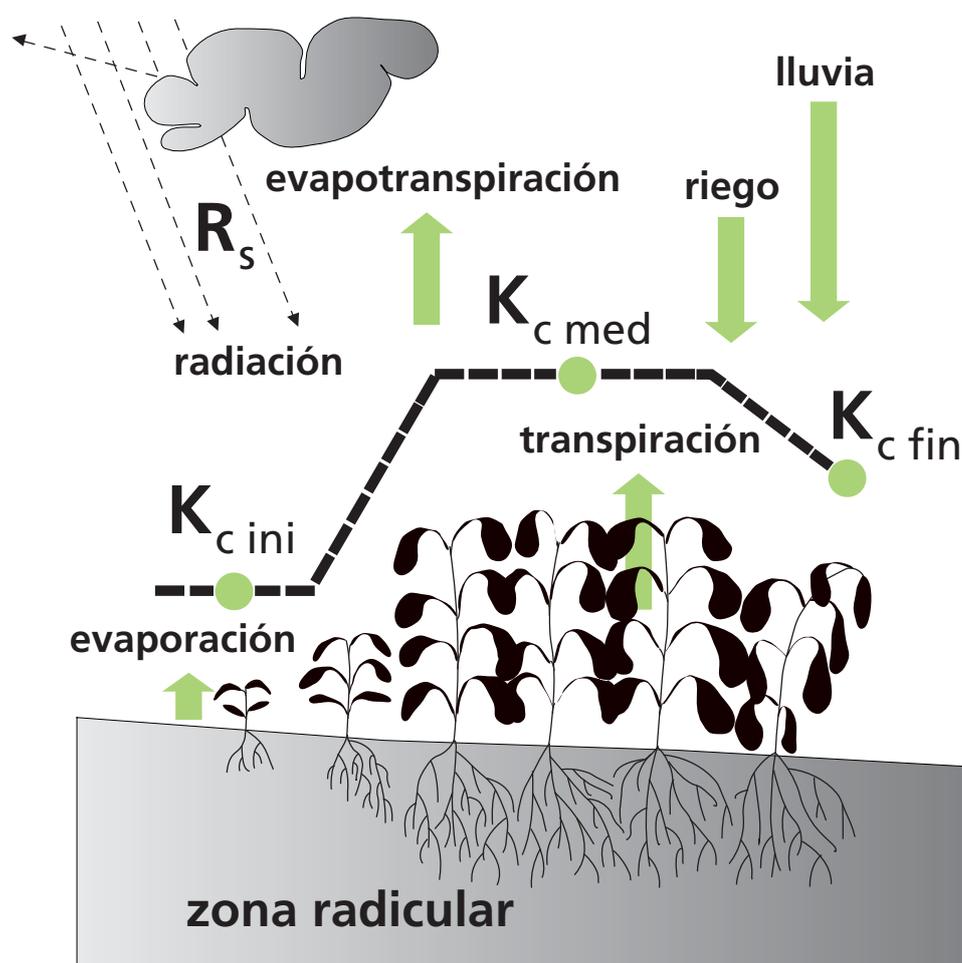


# Evapotranspiración del cultivo

Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos



# Índice

<b>1. Introducción a la evapotranspiración</b>	<b>1</b>
Proceso de Evapotranspiración	1
Evaporación	1
Transpiración	3
Evapotranspiración	3
Unidades	3
Factores que afectan la evapotranspiración	5
Variables climáticas	5
Factores de cultivo	5
Manejo y condiciones ambientales	5
Conceptos de Evapotranspiración	7
Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ )	7
Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ )	7
Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c_{aj}}$ )	9
Determinación de la evapotranspiración	10
Medición de ET	10
ET calculada con datos meteorológicos	13
ET estimada con el tanque de evaporación	13
<b>PARTE A. Evapotranspiración de referencia (<math>ET_o</math>)</b>	<b>15</b>
<b>2. Ecuación de FAO Penman-Monteith</b>	<b>17</b>
Necesidad de un método estándar para determinar $ET_o$	17
Formulación de la ecuación de Penman-Monteith	18
Ecuación de Penman-Monteith	18
Resistencia aerodinámica ( $r_a$ )	20
Resistencia superficial (total) ( $r_s$ )	20
Superficie de Referencia	23
Ecuación de FAO Penman-Monteith	24
Ecuación	24
Datos	27
Estimación de datos faltantes	28
<b>3. Datos meteorológicos</b>	<b>29</b>
Factores meteorológicos que determinan la ET	29
Radiación solar	29
Temperatura del aire	29
Humedad del aire	30
Velocidad del viento	30
Parámetros atmosféricos	31
Presión atmosférica (P)	31
Calor latente de vaporización ( $\lambda$ )	31
Constante psicrométrica ( $\gamma$ )	31
Temperatura del aire	32

Humedad del aire	33
Conceptos	33
Medición	35
Procedimientos de cálculo	35
Radiación	41
Conceptos	41
Unidades	43
Medición	45
Procedimientos de cálculo	45
Velocidad del viento	55
Medición	55
Relación del viento con la altura	55
Recolección de datos climáticos	57
Estaciones meteorológicas	57
Bases de datos agroclimáticos mensuales	57
Estimación de datos climáticos faltantes	58
Estimación de datos faltantes de humedad	58
Estimación de los datos de radiación	59
Datos faltantes de viento	63
Datos mínimos requeridos	64
Una ecuación alternativa para el cálculo de $ET_0$	64
<b>4. Determinación de <math>ET_0</math></b>	<b>65</b>
Ecuación de Penman-Monteith	65
Procedimientos de cálculo	66
$ET_0$ calculada para diversos períodos de tiempo	66
Procedimientos de cálculo en caso de datos faltantes	76
Método del tanque evaporímetro	78
Tanque evaporímetro	78
Coeficiente del tanque evaporímetro ( $K_p$ )	79
<b>PARTE B. Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar</b>	<b>87</b>
<b>5. Introducción a la evapotranspiración del cultivo (<math>ET_c</math>)</b>	<b>89</b>
Procedimientos de cálculo	89
Cálculo directo	89
Enfoque del coeficiente del cultivo	89
Factores que determinan el coeficiente del cultivo	91
Tipo del cultivo	91
Clima	91
Evaporación del suelo	93
Etapas del crecimiento del cultivo	95
Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )	97
Enfoques de los coeficientes único y dual del cultivo	98
Curva del coeficiente del cultivo	99
Diagrama de flujo de los cálculos	101
<b>6. <math>ET_c</math> – coeficiente único del cultivo (<math>K_c</math>)</b>	<b>103</b>
Duración de las etapas de crecimiento	103

Coeficientes del cultivo	109
Valores tabulados de $K_c$	109
Coeficiente del cultivo para la etapa inicial ( $K_{c\text{ ini}}$ )	114
Coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada ( $K_{c\text{ med}}$ )	121
Coeficiente del cultivo para el término de la etapa final ( $K_{c\text{ fin}}$ )	125
Elaboración de la curva de $K_c$	127
Cultivos anuales	127
Curva de $K_c$ para cultivos forrajeros	128
Árboles frutales	129
Cálculo de la $ET_c$	129
Determinación gráfica del valor de $K_c$	129
Determinación numérica del valor de $K_c$	132
Coeficientes del cultivo basados en la alfalfa como referencia	133
Extrapolación de valores previos de $K_c$	134
<b>7. <math>ET_c</math> – coeficiente dual del cultivo (<math>K_c = K_{cb} + K_e</math>)</b>	<b>135</b>
Componente de la transpiración ( $K_{cb} ET_o$ )	135
Coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ )	135
Determinación de los valores diarios de $K_{cb}$	141
Componente de la evaporación ( $K_e ET_o$ )	141
Procedimiento de cálculo	142
Límite superior $K_{c\text{ max}}$	143
Coeficiente de reducción de la evaporación del suelo ( $K_r$ )	144
Fracción expuesta y humedecida del suelo ( $f_{ew}$ )	147
Cálculo diario del valor de $K_e$	151
Cálculo de $ET_c$	156
<b>PARTE C. Evapotranspiración del cultivo en condiciones no-estándar</b>	<b>159</b>
<b>8. <math>ET_c</math> bajo condiciones de estrés hídrico</b>	<b>161</b>
Disponibilidad de agua en el suelo	161
Agua disponible total (ADT)	161
Agua fácilmente aprovechable (AFA)	162
Coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ )	167
Balance de agua del suelo	169
Planificación del riego	171
Efectos de la salinidad del suelo	174
Relación productividad-salinidad	175
Relación productividad-estrés hídrico	176
Relación combinada salinidad-reducción de la ET	177
Sin estrés hídrico ( $D_r < AFA$ )	177
Con estrés hídrico ( $D_r > AFA$ )	177
Aplicación	181
<b>9. <math>ET_c</math> para vegetación natural, atípica y subóptima</b>	<b>183</b>
Procedimiento de cálculo	183
Etapa inicial de crecimiento	183
Etapas de mediado y final de temporada	183
Condiciones de estrés hídricos	184

Ajuste para la etapa de mediados de temporada para vegetación escasa	184
Ajuste a partir de observaciones de campo	184
Estimación de $K_{cb\ med}$ a partir del índice de área foliar (IAF)	185
Estimación de $K_{cb\ med}$ a partir de la cobertura efectiva del suelo ( $f_{c\ eff}$ )	187
Estimación de $K_{cb\ full}$	189
Conclusión	190
Etapa de mediados de temporada: ajuste por control estomático	191
Etapa de final de temporada	192
Estimación de $ET_{c\ aj}$ considerando la productividad del cultivo	193
<b>10. <math>ET_c</math> bajo distintas prácticas de manejo</b>	<b>195</b>
Efecto del mantillo (mulch) sobre la superficie	195
Cobertura con plástico	195
Cobertura orgánica	196
Cultivos intercalados	197
Vegetación contigua	198
Vegetación solapada	199
Cultivos de borde	199
Áreas reducidas de vegetación	199
Áreas rodeadas por vegetación que posee características similares de rugosidad y de humedad	200
Efectos de «oasis» y «ropa tendida»	200
Estrés ambiental inducido como práctica de manejo	202
Semilla de alfalfa	203
Algodón	203
Remolacha azucarera	204
Café	204
Té	204
Olivos	204
<b>11. <math>ET_c</math> fuera de la temporada productiva</b>	<b>205</b>
Tipos de condiciones de la superficie del terreno	205
Suelo descubierto	205
Superficie cubierta por vegetación muerta	205
Superficie cubierta por vegetación viva	206
Superficies congeladas o cubiertas con nieve	207
<b>Anexos</b>	
<b>1. Unidades y símbolos</b>	<b>209</b>
<b>2. Cuadros meteorológicos</b>	<b>211</b>
<b>3. Bases físicas de los parámetros usados en el cálculo de la evapotranspiración</b>	<b>221</b>
<b>4. Análisis estadístico de los datos climáticos</b>	<b>227</b>
<b>5. Medida y determinación de la integridad de los datos meteorológicos</b>	<b>241</b>
<b>6. Corrección de datos climáticos obtenidos en estaciones no-referenciales para calcular <math>ET_0</math></b>	<b>253</b>
<b>7. Cálculo de <math>K_c</math> para el estado inicial de los cultivos anuales</b>	<b>259</b>
<b>8. Ejemplo de cálculo para la aplicación del concepto de <math>K_c</math> en calendarios de riego</b>	<b>265</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>277</b>

# Lista de figuras

1. Representación esquemática de un estoma	2
2. Partición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el período de crecimiento de un cultivo anual	2
3. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET	4
4. Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ), bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y bajo condiciones no estándar ( $ET_{c_{aj}}$ )	6
5. Representación esquemática de la variación diurna de los componentes del balance de energía sobre una superficie transpirante con suficiente cantidad de agua en un día soleado	11
6. Balance de agua en el suelo de la zona radicular	12
7. Representación simplificada de la resistencia superficial (total) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua	19
8. Representación típica de la variación del Índice de Área Foliar (IAF) activo (verde) a lo largo del período de crecimiento de un cultivo de maíz	22
9. Características del cultivo hipotético de referencia	24
10. Ilustración del efecto de la velocidad del viento sobre la evapotranspiración en condiciones atmosféricas secas y calientes comparadas con condiciones húmedas y tibias	30
11. Presión de saturación de vapor ( $e^o$ ) en función de la temperatura: curva de $e^o(T)$	34
12. Variación de la humedad relativa durante un período de 24 horas para una presión de vapor constante de 2,4 kPa	34
13. Variación anual de la radiación extraterrestre ( $R_a$ ) en el ecuador, a los 20 y 40° de latitud norte y sur	41
14. Variación anual de las horas de luz del día (N) en el ecuador, a los 20 y 40° de latitud norte y sur	42
15. Componentes de la radiación	44
16. Factor de conversión para convertir la velocidad del viento medida en cierta altura sobre el nivel del suelo a la velocidad del viento en la altura estándar (2 m)	56
17. Relación entre la fracción de radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra, $R_s/R_a$ , y la diferencia de temperatura $T_{max} - T_{min}$ para zonas interiores ( $k_{RS} = 0.16$ ) y para zonas costeras ( $k_{RS} = 0.19$ )	61
18. $ET_o$ calculada por CROPWAT	69
19. Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores	79
20. Valores típicos de $K_c$ para diferentes cultivos completamente desarrollados	92
21. Rangos extremos de $K_c$ para cultivos completamente desarrollados, en respuesta a variaciones climáticas y meteorológicas	92
22. El efecto de la evaporación sobre $K_c$ .	94
23. Etapas de desarrollo de diferentes cultivos	94
24. Rangos típicos esperados del valor de $K_c$ para las cuatro etapas del crecimiento	97

25. Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo	100
26. Curvas del coeficiente del cultivo mostrando las curvas de $K_{cb}$ (línea gruesa), de la evaporación en el suelo $K_e$ (línea delgada) y la curva correspondiente de $K_c = K_{cb} + K_e$ curve (línea punteada)	100
27. Procedimiento general para calcular $ET_c$	102
28. Variación de la longitud del período de crecimiento del arroz (cultivar: Jaya), repartidos durante varios meses del año, en diferentes lugares a lo largo del Río Senegal (África)	109
29. Valor promedio de $K_{c\ ini}$ relacionado con el nivel de $ET_o$ y el intervalo de tiempo entre riegos y/o lluvias significativas durante la etapa inicial de crecimiento, para cualquier tipo de suelo, cuando los eventos de humedecimiento sean de ligeros a medianos (3–10 mm por evento)	117
30. Valor promedio de $K_{c\ ini}$ relacionado con el nivel de $ET_o$ y el intervalo de tiempo entre riegos para eventos de humedecimiento mayores o iguales a 40 mm durante la etapa inicial para a) suelos de textura gruesa; b) suelos de textura mediana y fina	118
31. Riego con humedecimiento parcial	120
32. Ajuste (aditivo) al valor de $K_{c\ med}$ del Cuadro 12 para diferentes alturas del cultivo y valor promedio diario de la velocidad del viento ( $u_2$ ) para diferentes condiciones de humedad	122
33. Rangos esperados de $K_{c\ fin}$	126
34. Curva del coeficiente del cultivo	126
35. Curva de $K_c$ para alfalfa destinada para heno en el sur de Idaho, Estados Unidos, utilizando valores de los Cuadros 11 y 12 y ajustes a través de las Ecuaciones 62 y 65	128
36. Curva de $K_c$ y valores decadales de $K_c$ y $ET_c$ derivados del gráfico, para el cultivo de frijol (judía) seco del ejemplo (Recuadro 15)	132
37. Curva del coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) para el cultivo de frijol seco (Ejemplo 28) usando las longitudes de las etapas de crecimiento de 25, 25, 30 y 20 días	142
38. Coeficiente de reducción de la evaporación, $K_r$	145
39. Determinación de la variable $f_{ew}$ en función de la fracción de cobertura de la superficie del suelo ( $f_c$ ) y de la fracción humedecida de la superficie ( $f_w$ )	148
40. Balance de agua en la capa superior del suelo	152
41. Factor de agotamiento ( $p$ ) para diferentes niveles de evapotranspiración del cultivo	166
42. Coeficiente de estrés hídrico, $K_s$	167
43. Balance de agua en la zona radicular	169
44. El efecto de la salinidad en el coeficiente de estrés hídrico $K_s$	181
45. Diferentes situaciones de cultivos intercalados	198
46. Curvas de $K_c$ para áreas pequeñas con vegetación bajo efecto oasis, en función del ancho de la superficie con vegetación, para condiciones de $HR_{min} = 30\%$ , $u_2 = 2$ m/s, altura de la vegetación ( $h$ ) = 2 m y $IAF = 3$	203
47. Evapotranspiración promedio medida durante períodos invernales sin crecimiento vegetativo, en Kimberly, Idaho, Estados Unidos	208

# Lista de Cuadros

1. Factores de conversión para expresar evapotranspiración	4
2. $ET_o$ promedio para diferentes regiones agroclimáticas en $mm\ día^{-1}$	8
3. Factores de conversión para la radiación	45
4. Valores generales de la velocidad del viento en términos mensuales	63
5. Coeficientes del tanque evaporímetro ( $K_p$ ) para el Tanque Clase A para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media del viento y de humedad relativa	81
6. Coeficientes del tanque evaporímetro ( $K_p$ ) para el Tanque Tipo Colorado para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media del viento y de humedad relativa	81
7. Coeficientes del tanque evaporímetro ( $K_p$ ): Ecuaciones de regresión derivadas de los Cuadros 5 y 6	82
8. Cocientes de evaporación de diversos tipos de tanques y del tanque tipo Colorado para diversas condiciones climáticas y ambientales	83
9. Valores aproximados de $K_{c\ ini}$ correspondientes a eventos moderados de humedecimiento (10–40 mm) y texturas medias del suelo	95
10. Criterios generales de selección para los procedimientos del coeficiente único y dual del cultivo	98
11. Duración de las etapas de desarrollo del cultivo para distintos períodos de siembra y regiones climáticas	104
12. Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo $K_c$ y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ( $HR_{\min} \approx 45\%$ , $u_2 \approx 2\ m/s$ ) para usar en la fórmula de la FAO Penman-Monteith $ET_o$	110
13. Clasificación de las láminas de precipitación	115
14. $K_{c\ ini}$ para arroz y varias condiciones climáticas	121
15. Estimaciones empíricas de datos mensuales de velocidad del viento	124
16. Valores típicos de $HR_{\min}$ comparados con $HR_{\med}$ para clasificaciones climáticas generales	124
17. Coeficiente basal del cultivo $K_{cb}$ para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ( $HR_{\min} \approx 45\%$ , $u_2 \approx 2\ m/s$ ) para ser usados en la Ecuación de la FAO Penman-Monteith $ET_o$	137
18. Guías generales para la derivación de $K_{cb}$ a partir de los valores de $K_c$ incluidos en el Cuadro 12	141
19. Características típicas de humedad para diferentes tipos de suelo	144
20. Valores comunes de la fracción $f_w$ de la superficie humedecida del suelo por riego o lluvia	149
21. Valores comunes de la fracción del suelo cubierta por la vegetación ( $f_c$ ) y de la expuesta a la luz del sol ( $1-f_c$ )	149
22. Rangos de profundidad máxima efectiva de las raíces ( $Z_r$ ) y fracción de agotamiento de la humedad del suelo ( $p$ ) para condiciones sin estrés hídrico, para cultivos comunes	163
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 $CE_{e \text{ umbral}}$	178
24. Coeficientes estacionales de respuesta de la productividad, FAO No. 33, serie de Riego y Drenaje	181
25. Reducción aproximada del valor de $K_c$ y de la evaporación en la superficie e incrementos de la transpiración para varios cultivos hortícolas bajo una cobertura completa de plástico, en comparación con condiciones sin cobertura utilizando riego por goteo	196

## Lista de cuadros

1. Capítulos relacionados con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ) presentados en este libro	8
2. Capítulos relacionados con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) presentados en este libro	9
3. Capítulos relacionados con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c_{aj}}$ ) presentados en este libro	10
4. Resistencia aerodinámica de la superficie de pasto de referencia	21
5. Resistencia superficial (total) para el cultivo de referencia (pasto)	22
6. Derivación de la ecuación de FAO Penman-Monteith para el cultivo hipotético de referencia	26
7. Hoja de cálculo para determinar el déficit de presión de vapor ( $e_s - e_a$ )	40
8. Conversión de valores de energía a evaporación equivalente	44
9. Hoja de cálculo para la radiación extraterrestre ( $R_a$ ) y la insolación máxima (N)	49
10. Hoja de cálculo para la radiación neta ( $R_n$ )	53
11. Planilla para el cálculo de $ET_o$ (FAO Penman-Monteith)	67
12. Descripción del Tanque Clase A	84
13. Descripción del tanque enterrado tipo Colorado	85
14. Demostración del efecto del clima en el valor de $K_{c \text{ med}}$ para el cultivo de trigo desarrollado bajo condiciones de campo	123
15. Caso de estudio: cultivo de frijol seco en Kimberly, Idaho, Estados Unidos (coeficiente único del cultivo)	130
16. Caso de estudio de un cultivo de frijol seco (judías) en Kimberly, Idaho, Estados Unidos (coeficiente dual del cultivo)	158
17. Medición y estimación del IAF	186
18. Medición y estimación de $f_{c \text{ eff}}$	187

## Lista de ejemplos

1. Conversión de la evaporación a partir de una unidad a otra	4
2. Determinación de parámetros atmosféricos	32
3. Determinación de la presión media de vapor de saturación	36
4. Determinación de la presión real de vapor a partir de lecturas del psicrómetro	38
5. Determinación de la presión real de vapor de la humedad relativa	39
6. Determinación del déficit de presión de vapor	39
7. Conversión de la latitud en grados y minutos a radianes	46
8. Determinación de la radiación extraterrestre	47
9. Determinación de la insolación máxima	48
10. Determinación de la radiación solar con datos de insolación real diaria	50
11. Determinación de la radiación neta de onda larga	52
12. Determinación de la radiación neta	53
13. Determinación del flujo de calor en el suelo para períodos mensuales	55
14. Ajuste de datos de velocidad del viento a la altura estándar	56
15. Determinación de la radiación solar con datos de temperatura	61
16. Determinación de la radiación neta en ausencia de datos de radiación	62
17. Determinación de $ET_o$ con el promedio de los datos mensuales	70
18. Determinación de $ET_o$ con datos diarios	72
19. Determinación de $ET_o$ con datos horarios	75
20. Determinación de $ET_o$ con datos faltantes	77
21. Determinación de $ET_o$ con datos del tanque evaporímetro usando Cuadros	83
22. Determinación de $ET_o$ a través del uso de ecuaciones adoptadas para el tanque de evaporación	86
23. Estimación del intervalo entre eventos de humedecimiento	116
24. Determinación gráfica del valor de $K_{c\ ini}$	116
25. Interpolación entre eventos de humedecimiento ligeros y pesados	119
26. Determinación del valor de $K_{c\ ini}$ para humedecimiento parcial de la superficie del suelo	120
27. Determinación de $K_{c\ med}$	125
28. Determinación numérica de $K_c$	133
29. Selección y ajuste del coeficiente basal del cultivo, $K_{cb}$	136
30. Determinación de los valores diarios de $K_{cb}$	141
31. Determinación de la evapotranspiración en un suelo descubierto	146
32. Cálculo del coeficiente del cultivo ( $K_{cb} + K_e$ ) bajo riego por aspersión	150
33. Cálculo del coeficiente del cultivo ( $K_{cb} + K_e$ ) bajo riego por surcos	151
34. Cálculo del coeficiente del cultivo ( $K_{cb} + K_e$ ) bajo riego por goteo	151
35. Estimación de la evapotranspiración del cultivo a través del procedimiento del coeficiente dual del cultivo	154

36. Determinación del agua fácilmente aprovechable para diferentes cultivos y tipos de suelo	166
37. Efecto del estrés hídrico en la evapotranspiración del cultivo	168
38. Calendario de riego para evitar situaciones de estrés hídrico	172
39. Efecto de la salinidad del suelo en la evapotranspiración del cultivo	182
40. Aproximación inicial del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada para vegetación escasa	185
41. Estimación del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada	190
42. Estimación del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada para una cobertura reducida del suelo	191
43. Estimación de $K_{cb\ med}$ utilizando la cobertura del suelo y considerando la reducción por control estomático	192
44. Estimación aproximada de $K_s$ a partir de los datos de productividad del cultivo	194
45. Efectos de la cobertura plástica sobre la superficie	197
46. Cultivo intercalado de maíz y calabacín	200
47. Vegetación solapada	201

## Prefacio

En esta publicación se presenta una actualización del procedimiento para calcular la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del cultivo a partir de datos meteorológicos y coeficientes del cultivo. El procedimiento, que fue presentado por primera vez en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 «Las Necesidades de Agua de los Cultivos», se denomina como el enfoque de « $K_c ET_o$ », donde los efectos del clima sobre los requerimientos de agua del cultivo vienen reflejados en la evapotranspiración del cultivo de referencia  $ET_o$  y el efecto del cultivo se incorpora en el coeficiente del cultivo  $K_c$ . Otros procedimientos desarrollados en la citada publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24, tales como la estimación de la precipitación confiable y la precipitación efectiva, el cálculo de los requerimientos de riego y el cálculo de los calendarios de riego, no se tratan en la presente publicación, pero serán temas a considerar en publicaciones futuras de esta serie.

Desde la aparición de la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 en 1977, los avances en investigación y la disponibilidad de cálculos más precisos del uso del agua por los cultivos han indicado la necesidad de actualizar las metodologías de la FAO para el cálculo de  $ET_o$ . Se encontró que el método de Penman modificado de la FAO producía con frecuencia sobreestimaciones del valor de  $ET_o$ , mientras que otros métodos recomendados por la FAO, específicamente los métodos de la radiación, Blaney-Criddle y el método del tanque de evaporación, mostraron una correspondencia variable con respecto a la evapotranspiración de referencia del pasto.

En Mayo de 1990, la FAO organizó una consulta de expertos e investigadores, con la colaboración de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, para revisar las metodologías de la FAO para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos y para producir lineamientos para la revisión y actualización de los procedimientos utilizados.

El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como el nuevo procedimiento estándar para la evapotranspiración de referencia e indicó los procedimientos para calcular los distintos parámetros incluidos en el método. Se desarrolló entonces el método de FAO Penman-Monteith, definiendo el cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia de la superficie de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0,23 m, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada. El nuevo método supera las limitaciones del método anterior de Penman de la FAO y produce valores que son más consistentes con datos reales del uso de agua de los cultivos obtenidos mundialmente. Además se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización del método de la FAO Penman-Monteith con datos climáticos limitados, eliminando por lo tanto la necesidad de utilizar otros métodos para la estimación de la evapotranspiración y creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivos.

El método de la FAO Penman-Monteith utiliza datos climáticos estándar los cuales pueden ser fácilmente medidos o derivados de datos comúnmente medidos. Todos los procedimientos de cálculo han sido estandarizados en función de los datos meteorológicos disponibles y la escala de tiempo de los cálculos. Los métodos de cálculo, así como los procedimientos para la estimación de datos climáticos faltantes, se presentan en esta publicación.

En el enfoque del « $K_c ET_o$ », las diferencias en la vegetación del cultivo y en la resistencia aerodinámica, con respecto al cultivo de referencia, resultan consideradas en el coeficiente del cultivo. El coeficiente  $K_c$  sirve como una integración de todas las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos. Se presentan dos métodos de cálculo para la determinación de la evapotranspiración del cultivo a partir del valor de  $ET_o$ . El primer enfoque integra la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración del cultivo de referencia dentro de un coeficiente único  $K_c$ . En el segundo enfoque  $K_c$  se divide en dos factores que describen por separado los componentes de la evaporación ( $K_e$ ) y la transpiración ( $K_{cb}$ ). La selección del enfoque apropiado de  $K_c$  dependerá del propósito de los cálculos y de la frecuencia de los datos (diaria, semanal, mensual, etc.) disponibles para los cálculos.

Los últimos capítulos presentan varios procedimientos que pueden ser utilizados para realizar ajustes al coeficiente del cultivo y que toman en cuenta las desviaciones de las condiciones de desarrollo del cultivo con respecto a las condiciones estándar, tales como la presencia de estrés hídrico y salino, baja densidad de plantas, factores ambientales y las prácticas de manejo del cultivo.

Los ejemplos incluidos ilustran los distintos procedimientos de cálculo considerados a lo largo de la publicación. La mayoría de los cálculos, principalmente todos aquellos requeridos para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia y el método del coeficiente único del cultivo, pueden ser llevados a cabo utilizando una calculadora de bolsillo, las hojas de cálculo y los numerosos cuadros incluidos en esta publicación. El usuario podría además diseñar algoritmos de computación, utilizando hojas de cálculo electrónicas o cualquier lenguaje de programación.

Los procedimientos incluidos en esta publicación tienen como objetivo suministrar guías para los gerentes de proyectos, consultores, ingenieros de riego, agrónomos, meteorólogos y estudiantes, para la determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia y la evapotranspiración de los cultivos. Estos procedimientos pueden ser utilizados para determinar los requerimientos de agua de cultivos bajo riego o secano y para calcular el consumo de agua tanto de vegetación agrícola como vegetación natural.

## Agradecimientos

Este material constituye el esfuerzo de ocho años de deliberaciones y consultas por parte de los autores, quienes conformaron el grupo de trabajo designado para llevar a efecto las recomendaciones de la consulta de expertos de la FAO llevada a cabo en Mayo de 1990 en Roma. Esta consulta fue organizada para revisar los, hasta entonces, procedimientos de la FAO para la determinación de las Necesidades de Agua de los Cultivos, presentados en 1977 en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 (FAO-24), cuyos autores fueron J. Doorenbos y W. Pruitt. El enfoque conceptual introducido en las metodologías revisadas de la presente publicación es producto del grupo de destacados expertos congregados en la reunión de 1990 quienes han contribuido de manera importante en el desarrollo de estudios adicionales conducidos dentro del enfoque de la publicación. Miembros de la consulta de expertos de la FAO de 1990 incluyen Dr P. Fleming de Australia, Dr A. Perrier de Francia, Drs L. Cavazza y L. Tombesi de Italia, Drs R. Feddes y J. Doorenbos de Holanda, Dr L.S. Pereira de Portugal, Drs J.L. Monteith y H. Gunston del Reino Unido, Drs R. Allen, M. Jensen y W.O. Pruitt de los Estados Unidos de América, Dr D. Rijks de la Organización Meteorológica Mundial y personal de la FAO.

Muchos otros especialistas y personas pertenecientes a diferentes organizaciones e institutos han aportado, en diferentes grados y en diferentes etapas, importantes recomendaciones y contribuciones. Un agradecimiento especial por esta contribución se debe en particular al Profesor W.O. Pruitt (retirado) de la Universidad de California, Davis y a J. Doorenbos de la FAO (retirado) los cuales fijaron los estándares y modelos a seguir en este trabajo a través del trabajo predecesor de FAO-24, y para el Prof. J.L. Monteith cuyo inigualable trabajo marcó las bases científicas para la revisión de ETo. El Prof. Pruitt, a pesar de su estatus emeritus, ha contribuido permanentemente haciendo disponible datos esenciales e impartiendo recomendaciones acerca de conceptos críticos. El Dr James L. Wright del USDA, Kimberly, Idaho, contribuyó igualmente al proveer datos para diferentes cultivos obtenidos a través de lisímetros de precisión. Importantes contribuciones adicionales o revisiones en etapas críticas de esta publicación fueron recibidas de los Drs. M. Jensen, G. Hargreaves y C. Stockle de los Estados Unidos, Dr B. Itier de Francia, y varios miembros de los grupos de trabajo técnico de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID) y las Sociedades Americanas de Ingenieros Civiles y Agrícolas.

Los autores agradecen a sus respectivas instituciones, Utah State University, Instituto Superior de Agronomía de Lisboa, Katholieke Universiteit Leuven y FAO por el generoso soporte del tiempo en nuestras facultades y servicios del personal durante la preparación de esta publicación.

Los autores quieren expresar su gratitud al Sr. H. Wolter (retirado), Director de la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas por su estímulo en la preparación de esta publicación y a los colegas de la FAO y otras personas quienes han revisado este documento y realizado valiosos comentarios.

Un agradecimiento especial a Ricardo Trezza de la Universidad de los Andes de Venezuela y a Magali Garcia de la Universidad Mayor de San Andrés de Bolivia por la traducción al español. Finalmente se agradece la contribución de Juan Antonio Sagardoy y Giovanni Muñoz por la revisión final y de Simone Morini por la preparación del texto y de su formato.

# Lista de ecuaciones

1. Ecuación del balance de energía	11
2. Balance del agua en el suelo	12
3. Expresión de Penman-Monteith de la ecuación combinada	19
4. Resistencia aerodinámica ( $r_a$ )	20
5. Resistencia (total) de la superficie ( $r_s$ )	21
6. Ecuación FAO Penman-Monteith, escala de tiempo diaria, de diez días y mensual	25
7. Presión atmosférica (P)	31
8. Constante psicrométrica ( $\gamma$ )	31
9. Temperatura media del aire ( $T_{media}$ )	32
10. Humedad relativa (HR)	35
11. Presión de vapor a saturación en función de la temperatura ( $e^{\circ}(T)$ )	36
12. Presión de vapor a saturación ( $e_s$ )	36
13. Pendiente $e^{\circ}(T)$ curva ( $\Delta$ )	36
14. Presión real de vapor obtenida de la temperatura del punto de rocío ( $e_a$ )	37
15. Presión real de vapor obtenida de datos psicrométricos ( $e_a$ )	37
16. Constante psicrométrica del instrumento (psicrómetro) ( $\gamma_{psy}$ )	37
17. Presión real de vapor obtenida de $HR_{max}$ y $HR_{min}$ ( $e_a$ )	38
18. Presión real de vapor obtenida de $HR_{max}$ ( $e_a$ )	38
19. Presión real de vapor obtenida de $RH_{med}$ ( $e_a$ )	39
20. Conversión de energía a evaporación equivalente	43
21. Radiación extraterrestre para períodos diarios ( $R_a$ )	45
22. Conversión de grados decimales a radianes	46
23. Inverso de la distancia relativa Tierra-Sol ( $d_r$ )	46
24. Declinación solar ( $\delta$ )	46
25. Angulo horario al ocaso – función arco coseno ( $\omega_s$ )	46
26. Angulo horario al ocaso – función arco tangente ( $\omega_s$ )	46
27. Parámetro X de la Ecuación 26	46
28. Radiación extraterrestre para períodos horarios o inferiores ( $R_a$ )	47
29. Angulo del tiempo solar al inicio del período ( $\omega_1$ )	47
30. Angulo del tiempo solar al final del período ( $\omega_2$ )	47
31. Angulo del tiempo solar a la mitad del período ( $\omega$ )	48
32. Corrección estacional del tiempo solar ( $S_c$ )	48
33. Parámetro b de la Ecuación 32	48
34. Horas de insolación (N)	48
35. Radiación solar ( $R_s$ )	50
36. Radiación para días despejados cerca del nivel del mar ( $R_{s0}$ )	51
37. Radiación para días despejados para altitudes mayores ( $R_{s0}$ )	51
38. Radiación neta solar o de onda corta ( $R_{ns}$ )	51
39. Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )	52

40. Radiación neta ( $R_n$ )	53
41. Flujo de calor en el suelo ( $G$ )	54
42. Flujo de calor en el suelo para períodos diarios o de diez días ( $G_{day}$ )	54
43. Flujo de calor en el suelo para períodos mensuales ( $G_{mes}$ )	54
44. Flujo de calor en el suelo para períodos mensuales si $T_{mes,i+1}$ es desconocido ( $G_{mes}$ )	54
45. Flujo de calor en el suelo para períodos horarios o inferiores durante horas diurnas ( $G_{hr}$ )	55
46. Flujo de calor en el suelo para períodos horarios o inferiores durante horas nocturnas ( $G_{hr}$ )	55
47. Ajuste de la velocidad del viento a la altura estándar ( $u_2$ )	56
48. Estimación de la presión real de vapor a partir de $T_{min}$ ( $e_a$ )	58
49. Importando radiación solar de una estación meteorológica cercana ( $R_s$ )	59
50. Estimación de la radiación solar a partir de diferencias de temperatura (fórmula de Hargreaves)	60
51. Estimación de la radiación solar en islas ( $R_s$ )	62
52. Ecuación de evapotranspiración de referencia de Hargreaves 1985	64
53. Ecuación de FAO Penman-Monteith para períodos horarios	74
54. Presión real de vapor para períodos horarios	74
55. Estimación de $ET_o$ a partir de datos del tanque evaporímetro	79
56. Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )	89
57. Coeficiente dual del cultivo	99
58. Evapotranspiración del cultivo – coeficiente único del cultivo ( $ET_c$ )	103
59. Interpolación para láminas infiltradas entre 10 y 40 mm	117
60. Ajuste de $K_{c\ ini}$ por humedecimiento parcial del suelo	119
61. Lámina de riego para la porción humedecida del suelo ( $I_w$ )	119
62. Ajuste climático del valor de $K_{c\ med}$	123
63. Humedad relativa mínima estimada a partir de $e^\circ(T_{rocio})$	124
64. Humedad relativa mínima estimada a partir de $e^\circ(T_{min})$	124
65. Ajuste climático de $K_{c\ fin}$	127
66. Interpolación de $K_c$ para las etapas de desarrollo y final	132
67. Relación entre coeficientes del cultivo basados en el pasto y la alfalfa	133
68. Cociente entre el $K_c$ basado en el pasto y el $K_c$ basado en la alfalfa para Kimberly, Idaho	134
69. Evapotranspiración del cultivo – coeficiente dual del cultivo ( $ET_c$ )	135
70. Ajuste climático de $K_{cb}$	136
71. Coeficiente de la evaporación en el suelo ( $K_e$ )	142
72. Limite superior de la evaporación y evapotranspiración para cualquier superficie cultivada ( $K_{c\ max}$ )	143
73. Lámina máxima de agua que puede ser evaporada de la capa superficial del suelo (AET)	144
74. Coeficiente de reducción de la evaporación ( $K_r$ )	146
75. Fracción expuesta y humedecida del suelo ( $f_{ew}$ )	147
76. Fracción efectiva de la superficie del suelo que es cubierta por la vegetación ( $f_c$ )	149
77. Balance diario del agua del suelo para la fracción expuesta y humedecida del suelo	151

78. Límites del agotamiento del agua del suelo debido a la evaporación ( $D_e$ )	153
79. Agua que drena fuera de la capa superficial del suelo ( $DP_e$ )	156
80. Evapotranspiración del cultivo ajustada por estrés hídrico – coeficiente dual del cultivo	161
81. Evapotranspiración del cultivo ajustada por estrés hídrico – coeficiente único del cultivo	161
82. Agua disponible total en la zona radicular (ADT)	162
83. Agua fácilmente aprovechable en la zona radicular del suelo (AFA)	162
84. Coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ )	169
85. Balance de agua en la zona radicular	170
86. Límites del agotamiento de agua en la zona radicular debido a la evapotranspiración ( $D_r$ )	170
87. Agotamiento inicial ( $D_{r,i-1}$ )	170
88. Percolación profunda (DP)	171
89. Productividad relativa del cultivo ( $Y_a/Y_m$ ) determinada según la salinidad del suelo ( $EC_e$ ) y el umbral de salinidad del cultivo	176
90. Función de respuesta de la productividad del cultivo a la disponibilidad de agua (FAO Estudio de la serie de Riego y Drenaje No. 33)	176
91. Coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) bajo condiciones de salinidad	177
92. Coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) bajo condiciones de salinidad y estrés hídrico	177
93. Salinidad del suelo ( $EC_e$ ) estimada a partir de la fracción de lavado (LF) y la calidad del agua de riego ( $EC_{iw}$ )	181
94. $K_{c\ aj}$ para cobertura reducida de las plantas	184
95. Coeficiente de ajuste (a partir del IAF)	185
96. Coeficiente de ajuste (a partir de $f_c$ )	185
97. $K_{(cb\ med)\ aj}$ a partir del Índice de Área Foliar	186
98. $K_{(cb\ med)\ aj}$ a partir de la cobertura efectiva de la superficie del suelo	187
99. $K_{cb\ full}$ para cultivos agrícolas	189
100. $K_{cb\ full}$ para vegetación natural	189
101. $K_{cb\ h}$ para cobertura vegetal completa	189
102. Ajuste por control estomático ( $F_r$ )	191
103. Coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) estimado a partir de la función de respuesta de la productividad del cultivo a la disponibilidad de agua	194
104. Coeficiente del cultivo estimado para campos con cultivos intercalados ( $K_{c\ campo}$ )	199
105. Coeficiente del cultivo estimado para barreras rompevientos ( $K_c$ )	202

# Lista de los símbolos principales y acrónimos

$a_{psi}$	coeficiente del psicrómetro [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$a_s$	fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en un día nublado [-]
$a_s+b_s$	fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en un día despejado [-]
ADT	agua disponible total en la zona radicular [mm]
AET	agua evaporable total (ósea, la lámina máxima de agua que puede ser evaporada de la capa superficial del suelo [mm])
AFA	agua fácilmente aprovechable de la zona radicular del suelo [mm]
AFE	agua fácilmente evaporable (ósea, la lámina máxima de agua que puede ser evaporada sin restricciones de la capa superficial del suelo durante la etapa 1) [mm]
$c_p$	calor específico [ $\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$c_s$	capacidad calorífica del suelo [ $\text{MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
CR	ascenso capilar [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
$D_e$	lámina acumulada de evaporación (agotamiento) de la capa superficial del suelo [mm]
$D_r$	lámina acumulada de evapotranspiración (agotamiento) de la zona radicular del suelo [mm]
$d$	altura del plano de desplazamiento nulo [m]
$d_r$	inverso de la distancia relativa Tierra-Sol [-]
DP	percolación profunda [mm]
$DP_e$	percolación profunda que abandona la capa evaporante [mm]
E	evaporación [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
$E_{pan}$	evaporación en el tanque evaporímetro [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
$e^{\circ}(T)$	presión de vapor a saturación a la temperatura del aire T [kPa]
$e_s$	presión de vapor a saturación para un período determinado [kPa]
$e_a$	presión real de vapor [kPa]
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor con respecto a la saturación
$EC_e$	conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo [ $\text{dS m}^{-1}$ ]
$EC_{e\text{ umbral}}$	conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo por encima de la cual empieza a disminuir la productividad del cultivo [ $\text{dS m}^{-1}$ ]
ET	evapotranspiración [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
$ET_o$	evapotranspiración del cultivo de referencia [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
$ET_c$	evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
$ET_{c\text{ aj}}$	evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no-estándar [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
$\exp[x]$	2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia x
$F_r$	factor de corrección de la resistencia [-]
$f_c$	fracción de la superficie del suelo cubierta por la vegetación (observada verticalmente desde arriba) [-]
$f_{c\text{ eff}}$	fracción efectiva de la superficie del suelo cubierta por la vegetación [-]
$1-f_c$	fracción expuesta del suelo [-]
$f_w$	fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia [-]
$f_{ew}$	fracción del suelo que se encuentra expuesta y humedecida (a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación) [-]

G	flujo de calor en el suelo [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
G <sub>day</sub>	flujo de calor en el suelo para períodos diarios y de diez días [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
G <sub>hr</sub>	flujo de calor en el suelo para períodos horarios e inferiores [MJ m <sup>-2</sup> hora <sup>-1</sup> ]
G <sub>mes</sub>	flujo de calor en el suelo para períodos mensuales [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
G <sub>sc</sub>	constante solar [0,0820 MJ m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> ]
H	calor sensible [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
HR	humedad relativa [%]
HR <sub>hr</sub>	promedio de humedad relativa horaria
HR <sub>max</sub>	humedad relativa máxima diaria [%]
HR <sub>media</sub>	humedad relativa media diaria [%]
HR <sub>min</sub>	humedad relativa mínima diaria [%]
HWR	cociente entre la altura y el ancho
h	altura del cultivo [m]
I	lámina infiltrada de riego (neta) [mm]
IAF	índice de área foliar [m <sup>2</sup> (área foliar) m <sup>-2</sup> (superficie del suelo)]
IAF <sub>activa</sub>	índice del área foliar activa (soleada) [-]
I <sub>w</sub>	lámina infiltrada de riego en la porción humedecida de la superficie [mm]
J	número del día en el año [-]
K <sub>c</sub>	coeficiente del cultivo [-]
K <sub>c ini</sub>	coeficiente del cultivo durante la etapa inicial de crecimiento [-]
K <sub>c med</sub>	coeficiente del cultivo durante la etapa de mediados de temporada [-]
K <sub>c fin</sub>	coeficiente del cultivo al finalizar la etapa final de crecimiento [-]
K <sub>c max</sub>	valor máximo del coeficiente del cultivo (a continuación de una lluvia o riego) [-]
K <sub>c min</sub>	valor mínimo del coeficiente del cultivo (suelo seco sin cobertura del suelo) [-]
K <sub>cb</sub>	coeficiente basal del cultivo [-]
K <sub>cb full</sub>	coeficiente basal del cultivo durante la etapa de mediados de temporada (en el máximo del tamaño o altura de la planta) para vegetación con cobertura completa del suelo de IAF > 3 [-]
K <sub>cb ini</sub>	coeficiente basal del cultivo durante la etapa inicial de crecimiento [-]
K <sub>cb med</sub>	coeficiente basal del cultivo durante la etapa de mediados de temporada [-]
K <sub>cb fin</sub>	coeficiente basal del cultivo al finalizar la etapa final de crecimiento [-]
K <sub>e</sub>	coeficiente de evaporación en el suelo [-]
K <sub>p</sub>	coeficiente del tanque evaporímetro [-]
K <sub>r</sub>	coeficiente de reducción de la evaporación en el suelo [-]
K <sub>s</sub>	coeficiente de estrés hídrico [-]
K <sub>y</sub>	factor de respuesta de la productividad del cultivo [-]
k	constante de von Karman's [0,41] [-]
k <sub>Rs</sub>	coeficiente de ajuste para la formula de radiación de Hargreaves [°C <sup>-0,5</sup> ]
L <sub>ini</sub>	duración de la etapa inicial de crecimiento del cultivo [día]
L <sub>des</sub>	duración de la etapa de desarrollo del cultivo [día]
L <sub>med</sub>	duración de la etapa de mediados de temporada [día]
L <sub>fin</sub>	duración de la etapa de final de temporada [día]
L <sub>z</sub>	longitud del centro de la zona del tiempo local [grados oeste de Greenwich]
L <sub>m</sub>	longitud [grados oeste de Greenwich]
N	duración máxima de la insolación durante el día o el máximo número de horas de sol durante el día [hora]
n	duración real de la insolación durante el día o el número real de horas de sol durante el día [hora]

$n/N$	relación de la duración de la insolación o fracción de insolación [-]
$P$	precipitación [mm], presión atmosférica [kPa]
$p$	factor de agotamiento del agua en el suelo [-]
$R$	constante específica del gas [0,287 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$R_a$	radiación extraterrestre [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_l$	radiación de onda larga [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_n$	radiación neta [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_{nl}$	radiación neta de onda larga [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_{ns}$	radiación solar neta o radiación neta de onda corta [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_s$	radiación solar o radiación de onda corta [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$R_{so}$	radiación solar o de onda corta para cielo despejado [MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]
$r_a$	resistencia aerodinámica [s m <sup>-1</sup> ]
$r_l$	resistencia estomática (total) de una hoja bien iluminada [s m <sup>-1</sup> ]
$r_s$	resistencia del cultivo o resistencia superficial (total) [s m <sup>-1</sup> ]
$R_s/R_{so}$	fracción de radiación solar o fracción de radiación de onda corta [-]
$RO$	escurrimiento superficial [mm]
$S_c$	factor de corrección estacional del tiempo solar [hora]
$SF$	flujo sub-superficial [mm]
$SW$	contenido de agua en el suelo [m <sup>3</sup> (agua) m <sup>-3</sup> (suelo)]
$T$	temperatura del aire [°C]
$T_K$	temperatura del aire [K]
$T_{Kv}$	temperatura virtual del aire [K]
$T_{rocío}$	temperatura de rocío [°C]
$T_{seco}$	temperatura del bulbo seco [°C]
$T_{max}$	temperatura máxima diaria del aire [°C]
$T_{max,K}$	temperatura máxima diaria del aire [K]
$T_{media}$	temperatura media diaria del aire [°C]
$T_{min}$	temperatura mínima diaria del aire [°C]
$T_{min,K}$	temperatura mínima diaria del aire [K]
$T_{húmedo}$	temperatura del bulbo húmedo [°C]
$t$	tiempo [hora]
$u_2$	velocidad del viento a 2 m sobre la superficie del suelo [m s <sup>-1</sup> ]
$u_z$	velocidad del viento a una altura $z$ m sobre la superficie del suelo [m s <sup>-1</sup> ]
$W$	agua precipitable en la atmósfera [mm]
$Y_a$	productividad real del cultivo [kg ha <sup>-1</sup> ]
$Y_m$	productividad máxima (esperada) del cultivo en ausencia de estrés hídrico o estrés ambiental [kg ha <sup>-1</sup> ]
$Z_c$	profundidad de la capa superficial del suelo sujeta al secado a través de la evaporación [m]
$Z_r$	profundidad de las raíces [m]
$z$	altitud, altura sobre el nivel del mar [m]
$z_h$	altura de las mediciones de humedad [m]
$z_m$	altura de las mediciones de viento [m]
$z_{om}$	longitud de la rugosidad para la transferencia de momentum [m]
$z_{oh}$	longitud de la rugosidad para la transferencia de calor y vapor de agua [m]
$\alpha$	albedo [-]
$\gamma$	constante psicrométrica [kPa °C <sup>-1</sup> ]
$\gamma_{psy}$	constante psicrométrica del instrumento [kPa °C <sup>-1</sup> ]
$\Delta$	pendiente de la curva de presión de vapor a saturación [kPa °C <sup>-1</sup> ]
$\Delta_{SW}$	variación en el contenido de agua en el suelo [mm]
$\Delta_t$	duración del intervalo de tiempo [día]
$\Delta_z$	profundidad efectiva del suelo [m]
$\delta$	declinación solar [rad]

$\varepsilon$	cociente entre los pesos moleculares del vapor de agua/aire seco (= 0,622)
$\eta$	ángulo medio del sol sobre el horizonte
$\theta$	contenido de agua en el suelo [ $\text{m}^3(\text{agua}) \text{m}^{-3}(\text{suelo})$ ]
$\theta_{FC}$	contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [ $\text{m}^3(\text{agua}) \text{m}^{-3}(\text{suelo})$ ]
$\theta_t$	valor umbral del contenido de agua en el suelo por debajo del cual se reduce la transpiración debido al estrés hídrico [ $\text{m}^3(\text{agua}) \text{m}^{-3}(\text{suelo})$ ]
$\theta_{WP}$	contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente [ $\text{m}^3(\text{agua}) \text{m}^{-3}(\text{suelo})$ ]
$\lambda$	calor latente de vaporización [ $\text{MJ kg}^{-1}$ ]
$\lambda_{ET}$	flujo de calor latente [ $\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$ ]
$\rho_a$	densidad media del aire [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\rho_w$	densidad del agua [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [ $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]
$\varphi$	latitud [rad]
$\omega$	ángulo del tiempo solar a la mitad del período horario o inferior [rad]
$\omega_1$	ángulo del tiempo solar al comienzo del período horario o inferior [rad]
$\omega_2$	ángulo del tiempo solar al final del período horario o inferior [rad]
$\omega_s$	ángulo horario al ocaso [rad]

## Capítulo 1

# Introducción a la evapotranspiración

Este capítulo explica los conceptos y las diferencias entre evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y la evapotranspiración del cultivo bajo varias condiciones de manejo y ambientales ( $ET_{c_{aj}}$ ). También examina los factores que afectan la evapotranspiración, las unidades en las cuales se expresa normalmente y la manera en la cual puede ser determinada.

### PROCESO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

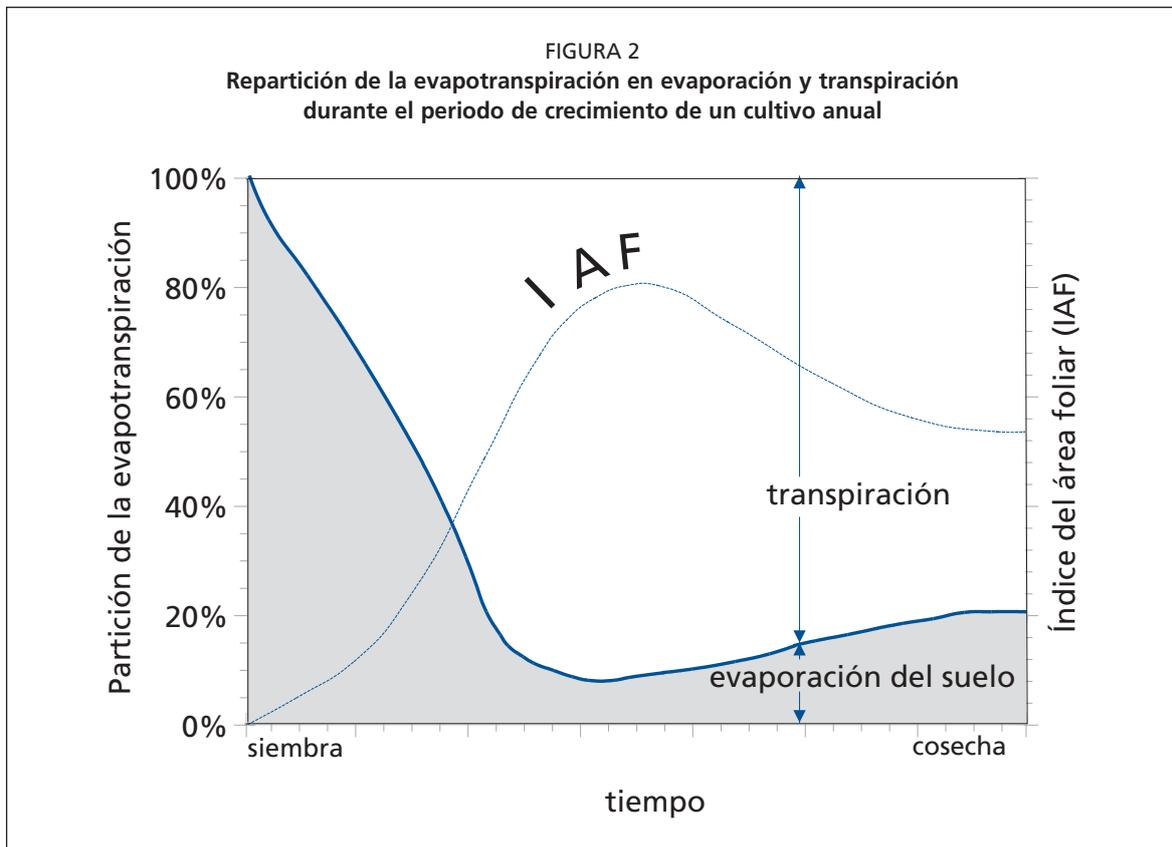
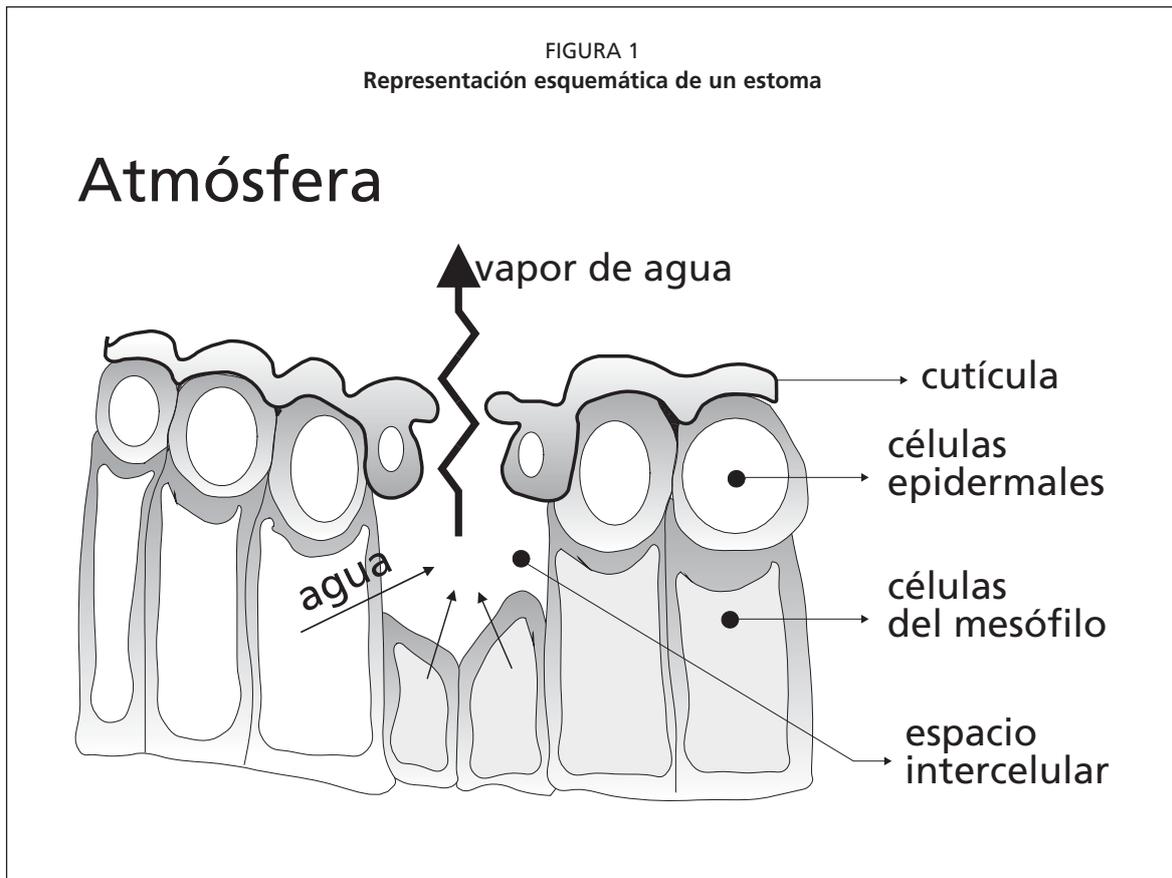
Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo

#### Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas. Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo.



## Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Figura 1). El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración.

## Evapotranspiración (ET)

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En la Figura 2 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración.

## UNIDADES

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año.

Como una hectárea tiene una superficie de 10 000 m<sup>2</sup> y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m<sup>3</sup> de agua por hectárea. Es decir 1 mm día<sup>-1</sup> es equivalente 10 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

La altura del agua se puede también expresar en términos de la energía recibida por unidad de área. Esto último se refiere a la energía o al calor requerido para vaporizar el agua. Esta energía, conocida como el calor latente de vaporización ( $\lambda$ ), es una función de la temperatura del agua. Por ejemplo, a 20°C,  $\lambda$  tiene un valor de cerca de 2,45 MJ Kg<sup>-1</sup>. Es decir 2,45 MJ son necesarios para vaporizar 1 kilogramo ó 0,001 m<sup>3</sup> de agua. Por lo tanto, un aporte de energía de 2,45 MJ por m<sup>2</sup> puede vaporizar 0,001 m ó 1 milímetro de agua, y entonces 1 milímetro de agua es equivalente a 2,45 MJ m<sup>-2</sup>. La evapotranspiración expresada en unidades del MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> se representa por  $\lambda$  ET, el flujo del calor latente.

El Cuadro 1 resume las unidades usadas para expresar la evapotranspiración y los factores de conversión entre ellas.

CUADRO 1  
Factores de conversión para expresar evapotranspiración

	Altura de agua		volumen por unidad de área		energía por unidad de área *
	mm día <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	l s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup>	MJ m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup>	
1 mm día <sup>-1</sup>	1	10	0,116	2,45	
1 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	0,1	1	0,012	0,245	
1 l s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup>	8,640	86,40	1	21,17	
1 MJ m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup>	0,408	4,082	0,047	1	

\* Para el agua con una densidad de 1 000 kilogramos m<sup>3</sup> y a 20 °C.

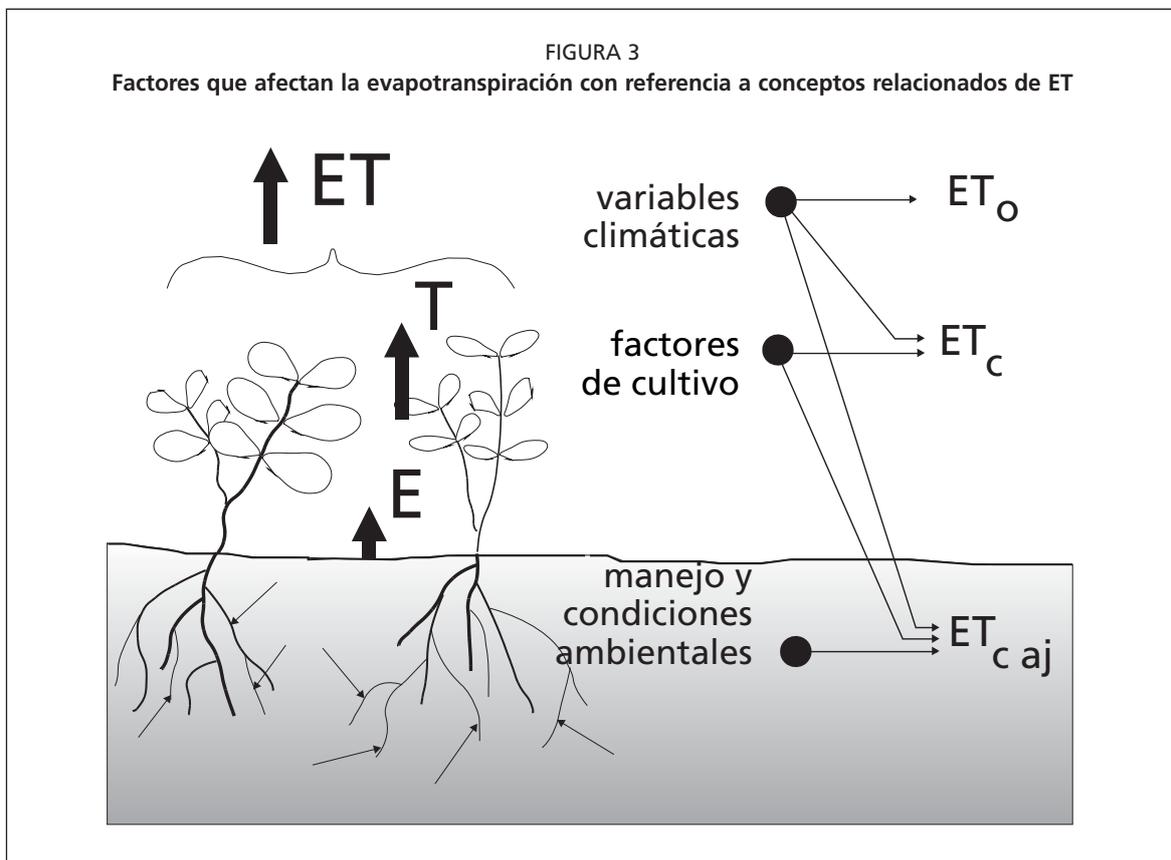
EJEMPLO 1

Conversión de la evaporación a partir de una unidad a otra

En un día de verano, la energía solar neta recibida en un lago alcanza 15 MJ por metro cuadrado por día.  
¿Si el 80% de la energía se usa para evaporar el agua, cual es el valor de la altura de agua evaporada?

De Cuadro 1:	1 MJ m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> =	0,408	mm día <sup>-1</sup>
Por lo tanto:	0,8 x 15 MJ m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> = 0,8 x 15 x 0,408 mm día <sup>-1</sup> =	4,9	mm día <sup>-1</sup>

La tasa de evaporación será de 4,9 mm día<sup>-1</sup>



## FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la Figura 3 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración.

### Variables climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ). La evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar. La  $ET_0$  se describe más adelante en este Capítulo y en los Capítulos 2 y 4 en forma más detallada.

### Factores de cultivo

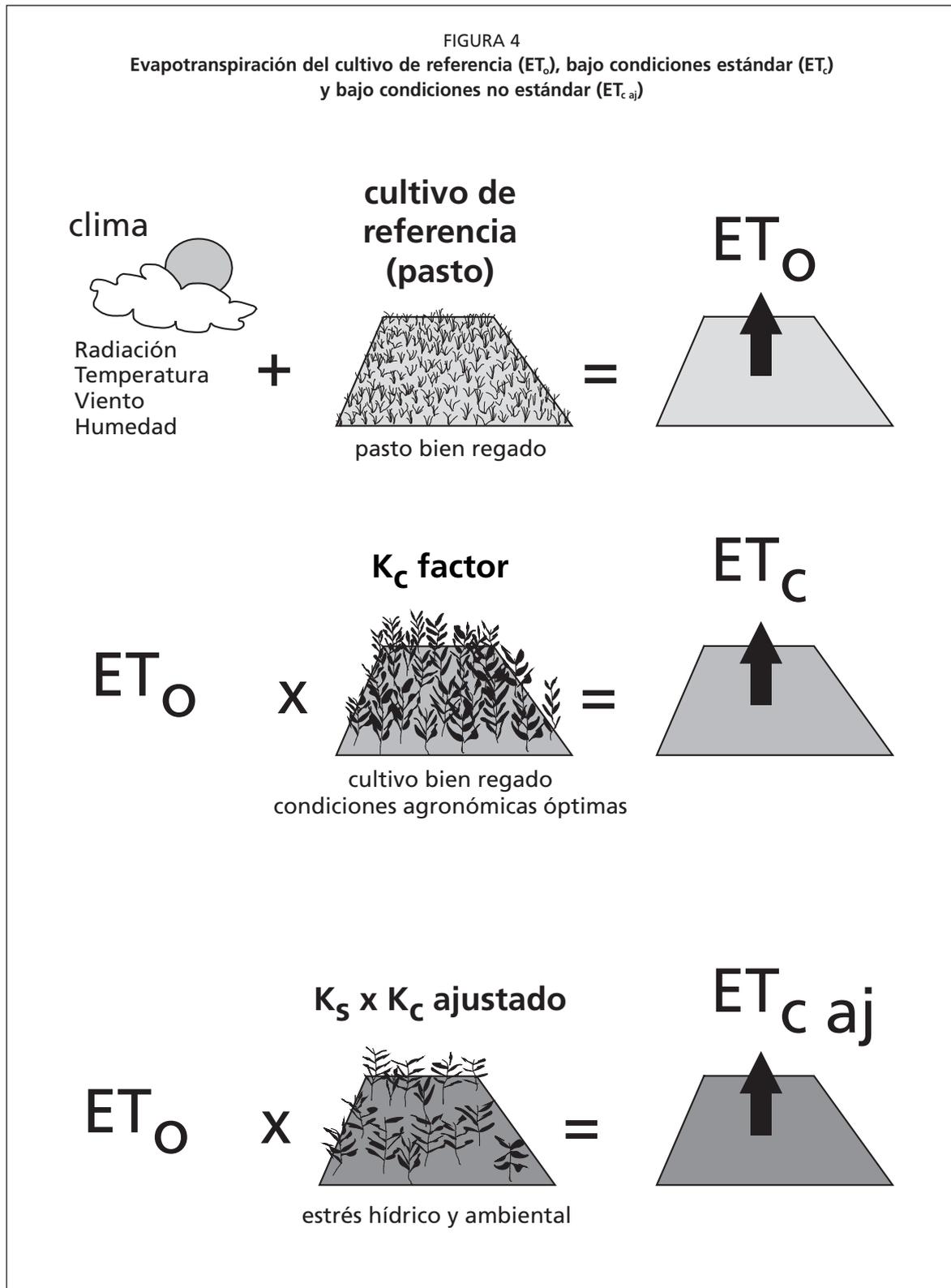
El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radicales del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas.

### Manejo y condiciones ambientales

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo. Una barrera rompevientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en el campo. La evaporación del suelo de un huerto con árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación. El uso de coberturas, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir substancialmente la evaporación del suelo. Los anti-transpirantes, tales como estimulantes del cierre de

los estomas, o los materiales que favorecen el reflejo del suelo, reducen las pérdidas de agua del cultivo y por lo tanto la tasa de transpiración. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar  $ET_c$  ( $ET_{c\text{aj}}$ ). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.



## CONCEPTOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c,aj}$ ) (Figura 4).  $ET_o$  es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera.  $ET_c$  se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas.  $ET_c$  requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.

### Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ )

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina  $ET_o$ . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición.

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de  $ET_o$  en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia.

Los únicos factores que afectan  $ET_o$  son los parámetros climáticos. Por lo tanto,  $ET_o$  es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos.  $ET_o$  expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de  $ET_o$  con parámetros climáticos. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la  $ET_o$  de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes.

El Cuadro 2 muestra rangos típicos de valores de  $ET_o$  en diferentes regiones agroclimáticas. Estos valores pretenden familiarizar al usuario, sin recomendar su aplicación directa. El cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia se presenta en la Parte A de este manual (Recuadro 1).

### Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ )

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina  $ET_c$ , y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes.

CUADRO 2

ET<sub>o</sub> promedio para diferentes regiones agroclimáticas en mm día<sup>-1</sup>

Regiones	Temperatura promedio durante el día (°C)		
	Templada ~10°C	Moderada 20°C	Caliente > 30°C
<b>Trópicos y subtropicos</b>			
- húmedos y subhúmedos	2 - 3	3 - 5	5 - 7
- áridos y semiáridos	2 - 4	4 - 6	6 - 8
<b>Regiones templadas</b>			
- húmedas y subhúmedas	1 - 2	2 - 4	4 - 7
- áridas y semiáridas	1 - 3	4 - 7	6 - 9

RECUADRO 1

**Capítulos relacionados con el cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) presentados en este libro**

**PARTE A****Capítulo 2 – Ecuación Penman-Monteith de la FAO:**

Este capítulo explica al usuario la importancia de estandarizar el método de cálculo de ET<sub>o</sub> a partir de datos meteorológicos. El método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método para determinar ET<sub>o</sub>. Se describen el método y las definiciones correspondientes de la superficie de referencia.

**Capítulo 3 – Datos Meteorológicos:**

El método Penman-Monteith de la FAO requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. En este capítulo se presentan procedimientos de cálculo para derivar parámetros climáticos de los datos meteorológicos con los que se cuente. También se presentan procedimientos para estimar valores faltantes de variables meteorológicas existentes con el fin de calcular ET<sub>o</sub>. Con estos procedimientos es posible estimar la ET<sub>o</sub> con el método FAO Penman-Monteith bajo cualquier circunstancia, aún cuando no se cuenten con todos los datos climáticos.

**Capítulo 4 – Determinación de ET<sub>o</sub>:**

Se describe el cálculo de ET<sub>o</sub> de acuerdo a la ecuación FAO Penman-Monteith, con distintos intervalos de tiempo, a partir de los principales parámetros meteorológicos y también en casos de datos faltantes. También se presenta la determinación de la ET<sub>o</sub> a partir de la evaporación del tanque Clase A.

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. El requerimiento de agua de riego también incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua. El cálculo de las necesidades de agua de riego no se incluye en este libro, pero será tema central de un futuro libro dentro de la Serie Riego y Drenaje.

## RECUADRO 2

**Capítulos relacionados con el cálculo de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) presentados en este libro**

**PARTE B****Capítulo 5 – Introducción a la evapotranspiración del cultivo:**

Este capítulo presenta al usuario el enfoque de « $K_c \times ET_o$ » para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. El efecto de las características que distinguen a los cultivos de campo del cultivo de referencia se integran en el coeficiente  $K_c$ . Se hace una distinción entre dos métodos de determinación de  $K_c$  de acuerdo a los objetivos planteados, precisión requerida, disponibilidad de datos climáticos, y el intervalo de tiempo dentro del cual se van a realizar las estimaciones.

**Capítulo 6 - ET<sub>c</sub> – Coeficiente único del cultivo ( $K_c$ ):**

Este capítulo presenta el primer método de cálculo de la evapotranspiración del cultivo, en el cual la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y la superficie de referencia se combina en un único coeficiente ( $K_c$ ).

**Capítulo 7 – ET<sub>c</sub> –Partición del coeficiente del cultivo ( $K_c = K_{cb} + K_e$ ):**

Este capítulo presenta un segundo método de cálculo de la evapotranspiración del cultivo.  $K_c$  se divide en dos coeficientes separados, uno para la transpiración del cultivo (el coeficiente basal del cultivo  $K_{cb}$ ) y otro para la evaporación del suelo ( $K_e$ ).

La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ET<sub>o</sub>). La relación ET<sub>c</sub>/ET<sub>o</sub> que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo ( $K_c$ ), y se utiliza para relacionar ET<sub>c</sub> a ET<sub>o</sub> de manera que  $ET_c = K_c \times ET_o$ .

Las diferencias en la anatomía de las hojas, características de los estomas, las propiedades aerodinámicas, e incluso el albedo, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas. Debido a variaciones en las características del cultivo durante los diferentes periodos de crecimiento, para un determinado cultivo,  $K_c$  cambia desde la siembra hasta la cosecha. El cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) se presenta en la parte B de este manual (Recuadro 2).

**Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET<sub>c aj</sub>)**

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET<sub>c aj</sub>) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ET<sub>c</sub> debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET<sub>c</sub>.

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico  $K_s$  o ajustando  $K_c$  a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo. El ajuste de  $ET_c$  para el estrés hídrico, y para las limitaciones ambientales y de manejo se presenta en la Parte C de este manual (Recuadro 3).

## DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

### Medición de ET

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos.

### *Métodos de balance de energía y microclimáticos*

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo.

#### RECUADRO 3

#### Capítulos relacionados a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c,aj}$ ) presentados en este libro

##### PARTE C

##### Capítulo 8 - $ET_c$ bajo estrés hídrico

Este capítulo presenta la reducción en la transpiración inducida por estrés hídrico o por salinidad existente en la solución del suelo. La evapotranspiración resultante se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico,  $K_s$ , que describe el efecto de las condiciones de estrés hídrico en la transpiración del cultivo.

##### Capítulo 9 – $ET_c$ para vegetación natural, atípica y no-prístina:

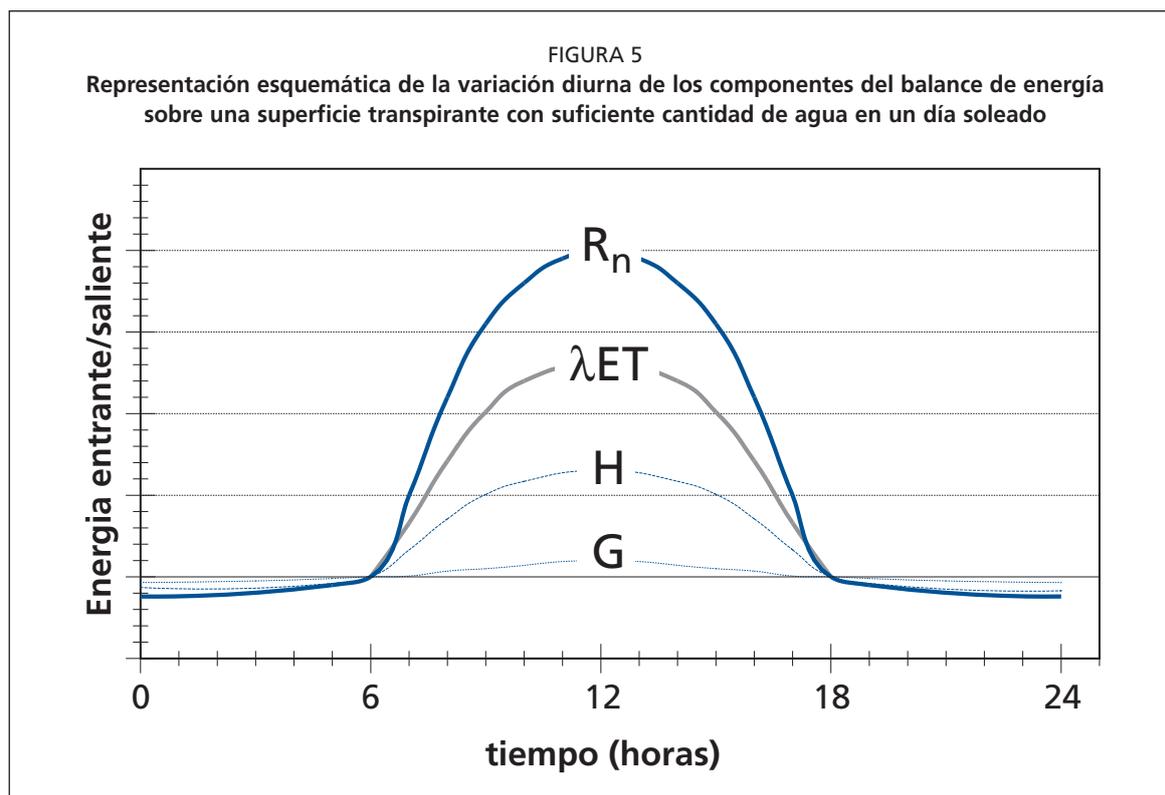
Se presentan los procedimientos que pueden ser utilizados para hacer ajustes a  $K_c$  tomando en cuenta condiciones de crecimiento diferentes a las estándar. Estos procedimientos también pueden ser utilizados para determinar  $K_c$  para cultivos agrícolas que no se cubren en los cuadros de la Parte B.

##### Capítulo 10 – $ET_c$ bajo varias prácticas de manejo:

Este capítulo presenta varios tipos de prácticas de manejo que pueden causar que los valores de  $K_c$  y  $ET_c$  se desvíen de las condiciones estándar descritas en la Parte B. Se presentan procedimientos de ajuste para superficies cubiertas, cultivos intercalados, áreas pequeñas de cultivo, y manejo de estrés inducido.

##### Capítulo 11 – $ET_c$ durante periodos no cultivados:

Este capítulo describe procedimientos para describir  $ET_c$  durante periodos no cultivados bajo varios tipos de condiciones de superficie.



Todos los flujos de energía deben ser considerados cuando se deriva una ecuación de balance de energía. La ecuación para una superficie de evaporación se puede escribir como:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (1)$$

donde  $R_n$  es la radiación neta,  $H$  es el calor sensible,  $G$  es el flujo de calor del suelo, y  $\lambda ET$  es el flujo de calor latente. Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando  $R_n$  es positiva, proporciona energía a la superficie y cuando  $G$ ,  $\lambda ET$  y  $H$  son positivos retiran energía de la superficie (Figura 5).

En la Ecuación 1, solamente se consideran flujos verticales y se ignora la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección. Por lo tanto la ecuación se aplica solamente a superficies grandes y extensas de vegetación homogénea. La ecuación está restringida a cuatro componentes:  $R_n$ ,  $\lambda ET$ ,  $H$  y  $G$ . No se consideran otros términos de energía, tal como el calor almacenado y liberado de la planta, o la energía utilizada en actividades metabólicas. Estos términos solo utilizan una pequeña fracción de la radiación solar diaria y pueden ser considerados despreciables cuando se comparan con los otros cuatro componentes.

El flujo de calor latente ( $\lambda ET$ ) representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta ( $R_n$ ) y el flujo de calor del suelo ( $G$ ) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Por el contrario la medición del calor sensible ( $H$ ) es compleja y sus valores no pueden obtenerse fácilmente. La determinación de  $H$  incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie.

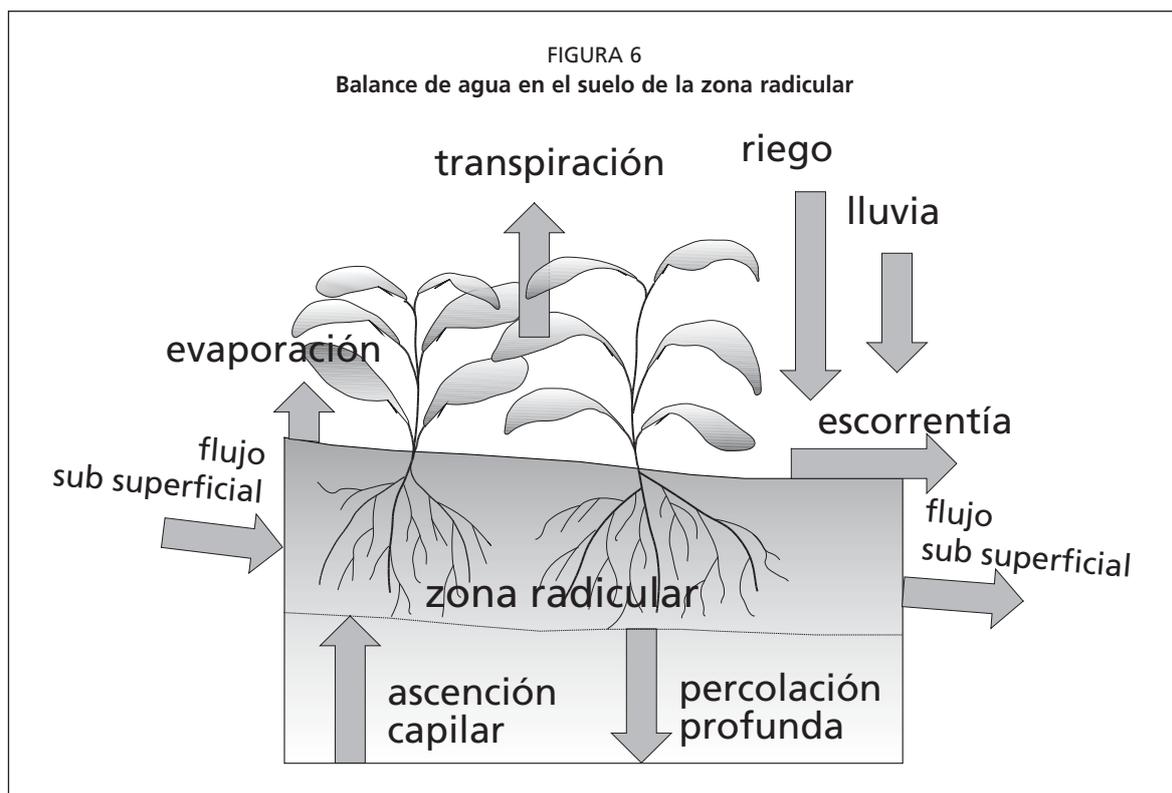
Otro método para estimar la evapotranspiración es el método de transferencia de masa. Este enfoque considera los movimientos verticales de pequeñas cantidades de aire (remolinos) por encima de una amplia superficie homogénea. Los remolinos

transportan la materia (vapor de agua) y la energía (calor, momentum) desde y hacia la superficie de evapotranspiración. Asumiendo condiciones de equilibrio y que los coeficientes de transferencia de los remolinos para el vapor de agua son proporcionales a aquellos para el calor y el momentum, la evapotranspiración puede ser calculada a partir de los gradientes verticales de la temperatura del aire y vapor de agua usando la relación de Bowen. Otros métodos de observaciones directas, utilizan gradientes de velocidad del viento y de vapor de agua. Estos métodos y otros como el de la covarianza de remolinos, requieren medidas precisas de la presión de vapor, y de la temperatura del aire o velocidad del viento a diferentes niveles sobre la superficie. Por lo tanto su aplicación se restringe principalmente, a situaciones de investigación.

### *Balance de agua en el suelo*

La evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Figura 6). El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular ( $\Delta FS$ ). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden no ser considerados. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo ( $\Delta SW$ ) a lo largo de un periodo de tiempo:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW \quad (2)$$



Algunos flujos como el flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo. El método del balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimaciones de ET para periodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días.

### **Lisímetros**

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y períodos pequeños tales como una hora pueden ser considerados. En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada.

Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de  $ET_c$  y  $K_c$ .

Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos.

### **ET calculada con datos meteorológicos**

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente.

Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una Consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia,  $ET_o$ . La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) que relacionan la  $ET_c$  con la  $ET_o$ . La ET de superficies cultivadas bajo condiciones no estándar se ajusta mediante un coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) o modificando el coeficiente de cultivo.

### **ET estimada con el tanque de evaporación**

La evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con  $ET_o$ . El procedimiento se presenta en el Capítulo 4.