

V. Determinación de las necesidades de riego

La estimación de las necesidades de agua constituye un dato básico para el diseño de un proyecto de riego y la planificación de la estrategia de riego a fin de lograr rendimientos altos y estables, con la máxima calidad de producto cosechable, para lo cual se requiere satisfacer la máxima evapotranspiración del cultivo. Existen varias técnicas para estimar el manejo adecuado del agua en la agricultura siendo importante la programación del riego para conocer cómo y cuanto regar para lo cual es necesario conocer los diferentes factores que condicionan los procesos implicados.

V.1 Evapotranspiración

La mayor del agua aplicada a los cultivos para su desarrollo, es transferida a la atmósfera a través de sus tejidos y de la evaporación directa del suelo. A la combinación de los dos procesos se le llama evapotranspiración o uso consuntivo. Normalmente se mide en mm/día o mm/mes, y depende de la interacción entre factores climáticos, botánicos, edáficos y de manejo del cultivo. En un período de 24 horas la evapotranspiración varía de acuerdo a como se comportan los factores que influyen en ella.

La evapotranspiración es baja en los primeros estadios de la etapa de crecimiento de la planta; se incrementa a medida que la planta crece en altura, y en área foliar, hasta alcanzar un máximo en la etapa de fructificación y luego disminuye progresivamente hasta la etapa de cosecha.

El promedio de la evapotranspiración (ET), durante 7 a 10 días de máximo uso de agua en la estación de máximo crecimiento se denomina, "evapotranspiración máxima" (período PEAK). La importancia de este concepto radica, en que se refiere al valor que debe utilizarse en el diseño de cualquier sistema de riego. Se deduce por lo tanto, que la evapotranspiración del cultivo (ETc) varía fundamentalmente según el cultivo el clima. Para poder estimar las necesidades hídricas de los cultivos o evapotranspiración es necesario considerar el concepto de evo transpiración de referencia (ETr) y conocer los factores que la afectan y los métodos para estimarla.

La evapotranspiración de referencia, es un concepto establecido para indicar la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera de un suelo permanentemente húmedo, cubierto por un cultivo de referencia. Se ha utilizado como cultivo de referencia la alfalfa o un pasto bien regado, en pleno desarrollo y buenas condiciones fitosanitarias.

Como la mayor parte de los cultivos cubren totalmente el suelo en cierto periodo de su desarrollo, y el suelo solo en ocasiones está permanentemente húmedo, tal concepto es hipotético y como su nombre lo indica sirve de referencia para la evaluación de lo que realmente ocurre.

De acuerdo con lo anterior, la evapotranspiración de referencia depende de las condiciones del medio ambiente y se requieren registros climatológicos.

V.1.1 Factores que afectan la evapotranspiración

Al considerar la evapotranspiración a la evaporación en superficies cubiertas de vegetales junto con la transpiración de estos vegetales se tiene:

La evaporación del agua por las plantas se debe a la necesidad de agua que tienen las plantas para incorporarla a su estructura celular, además de utilizarla como elemento de transporte de alimentos y de eliminación de residuos. La circulación del agua en la planta no es un circuito cerrado, sino que por el contrario es una circulación abierta. El agua penetra por la raíz, circula por la planta y gran parte de ella se evapora por las hojas.

La transpiración depende de los siguientes factores:

- Tipo de planta;
- Ciclo de crecimiento de la planta (inicial, vegetativo, medio, maduro);
- Tipo de suelo y humedad del suelo;
- Insolación, viento, humedad de la atmósfera, etc.

Existe una diferencia entre la cantidad de agua que la planta puede absorber del suelo Q_p y la cantidad de agua Q_l que la planta transpira.

Q_p depende del tipo de suelo, de las condiciones de humedad, así como del tipo y situación de la planta; mientras que Q_l depende de las condiciones de insolación, humedad y viento, así como de las características de la propia planta.

Si $Q_l > Q_p$, la planta se marchita o tiene que variar sus condiciones de desarrollo. Si $Q_l \approx Q_p$, la planta tiene suficiente circulación de agua y se desarrolla satisfactoriamente. Por último, los excesos de circulación de agua con $Q_l \ll Q_p$, pueden producir fenómenos contrarios al desarrollo.

V.1.2 Métodos para estimar la evapotranspiración

Formulas matemáticas (Thornthwaite – 1948, Penman – 1948, Hargreaves – 1956, Jensen y Haise – 1963, Turc – 1954, etc.) o la evaporación directa del Tanque clase A, permiten estimar la evaporación potencial (ETp), mediante la cual es posible aproximarse a la estimación correcta de la evaporación máxima del cultivo (ETc máxima), para una condición edáfica y climática determinada, en función de la magnitud del área foliar evapotranspirante. El volumen efectivo de agua evapotranspirada hacia la atmósfera por el cultivo se denomina Evapotranspiración real (ETr) o evapotranspiración del cultivo (ETc) y su magnitud está determinada por las características del sistema integrado suelo – planta – atmósfera, así como, por la disponibilidad efectiva de agua en el perfil del suelo (agronomía del riego).

La absorción de agua por las plantas se produce en respuesta a gradientes de energía entre el suelo, la planta y la atmósfera. Esta gradiente, es función del nivel de humedad en el suelo y de la intensidad de la demanda atmosférica (poder evaporante). El agua fluye a través de la planta en estado líquido, desde el suelo a las hojas, evaporándose en las cavidades sub- estomáticas y es liberada a través de los estomas hacia la atmósfera en forma de vapor de agua.

La transpiración ocurre principalmente a través de estomas de las hojas. La apertura estomática, está regulada por factores ambientales, principalmente luz, déficit de presión de vapor entre la hoja y la atmósfera y temperatura ambiental y, por la concentración salina interna a nivel de vacuola de las células.

El cierre estomático está influenciado por el bajo contenido de humedad del suelo (bajos potenciales de agua del suelo) y puede ocurrir, aún durante el día, como consecuencia de un severo déficit hídrico.

Una deshidratación moderada de los tejidos, sin que el cierre de estomas se produzca, es requisito indispensable para mantener el flujo de agua desde el suelo a las raíces, y a través de los vasos xilemáticos, a las hojas y posteriormente a la atmósfera. Sin embargo, la disminución de la disponibilidad de agua del suelo, hasta un valor crítico (para la mayoría de las especies cultivadas, este valor se presenta a tensiones de humedad por encima de 4 bars), reducirá la velocidad de flujo de agua a las raíces, hasta un nivel que no pueda sustentar la demanda evaporativa de la atmósfera, ocurriendo el cierre de estomas, proceso indispensable para el mantenimiento de la economía hídrica de la planta, a niveles que no alteren su crecimiento y desarrollo .

El manejo agronómico del riego tiene como principal objetivo, la reposición exacta del agua y su almacenamiento en la zona de raíces, agua que ha sido consumida por efecto del poder evaporante de la atmósfera, entre dos eventos consecutivos de riego, evitando así condiciones de disponibilidad hídrica restringida. Así, si la ET real (para un cultivo dado, es el producto de una determinada condición suelo – clima y de su área foliar efectiva) está en equilibrio dinámico con la velocidad de aporte de agua (equilibrio que rara vez se presenta en campo), la tecnología de riego habrá logrado un régimen óptimo, estableciendo frecuencias y tiempos de riego que eviten que el agua no sea el factor limitante de la producción de plantas. Actualmente existen muchas fórmulas a través de las cuales se puede estimar la evapotranspiración potencial. Todas ellas requieren de información climática y de cálculos más o menos complicados. Un método con el cual se está obteniendo resultados excepcionales, es el de relacionar la ET del cultivo con la evaporación de una superficie libre de agua en el tanque de evaporación tipo A.

El tanque de evaporación clase A es un estanque circular de 121 cm. de diámetro y 25.5 cm. de profundidad.

El material utilizado para su confección es hierro galvanizado de 0.8 mm de espesor. Está montado sobre un marco de madera de 15 cm. de altura sobre la superficie del suelo. Una vez instalado el marco, debe rellenarse con tierra, de manera tal que quede un espacio de aire de 5 cm. entre la base del tanque y el terreno levantado. El tanque debe quedar bien nivelado y debe llenarse con agua hasta una altura de 5 cm., Del borde superior y no debe permitirse que su nivel disminuya más allá de 7.5 cm. del borde. Ello implica que la altura de agua no debe variar más allá de 2.5 cm., lo que significa que durante los días de intenso calor, éste debe ser llenado muy frecuentemente. A su vez, el agua debe ser renovada con regularidad con el objeto de eliminar la turbidez. Estos aparatos deben pintarse anualmente con pintura de aluminio. El lugar en que se instale debe estar rodeado de pasto corto hasta un radio de 50 m. El método del tanque de evaporación tiene la ventaja de ser un excelente integrador de los parámetros climáticos: temperatura, humedad relativa, radiación, vientos, etc.

Fig. 36. Relaciones entre la Evapotranspiración Potencial, Evapotranspiración de Referencia y la Evaporación del Tanque clase A

- LA **EVAPOTRANSPIRACIÓN** ES LA CANTIDAD DE AGUA TRANSPIRADA POR EL CULTIVO Y EVAPORADA DESDE LA SUPERFICIE DEL SUELO EN UN ÁREA CULTIVADA. CONSTITUYE EL **USO CONSUNTIVO** DE AGUA POR LAS PLANTAS Y ES EL FACTOR BÁSICO PARA DETERMINAR EL REQUERIMIENTO DE AGUA DEL CULTIVO Y ES EL PRINCIPAL FACTOR LIMITANTE DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA.
- LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEPENDE DE LA INTERACCIÓN DE FACTORES CLIMÁTICOS, BOTÁNICOS, EDÁFICOS Y CULTURALES. ES BAJA AL INICIO DEL CRECIMIENTO, AUMENTA A MEDIDA QUE EL CULTIVO INCREMENTA MATERIA SECA Y ÁREA FOLIAR, ES MÁXIMA EN EL PERÍODO DE FRUCTIFICACIÓN Y DISMINUYE POSTERIORMENTE, AL FINAL DEL CICLO DE CRECIMIENTO.
- LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ES VARIABLE FUNDAMENTAL EN ESTUDIOS DE ECONOMÍA DE AGUA Y BALANCE HÍDRICO PARA UNA REGIÓN DETERMINADA Y UN MOMENTO DADO.
- LA FALTA ABSOLUTA DE MEDICIONES DE ESTE TÉRMINO OBLIGA A ESTIMACIONES A PARTIR DE DATOS DEL TANQUE DE EVAPORACIÓN Tipo A o MODELOS MATEMÁTICOS QUE TOMEN EN CUENTA EL **FACTOR AERODINÁMICO** (Humedad Atmosférica y Viento) Y EL **FACTOR ENERGÉTICO** (Temperatura, Horas Sol, Radiación Solar), QUE GOBIERNAN EL PROCESO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN.
- CINCO FORMULAS MATEMÁTICAMENTE PRECISAS ESTIMAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN: **THORNTHWAITE** (EEUU - 1948), **PENMAN** (REINO UNIDO - 1948), **HARGREAVES** (EEUU - 1956), **JENSEN y HAISE** (EEUU - 1963) y **TURC** (FRANCIA - 1954).

EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (Etp)
EVAPORACION Y TRANSPIRACION DE UN CAMPO CULTIVADO CON COBERTURA TOTAL Y SIN LIMITACIONES DE HUMEDAD, LO CUAL AISLA LOS FACTORES CLIMATOLÓGICOS DE TODOS LOS DEMAS QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACION.

EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA (Eto)
EVAPORACION Y TRANSPIRACION DE UN CAMPO CON UN CULTIVO DEREFERENCIA (generalmente alfalfa) DE PORTE BAJO (10-30 cm), CON COBERTURA TOTAL Y SIEMPRE BIEN ABASTECIDO DE AGUA.

EVAPORACION DEL TANQUE TIPO A (Eo)
EVAPORACION DE UNA SUPERFICIE LIBRE DE AGUA, INTEGRADOR DE LOS PARAMETROS CLIMÁTICOS, DE EXCELENTE CORRELACION CON LA ET POTENCIAL O DE REFERENCIA.

Etp ≅ Eto ≅ Eo



Se puede calcular la evapotranspiración de un cultivo a partir de datos climáticos, integrando además los factores de resistencia propios de cada cultivo.

La FAO en su estudio de Riego y Drenaje No 56, recomienda el método de PenmanMonteith para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_r), a partir de datos climatológicos, temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento además de la localización del sitio.

Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos sembrados y la evapotranspiración de referencia, pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo (K_c) o separadas en dos coeficientes: un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e).

De acuerdo con lo anterior se tiene:

$$K_c = K_{cb} + K_e.$$

El procedimiento a seguir dependerá del propósito de los cálculos, la exactitud requerida y la información disponible.

Enfoque del coeficiente del cultivo

De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_r y el

Coeficiente del cultivo K_c:

$$ET_c = K_c \times ET_r$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo [mm d⁻¹]

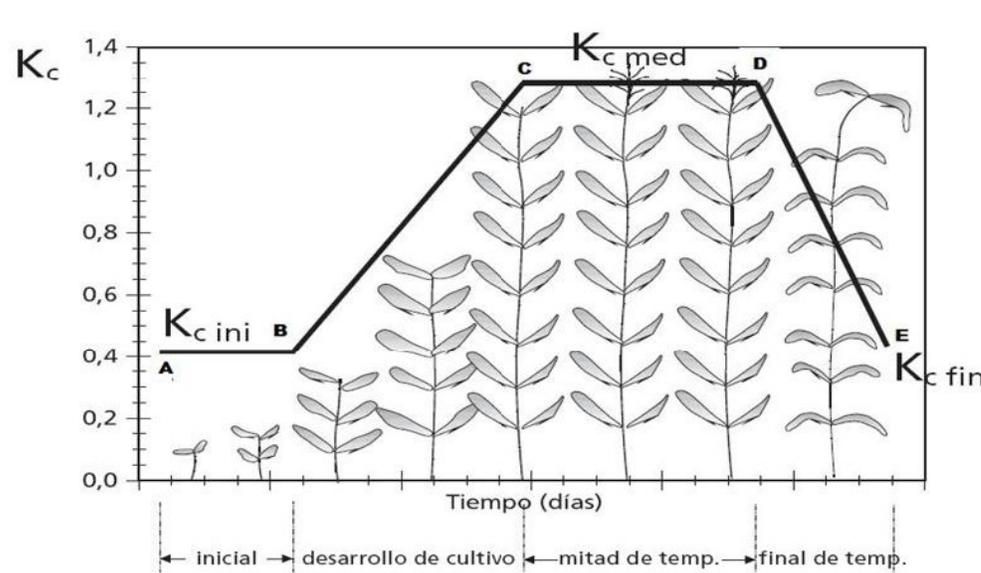
K_c = Coeficiente del cultivo [adimensional]

ET_r = Evapotranspiración de referencia [mm d⁻¹]

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo estas condiciones supone que no existen limitaciones de ningún tipo en el desarrollo de los mismos. Que no existe ninguna limitación debida a estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad.

Debido a las variaciones en las características propias del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha. En la siguiente figura se presenta en forma esquemática, dichos cambios.

Fig. 37. Curva generalizada de Coeficiente de Cultivo K_c , fuente: Estudios FAO Riego y Drenaje 56



Los efectos combinados, tanto de la transpiración del cultivo, como de la evaporación del suelo se integran en este coeficiente único del cultivo. Así El coeficiente K_c incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo, constituyendo una excelente herramienta para la planificación del riego y la programación de calendarios básicos de riego en periodos mayores a un día.

El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo, entonces sería el siguiente:

1. Identificar las etapas de desarrollo del cultivo, determinando la duración de cada etapa y seleccionando los valores correspondientes de K_c .
2. Ajustar los valores de K_c seleccionados según la frecuencia de riego o las condiciones climáticas durante cada etapa.
3. Construir la curva del coeficiente del cultivo (permite la determinación de K_c para cualquier etapa durante su período de desarrollo).

4. Calcular ETc como el producto de ETp y Kc.

V.2 Precipitación efectiva

No toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede realmente ser utilizada por las plantas. Parte del agua de lluvia se infiltra a través de la superficie y parte fluye sobre el suelo en forma de escorrentía superficial. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo. Del total del agua que se infiltra, parte percola por debajo de la zona de raíces, mientras que el resto permanece almacenado en dicha zona y podría ser utilizada por las plantas.

El agua de lluvia evaporada, la de percolación profunda y la de escorrentía superficial no pueden ser utilizadas por el cultivo, o sea no son efectivas. A la porción restante, almacenada en la zona de raíces se le denomina precipitación efectiva.

En otras palabras, el término "precipitación efectiva" es utilizado para definir esa fracción de la lluvia que estará realmente disponible para satisfacer al menos parte de las necesidades de agua de las plantas. Este parámetro puede determinarse por experimentos o se estima por medio de ecuaciones empíricas (FAO, 1993), que para áreas con pendientes inferiores al 4-5% se tiene:

$$Pe = 0.8 \times PP - 25 \text{ si } PP > 75 \text{ mm/mes}$$

$$Pe = 0.6 \times PP - 10 \text{ si } PP < 75 \text{ mm/mes}$$

V.3 Requerimiento de riego

El requerimiento de riego, será el valor que nos indique la cantidad de agua que habrá que aplicarse a un cultivo, tomando en cuenta la evapotranspiración, una cantidad adicional de agua para lavado de sales y la precipitación del lugar.

Una vez calculada la evapotranspiración, se puede calcular el requerimiento de riego. Este se calcula con la siguiente ecuación:

$$Rr = Et + Rl - Pe$$

Donde:

Rr = requerimiento de riego (cm.)

Et = evapotranspiración (cm.)

Rl = requerimiento de lavado (cm.)

Pe = precipitación efectiva (cm.)

Cuando no existen sales, entonces:

$$Rr = Et - Pe$$

Considerando la precipitación efectiva, el requerimiento de riego puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$Rr = Et \left(1 - \frac{I}{1.53 + \frac{0.8 Et}{P}} \right)$$

Donde:

P = precipitación (cm.)

V.4 Intervalo y calendario de riego

El intervalo de riego se define como el número de días entre dos riegos consecutivos. Está determinado por los siguientes factores

- Suelo: Las características físicas de un suelo determinan la capacidad de almacenamiento de agua del mismo.
- Cultivo: La respuesta fisiológica de los cultivos al abatimiento de la reserva de humedad disponible en el suelo es diferente para cada cultivo

El calendario de riego, será útil para determinar cuando menos los siguientes puntos:

- N° de riegos por aplicar al cultivo
- Intervalos entre riegos
- Láminas de requerimiento de riego
- Láminas netas de riego

La metodología para la programación de riegos (PR), tradicionalmente se agrupa en cuatro bloques:

1. Comprende los que se basan únicamente en el conocimiento del estado hídrico del suelo, apoyándose en el conocimiento del potencial hídrico (tensiómetros, resistencias) y el contenido de agua mediante sonda de neutrones muestreo gravimétrico o mediciones de la constante dieléctrica.
2. Basado en el conocimiento hídrico del cultivo ya que este refleja el balance entre factores de oferta (profundidad y densidad radicular, contenido de agua en el suelo) y demanda de agua por las condiciones atmosféricas. Entre estos métodos, se incluyen los que miden el potencial hídrico de la hoja (con la bomba de presión), los que miden la temperatura de la cubierta vegetal (con sensores de radiación infrarroja), el empleo de sistemas visuales de estrés hídrico (color de las hojas, enrollamiento foliar, cambio de orientación de las hojas, etc.), los que miden la resistencia estomática.
3. Los métodos que utilizan distintos modelos de balance de agua en el suelo.
4. Los métodos mixtos, que combinan distintas técnicas

V.5 Determinación del gasto de diseño.

Para elegir el tamaño de los componentes del sistema de riego, se requiere conocer la capacidad del suministro del caudal al sistema y cumplir con las demandas críticas del cultivo. En esta etapa es importante tener una buena aproximación de los máximos requerimientos de riego de los cultivos. Si no se tienen registros climáticos confiables se puede sobrestimar o subestimar la capacidad del sistema, resultando en pérdidas económicas por un sobre dimensionamiento del sistema o por no suministrar los requerimientos hídricos de los cultivos durante la etapa fonológica crítica.

Uno de los métodos tradicionales para la programación de riegos es el balance hídrico.

El balance hídrico funciona como una contabilidad de agua que registra las entradas y salidas de agua

pronosticando así la cantidad de agua presente en el suelo en un momento determinado. En consecuencia, el Balance Hídrico nos indica cuando el suelo llega al nivel de humedad que se ha definido como el punto crítico en el cual es necesario regar, para evitar que la planta reduzca su tasa de producción de biomasa.

La ventaja de usar el Balance Hídrico para programar los riegos es que se mejora la precisión del cálculo que se realiza para determinar el requerimiento de agua sin necesidad de hacer mediciones frecuentes en el campo. Se gana precisión porque para su cálculo se consideran el tipo de suelo, el clima que son los factores que más influyen en el consumo de agua del cultivo.

En cualquier ecosistema, el balance hídrico se puede determinar calculando los cambios en entradas, salidas y almacenamiento de agua que ocurren en el suelo. Los flujos de entrada más importante son el riego y las lluvias; y el mayor flujo de salida es la evapotranspiración (ET), que está compuesta por la evaporación de agua directa desde la superficie del suelo y la transpiración que ocurre desde el follaje del cultivo. También pueden ocurrir flujos de entrada por ascenso capilar del agua freática hacia la zona de absorción radicular. El exceso de agua que el suelo no es capaz de almacenar sale del sistema por medio de la escorrentía superficial y de la precolación a estratos de suelo más profundos. El balance hídrico, que implica la determinación de todas las entradas y salidas del agua se puede expresar como:

$$ET = P + R + Ac + ES - D - DHS$$

Donde

P es la precipitación acumulada en el intervalo de tiempo considerado (hora, día, semana, decena, mes) en la superficie en estudio

R es igual al agua de riego aplicada

Ac es el aporte de agua desde la capa freática por ascensión capilar de la zona subyacente a la explorada por el sistema radicular activo

ES corresponde al aporte (+) o pérdida (-) lateral de agua de escorrentía en la superficie del terreno

D es el flujo vertical de agua en profundidad fuera del volumen del suelo explorado por el sistema radicular activo

DHS es la variación del agua almacenada en el suelo para el tramo del perfil del suelo donde se encuentra el sistema radicular activo.

Para implementar el balance hídrico se necesita conocer la capacidad de campo del suelo (CC), el punto de marchitamiento permanente (PMP), el máximo descenso de humedad de suelo permitido (punto crítico de humedad), la evapo-transpiración (ET) y el coeficiente de consumo del cultivo (K).

La CC es la cantidad de agua que un suelo puede retener después de que la gravedad ha terminado de drenar el agua del suelo, lo cual ocurre usualmente 1 a 2 días después de una lluvia o riego que saturan el suelo. La CC de un suelo es una característica que debe ser medida en el campo si se quiere asegurar que se está utilizando el valor correcto en el Balance Hídrico.

Para poder satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, un sistema de riego debe proveer el caudal necesario conocido como capacidad del sistema expresado por la ecuación

$$Q_s = \left(\frac{RRDD}{E_a} \right) A$$

Donde RRDD son los requerimientos de riego de diseño diarios (L/T), A es el área dominada por el sistema de riego, E_a es la eficiencia de aplicación en fracción decimal, la cantidad de agua que no se almacena en la zona objetivo, usualmente la zona de raíces, con respecto a la cantidad que sale del punto pivote.

Para una sección circular, la ecuación anterior tiene la forma siguiente:

$$Q_s = \left(\frac{RRDD}{E_a} \right) \pi R^2$$

Donde R es el radio efectivo o hidráulico del sistema de riego

