

## HIDRÁULICA AGRÍCOLA

La Hidráulica Aplicada trata del movimiento del agua con vista a las aplicaciones prácticas, entre las cuales se pueden citar:

- APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO
- HIDRAULICA FLUVIAL
- HIDRAULICA MARITIMA
- HIDRAULICA URBANA
- MAQUINAS HIDRAULICAS
- **HIDRAULICA AGRICOLA**

### HIDRAULICA AGRICOLA

La Hidráulica Agrícola como disciplina práctica orienta su cometido hacia el aprovechamiento de la RIQUEZA POTENCIAL DEL SUELO.

Plantea y resuelve los problemas referentes al abastecimiento de agua a las plantas, la eliminación y/o control de sus excedentes y la defensa de los suelos agrícolas sujetos a erosión hídrica.

En particular son los estudios y operaciones tendientes a establecer un equilibrio entre suelo, agua y aire que más convenga a la planta, y por lo tanto a la producción agrícola.

En ese sentido y considerando que el suelo es un recurso natural renovable, que se debe conservar, se plantean y buscan soluciones a los problemas que el abastecimiento de agua a las plantas y la eliminación de sus excedentes imponen a la Hidráulica Agrícola:

- Captación del agua. Superficial, subterránea y meteóricas.
- Regulación de los recursos hídricos y almacenamiento: Embalses, reservorios, almacenamiento en suelo no saturado.
- Distribución del agua: Canalizaciones, dispositivos de partición y medición, estaciones de bombeo.
- Utilización del agua: Método de riego.
- Control y manejo del nivel freático: Drenaje, recarga.
- Problemas diversos. Desalado, tratamiento de suelos.
- Saneamiento de suelos agrícolas. Desagües, defensa contra la erosión hídrica.
- Complemento agronómico: Relación suelo, agua, planta. Relación fundamental. Balance hidrológico. Dosis y Dotación.
- Definiciones y datos agronómicos para los proyectos de riego y saneamiento.

### RIEGO

El riego es la aportación de agua al suelo, compensando el déficit de precipitaciones. Por lo general, esta aportación no se realiza de modo continuo, sino que, por razones de tipo técnico y económico, hay que llevarla a cabo periódicamente, aprovechando la capacidad de retención de agua que tiene el suelo.

Por tanto, al efectuar el riego se aplica una dosis de agua al suelo de un modo muy rápido y casi siempre con un exceso de agua sobre la necesaria para alcanzar la capacidad de campo. Es fundamental la eliminación de esta agua sobrante, ya que en caso contrario se iría acumulando en el suelo con la consiguiente elevación de la capa freática y los correspondientes perjuicios a los cultivos ante la falta de aireación de las raíces.

## DRENAJE

A su vez, drenaje consiste en eliminar el excedente de aguas de riego o lluvias, controlando la capa freática. Por regla general, si los terrenos no tienen buen drenaje interno natural, hay que disponer una red de drenaje artificial para eliminación del agua en exceso.

La necesidad de drenaje se ve aumentada en el caso de riego de suelos salinos o de empleo de aguas salinas. En caso de suelos salinos se hará necesaria una dosis suplementaria de riego para el lavado del mismo, con lo cual se ven incrementadas las necesidades de drenaje. En caso de aguas salinas, el agua que se evapora deja en el suelo las sales que lleva disueltas, y habrá que aumentar la dosis de riego para volver a disolver las sales.

Por tanto, riego y drenaje están íntimamente ligados, siendo complementarios el uno del otro y ambos a las precipitaciones naturales del Ciclo Hidrológico.

## ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL RIEGO

- Egipto.- 2000 A. de C. la Reina Asiría ordenó desviar las aguas del Nilo para irrigar los desiertos de Egipto.  
En Egipto se encuentra la presa más antigua del mundo.
- China.- 2200 A. de C. el pueblo eligió como Rey a “Yu” por su excepcional labor en la regulación de las aguas.
- India.- 300 A. de C. Escritos dan cuenta que el país se encontraba completamente regado.

### Culturas Pre Incas

- Cultura Chavín, 1200 A. de C. se establecieron sistemas de riego rudimentarios y se construye el canal colector de aguas pluviales de Cumbe Mayo que permite el trasvase de las aguas del río Jequetepeque al río Cajamarca.
- Los Mochicas, 200 A. de C., establecieron grandes canales de regadío.
- Nazca, 100 A. de C. construyeron conductos subterráneos y galerías filtrantes para recolectar el agua del subsuelo, que en número de 28 han sido descubiertos y continúan en uso para riego.

## Época Incaica

- Piura.- El canal de Pabur.
- Lambayeque, Canales de Raca Rumí y Cucureque.
- Sistema Hidráulico de la ciudad de Chanchan.
- Chicama, Canal la cumbre.
- Ica.- Los acueductos de la Achirana.

## FACTORES INFLUYENTES EN EL RIEGO

Toda transformación en regadío debe tener en cuenta una serie de factores que condicionan la operación y que son los siguientes: el suelo, el agua, el clima, los cultivos, los regantes, la estructura de la propiedad y la legislación jurídica.

## SUELO AGRÍCOLA

El **suelo agrícola** es el continente de elementos nutritivos para las plantas, el medio para desarrollo de las bacterias, reservorio de agua, soporte y anclaje de las plantas.

Constituye una mezcla porosa de sedimentos (granos), materia orgánica, aire, agua y organismos.

La matriz del suelo está formada por los granos, de materia orgánica y minerales.

El suelo se utiliza en regadío como depósito de las aportaciones de agua. Desde este punto de vista, presentan interés diversas propiedades del suelo que se indican a continuación.

## PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO AGRÍCOLA

### TEXTURA

La textura de un suelo es la cualidad dada por la granulometría de las partículas que lo constituyen.

Se distinguen tres tipos de partículas generales: arcilla, limo y arena; cada cuál dando características diferentes al suelo.

La arcilla posee la cualidad de otorgar una alta capacidad de retención de agua y elevada plasticidad.

La retención de agua y la plasticidad baja con el limo, además de tener poca actividad química. Con la arena la retención de agua es casi nula al igual que la actividad química y la plasticidad.

La combinación de los tres tipos de partículas determina la textura de un suelo, existen una gran variedad de texturas las que dependen de ó de las partículas dominantes dentro de la combinación, medidas en porcentaje.

- grava fina 1 - 2 mm
- arena gruesa 0,5 - 1 mm
- arena mediana 0,25 - 0,5 mm
- arena fina 0,10 - 0,25 mm
- arena muy fina 0,05 - 0,10 mm
- limo 0,005 - 0,05 mm
- arcilla 0,0001 - 0,005 mm
- coloides 0,000001 - 0,0001 mm

Arenoso o ligero: mas del 70 % de arena

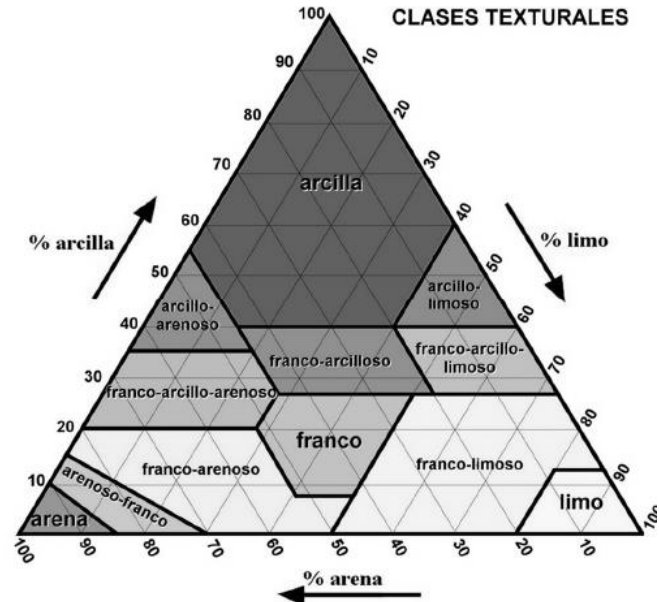
- Poca retención de agua.
- Químicamente inertes.
- Buena condición de filtración de agua

Limoso: no posee carga eléctrica.

Arcilloso o pesado: más de 35 % de arcilla

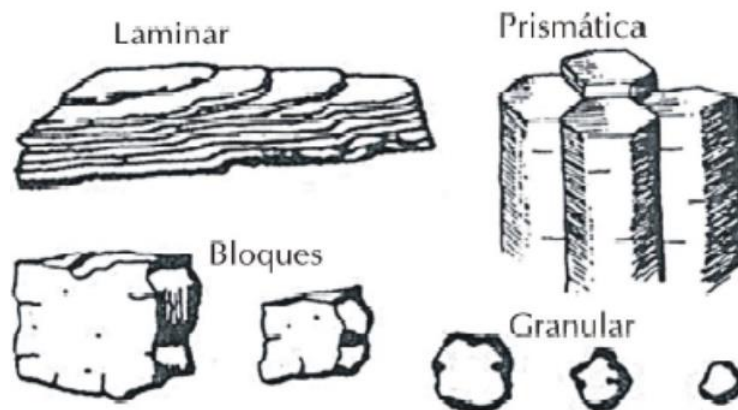
- Gran capacidad de retención de agua.
- Coloidales y poseen carga eléctrica.
- Más del 60 % de arcilla no son suelos agrícolas.

Franco: distribución equilibrada de granos.



## ESTRUCTURA

La estructura de un suelo está dada por la forma en que se agrupan las partículas elementales (arena, limo y arcilla) en un solo agregado.



La aptitud de un suelo para formar terrones espontáneamente, constituidos por agregados de menor tamaño se conoce como capacidad estructural.

La capacidad que tienen los agregados de conservar su forma cuando son sometidos a una acción física se conoce como estabilidad estructural.

Las características estructurales de los suelos condicionan el comportamiento hídrico y la aeración en función del:

- Tamaño de sus poros.
- Forma de los granos.
- Tamaño de los granos
- Disposición y grado de cohesión.
- Compacidad.

Factores que afectan la estabilidad estructural de un suelo:

- Presencia del agua:
- Naturaleza de la fracción arcillosa.
- Tipo de iones: sodio o calcio. El ión sodio activa la dispersión de agregados de arcilla disminuyendo el tamaño de los poros que son llenados por arcilla coloidal.
- Salinidad: las sales solubles aumentan la presión osmótica para los cultivos.
- Procesos mecánicos: generan agregación macro del suelo por penetración de raíces o laboreos agronómicos superficiales.

Las diferentes formas estructurales del suelo afectan en forma directa la velocidad de infiltración del agua, producto de la lluvia o un riego tipo. Es así como en las estructuras de forma granular la tasa de infiltración es rápida, no así en los de tipo prismática y de bloques donde es de forma moderada.

En las estructuras laminares la tasa de infiltración es demasiada lenta dando lugar a escorrentía superficial cuando la aplicación del agua es alta.

## DENSIDAD REAL

**Peso específico real (Per) o densidad real (Dr).**

Dr (adim): peso del suelo seco / peso de un volumen de agua igual al volumen de los granos = 2,6 a 2,65

## DENSIDAD APARENTE

**Peso específico aparente (Pea) o densidad aparente (Da).**

Da (adim): peso de un volumen del suelo seco más poros / peso de un volumen igual de agua

suelo arcilloso:  $Da = 1,10 - 1,30$

suelo limoso:  $Da = 1,30 - 1,50$

suelo arenoso:  $Da = 1,50 - 1,80$

## POROSIDAD

Porosidad (%):	$n = \text{volumen de vacíos} / \text{volumen total} * 100$
Porosidad efectiva (%):	$n_e = \text{volumen de agua drenada por gravedad} / \text{volumen total} * 100$
Retención específica :	Diferencia entre los dos parámetros anteriores.
• suelos arcillosos	$n = 40 - 50\%$
• suelos arenosos	$n = 30 - 40\%$

## PROFUNDIDAD

Se llama profundidad de un suelo, para el caso agronómico, a aquella cota medida desde la superficie del suelo hacia abajo, hasta donde se puede desarrollar el sistema de raíces del cultivo sin condiciones restrictivas que lo afecten. Dichas condiciones pueden ser capas impermeables al aire, agua, y raíces; o compactación del suelo debido al uso de maquinaria agrícola.

## DRENAJE

El drenaje de un suelo es una propiedad que está relacionada con la capacidad que este tiene para eliminar el exceso de agua de su perfil, ya sea proveniente del riego o de las precipitaciones. La evacuación del agua puede realizarse en forma de escurrimiento superficial o por percolación profunda. La mala evacuación del agua puede llevar a una humedad excesiva del suelo, dicha deficiencia se debe a un drenaje externo o interno inadecuado. Los drenajes externos que no evacúan en forma eficiente se deben a la topografía y relieve del terreno, los suelos de áreas muy planas o que poseen una posición muy deprimida tienen un gradiente hidráulico desfavorable, lo que retarda la evacuación del agua. Los factores internos que afectan el drenaje se deben a la textura, la estructura y porosidad, luego la arquitectura de un suelo será la responsable del movimiento interno del agua. La velocidad de infiltración del agua desde la superficie del suelo a su interior depende de la cantidad, continuidad, estabilidad y tamaño de los poros de transmisión. Una baja velocidad de infiltración puede provocar escurrimiento superficial afectando los cultivos cuando el método de riego no es el adecuado. Cuando la tasa de evacuación del agua es demasiado lenta es necesario un drenaje artificial. Un suelo que no necesite drenaje artificial es aquel que posea una adecuada profundidad, sin capas impermeables y que tenga más de 10% de porosidad gruesa, lo que garantiza una muy buena aireación y conducción del exceso de agua.

## INFLUENCIA DE LOS COMPONENTES DEL SUELO

- La densidad, que está relacionada con el contenido de materia orgánica. A mayor densidad, menor contenido de materia orgánica.
- La capilaridad, que influye en las posibles aportaciones de agua de la capa freática.
- La plasticidad. A mayor plasticidad, mayor porcentaje de humedad.

- La permeabilidad influye decisivamente en la práctica del riego, ya que es el factor que determina la capacidad que tiene el suelo para absorber una aportación de agua en un tiempo dado. Se mide en cm/hora y sus valores se clasifican desde 0,1 cm/h. (muy lenta), hasta 25 cm/h (muy elevada). Del conjunto de estas propiedades depende la aptitud de un suelo para su transformación en regadío, siendo la permeabilidad la que más importancia tiene en el tiempo de aplicación del riego. El resto de las propiedades influyen más bien en la capacidad del suelo para retener la humedad. De un modo general esta capacidad aumenta con el porcentaje de finos, a la vez que desciende la permeabilidad.

## PRODUCTIVIDAD

La productividad del suelo se define como la capacidad de producir una planta específica o sucesión de plantas bajo un determinado sistema de manejo. Se considera que ningún suelo puede producir todos los cultivos con igual éxito, ni tampoco un solo sistema de manejo puede provocar los mismos efectos sobre todos los suelos.

Por lo tanto un suelo productivo es aquel en que las condiciones químicas, físicas y biológicas son favorables para la producción económica de un cultivo.

La capacidad productiva de un suelo dependerá entonces de sus características naturales, del clima y el manejo. Un suelo de poca o nula productividad podrá levantar su capacidad al aplicar en él una tecnología determinada como fertilización, drenaje, riego tecnificado, etc.

## INTERRELACIÓN SUELO-AGUA

El suelo proporciona el anclaje mecánico a las plantas y dependiendo de su estructura y textura, puede almacenar en su espacio poroso una cantidad considerable de agua. El agua es un factor esencial en los procesos de génesis del suelo, ya que es necesario para los requerimientos de las plantas como transpiración, elongación celular, metabolismo, etc.

El movimiento del agua dentro del suelo está sometida a la acción de varios factores, los que tienden a retenerla o expulsarla. Cuanta más agua retiene el suelo después de un riego más favorable es para los cultivos, esta cualidad es conocida como estado de humedad del suelo.

## CONTENIDO DE HUMEDAD

porcentaje de humedad en peso:

$$\theta_p = (\text{peso muestra con humedad} - \text{peso muestra seca}) / \text{peso muestra seca} * 100$$

$$\theta_p = \text{peso del agua} / \text{peso del suelo} * 100$$

porcentaje de humedad en volumen:

$$\theta = \text{volumen de agua} / \text{volumen total} * 100$$

Cuando el medio poro esta saturado,  $\theta = n$ .

## ESTADOS DEL AGUA EN EL SUELO

**Gravitacional:** Agua libre que se mueve en los poros bajo la acción de la gravedad. Este volumen de agua es posible de drenar. Límite máximo: Agua de saturación = porosidad.

**Capilar:** Agua retenida en el suelo por fuerzas capilares. Se moviliza en cualquier dirección.

**Higroscópica:** Fuertemente adherida a la partícula en capas muy delgadas. Se moviliza como vapor. No es utilizable por las plantas.

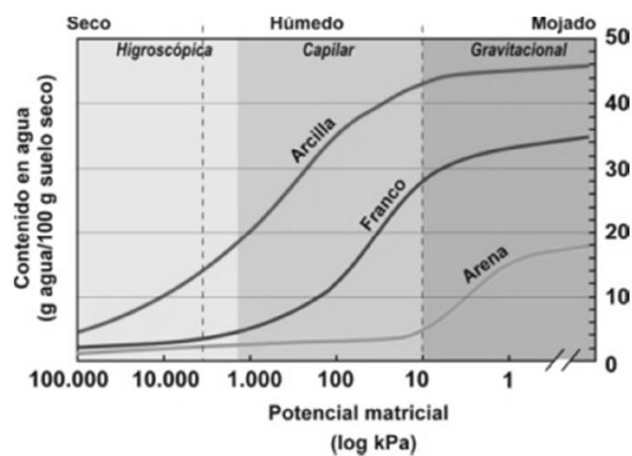
### Condiciones extremas:

**Condición de saturación:** las raíces no pueden airearse y es necesario el drenaje.

**Condición de desecación:** es necesario agregar agua para el desarrollo vegetal.

Una buena práctica de riego se basa en estudiar las fuerzas disponibles en suelo para la retención del agua, en lugar de agregar agua en cantidad.

Desde este punto de vista, el riego se concibe como la práctica de aportar solo el agua necesaria para que la tensión matricial no alcance valores demasiado elevados que dificulte la absorción hídrica de las plantas, provocando una disminución en la producción.



Textura del suelo	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Capacidad de campo (%)	Punto marchitez permanente (%)
Arenoso	1.55 – 1.80	6 – 12	2 – 6
Franco-Arenoso	1.40 – 1.60	10 – 18	4 – 8
Franco y Franc-Limoso	1.35 – 1.50	18 – 26	8 – 12
Franco-Arcilloso	1.30 – 1.40	23 – 31	11 – 15
Arcill.-Arenoso	1.25 – 1.35	27 – 35	13 – 17
Arcilloso	1.20 – 1.30	31 - 39	15 – 19

Tabla N°AA1 Propiedades Físicas de Diferentes Tipos de Suelos



## ESTADOS DE HUMEDAD SUELO

El suelo posee diferentes estados de humedad los que están estrictamente relacionados con la cantidad de agua retenida en su espacio poroso. Una humedad excesiva, como una deficiente, es perjudicial para el cultivo.

## SATURACIÓN

Cuando todo el espacio poroso del suelo está ocupado por agua hablamos de saturación. La energía necesaria para extraer el agua en este estado es mínima, siendo su potencial mátrico igual a cero. Cuando persiste este estado se corre el riesgo de asfixia en los cultivos por la falta de oxígeno.

## CAPACIDAD CAMPO

Es el contenido de agua en el suelo una vez que ésta ha drenado libremente. Se estima que la capacidad de campo se alcanza aproximadamente después de 24 a 48 horas de la saturación.

Los poros que rápidamente pierden agua son los poros de transmisión o macro poros, siendo llenados por aire. El agua es retenida sólo contra el efecto de la gravedad (potencial gravitatorio) en los poros de almacenamiento. En este nivel la disponibilidad de agua es máxima y una planta solamente necesita realizar una succión de aproximadamente 0.3 bar para absorber el agua del terreno.

### Capacidad de campo (CC).

El contenido de humedad en % que tiene el suelo después de la eliminación del agua gravitacional se denomina capacidad de campo CC.

Se considera que es el porcentaje de humedad de una muestra de suelo luego de dos días de regado y tapado para evitar la evaporación.

## HUMEDAD EQUIVALENTE

### Humedad Equivalente (HE).

Es el contenido de humedad en % que tiene una muestra de suelo previamente saturada sometida por centrifugación a una aceleración de 1000 g, equivalente a la presión de 1 atm.

Es un valor de humedad arbitrario que intenta reemplazar al tiempo de drenaje en laboratorio.

## PUNTO MARCHITEZ PERMANENTE

Cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo de la capacidad de campo, producto del consumo de los cultivos y la evaporación, esta es retenida en delgados filmes y con mucha fuerza alrededor de las partículas de terreno (adhesión). Debido a esto las plantas no son capaces de extraer el agua retenida necesitando realizar para ello una succión de aproximadamente 15 bar, experimentando marchitez irreversible.

## Marchitez permanente (MP) o punto de marchitamiento.

El punto de marchitamiento corresponde al estado particular en el que el agua es retenida por el suelo con fuerzas superiores a las fuerzas de succión de las raíces.

### Fuerzas de absorción de las raíces. (fuente: FAO)

- La cifra inferior se refiere en suelos arenosos y la superior en suelos arcillosos
- La presencia de salinidad hace disminuir estos valores.

Especie	Succión matriz (atm)	Periodo critico para la producción
Plantas naturales desérticas	17 -100	
Plantas naturales de clima húmedo	15 -50	
Plantas cultivadas de clima árido	10 -35	
Plantas cultivadas de clima templado	5 – 35	
Maíz	16 – 27	Desde la polinización hasta la fructificación
Alfalfa	8 – 27	Después de cada corte
Trigo	8 - 15	Durante la floración
Tomate	5 – 13	Floración y crecimiento inicial de los frutos
Cítricos	5 – 10	Durante la floración y fructificación
Vid	4 - 10	
Zanahoria	5 - 6	
Cebolla	4 - 7	
Papa	3 - 5	Desde la formación del tubérculo.
Flores	1 – 5	

## POTENCIAL DEL AGUA EN EL SUELO

### El agua en el suelo agrícola.

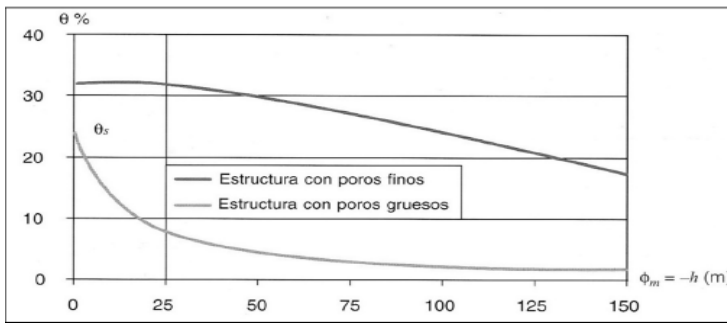
**Potencial total del agua en el suelo:** Es el trabajo que debe realizarse por unidad de peso para movilizar el agua a través del suelo.

El potencial hídrico se representa por una expresión escalar de suma algebraica de energía de gravedad, matricial, hidrostáticas y osmóticas.

$$\Phi_H = \Phi_g + \Phi_m + \Phi_h + \Phi_o$$

El potencial hidrico del agua pura es cero. Para el aire a 20° y Hr = 99%, el potencial hidrico es -13,6 atm.

La tensión con la cual el agua es retenida por el suelo es inversamente proporcional al contenido de humedad. Se mide como una fuerza por unidad de área, que debe aplicarse para extraer el agua, en atmósferas o en potencial capilar  $PF = \log_{10} H$ , siendo H = contenido de humedad en cm.



Contenido de humedad	Tensión (PF)	Tensión (atm)
Saturación	0	-0,001
Capacidad de Campo	2,7	-0,5
Marchitez permanente	4,2	-15
Secado al aire	6,4	-2800
Secado en estufa	7,0	-10000

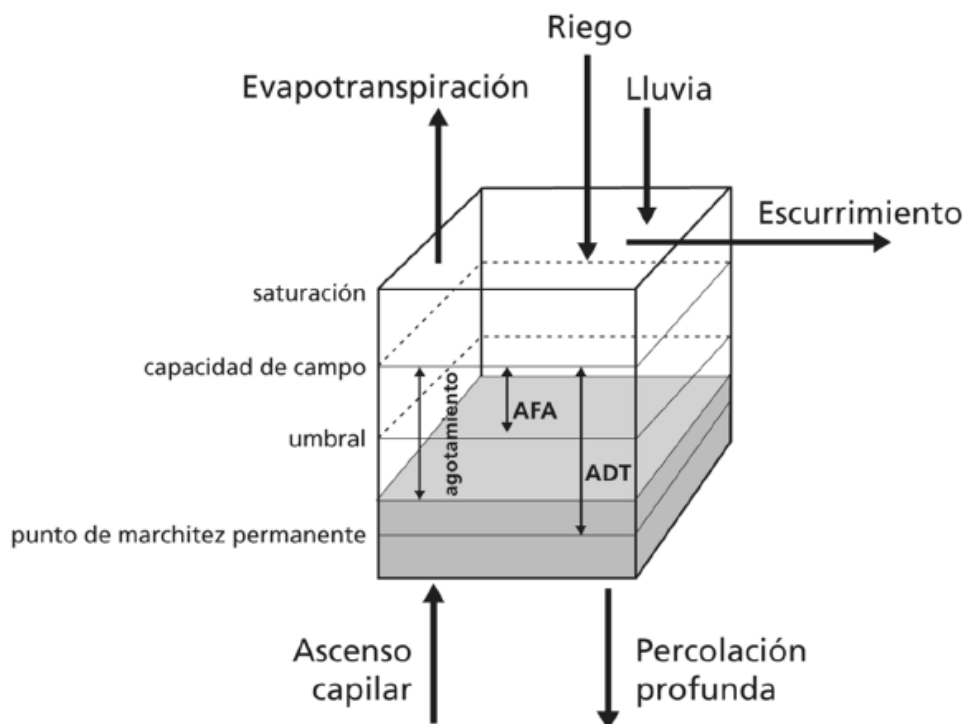
## AGUA ÚTIL

Se define agua útil como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, y representa el valor comprendido entre los límites máximo y mínimo de humedad del suelo.

Se calcula como:

$$\text{Agua Útil} = \text{CC} - \text{PMP}$$

Balace de agua en la zona radicular



## INFILTRACIÓN DEL AGUA

La infiltración se define como la capacidad de flujo que el perfil de un suelo puede absorber a través de su superficie cuando es mantenido en contacto con el agua a presión atmosférica. El agua puede entrar a través de toda la superficie, en forma uniforme, como cuando el suelo está inundado o

cuando llueve, y también puede penetrar en forma de surcos o acequias. Mientras la tasa de aporte de agua a la superficie del suelo sea menor que la tasa de infiltración, el agua se infiltra tan rápidamente como es aportada y la velocidad de aporte determina la velocidad de infiltración. Cuando la velocidad de infiltración es menor que la velocidad de aporte se corre el riesgo de provocar escurrimiento superficial, producto del anegamiento, y con ello peligro de erosión hídrica. La capacidad de infiltración de un suelo y su variación en el tiempo depende de su estructura, textura y uniformidad.

## FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE INFILTRACIÓN

### SELLAMIENTO SUPERFICIAL

Se debe a la formación de una capa fina y compacta sobre la superficie del terreno, producto de un rompimiento de la estructura de la superficie por la lluvia, la que reduce rápidamente la penetración del agua.

### COMPACTACIÓN AGRÍCOLA

Llamada pie de arado, es producida por maquinaria agrícola, la que debido a su peso compacta y forma capas impermeables debajo de la profundidad a la que penetra la herramienta.

### PARTÍCULAS O GRIETAS DEL SUELO

Los suelos de texturas finas tienden a partirse cuando se secan; al aplicar agua las partículas del suelo aumentan de tamaño, sellando las partiduras disminuyendo la velocidad de infiltración.

### SALES DE RIEGO

Las sales que contiene el agua de riego se acumulan en el perfil del suelo formando una costra, disminuyendo la infiltración.

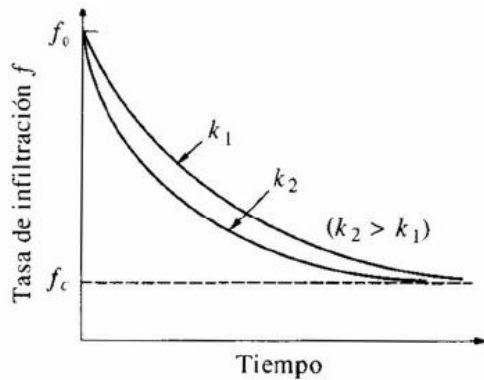
### SEDIMENTOS DEL AGUA DE RIEGO

Las partículas de limo y arcilla, suspendidas en el agua, producen un encostramiento de la superficie bajando el nivel de infiltración.

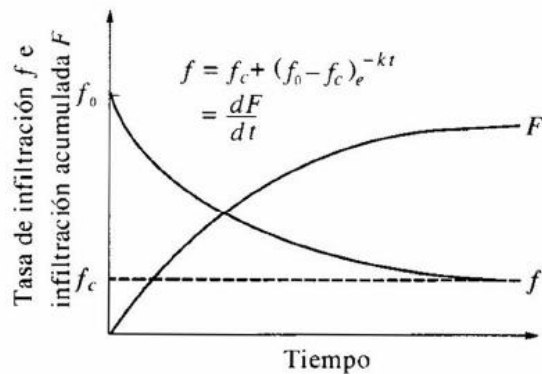
### El agua en el suelo agrícola: Infiltración.

La infiltración depende de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, contenido de humedad y de las prácticas agrícolas de manejo del suelo.

La infiltración límite (pendiente menor 0,1) se produce cuando el suelo esta en condición de saturación y tiende al valor de conductividad hidráulica.



a) Variación del parámetro  $k$



b) Tasa de infiltración e infiltración acumulada

Suelo arcilloso:	1,2 – 5 mm/hora
Suelo franco:	20 – 60 mm/hora
Suelo arenoso:	120 – 250 mm/hora

donde:

- $f$  : tasa de infiltración en [mm/h]
- $f_c$  : tasa de infiltración límite o mínima en [mm/h]
- $f_0$  : tasa de infiltración inicial en [mm/h]
- $k$  : constante que depende del tipo de suelo
- $t$  : tiempo

## INTERRELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA

El agua es el principal componente de animales y plantas, en estas últimas actúa como solvente y vehículo de gases, minerales y otras sustancias esenciales para la vida vegetal que transporta el agua desde el suelo y es considerada como un reactivo fundamental en el proceso fotosintético.

Desde el punto de vista del riego el objetivo que se busca es cubrir las necesidades de agua del cultivo, para ello es necesario conocer dichas necesidades y como se calculan.

## FOTOSÍNTESIS

El proceso de fotosíntesis es la reacción bioquímica natural más importante. Mediante este proceso las plantas sintetizan sus nutrientes a partir de dos compuestos inorgánicos: el anhídrido carbónico y el agua, obtenidos por el vegetal, respectivamente, del aire y del suelo.

En este proceso se acumula gran cantidad de energía, la cual es captada (transformación de la energía luminosa en energía química), y se libera oxígeno al medio externo.

## TRANSPIRACIÓN

Las plantas absorben el agua del suelo mediante su sistema radical. El agua pasa a través de la planta desde las raíces hacia el tronco y luego a las hojas.

En las hojas se produce la fotosíntesis mediante la absorción de anhídrido carbónico por los estomas, por estos últimos también se libera agua en estado líquido, la que pasa al estado gaseoso al salir a la atmósfera.

A este proceso se le llama transpiración. La transpiración está causada, más que por el crecimiento de los vegetales, por una diferencia de presión entre las hojas y la atmósfera que los rodea, ya que las hojas están sujetas a la radiación solar y a la acción del viento que le imponen la necesidad de transpirar incesantemente.

La planta puede reducir la tasa de transpiración al cerrar sus estomas, pero ello acarrea consigo un retardo en su crecimiento y a la vez un alza de su temperatura interna, lo que es perjudicial para sus actividades metabólicas.

## NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO

Para crecer y desarrollarse la planta debe absorber y expulsar agua en forma continua, lo ideal es que el suelo funcione como una reserva de agua permanente, saciando las necesidades hídricas del cultivo. En la práctica eso no sucede ya que la lluvia o el riego convencional, principales agentes portadores de agua, ocurren en forma ocasional, siendo en los poros de almacenamiento del suelo donde la planta puede encontrar la reserva de agua.

Por esto la planta debe estar capacitada para extraer el agua contenida en el espacio poroso del suelo.

Todos los cultivos no necesitan la misma cantidad de agua para su desarrollo y productividad. Este dato es necesario conocer para efectuar un adecuado reabastecimiento de agua a medida que la planta la consume y se evapora.

Para conocer este consumo de agua se debe determinar la evapotranspiración del cultivo.

La **transpiración** es el proceso de transferencia de agua, en estado de vapor, desde los vegetales a la atmósfera.

- a) Transpiración estomática: es regulada por los estomas; es una vía controlada por la planta ya que los mismos se cierran ante un déficit apreciable de agua en la planta o en el suelo. Cuantitativamente representa alrededor del 90% del total de agua perdida. La apertura de los estomas también reaccionan ante factores ambientales como radiación solar, humedad, viento y temperatura.
- b) Transpiración cuticular: se produce en la cutícula. Esta vía no es controlada por la planta y representa no más del 10% restante, pero adquiere importancia cuando los estomas se encuentran cerrados. En coníferas 0,5% y en cactus 0,05 %.
- c) La transpiración presenta una periodicidad diurna relacionada con las condiciones meteorológicas. Es baja durante la noche, aumenta con rapidez después del amanecer hasta un máximo mediodía.
- d) La EVT potencial se produce siempre que exista disponibilidad de agua en el suelo.
- e) Funciones fisiológicas:
  - Regula el contenido hídrico ( absorción – transpiración)
  - Refrigera la planta. Enfriamiento de la superficie foliar por el desprendimiento del calor de vaporización.
  - Transporte de sales minerales

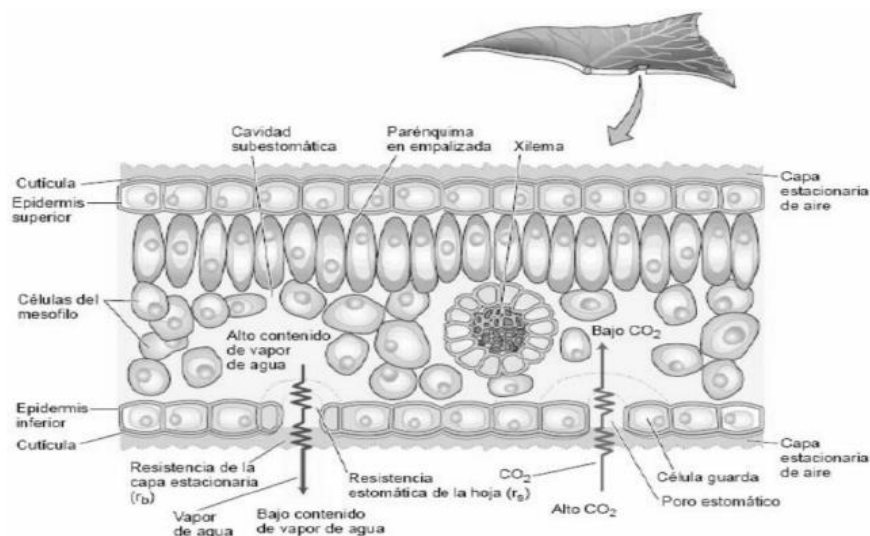
## TRANSPIRACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

En un terreno ocupado por cultivos, el agua pasa del suelo a la atmósfera de dos formas diferentes: la evaporación, término que se aplica a la evaporación directa del agua desde el suelo a la atmósfera y la transpiración, descrita con anterioridad. Al conjunto de ambos fenómenos se denomina evapotranspiración.

Una forma de medir la evapotranspiración de un cultivo es mediante la bandeja de evaporación, la que consiste en un recipiente de dimensiones conocidas lleno de agua. Este recipiente se coloca en el terreno donde se encuentra el cultivo, como si fuese una planta más, sometida a las mismas condiciones climáticas.

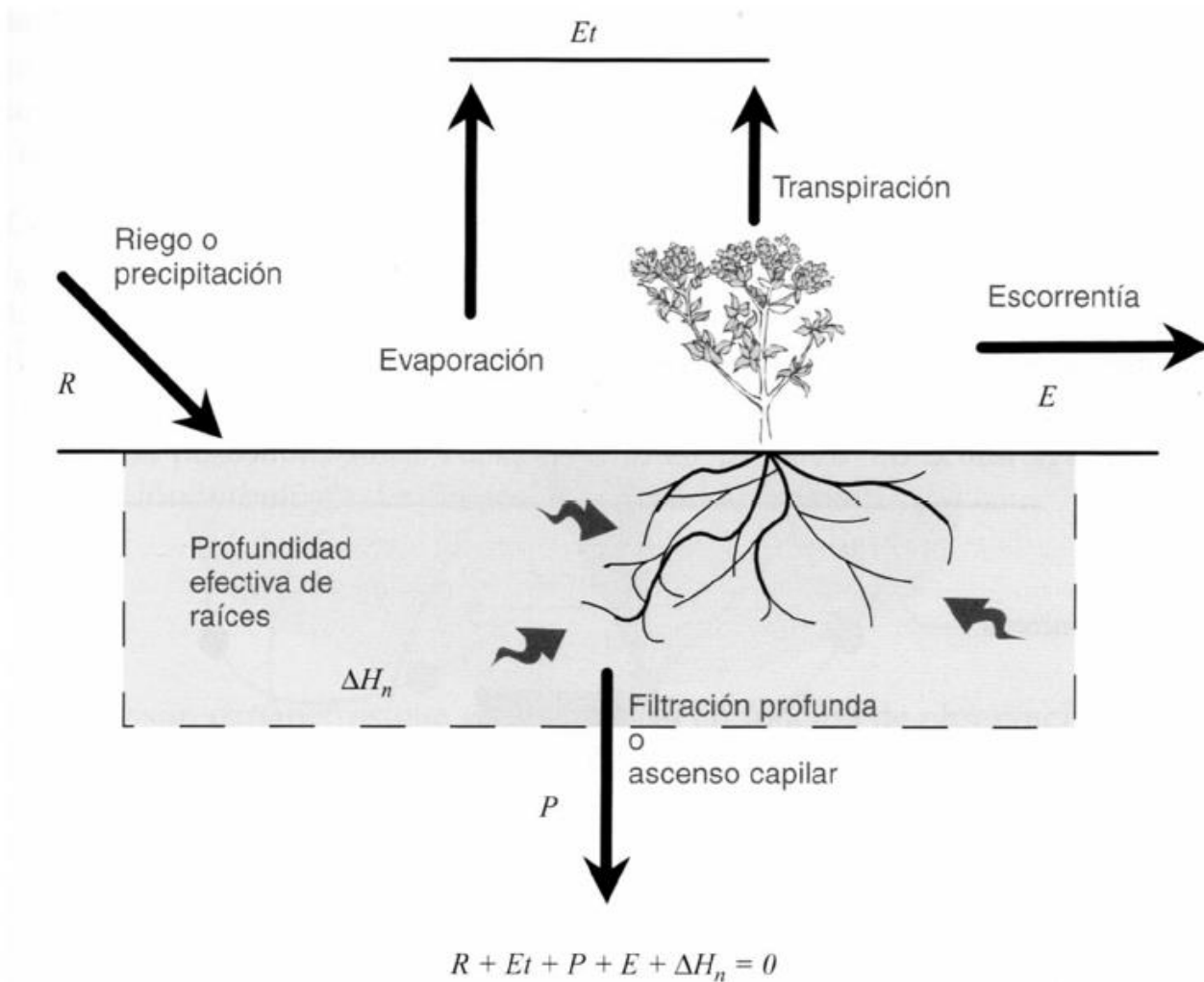
Se asume que la pérdida de humedad en la bandeja como cultivo, variación del nivel de agua, es la misma que sufren las demás plantas. Para conocer dicha variación de humedad se realizan lecturas periódicas a la bandeja las que arrojan la cantidad de agua evaporada a la atmósfera, la misma que debe ser aplicada para mantener el equilibrio de humedad entre suelo y planta. Estas mediciones permiten también conocer cuáles son los meses con más demanda evaporativa.

### Transpiración y Evapotranspiración



**Evapotranspiración:** estimación de la suma de evaporación y la transpiración.

- Rigen las mismas aproximaciones que para el estudio de la evaporación directa ( $E_s$ ).
- La ET potencial se produce con disponibilidad máxima y permanente de agua en el suelo y desarrollo vegetativo óptimo.
- Sin estas condiciones la ET se denomina real ( $E_{Tr}$ ).



## EVAPOTRANSPIRACIÓN

En un terreno ocupado por cultivos, el agua pasa del suelo a la atmósfera de dos formas diferentes: la evaporación, término que se aplica a la evaporación directa del agua desde el suelo a la atmósfera y la transpiración, descrita con anterioridad. Al conjunto de ambos fenómenos se denomina evapotranspiración.

Una forma de medir la evapotranspiración de un cultivo es mediante la bandeja de evaporación, la que consiste en un recipiente de dimensiones conocidas lleno de agua. Este recipiente se coloca en el terreno donde se encuentra el cultivo, como si fuese una planta más, sometida a las mismas condiciones climáticas.

Se asume que la pérdida de humedad en la bandeja como cultivo, variación del nivel de agua, es la misma que sufren las demás plantas. Para conocer dicha variación de humedad se realizan lecturas periódicas a la bandeja las que arrojan la cantidad de agua evaporada a la atmósfera, la misma que debe ser aplicada para mantener el equilibrio de humedad entre suelo y planta.

Estas mediciones permiten también conocer cuáles son los meses con más demanda evaporativa.

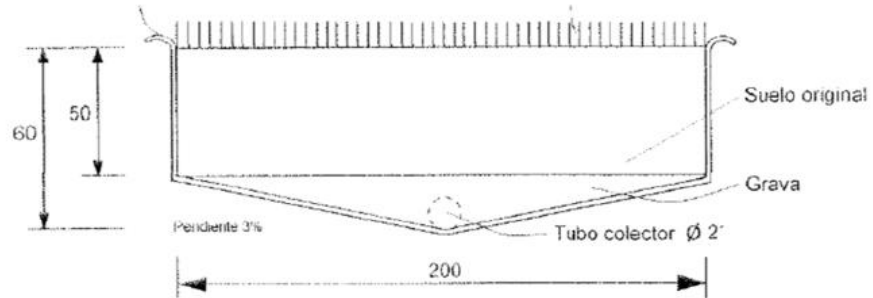


## Determinación de la Evapotranspiración

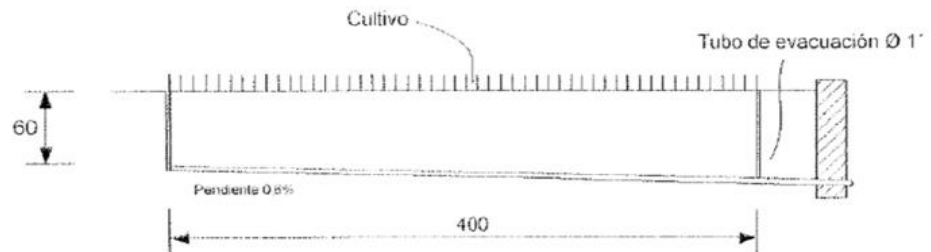
### Lisímetros de drenaje.

$E_{Tr} = \text{Precipitación Neta} - \text{Percolación}$

$ETP = \text{Precipitación neta} + \text{Riego} - \text{Percolación}$



a) Sección transversal de un lisímetro de drenaje (cotas en cm).



b) Sección longitudinal de un lisímetro de drenaje (cotas en cm).

Fuente: Castañón G. Ingeniería del Riego

## Determinación de la Evapotranspiración

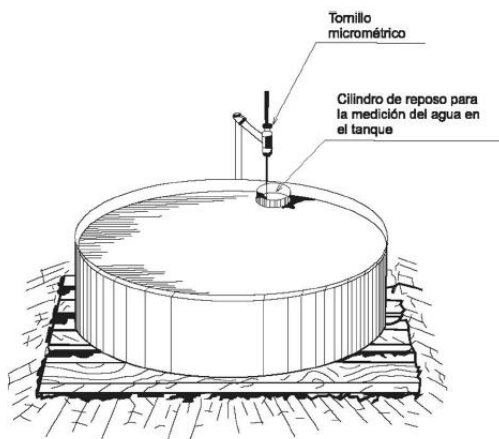
### Tanques Evaporimétricos.

$$E_{To} = K_t \cdot E_t$$

$E_{To}$ : evapotranspiración de referencia (mm/día).

$K_t$ : coeficiente de tanque FAO, depende de la ubicación, tipo de tanque, viento y Hr.

$E_t$ : evaporación en tanque (mm/día)

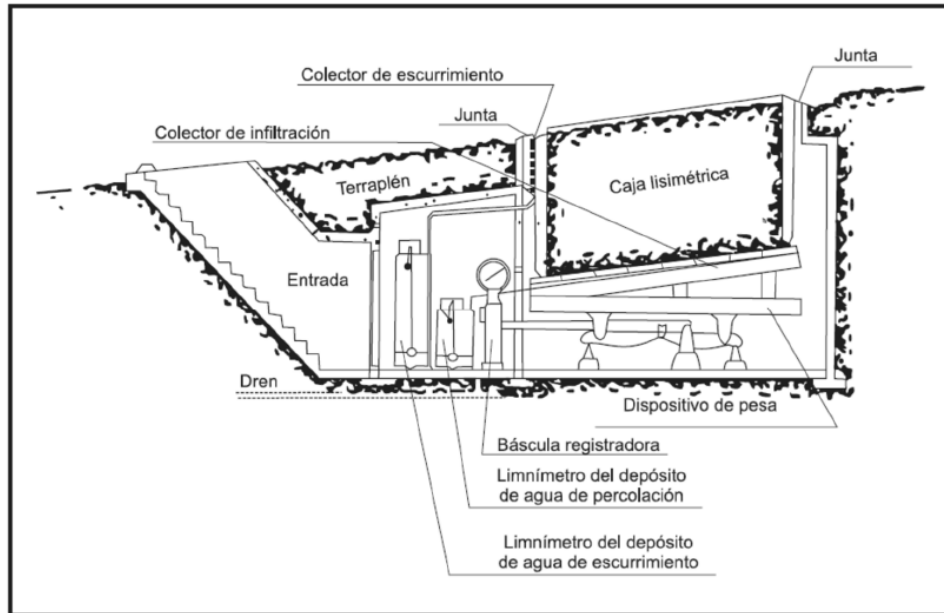


### Determinación de la Evapotranspiración

#### **Lisímetros de pesada.**

$$ETr = \text{Precipitación Neta} - \text{Percolación} - \text{Escurrimiento} + \Delta w / Pe_{\text{agua}}$$

$$ETP = \text{Precipitación neta} + \text{Riego} - \text{Percolación} - \text{Escurrimiento} + \Delta w / Pe_{\text{agua}}$$



### Determinación de la Evapotranspiración

#### Turc (1955)

$$ETr \text{ (mm/año)} = PMA / (0,9 + P^2 / L^2)^{0,5}$$

PMA: precipitación anual

L:  $300 + 25 T + 0,05 T^3$

TMA: temperatura media anual (°C)

#### Thornthwaite y Mather (1955)

$$i = (TMM / 5)^{1,514} \quad I = \sum i$$

TMM: temperatura media mensual (°C)

$$ETP'm \text{ (mm/mes)} = c TMM^a$$

$$a = 675 \cdot 10^{-9} |^3 - 771 \cdot 10^{-7} |^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} | + 0,492$$

$$c = 16 (10 / |)^a$$

$$ETPm = k ETP'm \quad (\text{corrección por latitud})$$

$$si = Pm - ETPm + H_{m-1} > H_{\text{max}} \quad \text{exceso hídrico y } ETr = ETP$$

$$si = Pm - ETPm + H_{m-1} < H_{\text{max}} \quad ETr < ETP$$

$$si = Pm - ETPm + H_{m-1} < 0 \quad \text{déficit hídrico y } ETr < ETP$$

## Determinación de la Evapotranspiración. Balance Hidrico Thornwaite en la zona no saturada.

	unidades	Hn-1	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total
temperatura media mensual	°C		22.0	20.7	19.1	16.7	14.6	11.0	12.2	11.3	12.6	18.9	19.6	21.2	
índice mensual			9.4	8.6	7.6	6.2	5.1	3.3	3.8	3.4	4.1	7.5	7.9	8.9	
			l: 75.7				a: 1.699				c: 0.520				
evapotranspiración potencial	mm/mes		98.8	89.3	77.7	61.9	49.7	30.4	36.2	31.9	38.6	76.3	81.1	93.3	765.1
precipitación acumulada mensual	mm/mes		107.0	170.0	63.0	110.0	93.0	5.0	36.0	15.0	22.0	67.0	120.0	138.0	946.0
PM - EPVT	mm/mes		8.2	80.7	-14.7	48.1	43.3	-25.4	-0.2	-16.9	-16.6	-9.3	38.9	44.7	180.9
Contenido de humedad máximo	mm		200												
Humedad en el suelo	mm		208.2	280.7	185.3	233.4	243.3	174.6	174.4	157.5	140.9	131.6	170.5	215.2	
Balance de humedad	mm	200	200.0	200.0	185.3	200.0	200.0	174.6	174.4	157.5	140.9	131.6	170.5	200.0	
exceso hídrico	mm/mes		8	81		33	43							15	180.9
déficit hídrico	mm/mes														0.0

	unidades	Hn-1	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total
temperatura media mensual	°C		22.0	20.7	19.1	16.7	14.6	11.0	12.2	11.3	12.6	18.9	19.6	21.2	
índice mensual			9.4	8.6	7.6	6.2	5.1	3.3	3.8	3.4	4.1	7.5	7.9	8.9	
			l: 75.7				a: 1.699				c: 0.520				
evapotranspiración potencial	mm/mes		98.8	89.3	77.7	61.9	49.7	30.4	36.2	31.9	38.6	76.3	81.1	93.3	765.1
precipitación acumulada mensual	mm/mes		80.3	127.5	47.3	82.5	69.8	3.8	27.0	11.3	16.5	50.3	90.0	103.5	709.5
PM - EPVT	mm/mes		-18.5	38.2	-30.5	20.6	20.1	-26.6	-9.2	-20.7	-22.1	-26.1	8.9	10.2	-55.6
Contenido de humedad máximo	mm		200												
Humedad en el suelo	mm		0.5	38.7	8.2	28.8	48.9	22.3	13.1	-7.6	-22.1	-26.1	8.9	19.1	
Balance de humedad	mm	19	0.5	38.7	8.2	28.8	48.9	22.3	13.1	0.0	0.0	0.0	8.9	19.1	
exceso hídrico	mm/mes														0.0
déficit hídrico	mm/mes									-8	-22	-26			-55.7

## Determinación de la Evapotranspiración

### Blaney y Criddle (1962)

$$ETP = K_c \cdot p \cdot (0,457 \cdot T + 8,13)$$

- ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes]  
 Kc = coeficiente empírico según tipo de vegetación  
 t = temperatura media diaria del mes [°C]  
 p = porcentaje mensual de horas de insolación respecto de la cantidad anual

## Determinación de la Evapotranspiración

### FAO Penman – Monteith (1990)

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

- ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia (mm/día). Pasto de 12 cm, 0,23 de albedo  
R<sub>n</sub>: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ /m<sup>2</sup> día)  
R<sub>a</sub>: radiación extraterrestre (mm/día)  
G: flujo del calor de suelo (MJ /m<sup>2</sup> día)  
T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)  
U<sub>2</sub>: velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)  
e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación (kPa)  
e<sub>a</sub>: presión real de vapor (kPa)  
e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>: déficit de presión de vapor (kPa)  
Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)  
γ: constante psicrométrica (kPa/°C)

## COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc)

El coeficiente de cultivo Kc es un factor que influye en el cálculo del uso consumo del cultivo, y ha sido tabulado para diferentes cultivos, estados de desarrollo y distintas condiciones climáticas. Estos valores se obtienen en forma experimental y dependen de la localidad.

Cultivo	Kc	Cultivo	Kc
Alfalfa	0.80 – 0.90	Empastadas	0.75 – 0.85
Porotos	0.60 – 0.70	Trébol	0.80 – 0.85
Maiz	0.75 – 0.85	Papas	0.65 – 0.75
Cereales	0.75 – 0.85	Arroz	1.00 – 1.10
Sorgo	0.70 – 0.80	Remolacha	0.65 – 0.75
Maravilla	0.65 – 0.75	Tabaco	0.70 – 0.80
Paltos	0.50 – 0.55	Tomates	0.65 – 0.70
Pomelos	0.55 – 0.65	Viñas	0.50 – 0.60
Naranjos	0.45 – 0.55	Nogales	0.60 – 0.70
Limones	0.45 – 0.55		

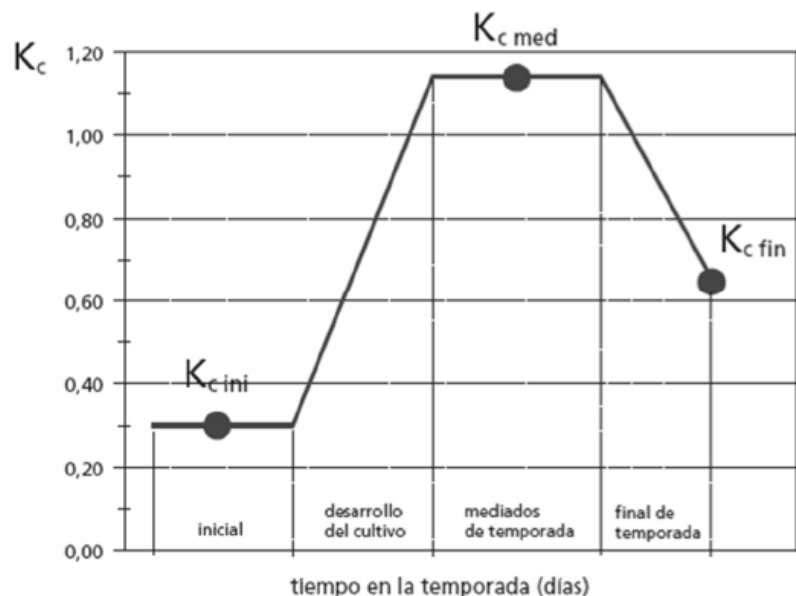
## Necesidades de los cultivos

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo.

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración potencial de referencia.

K<sub>c</sub>: coeficiente de cultivo



## USO CONSUMO (UC)

El consumo de agua de los cultivos, llamado uso consumo, se define como la cantidad de agua usada por cada cultivo o vegetal natural y que se utiliza en la formación de tejidos, se pierde por las hojas y se reintegra a la atmósfera debido a la interceptación de la lluvia o del sistema conductor del agua de riego.

Conocida la Evaporación de Bandeja (E<sub>b</sub>), que es análoga con la Evapotranspiración del Cultivo (ET<sub>c</sub>) y el Coeficiente de Cultivo (K<sub>c</sub>) se puede calcular el Uso Consumo:

$$\text{Uso Consumo} = K_c \times E_b \text{ (mm / día)}$$

El valor obtenido corresponde a la cantidad de agua a reponer en forma diaria mediante el riego al cultivo para que éste se desarrolle y produzca en forma satisfactoria.

## LÁMINA NETA

Es la cantidad de agua que se aplica por unidad de superficie durante un periodo de riego. Se expresa de la siguiente manera:

$$L.N = \frac{(C.C. - P.M.P.)}{100} * D.A. * C.R * P.R. * 1000 \text{ (mm) Ec. 3.1}$$

Dónde:

(C.C. – P.M.P.) = Agua Útil

C.C. = Capacidad de Campo<sup>4</sup>

P.M.P. = Punto de Marchitez Permanente<sup>5</sup>

D.A. = Densidad Aparente del Suelo.

C.R. = Criterio de Riego (0.6 a 0.4).

P.R. = Profundidad de las raíces del cultivo en metros.

## AGUA ÚTIL

### Capacidad de agua útil del suelo:

$$Cu \text{ (m}^3\text{)} = AU * S * z$$

S = superficie de suelo (m<sup>2</sup>)

z = Profundidad radicular (m)

AU = (CC – MP)

**Dosis:**  $D \text{ (mm)} = AFU * z = (0,5 \text{ a } 0,75) * ((CC - MP) / 100) * z$

Dosis es la cantidad de agua que se incorpora en cada riego para llevar el suelo a CC, antes de alcanzar la MP.

La dosis no tiene en cuenta el tiempo (m<sup>3</sup>, mm/ha, mm). Refleja la cantidad de agua que puede almacenar el suelo en base a las características físicas del mismo y la profundidad radicular del cultivo en análisis.

El valor máximo es:  $D_{max} \text{ (mm)} = (CC - MP) * z$

expresa el volumen de agua a reponer en el suelo para llevarlo a CC cuando éste ha llegado al estado de MP.

Si el contenido de humedad está dado en % de suelo seco (pss), debe multiplicarse por la densidad aparente  $D_a$ .

## CRITERIO DE RIEGO

El criterio de riego es un factor que se adopta para determinar el momento de aplicar un riego respecto del porcentaje de agua útil que posee el terreno. Si asumimos que cuando el terreno se encuentra en capacidad de campo el porcentaje de agua útil es un 100% y cuando está en el punto de marchitez permanente corresponde al 0% de agua útil.

Capacidad de Campo	100%	AGUA ÚTIL
	90%	
	80%	
	70%	
Punto A	60%	
Punto B	50%	
Punto C	40%	
Punto D	30%	
	20%	
	10%	
Punto de Marchitez Permanente	0%	

Los diferentes puntos indicados presentan la posibilidad de regar cuando el porcentaje de agua útil alcanza dichos valores y corresponden al criterio de riego a usar.

**Tabla N°11, Criterio de Riego o fracción de agotamiento del agua disponible “f”**

Cultivo	f	Cultivo	f
Alfalfa	0.60	Limón	0.25
Aguacate	0.30	Maíz grano	0.40
Apio	0.15	Melón	0.20
Brócoli	0.30	Naranja	0.35
Caña de azúcar	0.60	Patata	0.40
Cebolla	0.30	Plátano	0.30
Coliflor	0.45	Remolacha	0.50
Fresa	0.10	Repollo – col	0.35
Frutales hoja caduca	0.40	Tabaco	0.25
Guisante – arveja	0.25	Tomate	0.45
Judía – fréjol	0.50	Viñedo	0.55
Lechuga	0.35	Zanahoria	0.40

**Fuente:** Hablemos de Riego, Víctor Hugo Cadena Navarro, 2012.

Sin embargo al no disponer de estos valores se debe considerar un valor de “f” de 0.60 para cultivos con raíces profundas y 0.40 para cultivos con raíces superficiales.

## PROFUNDIDAD RADICULAR

Las raíces de las plantas son los órganos encargados de absorber los nutrientes y el agua. Dependiendo del tipo de cultivo y en qué lugar se encuentre arraigado, las raíces se prolongarán en busca de alimento. Es por ello que ese factor incide en el cálculo de aplicación de agua, a mayor profundidad de raíces más agua hay que aplicar durante el riego, por el mismo motivo de que debe atravesar más perfil de suelo para llegar a las raíces de la planta.

Una vez conocidos estos factores podemos determinar la cantidad de agua que se va a aplicar por riego también denominada lámina neta.

**Tabla N°12, Profundidad efectiva de las raíces de algunos cultivos**

Cultivo	Profund (metros)	Cultivo	Profund (metros)	Cultivo	Profund (metros)
Aguacate	0.8 - 1.2	Col y Coliflor	0.6 - 0.7	Patata	0.4 - 0.8
Alcachofa	0.6 - 0.9	Esparrago	1.2 - 1.8	Pepino	0.5 - 0.8
Alfalfa	1.2 - 2.2	Espinaca	0.4 - 0.6	Peral	0.7 - 1.2
Algodón	0.8 - 1.8	Fresa	0.2 - 0.3	Pimiento	0.4 - 0.8
Almendro	0.8 - 1.2	Fréjol	0.5 - 0.9	Piña	0.4 - 0.6
Arveja(guisante)	0.5 - 0.9	Girasol	0.9 - 1.8	Plátano	0.9 - 1.2
Avena	0.6 - 1.1	Lechuga	0.2 - 0.4	Pastos	0.6 - 1.0
Berenjena	0.5 - 1.0	Leguminosas de grano	0.5 - 1.0	Remolacha	0.5 - 1.0
Camote	0.6 - 0.9	Maíz grano	0.8 - 1.2	Sandía	0.6 - 0.8
Café	0.9 - 1.2	Maíz tierno	0.6 - 1.0	Soya	0.6 - 1.0
Caña de azúcar	1.0 - 1.2	Maní	0.9 - 1.0	Sorgo	0.6 - 0.9
Cebada	0.6 - 1.0	Manzano	0.9 - 1.2	Tabaco	0.5 - 0.9
Cebolla	0.3 - 0.6	Melocotón	0.8 - 1.1	Tomate	0.5 - 1.1
Cerezo	0.8 - 1.2	Melón	0.7 - 1.0	Trébol	0.7 - 0.9
Ciruelo	0.9 - 1.0	Nogal	1.0 - 1.2	Trigo	0.6 - 1.1
Cítricos	1.2 - 1.5	Olivo	0.9 - 1.2	Uva	0.8 - 0.9
Clavel	0.3 - 0.4	Palmera	0.7 - 0.9	Zanahoria	0.4 - 0.5

**Fuente:** Hablemos de Riego, Víctor Hugo Cadena Navarro, 2012

## CRITERIOS GENERALES DEL DISEÑO DE REGADÍOS

- A mayor humedad en el suelo, el potencial del agua es menor, aumenta su movilidad y es más fácilmente aprovechable por las plantas.
- A menor humedad en el suelo, el agua esta menos disponible para las plantas debido que aumentan las fuerzas de retención del suelo.



- Dos suelos diferentes y con la misma humedad, no ofrecen a las plantas la misma posibilidad de absorción de agua.
- Considerar que una planta no debería estar expuesta a desarrollar una presión de succión mayor a 15 atm para lograr un buen desarrollo vegetativo.
- La planta debe disponer de volúmenes de agua necesarios y suficientes para asegurar su alimentación y compensar las pérdidas por transpiración.
- Es indispensable que el suelo regado esté aireado.
- Considerar que la alimentación de agua solo se produce en zona del suelo explorado por las raíces.

## DISEÑO BASICO DE SISTEMAS DE RIEGO TECNIFICADO

Tipo de Cultivo	Tomate
Kc de Cultivo	0.65
Profundidad de Raíces	0.50 m
Criterio de Riego	0.40
Riego Recomendado	Goteo
Eficiencia de Riego	90%
Evaporación de Bandeja	6.5 mm/día
Tipo de Suelo	Franco arcilloso
Densidad Aparente Suelo	1.35 g/cm <sup>3</sup> (1.35 a 1.50 g/cm <sup>3</sup> )
Capacidad de Campo	18% (18% a 26%)
PMP	8% (11% a 15%)

### Uso Consumo.

$$U.C. = Kc * Evt \quad mm/día \quad Ec. AA - 5$$

$$U.C. = 0.65 * 6.5 \text{ mm/día} = 4.22 \text{ mm/día}$$

### Lámina Neta.

$$L.N = \frac{(C.C. - P.M.P)}{100} * D.A. * C.R * P.R. * 1000 \text{ (mm)} \quad Ec. 3.1$$

$$L.N = \frac{(18 - 8)}{100} * 1.35 * 0.40 * 0.50 * 1000 \text{ (mm)}$$

$$L.N = 27 \text{ mm}$$

### Requerimiento Bruto.

$$R. B. = \frac{\text{Uso consumo cultivo}}{\eta} \text{ (mm/día) Ec. 3 - 2}$$

$$R. B. = \frac{4.22}{0.9} \text{ (mm/día)}$$

$$R. B. = 4.69 \text{ mm/día}$$

### Frecuencia de Riego.

$$F. R. = \frac{L. N.}{R. B.} \text{ (días) Ec. 3 - 3}$$

$$F. R. = \frac{27}{4.69}$$

$$F. R. = 5.76 \text{ días}$$

Para no provocar estrés hídrico en la planta la frecuencia recomendada no debe exceder de los 3 días, por lo tanto tenemos que recalcular la lámina neta.

$$3 = \frac{L. N.}{4.69}$$

$$L. N. = 4.69 * 3 = 14.07 \text{ mm}$$

## EL SUELO: CLASIFICACIÓN

Para regular su empleo en regadíos los suelos se clasifican previamente. Las clasificaciones que hoy día utilizan los edafólogos se pueden reunir en dos grandes grupos:

- Clasificaciones basadas en las características de formación de los suelos, que se apoyan en los orígenes de dichos suelos (Kubiena y Baldwin son las más conocidas).
- Clasificaciones basadas en las características del perfil de un sondeo del suelo (Storie y 7ª aproximación USDA son las más usadas).

Desde el punto de vista de los regadíos resulta más interesante la clasificación de suelos del Bureau of Reclamation (BOR), que tiene en cuenta no sólo las características fisicoquímicas de los suelos, junto con la topografía y el drenaje, sino que también considera sus producciones estimadas en regadíos por lo cual sirve para los trabajos de planificación. Por otra parte, esta clasificación es la más utilizada y conocida por todos los técnicos. En esta clasificación los suelos se ordenan de mejor a peor en seis clases, a las cuales se les asigna un color de acuerdo con la siguiente escala:

Clase	Color
I	Amarillo
II	Verde
III	Azul
IV	Marrón
V	Rosa
VI	Sin color

La clasificación tiene en cuenta las características del suelo, la topografía y el drenaje. Las clases I, II y III son regables, la clase IV es regable con fuertes deficiencias, la clase V necesita estudios complementarios para conseguir su puesta en riego y la clase VI no es regable.

La clasificación del B.O.R. tiene tres niveles de detalle: estudios de reconocimiento, estudios semidetallados y estudios detallados.

## EL AGUA EN EL SUELO

El balance hídrico fundamental indica que las precipitaciones se convierten en aportaciones (escorrentía) y evapotranspiración. Analizando con más detalle el balance, nos encontramos con que las principales etapas que recorre el agua en el mismo son las siguientes:

- Precipitación
- Evaporación
- Transpiración
- Humedad del suelo en la zona no saturada
- Escorrentía superficial
- Flujo a través de la zona no saturada: percolación y elevación capilar.
- Flujo del agua freática: drenaje y filtraciones

Para estudiar la vida vegetal interesa fundamentalmente conocer el comportamiento del agua en el suelo dentro de estas etapas.

El nivel freático, separa la zona saturada de agua del suelo de la zona no saturada de agua.

Por encima del nivel freático existe una franja capilar casi saturada, en la que el agua está en contacto con el nivel freático y sostenida por elevación natural.

El agua que está debajo del nivel freático recibe el nombre de agua freática y se define como la masa de agua que existe en un suelo en el que todos los poros están saturados de agua.

Para conocer las posiciones del agua en un determinado suelo se realizan sondeos en el mismo. El agua fluye dentro de estos sondeos hasta que se alcanza un nivel de equilibrio, en el que la presión del agua es igual a la presión atmosférica, y precisamente este nivel es el que hemos llamado nivel freático.

Para observar las variaciones de la capa freática a lo largo de un cierto período de tiempo se utilizan los piezómetros, que son pozos de observación que alcanzan el nivel más bajo que se espera en el período, y que se revisten con tubos perforados.

Las posiciones límite de la capa freática en un suelo se pueden detectar también por otras características.

Por debajo del nivel mínimo de la capa freática no hay oxidación, esto se traduce en que los suelos arcillosos presentan tonos azulados y las turbas tonos pardos claros. En las zonas de oscilación de la capa freática, donde alternan los fenómenos de oxidación y reducción, son frecuentes las manchas negruzcas de manganeso.

En la zona no saturada, el agua está sometida a la acción del potencial mátrico del suelo, que es una presión negativa (succión), resultante de la combinación de las fuerzas capilares con las fuerzas de absorción de las partículas del suelo. Por lo tanto, la presión del agua en cualquier punto de la zona no saturada es menor que la presión atmosférica, lo cual significa que se requiere una succión para poder extraer agua de dicha zona no saturada.

## EL AGUA EN LA NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS

El agua es fundamental en el aspecto biológico de la planta, pero no hay que olvidar su importancia como vehículo de las demás sustancias nutritivas que contiene el suelo, interviniendo, además, en las reacciones químicas que se producen en la hoja.

Existe, además, otro aspecto del agua en la vida de las plantas, cuya importancia es esencial para el desarrollo de las mismas, y que es el papel regulador en los fenómenos químicos y microbiológicos que se producen en el suelo.

Durante el desarrollo del ciclo agro hidrológico el comportamiento del agua en el suelo no es estático; cuando el agua de riego o lluvia entra en contacto con el terreno se verifica en primer lugar su percolación desde los estratos superiores hacia los inferiores; en esta fase, los macroporos y microporos del suelo se llenan de agua siendo expulsado el aire. En fase posterior los macroporos de aquellos estratos que ya han sido atravesados por el agua se llenan nuevamente de aire, mientras que los microporos quedan todavía saturados de humedad. Después de un cierto tiempo, bajo la fuerza de absorción de las raíces de las plantas, esta humedad se reduce gradualmente dejando que el aire llene de nuevo, en todo o en parte, los espacios vacíos de los microporos.

Como consecuencia del fenómeno descrito los procesos aerobios y anaerobios se alternan continuamente en el terreno, asegurando a las plantas un continuo aprovechamiento de elementos nutritivos asimilables.

Cuando la humedad del terreno se agota, la microflora aerobia favorece la rápida oxidación de los componentes orgánicos y minerales del suelo, pero por carencia de agua estos elementos no pueden ser absorbidos por la planta.

Por el contrario, si el agua ocupa los poros del terreno durante un tiempo prolongado, la circulación del aire no existe, con el consiguiente fenómeno de asfixia de las raíces y fermentación anaerobia.

El conocimiento hidrológico del terreno y de la distribución de la humedad en el suelo constituye un factor determinante para el logro de las mejores producciones tanto en cultivos de secano como de regadío.

## NECESIDADES DE AGUA DE LAS PLANTAS

La determinación de las cantidades de agua que necesitan las plantas para su nutrición representa el aspecto más importante de la problemática del riego; tanto desde el punto de vista biológico como económico.

Está comprobado que la cantidad de agua absorbida por las plantas es sólo una mínima parte del consumo total (" 1%), mientras que la porción más importante se elimina por evaporación del agua de la savia bruta y su emisión a la atmósfera en grandes cantidades a través de los estomas (transpiración).

Los factores que intervienen en la transpiración son los siguientes:

- Factores de la especie vegetal; la densidad de estomas varía de 1 a 10 según el tipo de plantas
- Factores de crecimiento de las plantas. A mayor edad, mayor número de hojas y mayor transpiración
- Factores climatológicos; temperatura, radiación solar, pluviometría, humedad del aire, velocidad del viento
- Factores de luminosidad; la diferencia de transpiración con luz a transpiración en oscuridad puede variar de 1 a 50

Paralelamente al consumo de agua exclusivo de las plantas, se produce un fenómeno de consumo de agua directamente en el terreno, y este proceso viene influenciado por los siguientes factores:

- Factores de orden climático; temperatura, radiación solar, pluviometría, humedad del aire, velocidad del viento.
- Factores dependientes del suelo; textura, estructura, porcentaje de sustancias orgánicas.
- Factores de orden hidrológico; pH del suelo, profundidad de la capa freática.
- Factores de orden agro fitológico; labores del terreno, cobertura vegetal, etc.

Se denomina evapotranspiración a la suma de los dos fenómenos antes expuestos, y se conoce internacionalmente por las siglas ET.

Dentro de este concepto se llevan a cabo dos distinciones:

- Se llama evapotranspiración actual a la cantidad de agua realmente consumida por un terreno cultivado de acuerdo con las disponibilidades de agua.
- Se llama evapotranspiración potencial a la cantidad de agua que podría consumir un terreno cultivado en condiciones óptimas, al cual se suministrara agua según sus necesidades. Todos aquellos terrenos cultivados que tengan una evapotranspiración potencial mayor que la evapotranspiración actual son deficitarios de agua, y precisamente la diferencia entre los dos tipos es la necesidad de riego.

Hay gran cantidad de métodos propuestos para deducir la evapotranspiración potencial. Todos son experimentales y se pueden agrupar en cuatro categorías:

- Métodos basados en la correlación entre la evapotranspiración y la temperatura.
- Métodos basados en la correlación entre la evapotranspiración y la evaporación.
- Métodos basados en la correlación entre la evapotranspiración y el déficit de humedad del aire.
- Métodos basados en el balance energético de las radiaciones solares.

Todos estos métodos determinan en general la evapotranspiración potencial sin tener en cuenta el tipo de cultivo.

La evapotranspiración potencial se representa por una curva de necesidades de agua de la planta a lo largo del ciclo vegetativo.

## MÉTODOS PARA REMEDIAR LA INSUFICIENCIA DE PRECIPITACIONES

Los métodos que el hombre ha empleado se pueden clasificar en dos grandes grupos: los que actúan sobre el consumo de agua del terreno y los que actúan modificando el régimen de aportaciones.

Dentro del primer grupo destacan el empleo de abonos orgánicos para modificar la estructura del suelo y aumentar así la capacidad de retención del mismo, incrementando de este modo el efecto regulador, y el barbecho para reducir la evaporación al impedir la ascensión capilar del agua.

Las aportaciones de agua se han conseguido en algunas ocasiones mediante la lluvia artificial, pero el principal procedimiento utilizado dentro de este grupo ha sido y es el de los regadíos.

## EL CLIMA

La influencia del clima en un regadío es obvia, condicionando tanto los cultivos a implantar como las cantidades de agua que hay que aportar al suelo. Por lo tanto todo estudio de regadío debe ir precedido de un estudio climatológico que detalle las pluviometrías, las temperaturas e incluso, los vientos de la zona.

## LOS CULTIVOS

La influencia de los cultivos en la técnica del riego es evidente, ya que cada uno de ellos tiene el ciclo vegetativo en una determinada época del año y unos consumos de agua específicos. Por otra parte, la profundidad de las raíces, condiciona el espesor del suelo que se puede utilizar como depósito regulador. Además, algunos tipos de cultivo son incompatibles con ciertos sistemas de riego. Por ejemplo, la patata no admite el riego por inundación, ya que se estropea.

Sin embargo, es un hecho comprobado que la mayoría de los terrenos en riego son empleados para un gran número de cultivos y que las necesidades de agua de los mismos se compensan unas con otras, llegando en las grandes zonas de cultivos múltiples a unos consumos medios bastante

constantes.

Al proyectar una zona de riego es necesario conocer los cultivos que se van a implantar, ya que pueden tener influencia decisiva en el sistema a emplear y, sobre todo, en la capacidad de transporte necesaria en los terminales de las redes.

## LOS REGANTES

El factor humano es el más influyente en una transformación en regadío, pudiéndose contemplar dos aspectos distintos: la aptitud del regante para manejar el agua, y la disposición del mismo para el cambio del sistema de explotación de las tierras.

Deben realizarse siempre unos estudios sociológicos, ya que desgraciadamente son bastantes las zonas en que, disponiendo de agua, no se riega por falta de vocación de los agricultores, o por haber proyectado un sistema de riego poco adecuado a los mismos.

## ESTRUCTURA DE LA PROPIEDAD

El último factor, pero no el menos importante, que influye en un regadío es la estructura de la propiedad, ya que el grado de parcelación de las tierras puede afectar enormemente al sistema de distribución de agua, y si no se tiene en cuenta al redactar los proyectos puede dar lugar a transformaciones en regadío totalmente inoperantes. Desde este punto de vista es más peligroso no tener en cuenta la existencia de un excesivo grado de parcelación, que como queda dicho puede impedir el regadío, que ignorar los grandes latifundios, en los cuales el olvido de este factor de la propiedad sólo puede suponer como mucho el encarecimiento de la transformación.

También hay que considerar la futura forma de explotación de la tierra, ya que las sociedades cooperativas y pools de siembra, hoy en expansión, pueden condicionar el empleo de un determinado sistema de riego.

## SISTEMAS DE RIEGO

La técnica del riego dispone de varios sistemas para la aplicación del agua al suelo, por lo que al redactar un proyecto se debe realizar una adecuada elección del sistema de acuerdo con los factores condicionantes descritos en el apartado anterior.

Atendiendo al tipo de escurrimiento, los sistemas de riego se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- RIEGOS POR GRAVEDAD
- RIEGOS A PRESIÓN

Los **riegos por gravedad** necesitan disponer del agua en el punto más alto de la parcela y a la presión atmosférica.

Los **riegos a presión** necesitan disponer del agua a una determinada presión que, convenientemente aprovechada, permite aplicar el agua al suelo.

## RIEGO POR GRAVEDAD

Los riegos por gravedad se conocen de antiguo, y constituyen el sistema más utilizado en todos los regadíos del mundo. Se pueden dividir en los tres grandes grupos siguientes:

- Riegos por escurrimiento.
- Riegos por inundación.
- Riegos por infiltración.

## RIEGOS POR ESCURRIMIENTO

Aplican el agua al suelo, haciéndola rebosar de la reguera que domina la parcela, y dejándola escurrir por el terreno hasta alcanzar los puntos bajos del mismo, en donde es recogida por los azarbes o por las siguientes regueras. La superficie dominada por una reguera se llama arriate. La lámina de agua suele ser muy delgada para que no provoque erosiones en el terreno.

Este sistema es aplicable a terrenos con pendientes comprendidas entre el 3-30%, sin que sea necesario llevar a cabo abancalamiento, aunque frecuentemente convenga efectuar una nivelación somera del suelo para eliminar las irregularidades, consiguiendo así una pendiente uniforme.

Se emplea casi exclusivamente para praderas.

Las principales pérdidas de agua en este sistema de riegos se producen por escorrentía superficial, por lo que no se adapta bien a los terrenos impermeables. En cambio, se controlan correctamente las pérdidas por percolación.

Dentro del sistema se pueden distinguir 4 métodos de aplicación del agua:

- Método de regueras horizontales. Es el más económico. Funciona bien con pendientes comprendidas entre el 3-10%, aunque su campo de aplicación pueda llegar hasta terrenos con pendientes de hasta el 30%. Consiste en cubrir el terreno con regueras en tierra horizontales y de sección constante. Una vez alimentadas, las regueras desbordarán y el agua se extenderá por el terreno escurriendo hasta alcanzar la siguiente reguera, llenándola y volviéndose a repetir el proceso.

El principal inconveniente de este sistema desde el punto de vista constructivo es el replanteo de la reguera horizontal, que ha de seguir una curva de nivel.

La separación entre regueras depende de la pendiente del terreno y de la permeabilidad del mismo, pudiéndose tomar como separación media la de 8 m. Asimismo, la longitud de la reguera depende de la permeabilidad del suelo, teniendo un valor medio de 30 m, sin que se lleguen nunca a superar los 50 m.



- Método de regueras inclinadas o en espiga. Es una variante del anterior, consistente en emplear regueras rectas, formando un cierto ángulo con la cacera de alimentación y teniendo una cierta pendiente. Como consecuencia, la sección transversal de la reguera es variable y decreciente para poder provocar el desbordamiento del agua con caudales decrecientes.

Se aplica este método a terrenos cuya pendiente está comprendida entre el 3-6%. El método tiene la ventaja de la gran facilidad del trazado de las regueras, pero tiene el inconveniente de que el escurrimiento del agua no es tan perfecto como en el caso de las horizontales.

- Método de planos inclinados o de simple arriate. Consiste en transformar la pendiente del terreno, convirtiéndolo en una serie de planos inclinados con mayor pendiente. La reguera se dispone en la parte alta de cada plano y el desagüe en la parte baja. Este método proporciona mayor eficacia que los dos anteriores, pero tiene el inconveniente del elevado coste del movimiento de tierras.

- Método de dobles planos inclinados o de doble arriate. Es una variante del anterior para disminuir el movimiento de tierras en los terrenos muy llanos. Consiste en disponer planos con pendiente alternativa, ocupando la reguera la arista superior de intersección de los dos planos y disponiéndose los desagües en las partes bajas.

## RIEGO POR INUNDACIÓN

Llamados también riegos por sumersión, consisten en mantener el terreno inundado para que el agua penetre por infiltración en el suelo. Pueden ser de inundación permanente o temporal.

- Inundación permanente. La tierra permanece inundada durante todo el período de vegetación, variando únicamente la altura del agua en función de la edad de la planta. La inundación permanente exige nivelación total del terreno (en España se usa casi exclusivamente para el cultivo de arroz).

- Inundación temporal. Llamada también riego a manta, mantiene el terreno inundado durante el tiempo necesario para que la humedad del suelo alcance la capacidad de campo en toda la profundidad útil de las raíces. Con objeto de lograr la mayor uniformidad posible en el reparto del agua se suele dividir el terreno en compartimentos o eras, limitados por pequeños diques de tierra, aunque las tendencias modernas suprimen la construcción de estas eras, consiguiendo así una economía de mano de obra a costa de la uniformidad del riego.

Los riegos por inundación necesitan terrenos bien nivelados, de superficie casi horizontal (3 0/00 máximo).

Se emplean para caso todos los tipos de cultivos, plantas forrajeras, plantas industriales, cultivos arbóreos, etc.

Las mayores pérdidas de agua se producen por percolación, por lo que estos riegos están indicados en terrenos relativamente impermeables. Por el contrario, las pérdidas por escorrentía son bastante reducidas en este sistema de riego.

## RIEGO POR INFILTRACIÓN

Los riegos por infiltración o por surcos consisten en aplicar el agua al terreno dejándola escurrir por

unos surcos, desde los que se filtra al suelo llegando a las raíces de las plantas que se cultivan sobre caballones elevados.

Este sistema de riego se debe emplear en terrenos de permeabilidad media, ya que en terrenos de permeabilidad reducida las pérdidas por escorrentía son elevadas, mientras que en terrenos muy permeables, las pérdidas por percolación alcanzan grandes valores.

El sistema de riego por infiltración se adapta lo mismo a cultivos herbáceos que a cultivos leñosos.

La aportación de agua a los surcos se suele hacer mediante sifoncillos de PVC.

Los terrenos ondulados pueden regarse con este sistema disponiendo los surcos con la debida inclinación, pero en general, resulta más económico realizar una sistematización previa del terreno, con pendientes parecidas a las del riego a manta y disponiendo los surcos en el sentido de la máxima pendiente.

## RIEGO A PRESIÓN

Los **riegos a presión** son relativamente modernos. Se pueden dividir en los dos grupos siguientes:

- RIEGOS POR ASPERSIÓN
- RIEGOS LOCALIZADOS

### RIEGOS POR ASPERSIÓN

Consisten en aplicar el agua al suelo en forma de lluvia. Esto se consigue a través de unos mecanismos denominados aspersores, que transforman la energía de presión en energía cinética, dándole salida a través de una tobera. Se aprovecha también la energía del agua para hacer girar el aspersor, que de esta manera barre un campo casi siempre circular.

Según la presión necesaria en tobera, los riegos por aspersión pueden ser de baja presión (1.5-3 atm.), de media presión (3-5 atm.) y de alta presión (más de 5 atm.).

En función del diámetro de la tobera y de la presión en la misma, los aspersores tienen un caudal y un alcance variables, así como también es distinto el tamaño de la gota de agua. Hoy día existe una gran gama de aspersores que permiten al proyectista seleccionar el modelo más adecuado en función del tipo de terreno y de la economía del riego.

Una red de aspersores puede cubrir el terreno a regar de diversas maneras, según se dispongan en cuadrado, en rectángulo o en triángulo; y, según los aspersores tengan un campo circular, o solamente sectorial.

Las instalaciones de riego por aspersión consisten en esencia en una red de tuberías que conduce el agua hasta los aspersores. Los diversos tipos de tuberías y aspersores dan origen a múltiples modalidades dentro del sistema, que se pueden agrupar del siguiente modo:

- **Equipos móviles.** Se instalan sobre el terreno en cada campaña de riegos y se trasladan a lo largo del mismo para suministrar agua a las diversas parcelas de la finca.
- **Equipos semifijos.** Tienen una parte de la instalación enterrada y fija, y otra parte móvil que se desplaza a lo largo del terreno, conectándola a la tubería fija en diversos puntos de toma.
- **Equipos de cobertura total.** Todas las tuberías están enterradas y fijas, únicamente se cambian los aspersores.
- **Equipos fijos.** Toda la instalación, incluidos los aspersores, está fija en el terreno. Pueden funcionar simultáneamente todos los aspersores, aunque lo más frecuente es que se rieguen alternativamente las diversas partes de una finca.
- **Equipos mecanizados.** Cubren grandes superficies de terreno, desplazándose sobre el mismo por procedimientos mecánicos. Estos equipos son objeto de patentes, existiendo gran variedad de modelos. Entre ellos se pueden destacar las alas regantes, montadas sobre ruedas que se desplazan por arrastre con un tractor o bien mediante pequeños motores conectados al ala. Las plumas, que consisten en una gran viga en doble voladizo, de varias decenas de metros, que sostiene una tubería provista de aspersores y riega girando impulsada por el agua; va montada sobre un carro móvil y se desplaza por arrastre. Los pivotes, que consisten en una gran estructura de varios cientos de metros de longitud provista de aspersores, que descansan sobre apoyos montados sobre ruedas y separados unos 30-40 m., toda la estructura gira sobre un extremo, donde está la toma de agua, mediante motores incorporados a los apoyos. El tiempo de rotación suele ser de 24 h., con lo que se consigue una gran frecuencia de riegos, lo que va en beneficio del cultivo.

Con los equipos mecanizados se pueden regar grandes superficies de terreno con gran ahorro de mano de obra. Como contrapartida, exigen fincas de gran extensión o bien, parcelas agrupadas en sistemas cooperativos.

Las **ventajas del riego por aspersión** son las siguientes:

- Se pueden emplear dosis de riego menores que en los riegos por gravedad y mucho mejor controladas en su cuantía. Esto se traduce en una mayor economía del agua, mejor rendimiento de los cultivos y sobre todo, permite regar suelos de poco espesor situados sobre un estrato impermeable, que por gravedad no sería regables a causa de la forzosa elevación de la capa freática.
- Mediante el control de las dosis y de la intensidad de lluvia se pueden regar terrenos de alta permeabilidad sin que las pérdidas por percolación sean muy elevadas.
- Las instalaciones pueden utilizarse en invierno para dar riegos de protección contra las heladas.
- En general exige menos mano de obra, y menos especializada, que el riego por gravedad, salvo en el caso de grandes bancales (muy costosos) que permiten el riego con grandes caudales (más de 100 l/s).

Las **desventajas del riego por aspersión** son:

- Los costes de instalación son altos, ya que los plazos de amortización de las instalaciones oscilan entre 5 y 20 años.

- Salvo en casos excepcionales, existe un consumo de energía que cada vez tiene más importancia.
- Se ha de vigilar fundamentalmente el tamaño de la gota de agua para que no provoque apelmazamientos del terreno y no cause daños a las plantas.
- El riego por aspersión pierde eficacia y uniformidad cuando los vientos son intensos.
- Los cambios de postura de los equipos móviles o semifijos son muy incómodos en un terreno regado.

## RIEGO LOCALIZADO

Consisten en la aplicación del agua al suelo, restringido a la zona de aprovechamiento de las plantas.

La característica fundamental es que se riega con la frecuencia necesaria para mantener una humedad en el suelo, normalmente por encima de la capacidad de campo en un entorno reducido de las raíces.

Esta técnica de riego difiere esencialmente de la empleada en los demás sistemas, en los cuales se aplica el agua a intervalos bastante grandes y en las dosis necesarias para alcanzar la capacidad del campo, existiendo siempre un cierto período de tiempo durante el cual el terreno está saturado, y siendo por lo tanto necesario, dejar transcurrir un gran intervalo entre dos riegos para que no se produzca la asfixia de las raíces. En el riego localizado el agua penetra lentamente sin llegar a saturar el terreno, lo que permite alcanzar unos altos contenidos de humedad sin que falte aireación a las raíces. Por otra parte, está comprobado que en este tipo de riegos una buena parte de las raíces se desarrolla en la zona seca.

Otras características de este tipo de riego son:

- No se moja la totalidad del suelo.
- Se utilizan pequeños caudales a bajas presiones (1-2 atm.).
- El agua se aplica en las proximidades de las plantas con un elevado número de puntos de emisión.
- La zona de humedad del suelo correspondiente a cada punto de emisión se denomina bulbo. La forma de este bulbo es estrecha y alargada en los terrenos arenosos, y ancha y corta en los arcillosos.
- En las partes superiores del bulbo se produce una acumulación de sal como consecuencia de la pequeña evaporación del agua de riego.

Los riegos localizados se dividen en dos grandes grupos:

- Riegos por goteo. El agua se aplica directamente al suelo con caudales inferiores a 12 l/h. Los puntos de emisión se llaman goteros.
- Riegos por difusores o miniaspersores. El agua se expulsa al aire con caudales superiores a 12 l/h., e inferiores a 120 l/h.

Los consumos de agua en este tipo de riego se basan también en la evapotranspiración potencial, pero teniendo únicamente en cuenta el porcentaje de suelo ocupado por las plantas, ya que en el resto no se produce consumo de agua.

Las instalaciones de riego localizado tienen siempre una estación de control en la que existe un conjunto de aparatos para medir el agua, filtrarla, tratarla, incorporar fertilizantes, controlar la presión, medir el tiempo de riego, etc.

La superficie regada desde una estación de control se denomina “unidad operacional de riego”. Esta unidad operacional se divide en unidades de riego, en cada una de las cuales se instala en cabecera una válvula volumétrica para determinar la dosis de agua a aplicar.

Cada unidad de riego se divide en subunidades de riego, cada una de las cuales lleva en cabecera un control de presión del agua.

El transporte del agua desde la estación de control hasta los puntos de emisión se lleva a cabo mediante tuberías que reciben las siguientes denominaciones:

- Tuberías principales, son las que transportan el agua desde la estación de control hasta las unidades de riego.
- Tuberías secundarias, son las que llevan el agua a las distintas subunidades de riego.
- Tuberías terciarias, son las que alimentan dentro de una subunidad de riego a las tuberías laterales.
- Tuberías laterales, son las que llevan conectados los emisores.

En los riegos por goteo el emisor del agua se llama gotero y debe reunir las dos cualidades siguientes:

- Caudal pequeño, pero constante y poco sensible a las variaciones de presión y temperatura.
- Orificio suficientemente grande para evitar obstrucciones y colmatado.

Estas dos cualidades son, en cierto modo, contrapuestas, lo que hace muy difícil la obtención de un gotero perfecto, que por otra parte debe ser un aparato de coste muy reducido, ya que el número de goteros instalados por ha., es muy grande. Esto ha hecho que el número de goteros existentes en el mercado sea muy amplio y de características muy diversas, debiendo el proyectista seleccionar entre las existencias para conseguir que las ventajas del gotero sean superiores a sus inconvenientes, ponderando debidamente la inversión inicial y los costes de mantenimiento y amortización sin perder de vista la uniformidad del material, que es muy importante en este tipo de aparatos.

Los difusores o miniaspersores tienen menos inconvenientes que los goteros, al ser su caudal notablemente más grande.

Los riegos localizados suministran agua directamente a las plantas, por lo tanto sus instalaciones dependen del cultivo, de las prácticas culturales y del tipo de emisor elegido.

Las **ventajas de los riegos localizados** son las siguientes:

- Ahorro de agua (hasta el 50%), mano de obra, abonos y productos fitosanitarios.
- Posibilidad de regar cualquier tipo de terreno.
- Posibilidad de empleo de aguas salinas, dado el alto contenido de humedad que se proporciona al suelo.
- Aumento de la producción y mejor calidad de la misma.
- Disminución de las malas hierbas al no mojar toda la superficie del suelo.

Frente a estas ventajas existen los siguientes **inconvenientes**:

- Elevado coste.
- Poca flexibilidad del sistema para pasar de un cultivo a otro.
- Necesidad de lavar periódicamente el terreno (4-5 años) para eliminar las sales que se acumulan en los bulbos.
- Posibilidad de obstrucción de los emisores.
- Se necesita una alta especialización por parte de los regantes, ya que este riego es el más tecnificado que existe.
- Se pueden provocar enfermedades en las plantas, favorecidas por la humedad constante de los emisores.

## OTROS SISTEMAS DE RIEGO

Además de los sistemas descritos existen otros muchos cuyo campo de aplicación es muy reducido o bien se encuentran en fase de experimentación. A título indicativo se pueden citar los riegos por infiltración subterránea, los riegos por bandas de papel húmedo, los riegos de protección de heladas, etc.

## ELECCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

A la vista de los factores condicionantes del riego y de los sistemas existentes, el proyectista debe realizar la elección del sistema llevando a cabo una primera selección desde el punto de vista técnico, es decir, eligiendo aquellos sistemas que mejor se adapten a los factores condicionantes. Para luego, dentro de los sistemas previamente elegidos, se debe realizar una valoración económica para seleccionar el sistema de riego más idóneo.

Un factor importante en esta elección debe ser la eficacia del riego, que se mide por el porcentaje de agua que queda en el terreno en relación con el total de agua empleada. La eficacia depende tanto del sistema de riego como del tipo de terreno y la experiencia del regante. Resulta por lo tanto difícil dar cifras a este respecto, pero como valores medios se pueden adoptar los siguientes:

Riegos por gravedad	50-65%
Riegos por aspersión	65-75%
Riegos localizados	75-90%

Pereira y Trout (1999), clasificaron y categorizaron los Sistemas de Riego como:

- Riego de superficie, o por gravedad, comprendiendo el riego por inundación, en canteros tradicionales y surcos cortos o en canteros con nivelado de precisión, el riego por sumersión en canteros para arroz, el riego por infiltración en surcos o en fajas y el riego por escorrentía libre.
- Riego por aspersión, con sistemas estáticos y disposición en cuadrícula, fijos o móviles, con sistemas móviles de cañón o ala sobre carro tirada por enrollador o por cable, y sistemas de lateral móvil, pivotante o de desplazamiento lineal.
- Riego localizado, o microrriego, comprendiendo el riego por goteo, por difusores o borboteadores (“bubblers”), por tubos perforados o porosos, la micro-aspersión y el riego sub-superficial por tubos perforados y tubos porosos.

Tabla 4.1. Factores que favorecen la elección del método de riego.

Factores	Riego de superficie	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: Pereira y Trout (1999).

Tabla 4.2. Valores indicativos de las eficiencias de aplicación para sistemas de riego bien proyectados y bien mantenidos.

Sistemas de riego	Eficiencias (%)
• Riego por gravedad con nivelado de precisión:	
– Surcos.	65 – 85
– Fajas.	70 – 85
– Canteros.	70 – 90
• Riego por gravedad tradicional:	
– Surcos.	40 – 70
– Fajas.	45 – 70
– Canteros.	45 – 70
• Riego de arroz, canteros en inundación permanente.	25 – 70*
• Riego por aspersión:	
– Sistemas estacionarios de cobertura total.	65 – 85
– Sistemas estacionarios desplazables manualmente.	65 – 80
– Laterales con ruedas.	65 – 80
– Cañón con enrollador o con cable.	55 – 70
– Laterales móviles, con pivote central.	65 – 85
• Microriego (riego localizado):	
– Goteros, $\approx$ 3 emisores por planta (frutales).	85 – 95
– Goteros, < 3 emisores por planta.	80 – 90
– Micro-aspersores y “difusores” (frutales).	85 – 95
– Línea continua de emisores gota-a-gota.	70 – 90

\* Los valores más bajos se refieren a canteros tradicionales, mal nivelados y sin un adecuado control de la lámina de agua del cantero, mientras que los más altos se refieren a canteros de grandes dimensiones, bien nivelados y con buen control de la lámina de agua.

## ORGANIZACIÓN DE UN REGADÍO

### SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN

Existen tres procedimientos básicos que se siguen en la práctica para llegar a poner a disposición de cada regante la cantidad de agua que precisa y que son: distribución continua, distribución por rotación y distribución a demanda.

Sea cual fuere el sistema de explotación se presenta con frecuencia el caso de “riegos preferentes”, sobre todo en las zonas en las que el regadío ha ido en aumento. Se trata de una situación jurídica que obliga a que en primer lugar se atienda a ellos y sólo si hay excedentes de agua al resto.

### DISTRIBUCIÓN CONTINUA

Este método consiste en dar a cada usuario de forma continua, durante todo el período de riegos, el caudal que le corresponda. El consumidor tiene la ventaja de que puede distribuir en su finca el agua como más le convenga; las acequias funcionan continuamente y por tanto su sección es mínima.

Este sistema solamente se puede emplear cuando el caudal continuo que se precise tenga cierta



importancia, ya que si es inferior al módulo no resulta manejable, salvo que se construyan depósitos reguladores.

## DISTRIBUCIÓN POR ROTACIÓN

Es el método más frecuentemente utilizado y evita la dificultad mencionada anteriormente. Se distribuye el agua en cada propiedad durante determinados intervalos de tiempo, pero con un caudal igual al módulo, que en general es más importante que el gasto continuo necesario. El tiempo de riego de cada propiedad se reduce proporcionalmente de forma que reciba el mismo volumen de agua que si se regara con un caudal continuo.

Cada finca tiene una toma en la acequia de distribución provista de dos compuertas para poder tomar el agua en el instante correspondiente.

Se riega sucesivamente cada una de las parcelas durante unos tiempos determinados, de forma tal que en un mes, cada parcela recibe unos riegos espaciados que equivalgan al caudal continuo durante ese tiempo. Las parcelas se riegan en un orden estableciendo una rotación entre ellas. Para el cómputo del tiempo hay que tener en cuenta el tiempo que tarda el agua desde el partidador principal a la toma de cada finca.

## DISTRIBUCIÓN A LA DEMANDA

Consiste en dar agua a los regantes cada vez que la pidan y el volumen que necesitan. Este método necesita conducciones de capacidad superior a la estricta; es un tipo de distribución continua en la que los usuarios toman el agua cuando quieren. Presentan ventajas en los primeros años de puesta en riego de una zona, ya que permite a los agricultores iniciarse poco a poco en los métodos de riego sin obligarles a cumplir normas restrictivas; permite también experimentar la red y establecer un reglamento.

En las redes importantes de riego por aspersión se tiende hoy, sin embargo, a este sistema por su sencillez y economía de explotación.

Las redes se prevén entonces con cierta “garantía probabilística” frente al uso simultáneo de todos los aspersores de una o varias zonas.

El efecto de una simultaneidad, cuya probabilidad puede calcularse, es una caída de presión en los aspersores que es inmediatamente apreciada por el regante, al que basta entonces esperar un poco de tiempo, si la red está bien calculada, para que desaparezca.

## LA AUTOMATIZACIÓN EN EL RIEGO

La necesidad cada vez más acuciante de reducir las pérdidas de agua por una parte y la carestía de la mano de obra y la dificultad de encontrarla, junto con el rápido desarrollo de la tecnología de los automatismos, programadores y mandos de distancia por otra, han hecho que se preste hoy día una atención creciente al desarrollo de la automatización en el riego.

El agua hay que suministrarla al terreno cuando el grado de humedad se acerca a un límite determinado. Cabe pues concebir un dispositivo que, a partir de medidas de humedad hechas por

captos adecuados dispuestos en el terreno, desencadene y desarrolle según un programa previsto todo el proceso de riego.

En la actualidad existen regadíos con este grado de automatización, aunque por ahora, no se utiliza para grandes zonas regables y está limitado a extensiones no muy superiores a 20 ha. No se ve, sin embargo, inconveniente, en extenderlo a áreas grandes, subdivididas en otras menores, dotados de sus propios indicadores.

El riego programado automático permite reducir grandemente la mano de obra, el desperdicio de agua y también las dimensiones de la red principal al evitar acumulaciones innecesarias de demanda. Resulta especialmente apto para instalaciones fijas, en las que el riego se lleva a cabo con gran independencia del agricultor.

También es posible automatizar en gran medida el riego a la demanda, aunque en este caso el automatismo versa más bien sobre la respuesta de la alimentación a la demanda de agua. En este caso es el agricultor el que decide regar, con independencia de los demás, y el sistema se presta más al empleo de instalaciones semifijas, con una parte móvil que es manejada por los operarios; el ejemplo clásico es el del riego por aspersión con aspersores móviles, pero el procedimiento no tiene por que limitarse a este tipo de riego.

Al tratar de automatizar una red clásica de canales, ya sea mediante compuertas que mantengan los niveles aguas arriba caso que corresponde al riego programado, pues fija los caudales; o con otras que los mantengan aguas abajo, lo que corresponde al riego a demanda, se plantea el grave problema de la insuficiencia de resguardos, debido en general a excesiva pendiente en los canales, y el de la pérdida de carga en las compuertas, no prevista en la instalación original.

El primero puede paliarse multiplicando el número de compuertas, lo que encarece y aumenta las pérdidas de carga, pero es robusto y sencillo; o coordinando el funcionamiento con ayuda de un ordenador electrónico y transmisión eléctrica de indicaciones y órdenes de maniobra, lo que puede ser menos costoso, pero es más delicado.

El segundo puede llegar a quedar evitado, según los casos, al reducirse los caudales máximos necesarios como consecuencia de la automatización.

Cualquiera que sea el automatismo que se disponga en un regadío es muy importante centralizar en una oficina todas las indicaciones sobre la marcha del riego, así como los datos fundamentales acerca de los caudales circulantes, niveles, presiones, etc., en los puntos principales.

Según el tipo de instalación, esta oficina puede tener o no la posibilidad de modificar en mayor o menor grado los programas preestablecidos.

## INSTALACIONES PARA UN REGADÍO

### ESQUEMA DE UNA RED DE RIEGO

Una **red de riego** está constituida por distintas partes, más o menos diferenciadas, según los casos, cuyas funciones y características se exponen a continuación.

Una **obra de captación** con diferentes características según se trate de captar aguas superficiales

o subterráneas; en el primero de los casos la obra será también muy distinta según se haga de forma directa o por medio de una presa de embalse o azud de derivación.

En ocasiones, el punto donde se hace la toma está más bajo que la superficie a regar y hay que proceder a la instalación de una central de elevación que permita situar el agua a la cota necesaria para su posterior utilización. Este procedimiento no ha sido rentable hasta los últimos decenios más que para volúmenes reducidos, por lo que se ha utilizado en general para riegos de pequeña importancia.

Hoy día, sin embargo, se emprenden ya obras de regadío de gran envergadura, en las que el bombeo a altura importante es el elemento fundamental, y es de prever que en un futuro inmediato, con la puesta en funcionamiento de las centrales nucleares, la utilización de los excedentes de energía impulse la realización de grandes bombeos para riego.

Una vez captadas las aguas hay que transportarlas hasta la zona donde van a ser empleadas; esto se hace por medio de una **conducción**, generalmente en régimen de lámina libre, que se llama canal principal. La primera parte de este canal tiene como única misión transportar el agua, por cuyo motivo se llama cabeza muerta del canal; a partir de un cierto punto, es decir, cuando el canal se desarrolla por la zona de riego, suministra agua a los canales secundarios que distribuyen el agua por toda la zona.

Estos canales secundarios se ramifican después en acequias, que a su vez se vuelven a ramificar con el fin de llevar el agua a todas las fincas y parcelas en explotación. Este conjunto de canales y acequias forman la red de distribución. Generalmente se llaman acequias cuando el caudal es inferior a 0,5 m<sup>3</sup>/s., y siempre que riegan a dos manos.

La red de distribución debe ser generalmente completada con una red de drenaje que recoge y conduce fuera de la superficie regada los excedentes de agua de riego o de lluvia que serían perjudiciales para el cultivo. En la práctica es imposible dar a las tierras la cantidad exacta de agua que pueden retener y utilizar.

No debe olvidarse la red de caminos de acceso a las distintas parcelas, por las que deberán sacarse los productos, que pueden dar lugar a interferencias, especialmente con las acequias de los últimos órdenes y con los azarbes de drenaje pequeños, que obliguen a multiplicar sifones y pasos de agua.

Desde el punto de vista del regadío se llama superficie dominada toda la superficie sea cual sea su naturaleza (tierras, caminos, pueblos, bosques...) dominada por el canal principal y susceptible de recibir el agua por gravedad. En realidad, esta palabra ha perdido su sentido preciso desde que el desarrollo de las bombas mecánicas permite el riego de zonas situadas a cotas más elevadas que el canal principal. La parte de la superficie dominada susceptible de ser regada con provecho se llama zona regable. Como la puesta en riego lleva un determinado tiempo, podemos distinguir dentro de la superficie regable, la zona regada.

## CAPTACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES

Las **tomas de agua** son obras destinadas a hacer pasar la totalidad o una parte del agua de una corriente a un canal de riego.

Las tomas de agua pueden consistir simplemente en sangrías practicadas en la orilla del lecho; por

esta sangría penetra una parte del agua en el canal de riego; son las tomas de agua sin presa, o tomas directas, también llamadas al “hilo de agua” o tomas “de pie”.

Si la derivación se realiza aguas arriba de una presa que eleva el nivel del agua y lo mantiene casi constante, se tienen las tomas de agua con presa. Esta, además de cumplir la función de elevar el nivel del agua a la cota necesaria, puede crear un embalse que nos permita regular la aportación del río, reteniéndolo en la época de mayores caudales y menor consumo y suministrándola en época de sequía.

Las tomas directas tienen principalmente la ventaja de ser menos costosas que las tomas con presa. Son utilizadas, sobre todo, en las corrientes de agua con pendiente fuerte y caudal bastante regular, así como en los ríos torrenciales de lecho amplio, donde la construcción de una presa resultaría demasiado onerosa.

Presentan, por el contrario, numerosos inconvenientes que hacen que cada vez sean menos utilizadas. En efecto, el nivel del agua de una corriente puede bajar notablemente en la época de estío y causar de esta manera una interrupción más o menos completa de la alimentación del canal en el preciso momento en que resulta más necesaria esa alimentación; en ciertas ocasiones, el lecho de una corriente de agua puede variar algo y alejarse así de la toma, que es preciso modificar.

El emplazamiento de una toma en río debe elegirse en el lugar donde la variación de lecho sea poco probable. Para asegurar en lo posible su buena alimentación, la toma directa debe colocarse en la margen cóncava del río y apoyarla sobre una zona rocosa para asegurar su permanencia; se facilita la entrada del agua colocando un espigón de piedras, gaviones, tablestacas, etc., con el fin de dirigir hacia la entrada del canal. En ocasiones, para impedir en lo posible los cambios de la corriente, se disponen diques o espigones en forma que estabilicen su lecho.

A cierta distancia de la derivación se coloca una compuerta destinada a regular la cantidad de agua que se desea entre en el canal; asimismo dispone una rejilla que impida la entrada al canal de ramas, hojas, etc.

La toma directa puede ser frontal o lateral.

- En la toma frontal, la entrada del agua tiene la dirección de la corriente del río. Está indicada cuando el caudal a derivar es importante; presenta el inconveniente de que los materiales en suspensión entran también más fácilmente en el canal, por lo que debe limpiarse con frecuencia.

- Con la toma lateral se evita este inconveniente y el tener que colocar en el río un espigón que puede provocar depósitos y alteraciones del lecho; por otro lado la toma frontal resulta más cara y de mayor dificultad de ejecución.

Siempre que el río lleve materiales en suspensión, es conveniente colocar al principio del canal de derivación, una o varias cámaras de decantación donde se acumule el material y pueda ser retirado posteriormente; se evita de esta forma el enarenamiento de los canales y acequias de riego y, por consiguiente, los trabajos de conservación, siempre costosos.

Cuando se quiere asegurar la alimentación del canal de derivación se suele establecer una presa sobre el curso de agua; esta obra provoca una sobreelevación del nivel del agua y asegura su entrada en cualquier estación en el canal de derivación.

Desde el punto de vista de su influencia en el curso de agua, se pueden considerar tres tipos:

- Las presas fijas que detienen de forma permanente el paso del agua.
- Las presas móviles, que se suprimen durante las crecidas para dejar paso libre al agua.
- Las presas mixtas o semimóviles, que constan de una parte fija, más alta que el lecho, constituyendo el vertedero, y una parte móvil que puede retirarse en las crecidas.

El emplazamiento vendrá condicionado por razones topográficas y geológicas; entre todas las posibles soluciones compatibles con las condiciones anteriores, la elección del punto de emplazamiento y de la altura más conveniente será un problema económico que habrá que resolver en cada caso, de acuerdo con las características del mismo.

## CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El desarrollo de los distintos tipos de motores, particularmente los de combustión interna y eléctricos, paralelamente al desarrollo de las bombas centrífugas, ha aumentado considerablemente las posibilidades de puesta en riego permitiendo extraer directamente de las capas subterráneas en puntos próximos a las zonas que se deseen regar.

Según su procedencia, las aguas subterráneas pueden clasificarse en varias clases:

- Corriente subálveas de valles fluviales, que discurren lentamente en el subsuelo inmediato de estos valles, paralelamente a los ríos.
- Capa freática, es decir, la primera capa que se encuentra a partir de la superficie, constituida por la acumulación por encima de la primera capa impermeable, de las aguas que proceden de la superficie del suelo.
- Capas profundas.
- Manantiales, que no son más que la salida al exterior de las aguas freáticas y profundas.

El problema de la utilización de esta agua es doble, se trata en primer lugar de captarlas, y después de elevarlas a un nivel conveniente para ser utilizadas.

La circulación de esta agua subterráneas presenta distintas características según se trate de corrientes subálveas o capas más o menos profundas. Su captación se realiza por medio de presas subterráneas, galerías filtrantes, pozos, sondeos, etc.

## CAPTACIÓN DE AGUAS DE ESCORRENTÍA

En numerosas zonas montañosas o con relieve adecuado, con buenos suelos para cultivos, pero de poca pluviometría, se podrían obtener buenas cosechas si se pudiese obtener agua para el riego en condiciones económicas.

Sin embargo, es frecuente en terrenos de estas características, que los ríos y arroyos se encuentren

alejados y a cota bastante más baja que la superficie a dominar, por lo que los trabajos de captación pueden ser demasiado costosos de ejecución y explotación.

En tales regiones, la inmovilización de la escorrentía de las aguas de lluvia tras un dique de tierra de poca altura, construido en una garganta que domine la zona a regar, constituye a veces una solución viable desde el punto de vista técnico y económico.

De este modo se crea un lago de colina, con capacidad suficiente para regar algunas docenas de hectáreas próximas.

La cantidad de agua que se puede recoger es función del punto de ubicación de la presa; este sitio debe tener una cuenca de alimentación suficientemente extensa, manteniendo al mismo tiempo las aguas a la mayor altura posible sobre la zona a regar. El volumen recogido será, naturalmente, función de la pluviometría y del coeficiente de escorrentía.

## CONDUCCIÓN DEL AGUA HASTA LA ZONA REGABLE

Las aguas de riego de que se dispone no se destinan, en general, a ser utilizadas cerca de la zona de captación; hay que conducir las a los lugares de utilización mediante los medios apropiados.

Por otra parte, los lugares de utilización efectiva están comprendidos dentro de lo que hemos llamado zona regable que se presenta, frecuentemente, bajo el aspecto de una superficie topográfica irregular. Para la distribución de las aguas, es preciso llevarlas, si ello es posible, a la parte alta de la zona regable para que cada una de las parcelas a regar pueda estar dispuesta a recibir el agua necesaria, en principio, por gravedad; si no es posible hacerlo, se conducen las aguas a un punto propicio, desde donde se elevan por medios mecánicos.

Para estudiar las distintas soluciones posibles, vamos a razonar sobre un caso que frecuentemente encontramos en la práctica; el de una toma en un río que se puede construir en diferentes puntos de un tramo de bastante longitud.

Técnicamente, para llevar a M (punto alto de la zona regable) las aguas del río, existen varias soluciones diferentes. Una de ellas es situar la toma en un punto A suficientemente aguas arriba en el río, de forma que se pueda trazar un canal de conducción que lleve por gravedad a M, a continuación, al canal principal, las aguas necesarias para el riego de la zona.

Otra posible solución consiste en situar en un punto D, escogido de forma que la distancia DM sea mínima, una estación de bombas E que a través de la tubería de impulsión DM alimente el canal principal.

Estas dos soluciones extremas tienen ventajas e inconvenientes. En efecto, si el transporte por gravedad resulta interesante desde el punto de vista económico de la explotación, no hay que olvidar, que la construcción de un tramo de canal de gran longitud que no riega la zona que atraviesa (canal muerto), puede ser muy costoso y que a lo largo del mismo se producen pérdidas de agua sensibles. Hay que tener en cuenta, además, los gastos de conservación del tramo de canal muerto.

Por el contrario, la solución por bombeo ocasiona, por lo general, gastos de primer establecimiento más pequeños, pero los gastos de explotación (mano de obra, energía, conservación, renovación de maquinaria, etc.), son más fuertes.

Además, se ha de considerar incluso la posibilidad de un riego combinado, o sea, atender a una parte de la superficie regable por gravedad y a otra por bombeo. Frecuentemente una realización de este tipo es la que resulta más económica.

## REDES DE DISTRIBUCIÓN

A continuación del canal muerto, o a la salida de la tubería de impulsión, se inicia la red de riego propiamente dicha.

Esta red está constituida por conducciones ramificadas, que pueden ser canales y acueductos que discurren en lámina libre, tuberías de presión generalmente enterradas, o una solución mixta con conducciones de las dos clases.

En las redes mixtas, las conducciones principales con grandes caudales serán canales, lo que no impide la elevación mecánica de las aguas desde un canal hasta otro situado a cota más elevada.

En los riegos por gravedad, la distribución y transporte del agua se realiza por gravedad, por medio de canales y acequias que funcionan en régimen de lámina libre. El canal principal se inicia en el canal muerto; domina desde las laderas toda la zona del valle que ha de regar y termina en un canal de desagüe que devuelve al río las aguas no utilizadas. El riego de toda la zona interesada se realiza a través de este canal.

Tanto los canales secundarios como las acequias pueden ser construidos en forma convencional sobre el terreno, bien sea con secciones en tierra o revestidas. Sin embargo, hoy día, no es corriente utilizar esos procedimientos; en el caso de secciones en tierra se producen filtraciones excesivas y perjudiciales, y en el caso de secciones revestidas, el coste de la construcción in situ, es muy elevado.

Se emplean con más frecuencia los canales y acequias prefabricados, que casi siempre adoptan la forma de acueductos.

También se va imponiendo el sistema de distribución por tuberías de baja presión (hasta 5 m.) de hormigón en masa, que presentan las ventajas de economizar terreno, suprimir obstáculos para el transporte y cultivo y tener gran flexibilidad de trazado.

Tienen el inconveniente de ser poco elásticas para las variaciones de caudal, y soportar mal la agresividad de los suelos salinos.

En los riegos a presión, la distribución se lleva a cabo por una red de tuberías de presión, que suelen ser de PVC (hasta 100 mm.) y de fibrocemento en diámetros inferiores a 700 mm., aunque hoy día se tiende a emplear diámetros mayores. Para tamaños superiores se emplean tuberías de hormigón armado y pretensado, con y sin camisa de chapa, según las presiones que tengan que soportar las conducciones.

## LA RED DE DRENAJE

Aunque no sea necesario el drenaje interno de las parcelas, siempre tiene que existir una red de

desagües para eliminar los excedentes de agua de riego y lluvia. Esta red, se construye generalmente en tierra y a cielo abierto, empleándose rara vez los colectores tubulares.

Cuando se considere conveniente el revestimiento de la red para reducir gastos de mantenimiento o para aumentar los caudales, es aconsejable emplear materiales permeables para reducir los efectos de la subpresión y facilitar el drenaje de las áreas colindantes.

## LA RED DE CAMINOS

El sistema de comunicaciones debe llegar a todas las parcelas, por lo que la longitud del mismo es muy grande en una zona regable. Por esta razón los caminos deber ser de coste reducido y una solución muy aconsejable son los caminos de tierra estabilizada.

Para los caminos principales se deben adoptar soluciones de más calidad, pues el tráfico en ellos suele alcanzar cifras importantes.

## OBRAS ESPECIALES

La mayor parte de las obras de conducción y distribución (canales, tuberías, acueductos, sifones, etc.) son análogos, ya se trate de riegos, aprovechamientos hidroeléctricos, o abastecimientos de agua.

Hay, sin embargo, un grupo de obras especiales que son específicas de los regadíos y son, por una parte, las que permiten mantener en los canales la pendiente y velocidad adecuadas y, por otra, las que facilitan la medida y reparto de agua según las necesidades.

El primer grupo lo constituyen las caídas y las rápidas, que permiten concentrar pérdidas importantes de nivel en los puntos en que ya no es necesaria la cota. Si la pérdida de nivel es pequeña.

## LA TÉCNICA DEL DRENAJE

El drenaje consiste en eliminar el excedente de agua de riego o lluvia.

La eliminación del agua en el drenaje se lleva a cabo aprovechando la circunstancia de que, por debajo de la capa freática, la presión del agua es superior a la atmosférica; basta por lo tanto con situar conducciones en régimen libre a una cota conveniente para que el agua fluya a ellas. Las conducciones pueden ser zanjas o tuberías perforadas enterradas.

El movimiento del agua en el drenaje cumple la ley de Darcy:

El factor  $h$ , se denomina gradiente hidráulico. Las características principales del movimiento del agua son las siguientes:

- La capa freática no es una superficie plana, sino que tiene una cierta curvatura, que es más pronunciada a medida que el terreno es más impermeable. Por lo tanto, un drenaje no consigue nunca que la capa freática esté a la misma profundidad respecto al terreno.
- La afluencia del agua a los drenes proviene de toda la zona situada bajo la capa freática.



- Cuando el terreno está compuesto de estratos de distinta permeabilidad, las líneas de flujo reflejan estas variaciones.

El principal problema con que se enfrenta el proyectista de un drenaje es la determinación de la profundidad media óptima de la capa freática. El problema podría resolverse mediante tanteos sucesivos que comparan las inversiones y gastos de mantenimiento necesarios para la red de drenaje a diversas profundidades con las producciones agrícolas obtenidas en función de la situación de la capa freática. Este camino sería demasiado largo y no muy exacto. Está generalmente admitido que la determinación de la profundidad media de la capa freática se lleve a cabo por criterios empíricos, y el más aceptado es el siguiente:

- Para una zona de regadío la profundidad de la capa freática a los tres días después de regar debe ser la que sigue:

Pastos	0.5-0.7 mts.
Hortalizas	0.5-0.8 mts.
Cultivos extensivos	0.9-1.2 mts.
Frutales	1.50 mts.

Asimismo, se admite que como consecuencia de las lluvias la capa freática puede alcanzar hasta 5 veces al año los siguientes valores:

Días después de la lluvia	Pastos y hortalizas	Cultivos extensivos	Frutales
0	0.3	0.5	0.9
1	0.5	0.8	1.1
2	0.7	1.0	1.3
3	0.8	1.1	1.4

La aplicación de estos dos criterios conduce a resultados muy aceptables en la práctica y pueden utilizarse por lo tanto para deducir los caudales en una red de drenaje.

## FACTORES INFLUYENTES EN EL DRENAJE

Los factores que condicionan una red de drenaje son prácticamente los mismos que los que inflúan en la transformación en regadío, aún cuando su campo de influencia sea distinto.

- el suelo.

La influencia del suelo es decisiva en el proyecto de una red de drenaje, sobre todo desde el punto de vista de la permeabilidad. Influye también mucho la estratificación del suelo, ya que como se ha visto, el flujo del agua hacia el dren se ve modificado por la distinta permeabilidad de los diversos estratos.

La topografía influye asimismo en las cantidades de agua infiltradas después de las lluvias y sobre

todo define las aportaciones de agua que se producen a la red de drenaje desde los terrenos colindantes a la zona a drenar.

- el agua.

La influencia del agua en una red de drenaje es mucho menos importante que en una red de riegos. Únicamente se pueden producir problemas en los tubos enterrados como consecuencia de depósitos químicos debidos a veces a la calidad del agua, aunque en la mayor parte de los casos es el suelo el responsable de estos problemas.

- el clima.

Dado que las lluvias condicionan en una gran parte el dimensionamiento de una red de drenaje, es esencial conocer a fondo la pluviometría de la zona a drenar, a ser posible, con datos de intensidades máximas, horarias y diarias.

- los cultivos.

La influencia de los cultivos consiste en la profundidad necesaria de la capa freática que requiere cada uno de ellos, aunque no es frecuente realizar un drenaje para un cultivo determinado, sino más bien, al contrario. Es decir, una vez proyectada una red de drenaje, la profundidad de la capa freática resultante determinará los cultivos aptos en la zona.

- la estructura de la propiedad y la legislación jurídica.

La influencia de este factor es bastante reducida, aunque en general debe tenderse siempre a que los colectores discurran por las laderas entre fincas. Naturalmente esto no es siempre posible, ya que la topografía del terreno influye enormemente.

## SISTEMAS DE DRENAJE

En un sistema de drenaje completo el agua se recoge en parcelas mediante los drenes (zanjas o tubos) a nivel de parcela. Desde estos drenes el agua fluye a los colectores que la conducen al sistema principal de drenaje. Cuando el suelo tiene buen drenaje interno no es necesaria la colocación de los drenes a nivel de parcela, que es el caso más general en nuestro país.

Los distintos sistemas de drenaje difieren entre sí por la utilización de tubería enterrada o zanja. La clasificación más aceptada es la siguiente:

- **Sistemas de drenajes abiertos.** En estos sistemas tanto los drenes a nivel de parcela como los colectores son zanjas abiertas.

- **Sistemas de drenajes subterráneos.** En este caso tanto los drenes a nivel de parcela como los colectores son tuberías enterradas.

- **Sistemas de drenaje mixtos.** En estos sistemas los drenes consisten en tuberías enterradas y los colectores son zanjas abiertas.

En cualquiera de estos sistemas los drenes a nivel de parcela pueden colocarse con disposición de

rejilla o disposición en espina de pescado, siendo bastante frecuente emplear una combinación de ambas disposiciones para adaptarse mejor a la forma de las parcelas a drenar.

Los sistemas de drenaje **abiertos** ofrecen las siguientes **ventajas**:

- Los drenes de parcelas sirven para eliminar las escorrentías superficiales a la vez que controlan el nivel de la capa freática.
- Las pendientes necesarias para el transporte del agua son mucho más reducidas que en el caso de tubos enterrados.
- El sistema permite una fácil inspección.

Frente a estas ventajas, se presentan los siguientes **inconvenientes**:

- Facilitan el desarrollo de las malas hierbas y la erosión, lo cual encarece la conservación.
- El terreno queda dividido en pequeñas parcelas, lo que es un obstáculo para la mecanización agrícola.
- Se pierde bastante terreno con las zanjas, sobre todo si los taludes son tendidos.

Estas desventajas tienen bastante importancia, hasta tal punto que hoy día no se emplean estos sistemas salvo en situaciones muy específicas, que pueden ser los casos en que la escorrentía superficial tiene gran importancia, o cuando la capa freática puede quedar bastante alta.

Los **sistemas de drenaje subterráneos**, presentan las siguientes **ventajas**:

- No hay pérdida de terreno.
- Se pueden drenar áreas bastante extensas sin zanjas, lo cual facilita mucho la mecanización de los cultivos.
- No presenta problemas de desarrollo de malas hierbas.

Como **desventajas** tenemos:

- Necesitan pendientes bastante grandes para el transporte del agua.
- Los costes de instalación de los colectores de tubo son bastante elevados.
- La obstrucción de algún colector puede afectar a un área de bastante superficie.
- En climas de fuertes intensidades de lluvia se pueden presentar dificultades para la evacuación de la escorrentía superficial.

Los sistemas de drenaje mixtos, participan de las ventajas e inconvenientes de los sistemas anteriormente descritos, ya que se componen de zanjas abiertas y tubos enterrados.

## ELECCIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE

La elección del sistema de drenaje la deberá llevar a cabo el proyectista ponderando las ventajas e inconvenientes antes descritos, y teniendo en cuenta en general, que los gastos de conservación de las zanjas suelen ser muy superiores a los de los tubos enterrados.

En el caso de elegirse un sistema con tubos enterrados a nivel de parcela, que pueden ser de material cerámico o de PVC, el proyectista tendrá que realizar unos tanteos previos para determinar la separación y profundidad de los drenes, ya que ambos factores están íntimamente ligados, debiéndose llegar a la solución más económica.

Cuando se emplean zanjas para colectores, es conveniente que las dimensiones mínimas no bajen de las siguientes:

- ancho de solera: 0.50 m
- profundidad: 0.50 m por debajo de la cota de los drenes de parcelas

Los taludes de la zanja estarán de acuerdo con la constitución del suelo, adoptándose en general el talud 1/1 para suelos arenosos y el talud 4/3 para suelos arcillosos.

Si el sistema de tubos se emplea para colectores, éstos suelen ser de hormigón en masa, muchas veces de cementos especiales para evitar la agresividad de las aguas salinas. Como es natural, la profundidad de los colectores debe ser la necesaria para garantizar un desagüe de los drenes a nivel de parcela.

## ECUACIONES DE DRENAJE

Darcy y Dupuit en el siglo XIX, fueron los primeros en formular las ecuaciones básicas para el flujo subsuperficial de agua a través de medios porosos y aplicarla en pozos. Rothe a principios del siglo XX, aplicó estas ecuaciones a flujo subsuperficial hacia los drenes, deduciendo así la primera fórmula de drenaje. Hooghoudt, en los años treinta dio un estímulo real a un análisis racional del problema del drenaje, estudiándola en el contexto del sistema agua-suelo-planta.

Desde ese entonces, científicos de todo el mundo como Childs en Inglaterra, Donnan, Luthin y Kirkham en los Estados Unidos y Ernst y Wesseling en Holanda, han contribuido hacia un perfeccionamiento adicional de este análisis racional.

Los factores anteriormente mencionados, se interrelacionan por ecuaciones de drenaje que se basan en dos suposiciones:

- Flujo bidimensional, es decir el flujo es el mismo en cualquier sección transversal perpendicular a los drenes
- Distribución uniforme de la recarga permanente o variable, sobre el área comprendida entre los drenes.

La mayoría de las ecuaciones que se presentan, se basan además en las suposiciones de Dupuit-Forchheimer, por lo que tienen que considerarse únicamente como soluciones aproximadas. Sin embargo, estas soluciones aproximadas tienen por lo general tan alto grado de exactitud, que se justifica completamente su aplicación en la práctica.

Estas fórmulas se emplean fundamentalmente para el dimensionamiento de los sistemas de drenaje, ya que relacionan algunas características de diseño (espaciamiento y profundidad) con ciertas características de los suelos, clima, etc. Estas últimas características son: Conductividad hidráulica ( $K$ ), espesor de los estratos, espacio poroso drenable o macroporosidad ( $\rightarrow \mu$ ), profundidad óptima de la capa freática o velocidad de descenso de la misma y caudal procedente de la lluvia, riego u otros orígenes.

Las fórmulas de drenaje, se pueden agrupar en las dos clases siguientes:

- Fórmulas de régimen permanente.
- Fórmulas de régimen variable o transitorio.

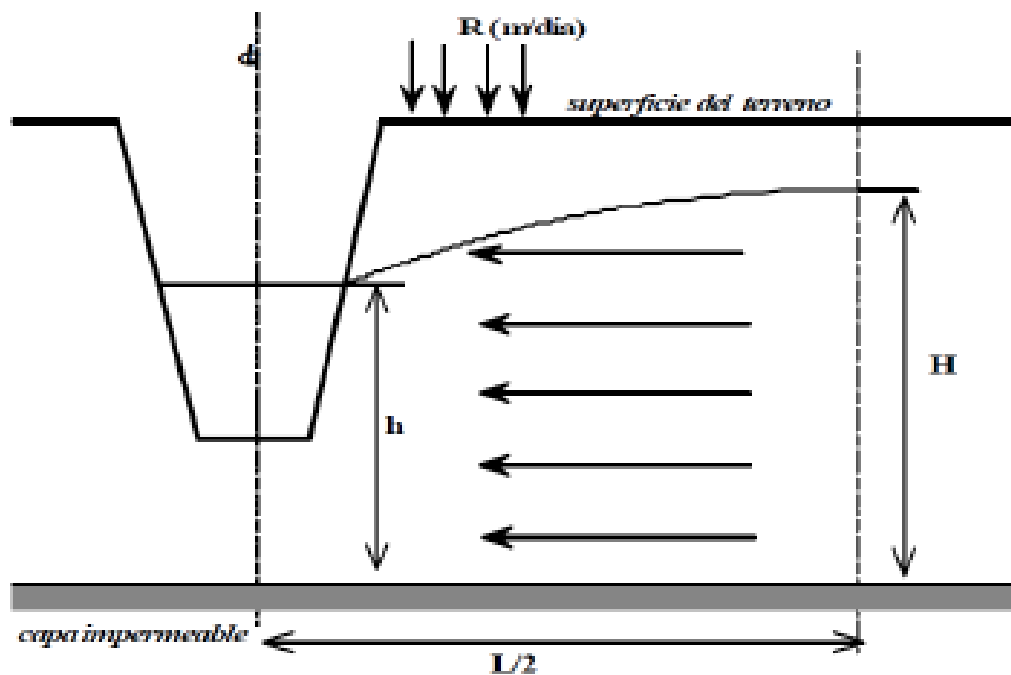
## ECUACIONES DE DRENAJE PARA RÉGIMEN PERMANENTE

En las ecuaciones de drenaje de régimen permanente, se supone que la capa freática se encuentra estabilizada: la cantidad de agua que la alimenta es igual a la eliminada por los drenes.

Tal situación correspondería al caso de una lluvia constante durante un largo periodo de tiempo. En la práctica no se da esta situación, pero sin embargo, la aplicación de las correspondientes fórmulas suelen dar resultados aceptables en regiones de régimen pluviométrico caracterizado por la regularidad de las precipitaciones y por su baja intensidad.

### a) Fórmula de Donnan

Anteriormente se ha demostrado que con la llamada ecuación de Donnan (Donnan, 1946), se puede describir el flujo de agua hacia zanjas verticales, basándose en las suposiciones de flujo horizontal unidimensional, es decir, líneas de corriente horizontales y paralelas:



Parámetros de la fórmula de Donnan

$$R = q = \frac{4K(H^2 - h^2)}{L^2} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

$q$  = descarga de los drenes por unidad de superficie (m/día)

$R$  = recarga por unidad de superficie (m/día).

$L$  = espaciamiento de drenes (m).

$K$  = conductividad hidráulica del suelo (m/día)

$H$  = distancia de la napa freática en el punto medio entre los drenes hasta la capa impermeable (m).

$h$  = distancia desde la superficie del agua en la zanja o el tubo de drenaje hasta la capa impermeable (m).

Como se comprende, la fórmula más sencilla para el cálculo del espaciamiento de drenes es la de Donnan cuyos puntos de partida son:

- El flujo hacia los drenes es permanente. Esto quiere decir que la cantidad de agua que alimenta la napa freática en forma constante, es la misma que fluye hacia los drenes y sale por ellos sin variaciones en el tiempo.
- El flujo solamente es horizontal.
- El suelo es homogéneo hasta la capa impermeable.
- Hay un sistema de drenes paralelos infinito en ambas direcciones.
- La recarga es homogéneamente distribuida.

De los estudios de campo, se obtiene la conductividad hidráulica del suelo y la profundidad de la capa impermeable. Las normas de drenaje, dan la profundidad de la napa freática en el punto medio entre los drenes y la descarga de drenaje "R". "H" se obtiene de las informaciones de campo y normas de drenaje. "h" en cambio, aunque está limitado por la profundidad de la capa impermeable y en cierta forma por las normas de drenaje, depende generalmente de las condiciones de diseño del sistema, como niveles de los drenes troncales, pendientes necesarias, condiciones de construcción, etc.

La fórmula será por lo tanto aplicable cuando  $(H-h) \ll h$  y  $L \gg h$ . Además el perfil debe tener una conductividad hidráulica más o menos homogénea hasta la capa impermeable.

### b) Formula de Hooghoudt

La fórmula de Donnan, también fue deducida por Hooghoudt (1936), pudiéndose expresar la ecuación (1) como:

$$R = q = \frac{4K(H+h)(H-h)}{L^2} \dots\dots\dots(2)$$

Considerando que  $\hat{h} = (H-h)$  y  $(H+h) = (2h + \hat{h})$ , donde  $\hat{h}$  es la altura en metros de la capa de agua sobre el nivel de los drenes en el punto medio de los drenes, es decir la carga hidráulica para el flujo subsuperficial hacia los drenes.

Luego:

$$q = \frac{8K(h + \frac{\Delta h}{2})\Delta h}{L^2} \dots\dots\dots(3)$$

La ecuación (3), también puede representarse como:

$$q = \frac{8Kh\Delta h + 4K\Delta h^2}{L^2} \dots\dots\dots(4)$$

Si  $h = 0$ , se obtiene:

$$q = \frac{4K\Delta h^2}{L^2} \dots\dots\dots(5)$$

La ecuación (5) representa aparentemente el flujo horizontal por encima de los drenes y se le conoce como la **ecuación de Rothe**.

Si  $h$  es grande comparado con  $\hat{h}$ , se puede despreciar el segundo miembro del numerador de la ecuación (5), luego:

$$q = \frac{8Kh\Delta h}{L^2} \dots\dots\dots(6)$$

Considerando un suelo con dos estratos cuyo límite de contacto está al nivel de los drenes, luego la ecuación (5) puede expresarse:

$$q = \frac{8K_2h\Delta h + 4K_1\Delta h^2}{L^2} \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

$K_1$  = Conductividad Hidráulica del estrato arriba del nivel de los drenes (m/día)

$K_2$  = Conductividad Hidráulica del estrato abajo del nivel de los drenes (m/día)

En este sentido, Hooghoudt (1940) desarrolló varias fórmulas. La más completa de ellas supone que el flujo no solamente es horizontal, sino que parcialmente hasta alrededor de los drenes hay flujo radial.

$$L^2 = \frac{8K_2d(\Delta h - n) + 4K_1(\Delta h^2 - n^2)}{R} \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

$L$  = espaciamiento de drenes (m).

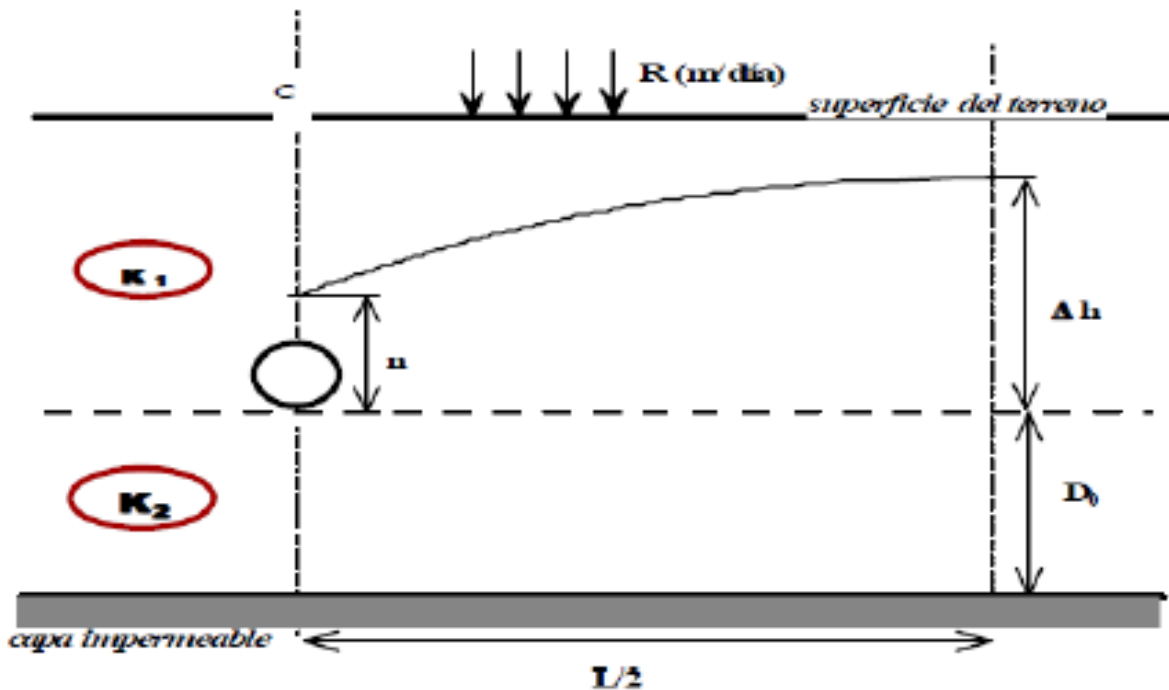
$\hat{h}$  = distancia vertical entre la horizontal que pasa a nivel del fondo de los drenes y la napa freática en el punto medio entre los drenes (m).

$n$  = distancia vertical entre el fondo del dren y la napa freática sobre el dren (m).

$d$  = espesor del "estrato equivalente" (m).

$R$  = cantidad de agua que hay que drenar (m/día).





### Parámetros de la fórmula de Hooghoudt

Los parámetros "n" y "d" se describen a continuación:

El parámetro "n" tiene un significado diferente en el caso de drenaje con zanjas abiertas y en caso de drenaje con tubos.

En el caso de zanjas, "n" es el espesor de la lámina de agua que hay sobre el fondo de la zanja cuando se está drenando la descarga normativa equivalente a R. En este caso, tanto el tamaño como el distanciamiento entre las zanjas se diseñan con la misma descarga normativa. En el caso de drenaje por tubos, "n" es teóricamente la altura de carga necesaria para la resistencia que tiene que vencer el agua para entrar en los tubos. En general, para calcular el espaciamiento de drenes, se ha supuesto que "n" es cero.

Para tener en cuenta la resistencia extra causada por el flujo radial, Hooghoudt introdujo una reducción de la profundidad  $D_0$ , en una profundidad equivalente más pequeña "d", donde  $d < D_0$ .

En este caso, las ecuaciones (7) y (8) se transforman en:

$$L^2 = \frac{8K_2d\Delta h + 4K_1\Delta h^2}{R} \dots\dots\dots(9)$$

La ecuación (9) es la llamada fórmula de Hooghoudt, aunque incompleta, es la más conocida.

### c) **Fórmula de Ernst**

La ecuación de Ernst, se utiliza en suelos con dos estratos y ofrece unas mejoras sobre las formulas anteriores, ya que el limite entre los dos estratos puede estar por encima o por debajo del nivel de los drenes.

El principio fundamental de la solución de Ernst es el de considerar tres componentes en el flujo: vertical, horizontal y radial. Estos componentes dan un esquema bastante completo del sistema total de flujo que está basado directamente en la analogía entre las leyes de Darcy y Ohm.

De esta forma, la carga hidráulica total será:

$$h = h_v + h_h + h_r$$

Donde:

$h_v$  = Resistencia al flujo vertical

$h_h$  = Resistencia al flujo horizontal

$h_r$  = Resistencia al flujo radial

Análogamente al flujo eléctrico (Ley de Ohm) se puede definir el flujo de agua subterránea como.

$$q = \frac{h}{w}$$

$q$  = descarga del dren por unidad de área (m/día)

$h$  = carga hidráulica total (m)

$w$  = resistencia (día)

Luego:

$$h = qw_v + qw_h + qw_r, \dots \dots \dots (12)$$

Y reemplazando los valores de resistencia se tendría:

$$h = R \frac{D_v}{K_v} + R \frac{L^2}{8 \sum (KD)_h} + R \frac{L}{\pi K_r} \ln \frac{a D_r}{u}$$

#### **Ecuación general de Ernst.**

Donde:

$D_v$  = espesor de la capa en la que tiene lugar el flujo vertical (m).

$K_v$  = conductividad hidráulica de la capa en la que se considera flujo vertical (m/día)

$\sum (KD)_h$  = transmisividad de las capas de suelo en las cuales se considera flujo

horizontal ( $m^2/día$ )

$K_r$  = conductividad hidráulica de la capa en la que se considera flujo radial ( $m/día$ )

$D_r$  = espesor de la capa en la que tiene lugar el flujo radial (m)

$a$  = factor geométrico para flujo radial que depende de las condiciones de flujo (adimensional) anexo A

$u$  = perímetro mojado del dren (m)

Consideraciones para la aplicación de la ecuación de Ernest

- ✓ El flujo vertical ocurre entre el nivel freático y el fondo de los drenes, es decir:

$$D_v = y + h \quad \text{para zanjas y}$$

$$D_v = h \quad \text{para drenes entubados.}$$

- ✓ El flujo horizontal ocurre en todo el espesor del acuífero, luego

$$\sum (KD)_h = K_1 D_1 + K_2 D_2.$$

Sin embargo, si la barrera impermeable se encuentra muy profunda

$\sum (KD)_h$  tiende al infinito y la resistencia tiende a cero. Para evitar esto se establece que el espesor bajo los drenes  $D_o < 1/4L$ .

El flujo radial se toma en cuenta solamente en la capa debajo del nivel de los drenes, entonces  $D_r = D_o$ , aplicando la misma limitación que el flujo horizontal:  $D_o < 1/4L$ . y el valor del factor geométrico ( $a$ ) será considerado de acuerdo a la relación que exista entre las conductividades del estrato superior e inferior.

- ✓ El perímetro mojado ( $u$ ) será igual a:

- **En zanjas:**

$$u = b + 2y\sqrt{s^2 + 1}$$

- **En drenes entubados:**

$$u = b + 4r$$

donde,  $b$  = ancho del fondo de la zanja.

$y$  = tirante de agua.

$s$  = talud de la zanja: horizontal y vertical.

$r$  = radio del tubo.

## ECUACIÓN DE DRENAJE PARA RÉGIMEN VARIABLE

Las fórmulas de régimen variable consideran el movimiento de la capa freática, tanto para carga del acuífero como durante la descarga, en consecuencia existe una variación en el nivel de esta.

Como anteriormente se indicó, trataremos la situación de carga instantánea del acuífero (por ejemplo, en riego por gravedad). Si la cantidad de agua aportada, expresada en altura es "R", la capa freática se eleva en una altura  $R/2$  y a continuación comienza a descender. La fórmula de Glover Dumm estudia esta situación.

### a) Fórmula de Glover Dumm

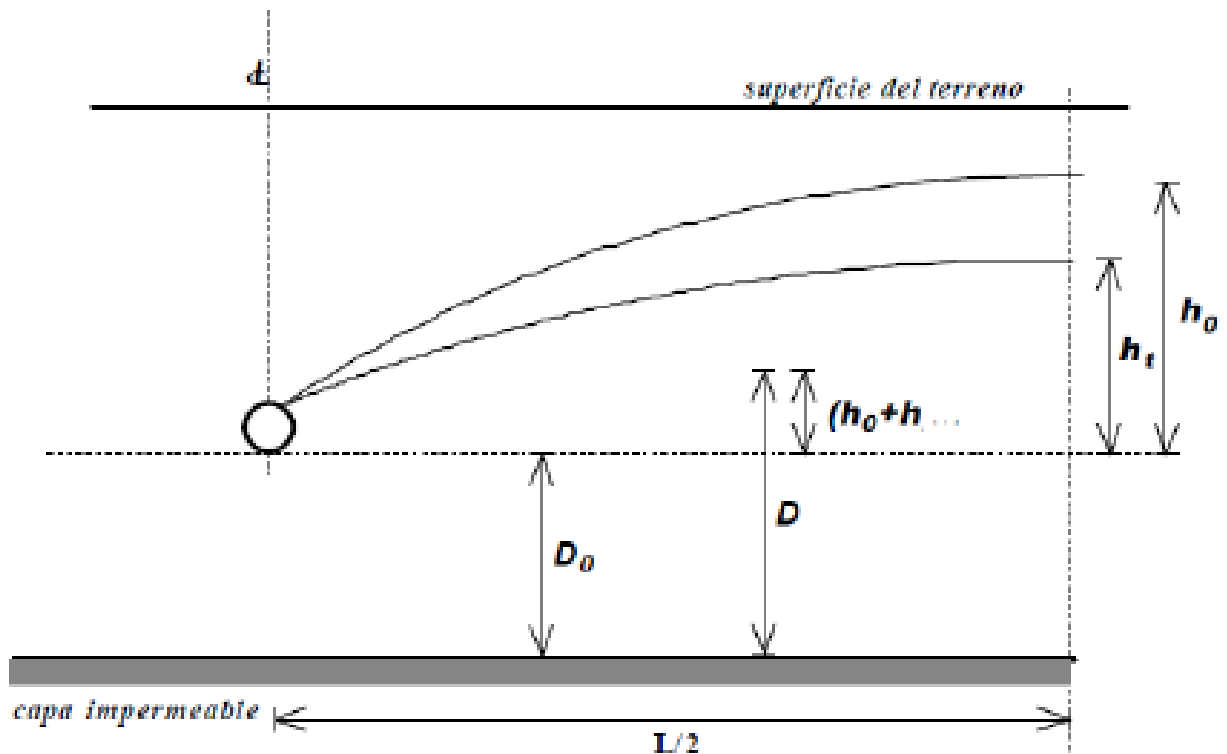
Las fórmulas de Donnan, Hooghoudt y Ernst anteriormente tratadas están basadas en una situación de flujo con recarga permanente. Esto significa que tanto la altura de la napa freática como la velocidad del flujo que ingresa a los drenes no cambia durante el proceso de drenaje. La recarga de la napa, proveniente de las precipitación y la descarga de los drenes es igual en estas condiciones y ambas son indicadas con el mismo símbolo "R". Aunque, estas condiciones no son exactamente satisfechas en la realidad, la suposición de una situación de flujo permanente ha probado producir muy satisfactoriamente resultados en climas húmedos, cuando las variaciones en precipitación no son extremas.

Sin embargo, cuando nos enfrentamos con problemas de drenaje conectados con irrigación, la recarga es evidentemente no permanente, ya que ocurre a intervalos que son determinados por la frecuencia de riegos. En estas condiciones, puede ocurrir una notoria elevación de la napa freática como resultado de la inevitable precolación de parte del agua aplicada en el riego, seguido por una gradual declinación de la napa en los períodos comprendidos entre dos riegos consecutivos. En estos casos la recarga R y la velocidad de descarga  $R_t$  evidentemente no son iguales.

Una fórmula de drenaje desarrollado para estas condiciones deberá dar respuesta a la pregunta: ¿Cuánto descenderá la napa freática y cuál será la velocidad de descarga de los drenes como función del distanciamiento de los drenes y de la recarga no permanente?. Tal formula ha sido derivado por numerosos autores.

La primera fórmula que aquí se muestra fue obtenida por los estudios de Glover Dumm y presentada por Dumm en 1954:

$$L^2 = \pi^2 \frac{KD_*t}{\mu \ln\left(1.27 \frac{h_0}{h_t}\right)}$$



en la que:

- $L$  = espaciamiento de los drenes (m)
- $K$  = conductividad hidráulica (m/día)
- $D$  = espesor del estrato en donde hay flujo horizontal (m)
- $\mu$  = espacio poroso drenable (fracción)
- $h_0$  = altura de la napa freática sobre el fondo del dren antes del descenso (m)
- $h_t$  = altura de la napa freática sobre el fondo del dren después del descenso (m)
- $t$  = tiempo en que debe ocurrir el descenso de la napa freática (días)

$D$  es definida como la altura desde la capa impermeable hasta el punto medio de la vertical que va desde el nivel de los drenes hasta la altura promedio de la napa en el punto equidistante entre los drenes, o sea:

$$D = D_0 + \frac{h_0 + h_t}{2} = D_0 + \left(\frac{h_0 + h_t}{4}\right)$$

K, D y  $\mu$  se miden; la combinación de  $h_0$ ,  $h_t$  y t constituye las normas de drenaje. El espaciamiento L debe ser tal que después de un riego la napa freática descienda desde  $h_0$  hasta  $h_t$  en t días.

La derivación de la fórmula de Glover se basa en la solución de la llamada ecuación del flujo de calor:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{KD}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Glover asume que inicialmente, esto es al tiempo  $t = 0$ , existe una napa freática plana, aunque el agua sobre los drenes se mantiene al mismo nivel formando casi un rectángulo

Entonces, la última fórmula de Glover se presenta entonces en la siguiente forma:

$$L^2 = \frac{\Pi^2 KD}{\mu \cdot \ln\left(1.16 \frac{h_0}{h_t}\right)} \cdot t$$

Debe notarse de que la ecuación para el calculo de  $R_t$  debe de ser mantenida y que la relación  $h_t/R_t$  no es afectada por el término de  $4/L^2$ .

Las formulas de Glover, se basan en un flujo solamente horizontal. No toman en cuenta la resistencia vertical y radial.

Sin embargo, la resistencia radial se puede incorporar en la formula de la misma manera que en la formula de Hooghoudt. Entonces, se puede usar el espesor del estrato equivalente "d" en lugar de la distancia entre el fondo del dren y la capa impermeable ( $D_0$ ). Esta d, depende de L,  $r_0$  y D y se puede usar las mismas formulas o tablas que para la formula de Hooghoudt.

En este caso, la D de la ecuación es igual a:

$$D = d + \frac{h_r + h_o}{4}$$

Los parámetros ya son conocidos.

El coeficiente de reservorio "j" usado por Kraijenhoff van der Leur tiene un sentido físico. Este coeficiente incorpora las características físicas del suelo y las condiciones de drenaje. Estos factores juntos, dictan el movimiento del agua en el suelo. La dimensión de "j" es días.

Cuando "j" es grande la napa freática baja lentamente, porque la transmisibilidad del suelo es pequeña o el espacio poroso drenable y el espaciamiento de drenes son grandes. Al contrario, cuando "j" es pequeña, la napa freática baja rápidamente.

#### COMPILADO DE:

- Clases de Hidráulica Aplicada - FI - UNaM
- "El Riego y sus Tecnologías" – L.S. Pereira, J. A. de Juan Valero, M.R. Picornel Buendía, J.M. Tarjuelo Martín-Benito – CREA – UCLM
- "Irrigación" - J.C. Pizarro Baldera
- "Manual de Diseño de Sistemas de Riego Tecnificado" – D.F. Tapia Cadena
- "Diseño Agronómico del Riego Localizado" - Universidad Politécnica de Madrid - MOOC
- <https://riegodrenaje102.blogspot.com/>
- "Riego y Drenaje" - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata
- "Drenaje Subterráneo" - Facultad de Agronomía - Universidad de la Republica - ROU