

# **Hidrología agrícola**

**Análisis de los componentes del ciclo hidrológico. Aplicación de metodologías para la medición y estimación de la precipitación efectiva y la evapotranspiración.**

**Curso de Diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas de riego de espacios verdes: parques, jardines, áreas deportivas y recreativas.**

## Ciclo hidrológico

El recurso agua es el más básico y elemental de todos los recursos que el hombre dispone. Este recurso, que es de los típicamente considerados renovables, es alterado en su calidad y distribución espacial y temporal por el uso indiscriminado que el hombre hace del mismo. Además, el agua no es un recurso aislado, sino que se encuentra en un delicado equilibrio con otros recursos: suelo, vegetación y atmósfera, lo que determina que cualquier modificación de uno de ellos, repercutirá en los demás. Este conjunto de recursos constituye el medio ambiente que hace posible la vida humana, por lo que su conservación es una necesidad vital.

Por esto, el uso del recurso agua deberá ser racionalmente planificado, lo cual implica el cumplimiento de los siguientes pasos:

1. Análisis e interpretación del funcionamiento del **ciclo hidrológico**. Para ello se aplican técnicas y metodologías de análisis sobre la base de los datos suministrados por los sistemas de información hídrica (precipitación, escorrentía, caudales, parámetros de los acuíferos, etc.)
2. Evaluación de los recursos hídricos: es conveniente realizarla a diferentes escalas.
3. Selección de alternativas: a los efectos de planificar el uso del recurso.
4. Elaboración de proyectos de aprovechamiento hídrico.

A los fines prácticos el área física donde se estudia el ciclo hidrológico es la cuenca. Se entiende por **cuenca hidrográfica** de un curso de agua (en un determinado punto de dicho curso) al área delimitada topográficamente en la cual la lluvia caída es conducida, por escurrimiento superficial, por escurrimiento subterráneo o a través de afluentes, al punto del curso considerado.

### **Esquemas del tipo diagrama de bloque aplicados al ciclo hidrológico**

Se trata de representar las relaciones funcionales más importantes, partiendo de las siguientes hipótesis:

- Se dispone de un medio físico representado por una cuenca con sus características de vegetación, suelo y subsuelo.
- Sobre ese mismo sistema físico actúan los fenómenos atmosféricos representados por el aporte de las precipitaciones y por la demanda de vapor de agua de la atmósfera.

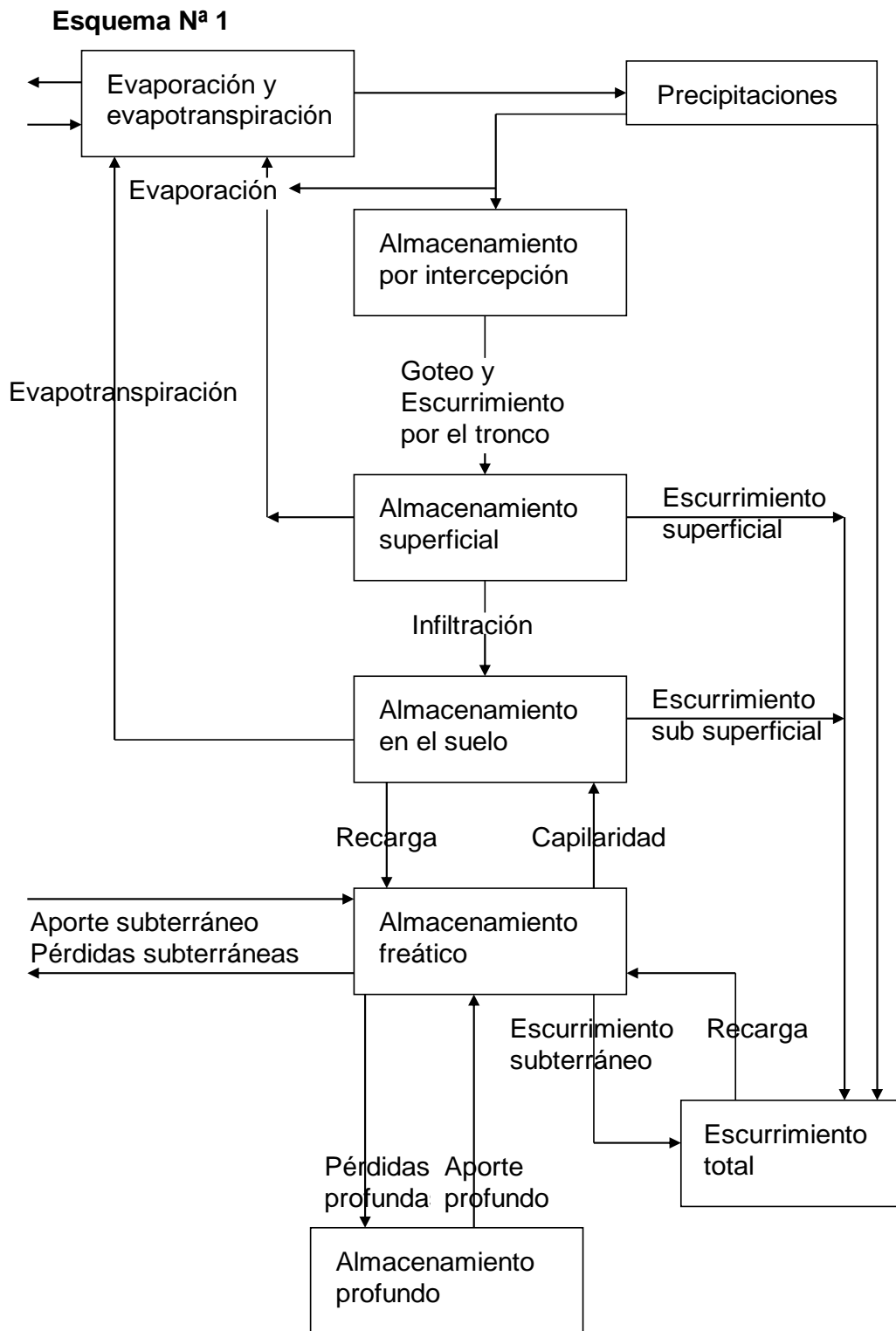
- El sistema físico reacciona ante la acción de los fenómenos atmosféricos produciendo cambios internos, representados por distintas formas de **almacenamiento** y **transporte** de agua, dando como resultado salidas del sistema representadas por el **escurrimiento** y pérdidas hacia la atmósfera en forma de **vapor de agua**.
- Sobre la cuenca pueden actuar aportes de agua provenientes de otras cuencas y puede, a su vez, haber pérdidas hacia otras cuencas. En este último caso se trata de un sistema hidrológicamente no aislado, lo cual constituye la situación más frecuente.
- Los efectos de almacenamiento y transporte que se producen en el sistema físico, se representan por un desarrollo vertical de diferentes niveles de almacenamiento con la comunicación entre los mismos. Si bien su validez es puntual, las consideraciones que se plantean pueden extenderse aéreamente.

Según esas consideraciones se describen los fenómenos que actúan en el ciclo y que figuran en el **Esquema N° 1**.

El fenómeno de precipitación es la variable de entrada principal al sistema físico. Se entiende por tal al agua caída en sus diferentes formas: lluvia, nieve, etc. La energía térmica y la gravitación son las fuerzas motrices del ciclo. De la cantidad total de agua que precipita, una parte se evapora directamente en la atmósfera. Esta proporción puede ser importante en condiciones de elevada demanda atmosférica.

Si existe cobertura vegetal, esta constituye el **primer nivel de almacenamiento** que se denomina **intercepción**. Está constituida por la cantidad de agua que la vegetación puede tener inicialmente. Se caracteriza por ser un almacenamiento de funcionamiento transitorio, durante el tiempo de precipitación y hasta un breve tiempo posterior a la misma.

Parte del agua que inicialmente es retenida por la vegetación, escurre por las ramas y el tronco o gotea desde las hojas llegando finalmente al suelo. La diferencia entre el volumen de agua retenido y el que, por escurrimiento y goteo, llega al suelo se denomina **intercepción efectiva**. Corresponde a la cantidad de agua que evapora directamente desde la cubierta vegetal. El agua llega al suelo desde la cubierta vegetal o directamente de la precipitación.



En la superficie del suelo se encuentra el **segundo nivel de almacenamiento**, que es el **almacenamiento superficial**. Comprende el agua que se acumula sobre el terreno

hasta conseguir un tirante hidráulico suficiente para vencer los efectos de rugosidad y poder escurrir en forma de lámina (componente transitoria). También comprende aquellos volúmenes que quedan retenidos en las cavidades y hondonadas del terreno sin poder escurrir (componente medianamente permanente). La lámina que escurre se denomina **escurrimiento superficial**. Desde el almacenamiento por intercepción y desde el almacenamiento superficial, se produce evaporación.

La superficie del terreno se comporta como un tamiz de malla variable, según el tipo y manejo del mismo y de su cubierta vegetal. Por lo tanto, la velocidad con que ingresa el agua al interior del suelo, dependerá de ese “tamiz”. Se denomina **infiltración** a la velocidad con que ingresa el agua en el interior del suelo. El almacenamiento superficial se forma cuando la intensidad de la precipitación supera la velocidad de infiltración.

El agua infiltrada alimenta el **tercer nivel de almacenamiento**: el **almacenamiento del suelo**, que es altamente complejo pero de fundamental importancia para el riego. Desde este nivel de almacenamiento se producen pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo y pérdidas por transpiración a través de los estomas de las plantas, constituyendo la **evapotranspiración**.

Durante una lluvia, el agua que ingresa a poca profundidad puede encontrarse con capas de suelo de menor permeabilidad y dar lugar a la formación de una lámina de detención, que a su vez da lugar al denominado **escurrimiento subsuperficial**. Se produce en general en forma paralela a la superficie del terreno y se caracteriza por tener una velocidad de avance menor a la del escurrimiento superficial. El escurrimiento subsuperficial, junto con el escurrimiento superficial, constituyen el **escurrimiento directo**.

El agua que ha ingresado al perfil del suelo va humedeciéndolo y desplazándose hacia abajo, fenómeno que se denomina avance del frente de humedad. Cuando el frente de humedad se encuentra con una capa de permeabilidad muy reducida puede desarrollar una zona saturada que constituye un **cuarto nivel de almacenamiento: almacenamiento freático**. El pasaje del agua desde el almacenamiento en el suelo al almacenamiento freático, se denomina **percolación**.

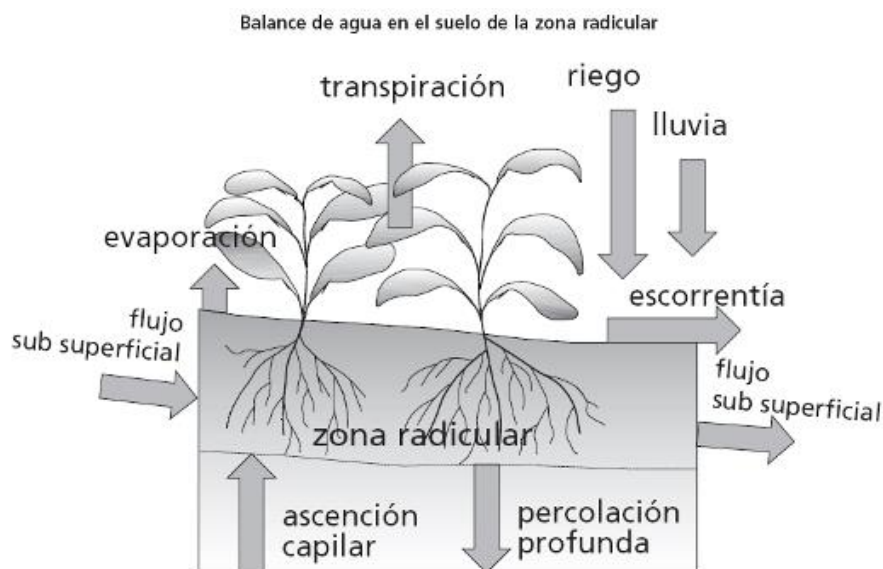
El agua del almacenamiento freático puede ascender al almacenamiento del suelo por **capilaridad**. Estas relaciones en períodos de humedecimiento y desecamiento, que vinculan el nivel de almacenamiento de agua en el suelo con el nivel de almacenamiento freático, están fuertemente condicionadas por la profundidad a la cual se encuentra este

último. Un nivel freático cercano a la superficie y otro muy profundo caracterizan sistemas de funcionamiento totalmente distintos.

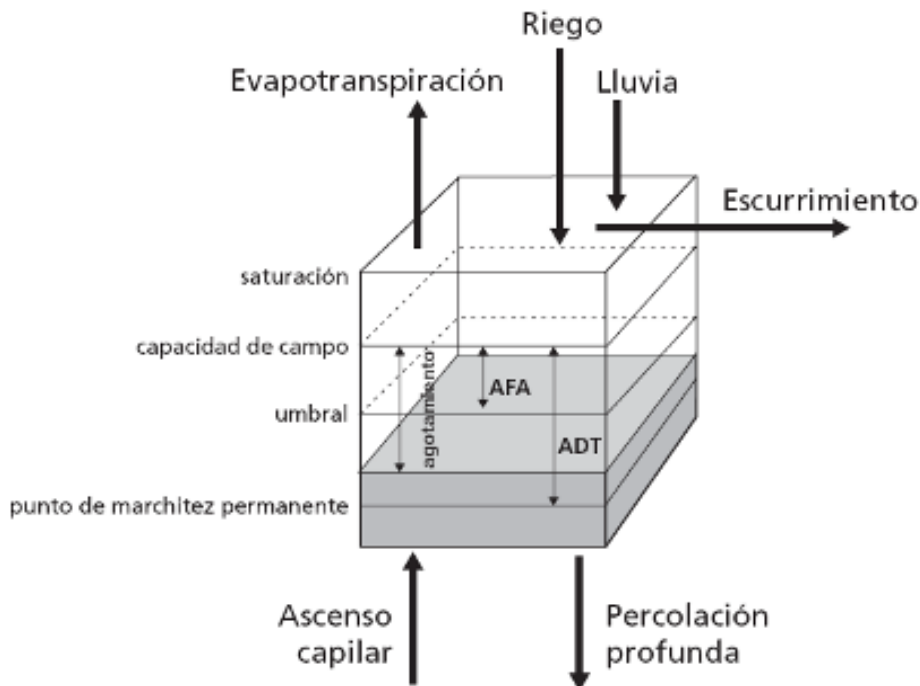
El agua que se acumula en el almacenamiento freático tiene un movimiento regido por las leyes del escurrimiento en medios porosos saturados. En una cuenca hidrológicamente aislada, cuando el nivel freático intercepta a los cauces que conforman la red de escurrimiento, descarga en ellos proporcionando lo que se denomina **escurrimiento de base** o **subterráneo**, que sumándose al escurrimiento directo, dan por resultado el **escurrimiento total** que transporta ese cauce.

Estos escurrimientos tienen diferentes velocidades y diferentes tiempos de aportes a un cauce. Generalmente el escurrimiento directo proporciona los caudales de agua más importantes que conforman una crecida debida a una lluvia, mientras que el escurrimiento de base proporciona los caudales que escurren en períodos no lluviosos. El derrame total de un curso en un momento determinado puede estar constituido por aporte directo, aporte de base o por ambos a la vez.

En una cuenca hidrológicamente no aislada, puede haber aportes o pérdidas subterráneas, esporádicas o permanentes. Estos mecanismos de transporte se pueden dar con otras cuencas o en profundidad. En este último caso, se está en presencia de niveles de almacenamiento profundo en general de características más o menos confinadas.



### Balance de agua en la zona radicular



### Balances hidrológicos

En el ciclo hidrológico, existe un equilibrio entre las entradas, las salidas y las variantes del sistema considerado. Las relaciones cuantitativas que se establecen para representar a este equilibrio son los **balances hidrológicos**.

Para establecer un balance hidrológico hay que considerar el sistema o la parte del mismo donde se realiza el balance y el intervalo de tiempo que se considera.

En el caso especial de riego, es necesario hacer un balance donde se considere no sólo las condiciones reales de evapotranspiración, sino la óptima para un cultivo dado. En ese caso deberá regarse en aquellos períodos en que la precipitación efectiva no alcance a cubrir la evapotranspiración del cultivo.

**Métodos de balance hídrico del suelo:** se aplica a diferentes escalas de tiempo y espacio, para estudios a nivel climático o nivel agronómico para programas de riego, que son el objeto de nuestro estudio.

Los balances hídricos del suelo serán equilibrados y precisos en función de la rigurosidad y exactitud en que puedan medirse las variables cuya suma algebraica permiten obtener la Et, de acuerdo a:

$$Et = P + Ac - D \pm Hs \pm Es$$

Donde:

Et = evapotranspiración durante un periodo de tiempo

P = precipitaciones acumuladas en un periodo de tiempo

Ac = aporte capilar de agua en el periodo de tiempo

Es = entradas y salidas de agua laterales por escorrentía superficial

D = drenaje o flujo vertical de agua en profundidad, fuera de la rizósfera.

Hs = contenido hídrico del suelo

Las mediciones de las variables Hs, Ac y D, requieren instrumental para caracterizar potenciales de agua del suelo.

### **Precipitación**

El cómputo de la variable precipitación es el insumo fundamental para la formulación del balance hidrológico y una de las variables más importantes para la resolución de problemas hidrológicos. La medición de la precipitación se realiza en su estado líquido o lluvia (por medio de pluviómetros o de pluviógrafos). Para el caso de precipitación nival se utilizan nivómetros o totalizadores. Todos los cálculos en los cuales participa la variable, suelen realizarse considerando los volúmenes precipitados o más frecuentemente la altura media de una lámina hipotética de agua precipitada.

En el primer caso, participa el área en cuestión como factor de cómputo; en el segundo, se considera que toda la lluvia caída en la cuenca, se acumula en una figura de la misma área que la cuenca pero de fondo horizontal, no existiendo pérdidas por evaporación, infiltración o escurrimiento.

Se emplean básicamente tres métodos para calcular dicha altura, los cuales se desarrollan a continuación mediante un ejemplo gráfico analítico en el cual se muestra una cuenca tipo y una serie de pluviómetros. Los métodos son: **Media aritmética,**



**métodos de las isohietas y método de Thiessen.** Los datos de la cuenca son los siguientes:

Estación	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Prec. (mm)	886	891	875	809	804	787	713	763	664	624	556	503	443	420	361	303

### **Solo veremos el desarrollo de la Media aritmética**

Se trata simplemente de hallar la media de los valores de precipitación (en mm) entre aquellas estaciones pluviométricas incluidas en la cuenca.

$$\text{Precipitación media} = \frac{\sum \text{Precipitaciones}}{\text{Número de estaciones}}$$

Es el método más simple, pero solamente debe ser utilizado en condiciones de clima homogéneo y topografía llana, sin accidentes orográficos que introduzcan diferencias marcadas en la distribución areal de los valores.

$$\text{Precipitación media} = \frac{\sum \text{Precipitaciones}}{\text{Número de estaciones}} = \frac{10.402\text{mm}}{16} = 650 \text{ mm}$$

### **Precipitación efectiva**

La precipitación que recibe un suelo infiltrará en mayor o menor proporción de acuerdo con una serie de factores entre los que figuran: la pendiente, la vegetación que lo cubre, la textura, el contenido de humedad de las capas superficiales, la intensidad y cantidad de agua caída, etc. Los métodos para estimar la cantidad de agua que se añade al almacenaje de un suelo con cada precipitación son muchos y cada uno de ellos toma sólo algunos de los factores mencionados, por lo que sus resultados suelen ser dispares.

La utilización de uno u otro método queda a elección del técnico, de acuerdo con los datos que se posean de la zona en estudio, o a la mayor o menor confiabilidad que le merezcan los mismos. También puede realizarse el cálculo por distintos métodos y tomar luego el promedio de los resultados obtenidos. Cabe aclarar en el riego de espacios verdes, este concepto es poco tenido en cuenta salvo excepciones como canchas de golf o estadios importantes. Mocionaremos algunos métodos, pero solo desarrollaremos uno.

### Método del U.S. Bureau of Reclamation

Es un método descrito por Stamm (1967), se recomienda para las regiones áridas y semiáridas y utiliza la precipitación estacional media de los cinco años consecutivos más secos. El único factor que toma en cuenta es la cantidad de agua caída. A tal efecto los mm de precipitación real se expresan en una escala creciente de 25 en 25 mm. (**Columna 1**) A cada incremento de 25 mm se le otorga un coeficiente de aprovechamiento decreciente. (**Columna 2**). De esa manera queda confeccionado el siguiente cuadro:

<b>Columna 1</b> Rango de precipitación (mm)	<b>Columna 2</b> Porcentaje de efectividad	Precipitación efectiva (mm) (acumulado anterior + incremento efectivo)
0 – 25	90	$25 \times 0,9 = 22,5$
> 25 – 50	85	$22,5 + 25 \times 0,85 = 43,75$
> 50 – 75	75	$43,75 + 25 \times 0,75 = 62,5$
> 75 – 100	50	$62,5 + 25 \times 0,50 = 75,0$
> 100 – 125	30	$75,0 + 25 \times 0,30 = 82,5$
> 125 – 150	10	$82,5 + 25 \times 0,10 = 85,0$
> 150	0	$85,0 + 25 \times 0 = 85,0$

La precipitación efectiva se deduce entonces, como la sumatoria del volumen acumulado anterior y el incremento efectivo para ese rango. Por ejemplo, a una precipitación real de 45 mm, le correspondería una precipitación efectiva de 39,5 mm.

$$25 \text{ mm} \times 0,90 = 22,5 \text{ mm}$$

$$20 \text{ mm} \times 0,85 = 17,0 \text{ mm}$$

$$\underline{45 \text{ mm}} \quad \quad \underline{39,5 \text{ mm}}$$

A una precipitación real de 150 mm, le corresponderían 85 mm de precipitación efectiva.

Otros métodos para el cálculo de la evaporación efectiva son:

Método de Blaney y Criddle

Método del Soil Conservation Service USDA (Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)

## Evapotranspiración de los cultivos

La evapotranspiración (Et) es un flujo de materia componente del ciclo hidrológico. Integra las salidas de agua hacia la atmósfera por evaporación desde el suelo y desde las superficies vegetales que interceptan y retienen agua libre y por transpiración del agua absorbida por las plantas.

Perrier (1984) define la Et como la pérdida total de agua de una cubierta vegetal bajo la forma de vapor a través de la evaporación y transpiración durante un intervalo de tiempo dado.

El desarrollo del conocimiento en los campos de la fisiología, la micrometeorología y la hidrología agrícola, la disponibilidad del instrumental de medición y los avances en la modelización matemática, permiten hoy comprender las relaciones causa efecto de la Et en el marco de las relaciones agua suelo planta atmósfera, medir y pronosticar la magnitud del fenómeno y ampliar su campo de aplicación con más precisión en la problemática del riego y el drenaje.

Desde un punto de vista cuantitativo, puede asumirse que los términos evapotranspiración potencial Etp, evapotranspiración de referencia Eto y uso consuntivo Uc, se refieren a una misma cantidad de flujo de agua que pasa a la atmósfera desde un suelo bien provisto de agua donde vegetan activamente gramíneas que cubren dicho suelo.

La evapotranspiración de un cultivo determinado Etc puede superar la Eto y de hecho frecuentemente esto ocurre, ya que principalmente la superficie foliar transpirante (por ejemplo indicado por el IAF índice de área foliar) de muchos cultivos es superior al de un cultivo herbáceo de gramíneas pratenses.

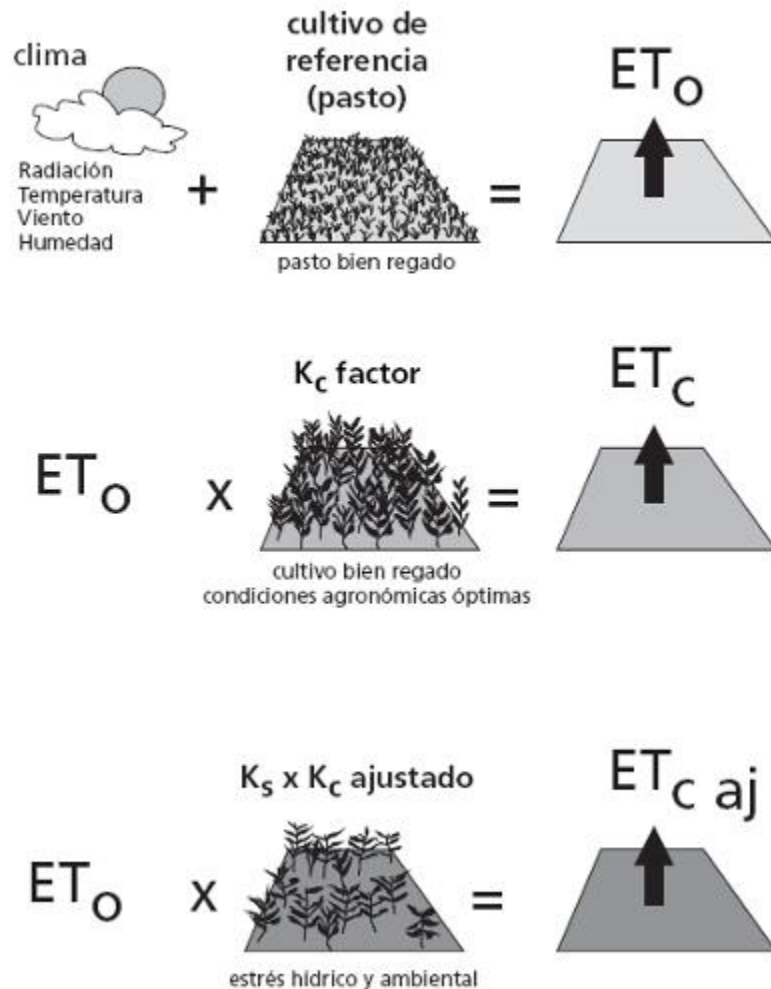
La evapotranspiración máxima es la mayor evapotranspiración que puede presentar una superficie extensa vegetada; no debe confundirse con la Etp, que en realidad puede significar la demanda hídrica atmosférica de una determinada localidad, que no tiene porqué ser la más alta Et.

El cociente entre la Etc y la Eto se denomina coeficiente de cultivo. Puede ser obtenido experimentalmente a partir de mediciones lisimétricas de la Et de un cultivo determinado y una gramínea y generalmente es estimado a partir de modelos matemáticos, nomogramas, gráficas, información tabulada, procedimientos combinados, etc. Generalmente el rango de variación del kc es de 0,3 a 1,3. Se utiliza generalmente

para predecir valores de Etc a partir de valores zonales de Eto, estimados mediante el uso de modelos matemáticos y programas computacionales. Este tema será ampliado más adelante en la presente guía.

Conociendo la tasa de Et de un cultivo puede estimarse su necesidad de agua y elaborarse los programas operativos de riego.

La Et puede medirse con instrumental y procedimientos adecuados o estimarse utilizando modelos matemáticos.



### Clasificación de métodos de medición de la Et

- 1.1 Métodos directos:
- Lisimetría
  - lisímetros volumétricos
  - lisímetros de pesada
- 1.2 Métodos indirectos:
- Micrometeorologías
  - aerodinámicos
  - balance de energía (Bowen)

- sensores remotos

- Fisiológicos

- Balance hídrico del suelo

### **Coefficiente de desarrollo del cultivo (Kc)**

Si bien, como ya hemos visto anteriormente, existen métodos que permiten arribar a estimaciones de Eto, en la ingeniería de riego y drenaje se exige el conocimiento de la evapotranspiración real (Etc). De ambas surge la relación llamada Kc, definida como:

$$Kc = Etc / Eto$$

Y constituye el factor de ajuste de la demanda evapotranspirativa del cultivo. Precisamente las diferencias existentes para una misma zona, entre Etc y Eto son debidas a las características del cultivo, la duración del período vegetativo y el ritmo de su desarrollo, las fechas de siembra, transplante o plantación, las condiciones climáticas, la frecuencia de las precipitaciones o riegos que inciden en la disponibilidad hídrica, etc.

### **Bibliografía.**

- Linsley, R.K.; M.Kohler y J Paulus 1967 Hidrología para ingenieros Ed Mc Graw – Hill Castellana Madrid
- Remeneira G 1971 Tratado de Hidrología Aplicada Ed. Técnicos asociados Barcelona
- Luque A L 1981 Hidrologia Aplicada Ed Hemisferio Sur Buenos Aires
- Dastane N G 1974 Precipitación efectiva en la agricultura de regadío Ed FAO Roma
- Blaney H Criddle W 1950 Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data USDA Soil Conservation Service Technical Paper 96 Washington
- Chamboleyron, J. 1999. Riego y drenaje. Universidad Nacional de Cuyo. Luján de Cuyo, Mendoza.
- Doorembos y Pruitt W 1976 Las necesidades de riego de los cultivos Estudios FAO Riego y drenaje N°24 Roma

- Grassi, C. 1993. Fundamentos del riego. RD 38. SIDITA. Mérida.
- Grassi C y J Tevez E 1966 Evapotranspiración de los cultivos en la República Argentina estimada por la fórmula de Grassi y Christiansen IDIA (INTA) 226: 65 – 80
- Luque J A 1970 Aplicación del método de Blaney – Criddle ajustado para la determinación del uso consuntivo, lámina neta y requerimiento de riego en el país IDIA (INTA) 266: 61 – 69
- Luque J A y J. D. Paoloni. Manual de operación de riego Editorial Hemisferio Sur Bahía Blanca
- Oriolani M J C Wouters O D Bagini R L 1975 Requerimiento hídrico del peral IDIA (INTA) 325/327: 17 – 21
- INTA 1966 Riego y drenaje Editorial INTA Buenos Aires
- Santa Olalla Mañas, F. Y J. Valero. Agronomía del riego. 1993. Ed.Mundi-Prensa, Madrid.
- Stamm, G.G. 1967 Problems and procedures in determining water supply requirements for irrigation projects. Chap. 40 in irrigation of agricultural lands by Hagan et al. Wisconsin, Amer. Soc. Agron. Agronomy II.