

Lección 7. Flujo de agua en el suelo. Ley de Darcy. Conductividad hidráulica. Relación entre conductividad hidráulica y tensión. Ecuaciones que rigen la infiltración vertical. Ecuación de Richards. Capacidad de infiltración y tasa de infiltración. Modelo de Horton. Infiltración profunda acumulada. Infiltración y recarga. Precipitación eficaz. El modelo de Holtan. Medida de la infiltración: balances, infiltrómetros. Redistribución del agua en el suelo. Recarga de agua subterránea.

FLUJO DE AGUA EN EL SUELO Y ZONA NO SATURADA

El suelo y la zona no saturada tienen una gran importancia en el ciclo del agua, así como en el transporte y las transformaciones de los compuestos químicos en el suelo. Sin embargo, existen otros tipos de medios porosos no saturados. Además, otras fases diferentes pueden coexistir con el agua y el aire. La gestión de las proporciones volumétricas y másicas de las diferentes fases existentes en el suelo constituye la base para el estudio del comportamiento de la zona no saturada. Así pues, la succión y el potencial total del agua son los responsables principales de la retención y del movimiento del agua en el suelo. Para cada tipo de suelo y de problema a resolver, diferentes funciones paramétricas permiten estimar las propiedades hidrodinámicas de la zona no saturada.

En condiciones de equilibrio, la ley de Darcy sirve también para definir el movimiento del agua. Sin embargo para la zona no saturada, no siempre es posible encontrar soluciones simples y precisas. En lo que respecta a los regímenes transitorios, la ecuación de Richards define el flujo del agua y los cambios de saturación en el suelo. Se puede decir que el tipo de condiciones estacionarias externas al sistema, así como las propiedades hidrodinámicas del suelo, determinan las posibles soluciones en la zona no saturada y saturada del suelo. En las condiciones reales del terreno, la lluvia, la evapotranspiración y el ascenso capilar desde la superficie freática, son los procesos transitorios externos que comúnmente regulan el movimiento del agua y el grado de aireación de la zona no saturada.

El flujo de agua en zona no saturada puede ser enfocado desde dos puntos de vista: o bien el flujo microscópico a través de poros individuales, o bien el flujo macroscópico a través de todo el conjunto poroso, que es la aproximación más común.

En un medio casi saturado el efecto de la gravedad drena verticalmente formándose interfases agua-aire en forma de meniscos. El radio de curvatura de estos meniscos depende de la magnitud de la succión. Al ir progresando el drenaje la curvatura de los meniscos es más pronunciada y aumenta la succión.

Los poros más grandes se vacían con valores bajos de la succión, mientras que los más estrechos se drenan con succiones más altas. Si se representa la evolución del grado de saturación (definido como la fracción de los poros que están llenos de agua) en función de la succión se obtienen las denominadas curvas de retención o curvas de succión-humedad, características de cada tipo de suelo.

La succión es muy pequeña para contenidos de agua próximos a la saturación; al aumentar la succión se vacían rápidamente los poros mayores. La succión crece rápidamente al disminuir el contenido en agua. Para un mismo contenido en agua y en las mismas condiciones, la succión es mayor cuanto más pequeños son los poros, de modo que su valor puede dar una idea de la textura del terreno.

Considerando el flujo macroscópico, en condiciones de equilibrio se cumple la ley de Darcy:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}$$

donde:

q es el flujo de Darcy o volumen de agua que circula a través de una superficie unidad por unidad de tiempo ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ día}$)

K(r) es la conductividad hidráulica (cm/día)

H es el potencial (tensión, en cm)

z es la distancia (cm)

Para suelos saturados, la conductividad hidráulica se asume constante, pero decrece rápidamente cuando decrece la humedad. Esto es debido a que cuando el agua se drena, los poros se vacían y la sección de flujo efectivo es mucho menor. Consecuentemente, el

descenso del valor de K es mucho más rápido en suelos con capacidad drenante (arenas) que en suelos con poros de menor tamaño (arcillas).

La ecuación de Darcy es válida para régimen estacionario, pero no cuando el contenido en agua o la tensión cambian con el tiempo. En este caso, es necesario tener en cuenta la ecuación de continuidad, que es:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}$$

donde t es el tiempo (días o segundos) y z es la elevación (cm).

Combinando las ecuaciones de Darcy y de la continuidad, se obtiene la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

Considerando un término, r, fuente-sumidero (absorción por las raíces) y definiendo C(h) como la capacidad específica del medio no saturado, que viene dada por la pendiente de la curva succión-humedad ($C(h) = d\theta/dh$), la ecuación de Richards queda:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] + r$$

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica, K, es una función de las características intrínsecas de la matriz del suelo y de las propiedades del fluido contenido en dicho suelo.

El valor de K decrece de manera exponencial a medida que disminuye el valor de la humedad (θ). K suele expresarse como el producto de la conductividad correspondiente a saturación K_s por una conductividad relativa que decrece al disminuir K_r . Esta disminución es tanto más brusca cuanto más gruesa es la textura del medio sólido.

Concepto de infiltración

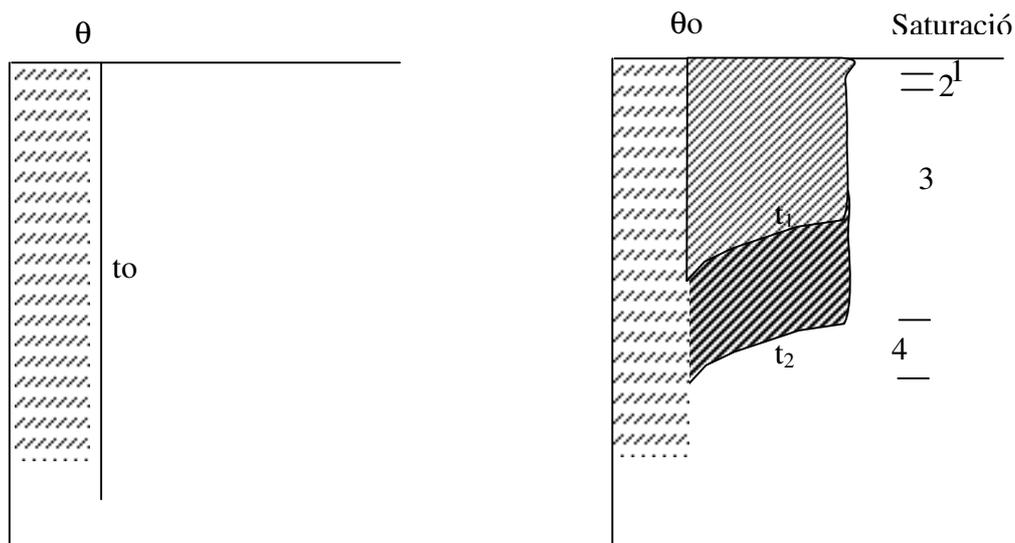
Se entiende por infiltración el flujo de agua desde el suelo hacia las zonas no saturada y saturada. El índice de infiltración (f) es el flujo de agua por unidad de tiempo y de área total.

Los **factores** que afectan a la infiltración son:

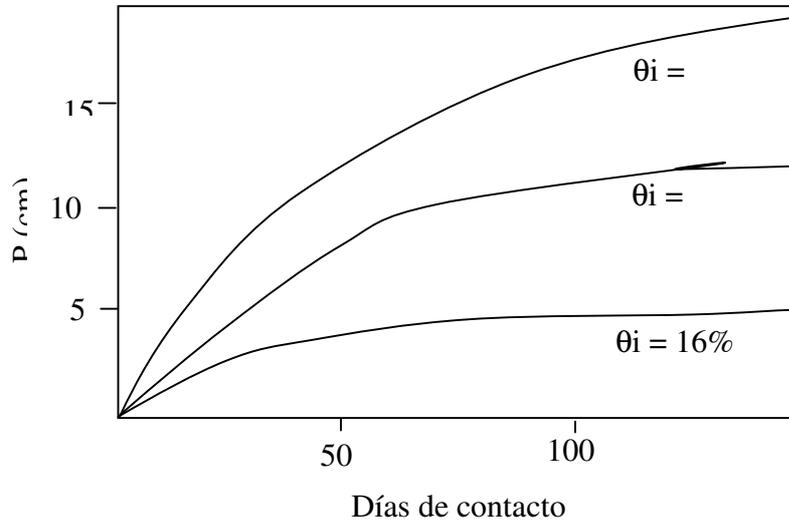
- tipo de cubierta vegetal
- características hidráulicas del suelo
- estado de humedad del suelo
- intensidad de la lluvia o cantidad de agua de riego
- calidad del agua
- formación de costras superficiales
- trabajos agrícolas

El agua penetra en el suelo creándose dos zonas:

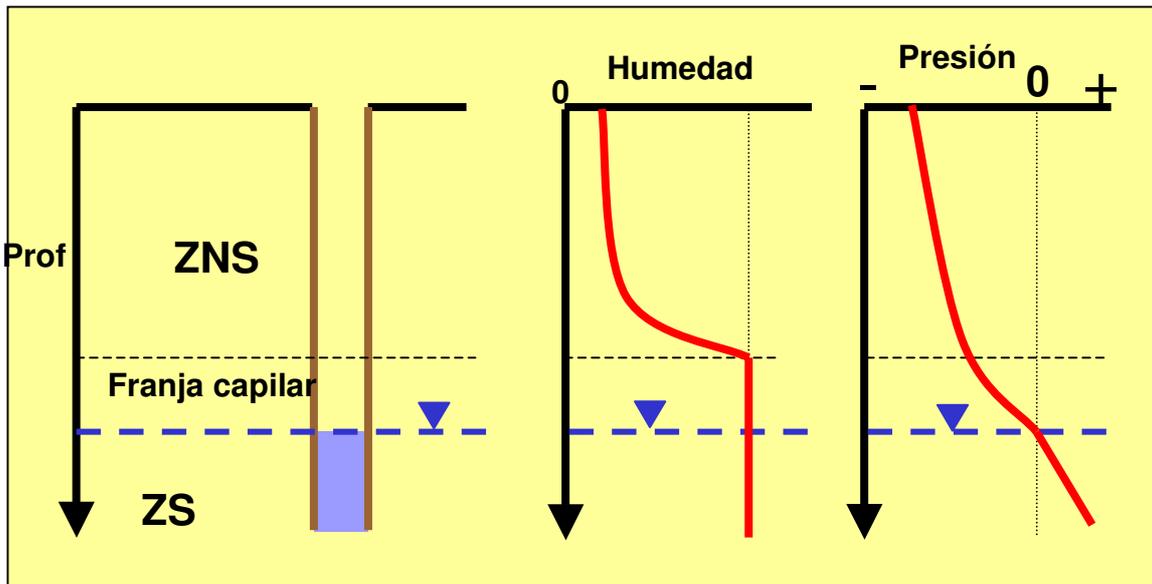
- Zona de transmisión, en la que el suelo se halla próximo a la saturación y sólo transmite el agua
- El frente mojante o frente de humectación, que es la zona donde la humedad varía rápidamente y que avanza, al tiempo que su amplitud aumenta



- 1 Zona de saturación, 2 Zona de transición, 3 Zona de transmisión, 4 Frente de humectación en t2



P = penetración de agua desde un suelo húmedo a un suelo seco



Cálculo de la infiltración

El cálculo de la infiltración se puede efectuar rigurosamente mediante la integración numérica de la ecuación de Richards, que tiene en cuenta las variaciones de humedad, tensión y conductividad hidráulica.

También se puede calcular mediante fórmulas empíricas, entre las que una de las más utilizadas es la ecuación de Horton:

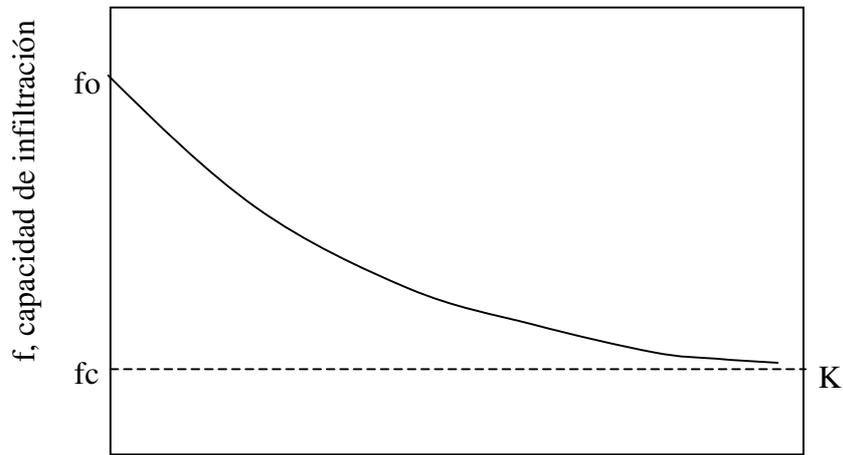
$$\theta_i = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt}$$

f = índice de infiltración

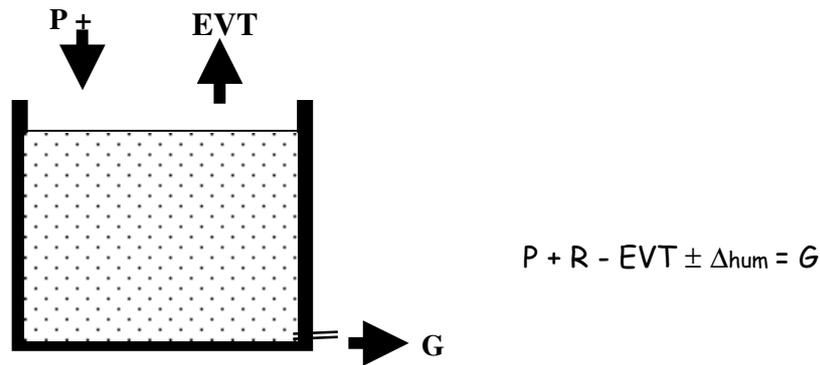
f_o = capacidad inicial

f_c = capacidad final (= K_{sat})

K = constante



Experimentalmente, se puede determinar mediante *lisímetros*, que tienen problemas bien conocidos de representatividad, y flujos preferenciales



Otro método experimental son los *infiltrómetros*, que miden más bien la capacidad de un suelo para infiltrar, pero también son poco representativos.

A escala del acuífero, se pueden hacer estimaciones a partir de las variaciones del almacenamiento o de los caudales de las surgencias.

El método de la *concentración de cloruros* supone que el acuífero no aporta cloruros, lo cual suele ser cierto en acuíferos kársticos, de manera que la concentración en los manantiales debe ser mayor que en el agua de lluvia, debido a concentración por evapotranspiración.

Se puede asumir, entonces que: $I = [Cl]_p / [Cl]_{man}$

Si se representa en un gráfico la evolución de la precipitación y de la evapotranspiración, se puede tener una idea del comportamiento del agua infiltrada.

