



DEMANDA DE AGUA POR PARTE DE LOS CULTIVOS

Oscar Reckmann A.

Ingeniero Agrónomo, M. Sc.

INIA La Platina.

1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación (E) es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Incluye tanto la evaporación de agua líquida o sólida directamente desde el suelo o desde las superficies vegetales vivas o muertas (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), como las pérdidas de agua a través de las superficies vegetales, particularmente las hojas. En este último proceso, denominado transpiración (T), el agua absorbida por medio de las raíces, se transfiere a la atmósfera fundamentalmente a través de los estomas situados en las hojas. Fue la dificultad de discriminar E y T en condiciones naturales, lo que obligó a introducir el concepto de evapotranspiración (ET). Por lo tanto, la evapotranspiración constituye la transferencia total de agua desde una superficie con cubierta vegetal a la atmósfera (**Figura 15**).

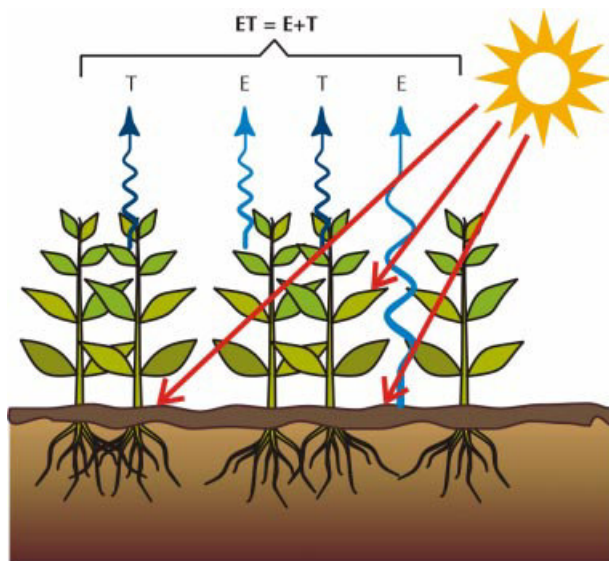


Figura 15. Evapotranspiración de cultivo.

La importancia cuantitativa de este proceso es tal que, como promedio global, el 57% de la precipitación anual es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración, alcanzando valores del 90 y 100% en zonas áridas y desérticas. Las cantidades de agua que por este concepto vuelven a la atmósfera y la energía necesaria para ello, alcanzan cifras también realmente notables. En un día cálido, es frecuente en muchas zonas una ET de 3 - 4 mm día⁻¹, lo que equivale a 30 - 40 m³ ha⁻¹ día⁻¹.

Por tanto, la ET es un componente fundamental del balance del agua y un factor clave en la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera. Su cuantificación se hace precisa en contextos diferentes tales como la producción vegetal, la planificación y gestión de recursos hídricos o estudios ambientales y ecológicos, y afecta por tanto a una gran variedad de especialidades científicas como climatólogos, ecólogos vegetales y fisiólogos y especialistas en hidrología.

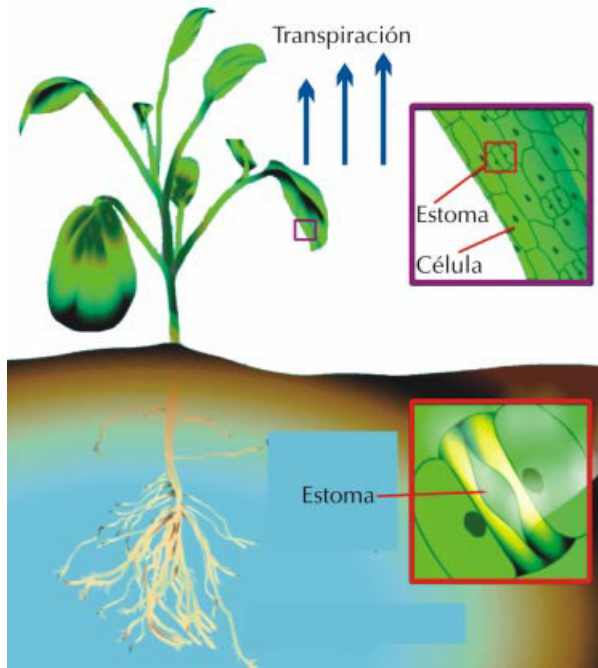


Figura 16. Transpiración de cultivo.

2. BALANCE HÍDRICO DE UN SUELO REGADO

El propósito de aplicar agua de riego a los cultivos es de abastecer al vegetal con el agua necesaria con el fin de optimizar la relación “agua de riego/producción”. El contenido de agua en el suelo luego de ser aplicada con el riego sufre una serie de transformaciones y transferencias. Existe absorción por parte de las raíces, translocación y transpiración en las plantas, evaporación directa desde el suelo, percolación profunda y escurrimiento superficial. En la **Figura 17**, se ilustra el balance de agua y sus interacciones en el sistema suelo-planta-atmósfera.

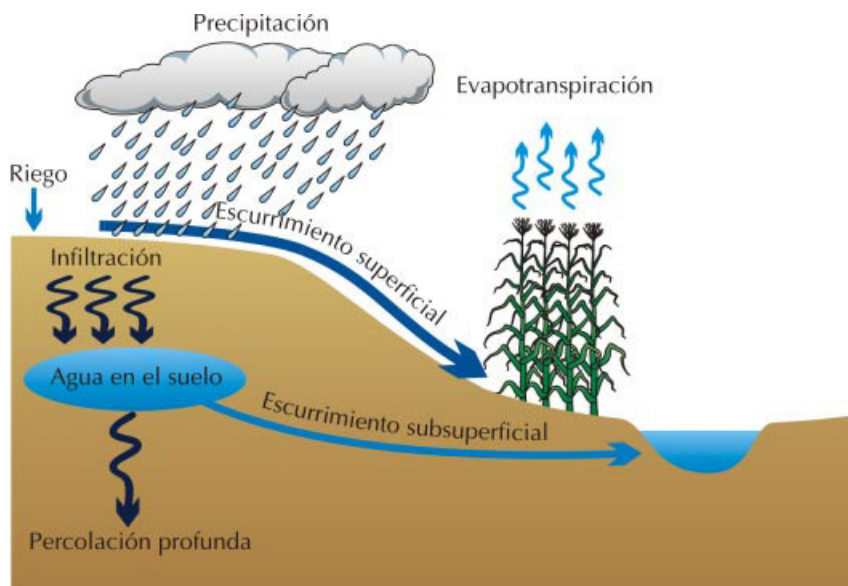


Figura 17. Balance de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera.

Una descripción breve pero integradora del sistema suelo-planta-atmósfera puede iniciarse desde el suelo. La planta absorbe agua del suelo y la emite en forma de vapor a la atmósfera en el proceso denominado transpiración (T), a su vez el suelo emite vapor a la atmósfera en el proceso de evaporación (E). La pérdida total de agua del conjunto suelo-planta en forma de vapor en los procesos de evaporación y transpiración se denomina evapotranspiración (ET).

Estas pérdidas de vapor son mayores, cuanto mayor es la temperatura, más fuerte es el viento y más seco es el aire. Ambos procesos, evaporación y transpiración, se ven afectados por la demanda evaporativa de la atmósfera, por la cantidad de agua disponible en el suelo, naturaleza del suelo y las características de la cubierta vegetal.



En nuestro país existen importantes áreas agroecológicas que se ubican en zonas con climas áridos y semiáridos con períodos secos entre 6 y 8 meses, generando una alta dependencia de agua de riego para los cultivos. Si el método de riego utilizado es correctamente seleccionado y bien operado, las pérdidas de agua llegan a disminuir en forma importante y por lo tanto el requerimiento de riego pasa a ser altamente dependiente de la evapotranspiración.

Por otra parte, en las áreas de riego con climas subhúmedos y húmedos el requerimiento de riego puede disminuirse en función de las precipitaciones que caen en épocas del año que coinciden con el período de crecimiento de los cultivos, además del aporte por capilaridad cuando hay presencia de napas freáticas superficiales. Es así, como la ET varía con la estación del año y la suma de esta durante los correspondientes períodos de crecimiento de cada cultivo determina el volumen de agua requerido. Bajo estas circunstancias es posible realizar el riego con sistemas de riego gravitacional (surco) y goteo, incluso es posible realizar riego a partir de napas subsuperficiales aprovechando los fenómenos de capilaridad.

Cuando el cultivo está estableciéndose en terreno la componente dominante de la ET es la evaporación (E). A medida que el cultivo crece, desarrolla superficie foliar y cubre más terreno, aumenta la componente transpiración (T) y a su vez disminuye la evaporación por sombreado de suelo. Llegando la T a alcanzar valores de 90 a 95% de la ET. Es evidente que este concepto es la componente básica del requerimiento de riego de parte de los cultivos por lo que su medición o estimación llega a ser de fundamental importancia con fines de planificación.

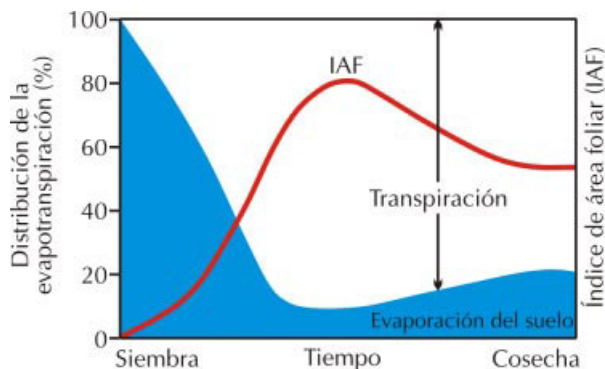


Figura 18. Distribución de la evapotranspiración, en transpiración y evaporación durante el período de crecimiento de un cultivo anual.

3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET_0)

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la “Evapotranspiración”, corresponde a la cantidad de agua usada por la planta, durante todo el período de desarrollo en los procesos de transpiración y formación de tejidos, más el agua perdida a través de la evaporación directa desde el suelo.

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), representa una tasa de evapotranspiración que ocurre desde una superficie de referencia cubierta de pasto con características definidas, en condiciones de abastecimiento hídrico adecuado. Este concepto se utiliza para determinar la demanda evapotranspirativa de la atmósfera independiente del tipo de cultivo, su desarrollo y prácticas de manejo normalmente utilizadas. Como es una cubierta vegetal que no se encuentra bajo restricción hídrica los factores de suelo no afectan la evapotranspiración, sino los componentes



climáticos mayormente (temperatura, viento, radiación solar, período luminoso del día, humedad ambiente y precipitación). La ET_0 por lo tanto permite comparar la evapotranspiración producida en el cultivo estándar (pasto) con la evapotranspiración ocurrida en otras especies vegetales. Obviamente es necesario además de establecer el cultivo bajo análisis, el determinar su estado de crecimiento al momento de realizar la comparación.

El único método aceptado para la obtención de la ET_0 es el recomendado por la FAO y que utiliza la ecuación de Penman-Monteith. Este método corresponde a una ecuación que describe la evapotranspiración desde una superficie vegetal uniforme, que incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos ajustándose muy bien a los valores reales en pruebas con lisímetros bajo distintas condiciones climáticas (**Figura 19**).

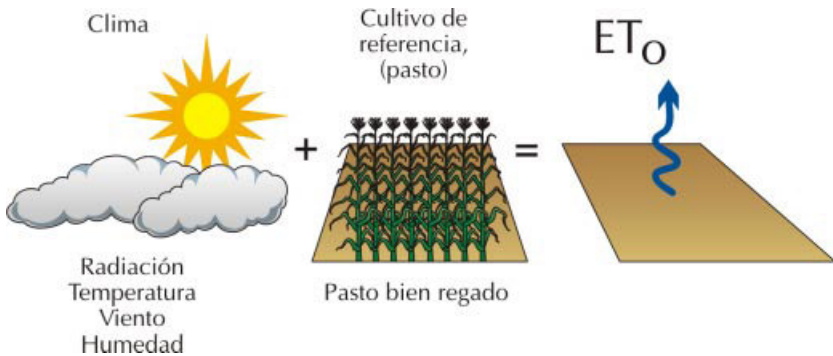


Figura 19. Evapotranspiración del cultivo de referencia.

Valores típicos de ET_0 para condiciones climáticas distintas se presentan en el **Cuadro 8**. Esta información se entrega solo con fines referenciales y en ningún caso se pueden utilizar para realizar estimaciones de la misma.



Cuadro 8. Evapotranspiración potencial (ET_0) promedio según climas en mm/día.

Clima (Región templada)	Temperatura media diaria (°C)		
	Fría 10°C	Moderada 20°C	Cálida > 30°C
Húmedo y subhúmedo	1-2	2-4	4-7
Arido y semiárido	1-3	4-7	6-9

Fuente: FAO, 1998

En el **Cuadro 9** y a modo de ejemplo, se presentan valores de Evapotranspiración del cultivo de referencia para dos zonas características de cultivo de frutilla en Chile.

Cuadro 9. Evapotranspiración potencial (ET_0) para dos zonas características de cultivo de frutilla en Chile.

Región	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
VI costa	2,32	3,23	3,92	4,91	5,12	4,15	3,45
VII interior	2,12	3,22	4,22	5,40	5,74	4,50	3,49

(Fuente: Cartografía de la Evapotranspiración Potencial de Chile, CNR-CIREN).

A partir desde este punto, se utilizara el cultivo de frutilla a modo de ir ejemplificando los contenidos expuestos.

4. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO (ET_c)

La evapotranspiración de cultivo (ET_c) se define como el agua evapotranspirada por un cultivo creciendo en una superficie, bien fertilizado, bajo condiciones óptimas de suelo y agua, libre de enfermedades y que alcanza su producción potencial en un medio ambiente dado.



La cantidad de agua requerida para compensar las pérdidas provocadas por la ET_c se conocen como los requerimientos de agua de riego del cultivo, los que básicamente representan la diferencia entre el requerimiento de agua de los cultivos y la precipitación efectiva, a veces también considera el agua necesaria para el lavado de sales y para la compensación de la desuniformidad en la aplicación.

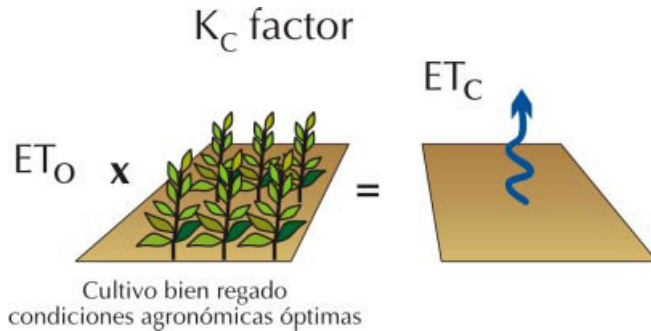


Figura 20. Evapotranspiración real o del cultivo.

La ET_c al igual que la ET_0 puede ser calculada a partir de parámetros climáticos a través de diferentes métodos. Sin embargo, como aún no se cuenta con información suficiente para diferentes cultivos, el método de Penmann-Monteith se utiliza para la obtención del estándar de referencia ET_0 . Así experimentalmente se obtiene la relación ET_c / ET_0 denominado Coeficiente de Cultivo o K_c . Finalmente estos valores son utilizados para obtener la relación:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

ET_c : Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

K_c : Coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_0 : Evapotranspiración potencial o de referencia (mm/día)



El coeficiente de cultivo varía entre especies y durante el crecimiento de una especie, en función de este último concepto es que se han definido estados de crecimiento estándar.

5. ESTADOS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO

El crecimiento del cultivo durante su ciclo de desarrollo se traduce en una variación en la altura de este, grado de cobertura del suelo por la superficie vegetal, entre otros; generando distintos valores de K_c durante este período. Se ha establecido (FAO, 1977 y 1998) como normativa dividir el ciclo de desarrollo del cultivo en 4 fases de crecimiento: Inicial, desarrollo, media estación y madurez (**Figura 21**).

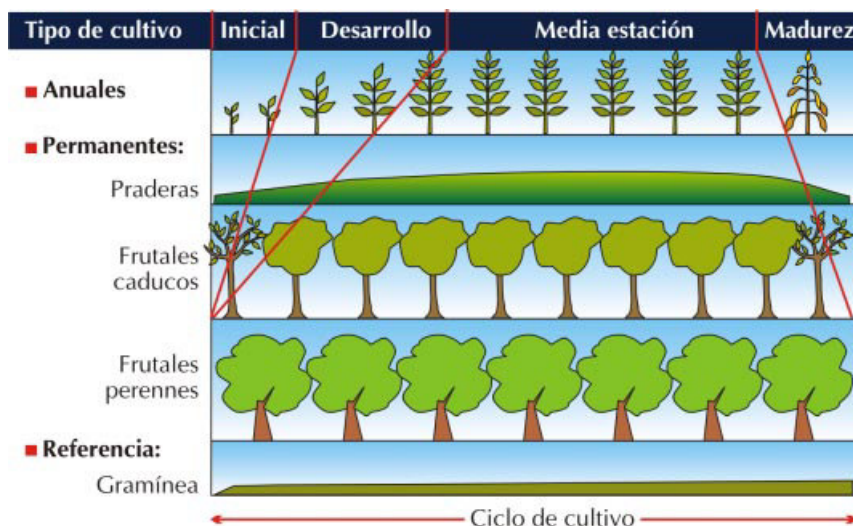


Figura 21. Fases de cultivo según tipo de especies vegetales.

En las **Fotos 1, 2, 3 y 4**, se presentan las fases del cultivo de frutilla asociadas a fases.



Foto 1.
Fase 1 inicial en cultivo de frutilla.



Foto 2.
Fase 2 de desarrollo en cultivo de frutilla.



Foto 3.
Fase 3 de media estación en cultivo de frutilla.



Foto 4.
Fase 4 de madurez en cultivo de frutilla.

Fase 1 inicial: Esta fase corresponde al período de plantación o siembra hasta cuando el cultivo alcanza alrededor de un 10% de cobertura vegetal. La duración de este período depende del cultivo, la variedad, fecha de plantación y el clima.



Fase 2 de desarrollo: Comienza cuando el cultivo ha alcanzado un 10% de cobertura hasta cubrir totalmente la superficie. En la mayoría de las especies la cobertura de un 100% se alcanza con inicios de floración. En el caso de cultivos hilerados como la frutilla esto ocurre cuando las hojas entre las hileras se tocan.

Fase 3 de media estación: Esta fase se inicia con cobertura vegetal de un 100% hasta inicio de madurez del cultivo. El inicio de madurez se refleja en la mayoría de las especies a través del amarillamiento y senescencia y caída de las hojas o el cambio de color en el fruto. Esta fase es la de mayor duración tanto para especies anuales como perennes, pero puede llegar a ser muy corta para hortalizas de consumo fresco.

Fase 4 de madurez: Comienza con inicios de madurez y finaliza con la cosecha o senescencia total del cultivo.

6. OBTENCIÓN DE LA CURVA DE K_c

Para obtener los valores de K_c para las diferentes fases del cultivo se deben consultar las tablas existentes en bibliografía donde se entregan distintos valores según especies y climas, en Anexo 1 se muestran los valores de K_c aceptados por la Comisión Nacional de Riego (CNR). Sin embargo, se recomienda obtener información respecto a la estación de crecimiento y tasa de crecimiento de los cultivos bajo riego de la zona en estudio.

En el **Cuadro 10**, se presentan valores de K_c obtenidos para cultivo de frutilla bajo plástico en clima semiárido, (FAO, 1998, Simone *et al* 1995, Martínez, 1995).



Cuadro 10. Valores de K_c para frutilla bajo mulch en clima semiárido, según fases del cultivo.

Fases	1	2	3	4
K_c	0,4	0,5	0,7	0,6

7. UNIDADES

La evapotranspiración normalmente es expresada en milímetros (mm) por unidad de tiempo (día, mes, año) y representa la cantidad en altura de agua evapotranspirada desde una superficie cultivada.

Como una hectárea corresponde a una superficie de 10000 m² y 1 mm es igual a 0.001 m, es equivalente a 10 m³ por hectárea. En otras palabras 1mm de agua evapotranspirada al día corresponde a 10 m³ ha⁻¹ día⁻¹.

8. EVAPORACIÓN DE BANDEJA

Otra forma de obtener la ET_o , es a partir de la evaporación de bandeja tipo A, la cual provee de una medida del efecto integrado de radiación, viento, temperatura y humedad sobre la evaporación de una superficie libre de agua específica. En forma similar las plantas responden del mismo modo a las variables climáticas, pero un mayor número de factores pueden producir diferencias significativas en la pérdida de agua.

Por ejemplo, el reflejo o albedo de la radiación solar de una superficie de agua es solo de 5 a 8% mientras que en las superficies vegetales es del 20 al 25%. El almacenamiento de calor dentro



Foto 5. Bandeja de evaporación.

de la bandeja puede ser apreciable y puede tener igual evaporación tanto en el día como en la noche; los cultivos por su parte transpiran principalmente durante el día. Por otro lado, las pérdidas de agua en la bandeja y de los cultivos pueden ser causadas por diferencias en turbulencias, temperatura y humedad del aire inmediatamente por encima de la superficie.

No obstante estas diferencias, con una localización apropiada la evapotranspiración de referencia para períodos de 10 días o mayores puede obtenerse con bastante precisión a través de la bandeja de evaporación. Para relacionar la evaporación de bandeja con la evaporación de referencia, empíricamente se ha derivado un coeficiente de bandeja o K_b , el cual depende de variables climáticas y de la localización de la bandeja.



El tanque o bandeja de evaporación ha sido estandarizado en cuanto a sus medidas (**Figura 22**), se construye de hierro galvanizado de 8 mm de espesor. La bandeja se debe instalar sobre una estructura de madera la cual se encuentra ubicada a 15 cm. sobre la superficie del suelo. La bandeja debe quedar nivelada. El agua se renueva al menos una vez a la semana para eliminar la turbidez. El hierro galvanizado se debe pintar al menos una vez al año con pintura de aluminio. Se recomienda ubicar la bandeja sobre un sitio abierto de 20 por 20 metros, cubierto de césped, permitiendo la libre circulación del aire. Se recomienda instalar la bandeja a sotavento o al centro de superficies importantes de cultivo.

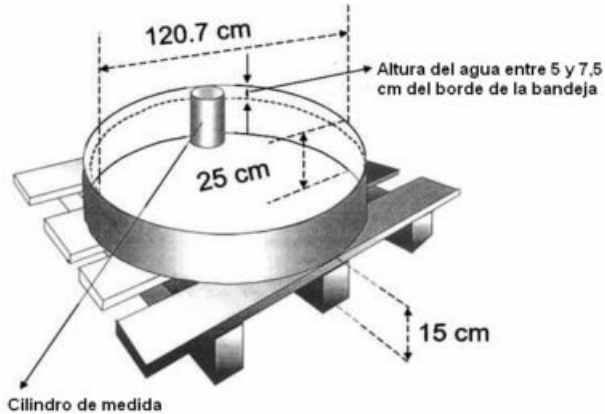


Figura 22. Bandeja de evaporación tipo A.

Las lecturas del agua evaporada deben realizarse diariamente como también del agua caída por precipitación. El control se realiza en un cilindro de alrededor de 10 cm. de diámetro y 20 cm. de altura situado cerca del borde de la bandeja. Este tiene un nivel que es una aguja metálica en posición vertical perpendicular a la base y ubicada en el centro del cilindro, que facilita la lectura de la bandeja cuando el agua enrasa en la punta de la



aguja. Además, el cilindro tiene un pequeño orificio en su base para mantener un equilibrio de niveles de agua.

La relación existente entre la evaporación de bandeja y la evapotranspiración de referencia es la siguiente:

$$ET_o = K_b \times EB \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración potencial o de referencia (mm/día).

EB : Evapotranspiración de bandeja (mm/día).

K_b : Coeficiente de bandeja (adimensional).

Los valores de K_b se presentan en el **Cuadro 11**, para diferentes condiciones de humedad relativa, velocidad del viento y ubicación de la bandeja.

Al seleccionar el valor apropiado de K_b para la bandeja de evaporación es necesario considerar la cobertura del terreno donde esta localizado la bandeja, la cobertura vegetal de los alrededores y las condiciones generales del viento y la humedad.

Cuando la bandeja se localiza en áreas pequeñas pero rodeadas de especies de mayor altura, maíz o frutales (2,5 o más metros) los coeficiente de bandeja deben incrementarse en un 30% para climas secos y ventosos, mientras que solo de un 5 a un 10% de incremento se requiere en áreas bajo condiciones de leve viento y humedad alta.



Cuadro 11. Coeficiente de bandeja tipo A, según localización y condiciones ambientales: humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s).

Velocidad del viento (m/s)	Bandeja ubicada sobre césped				Bandeja ubicada sobre suelo desnudo			
	Distancia respecto a un cultivo (m)	Humedad relativa (%)			Distancia respecto a suelo seco (m)	Humedad relativa (%)		
		Baja < 40	Media 40-70	Alta >70		Baja < 40	Media 40-70	Alta >70
Leve	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
Moderada	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
Fuerte	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,40	0,45	0,50	1000	0,40	0,45	0,55
Muy fuerte	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

Fuente: FAO. Riego y drenaje. Boletín N° 24.

9. DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA DE LOS CULTIVOS

Como ya lo hemos mencionado las necesidades de riego de los cultivos dependen fundamentalmente del clima, de las características del propio cultivo, del tipo de suelo y de la eficiencia del sistema de riego utilizado. La Organización de las Naciones Uni-



das para la Agricultura y la Alimentación (FAO) a partir de la década de los setenta desarrolló una metodología para la determinación de las necesidades hídricas y de riego de los cultivos que ha sido utilizada ampliamente en todo el mundo por especialistas de riego (Doorenbos y Pruitt, 1977, Allen *et al*, 1998). Según esta metodología, el cálculo de las necesidades de agua de riego de los cultivos se realiza en tres etapas principales:

9.1. Evapotranspiración de los cultivos (ET_c)

Los valores de ET_c constituyen las necesidades hídricas brutas de los cultivos para su desarrollo óptimo y representan la cantidad de agua que debe existir en la zona radical de un cultivo para satisfacer su demanda evaporativa. La ET_c de un cultivo se determina en función del clima, cuyo efecto se engloba en el concepto de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), y las características propias del cultivo, efecto que se engloba en el concepto de coeficiente de cultivo (K_c).

9.2. Demanda de agua neta de los cultivos (D_n)

Estas necesidades constituyen la cantidad de agua que se ha de suministrar a la zona radical del cultivo mediante el riego. Para calcular las D_n , se descuenta de la ET_c la cantidad de agua aportada por la precipitación efectiva (PE), que representa la fracción de la precipitación que contribuye a satisfacer la ET_c de un cultivo ($D_n = ET_c - PE$). Cuando se determina ET_c para un periodo sin precipitaciones entonces la D_n es igual a la ET_c .

9.3. Demanda de agua bruta de los cultivos (D_b)

Estas necesidades representan la cantidad de agua que el sistema de riego ha de proporcionar a nivel predial para que, tras des-



contarse las pérdidas de agua debido a la ineficiencia del sistema de riego (ningún sistema tiene una eficiencia del 100 %) la cantidad de agua que realmente se almacene en dicha zona radical sea igual a las D_b del cultivo. Finalmente la Demanda de agua bruta (D_b) se obtienen a partir de la siguiente relación:

$$D_b = \frac{D_n}{E_{fr}} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

D_b : Demanda de agua bruta (mm/día)

D_n : Demanda de agua neta (mm/día)

E_{fr} : Eficiencia de riego (%)

Ejemplo 2: Requerimiento hídrico del cultivo de frutilla

A continuación, se desarrolla un ejemplo utilizando la metodología antes descrita:

Se desea obtener la demanda de agua, expresada en litros por día, para cada metro de hilera plantada en el mes de enero, de una plantación de frutillas regada con cinta de riego. La plantación esta en camellones de 0,8 m de ancho con dos hileras de plantas por camellón distanciados a 1,2 m. Las hileras en el camellón están distanciadas a 30 cm. y las plantas a 20 cm. una de la otra. La plantación se encuentra ubicada en la comuna de Marchigue, zona de secano en la VI región.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) para el mes de enero en la costa de la VI región es de 5,12 mm/día. La frutilla en enero en dicha zona se encuentra en la fase 3 del cultivo, es decir le



corresponde un Coeficiente de Cultivo (K_c) de 0,7 (Cuadro 10). Con ambos datos obtenemos la Evapotranspiración del cultivo (ET_c), a partir de la ecuación 4, presentada en el punto 4, **Evapotranspiración de cultivo**, del presente capítulo:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

$$Et_c = 0,7 \times 5,12 = 3,6 \text{ mm / día}_o$$

Luego la demanda de agua neta (D_n) son equivalentes a la ET_o producto de que la precipitación efectiva (PE) según la zona y el mes es despreciable o cero.

Se asume una eficiencia de riego de 90% para cinta de riego, entonces:

$$Db = \frac{3,6}{90} \times 100 = 4,0 \text{ mm/día}$$

4 mm/día equivalen a 4 L/m²/día, asumiendo que en las dos hileras de frutillas en el camellón se tiene en un metro lineal un ancho ocupado por el cultivo de 60 cm (30 cm. entre hilera más 15 cm. en cada borde), por lo tanto la superficie utilizada en un metro lineal del cultivo es de 0,6 m² (0,6 m x 1 m).

Por lo tanto, el requerimiento diario de agua para dicha superficie durante el mes de enero es de:

$$4,0 \text{ litros/m}^2/\text{día} \times 0,6 \text{ m}^2 = 2,4 \text{ litros/día, en } 0,6 \text{ m}^2 \text{ de cultivo}$$

En 100 m lineales tenemos un requerimiento de 240 L. Como en una hectárea hay 83 camellones (100 m / 1,2 m entre camellones) la demanda del cultivo en una hectárea es de 19.920 litros/día.



Estas necesidades se calcularon a partir de datos meteorológicos e información de cultivos que representan a un año promedio. En consecuencia, las necesidades hídricas y de riego aquí calculadas representan así mismo las necesidades para un año promedio. En condiciones reales, por ejemplo en años particularmente secos y calurosos, estas necesidades deberían ajustarse de acuerdo con las características climáticas de dichos años.

La información presentada se debe considerar con precaución ya que la identificación de las distintas fases de desarrollo de los cultivos es muy subjetiva. Básicamente porque, existe una variabilidad amplia de las fechas de plantación y de madurez/cosecha para un mismo cultivo ya que dependen de la variedad del cultivo, de las prácticas de manejo realizadas por cada agricultor y de las condiciones climáticas de cada año. Asimismo, la variabilidad climática interanual puede conducir a una variación importante de la duración de las distintas fases del cultivo. En definitiva, los valores en las tablas recogen solo valores medios representativos de las prácticas culturales generales promedio de la región.