0-2,0	0,55
– para heno		
– para semilla	1,0-3,0	0,60
Bermuda	1,0-1,5	0,55
– para heno		
– cultivo de primavera para semilla	1,0-1,5	0,60
Trébol heno, Bersím	0,6-0,9	0,50
Rye Grass (heno)	0,6-1,0	0,60
Pasto Sudán, heno (anual)	1,0-1,5	0,55
Pastos de Pastoreo	0,5-1,5	0,60
– pastos de rotación		
– pastoreo extensivo	0,5-1,5	0,60
Pasto (turfgrass, césped)	0,5-1,0	0,40
– época fría <sup>5</sup>		
– época caliente <sup>5</sup>	0,5-1,0	0,50
<b>k. Caña de Azúcar</b>		
	1,2-2,0	0,65
<b>l. Frutas Tropicales y Árboles</b>		
Banana	0,5-0,9	0,35
– 1 <sup>er</sup> año		
– 2 <sup>do</sup> año	0,5-0,9	0,35
Cacao	0,7-1,0	0,30
Café	0,9-1,5	0,40
Dátiles	1,5-2,5	0,50
Palmas	0,7-1,1	0,65
Piña	0,3-0,6	0,50
Árbol del caucho	1,0-1,5	0,40
Té	0,9-1,5	0,40
– no sombreado		
– sombreado	0,9-1,5	0,45
<b>m. Uvas y Moras</b>		
Moras (arbusto)	0,6-1,2	0,50
Uvas	1,0-2,0	0,35
– Mesa o Secas (pasas)		
– Vino	1,0-2,0	0,45
Lúpulo	1,0-1,2	0,50
<b>n. Árboles Frutales</b>		
Almendras	1,0-2,0	0,40
Manzanas, Cerezas, Peras	1,0-2,0	0,50
Albaricoque, Durazno, Drupa (fruta de hueso)	1,0-2,0	0,50
Aguacates	0,5-1,0	0,70
Cítricos		
– 70% de cobertura vegetal	1,2-1,5	0,50
– 50% de cobertura vegetal	1,1-1,5	0,50
– 20% de cobertura vegetal	0,8-1,1	0,50
Coníferas	1,0-1,5	0,70
Kiwi	0,7-1,3	0,35
Olivos (40 a 60% de cobertura del suelo por el dosel)	1,2-1,7	0,65
Pistachos	1,0-1,5	0,40
Nogales	1,7-2,4	0,50

<sup>5</sup> Los pastos de épocas frías incluyen bluegrass, ryegrass y fescue (festuca). Las variedades de temporada cálida incluyen pasto bermuda, pasto buffalo y pasto St. Augustine. Los pastos varían en su profundidad radicular. Algunos profundizan por debajo de 1,2 m mientras otros tienen raíces poco profundas. Los valores máximos de profundidad radicular para pastos representan condiciones asociadas a un manejo cuidadoso del agua, permitiendo un mayor agotamiento del agua entre riegos para promover una mayor profundidad de las raíces.

Es necesario mencionar que no es totalmente correcto el expresar la tolerancia de los cultivos al estrés hídrico como una función de la fracción (p). En realidad, la tasa de extracción del agua por parte de las raíces está influenciada más directamente por el nivel de energía potencial del agua del suelo (potencial matricial del suelo y la conductividad hidráulica asociada), que por el contenido de agua. Debido a que

FIGURA 41  
Factor de agotamiento (p) para diferentes niveles de evapotranspiración del cultivo



## EJEMPLO 36

## Determinación del agua fácilmente aprovechable para diferentes cultivos y tipos de suelo

Estimar el valor de AFA para cultivos completamente desarrollados de cebolla, tomate y maíz. Asumir que las plantas se cultivan en suelos arenoso franco, limoso y arcillo limoso.

Del Cuadro 22	Cebolla	$Z_r \approx 0,4 \text{ m}$ ,	$p = 0,30$
	Tomate	$Z_r \approx 0,8 \text{ m}$ ,	$p = 0,40$
	Maíz	$Z_r \approx 1,2 \text{ m}$ ,	$p = 0,55$

Del Cuadro 19    Arenoso Franco     $\theta_{FC} \approx 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,     $\theta_{WP} \approx 0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$   
 $1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 90 \text{ mm(agua)/m(profundidad del suelo)}$

Limoso     $\theta_{FC} \approx 0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,     $\theta_{WP} \approx 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$   
 $1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 170 \text{ mm(agua)/m(profundidad del suelo)}$

Arcillo limoso     $\theta_{FC} \approx 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,     $\theta_{WP} \approx 0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$   
 $1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 120 \text{ mm(agua)/m(profundidad del suelo)}$

	Arenoso franco		Limoso		Arcillo limoso	
	ADT (Ec. 82) mm	AFA (Ec. 83) mm	ADT (Ec. 82) mm	AFA (Ec. 83) mm	ADT (Ec. 82) mm	AFA (Ec. 83) mm
Cebolla	36	11	68	20	48	14
Tomate	72	29	136	54	96	38
Maíz	108	59	204	112	144	79

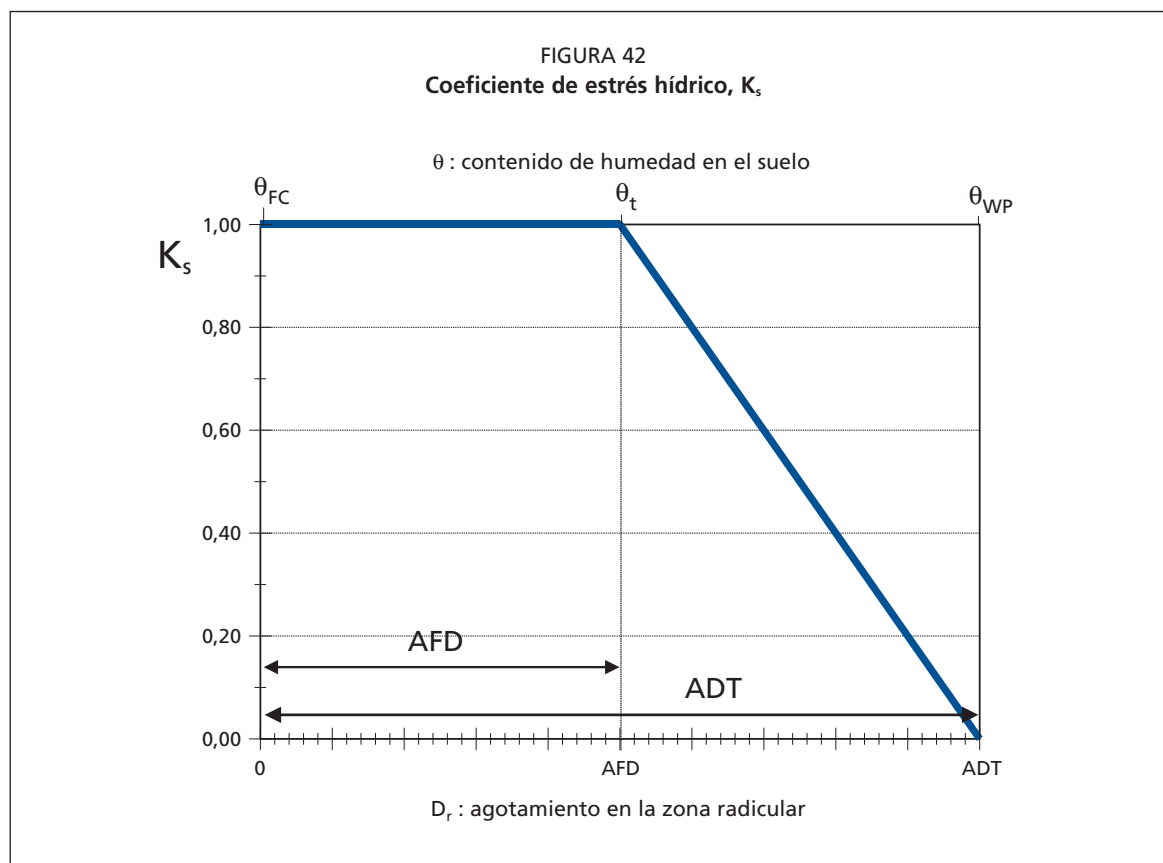
potenciales matriciales similares pueden corresponder a distintos tipos de suelos con diferentes contenidos de humedad, el valor de  $p$  es también función del tipo de suelo. En general, se puede establecer que para suelos de textura fina (arcilla) los valores de  $p$  indicados en el Cuadro 22 pueden ser reducidos en un 5-10%, mientras para suelos de textura más pesada (arenosos), estos pueden incrementarse en un 5-10%.

El término AFA es similar al término Agotamiento Máximo Permisible (AMP) introducido por Merriam. Sin embargo, los valores del AMP están influenciados por las prácticas de manejo y factores económicos, además de los factores físicos que influyen el valor de  $p$ . En general, el valor de  $AMP < AFA$  cuando se quiere evitar riesgos o imprevistos y  $AMP > AFA$  cuando se utiliza intencionalmente el estrés hídrico como práctica de manejo del agua del suelo.

### COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO ( $K_s$ )

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor la  $ET$  del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Esto se logra al multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico  $K_s$  (Ecuaciones 80 y 81).

El contenido de humedad en la zona radicular puede ser expresado en función del agotamiento de humedad en la zona radicular,  $D_r$ , es decir la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo. En capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular es igual a cero ( $D_r = 0$ ). Cuando se produce la extracción del agua a través de la evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad y se iniciarán las situaciones de estrés cuando el valor de  $D_r$  sea igual a AFA. Después de que el agotamiento en la zona radicular exceda a AFA (o sea, el contenido de agua es menor al valor umbral  $\theta_t$ ), el agotamiento del agua será lo suficientemente alto como para limitar la evapotranspiración a valores menores que su potencial, por lo que la evapotranspiración del cultivo comenzará a disminuir en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radicular (Figura 42).

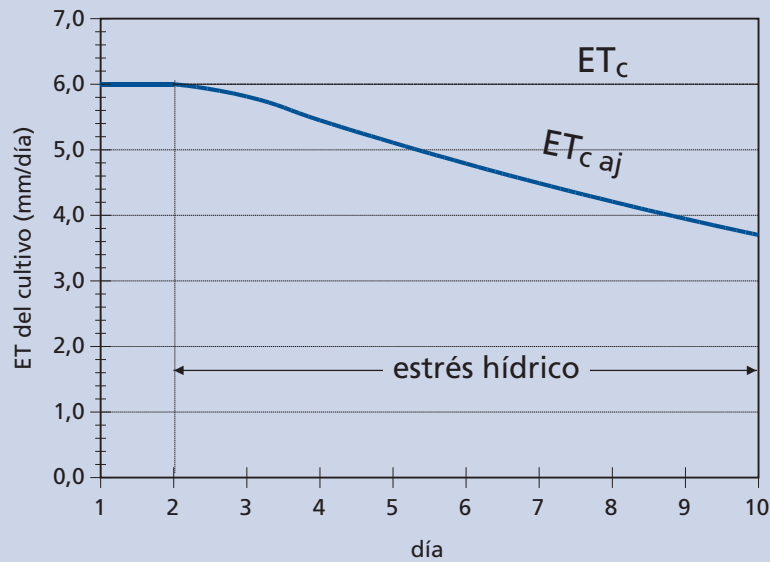




## EJEMPLO 37

## Efecto del estrés hídrico en la evapotranspiración del cultivo

Estimar el efecto del estrés hídrico en la evapotranspiración de un cultivo de tomate completamente desarrollado ( $Z_r = 0,8$  m y  $p = 0,40$ ), cultivado en un suelo limoso ( $\theta_{FC} = 0,32$  y  $\theta_{WP} = 0,12$   $m^3 m^{-3}$ ) para los próximos 10 días, donde el agotamiento inicial de humedad en la zona radicular es de 55 mm y considerando que no se planifican o predicen riegos o lluvias. El valor promedio esperado de  $ET_0$  para el período de 10 días es de 5 mm día<sup>-1</sup> y el valor de  $K_c = 1,2$ .

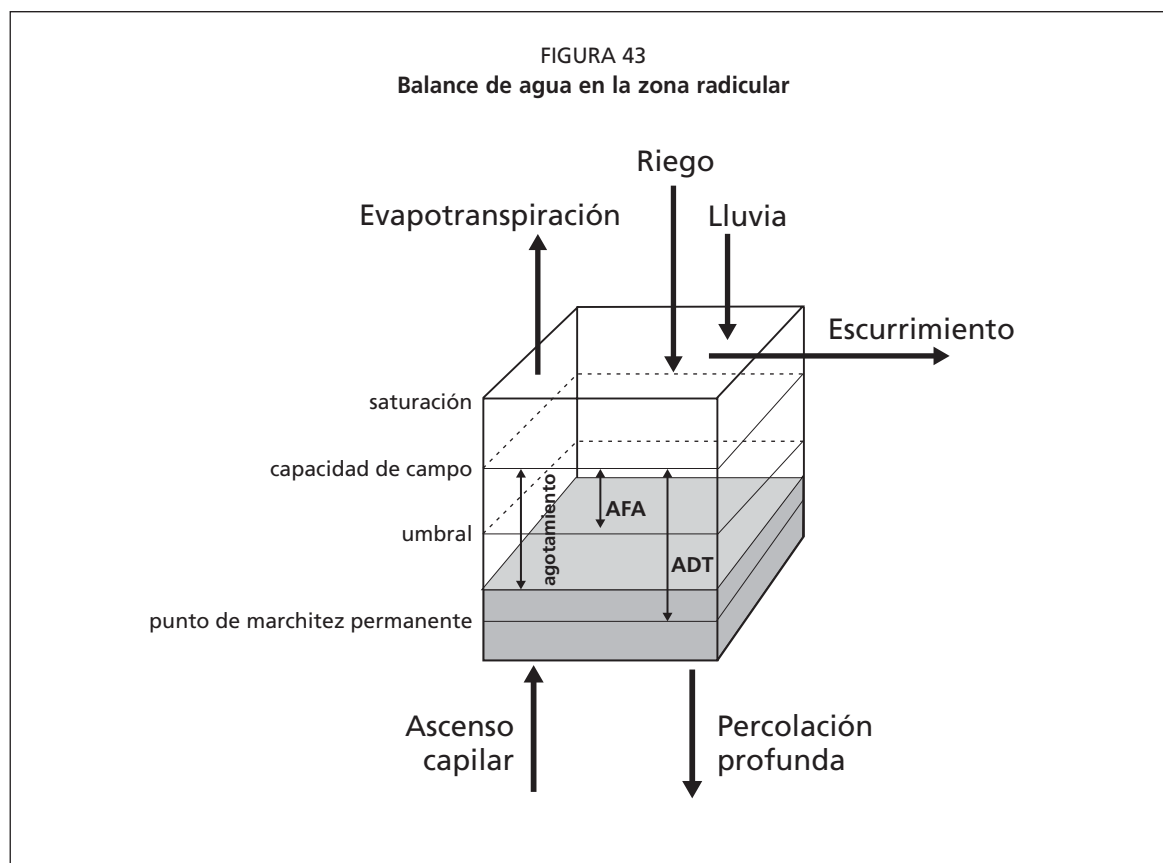


Utilizando Ec. 82       $ADT = 1\ 000 (0,32-0,12) 0,8 = 160$  mm  
 Utilizando Ec. 83       $AFA = 0,40 (160) = 64$  mm

(1) día	(2) $ET_0$ mm día <sup>-1</sup>	(3) $K_c$	(4) $ET_c$ mm día <sup>-1</sup>	(5) $D_{r,i}$ inicial mm	(6) $K_s$	(7) $ET_{c,aj}$ mm día <sup>-1</sup>	(8) $D_{r,i}$ Final mm
inicio	-	-	-	-	-	-	55,0
1	5,0	1,2	6,0	55,0	1,00	6,0	61,0
2	5,0	1,2	6,0	61,0	1,00	6,0	67,0
3	5,0	1,2	6,0	67,0	0,97	5,8	72,8
4	5,0	1,2	6,0	72,8	0,91	5,4	78,3
5	5,0	1,2	6,0	78,3	0,85	5,1	83,4
6	5,0	1,2	6,0	83,4	0,80	4,8	88,2
7	5,0	1,2	6,0	88,2	0,75	4,5	92,6
8	5,0	1,2	6,0	92,6	0,70	4,2	96,9
9	5,0	1,2	6,0	96,9	0,66	3,9	100,8
10	5,0	1,2	6,0	100,8	0,62	3,7	104,5

- (1) Número del día.
- (2) Evapotranspiración del cultivo de referencia.
- (3) Coeficiente del cultivo.
- (4) Ec. 58, ET del cultivo sin estrés hídrico.
- (5) Agotamiento en la zona radicular al inicio del día (columna 8 del día anterior).
- (6) Ec. 84 cuando  $K_s = 1$  si  $D_{r,i} < AFA$ .
- (7) Ec. 81, ET del cultivo bajo estrés hídrico.
- (8) Agotamiento al final del día.

Este ejemplo demuestra que la estimación de  $K_s$  requiere del cálculo de un balance diario del agua en el suelo. Esto es desarrollado en mayor profundidad en la sección siguiente.



Para  $D_r > AFA$ ,  $K_s$  es calculado como:

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} = \frac{ADT - D_r}{(1 - p) ADT} \quad (84)$$

donde

- $K_s$  es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo [0 - 1],
- $D_r$  agotamiento de humedad en la zona radicular [mm],
- ADT agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm],
- $p$  fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico [-].

Luego de calcular el valor de  $K_s$ , se calcula la evapotranspiración ajustada  $ET_{c_{aj}}$  a través de las Ecuaciones 80 ó 81, dependiendo de los coeficientes utilizados para determinar la evapotranspiración. Cuando el agotamiento en la zona radicular sea menor que AFA,  $K_s = 1$ .

#### BALANCE DE AGUA DEL SUELO

La estimación de  $K_s$  requiere del cálculo de un balance diario de humedad para la zona radicular del suelo. De una manera esquemática (Figura 43), se puede representar la zona radicular como un recipiente en el cual puede fluctuar la cantidad de agua existente. Es útil expresar el contenido de agua en la forma de agotamiento del agua en la zona radicular. Esto hace más sencillo el proceso de añadir y sustraer las pérdidas y ganancias, considerando que los diferentes parámetros del balance de humedad del suelo son expresados generalmente en forma de lámina de agua. La lluvia, el riego y el ascenso capilar del agua subterránea hacia la zona radicular son procesos que añaden

agua a la zona radicular y disminuyen el agotamiento de humedad en la zona radicular. Por otra parte, los procesos de evaporación, transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación remueven agua de la zona radicular y aumentan el agotamiento de la humedad del suelo. El balance diario del agua en la zona radicular del suelo, expresado en términos de agotamiento al final del día, es por lo tanto:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (85)$$

donde

$D_{r,i}$	agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día $i$ [mm],
$D_{r,i-1}$	contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ [mm],
$P_i$	precipitación en el día $i$ [mm],
$RO_i$	escurrimiento superficial en el día $i$ [mm],
$I_i$	lámina neta de riego en el día $i$ que infiltra en el suelo [mm],
$CR_i$	ascenso capilar proveniente de la mesa de agua subterránea en el día $i$ [mm],
$ET_{c,i}$	evapotranspiración del cultivo en el día $i$ [mm],
$DP_i$	pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día $i$ [mm].

#### *Limites de $D_{r,i}$*

Se asume en la Figura 43 que el agua puede ser almacenada en la zona radicular hasta que se alcance la capacidad de campo. Aunque el contenido de humedad pudiera estar temporalmente por encima de la capacidad de campo, después de una lluvia intensa o riego, se asume que la totalidad del agua por encima de capacidad de campo se pierde el mismo día a través de percolación profunda, después de descontar cualquier ET que ocurra durante el día. Se asume que cuando el suelo está a capacidad de campo, después de una lluvia significativa o riego, el valor mínimo del agotamiento es igual a cero. Como resultado de la percolación y la evapotranspiración, el contenido de humedad comenzará a disminuir gradualmente por lo que comenzará a aumentar el agotamiento del agua en la zona radicular. Si no se presenta otro evento de humedecimiento, el contenido de humedad alcanzará gradualmente su mínimo valor  $\theta_{WP}$ . En ese momento no existirá agua disponible para evapotranspiración en la zona radicular, el valor de  $K_s$  será igual a cero, y se alcanzará el valor máximo del agotamiento de humedad en la zona radicular, ósea ADT. Por lo tanto, los límites de  $D_{r,i}$  serán los siguientes:

$$0 \leq D_{r,i} \leq ADT \quad (86)$$

#### *Agotamiento Inicial*

Para iniciar el balance de humedad, es necesario estimar el agotamiento inicial  $D_{r,i-1}$ . El agotamiento inicial puede ser estimado a través de mediciones del contenido de humedad del suelo de la siguiente forma:

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{i-1}) Z_r \quad (87)$$

donde  $\theta_{i-1}$  es el contenido de humedad promedio en la profundidad efectiva de la zona radicular. Después de una lluvia pesada o riego, el usuario puede asumir que el contenido de humedad en la zona radicular esta cerca de la capacidad de campo, ósea,  $D_{r,i-1} \approx 0$ .

#### *Precipitación (P), Escurrimiento superficial (RO) y Riego (I)*

El término  $P_i$  representa la precipitación diaria. Cantidades diarias de precipitación

menores a  $0,2 ET_0$  son normalmente evaporadas en su totalidad, por lo que pueden ser ignoradas en el cálculo del balance hídrico, especialmente para los casos donde se utilice el coeficiente único del cultivo.  $I_i$  es equivalente a la lámina media infiltrada del riego expresada sobre la totalidad de la superficie del campo. El escurrimiento superficial que ocurra producto de la precipitación puede ser estimado utilizando alguno de los procedimientos estándar incluidos en libros de hidrología.

#### *Ascenso capilar (CR)*

La cantidad de agua que se mueve hacia arriba por ascenso capilar, desde la capa freática hacia la zona radicular, dependerá del tipo de suelo, la profundidad del nivel freático y el contenido de humedad en la zona radicular. Se asume normalmente que el valor de CR es igual a cero cuando el nivel freático se encuentra a más de 1 m por debajo de la zona radicular. Información acerca del CR fue presentada en la publicación de la FAO No. 24 de la Serie de Riego y Drenaje. El tema del ascenso capilar será tratado en una publicación futura de la FAO.

#### *Evapotranspiración ( $ET_c$ )*

Cuando el agotamiento del agua del suelo sea menor que AFA, la evapotranspiración del cultivo será  $ET_c = K_c ET_0$ . Al momento que  $D_{r,i}$  sea mayor que AFA, la evapotranspiración del cultivo se verá reducida y  $ET_c$  puede ser estimada a través de la Ecuación 80 ó 81.

#### *Percolación profunda (DP)*

Después de una lluvia pesada o riego, el contenido de humedad en la zona radicular puede exceder la capacidad de campo. De acuerdo a este procedimiento sencillo, se asume que el contenido de humedad en el suelo será el de capacidad de campo durante el mismo día que ocurra el evento de humedecimiento, por lo que el agotamiento  $D_{r,i}$  en la Ecuación 85 será igual a cero. Por lo tanto, luego de una lluvia pesada o riego:

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (88)$$

En el momento que el contenido de humedad en la zona radicular se encuentre por debajo de capacidad de campo (es decir,  $D_{r,i} > 0$ ), no existirá drenaje en el suelo y  $DP_i = 0$ .

No se debe confundir el término  $DP_i$  incluido en las Ecuaciones 85 y 88 con el término  $DP_{e,i}$  usado en las Ecuaciones 77 y 79 para la capa evaporante del suelo. Se puede calcular ambos términos de manera simultánea, pero son completamente independientes.

### **PLANIFICACIÓN DEL RIEGO**

Se requiere del riego cuando la cantidad de lluvia sea insuficiente para compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración. El objetivo principal del riego es la aplicación del agua en el momento preciso y con la cantidad precisa de agua. Mediante el cálculo del balance diario del agua presente en la zona radicular del suelo (Ecuación 85), se pueden planificar las láminas y los momentos de aplicación del riego. Para evitar el estrés hídrico se debe aplicar el riego antes, o en el momento, de agotarse la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo ( $D_{r,i} \leq AFA$ ). Por otra parte, para evitar pérdidas por percolación que puedan producir el lavado de importantes nutrientes de la zona radicular, la lámina neta de riego deberá ser menor o igual que el agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo ( $I_i \leq D_{r,i}$ ).

En el ejemplo 38 se ilustra la aplicación del balance de agua en la zona radicular para definir los días de riego y evitar el estrés hídrico. En el ejemplo se utilizan los cálculos de  $K_c$  tomados del Ejemplo 35. En el Anexo 8 se presenta una completa hoja de cálculo la cual incluye todos los cálculos necesarios para definir el calendario de riego y para predecir el valor de  $K_c = K_{cb} + K_c$  para distintos intervalos de tiempo.

## EJEMPLO 38

## Calendario de riego para evitar situaciones de estrés hídrico

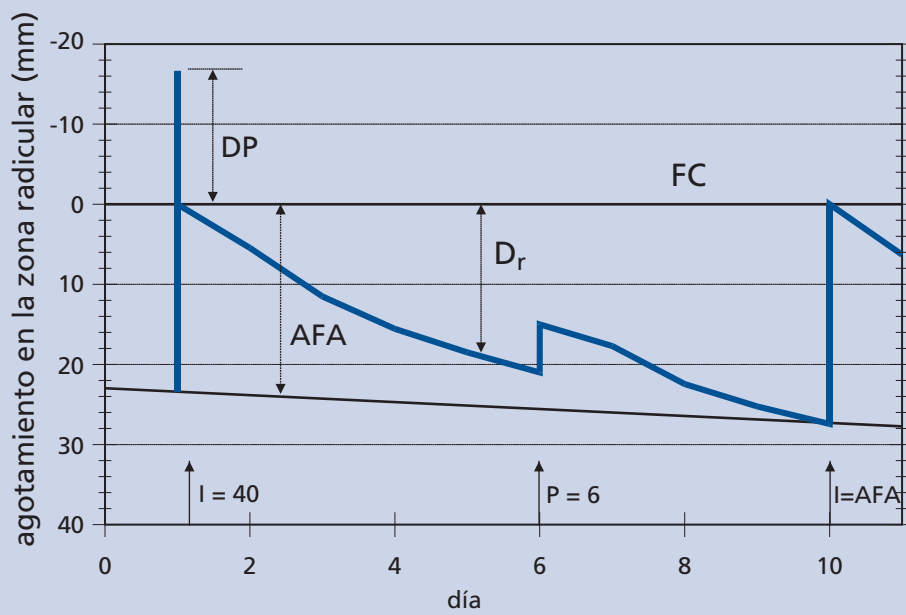
Planificar las aplicaciones de riego para el Ejemplo 35. Se asume lo siguiente:

- se debe aplicar el riego cuando se agote la lámina AFA;
- el factor de agotamiento ( $p$ ) es de 0,6;
- todos los riegos y lluvias ocurren en horas tempranas del día;
- la profundidad de la zona radicular ( $Z_r$ ) para el día 1 es 0,3 m y aumenta a 0,36 m para el día 12;
- el agotamiento de humedad en la zona radicular al inicio del día 1 ( $D_{r,i-1}$ ) es igual a AFA.

Utilizando Ec. 82  $ADT = 1\,000 (0,23 - 0,10) Z_{r,i} = 130 Z_{r,i}$  [mm]

Utilizando Ec. 83  $AFA = 0,6 ADT = 78 Z_{r,i}$  [mm]

En el día 1, cuando  $Z_r = 0,3$  m:  $D_{r,i-1} = AFA = 78 (0,3) = 23$  mm



(1) día	(2) $ET_c$ mm d <sup>-1</sup>	(3) $Z_r$ m	(4) AFA mm	(5) $D_{r,i}$ inicio mm	(6) P-RO mm	(7) I mm	(8) $K_s$	(9) $K_{cb}$	(10) $K_e$	(11) $K_c$	(12) $ET_c$ mm	(13) DP mm	(14) $D_{r,i}$ final mm
inicio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23
1	4,5	0,30	23	0	0	40	1	0,30	0,91	1,21	5,5	12	0
2	5,0	0,31	24	0	0	0	1	0,31	0,90	1,21	6,1	0	6
3	3,9	0,31	24	6	0	0	1	0,32	0,64	0,97	3,8	0	10
4	4,2	0,32	25	10	0	0	1	0,33	0,36	0,69	2,9	0	13
5	4,8	0,32	25	13	0	0	1	0,34	0,19	0,54	2,6	0	15
6	2,7	0,33	26	9	6	0	1	0,36	0,60	0,96	2,6	0	12
7	5,8	0,33	26	12	0	0	1	0,37	0,44	0,81	4,7	0	17
8	5,1	0,34	26	17	0	0	1	0,38	0,19	0,57	2,9	0	20
9	4,7	0,34	27	20	0	0	1	0,39	0,10	0,49	2,3	0	22
10	5,2	0,35	27	22	0	0	1	0,40	0,05	0,45	2,4	0	24
11	9,2	0,35	27	24	0	0	1	0,41	0,03	0,44	4,0	0	28
12	6,4	0,36	28	0	0	28	1	0,42	0,79	1,21	7,8	0	8

- (1) Número del día.  
 (2) Del Ejemplo 35.  
 (3)  $Z_r$  es un dato (interpolado entre 0,3 m para el día 1 y 0,36 m para el día 12).  
 (4) Ec. 83.  
 (5)  $D_{r,i \text{ ini}}$  (agotamiento en la zona radicular al inicio del día)  
 Si el riego y la lluvia ocurren temprano en el día, entonces  

$$D_{r,i \text{ ini}} = \text{Max}(D_{r,i-1 \text{ final}} - I - (P-RO), \text{ ó } 0)$$
 Si el riego y la lluvia ocurren tarde en el día, entonces  

$$D_{r,i \text{ ini}} = D_{r,i-1 \text{ final}}$$
 donde  $D_{r,i-1 \text{ final}}$  es tomado de la columna 14 del día anterior  
 Debido a que la profundidad de la zona radicular se incrementa cada día, se debe considerar el contenido de humedad en el subsuelo ( $\theta_{sub}$ ), para actualizar el valor de  $D_{r,i}$   

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} + 1\,000 (\theta_{FC} - \theta_{sub,i-1}) \Delta Z_{r,i}$$
 En el ejemplo se asume que  $\theta_{sub}$  esta a capacidad de campo (debido a riego o lluvia excesivas durante los días anteriores). Por lo tanto, se puede utilizar una combinación de las ecuaciones para  $D_{r,i}$ .  
 (6) Del ejemplo 35.  
 (7) Se requiere del riego cuando  $D_{r,i} \geq AFA$ .  
 En el día 1, la lámina de riego (infiltración en el suelo) es dada (del Ejemplo 35:  $I = 40$  m). En el día 12 se requiere de una aplicación de una lámina neta de riego de 28 mm para reponer la humedad en la zona radicular y evitar pérdidas por percolación profunda ( $DP = 0$  mm).  
 (8) Ec. 84, donde  $K_s = 1$  para  $D_{r,i} \leq AFA$ .  
 (9) Del Ejemplo 35.  
 (10) Día 1 al 10: Del Ejemplo 35. Día 11:  $K_r = 0,033$  y  $K_e = 0,033(1,21 - 0,41) = 0,03$   
 Día 12: Después del riego adicional aplicado temprano en el día, la capa superficial del suelo estará húmeda por lo que  $K_r$  es 1 o utilizando Ec. 71:  $K_e = (1,21 - 0,42) = 0,79$ .  
 (11)  $K_c = K_s K_{cb} + K_e$ .  
 (12) Ec. 80.  
 (13) Ec. 88, donde  $D_{r,i-1}$  es tomado de la columna 14 del día anterior.  
 (14)  $D_{r,i}$  (agotamiento en la zona radicular al final de un día) = el valor inicial de  $D_{r,i}$  al inicio del día siguiente (ver nota a pie de página 5). Utilizando Ec. 85, donde  $D_{r,i-1}$  se toma de la columna 14 del día anterior.

### EFFECTOS DE LA SALINIDAD DEL SUELO

Las sales presentes en la solución del suelo pueden reducir la evapotranspiración al hacer el agua del suelo menos «disponible» para su extracción por las raíces de las plantas. Las sales poseen afinidad por el agua, lo que se traduce en la necesidad del cultivo de aplicar una mayor fuerza para la extracción del agua de un suelo salino. La presencia de sales en el agua del suelo reduce la energía potencial en la solución del agua del suelo. Por otra parte algunas sales generan efectos tóxicos en las plantas, lo que puede producir la reducción del metabolismo y del crecimiento de las plantas. En esta parte se presenta una función para estimar la reducción que ocurre en la evapotranspiración como resultado de la salinidad del agua del suelo. Esta expresión fue derivada al combinar ecuaciones tipo salinidad-ET, presentadas en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No29, con ecuaciones tipo productividad-ET, presentadas en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No33. La ecuación resultante provee una aproximación inicial de la reducción que se produciría en la evapotranspiración bajo distintas condiciones de salinidad.

Existen evidencias que tanto la productividad de un cultivo como la transpiración son menos sensibles a un bajo potencial osmótico que a un bajo potencial matricial. Bajo condiciones de salinidad, muchas plantas son capaces de compensar el bajo potencial osmótico del agua del suelo mediante la producción de un mayor contenido interno de solubles. Esto es posible a través de la absorción de iones de la solución del suelo y mediante la síntesis de compuestos orgánicos. Ambas reacciones reducen el impacto del potencial osmótico en la disponibilidad del agua. Sin embargo la síntesis de compuestos orgánicos requiere del uso de energía metabólica. Como resultado, bajo condiciones de salinidad, el crecimiento de la planta se verá frecuentemente reducido. La reducción del crecimiento de la planta tendrá impacto en la transpiración al reducir la cobertura vegetal, siendo además, en algunos casos, un producto del cerrado parcial de los estomas.

Otros impactos de las sales del suelo incluyen toxicidad directa del sodio y cloro, así como deficiencias inducidas de nutrientes. Estas deficiencias reducen el crecimiento de las plantas al reducir el alargamiento de las hojas, así como el crecimiento y la división de las células de las hojas. La modalidad dependerá del método de riego. Con riego por aspersión, la absorción del sodio y del cloro a través de las hojas puede resultar en condiciones de toxicidad para todas las especies cultivadas. Con riego por superficie o riego por goteo, condiciones de toxicidad directa generalmente ocurren solo en viñedos y árboles; sin embargo, niveles altos de sodio pueden inducir deficiencias de calcio para todas las especies cultivadas.

Debido a que la concentración de sales varía a medida que cambia el contenido de agua del suelo, la salinidad del suelo se mide y expresa normalmente en base a la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo ( $CE_e$ ). La  $CE_e$  se define como la conductividad eléctrica de la solución del agua del suelo después de añadir una cantidad de agua destilada suficiente para llevar el contenido de agua del suelo a punto de saturación. Típicamente, la  $CE_e$  se expresa en deciSiemens por metro ( $dS\ m^{-1}$ ). Bajo condiciones óptimas de manejo la productividad de los cultivos permanecerá en sus niveles potenciales hasta alcanzar un valor umbral específico de conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo ( $CE_{e\ umbral}$ ). Si el valor promedio de  $CE_e$  en la zona radicular se incrementa por encima de este umbral crítico, se asume que la productividad del cultivo comenzará a disminuir en proporción al incremento de la salinidad. La tasa de reducción de la productividad con el incremento de la salinidad se expresa en forma de una pendiente,  $b$ , la cual tiene unidades de porcentaje de reducción de la productividad por cada  $dS\ m^{-1}$  de incremento de  $CE_e$ .

No todas las plantas responden de la misma manera a la salinidad; algunos cultivos pueden producir aceptablemente bajo niveles de salinidad mucho más altos que otros cultivos. Esto se debe a que algunos cultivos tiene mayor capacidad de realizar los ajustes osmóticos que le permiten extraer mayor cantidad de agua del suelo salino, o los mismos pueden ser más tolerantes a los efectos tóxicos de la salinidad. La tolerancia

de muchos cultivos a la salinidad se encuentra en las publicaciones de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 33 y 48. Los valores de  $CE_{e\text{ umbral}}$  y de la pendiente  $b$ , presentados en las publicaciones mencionadas, se incluyen en el Cuadro 23.

Como se puede observar en el Cuadro 23, existe una amplitud del rango de tolerancia de los cultivos a las sales que varía entre 8 a 10 veces. Por lo tanto se puede decir que el efecto de la salinidad en la productividad es específico de cada cultivo.

Los valores de los parámetros  $CE_{e\text{ umbral}}$  y  $b$  presentados en el Cuadro 23 fueron determinados principalmente en experimentos de investigación utilizando riego de régimen semi-permanente, donde los contenidos de humedad del suelo fueron mantenidos cerca de la capacidad de campo. Sin embargo, en la mayoría de los calendarios de riego por aspersión y superficie, el contenido de humedad del suelo es agotado bastante por debajo de capacidad de campo, por lo que el valor de  $CE$  de la solución del suelo,  $CE_{sw}$ , aumenta antes del riego, aunque el valor de  $CE$  del extracto de saturación no varía. El incremento de la concentración de sales en la solución del agua del suelo reduce el potencial osmótico del agua del suelo (se convierte en más negativo), por lo que la planta deberá gastar más energía metabólica y emplear una mayor fuerza mecánica para absorber el agua. Por otra parte a medida que el suelo se seca y la concentración aumenta, los efectos en el metabolismo y de la toxicidad pueden ser más pronunciados. Sin embargo, se ha encontrado que la variación en el contenido de humedad durante el intervalo entre riegos no tiene una influencia fuerte en la evapotranspiración del cultivo. Esto es debido que la elevación del contenido de humedad del suelo en los primeros días de un intervalo largo de riego, corresponden a niveles mayores a los experimentados bajo condiciones de riego semi-permanente. Asimismo, para contrarrestar lo anterior, se presenta una reducción del contenido de agua en el suelo en los últimos días de un intervalo largo de riego. Por otra parte, la distribución de las sales en la zona radicular bajo riego de baja frecuencia puede reducir los impactos de la salinidad durante la primera parte del intervalo de riego. Asimismo, bajo riego de alta frecuencia de la superficie del suelo, son mayores las pérdidas por evaporación. Por lo tanto considerando la misma lámina aplicada, se reduce la fracción de lavado. Por estas razones, tanto la longitud del intervalo de riego como el cambio de la  $CE$  durante el intervalo entre riegos no han sido generalmente señalados como factores en la reducción de la  $ET$ , asumiendo que las mismas láminas de agua infiltran a la zona radicular a lo largo del tiempo.

En algunos casos el incremento de la evaporación bajo riego de alta frecuencia puede contrarrestar las reducciones del valor de  $K_c$  causadas por valores altos de  $CE_e$  en la zona radicular. Bajo estas condiciones, la magnitud de los valores totales de  $K_c$  y  $ET_c$  no serán muy diferentes a las correspondientes a condiciones estándar y sin salinidad, bajo riegos de menor frecuencia, aunque se presenta una reducción en la productividad y la transpiración del cultivo. Debido a esto, bajo condiciones de salinidad el factor de reducción de  $K_s$  deberá ser aplicado solamente cuando se utiliza el procedimiento del coeficiente dual de cultivo.

En artículos que tratan sobre el impacto de la salinidad en la producción del cultivo, Letey *et al.* (1985) y Shalhevet (1994) concluyen que los efectos de la salinidad en el suelo y el estrés hídrico son aditivos con respecto a su impacto sobre la evapotranspiración del cultivo. Por lo tanto son aplicables las mismas funciones de productividad- $ET$  tanto en los casos del estrés originado por la falta de agua, como para los casos de estrés producido por la presencia de salinidad.

## RELACIÓN PRODUCTIVIDAD-SALINIDAD

En la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No29 se describe una metodología que ha sido utilizada ampliamente para la predicción de la reducción de la productividad del cultivo debido a la salinidad. La metodología asume que bajo condiciones óptimas de manejo, la productividad del cultivo permanece a sus niveles potenciales hasta el momento en que aparece el valor umbral específico de



conductividad eléctrica en la solución del agua del suelo. Cuando la salinidad se incrementa por encima de ese valor umbral, la productividad del cultivo disminuirá linealmente en proporción al incremento de la salinidad. La salinidad del suelo es expresada en la forma de conductividad eléctrica en el extracto de saturación,  $CE_e$ . En forma de ecuación matemática, el procedimiento utilizado en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No29 es:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (CE_e - CE_{e \text{ umbral}}) \frac{b}{100} \quad (89)$$

válida para condiciones donde  $CE_e > CE_{e \text{ umbral}}$  donde:

$Y_a$	productividad real del cultivo
$Y_m$	productividad máxima esperada del cultivo cuando $CE_e < CE_{e \text{ umbral}}$
$CE_e$	conductividad eléctrica promedio del extracto de saturación en la zona radicular [ $dS m^{-1}$ ]
$CE_{e \text{ umbral}}$	conductividad eléctrica del extracto de saturación, correspondiente al umbral de $CE_e$ , cuando la productividad del cultivo comienza a reducirse por primera vez por debajo de $Y_m$ [ $dS m^{-1}$ ]
$b$	reducción de la productividad por incremento de $CE$ [%/ $(dS m^{-1})$ ]

Los valores de  $CE_{e \text{ umbral}}$  y  $b$  incluidos en las publicaciones de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No29 y No 48 se presentan en el Cuadro 23 para distintos cultivos agrícolas.

Los datos de la relación salinidad-productividad, presentados en las publicaciones de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No29 y No 48, provienen principalmente de estudios donde el contenido de humedad del suelo fue mantenido a un potencial mayor o igual a  $-3$  m ( $-30$  kPa) aproximadamente, y a una profundidad mayor de 0,3 a 0,6 m, dependiendo del cultivo. Sin embargo en estas publicaciones se indica que, para la mayoría de los cultivos, los datos son transferibles a situaciones típicas de campo donde se agote entre riegos la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo (AFA).

### RELACIÓN PRODUCTIVIDAD-ESTRÉS HÍDRICO

En la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No 33 se presenta una función linear sencilla para describir la relación entre el uso del agua por el cultivo y la productividad, útil para predecir la reducción en la productividad del cultivo cuando el estrés hídrico es inducido por la falta del agua del suelo:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c \text{ aj}}}{ET_c}\right) \quad (90)$$

donde:

$K_y$	factor de respuesta de la productividad [-]
$ET_{c \text{ aj}}$	evapotranspiración ajustada (real) del cultivo [ $mm d^{-1}$ ]
$ET_c$	evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (sin estrés hídrico) [ $mm d^{-1}$ ]

El factor  $K_y$  describe la reducción relativa de la productividad en función a la reducción de la  $ET_c$  generada por la falta de agua. Los valores de  $K_y$  presentados en la publicación de la FAO No 33 son específicos de cada cultivo y pueden variar durante la temporada de crecimiento del cultivo. En general, la reducción de la productividad debido al déficit de agua es relativamente pequeña durante los períodos de desarrollo vegetativo y de maduración, siendo mayor durante los períodos de floración y

formación del fruto. En la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No33 se presentan valores de  $K_y$  para las etapas individuales de desarrollo, así como para la totalidad de la temporada de crecimiento. En el Cuadro 24 se presentan los valores de  $K_y$  correspondientes a la temporada.

### RELACIÓN COMBINADA SALINIDAD-REDUCCIÓN DE LA ET Sin estrés hídrico ( $D_r < AFA$ )

Cuando el estrés por salinidad ocurre sin la presencia de estrés hídrico, se puede combinar las Ecuaciones 89 y 90 y expresar  $K_s$  como un valor equivalente, donde  $K_s = ET_{c_{aj}} / ET_c$ :

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y 100} (CE_e - CE_{e_{umbral}}) \quad (91)$$

La ecuación 91 es válida para condiciones donde  $CE_e > CE_{e_{umbral}}$  y el agotamiento de humedad del suelo es menor a la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo ( $D_r < AFA$ ). Los términos  $D_r$  y  $AFA$  fueron definidos en secciones anteriores de esta publicación.

### Con estrés hídrico ( $D_r > AFA$ )

Cuando el estrés hídrico ocurre simultáneamente con el estrés por salinidad, se puede combinar la Ecuación 84 del Capítulo 8 y las Ecuaciones 89 y 90 para producir la siguiente expresión:

$$K_s = \left( 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{umbral}) \right) \left( \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} \right) \quad (92)$$

La Ecuación 92 es válida para las situaciones donde  $CE_e > CE_{e_{umbral}}$  y  $D_r > AFA$ . En la Figura 44 se ilustra el impacto de la reducción de  $K_s$  a medida que se incrementa la salinidad. Nótese que la metodología asume que el valor de  $AFA$  (y  $p$ ) no cambia a medida que se incrementa la salinidad. Para algunos cultivos, esta consideración podría ser cuestionable.

### Limitaciones

Debido a que el impacto de la salinidad en el crecimiento y productividad de las plantas, así como en la evapotranspiración de los cultivos, es un proceso integrado en el tiempo, en general se utiliza solamente el valor de  $K_y$  correspondiente a toda la temporada para predecir la reducción de la evapotranspiración del cultivo. En la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No33 se presentan valores de  $K_y$  correspondientes a sólo 23 cultivos. Los valores de  $K_y$  para toda la temporada incluidos en la publicación No33 están incluidos en el Cuadro 24. Para una gran cantidad de cultivos, el valor de  $K_y$  es alrededor de 1. Para cultivos donde se desconozca el valor de  $K_y$ , el usuario puede utilizar  $K_y = 1$  en las Ecuaciones 91 y 92 ó seleccionar el valor de  $K_y$  correspondiente a un cultivo de características similares.

Se sugiere el uso de las Ecuaciones 91 y 92 solamente para realizar estimaciones aproximadas del impacto de la salinidad en la  $ET$ , representando los efectos esperados de la salinidad sobre la evapotranspiración considerando un período largo de tiempo (medido en semanas o meses). No se espera que estas ecuaciones proporcionen resultados confiables para la predicción de  $ET_c$  para días individuales. Tampoco se incluyen otros efectos complejos tales como los originados por la toxicidad a determinados iones. Se asume, en la utilización de las ecuaciones 91 y 92, que el valor de  $CE_e$  representa un promedio de  $CE_e$  para la zona radicular.

CUADRO 23

Tolerancia a las sales de cultivos agrícolas comunes, expresada como la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo correspondiente al umbral donde la productividad del cultivo se reduce por primera vez por debajo de la productividad potencial total ( $CE_{e\text{ umbral}}$ ), y expresada como la pendiente ( $b$ ) de reducción en la productividad cuando la salinidad aumenta por encima del  $CE_{e\text{ umbral}}$ .

Cultivo <sup>1</sup>	$CE_{e\text{ umbral}}$ <sup>2</sup> ( $dS\ m^{-1}$ ) <sup>3</sup>	$b$ <sup>4</sup> (% / $dS\ m^{-1}$ )	Clase <sup>5</sup>
<b>a. Hortalizas pequeñas</b>			
Brócoli	2,8	9,2	MS
Col de Bruselas	1,8	9,7	MS
Repollo	1,0-1,8	9,8-14,0	MS
Zanahorias	1,0	14,0	S
Coliflor	1,8	6,2	MS
Apio (Céleri)	1,8-2,5	6,2-13,0	MS
Lechuga	1,3-1,7	12,0	MS
Cebolla	1,2	16,0	S
Espinaca	2,0-3,2	7,7-16,0	MS
Rábanos	1,2-2,0	7,6-13,0	MS
<b>b. Hortalizas – Familia de la Solanáceas</b>			
Berenjena	-	-	MS
Pimientos	1,5-1,7	12,0-14,0	MS
Tomate	0,9-2,5	9,0	MS
<b>c. Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas</b>			
Pepino	1,1-2,5	7,0-13,0	MS
Melones	-	-	MS
Calabaza de Invierno	1,2	13,0	MS
Calabacín (zucchini)	4,7	10,0	MT
Calabaza	3,2	16,0	MS
Sandía	-	-	MS
<b>d. Raíces y Tubérculos</b>			
Remolachas, rojas	4,0	9,0	MT
Chirivía	-	-	S
Papa o Patata	1,7	12,0	MS
Camote o Batata	1,5-2,5	10,0	MS
Nabos	0,9	9,0	MS
Remolacha Azucarera	7,0	5,9	T
<b>e. Leguminosas (Leguminosae)</b>			
Frijoles o judías	1,0	19,0	S
Habas	1,5-1,6	9,6	MS
Caupís (cowpeas)	4,9	12,0	MT
Maní o cacahuete	3,2	29,0	MS
Guisantes o arveja	1,5	14,0	S
Soya	5,0	20,0	MT

<sup>1</sup> Estos datos son sólo guías generales – La tolerancia varía dependiendo del clima, condiciones del suelo y prácticas culturales. Los cultivos son generalmente menos tolerantes durante las etapas de germinación y formación de la semilla.

<sup>2</sup>  $EC_{e\text{ umbral}}$  representa la salinidad promedio en la zona radicular, a partir de la cual comienza a reducirse la productividad del cultivo.

<sup>3</sup> La salinidad en la zona radicular se mide como la conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo, y se expresa en deciSiemens por metro ( $dS\ m^{-1}$ ) a 25°C.

<sup>4</sup>  $b$  es la reducción porcentual de la productividad del cultivo por cada incremento de 1  $dS/m$  por encima del  $EC_{e\text{ umbral}}$

<sup>5</sup> La clasificación es: T = Tolerante, MT = Moderadamente Tolerante, MS = Moderadamente Sensitivo y S = Sensitivo

CUADRO 22 (continuación)

Cultivo	$CE_{e, \text{umbral}}$ ( $dS\ m^{-1}$ )	$b$ (% / $dS\ m^{-1}$ )	Clase
<b>f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)</b>			
Alcachofas	-	-	MT
Espárragos	4,1	2,0	T
Menta	-	-	-
Fresas	1,0-1,5	11,0-33,0	S
<b>g. Cultivos textiles</b>			
Algodón	7,7	5,2	T
Lino	1,7	12,0	MS
<b>h. Cultivos oleaginosos</b>			
Ricino y Girasol	-	-	MS
Cártamo	-	-	MT
<b>i. Cereales</b>			
Cebada	8,0	5,0	T
Avena	-	-	MT
Maíz (grano)	1,7	12,0	MS
Maíz, (dulce)	1,7	12,0	MS
Mijo	-	-	MS
Sorgo	6,8	16,0	MT
Arroz <sup>6</sup>	3,0	12,0	S
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	6,0	7,1	MT
Trigo, semi-enano ( <i>T. aestivum</i> )	8,6	3,0	T
Trigo, durum ( <i>Triticum turgidum</i> )	5,7-5,9	3,8-5,5	T
<b>j. Forrajes</b>			
Alfalfa	2,0	7,3	MS
Cebada (forraje)	6,0	7,1	MT
Bermuda	6,9	6,4	T
Trébol, Bersím	1,5	5,7	MS
Trébol (ladino, rojo, fresa)	1,5	12,0	MS
Caupís (forraje)	2,5	11,0	MS
Festuca (pasto fescue)	3,9	5,3-6,2	MT
Foxtail	1,5	9,6	MS
Pasto Harding	4,6	7,6	MT
Lovegrass	2,0	8,4	MS
Maíz (forraje)	1,8	7,4	MS
Pasto Ovillo (orchard grass)	1,5	6,2	MS
Rye-grass (perenne)	5,6	7,6	MT
Sesbania	2,3	7,0	MS
Sphaerophysa	2,2	7,0	MS
Pasto Sudán	2,8	4,3	MT
Trébol pequeño, hoja estrecha	5,0	10,0	MT
Trébol grande	2,3	19,0	MS
Vetch, común	3,0	11,0	MS
Trigo forrajero, alto	7,5	4,2	T
Trigo forrajero, cresta amplia	7,5	6,9	T
Trigo forrajero, cresta estándar	3,5	4,0	MT
Pasto Wildrye, beardless	2,7	6,0	MT

<sup>6</sup> Debido a que el arroz se cultiva bajo condiciones de inundación, estos valores se refieren a la conductividad eléctrica del agua del suelo cuando las plantas están sumergidas

CUADRO 22 (continuación)

Cultivo	CE <sub>e, umbral</sub> (dS m <sup>-1</sup> )	b (% / dS m <sup>-1</sup> )	Clase
<b>k. Caña de azúcar</b>	<b>1,7</b>	<b>5,9</b>	<b>MS</b>
<b>I. Frutas tropicales y árboles</b>			
Banano o plátano	-	-	MS
Café	-	-	-
Palma datilera	4,0	3,6	T
Árboles de palma	-	-	T
Piña (cultivo multi-anual)	-	-	MT
Té	-	-	-
<b>m. Uvas y Moras</b>			
Mora negra	1,5	22,0	S
Boysenberry	1,5	22,0	S
Uvas	1,5	9,6	MS
Lúpulo	-	-	-
<b>n. Árboles frutales</b>			
Almendras	1,5	19,0	S
Aguacate	-	-	S
Cítricos (Toronja)	1,8	16,0	S
Cítricos (Naranja)	1,7	16,0	S
Cítricos (Limón)	-	-	S
Cítricos (Lima)	-	-	S
Cítricos (Pomelo)	-	-	S
Cítricos (Mandarina)	-	-	S
Coníferas	-	-	MS/MT
Huertos de hoja caduca			
– Manzana	-	-	S
– Durazno o melocotón	1,7	21,0	S
– Cereza	-	-	S
– Pera	-	-	S
– Albaricoque	1,6	24,0	S
– Ciruela	1,5	18,0	S
– Granada	-	-	MT
Olivos	-	-	MT

Fuente principal:

Ayers y Westcot, 1985. Publicación de la FAO N° 29, Serie de Riego y Drenaje. Calidad de agua para la agricultura;  
Rhoades, Kandiah y Mashali, 1992. publicación de la FAO N° 48, Serie de Riego y Drenaje. El uso de agua salina para la  
producción de los cultivos.

Las ecuaciones presentadas pudieran no ser aplicables para situaciones de alta salinidad, donde pudieran no ser válidas las relaciones lineales entre CE<sub>e</sub>, la productividad del cultivo y el valor de K<sub>s</sub>. Se debe restringir el uso de las Ecuaciones 91 y 92 a condiciones donde CE<sub>e</sub> < CE<sub>e, umbral</sub> + 50/b. Por otra parte, las ecuaciones predicen que Y<sub>a</sub> = 0 antes de que K<sub>s</sub> = 0, cuando K<sub>y</sub> > 1 y viceversa.

Como se indicó anteriormente, con frecuencia la reducción en la ET<sub>c</sub> debida a la presencia de salinidad en el suelo, es causada en forma parcial por la reducción del tamaño de la planta y la reducción de la cobertura del suelo. Estos efectos son incluidos ampliamente en los valores de los coeficientes presentados en el Cuadro 23. Por lo tanto, en los casos donde el crecimiento de la planta está afectado por la salinidad y se utilicen las Ecuaciones 91 y 92, no se requerirá de reducciones adicionales al valor de K<sub>e</sub>, por ejemplo a través del IAF o la fracción de cobertura del suelo, tal como se describe en el Capítulo 9.

CUADRO 24

**Coefficientes estacionales de respuesta de la productividad, FAO No. 33, Serie de Riego y Drenaje.**

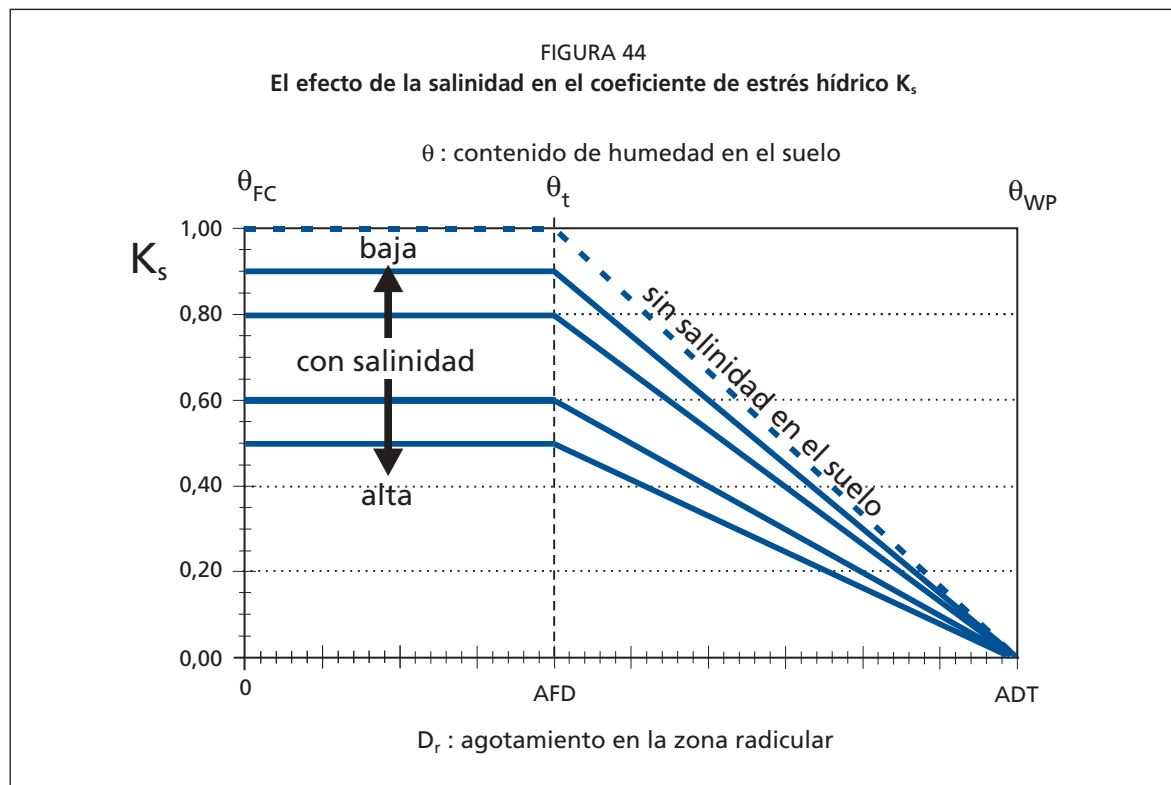
Cultivo	$K_y$	Cultivo	$K_y$
Alfalfa	1,1	Papa o patata	1,1
Banano	1,2-1,35	Cártamo	0,8
Frijoles o judías	1,15	Sorgo	0,9
Repollo	0,95	Soja	0,85
Cítricos	1,1-1,3	Trigo de primavera	1,15
Algodón	0,85	Remolacha azucarera	1,0
Uvas	0,85	Caña de azúcar	1,2
Maní o cacahuete	0,70	Girasol	0,95
Maíz	1,25	Tomate	1,05
Cebolla	1,1	Sandía	1,1
Guisantes o arveja	1,15	Trigo de invierno	1,05
Pimiento	1,1		

**Aplicación**

Bajo condiciones de régimen permanente, se puede predecir el valor de  $CE_e$  en función de la  $CE$  del agua de riego ( $CE_{iw}$ ) y la fracción de lavado, usando una ecuación estándar de lavado. Por ejemplo la fórmula del Estudio de Riego y Drenaje N° 29 de la FAO:  $LR = CE_{iw} / (5 CE_e - CE_{iw})$  calcula el requerimiento de lavado cuando aproximadamente un 40-30-20-10 por ciento de extracción del agua ocurre desde los cuartos (1/4) superior a inferior de la zona radicular antes del riego.  $CE_{iw}$  es la conductividad eléctrica del agua de riego. A partir de esta ecuación,  $CE_e$  se estima como:

$$EC_e = \frac{1 + LF}{LF} \frac{EC_{iw}}{5} \tag{93}$$

donde LF, la fracción real de lavado, se utiliza en lugar de LR, el requerimiento de lavado. La Ecuación 93 predice  $CE_e = 1,5 CE_{iw}$  en condiciones donde se emplea un 15-20



por ciento de la fracción de lavado. Se pueden utilizar otras ecuaciones de estimación de la fracción de lavado en lugar de la ecuación de la FAO-29, con el objeto de simular mejor las características locales. La Ecuación 93 es válida solo para los casos donde tanto la calidad del agua de riego y la fracción de lavado son constantes a lo largo de la temporada productiva. Se requerirá de tiempo para alcanzar un equilibrio de las sales en el suelo. En los casos donde existan lluvias importantes durante el invierno, con agua de alta calidad, así como lavados frecuentes de excelente calidad, el balance de sales en el suelo será sustancialmente diferente al comienzo de la temporada y con un valor promedio de  $CE_e$  menor a los que serían estimados a través de la Ecuación 93. Bajo esas condiciones particulares es aconsejable una calibración apropiada de Ecuación 93 en función de las condiciones locales.

### EJEMPLO 39

#### Efecto de la salinidad del suelo en la evapotranspiración del cultivo

Un campo de frijoles (judías) es cultivado en un suelo franco limoso el cual es regado durante la etapa de mediados de temporada utilizando agua que tiene una salinidad  $CE_{iw} = 1 \text{ dS m}^{-1}$ . Se emplea una fracción de lavado del 15 por ciento. El valor de  $CE_{e \text{ umbral}}$  y de la pendiente  $b$ , tomados del Cuadro 23, son  $1,0 \text{ dS m}^{-1}$  y  $19 \text{ \%/(dS m}^{-1})$  respectivamente. El valor de  $K_y$  para la temporada, según la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No 33 y el Cuadro 24 para los frijoles (judías) es  $K_y = 1,15$ . Compare el efecto sobre la evapotranspiración del cultivo, para varios niveles de agotamiento de humedad en la zona radicular, bajo condiciones de salinidad y en ausencia de salinidad. Los valores de ADT y AFA para el cultivo de frijoles son de 110 y 44 mm (para  $p = 0,4$ ).

Como la fracción de lavado es de 0,15,  $CE_e$  es estimado a través de la Ecuación 93 como  $CE_e = 1,5 CE_w = 1,5 (1) = 1,5 \text{ dS m}^{-1}$ . El valor de  $K_s$  en presencia de estrés por salinidad y ausencia de estrés hídrico es:

$$K_s = \left( 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e \text{ umbral}}) \right) = \left( 1 - \frac{19}{1,15(100)} (1,5 - 1,0) \right) = 0,92$$

El valor de  $K_s$  en presencia de estrés hídrico, pero en ausencia de estrés por salinidad es:

$$K_s = \left( \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} \right) = \left( \frac{110 - D_r}{100 - 44} \right) = \left( \frac{110 - D_r}{66} \right)$$

El valor de  $K_s$  en presencia de ambos, estrés hídrico y estrés por salinidad, es:

$$K_s = \left( 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e \text{ umbral}}) \right) \left( \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} \right) = 0,92 \left( \frac{110 - D_r}{66} \right)$$

El efecto sobre la evapotranspiración del cultivo, para varios valores de agotamiento de humedad en la zona radicular ( $D_r$ ) es:

$D_r$ (mm)	$K_s$ sin estrés por salinidad	$K_s$ con salinidad en el suelo ( $CE_e = 1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) (Ec. 92)	Reducción adicional en el valor potencial de $ET_c$ debido a la salinidad
0	1,00	sin reducción en $ET_c$	8%
35	1,00	sin reducción en $ET_c$	8%
40	1,00	sin reducción en $ET_c$	8%
44	1,00	sin reducción en $ET_c$	8%
50	0,91	9% de reducción	8%
60	0,76	24% de reducción	7%
70	0,61	39% de reducción	5%
80	0,45	55% de reducción	3%
90	0,30	70% de reducción	2%
100	0,15	85% de reducción	1%
110	0,00	$ET_c = 0$	--

## Capítulo 9

# ET<sub>c</sub> para vegetación natural, atípica y subóptima

Se define como vegetación atípica las disposiciones de los cultivos agrícolas que no se incluyen o describen en los Cuadros 12 y 17. Se define como vegetación subóptima, según se utiliza en esta publicación, a la vegetación que se desarrolla bajo condiciones imperfectas de crecimiento (es decir, condiciones relativamente pobres de densidad, altura, área foliar, fertilidad o vitalidad), al compararse con las condiciones óptimas.

El enfoque mediante el cual cada cultivo se caracteriza por un coeficiente del cultivo  $K_c$  y donde la evapotranspiración del cultivo se obtiene a través del producto de  $K_c$  y la evapotranspiración de referencia  $ET_o$ , también puede ser utilizado como una manera simple y conveniente para caracterizar la vegetación que se desarrolla en condiciones naturales, así como para aquellos cultivos agrícolas que crecen bajo prácticas culturales atípicas. En este capítulo se presentan procedimientos para estimar los valores de  $K_c$  correspondientes a la vegetación natural y para la vegetación agrícola para la cual no se dispone de valores de  $K_c$ .

### PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Como se describe en la Figura 27, el primer paso en el procedimiento de  $K_c$   $ET_o$  lo constituye la estimación de la duración de las etapas de desarrollo. Esto también es aplicable para los casos de la vegetación natural y otros tipos de vegetación. El siguiente paso lo constituye la elaboración de las curvas del coeficiente del cultivo, las cuales representan el cociente entre los valores de  $ET_c$  y  $ET_o$  durante las distintas etapas de crecimiento de la vegetación.

### Etapa inicial de crecimiento

El procedimiento para estimar el coeficiente del cultivo para la etapa inicial de crecimiento para vegetación natural, atípica y subóptima es idéntico al descrito en el Capítulo 6 (coeficiente único del cultivo  $K_{c\ ini}$ ) o en el Capítulo 7 (coeficiente dual del cultivo,  $K_{cb\ ini} + K_c$ ). El coeficiente del cultivo se determina principalmente en función de la frecuencia bajo la cual el suelo se humedece.

### Etapas de mediados y final de la temporada de crecimiento

El valor de  $K_c$  durante la etapa de mediados de temporada ( $K_{c\ med}$  y  $K_{cb\ med}$ ) y en menor grado el valor de  $K_c$  para la etapa final, son distintos a los descritos en capítulos anteriores. Debido a que con frecuencia se presenta una reducción de la cobertura del suelo en los casos de la vegetación natural y la subóptima, el valor de  $K_c$  es afectado en gran medida por la frecuencia de las lluvias o el riego, así como por la cantidad de área foliar y la cobertura del suelo.

### *Procedimiento del coeficiente dual del cultivo*

Para la determinación del valor de  $K_c$  para vegetación natural, atípica, o subóptima, se deberá seguir en general el procedimiento descrito en el Capítulo 7, donde se utilizan coeficientes separados para la transpiración ( $K_{cb}$ ) y para la evaporación ( $K_e$ ). De esta manera se pueden determinar directamente los efectos de la evaporación en la superficie del suelo.



En esta sección se presentan dos procedimientos para ajustar el valor del coeficiente basal del cultivo ( $K_{c\ med\ aj}$ ) para vegetación escasa. Según estos procedimientos, el valor de  $K_{cb\ med\ aj}$  es estimado a partir del IAF (Ecuación 97) o considerando la cobertura efectiva del suelo (Ecuación 98). Después de determinar el valor de  $K_{cb\ med\ aj}$ , se procederá a determinar el coeficiente de evaporación,  $K_e$ , para finalmente obtener el coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada:  $K_{c\ med\ aj} = K_{cb\ med\ aj} + K_e$ . En el Capítulo 7 se presentan los procedimientos para el cálculo de  $K_e$ .

Aún cuando el valor de  $K_{cb\ med\ aj}$  sea pequeño, el valor total de  $K_{c\ aj}$  ( $=K_{cb\ aj} + K_e$ ) después de una lluvia pudiera algunas veces ser tan alto o mayor que el valor de  $K_c$  correspondiente a las condiciones óptimas, debido a la evaporación que ocurre en las superficies del suelo entre la vegetación escasa.

### *Procedimiento del coeficiente único del cultivo*

Cuando se utiliza el coeficiente único del cultivo  $K_c$  del Capítulo 6, los efectos promedios del humedecimiento del suelo son incorporados en un valor medio general de  $K_c$ . En las secciones siguientes se presentan algunas guías generales para la estimación de  $K_{c\ aj}$ . De igual forma se puede determinar el valor del coeficiente del cultivo a partir del valor ajustado de  $K_{cb}$ , considerando la frecuencia de humedecimiento del suelo; ósea que durante la etapa de mediados de temporada  $K_{c\ aj} = K_{cb\ aj} + 0,05$  para humedecimiento infrecuente y  $K_{cb\ aj} + 0,10$  para humedecimientos de hasta una vez por semana. Para humedecimientos más frecuentes, se debe utilizar el procedimiento del coeficiente dual del cultivo.

Alternativamente, se pueden utilizar las Ecuaciones 97 y 98 para determinar  $K_e$  en lugar de  $K_{cb}$ . En esos casos,  $K_{c\ min}$  en las Ecuaciones 97 y 98 puede ser asumido como igual a  $K_{c\ ini}$ , donde  $K_{c\ ini}$  es estimado a través de la Figura 29 o 30. El uso del  $K_{c\ ini}$  incorpora los efectos de la evaporación del suelo y se constituye por lo tanto en un límite inferior en la estimación de  $K_{c\ med}$ .

### **Condiciones de estrés hídrico**

Cuando la lluvia o el riego sean insuficientes, se producirán situaciones de estrés hídrico que harán que los valores de evapotranspiración estén por debajo de la evapotranspiración de cultivos en condiciones estándar,  $ET_c$ . Para la determinación de la reducción en el valor de  $K_c$  bajo condiciones de disponibilidad limitada de agua en el suelo, se utiliza el coeficiente de estrés hídrico  $K_s$  tal como se describe en el Capítulo 8.

## **AJUSTE PARA LA ETAPA DE MEDIADOS DE TEMPORADA PARA VEGETACION ESCASA**

### **Ajuste a partir de observaciones de campo**

Como una aproximación burda del valor de  $K_c$  durante la etapa de mediados de temporada en cultivos donde la cobertura es reducida debido a enfermedades, estrés, plagas, baja densidad entre plantas (a pesar de que, en condiciones óptimas, generalmente sombreaman casi por completo el suelo), se pueden reducir los valores de  $K_{c\ med}$  y  $K_{cb\ med}$  mediante un factor de ajuste que depende del desarrollo real de la vegetación:

$$K_{c\ aj} = K_c - A_{cm} \quad (94)$$

donde

- $K_c$  valor de  $K_c$  del Cuadro 12 ( $K_{c\ med}$ ) ó 17 ( $K_{cb\ med}$ ) después de ajustarlo por el efecto de clima (Ecuación 62 o 70),
- $K_{c\ aj}$  valor ajustado de  $K_c$  ( $K_{c\ med\ aj}$  o  $K_{cb\ med\ aj}$ ).

El ajuste del valor de  $K_c$  a través de la Ecuación 94 no es válido para los casos donde los cultivos sean frecuentemente humedecidos y donde el incremento de la evaporación contrarreste la reducción de la cobertura del suelo. Bajo esas condiciones, se debe aplicar la Ecuación 94 sólo al coeficiente  $K_{cb}$ .

El coeficiente de ajuste,  $A_{cm}$ , se estima como:

$$A_{cm} = 1 - \left[ \frac{IAF}{IAF_{denso}} \right]^{0,5} \quad (95)$$

donde IAF es el índice real de área foliar (Recuadro 17) y  $IAF_{denso}$  es el índice de área foliar que se espera en el mismo cultivo bajo condiciones normales y prácticas de manejo estándar. Se pueden reemplazar los valores de IAF en la Ecuación 95 por los valores correspondientes de la fracción de cobertura del suelo ( $f_c$ ):

$$A_{cm} = 1 - \left[ \frac{f_c}{f_{c \text{ denso}}} \right]^{0,5} \quad (96)$$

#### EJEMPLO 40

##### Aproximación inicial del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada para vegetación escasa

Un cultivo de tomate fue cultivado en Davis, California, Estados Unidos en 1980 y solamente desarrolló un 50% de cobertura del suelo durante la etapa de mediados de temporada (Pruitt *et al.*, 1984). La altura del cultivo de tomate fue de 0,75 m. El porcentaje típico de cobertura del suelo para tomates con cobertura completa en Davis es de 85 a 90% y corresponde al valor de  $K_{cb \text{ med}}$  incluido en el Cuadro 17 para el tomate. Los valores medios de velocidad del viento y humedad relativa media durante la etapa de mediados de temporada fueron  $u_2 = 1,1 \text{ m s}^{-1}$  y  $HR_{min} = 30\%$ . La latitud de Davis es  $38,5^\circ \text{ N}$  y el punto medio de esta etapa ocurre en Julio 20. ¿Cuál es el valor de un ajuste de  $K_{cb \text{ med}}$  para tomates que reflejaría las condiciones del 50% de la cobertura del suelo?

De los Cuadros 12 y 17,  $K_{c \text{ med}} = 1,2$  y  $K_{cb \text{ med}} = 1,15$ .

Realizando los ajustes por clima (Ec. 62 y Ec. 70), donde  $u_2 = 1,1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $HR_{min} = 30\%$  y la altura promedio del cultivo = 0,75 m,

$$K_c = K_{c \text{ Cuadro}} + [0,04(1,1-2)-0,004(30-45)](0,75/3)0,30 = K_{c \text{ Cuadro}} + 0,02$$

resulta,  $K_{c \text{ med}} = 1,22$  y  $K_{cb \text{ med}} = 1,17$ .

La fracción de cobertura del suelo, considerada en los valores tabulados, correspondiente a tomates desarrollados en condiciones óptimas es de aproximadamente 85% ( $f_{c \text{ denso}} = 0,85$ ). En el caso del cultivo esparcido de tomates donde  $f_c = 0,50$ ,

Utilizando la Ec. 96  $A_{cm} = 1 - (0,50/0,85)0,5 = 0,23$

Los valores de  $K_{cb \text{ med aj}}$  y  $K_{c \text{ med aj}}$  para un 50% de cobertura del suelo son:

(usando la Ec. 94)  $K_{cb \text{ med aj}} = 1,17 - 0,23 = 0,94$

$$K_{c \text{ med aj}} = 1,22 - 0,23 = 0,99$$

Compárese estos resultados con los obtenidos en el Ejemplo 42, donde se realizó una estimación mas precisa del valor de  $K_{cb \text{ med aj}}$ .

Como una primera estimación, se espera que el valor del coeficiente del cultivo se reduzca en un 20% con respecto al valor correspondiente a condiciones óptimas.

### Estimación de $K_{cb \text{ med}}$ a partir del índice de área foliar (IAF)

Típicamente, la vegetación natural posee área foliar menor o fracción de cobertura del suelo menor que en el caso de la vegetación agrícola, la cual ha sido desarrollada para condiciones de completa cobertura y en condiciones de humedad del suelo que favorecen un crecimiento vigoroso. Esto es especialmente cierto para los casos de climas áridos y semiáridos. Cuando la densidad entre plantas o el área foliar sea menor que las asociadas a condiciones de completa cobertura (definidas generalmente como  $IAF \geq 3$ ), se debe reducir el valor de  $K_{cb \text{ med}}$  para los casos de la vegetación natural o

subóptima. En los casos donde el valor de IAF pueda medirse o aproximarse, se puede estimar un valor máximo de  $K_{cb\ med}$  para la vegetación natural, atípica, o subóptima, con un procedimiento similar al presentado por Ritchie como:

$$K_{cb\ med\ aj} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min})(1 - \exp[-0,7\ IAF]) \quad (97)$$

donde

$K_{cb\ med\ aj}$	valor estimado de $K_{cb}$ durante la etapa de mediados de temporada cuando la densidad entre plantas o área foliar son menores que las correspondientes a condiciones de cobertura completa,
$K_{cb\ full}$	valor estimado de $K_{cb}$ durante la etapa de mediados de temporada (en el máximo del tamaño o la altura de la planta) para vegetación que cubre completamente el suelo o con $IAF > 3$ (Ecuaciones 99 y 100),
$K_{c\ min}$	valor mínimo de $K_c$ para suelo descubierto ( $K_{c\ min} \approx 0,15 - 0,20$ ),
IAF	índice real de área foliar, definido como el área de las hojas dividido entre el área del suelo por debajo de las plantas, promediado sobre una área grande. Solamente se considera un lado de las hojas [ $m^2\ m^{-2}$ ].

#### RECUADRO 17

##### Medición y estimación del IAF

Se puede medir directamente el IAF a través de la cosecha de todas las hojas verdes y sanas de la vegetación que se encuentran en un área determinada, por ejemplo 1 m<sup>2</sup> ó 10 m<sup>2</sup>, y luego midiendo y sumando el área de cada hoja a través de métodos fotométricos; o bien midiendo áreas de algunas hojas representativas, promediar las áreas, y luego multiplicar por el número total de hojas contadas.

En la ausencia de mediciones del IAF, se puede estimar IAF para vegetación anual y escasa como:

$$IAF = IAF_{denso} \left[ \frac{\text{Población}}{\text{Población}_{denso}} \right]^a$$

donde

$IAF_{denso}$	Valor del IAF para especies particulares de plantas, bajo condiciones de crecimiento normales, 'densas' u óptimas. $LAI_{denso}$ puede ser obtenido de fuentes bibliográficas que traten acerca de cultivos y vegetación.
Población	número de plantas por área unitaria de superficie del suelo bajo las condiciones reales de crecimiento [ $No. m^{-2}$ ].
$Población_{denso}$	número de plantas por unidad de área de superficie del suelo bajo condiciones 'densas' u óptimas de crecimiento [ $No. m^{-2}$ ].
a	a = 0,5 cuando la población esta formada por plantas de crecimiento vigoroso; a = 1 cuando las plantas son menos vigorosas

El exponente 0,5 de la ecuación anterior simula la tendencia de la vegetación a compensar por la baja densidad de las plantas mediante el incremento del tamaño y el número total de las hojas de cada planta individual. Por lo tanto, en realidad el valor de IAF no disminuye en proporción directa a la población de plantas. En los casos donde no se incremente el tamaño de las plantas en condiciones de baja densidad, el exponente 'a' deberá ser considerado como 1 ( $a = 1$ ). Se puede presentar estos últimos casos cuando la fertilidad del suelo sea pobre o cuando la salinidad del suelo, estrés hídrico, o mal drenaje inhiban tanto el crecimiento como la densidad entre plantas, lo que retardará el crecimiento de plantas individuales.

Se recomienda la Ecuación 97 para tipos de vegetación anual que sean naturales o que se encuentran en condiciones subóptimas debido a la baja densidad entre plantas, o bajo los efectos de algún tipo de estrés ambiental que afecte su crecimiento.

La relación expresada en la Ecuación 97 produce resultados similares a los sugeridos por Ritchie (1974). Para  $IAF > 3$ ,  $K_{cb\ med} \approx K_{cb\ full}$ . El valor de  $IAF$  utilizado en la Ecuación 97 debe representar el  $IAF$  «verde», donde se considera solamente las hojas sanas que son activas para la transferencia de vapor de agua.

### Estimación de $K_{cb\ med}$ a partir de la cobertura efectiva del suelo ( $f_{c\ eff}$ )

Cuando solo se disponga de valores estimados de la fracción efectiva de la superficie del suelo cubierta por la vegetación, se puede aproximar el valor  $K_{cb\ med\ aj}$  a través de la siguiente expresión:

$$K_{cb\ med\ aj} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \left( \min \left( 1, 2f_c, (f_{c\ eff})^{\left(\frac{1}{1+h}\right)} \right) \right) \quad (98)$$

donde

$K_{cb\ med\ aj}$	valor estimado de $K_{cb}$ durante la etapa de mediados de temporada cuando la densidad entre plantas o área foliar son menores a las correspondientes a condiciones de cobertura completa,
$K_{cb\ full}$	valor estimado de $K_{cb}$ durante la etapa de mediados de temporada (en el máximo del tamaño o altura de la planta) para vegetación que cubre completamente el suelo o con $IAF > 3$ (ver Ecuaciones 99 y 100),
$K_{c\ min}$	valor mínimo de $K_c$ para suelo descubierto (con presencia de vegetación) ( $K_{c\ min} \approx 0,15 - 0,20$ ),

#### RECUADRO 18

#### Medición y estimación de $f_{c\ eff}$

Normalmente el término  $f_{c\ eff}$  debe representar la fracción de la superficie del suelo que sombreada por la vegetación. En general este valor es mayor a  $f_c$ , la fracción real de cobertura de la superficie del suelo observada verticalmente por encima de la vegetación. La cantidad de sombreado esta asociada con la cantidad de radiación solar que es interceptada por las plantas y que puede ser convertida potencialmente en evapotranspiración. La fracción total de sombreado es función del ángulo solar, así como de la extensión horizontal y forma de las plantas individuales (o hileras) con relación a su altura.

El valor de  $f_{c\ eff}$  para vegetación de forma ‘rectangular’, tal como es el caso de la mayoría de los cultivos agrícolas sembrados en hileras, puede ser aproximado como:

$$f_{c\ eff} = f_c \left[ 1 + \frac{HWR}{\tan(\eta)} \right] \leq 1$$

donde:

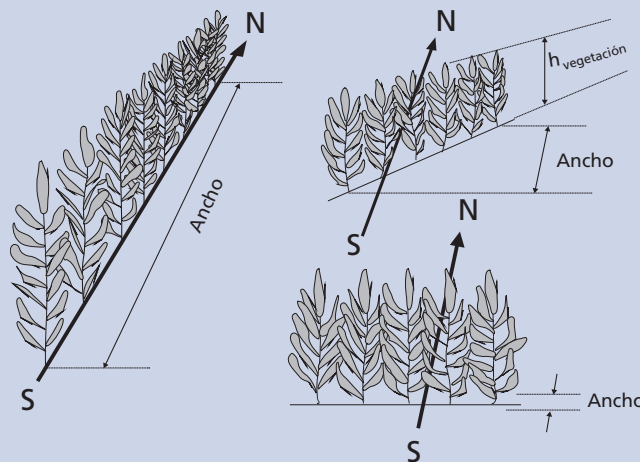
$f_c$	fracción observada de la superficie del suelo que se encuentra cubierta por la vegetación, observada desde la posición «nadir» (desde arriba, mirando verticalmente hacia abajo) [0,01 - 1],
HWR	cociente entre la altura y el ancho de las plantas individuales o grupos de ellas, cuando son observadas desde el este o desde el oeste [ ],
$\tan(\eta)$	tangente del ángulo medio del sol por encima del horizonte, $\eta$ , durante el período de máxima evapotranspiración (generalmente entre las horas 11:00 y 15:00) [ ]. En la mayoría de los casos $\eta$ puede ser calculado para el mediodía solar (12:00 horas).

El valor de HWR se calcula como:

$$\text{HWR} = \frac{h_{\text{vegetación}} (\cos(\Gamma))}{\text{Ancho}}$$

donde

- $h_{\text{vegetación}}$  altura vertical promedio del dosel de la planta [m],  
 Ancho ancho medio del dosel de una planta o grupo de ellas (ósea, la hilera) [m]  
 $\Gamma$  ángulo de la hilera de plantas desde la dirección este-oeste [rad] (para hileras orientadas este-oeste,  $\Gamma = 0$ ; para hileras orientadas norte-sur,  $\Gamma = \pi/2$ )



Para hileras orientadas norte-sur, el valor de HWR sería igual a cero, como  $\cos(\pi/2) = 0$ . Esto implica que las hileras de plantas orientadas desde el norte al sur tienen  $f_{c \text{ eff}} \approx f_c$ , debido a que el suelo se encuentra expuesto al sol durante varias veces al día y debido a que el área sombreada es la misma que la fracción de cobertura de la vegetación que ocurre a la mitad del día.

En el caso de los árboles o de la vegetación cuyo dosel no se extienda hasta el suelo, el valor de  $h_{\text{vegetación}}$  no incluirá la longitud de la porción inferior del tronco, sino solamente la vegetación activa. Por lo tanto, en estas situaciones  $h_{\text{vegetación}} < h$  donde  $h$  es la altura media de la planta.

Para vegetación de forma circular o esférica, tal como en el caso de los árboles, se puede estimar el valor de  $f_{c \text{ eff}}$  como:

$$f_{c \text{ eff}} = \frac{f_c}{\sin(\eta)} \leq 1$$

donde  $\sin(\eta)$  es el seno del ángulo medio del sol sobre el horizonte,  $\eta$ , durante el período de máxima evapotranspiración (generalmente entre 11:00 y 15:00) [ ]

**Ángulo solar medio sobre el horizonte durante el período de máxima evapotranspiración ( $\eta$ )**

Se puede calcular el valor del seno de  $\eta$  para un determinado momento del día, como:

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (\text{Ec. 22})$$

donde

- $\varphi$  latitud [rad] (negativa para latitud sur) (Ec. 22)  
 $\delta$  declinación solar [rad] (Ec. 24)  
 $\omega$  ángulo del tiempo solar [rad] (Ec. 31)

Generalmente,  $f_{c \text{ eff}}$  puede ser calculado al mediodía solar (12:00), por lo que  $\omega = 0$  y la ecuación anterior se reduce a lo siguiente:

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)$$

El valor de  $\eta$  puede ser obtenido calculando el arco seno de la ecuación anterior.

$f_c$	fracción observada de la superficie del suelo que se encuentra cubierta por la vegetación, observada desde arriba verticalmente hacia abajo (nadir) [0,01 - 1],
$f_{c\text{ eff}}$	fracción efectiva de la superficie del suelo cubierta o sombreada por la vegetación [0,01-1] (ver Recuadro 18),
$h$	altura de la planta [m].

La conductancia de los estomas y el transporte del agua a través de las plantas pueden limitar los valores de  $ET$  para condiciones de vegetación escasa y de gran altura. Bajo estas condiciones, el valor de  $K_{cb\text{ med}}$  es limitado por el término « $2 f_c$ » en la Ecuación 98. La Ecuación 98 se aplica satisfactoriamente a los casos de árboles y arbustos.

### Estimación de $K_{cb\text{ full}}$

#### *Cultivos agrícolas:*

Los cultivos agrícolas que se desarrollan bajo condiciones subóptimas son aquellos cultivos que no se han alcanzado su potencial, debido al estrés ambiental causado por la falta de agua en el suelo, baja fertilidad, enfermedades, daños debido a malezas o insectos, o debido a una baja densidad entre plantas. El valor de  $K_{cb\text{ full}}$ , en las Ecuaciones 97 y 98, puede tomarse como igual al valor de  $K_{cb\text{ med}}$  indicado para cualquier cultivo de «cobertura completa» ( $f_{c\text{ eff}} \sim 1$ ) del Cuadro 17, después de ajustarlo para las condiciones climáticas (Ecuación 70):

$$K_{cb\text{ full}} = K_{cb\text{ med, Tabla}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (99)$$

donde

$u_2$	velocidad promedio del viento medida a 2 m de altura durante la etapa de mediados de temporada [ $m\ s^{-1}$ ],
$HR_{\text{min}}$	valor promedio de la humedad relativa mínima diaria durante la etapa de mediados de temporada [%],
$h$	altura máxima media de la planta [m].

#### *Vegetación natural y cultivos no incluidos en el Cuadro 17:*

Para vegetación natural, cultivos de cobertura incompleta, o para cultivos no incluidos en el Cuadro 17, se puede aproximar el valor de  $K_{cb\text{ full}}$  en función del clima y la altura media de la planta, para áreas de vegetación que son mayores de unas pocas hectáreas:

$$K_{cb\text{ full}} = K_{cb,h} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (100)$$

donde

$K_{cb,h}$	corresponde al $K_{cb\text{ med}}$ para vegetación con cobertura completa ( $IAF > 3$ ), en condiciones sub-húmedas y vientos suaves ( $HR_{\text{min}} = 45\%$ y $u_2 = 2\ m\ s^{-1}$ ), (Ecuación 101),
$u_2$	velocidad promedio del viento a 2 m de altura durante la etapa de mediados de temporada [ $m\ s^{-1}$ ],
$HR_{\text{min}}$	valor promedio de humedad relativa mínima diaria durante la etapa de mediados de temporada [%],
$h$	altura máxima promedio de la planta [m].

Se puede estimar el valor de  $K_{cb,h}$  de la siguiente forma:

$$K_{cb,h} = 1.0 + 0.1 h \quad \text{para } h \leq 2\ m \quad (101)$$

donde  $K_{cb,h}$  está limitado a  $\leq 1,20$  cuando  $h > 2$  m. El valor de 1,2 representa un límite superior general de  $K_{cb,med}$  para vegetación alta que cubre completamente el suelo y con  $IAF > 3$  bajo condiciones sub-húmedas y vientos suaves. Este límite de 1,2 se ajusta para otras condiciones climáticas en la Ecuación 100. Las Ecuaciones 100 y 101 representan aproximaciones generales del incremento en el valor de  $K_{cb,full}$  con la altura de la planta y el clima. La forma de estas ecuaciones corresponde a la tendencia general representada por la Ecuación 70.

Para áreas pequeñas y aisladas con vegetación, se podría presentar la necesidad de incrementar el valor de  $K_{cb,full}$  por encima del valor estimado a través de la Ecuación 99 o la 100, tal como se presenta en el Capítulo 10.

### Conclusión

Se pueden utilizar las Ecuaciones 97 y 98 para estimar o para reducir el valor de  $K_{cb}$  para vegetación agrícola subóptima. Los exponentes incluidos en las ecuaciones 97 y 98 reflejan los efectos de la advección a micro-escala (transferencia) de calor sensible desde las superficies secas del suelo entre plantas hacia las hojas, lo que incrementa el valor de ET por unidad de área foliar; así como los efectos del incremento de la rugosidad aerodinámica a medida que aumenta el valor del IAF. La Ecuación 98 sugiere que a medida que aumenta  $h$ , aumenta el área foliar total y se incrementa la rugosidad efectiva de la vegetación, lo que incrementa el coeficiente del cultivo. Además, a medida que aumenta  $h$ , existirá una mayor oportunidad para la producción de micro-advección de calor desde el suelo a la vegetación, incrementando el intercambio turbulento dentro de la vegetación para la misma cantidad de cobertura del suelo. Todas estos factores afectan la magnitud relativa de  $K_{cb,med}$ .

Se deben utilizar con precaución las Ecuaciones 97 y 98, debido a que ellas sólo proporcionan estimaciones del valor máximo esperado de  $K_{cb}$  durante el máximo del crecimiento de las plantas, para vegetación con hojas transpirantes sanas y con una

#### EJEMPLO 41

##### Estimación del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada

Estimar el valor de  $K_{cb,med}$  y  $K_{c,med}$  para vegetación de 2 m de altura de forma rectangular que posee igual alto y ancho, donde un 30% del terreno está cubierto por la vegetación ( $f_c = 0,3$ ) para el día 19 de Julio (día 200 del año) y a una latitud de 40°N. Durante la etapa de mediados de temporada  $HR_{min} = 55\%$  y  $u_2 = 1,5$  m s<sup>-1</sup>.

En el día  $J = 200$ , a una latitud  $\varphi = 40$  ( $\pi/180$ ) = 0,70 radianes (40°N) y utilizando la Ec. 24, se tiene que la declinación solar es de  $\delta = 0,36$  radianes.

Al mediodía solar ( $\omega = 0$ ):

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta) = 0,94$$

El valor de  $\eta$ , calculando el arcoseno del valor anterior, es de 1,24 radianes y la  $\tan(\eta) = 2,8$ . Si  $f_c = 0,3$  y el valor de HWR para la vegetación es de 1, entonces  $f_{c,eff}$  del Recuadro 18 es:  $0,3(1+1/2,8) = 0,41$ .

Usando Ec. 101  $K_{cb,h} = 1,0 + 0,1(2) = 1,20$  ( $\leq 1,20$ , OK)

Usando Ec. 100  $K_{cb,full} = 1,20 + (0,04(1,5-2) - 0,004(55-45)) (2/3)0,3 = 1,15$

Por lo tanto, el valor de  $K_{cb,med}$  estimado a través de la Ec. 98 para un  $K_{c,min} = 0,15$  es:

$$\begin{aligned} K_{cb,med} &= K_{c,med} + (K_{cb,full} - K_{c,min}) \min[1, 2f_{c,eff} (f_{c,eff})^{(1/(1+h))}] \\ &= 0,15 + (1,15 - 0,15) \min[1, 2(0,3), (0,4)^{(1/(1+2))}] = 0,75 \end{aligned}$$

Este valor no necesita de ajustes adicionales por clima.

$K_{c,med}$  (donde  $K_{c,med}$  incluye los efectos promedio del humedecimiento) puede ser derivado del  $K_{cb,med}$  utilizando las indicaciones presentadas en los procedimientos de cálculo al inicio de este Capítulo:

$$K_{c,med} = K_{cb,med} + (0,05 \dots 0,10) = 0,80 \dots 0,85$$

dependiendo de la frecuencia del humedecimiento del suelo.

Los valores estimados del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada son  $K_{cb,med} = 0,75$  y  $K_{c,med} = 0,80$  a  $0,85$ .

## EJEMPLO 42

**Estimación del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada para una cobertura reducida del suelo**

Se puede estimar con mayor precisión el valor de  $K_{cb,med}$  para el cultivo de tomates del Ejemplo 40, que solo desarrolló un 50% de cobertura del suelo en Davis, California, Estados Unidos, si uno conoce que el cultivo de tomate fue plantado en hileras de 1,52 m orientadas este-oeste; que el cultivo alcanzó una altura de 0,75 m y que el radio entre la altura y el ancho del cultivo de tomate puede ser estimado como de 1,0 aproximadamente, para hileras orientadas este-oeste. La latitud es de 38,5°N y el punto medio de la etapa de mediados del período ocurre el 20 de Julio. ¿Cuál es el valor de  $K_{cb,med}$  para tomates que reflejaría la condición del 50% de cobertura del suelo?

En el día  $J = 201$  (20 de Julio), a una latitud  $\varphi = 38,5$  ( $\pi/180$ ) = 0,67 radianes (38,5°N) y utilizando la Ec. 24, la declinación solar es  $\delta = 0,36$  radianes. Al mediodía solar ( $\omega = 0$ ):

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta) = 0,95$$

El valor de  $\eta$ , calculando el arcoseno del valor anterior, es de 1,26 radianes. Por lo tanto, para el valor observado de  $HWR = 1$  y  $f_c = 0,5$ , se puede calcular la cobertura efectiva del suelo para las hileras orientadas este-oeste como (ver Recuadro 18):

$$f_{c,eff} = 0,5 [1 + 1/\tan(1,26)] = 0,66$$

El valor de  $K_{cb,med}$  en el Cuadro 17 correspondiente a un cultivo de tomate de cobertura completa, es de 1,15 y el valor promedio de  $h$  para tomates completamente desarrollados (esta variedad) es de 0,75 aproximadamente. Aplicando el ajuste por clima (usando Ec. 99):

$$K_{cb,full} = 1,15 + [0,04(1,1-2) - 0,004(30-45)] (0,75/3)0,30 = 1,17$$

Utilizando la Ec. 98 y considerando  $K_{c,min} = 0,15$ , el valor ajustado de  $K_{cb,med}$  para un 50% de cobertura del suelo:

$$K_{cb,med,aj} = 0,15 + (1,17 - 0,15) \min(1, 2(0,5), 0,661/(1+0,76)) = 0,95$$

El valor de  $K_{cb,med,aj} = 0,95$  para un 50% de cobertura del suelo, es similar a la primera estimación calculada en el Ejemplo 40 y ambos son comparables a los valores medidos de  $K_{cb,med} \sim 0,90$  a 1,00, determinados a través de un lisímetro de precisión por Pruitt *et al.* (1984).

superficie seca del suelo. Cuando el control de los estomas sea mayor que en el caso de la vegetación agrícola típica, entonces el valor de  $K_{cb}$  deberá ser reducido adicionalmente utilizando las recomendaciones establecidas en la sección próxima (Ecuación 102).

**ETAPA DE MEDIADOS DE TEMPORADA- AJUSTE POR CONTROL ESTOMÁTICO**

En los casos de vegetación que presente un alto grado de control estomático, se podría requerir una reducción del valor de  $K_{cb,full}$  en la Ecuaciones 97 y 98. Para los casos de algunos tipos de vegetación de desiertos o árboles que posean una resistencia foliar significativamente mayor que la mayoría de los cultivos agrícolas (donde el valor de  $r_l$  esta comúnmente alrededor de los 100  $s\ m^{-1}$ ), se puede modificar el valor de  $K_{cb,med}$  estimado a través de las Ecuaciones 97 y 98, multiplicándolo por un factor de corrección de la resistencia estomática,  $F_r$ . Este factor de resistencia se desarrolla en base en la ecuación de FAO Penman-Monteith:

$$F_r \approx \frac{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0,34u_2 \frac{r_l}{100}\right)} \quad (102)$$

donde  $r_l$  es la resistencia foliar media de la vegetación considerada [ $s\ m^{-1}$ ].

El valor medio de la resistencia foliar  $r_l$  para el pasto de referencia utilizado en  $ET_c$  es de 100  $s\ m^{-1}$ , al igual que para una variedad de cultivos agrícolas. Valores de  $r_l$  para varios cultivos agrícolas se muestran en Körner *et al.* (1978) y Allen *et al.* (1996). La Ecuación 102 usa el valor fijo de la rugosidad aerodinámica del pasto, en lugar de la rugosidad de la vegetación considerada, debido a que el valor ajustado de  $K_c$  es multiplicado por la  $ET_c$  del pasto y éste  $K_c$  ya incluye los efectos de la rugosidad aerodinámica de la vegetación considerada.



## EJEMPLO 43

**Estimación de  $K_{cb\ med}$  utilizando la cobertura del suelo y considerando la reducción por control estomático**

Un huerto de árboles de olivo tiene un espaciamiento entre plantas de 10 m. El diámetro horizontal de los árboles, visto desde arriba, es de 5 m. La altura de los árboles es de 5 m. La porción inferior de los árboles no presenta vegetación hasta una altura de 1,5 m. El suelo entre árboles se encuentra descubierto. El valor promedio de  $u_2$  durante la etapa de mediados de temporada es de  $2\text{ m s}^{-1}$  y el valor promedio de  $HR_{\min} = 25\%$ . El punto medio de la etapa de mediados de temporada ocurre el 29 de Junio (ósea, el día 180 del año). La latitud del sitio es de  $30^\circ\text{N}$ .

Estimar el valor de  $K_{cb\ med}$  utilizando la Ec. 98 para un espaciamiento de  $10 \times 10\text{ m}$  y para  $5 \times 10\text{ m}$ .

En el día  $J = 180$  (29 de Junio), a una latitud de  $\varphi = 30$  ( $\pi/180$ ) = 0,52 radianes ( $30^\circ\text{N}$ ) y utilizando la Ec. 24, la declinación solar es de  $\delta = 0,405$  radianes. Al mediodía solar ( $\omega = 0$ ):

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta) = 0,99$$

Como los árboles de olivo tienen una forma aproximadamente circular, la fracción efectiva de cobertura del suelo (Recuadro 18) puede ser estimada como  $f_{c\ eff} = f_c/(\sin(\eta))$ .

$$f_c = \text{área del dosel} / \text{área de influencia del árbol} = (\pi(5)^2/4)/(10)(10) = 0,196$$

$$f_{c\ eff} = 0,196/0,99 = 0,20$$

Usando Ec. 101:  $K_{cb,h} = 1,0 + 0,1(5) > 1,2$  o  $K_{cb,h} = 1,2$

Usando Ec. 100:  $K_{cb\ full} = 1,2 + [0 - 0,004(25 - 45)] (5/3)^{0,3} = 1,29$

Usando Ec. 98 y considerando  $K_{c\ min} = 0,15$ :

$$K_{cb\ med} = 0,15 + (1,29 - 0,15) \min(1, 2(0,196), (0,20)^{1/(1+5)}) = 0,60$$

Körner *et al.* (1979) señala que los olivos (*Olea europaea*) tienen un  $r_1$  de alrededor  $420\text{ s m}^{-1}$ . Por lo tanto, asumiendo  $T_{\text{media}} = 25^\circ\text{C}$  y que la elevación del huerto es de  $0\text{ m}$  (nivel del mar), por lo que  $\Delta = 0,189\text{ kPa}$  (Ec. 13) y  $\gamma = 0,0676\text{ kPa}$  (Ec. 8),  $F_r$  es estimado a través de la Ec. 102 como:

$$F_r \approx \frac{0,189 + 0,0676(1 + 0,34(2))}{0,189 + 0,0676 \left( 1 + 0,34(2) \left( \frac{420}{100} \right) \right)} = 0,67$$

El valor de  $K_{cb\ med\ aj}$  ajustado por el mayor control estomático utilizando  $F_r$  será por lo tanto:

$$K_{cb\ med\ aj} = F_r K_{cb\ med} = 0,67(0,60) = 0,40$$

El valor de  $K_{cb\ med\ aj} = 0,40$ , estimado a partir de  $f_c = 0,20$ , es menor que el valor de  $K_{cb\ med}$  reportado en el Cuadro 17 para los olivos con  $f_c = 0,40$  a  $0,67$ , debido a las diferencias en el valor de  $f_c$ . El valor reportado en el Cuadro 17 es de  $0,70$ , el cual después de ajustes climáticos utilizando la Ec. 70 es igual a  $0,79$ .

Si los olivos hubieran sido plantados con un espaciamiento de  $5 \times 10\text{ m}$ , como es común en California, Estados Unidos, lo cual es considerado en el valor de  $K_{cb}$  para los olivos indicados en el Cuadro 17, entonces  $f_c = 0,39$ ,  $f_{c\ eff} = 0,40$ , y  $K_{cb\ med}$  usando la Ec. 98 es  $K_{cb\ med} = 1,04$ , por lo que el valor estimado de  $K_{cb\ med\ aj}$  ajustado por control estomático utilizando  $F_r = 0,67$  sería  $K_{cb\ med\ aj} = 0,67(1,04) = 0,70$ . Este valor se ajusta mejor al valor de  $0,79$  indicado en el Cuadro 17 para el caso de árboles maduros, después de realizar el ajuste climático.

El coeficiente basal del cultivo,  $K_{cb\ med\ aj}$  considerando la baja densidad, condición climática y control estomático es de  $0,40$ . Este valor se incrementa a  $0,70$  para el espaciamiento de  $5 \times 10\text{ m}$ .

La ecuación anterior subestimaría el valor de  $F_r$  (sobreestimando la reducción en el  $K_{cb}$ ), si se utiliza la rugosidad real de la vegetación, para los casos donde  $r_1 > 100\text{ s m}^{-1}$ , debido a que la Ecuación 102 ignora los efectos de retroalimentación que el valor reducido de  $ET_c$  tiene en la temperatura y el déficit de presión de vapor sobre el cultivo. En general estos parámetros se incrementan al disminuir el valor de  $ET_c$ , lo que amortiguará la magnitud de la reducción de  $ET_c$ .

**ETAPA DE FINAL DE TEMPORADA**

Durante la etapa de final de temporada, el valor de  $K_{cb}$  comienza a reducirse hasta alcanzar el valor de  $K_{cb\ fin}$  al final del período de crecimiento. Los valores de  $K_{cb\ fin}$  pueden ser determinados a partir de  $K_{cb\ med}$  en proporción al estado de salud y la condición de las hojas de la vegetación al término de la temporada de crecimiento

y de acuerdo a la longitud de la etapa final de desarrollo (o sea, si las hojas fenecen lentamente o mueren por causa de heladas). De la misma forma se pueden estimar los valores de  $K_{c\text{ fin}}$  a partir de  $K_{c\text{ med}}$ ; sin embargo, la reducción en el valor de  $K_{c\text{ fin}}$  se verá afectada por la frecuencia del humedecimiento a través del riego o la lluvia, por lo que  $K_{c\text{ fin}}$  pudiera ser proporcionalmente menor.

En los casos donde  $K_{cb\text{ fin}}$  sea estimado a través de las Ecuaciones 97 y 98, se deberá reducir el valor de  $K_{cb\text{ fin}}$  si se quiere que éste represente el valor de  $K_c$  para las plantas que posean un mayor control estomático que la vegetación agrícola (donde  $r_1 \approx 100 \text{ s m}^{-1}$ ) o para considerar los efectos del envejecimiento y la senescencia en el control estomático. En estos casos, el valor estimado de  $K_{cb\text{ fin}}$  deberá ser multiplicado por el valor de  $F_r$  calculado con la Ecuación 102. Como alternativa, estos valores pueden ser reducidos en alrededor 10% cuando el valor de  $r_1$  se duplique por encima de  $100 \text{ s m}^{-1}$  y la temperatura media diaria del aire ( $T_{\text{media}}$ ) sea alrededor de  $30^\circ \text{ C}$ ; y pueden ser reducidos alrededor de un 20% cuando el valor de  $r_1$  se duplique por encima de  $100 \text{ s m}^{-1}$  y la temperatura media diaria del aire ( $T_{\text{media}}$ ) sea alrededor de  $15^\circ \text{ C}$ .

Como otra alternativa, se puede reducir relativamente el valor de  $K_{cb\text{ fin}}$  con respecto al valor de  $K_{cb\text{ med}}$ , en proporción a la fracción de hojas verdes saludables que se conservan al final de la etapa final con relación a las presentes en la etapa de mediados de temporada. Esto puede ser estimado generalmente en forma visual en el campo, pudiendo constituir por lo tanto una observación subjetiva.

Los parámetros  $f_c$  y  $h$  representan quizás los índices más sencillos para ser estimados en el campo. Es bueno recalcar que las Ecuaciones 97 y 98 deberán ser usadas solamente como una estimación inicial o preliminar del valor del  $K_{cb\text{ fin}}$ .

### ESTIMACIÓN DE $ET_{c\text{ aj}}$ CONSIDERANDO LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO

En la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 33 se presenta una función de producción simple y lineal de la relación cultivo-agua, que permite estimar la reducción en la productividad causada por el estrés generado en el cultivo debido a la falta de agua en el suelo. Esta función fue presentada anteriormente en la Ecuación 90:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c\text{ aj}}}{ET_c}\right) \quad (90)$$

donde

- $Y_a$  = productividad real del cultivo [ $\text{kg ha}^{-1}$ ]
- $Y_m$  = productividad máxima (esperada) del cultivo en ausencia de estrés ambiental o hídrico
- $K_y$  = factor de respuesta de la productividad [ ]
- $ET_c$  = evapotranspiración potencial (esperada) en ausencia de estrés ambiental o hídrico
- $ET_{c\text{ aj}}$  = evapotranspiración real (ajustada) como resultado del estrés ambiental o hídrico

En la publicación de la FAO No. 33 se indican valores de  $K_y$  para un rango amplio de cultivos, con el objeto de predecir el efecto del estrés hídrico y la correspondiente reducción en el valor de  $ET_{c\text{ aj}}$  en la productividad del cultivo. En la publicación mencionada se presentan factores que permiten la estimación de la reducción de la productividad para los casos donde el estrés ocurra durante una sola etapa de crecimiento del cultivo, o en los casos donde el estrés se distribuya a lo largo del período de crecimiento. Las funciones de respuesta de la productividad para la temporada completa han sido incluidas en el Cuadro 24.

La presencia de factores ambientales tales como la falta de agua, salinidad, baja fertilidad y enfermedades, impactan la productividad y reducen la magnitud de  $ET_{c\text{ aj}}$

en relación con la magnitud potencial de  $ET_c$ . Lo mismo puede considerarse para los casos donde la productividad es reducida debido a la utilización de bajas densidades de población de las plantas. Por lo tanto, para estimaciones muy generales del valor de  $ET_{c_{aj}}$ , se puede invertir la Ecuación 90, resolviéndola para estimar el factor de estrés,  $K_s$ :

$$K_s = 1 - \frac{1}{K_y} \left( 1 - \frac{Y_a}{Y_m} \right) \quad (103)$$

donde  $K_s$  es multiplicado por  $K_{cb}$  o por  $K_c$  en las Ecuaciones 80 y 81 para estimar el valor de  $ET_{c_{aj}}$  en presencia de estrés hídrico o ambiental o para los casos de baja densidad en la población de las plantas o baja vitalidad. El valor de  $ET_{c_{aj}}$  estimado utilizando el  $K_s$  de la Ecuación 103, representa solamente una aproximación muy general de la evapotranspiración a nivel mensual o incluso de toda la temporada productiva. La Ecuación 103 es de mayor validez para los casos de cultivos forrajeros y otros cultivos donde el valor de  $K_y$  permanece relativamente constante durante toda la temporada.

En general, la Ecuación 103 es válida solamente para la estimación de la evapotranspiración real del cultivo a ser utilizada en estudios del balance de agua a nivel regional, para estudios del agotamiento y recarga del agua subterránea o para estimar el uso histórico del agua. Este procedimiento no es válido para la predicción de  $ET_c$  para periodos de tiempo diarios o semanales, debido a la naturaleza muy general del coeficiente  $K_y$  y la escala de tiempo (toda la temporada) de la productividad del cultivo. Se recomienda el uso de los procedimientos presentados anteriormente para ajustar  $ET_c$  mediante el balance diario del agua del suelo, las funciones de salinidad, o las reducciones del valor de  $K_c$  basados en el área foliar o la fracción de cobertura del suelo, en lugar de la utilización de la Ecuación 103.

#### EJEMPLO 44

##### Estimación aproximada de $K_s$ a partir de los datos de productividad del cultivo

En una zona de riego (proyecto) se cultivan frijoles (judías) comestibles secos. Se conoce que existe un déficit de agua de riego, con la correspondiente reducción en la productividad del cultivo. La productividad estimada en el proyecto es de 1100 kg ha<sup>-1</sup>. La productividad potencial para la región y la variedad de frijoles (judías) considerada, en ausencia de estrés hídrico o ambiental y con una buena fertilidad del suelo, es de 1800 kg ha<sup>-1</sup>.

Según la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 33 o el Cuadro 24, el valor de  $K_y$  para los frijoles (judías) secos, asumiendo que las situaciones de estrés se distribuyan uniformemente a lo largo de la temporada de crecimiento, es de 1,15. Por lo tanto, según la Ecuación 103, el valor estimado de  $K_s$  para ser aplicado en la Ecuación 80 para la temporada de crecimiento es:

$$K_s = 1 - \frac{1}{1,15} \left( 1 - \frac{1100}{1800} \right) = 0,66$$

Por lo tanto, se estima que el valor de  $ET_{c_{aj}}$  para la temporada es de solamente 0,66 de la  $ET_c$  máxima bajo condiciones óptimas de crecimiento.

El valor estimado de  $ET_{c_{aj}}$  es de  $ET_{c_{aj}} = 0,66 ET_c$ , donde  $ET_c$  es estimado como  $ET_c = K_c ET_c$ .

## Capítulo 10

# ET<sub>c</sub> bajo distintas prácticas de manejo

En este capítulo se describen varios tipos de factores que pueden causar que los valores de  $K_c$  y  $ET_c$  sean diferentes a los correspondientes a los valores estándar descritos en los Capítulos 6 y 7. Estos factores se refieren a los efectos generados por la presencia de mantillo (mulch) en la superficie, la práctica de cultivos intercalados, la presencia de vegetación en áreas reducidas y otras prácticas específicas de cultivo.

La intención de este capítulo es de servir como una fuente de información para situaciones donde se conoce que las prácticas de cultivo son diferentes a las consideradas en los Cuadros 12 y 17, pero donde se necesite realizar estimaciones de  $K_c$  y  $ET_c$ . Los procedimientos presentados en este capítulo no son de ninguna forma exhaustivos. La intención es demostrar el uso de algunos procedimientos que pueden ser utilizados para realizar ajustes del valor de  $K_c$  con el objeto de considerar las diferencias o desviaciones con respecto a las condiciones estándar.

### EFFECTO DEL MANTILLO SOBRE LA SUPERFICIE

El uso del mantillo sobre la superficie es una práctica utilizada con frecuencia en la producción vegetal para reducir las pérdidas por evaporación en la superficie del suelo, para acelerar el desarrollo del cultivo en climas fríos al incrementar la temperatura del suelo, para reducir la erosión, ó para ayudar en el control de las malezas. El mantillo puede consistir de material orgánico vegetal o mantillo sintético compuesto de láminas de plástico.

### Cobertura con plástico

La cobertura plástica consiste generalmente de láminas delgadas de polietileno o materiales similares colocadas encima de la superficie del suelo, especialmente a lo largo de las hileras de las plantas. Se cortan agujeros en la lámina de plástico de acuerdo al espaciamiento entre plantas para permitir la emergencia de las mismas. Las coberturas de plástico pueden ser transparentes, blancas o negras. El color del plástico influye en el valor del albedo, principalmente durante las etapas tempranas del cultivo. Sin embargo, debido a que la intención en este capítulo es presentar un procedimiento sencillo para ajustar el valor de  $K_c$  en cultivos con cobertura de plástico, no se hace distinción entre los distintos tipos de plásticos.

La cobertura de plástico produce una reducción significativa de la evaporación del agua en la superficie del suelo, especialmente bajo sistemas de riego por goteo. Asociada con la reducción de la evaporación existirá un incremento general de la transpiración de la vegetación, debido a la transferencia de calor sensible y radiactivo desde la superficie de la cobertura de plástico hacia las adyacencias de la vegetación. Aunque la tasa de transpiración de cultivos bajo plástico puede incrementarse en un promedio de 10-30% a lo largo de la temporada, comparado con la ausencia de la cobertura plástica, el valor de  $K_c$  disminuye en un promedio de 10-30% debido a la reducción de la evaporación en el suelo, estimada en un 50-80%. En el Cuadro 25 se presenta un resumen de las reducciones observadas del valor de  $K_c$  en la evaporación, así como los incrementos en la transpiración a lo largo de la temporada de crecimiento, para cinco cultivos hortícolas. Generalmente, tanto la tasa de crecimiento del cultivo como la productividad vegetal se incrementan por el uso de la cobertura de plástico.

CUADRO 25

**Reducción aproximada del valor de  $K_c$  y de la evaporación en la superficie e incrementos en la transpiración para varios cultivos hortícolas bajo una cobertura completa de plástico, en comparación con condiciones sin cobertura utilizando riego por goteo**

Cultivo	Reduccion <sup>1</sup> en $K_c$ (%)	Reduccion <sup>1</sup> de la evaporación (%)	Incremento <sup>1</sup> de la transpiración (%)	Fuente
Calabacín (Squash)	5-15	40-70	10-30	Safadi (1991)
Pepino	15-20	40-60	15-30	Safadi (1991)
Melón	5-10	80	35	Battikhi y Hill (1988)
Sandia	25-30	90	-10	Battikhi y Hill (1986), Ghawi y Battikhi (1986)
Tomate	35	no disponible	no disponible	Haddadin y Ghawi (1983)
Promedio	10-30	50-80	10-30	

<sup>1</sup> Relativo a la no-utilización de cobertura plástica

### *Coefficiente único del cultivo, $K_c$*

Para considerar los efectos de la cobertura de plástico en el valor de  $ET_c$ , se pueden reducir los valores de  $K_{c\ med}$  y  $K_{c\ fin}$  en un 10-30% para los cultivos hortícolas incluidos en el Cuadro 12, dependiendo de la frecuencia de riego (use el valor mayor para riego por goteo frecuente). Con frecuencia, el valor de  $K_{c\ ini}$  bajo plástico puede ser tan bajo como 0,10. Cuando la cobertura plástica no cubra completamente el área humedecida por los emisores de goteo, o en los casos donde se presenten lluvias importantes, se producirá una reducción menor de los valores de  $K_{c\ med}$  o  $K_{c\ fin}$ , en proporción a la fracción humedecida del suelo cubierta por el plástico.

### *Coefficiente dual del cultivo, $K_{cb} + K_e$*

En el caso de la estimación de  $K_{cb}$  para cultivos con cobertura plástica, normalmente se necesitan ajustes menores a la curva de  $K_{cb}$ , los cuales estarán en el orden de un 5-15% de reducción del valor de  $K_{cb}$  debido a que se entiende que, aunque la presencia del plástico reduce la evaporación 'basal' del agua en la superficie del suelo, la transpiración se incrementa. En ciertas situaciones, tal como en el caso de algunos cultivos de baja densidad de plantación, el efecto en el valor de  $K_{cb}$  podría ser mayor. Se recomienda la calibración local de  $K_{cb}$  (y  $K_c$ ) para su uso con prácticas de cobertura plástica.

Cuando se calcule el coeficiente de evaporación  $K_e$  con cobertura de plástico, el valor de  $f_w$  deberá representar una fracción relativa equivalente de la superficie del suelo que puede contribuir tanto a la evaporación, a través de los agujeros de ventilación en la cobertura plástica, como a la fracción humedecida del suelo que no se encuentre cubierto por el plástico. El área efectiva de los agujeros de ventilación será normalmente de dos a cuatro veces el área física de las ventilaciones (o aún mayor), para considerar la transferencia de vapor que ocurre por debajo de la lámina plástica.

### **Cobertura orgánica (mantillo)**

Con frecuencia se utiliza el mantillo en la producción de huertos y en cultivos en hilera bajo prácticas reducidas de labranza. La cobertura orgánica puede consistir de residuos vegetales no incorporados o material traído al sitio, tal como la paja. Tanto la profundidad del mantillo orgánico como la fracción de la superficie cubierta del suelo es variable. Estos dos parámetros afectarán la magnitud de la reducción de la evaporación en la superficie del suelo.

### *Coefficiente único del cultivo, $K_c$*

Una regla general cuando se considere el valor del Cuadro 12, consiste en reducir la cantidad de agua evaporada en el suelo en aproximadamente un 5% por cada 10% de la superficie del suelo que es cubierta efectivamente por la cobertura orgánica.

**EJEMPLO 45****Efectos de la cobertura plástica sobre la superficie**

Se coloca una cobertura plástica sobre pepinos bajo riego por goteo. El plástico es transparente y cubre la totalidad de la superficie del campo, con pequeños orificios en cada planta. Ajustar tanto el valor medio de  $K_c$  como el  $K_{cb}$  basal para este cultivo con el objeto de reflejar la presencia de la cobertura plástica.

Según el Cuadro 12, los valores de  $K_{c\text{ inir}}$ ,  $K_{c\text{ med}}$  y  $K_{c\text{ fin}}$  para el caso de pepinos comercializados en fresco son de 0,4; 1,0 y 0,75 respectivamente.

Como la cobertura plástica es continua, con sólo pequeños orificios de ventilación en cada planta, se asume un valor de  $K_{c\text{ ini}}$  de sólo 0,10 (este valor deberá ser incrementado si ocurren precipitaciones).

Los valores de  $K_{c\text{ med}}$  y  $K_{c\text{ fin}}$  son estimados como:

$$K_{c\text{ med}} = 0,85 (1,0) = 0,85$$

$$K_{c\text{ fin}} = 0,85 (0,75) = 0,64$$

donde el multiplicador 0,85 es derivado del Cuadro 25 y refleja una reducción asumida del 15% en el valor de  $ET_c$  debido a la presencia del plástico, considerando una frecuencia semanal de riego.

En el Cuadro 17 los valores de  $K_{cb\text{ inir}}$ ,  $K_{cb\text{ med}}$  y  $K_{cb\text{ fin}}$  son de 0,15, 0,95 y 0,7 para el mismo cultivo de pepino. Se asume que el valor de  $K_{cb\text{ ini}}$  es similar al valor de  $K_{c\text{ ini}}$  para cobertura plástica, por lo que se asume como igual a 0,10. Se estima que los valores de  $K_{cb\text{ med}}$  y  $K_{cb\text{ fin}}$  son reducidos en un 10%, por lo que:

$$K_{cb\text{ med}} = 0,9 (0,95) = 0,86$$

$$K_{cb\text{ fin}} = 0,9 (0,7) = 0,63$$

Estos valores basales son similares a los valores ajustados de  $K_c$ . Esto es esperable debido a que se puede ignorar la evaporación que ocurre en la superficie cubierta por el plástico. Se necesitan ajustes adicionales de los valores de  $K_c$  para considerar los efectos del clima, utilizando las Ec. 62 y 70.

Los valores de  $K_c$  y  $K_{cb}$  son similares, con valores de 0,10 para la etapa inicial, 0,85 y 0,86 para la etapa de mediados de temporada y 0,64 y 0,63 para la etapa final de desarrollo.

Por ejemplo, si un 50% de la superficie del suelo se encontrara cubierta por un mantillo orgánico de residuos de cultivo, entonces se reduciría la evaporación en el suelo en alrededor un 25%.

- En el caso del valor de  $K_{c\text{ ini}}$ , el cual representa principalmente la evaporación en el suelo, se debe reducir el valor de  $K_{c\text{ ini}}$  en un 25% aproximadamente.
- En los casos de  $K_{c\text{ med}}$  y  $K_{c\text{ fin}}$ , se podría reducir estos valores en un 25% de la diferencia entre  $(K_{c\text{ med}} - K_{cb\text{ med}})$  y  $(K_{c\text{ fin}} - K_{cb\text{ fin}})$  de los Cuadros 12 y 17. En general, las diferencias entre los valores presentados en los Cuadros 12 y 17 son solamente de 5-10%, por lo que podría ser pequeño el ajuste de  $K_{c\text{ med}}$  y  $K_{c\text{ fin}}$  para considerar la presencia del mantillo orgánico.

**Coeficiente dual del cultivo,  $K_{cb} + K_e$** 

Cuando se aplica el procedimiento del coeficiente dual, el cual considera un balance separado del agua en la capa superficial del suelo, se deberá reducir la magnitud del componente de evaporación ( $K_e ET_o$ ) en alrededor un 5% por cada 10% de la superficie del suelo cubierta por el mantillo orgánico. No se debe cambiar el valor de  $K_{cb}$ .

Estas son solo recomendaciones aproximadas y su intención es considerar los efectos de la reflexión parcial de la radiación solar por parte del mantillo, la micro-advección de calor desde el residuo hacia el suelo, el movimiento lateral del agua del suelo por debajo del residuo hacia la superficie expuesta, así como el efecto aislante de la cobertura orgánica. Como estos parámetros varían ampliamente, se requerirán observaciones locales cuando sea necesario contar con estimaciones de cierta precisión.

**CULTIVOS INTERCALADOS**

Se refiere por cultivos intercalados a los casos donde dos cultivos diferentes se desarrollan juntos en el mismo campo. Con fines de estimar el coeficiente del cultivo, se distinguen los siguientes casos (Figura 45):

al cultivo de mayor altura es representativo del campo en su totalidad. El cultivo de mayor altura actúa de cierta forma como una línea de ropa tendida» por lo que se incrementa el valor de  $K_c$  (y  $ET_c$ ), por unidad de área, para el cultivo de mayor altura sobre los valores indicados en el Cuadro 12 o 17. Sin embargo, el valor de  $K_c$  (y  $ET_c$ ) para el cultivo de menor altura se reducirá debido al efecto cortaviento del cultivo de mayor altura. Como resultado, el valor integral de  $K_c$  para el campo podría ser similar al promedio ponderado de los valores de  $K_c$  para los dos cultivos, tomados de los Cuadros 12 y 17, o el valor total de  $K_c$  podría estar más cerca del valor estimado de  $K_c$  correspondiente a un campo cultivado por completo con el cultivo de mayor altura ( $K_{c \text{ campo}} \approx K_{c \text{ cultivo alto}}$ ). La productividad del cultivo de menor altura podría ser menor que la correspondiente a la producción de mono-cultivo, debido a los efectos originados por el sombreado producido por el cultivo más alto, así como la competencia por el agua del suelo.

### *Cobertura diferente del suelo*

Cuando sean distintas las fracciones del suelo cubiertas por cada uno de los cultivos, el valor de  $K_c$  para un campo con cultivos intercalados puede ser estimado mediante la ponderación de los valores de  $K_c$  correspondientes a cada cultivo individual, de acuerdo a la fracción de la superficie cubierta por cada cultivo, así como la altura de cada cultivo:

$$K_{c \text{ campo}} = \frac{f_1 h_1 K_{c1} + f_2 h_2 K_{c2}}{f_1 h_1 + f_2 h_2} \quad (104)$$

donde  $f_1$  y  $f_2$  son las fracciones de la superficie del suelo plantadas con los cultivos 1 y 2,  $h_1$  y  $h_2$  son las alturas de los cultivos 1 y 2, y  $K_{c1}$  y  $K_{c2}$  son los valores de  $K_c$  para los cultivos 1 y 2.

### **Vegetación solapada**

Cuando el intercalado de los cultivos produce el solapamiento de los espaciamientos entre las plantas, se considera que el dosel de un cultivo se encuentra bien por encima del otro. Este es el caso que ocurre por ejemplo al Sur de California, donde árboles de cítricos se plantan en huertos de palmas datileras. Cuando se utiliza el espaciamiento normal tanto para los árboles como para los dátiles, se podría incrementar el valor de  $K_c$  a medida que se incrementa la densidad de la vegetación combinada, en proporción al incremento del índice de área foliar, IAF, (Ejemplo 47), con el valor máximo de  $K_c$  limitado ya sea por el valor de  $K_{c \text{ max}}$  (Ecuación 72) o por el valor de  $K_{cb \text{ full}}$  (Ecuaciones 99 y 100), a menos que la extensión del campo sea pequeña lo que originaría un efecto adicional de «ropa tendida» u «oasis», tal como se discute en la sección siguiente.

### **Cultivos de borde**

Cuando vegetación alta, tal como en los casos de rompevientos o palmas datileras, bordee campos de vegetación de menor altura, la parte alta del dosel del cultivo de mayor altura puede interceptar cantidades extras de calor sensible presentes en las corrientes de aire. Bajo estas condiciones se debe ponderar el valor de  $K_c$  de acuerdo a las áreas de cada cultivo. Sin embargo antes de realizar la ponderación, el valor de  $K_c$  para el cultivo que bordea el campo, siendo este de mayor altura que el cultivo del interior del campo, deberá ser ajustado por el posible efecto de «ropa tendida» (sección siguiente).

### **ÁREAS REDUCIDAS DE VEGETACION**

La vegetación natural, así como algunos cultivos de subsistencia, se presentan con frecuencia en pequeños grupos o áreas reducidas de plantas. El valor de  $K_c$  para estas áreas reducidas va a depender del tipo y la condición de la vegetación que rodee a estas pequeñas áreas.

**EJEMPLO 46****Cultivo intercalado de maíz y calabacín (zucchini).**

Determinar el valor representativo de  $K_{c,med}$  en una situación donde se cultiva una hilera sencilla de maíz de 1 m de ancho por cada 2 m de calabacín (squash), donde  $HR_{min} \approx 45\%$  y  $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$ .

Según el Cuadro 12, los valores de  $K_{c,med}$  y  $h$  para el maíz son de 1,20 y 2 m y los de  $K_{c,med}$  y  $h$  para el calabacín son de 0,95 y 0,3 m. No se requiere de corrección por clima. En este caso se puede obtener el valor representativo de  $K_{c,med}$  ponderando los valores individuales de  $K_{c,med}$  de acuerdo a la fracción de la superficie del suelo cubierta por cada cultivo ( $f_1 \approx 0,3$  para maíz y  $f_2 \approx 0,7$  para el calabacín) y de acuerdo a la altura de cada cultivo (Ec. 104):

$$K_{c,med} = \frac{0,30(2)(1,20) + 0,70(0,3)(0,95)}{0,30(2) + 0,70(0,3)} = 1,14$$

De la misma manera pueden obtenerse los valores diarios de  $K_c$  construyendo las curvas individuales de  $K_c$  y luego ponderando los valores interpolados para cada día obtenidos de cada una de las curvas de  $K_c$ , utilizando la Ec. 104.

El coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada para todo el campo cultivado es de 1,14.

### Áreas rodeadas por vegetación con características similares de rugosidad y de humedad

En la mayoría de los casos de vegetación natural ó vegetación agrícola en condiciones no-prístinas, el valor de  $K_c$  deberá adherirse a los límites superiores de  $K_c$  de aproximadamente 1,20-1,40 cuando la extensión de la superficie sea mayor a 2000 m<sup>2</sup> aproximadamente. Esta condición es necesaria debido a que la ET en áreas grandes de vegetación está determinada por los principios de intercambio unidimensional de energía y por el principio de conservación de la energía. El valor de ET para áreas reducidas (< 2000 m<sup>2</sup>) se regirá por esos mismos principios y limitaciones solamente en los casos donde la altura de la vegetación, área foliar, y disponibilidad de agua sean similar a aquellos de la vegetación circundante.

### Efectos de «oasis» y «ropa tendida»

Bajo el efecto denominado de «ropa tendida», donde la altura de la vegetación es mayor que la existente en áreas circunvecinas (condiciones diferentes de rugosidad), ó bajo el efecto de oasis, donde la vegetación tiene una mayor disponibilidad de agua que las áreas circunvecinas (condiciones diferentes de humedad), el valor máximo de  $K_c$  puede exceder a los límites de 1,20-1,40. El usuario deberá ser precavido a la hora de extrapolar mediciones de ET tomadas en vegetación localizada en este tipo de áreas, hacia áreas mayores o regiones donde podría ocurrir una sobreestimación del valor de ET para la región.

El efecto de «ropa tendida» puede producirse en superficies pequeñas con vegetación alta que se encuentren rodeadas por superficies con cobertura vegetal de menor altura. Esto ocurre cuando tanto el transporte turbulento de calor sensible en el dosel de la vegetación alta y se incrementa el transporte de vapor de agua fuera de la vegetación debido a la mayor extensión horizontal del viento dentro de la vegetación más alta. Además la capa límite interna por encima de la vegetación podría estar en condiciones de no-equilibrio con la nueva superficie. Por lo tanto el valor de ET en las áreas aisladas, por unidad de superficie, podría ser significativamente mayor que el valor correspondiente de  $ET_0$  calculado para el pasto de referencia. Ejemplo de estos efectos de «ropa tendida» u oasis sería la ET que ocurre en una hilera sencilla de árboles rodeada de vegetación de corta altura o rodeada de un cultivo no cosechado y seco; ó el caso de la ET que se produce en una línea estrecha de anea (Typha, una vegetación hidrófila) a lo largo de un curso de agua. En estas condiciones se han registrado valores de  $K_c$  tan altos o mayores que dos.



## EJEMPLO 47

## Vegetación solapada

Un terreno de 20 ha de palma datileras en Palm Desert, California, Estados Unidos, tiene un espaciamiento entre árboles de 6 m. Intercalados entre las hileras de palma, se encuentran hileras de árboles pequeños de naranja (50% de cobertura), con un espaciamiento de 6 m. Las palmas y los árboles de cítricos están separados 3 metros unos de los otros en las hileras. La altura de las palmas es de 10 m y la altura de los cítricos es de 3 m. El follaje de las palmas se encuentra bastante por encima del follaje de los cítricos, por lo que no se pueden considerar los cultivos como contiguos. El valor promedio de  $HR_{\min}$  durante la etapa de mediados de temporada es de 20% y  $u_2 = 2 \text{ m s}^{-1}$ . El valor de  $K_{c \text{ med}}$  en el Cuadro 12 para los dátiles es de 0,95 que al ajustarlo por humedad y viento utilizando la Ec. 62 resulta en  $K_{c \text{ med}} = 1,09$ . El valor de  $K_{c \text{ med}}$  en el Cuadro 12 para cítricos que poseen un 50% de cobertura vegetativa es de 0,60, que al ajustarlo por humedad y viento utilizando la Ec. 62 resulta un  $K_{c \text{ med}} = 0,70$ .

El intercalado de los cítricos entre las palmas datileras incrementa el área total del huerto por lo que el valor de  $ET_c$  para el cultivo combinado (palmas y cítricos juntos) será mayor que el correspondiente a las plantas individuales. Se puede estimar el valor combinado de  $K_{c \text{ med}}$  como una función del incremento del valor total del índice de área foliar IAF. Primero, se estiman los valores de IAF para cada una de los cultivos, invirtiendo la Ec. 97 y resolviendo en función del IAF:

$$IAF = -1,4 \ln \left[ 1 - \frac{K_{cb} - K_{c \text{ min}}}{K_{cb \text{ full}} - K_{c \text{ min}}} \right]$$

donde  $K_{c \text{ min}}$  es el valor mínimo del  $K_c$  basal para suelo descubierto ( $\approx 0,15$  a  $0,20$ ) y  $K_{cb \text{ full}}$  es el valor máximo de  $K_c$  para la etapa de mediados de temporada, esperado para el cultivo si existiera completa cobertura del suelo, calculado a través de la Ec. 99. Basados en la Ec. 99, con  $h = 10 \text{ m}$  para las palmas datileras y  $h = 3 \text{ m}$  para los cítricos, los valores de  $K_{cb \text{ full}}$  para los dos cultivos, asumiendo una cobertura completa del suelo para cada uno, son  $K_{cb \text{ full}} = 1,34$  para las palmas y  $K_{cb \text{ full}} = 1,30$  para los cítricos (utilizando  $HR_{\min} = 20\%$  y  $u_2 = 2 \text{ m s}^{-1}$ ). Estos valores estimados no toman en cuenta los efectos de cualquier valor individual de control estomacal. Por lo tanto, utilizando la ecuación anterior, se estima que los valores efectivos de IAF para las palmas datileras y los cítricos son aproximadamente:

$$IAF_{\text{palmas}} = -1,4 \ln[1 - (1,09 - 0,15)/(1,34 - 0,15)] = 2,2$$

$$IAF_{\text{cítricos}} = -1,4 \ln[1 - (0,70 - 0,15)/(1,30 - 0,15)] = 0,9$$

Por lo tanto se estima que el valor efectivo del IAF para la combinación de palmas-cítricos es de aproximadamente  $IAF_{\text{combinado}} = IAF_{\text{palmas}} + IAF_{\text{cítricos}} = 2,2 + 0,9 = 3,1$ .

El incremento del valor de  $K_{c \text{ med}}$  para el huerto de palmas datileras, como resultado del incremento en IAF por el intercalado de los cítricos, se estima utilizando el cociente de las funciones basadas en IAF incluidas en la Ec. 97. Como resultado se tiene la relación:

$$K_{c \text{ med}} = K_{c \text{ med cultivo único}} \left[ \frac{1 - \exp(-0,7IAF_{\text{combinado}})}{1 - \exp(-0,7IAF_{\text{cultivo único}})} \right]$$

donde  $IAF_{\text{combinado}}$  es el IAF para la combinación de los dos cultivos y  $IAF_{\text{cultivo único}}$  es el IAF para el cultivo más alto.  $K_{c \text{ med cultivo único}}$  es el valor de  $K_c$  para la etapa de mediados de temporada del cultivo más alto (en este caso las palmas datileras). En este ejemplo, se resuelve la ecuación anterior como:

$$K_{c \text{ med}} = 1,09 \left[ \frac{1 - \exp(-0,7(3,1))}{1 - \exp(-0,7(2,2))} \right] = 1,23$$

Por lo tanto, el valor estimado de  $K_{c \text{ med}}$  para la combinación de palmas datileras y cítricos es de 1,23. Este valor es comparable al valor máximo esperado de  $K_c$  basado en limitaciones de la energía disponible, representado por el  $K_{c \text{ max}}$  de la Ec. 72, el cual en este caso para  $h=10 \text{ m}$  es  $K_{c \text{ max}} = 1,34$ . Debido a que  $K_{c \text{ med}} < K_{c \text{ max}}$  (o sea,  $1,23 < 1,34$ ), se acepta el valor de  $K_{c \text{ med}} = 1,23$  como una estimación aproximada del valor de  $K_{c \text{ med}}$  para el cultivo intercalado.

Cuando se necesiten estimaciones de ET para esas pequeñas extensiones aisladas de superficies con vegetación, rodeadas de vegetación de menor altura (efecto de ropa tendida) o de tierras secas (efecto oasis), el valor de  $K_c$  podría exceder en un 100% o más la referencia del pasto. La estimación de los valores de  $K_c$  para estas extensiones de vegetación deberá considerar los parámetros  $u_2$ ,  $HR_{\min}$  y  $h$  con el objeto de ajustar los valores de  $K_c$ , así como parámetros que representen las condiciones de aridez del área circundante, el ancho general de la superficie con vegetación y la capacidad del viento para penetrar la vegetación. La ecuación deberá considerar el valor del IAF de la vegetación para tomar en cuenta la capacidad de la misma de conducir y transpirar la cantidad de agua demandada por las condiciones climáticas y el efecto de ropa tendida.

Se asume generalmente un valor límite de  $K_c$  de 2,5 para considerar un límite superior de la capacidad de los estomas de la vegetación para suministrar el vapor de agua a la corriente de aire bajo el efecto de ropa tendida o el efecto de oasis. Para vegetación que posea una gran resistencia foliar, como por ejemplo algunos tipos de árboles o vegetación de desiertos, este límite superior deberá ser multiplicado por un factor de corrección de la resistencia,  $F_r$ , calculado en el Capítulo 9 a través de la Ecuación 102.

En la Figura 46 se presentan ejemplos de curvas de  $K_c$  para áreas reducidas de vegetación, con relación al ancho de la superficie con vegetación, para situaciones donde  $u_2 = 2 \text{ m s}^{-1}$ ,  $HR_{\min} = 30\%$ , la altura de la vegetación = 2 m y IAF = 3. La curva superior representa condiciones donde la vegetación considerada está rodeada por vegetación muerta, suelo descubierto y seco o incluso grava o asfalto. En esta situación se generan cantidades grandes de calor sensible en las áreas circunvecinas debido a la falta de ET. Una parte de este calor sensible es transportado por advección hacia la vegetación que se encuentra en el sentido del viento. La curva inferior representa condiciones donde la vegetación esta rodeada por pasto bien regado. En esta situación se producirá una cantidad mucho menor de calor sensible en el área circundante para incrementar el valor de ET (y  $K_c$ ) de la vegetación que se encuentra en la dirección del viento. Es clara la influencia de la aridez de las áreas circunvecinas en el valor de  $K_c$  de una superficie reducida. Las dos curvas mostradas cambiarán al variar los valores de  $u_2$ ,  $HR_{\min}$ ,  $h$  y IAF. El usuario deberá considerar que la Figura 46 solo proporciona un estimado general del valor de  $K_c$  bajo condiciones de ropa tendida y oasis. Estas estimaciones deberán ser verificadas en lo posible con mediciones locales.

Los valores estimados de ET para superficies extensas con vegetación, o para áreas reducidas de vegetación que están rodeadas por una combinación de vegetación que posee una rugosidad y condiciones de humedad similares, por lo general deberán ser menores o iguales a  $1,4 ET_0$  incluso bajo condiciones de aridez.

Para el caso de rompevientos altos, como el caso de una hilera simple de árboles, un valor aproximado de  $K_c$  es:

$$K_c = \min\left(1,2 + \frac{F_r h_{\text{vegetación}}}{\text{Ancho}}, 2,5\right) \quad (105)$$

donde

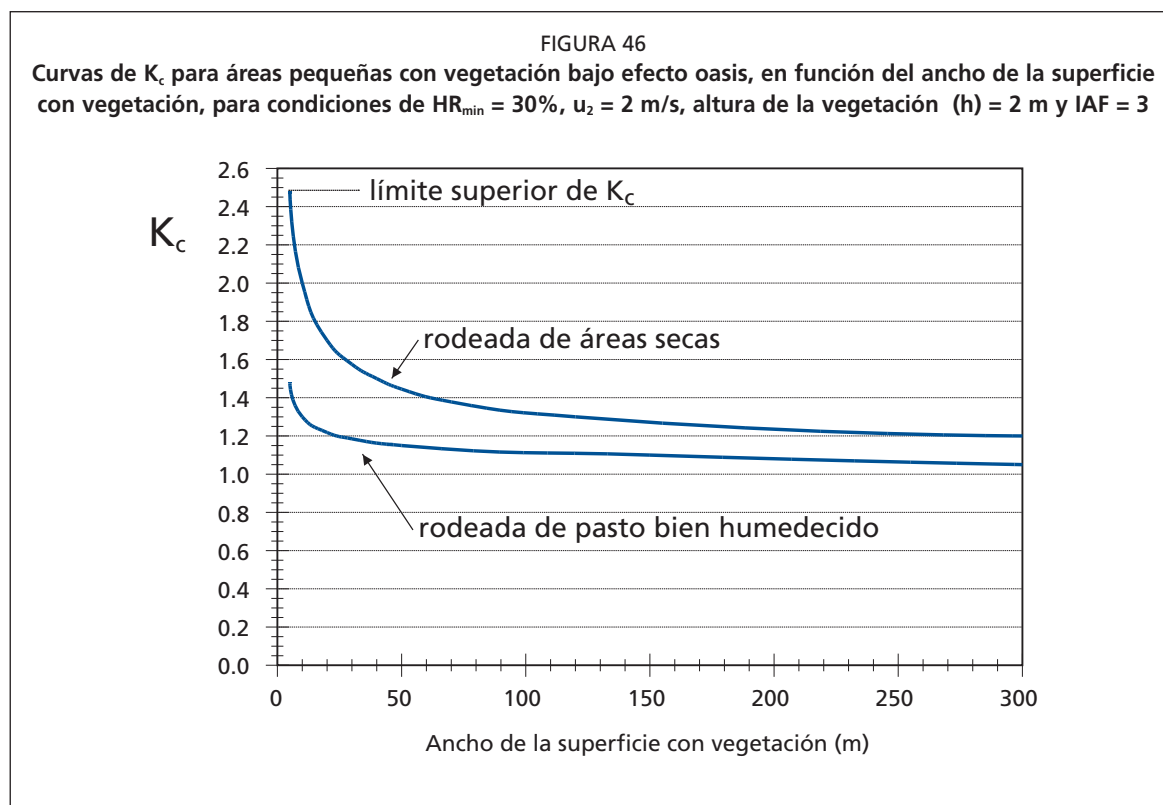
$F_r$	factor de corrección estomática (Ecuación 102)
$h_{\text{vegetación}}$	altura vertical media del área del dosel [m]
Ancho	ancho (espesor horizontal) del rompevientos [m]

El valor límite de  $K_c = 2,5$  considerado en la Ecuación 105, representa un valor aproximado del límite superior de la  $ET_c$  de los árboles, por área unitaria de superficie. Sin embargo este valor es bastante incierto. Debido a que la disponibilidad del agua en el suelo podría limitar la evapotranspiración en los rompevientos, se deberá realizar un balance del agua del suelo y el cálculo del factor de estrés hídrico  $K_s$ .

### ESTRÉS AMBIENTAL INDUCIDO COMO PRÁCTICA DE MANEJO

En muchos cultivos agrícolas se genera intencionalmente un estrés hídrico reduciendo la disponibilidad de agua durante períodos específicos de su desarrollo para promover ciertas características del cultivo. El estrés hídrico se induce a través de la aplicación retardada ó la reducción del riego. En los casos donde se practique este tipo de manejo del cultivo, el valor de  $K_c$  deberá reducirse para considerar la reducción de la evapotranspiración.

El estrés ambiental ocasionado por la falta de agua, baja fertilidad o salinidad del suelo, puede causar el aceleramiento del ciclo reproductivo de algunas plantas. En estas situaciones se podría reducir la duración del período de crecimiento, particularmente



la etapa de mediados de temporada del cultivo. El estrés durante la etapa de desarrollo puede incrementar la duración de esta etapa. Por lo tanto, tanto la duración de la etapa de mediados de temporada,  $L_{med}$ , como quizás las duraciones de las etapas de desarrollo y final, pueden requerir de ajustes debido a la presencia del estrés ambiental o el daño a la vegetación. La disponibilidad de investigaciones y observaciones locales es crítica para la identificación de las magnitudes y extensión de estos ajustes. A continuación se describen algunos ejemplos de modificaciones del valor de  $K_c$  y de las longitudes de las etapas de crecimiento.

### Semilla de alfalfa

Algunos cultivos forrajeros como la alfalfa, cuando se cultivan para la producción de semilla, se someten intencionalmente al estrés hídrico para reducir la cantidad de vegetación y para promover el incremento de la producción de flores y semillas. En áreas sujetas a inviernos fríos, la reducción en el valor de  $K_c$  para cultivos de raíces profundas, tales como la alfalfa, va a depender de la cantidad de agua de lluvia disponible durante la temporada de letargo (invierno) y va a depender de la cantidad de lluvia y del riego limitado durante la temporada de crecimiento. Por lo tanto, los efectos del estrés hídrico intencional en los valores de  $K_c$  deberán ser calculados a través del procedimiento del coeficiente basal del cultivo presentado en el Capítulo 7, así como el procedimiento del factor de estrés  $K_s$  y el balance de agua presentado en el Capítulo 8.

### Algodón

En la producción del algodón se debe iniciar el estrés hídrico durante la etapa de desarrollo para retardar el desarrollo de las flores y para promover el desarrollo de la parte útil del mismo. Con esta práctica se retarda la tasa de crecimiento de la planta de algodón y se retarda la fecha de la cobertura completa. Para el algodón, el logro de la cobertura completa y el inicio de la etapa de mediados de temporada generalmente ocurre cuando el valor de IAF es aproximadamente tres. Cuando se practica la inducción del estrés hídrico y el retardo del crecimiento, la condición de cobertura

completa puede ocurrir al inicio de la floración. Puede incluirse el efecto del estrés hídrico durante la etapa de desarrollo en el valor de la  $ET_c$  mediante la extensión de la duración de la etapa de desarrollo dentro de la etapa de mediados de temporada. La duración de la temporada total permanecerá la misma.

### Remolacha azucarera

Frecuentemente el cultivo de la remolacha azucarera se maneja de tal forma que se produzca un ligero estrés hídrico durante la etapa final de desarrollo para deshidratar las raíces y promover la concentración del azúcar. Se puede necesitar una aplicación final de riego justo antes de la cosecha para facilitar la extracción (cosecha) de las raíces. Cuando se practica este tipo de estrés hídrico, el valor de  $K_{c\text{ fin}}$  se reduce de 1,0 a 0,6 (Cuadro 12, Nota a pie de página 5).

### Café

Las plantas de café se exponen intencionalmente a condiciones de estrés hídrico para reducir el crecimiento de la vegetación y para promover el desarrollo de los frutos. Bajo estas condiciones, se deberán reducir los valores de  $K_c$  incluidos en el Cuadro 12. Por otra parte, los campos de café están frecuentemente bordeados por árboles que sirven de barreras rompevientos. El efecto de la barrera rompevientos es el de reducir el valor de  $K_c$  de las plantas de café debido a la reducción del viento y la radiación solar sobre las plantas. Esta reducción del valor de  $K_c$  puede ser significativa en los casos donde los rompevientos son altos y numerosos. Sin embargo debido a la presencia de los árboles, podría incrementarse el valor de  $K_c$  para todo el área del campo incluyendo los rompevientos, con relación a los valores de  $K_c$  presentados en el Cuadro 12, debido al aumento del área foliar total de la combinación café-árbol y el incremento de la rugosidad aerodinámica.

### Té

La aparición y desarrollo de hojas nuevas en plantas de té ocurre después del inicio de la temporada de lluvias. Durante la época seca, la aparición de hojas nuevas es lenta o inexistente. La transpiración que ocurre en las hojas viejas es menor que en el caso de las hojas jóvenes, debido al efecto de la edad de la hoja en la conductancia de los estomas. Por lo tanto el valor de  $K_c$  será un 10-20% menor a los indicados en los Cuadros 12 y 17 cuando las hojas han envejecido (más de 2-3 meses de edad). Como en el caso del café, los campos de té pueden estar bordeados por árboles que sirven como barreras rompevientos. El efecto de los rompevientos es reducir el valor de  $K_c$  de las plantas de té, pero incrementando potencialmente el valor de  $K_c$  para la plantación en general, tal como se describió en el caso de café.

### Olivos

Los productores de aceitunas suelen incrementar el espaciamiento entre árboles de olivo en condiciones de secano, en áreas con lluvias escasas. Esta práctica se realiza para incrementar el área de terreno por árbol que puede infiltrar lluvia y contribuir a la transpiración del árbol. Por ejemplo en Túnez, el espaciamiento entre árboles de olivo cambia desde el norte al sur, en proporción con la cantidad de lluvia anual. El espaciamiento entre plantas influye en el valor de  $K_c$  para el cultivo (Ejemplo 43).

## Capítulo 11

# ET<sub>c</sub> durante los periodos improductivos

En este capítulo se describen algunos procedimientos para la predicción del valor de ET<sub>c</sub> durante periodos fuera de la temporada productiva. Estos periodos se definen como aquellos durante los cuales no se plantan cultivos agrícolas. En climas templados estos periodos incluyen los periodos de heladas y condiciones de congelamiento continuo.

### TIPOS DE CONDICIONES DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO

El tipo y la condición de la superficie durante los periodos sin desarrollo vegetativo son los factores que van a determinar el rango de los valores de ET<sub>c</sub>. Cuando la superficie del suelo se encuentre descubierta, el valor de K<sub>c</sub> será bastante parecido al valor de K<sub>c ini</sub> presentado en el Capítulo 6. Cuando la superficie se encuentra cubierta por vegetación casi muerta o por algún tipo de mantillo orgánico o residuos de cultivo, el valor de K<sub>c</sub> será parecido al usado para agricultura donde se utiliza el mantillo superficial. Cuando la superficie se encuentra cubierta debido al crecimiento de malezas ó de vegetación «espontánea», entonces el valor de K<sub>c</sub> variará de acuerdo al área foliar o la fracción cubierta del suelo, así como por la disponibilidad de agua en el suelo. En los casos donde la superficie se encuentre cubierta por nieve, es difícil realizar una estimación del valor de K<sub>c</sub>, lo que podría obligar a asumir un valor constante de ET<sub>c</sub>.

#### Suelo descubierta

##### *Coficiente único del cultivo*

En los casos donde la superficie del suelo se deje prácticamente descubierta después de la cosecha, el valor de K<sub>c</sub> después de la cosecha estará fuertemente influenciado por la frecuencia y la cantidad de precipitación. Se puede calcular el valor de K<sub>c</sub> para un suelo descubierta como  $K_c = K_{c ini}$ , donde K<sub>c ini</sub> se calcula a través del procedimiento del Capítulo 6.

##### *Coficiente dual del cultivo*

En los casos donde es factible aplicar un balance diario del agua del suelo, el usuario puede preferir la utilización del procedimiento del K<sub>c</sub> dual del Capítulo 7. En estas situaciones la capa superior del suelo pudiera secarse hasta alcanzar contenidos de humedad muy bajos durante los periodos sin lluvias. Por consiguiente, se deberá considerar los valores de K<sub>cb</sub> y K<sub>c min</sub> en las Ecuaciones 71 y 76 como igual a cero. Esto permite predecir ET<sub>c</sub> = 0 durante los periodos largos donde no se presenten lluvias. Esto es necesario para preservar el balance de agua en la capa evaporante del suelo y en la totalidad de la zona radicular. El balance diario de agua en el suelo considerando K<sub>cb</sub> = 0 producirá la mejor estimación de ET<sub>c</sub> durante estos periodos no-productivos.

#### Superficie cubierta por vegetación muerta

##### *Coficiente único del cultivo*

En los casos donde la superficie del suelo se encuentre cubierta de residuos de plantas u otra cobertura orgánica muerta, o cuando partes no cosechadas del cultivo permanezcan encima de la superficie en condiciones sin vida o de senescencia, entonces la superficie responderá en forma parecida a la de una superficie cubierta por mantillo. En este caso, se puede asumir el valor de K<sub>c</sub> igual a K<sub>c ini</sub>, tal como se estima en las Figuras 29 y 30; sin

embargo el valor de  $K_{c\text{ ini}}$  puede ser reducido en un 5% por cada 10% de la superficie del suelo que está cubierta efectivamente por un mantillo orgánico.

#### *Coefficiente dual del cultivo*

La evaporación que ocurre en la vegetación muerta y húmeda puede ser significativa por unos pocos días después de un evento de lluvia. Por lo tanto, en el procedimiento del coeficiente dual del cultivo se deberá asumir un valor de  $f_c$  igual a cero para reflejar la falta de cobertura verde y se deberá considerar un valor de  $f_w$  como igual a 1,0 para reflejar el humedecimiento tanto del suelo como de la cobertura del mantillo por parte de la precipitación.

Tanto el mantillo como la vegetación muerta se secará con mayor rapidez que el suelo que se encuentra por debajo de ellos si éste se encontrara descubierto. Por otra parte, la vegetación o la cubierta muerta del mantillo protegerá de alguna forma al suelo de la evaporación. Por lo tanto las pérdidas totales por evaporación serán menores que el valor de AET estimado a través de la Ecuación 73. Esto puede ser considerado a través de la reducción del valor de AET en un 5% por cada 10% de la superficie del suelo que se encuentre efectivamente cubierta por el mantillo orgánico. Se deberá limitar el valor de AFE a valores menores o iguales a AET.

#### **Superficie cubierta por vegetación viva**

Durante los períodos libres de heladas después de la cosecha, las malezas pudieran comenzar a germinar y crecer. Esta vegetación se mantiene por el agua que se encuentra almacenada en el perfil del suelo, así como por cualquier lluvia. Por otra parte, las semillas del cultivo que se hayan perdido durante la cosecha podrían germinar después de un evento de lluvia, incrementando la cobertura del suelo. La cantidad de la superficie del suelo que será cubierta por la vegetación dependerá de la severidad de la aparición de las malezas, la densidad de las plantas agrícolas que broten espontáneamente, la frecuencia y extensión de la labranza del suelo, la disponibilidad de agua en el suelo y lluvias, así como por los daños ocasionados por la ocurrencia de las heladas.

El valor de  $K_{cb}$  durante períodos fuera de la temporada productiva puede ser estimado a lo largo del tiempo de acuerdo a la cantidad de vegetación que cubra el suelo. Esto puede realizarse a través de estimaciones del IAF, utilizando la Ecuación 97, ó con estimaciones de la fracción de cobertura del suelo,  $f_c$ , utilizando la Ecuación 98.

#### *Coefficiente único del cultivo*

De acuerdo al procedimiento del coeficiente único del cultivo, se puede transformar el valor de  $K_{cb}$  determinado a través de los procedimientos incluidos en el Capítulo 9, en un valor equivalente de  $K_c$  al sumarle un valor entre 0,05 a 0,15, de acuerdo a la frecuencia de las lluvias y el humedecimiento del suelo.

Es importante limitar el valor de  $K_c$  para la vegetación, durante períodos no-productivos, de acuerdo a la cantidad de agua disponible en el suelo para satisfacer la demanda evapotranspiratoria. De lo contrario se violará la ley de la conservación de la masa. Considerando lo expuesto, la integración de  $K_c ET_0$  a lo largo del período no-productivo no podrá exceder en ningún caso la suma de la precipitación que ocurre durante el período mencionado más cualquier humedad residual en la zona radicular del suelo que exista después de la cosecha, la cual puede ser aprovechada por la vegetación que se desarrolle posteriormente. En este caso la zona radicular estará definida por las raíces de las malezas o de la vegetación agrícola espontánea. A través del balance del agua en el suelo se logrará la mejor estimación del estrés hídrico inducido y de la consecuente reducción de los valores de  $K_c$  y  $ET_c$ .

#### *Coefficiente dual del cultivo*

De acuerdo al procedimiento del coeficiente dual del cultivo, se puede estimar el valor de  $K_{cb}$  de acuerdo a la porción de la superficie que se encuentre cubierta por la vegetación,

utilizando la Ecuación 97 ó 98. Posteriormente se puede aplicar un balance de agua en la capa superior del suelo, conjuntamente con un balance diario completo del agua en la zona radicular del suelo, tal como se describe en el Capítulo 7. Este balance se ajustará automáticamente a la ley de conservación de la masa, por lo que no se sobreestimaré el valor total de  $ET_c$  de la maleza o del cultivo espontáneo. Nuevamente, debido a que la capa superficial del suelo podría secarse hasta contenidos de humedad por debajo de punto de marchitez permanente bajo condiciones de lluvias escasas, los valores de  $K_{cb}$  y  $K_{c_{min}}$  utilizados en las Ecuaciones 71 y 76 deberán ser igualados a cero. De esta manera el balance diario de agua en el suelo, realizado a través de los cálculos del  $K_c$  dual, puede continuarse a lo largo del período no-productivo con buenos resultados.

### Superficies congeladas o cubiertas de nieve

Cuando la superficie del terreno se encuentra congelada o cubierta por nieve cualquier tipo de vegetación tendrá una actividad prácticamente nula, siendo casi nula su contribución al valor de  $ET_o$ , por lo que la cantidad de  $ET_c$  estará estrechamente relacionada a la disponibilidad de agua libre en la superficie y al valor del albedo de la superficie.

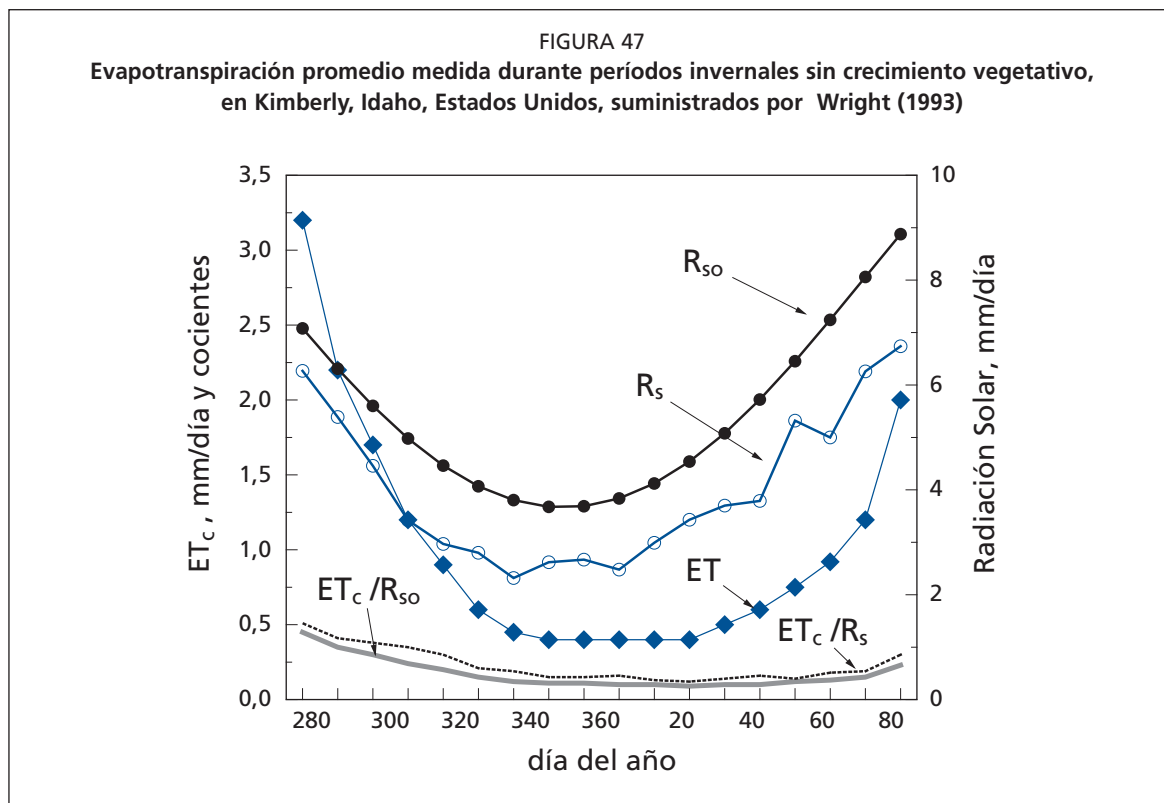
El albedo de las superficies cubiertas por nieve puede variar entre 0,40 para cobertura de nieve vieja y sucia hasta 0,90 para nieve fresca y seca. Por lo tanto el valor de  $ET_c$  para la cobertura de nieve será menor que el correspondiente a la  $ET_o$  del pasto, debido a que dispone de un 25-85% menos de energía de onda corta. Además, parte de la energía deberá ser usada para derretir la nieve antes de iniciar la evaporación.

Bajo tales condiciones la utilización de  $ET_o$  tendrá un valor limitado, debido a que se violan las condiciones que asumen la existencia de una cobertura verde de pasto. Se pudieran obtener incluso valores negativos de  $ET_o$  en algunos días de invierno en los casos donde sea grande la radiación de onda larga proveniente de la superficie y donde el déficit de presión de vapor sea reducido. Es bajo estas condiciones cuando es posible la producción de una condensación neta del agua de la atmósfera. Esto sería equivalente a una evaporación negativa.

Debido a lo limitado del valor de  $ET_o$  (e incluso  $ET_p$ ) para condiciones de superficies congeladas o cubiertas con nieve, podría ser mejor estimar  $ET_c$  considerando un valor único promedio. Wright (1993) encontró un valor promedio de  $ET_c$  de 1 mm día<sup>-1</sup> durante períodos de invierno, en Kimberly, Idaho, Estados Unidos, que duraron 6 meses (1 Octubre al 30 de Marzo). La latitud de Kimberly es de 42°N y su altitud es de alrededor 1 200 m. A lo largo del período de estudio de 6 años, un 50 % del suelo estuvo cubierto por nieve durante el 25% del tiempo entre el 1 Octubre y el 30 de Marzo. El suelo, cuando se encontraba expuesto, se encontraba congelado alrededor de un 50% del tiempo. El valor de  $K_c$  promedió 0,25 durante los períodos donde el suelo no se encontraba congelado pero donde ocurrían heladas (Octubre y comienzos de Noviembre). Cuando el suelo estaba cubierto de nieve por lo menos en un 50% de su superficie, el valor promedio de  $ET_c$  fue de sólo 0,4 mm día<sup>-1</sup>. Wright encontró que a lo largo del período de seis meses de no-crecimiento, el valor total acumulado de  $ET_c$  excedió la precipitación en alrededor de 50 mm.

En la Figura 47 se presentan los valores promedios obtenidos de las mediciones de  $ET_c$  durante el período de estudio 1985-1991. Las mediciones se corresponden altamente con el valor total de energía disponible de radiación de onda corta para un día despejado,  $R_{so}$ , estimado como  $0,75R_a$ . Se presenta un desfase entre el valor de  $ET_c$  y los valores de  $R_{so}$  y  $R_s$ , causado por la presencia de temperaturas mas bajas en los meses de Enero – Marzo, que las correspondientes al período de Octubre – Diciembre. El cociente  $ET_c / R_s$  promedió solamente 0,17 a lo largo del período de seis meses, y promedió 0,11 desde el 1 Diciembre al 10 Marzo. El cociente entre  $ET_c / R_s$  tuvo un promedio de 0,23 a lo largo del período de seis meses, y de 0,15 desde 1 Diciembre al 10 Marzo.

Un estudio similar llevado a cabo en Logan, Utah, Estados Unidos (latitud 41,6°N, altitud 1 350 m), durante un período de ocho años, demostró que la  $ET_c$



varió ampliamente en función de la humedad de la superficie del suelo, así como de la temperatura del aire durante los meses de invierno. El valor 'promedio' de  $K_c$  desde Noviembre a Marzo fue de 0,5 para los días donde no existía cobertura de nieve. Para los días con cobertura de nieve, 'ET<sub>c</sub>' osciló entre 0 a 1,5 mm día<sup>-1</sup>. De una forma similar, se encontró un valor de  $K_c$  de alrededor 0,4 para trigo de invierno durante periodos de congelamiento en la región de China del Norte (latitud cercana a 39°N).

#### *Coefficiente único del Cultivo*

Los procedimientos presentados anteriormente pueden ser útiles para la estimación del coeficiente único  $K_c$  durante periodos fuera de la temporada productiva, cuando se presenten condiciones de congelamiento de la superficie o cobertura de nieve. Sin embargo se sabe que el valor real de  $K_c$  varía ampliamente y será menor en los casos donde la disponibilidad de agua en la superficie del suelo es limitada.

#### *Coefficiente dual del cultivo*

Se requiere un balance diario del agua del suelo, a través del procedimiento del coeficiente dual del cultivo, para estimar con cierta precisión el valor de ET<sub>c</sub> en superficies bajo condiciones de congelamiento o cobertura de nieve. De acuerdo al método del coeficiente dual, se calcula un balance diario del agua en la capa superior del suelo lo que permite la reducción del valor de  $K_c$  en función de la cantidad de agua disponible. Sin embargo, además de la limitada validez del concepto de ET<sub>c</sub> bajo condiciones de congelamiento o cobertura de nieve, el valor del coeficiente de evaporación,  $K_e$ , puede reducirse cuando la superficie del suelo se encuentre congelada, debido a que el agua en este estado es menos disponible para el proceso de evaporación.

Otros modelos mas complicados para predecir ET<sub>c</sub> en periodos fuera de la temporada productiva con cobertura de nieve y con congelamiento de la superficie, se encuentran disponibles en la literatura y deberán ser consultados y quizás aplicados cuando se requiera de estimaciones precisas de ET<sub>c</sub>. Algunas de estas publicaciones fueron incluidas en la sección K de las Referencias.