



POLITÉCNICA



TEMA 6: El agua en el suelo



MARTA GONZÁLEZ DEL TÁNAGO
UNIDAD DOCENTE DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL
E.T.S. DE INGENIEROS DE MONTES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

CONTENIDO

- Formas de almacenamiento del agua en el suelo
- La humedad del suelo: Importancia y factores que la regulan
- Medición de la humedad del suelo
- Capacidad de campo y Punto de marchitez de un suelo
- Potencial hídrico de un suelo
- Curvas de retención de humedad. Influencia de la Textura y la Estructura del suelo
- Movimiento del agua dentro del suelo: Ley de Darcy
- Conductividad hidráulica y Permeabilidad de un suelo
- Factores que determinan la conductividad hidráulica
- Perfil de un suelo y niveles de humedad
- Principales características de los acuíferos



EL AGUA EN EL SUELO

El agua en el suelo se encuentra almacenada en poros de diferente tamaño, los cuales condicionan su velocidad de paso y su facilidad de absorción por la vegetación.

Según el tamaño de poro en que se encuentra, podemos hablar de:

- **Agua gravitacional:** Se encuentra en las grietas y poros de mayor tamaño, y se mueve dentro del suelo por gravedad. Drena libremente.
- **Agua capilar:** Se encuentra retenida en los capilares del suelo y se mueve por fuerzas de capilaridad. Forma parte de la humedad del suelo que es aprovechable por la vegetación.
- **Agua higroscópica:** Procede del vapor de agua del aire del suelo, que queda adherida a las partículas del suelo y está fuertemente retenida por ellas.
- **Agua estructural:** Se encuentra formando parte de las moléculas de ciertos compuestos del suelo.



HUMEDAD DEL SUELO:

- **Importancia.** Problemas por defecto y por exceso
- **Factores que la regulan**
 - Entrada de agua en el suelo:
 - Precipitaciones
 - Condiciones de infiltración
 - Almacenamiento de agua en el suelo
 - Porosidad (Textura y Estructura)
 - Profundidad
 - Salida del agua del suelo
 - Evaporación directa
 - Evapotranspiración
 - Drenaje subterráneo



Conceptos relacionados con el contenido de humedad de un suelo

Capacidad de campo:

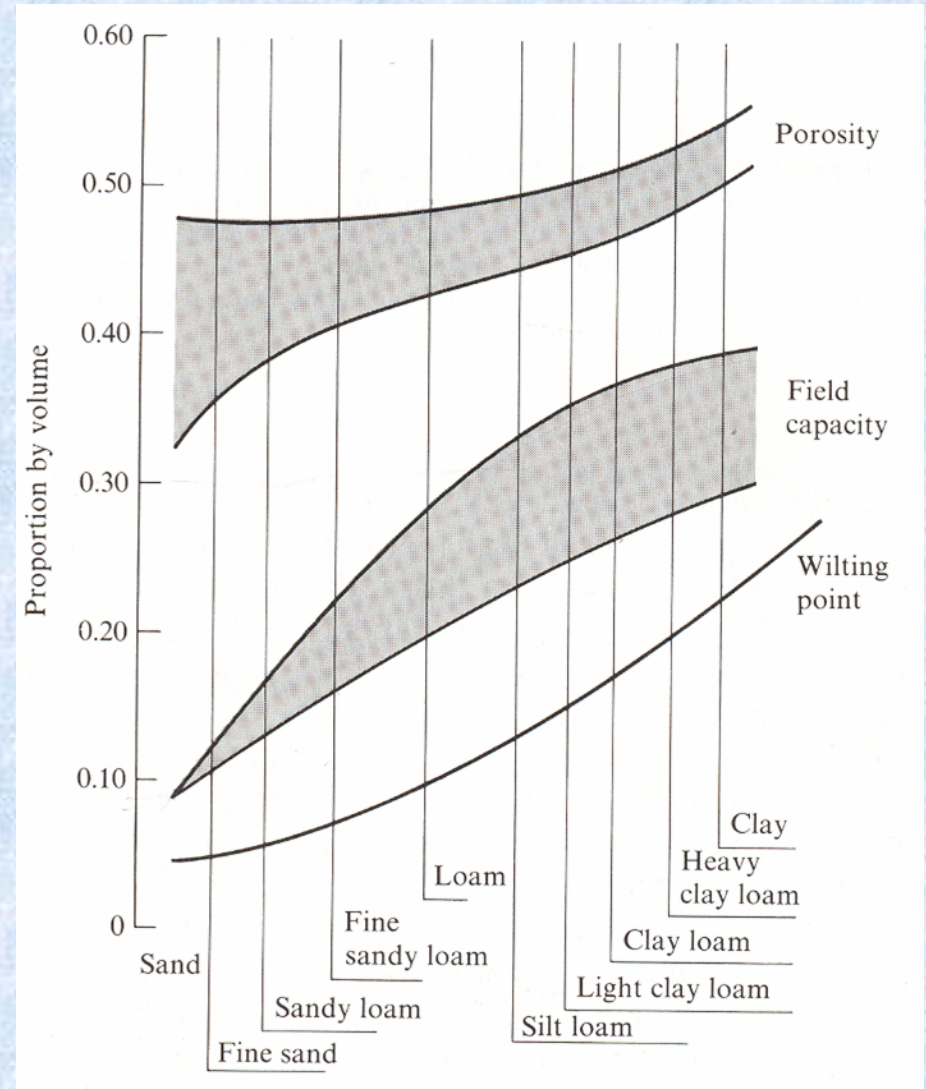
Contenido máximo de agua que puede retener un suelo

Punto de marchitez:

Contenido de agua retenida en el suelo después de aplicar una succión equivalente de 15 at

Agua disponible por la vegetación:

Diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez



Dunne & Leopold (1978)



MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO: Principales métodos

Unidades: % en volumen (V),
o en peso de suelo seco (m)

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \quad w = \frac{m_w}{m_s} \quad \theta_s = \frac{V_w}{V_v}$$

Índice de saturación θ_s : Volumen de agua en relación al volumen total de poros.

- Método gravimétrico:

- Toma de muestras de suelo (inalteradas si se refieren a un volumen fijo).
- Pesada en laboratorio con humedad. Desecación en estufa. Nueva pesada de la muestra, sin humedad. Humedad del suelo por diferencia de pesadas.
- Al hacer la medición se destruye la muestra del suelo.

TDR (Time Domain Reflectometry): Mide la constante dieléctrica del suelo, que está relacionada con su contenido de humedad.

La medición se realiza a través de varillas introducidas en el suelo, y no requiere la toma de muestras, pudiendo realizar las mediciones siempre en el mismo punto.



Potencial hídrico de un suelo: Energía potencial que tiene el agua del suelo.

Incluye varios componentes, siendo los más importantes:

- **Potencial gravitacional:** Se debe al agua gravitacional que contiene. Es siempre positivo. Equivale a la energía potencial que tiene el agua gravitacional en función de su altura por encima de un plano de referencia.
- **Potencial capilar:** Se debe al agua capilar. Es siempre negativo. Equivale al trabajo que hay que realizar para extraer el agua del suelo hasta un plano de referencia, la fuerza con la que el agua está retenida por las partículas del suelo.

El potencial hídrico se puede expresar en unidades de altura (potencial por unidad de peso), o en unidades de presión (potencial por unidad de volumen).

$$E_p = mgh \qquad P = \frac{mgh}{mg} = [h] \qquad P = \frac{mgh}{v} = \frac{[ML^2T^{-2}]}{[L^3]} = [ML^{-1}T^{-2}]$$

pF del suelo:

Logaritmo en base 10 del potencial hídrico del suelo, expresado en cm.



Relación entre el estado de humedad del suelo y su potencial capilar

- Saturación: Potencial capilar: 0
pF = 0
- Capacidad de campo: Potencial capilar: - 0,33 at.; 340 cm agua
pF = 2,5 aproximadamente
- Punto de marchitez: Potencial capilar: -15 at. ; 15.340 cm agua
pF = 4,2 aproximadamente

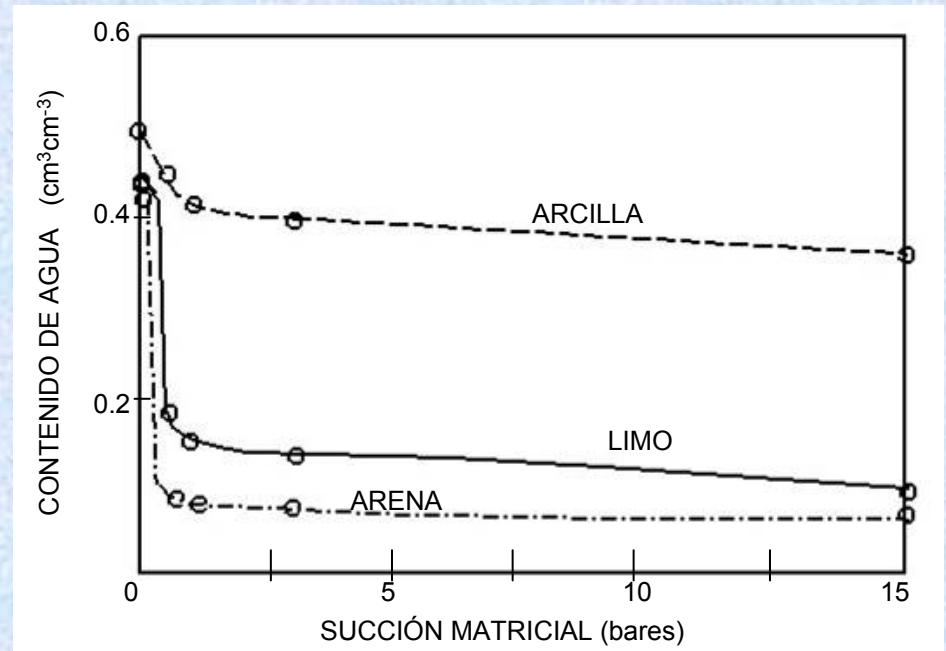
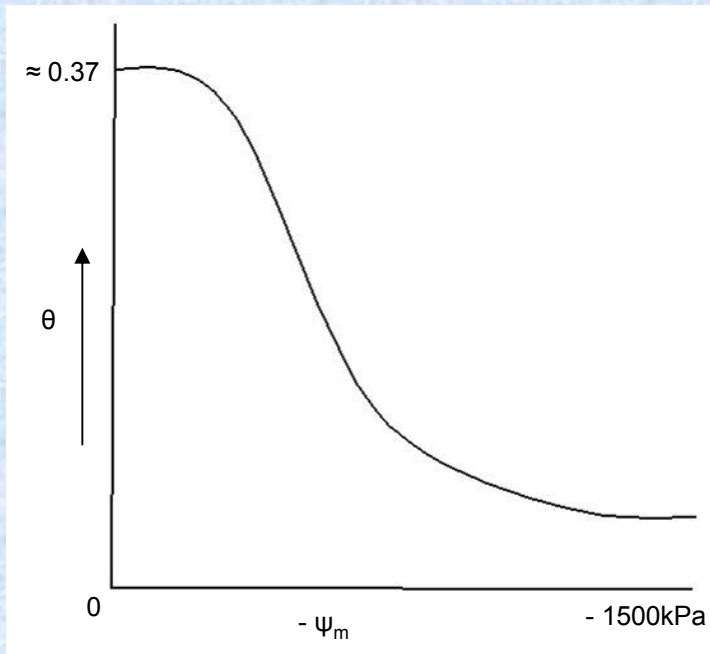


En relación a la humedad del suelo, es importante conocer no solo la cantidad de agua presente en el suelo, sino también su potencial o la fuerza con la que está retenida por las partículas del suelo.

Curvas de retención de humedad del suelo:

Expresan la relación entre el contenido de humedad y su potencial

Dependen de los factores relacionados con la porosidad del suelo



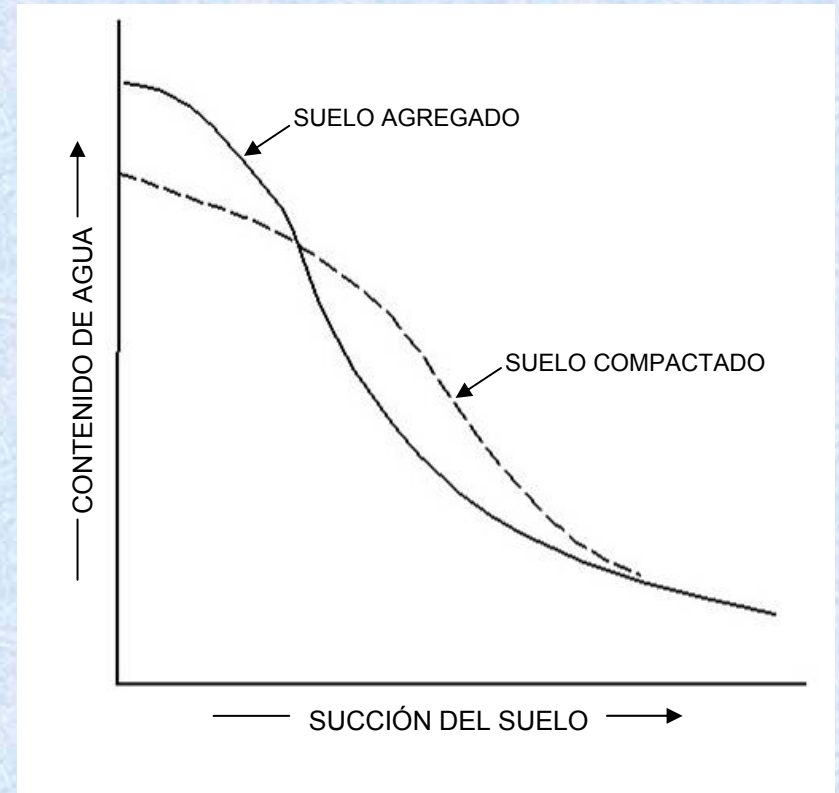
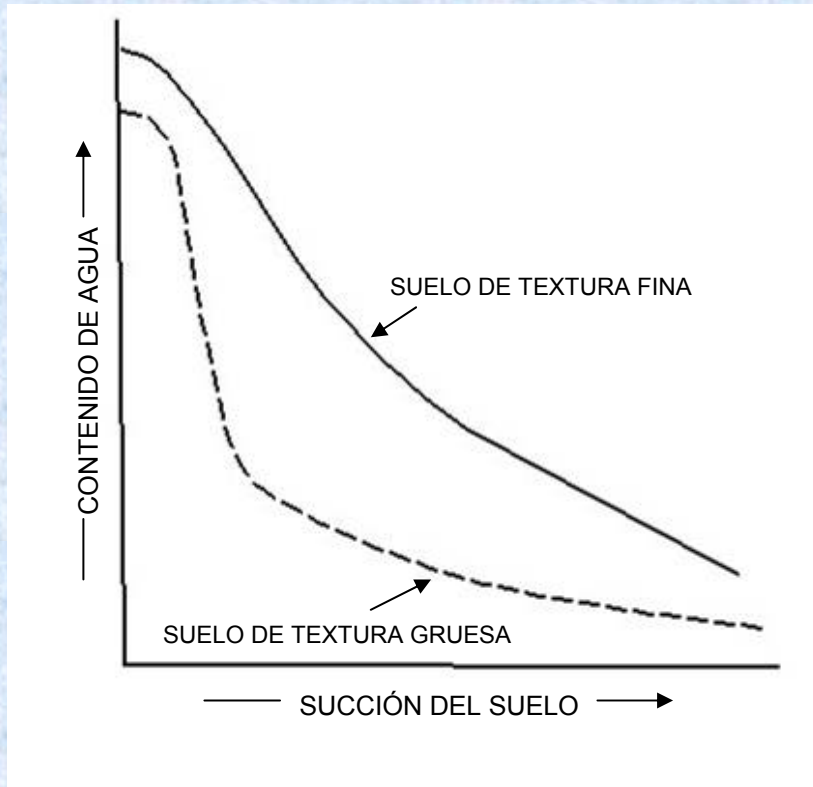
Modificado de Tripathi y Ghidyal (1987)



Curvas de retención de humedad del suelo

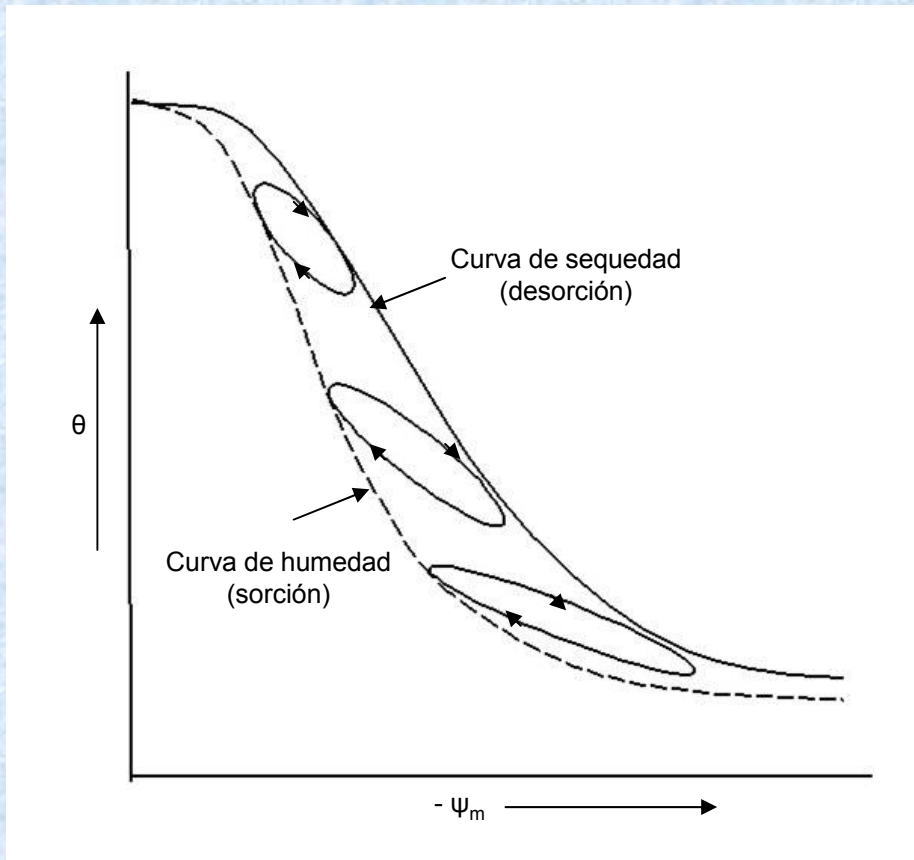
Efecto de la **textura**

Efecto de la **estructura**



Modificado de Tripathi y Ghidyal (1987)

HISTÉRESIS EN LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA EN EL SUELO



Modificado de Tripathi y Ghidyal (1987)

- La humedad del suelo es mayor en la fase de desecación, que en la fase de humectación, a igualdad de potencial matricial.

- La entrada de agua (humectación) es controlada por los poros de mayor tamaño y la salida (desecación) por los de menor tamaño.

- Efecto de “cuello de botella”
- Presencia de aire atrapado
- Ángulo de contacto en los capilares

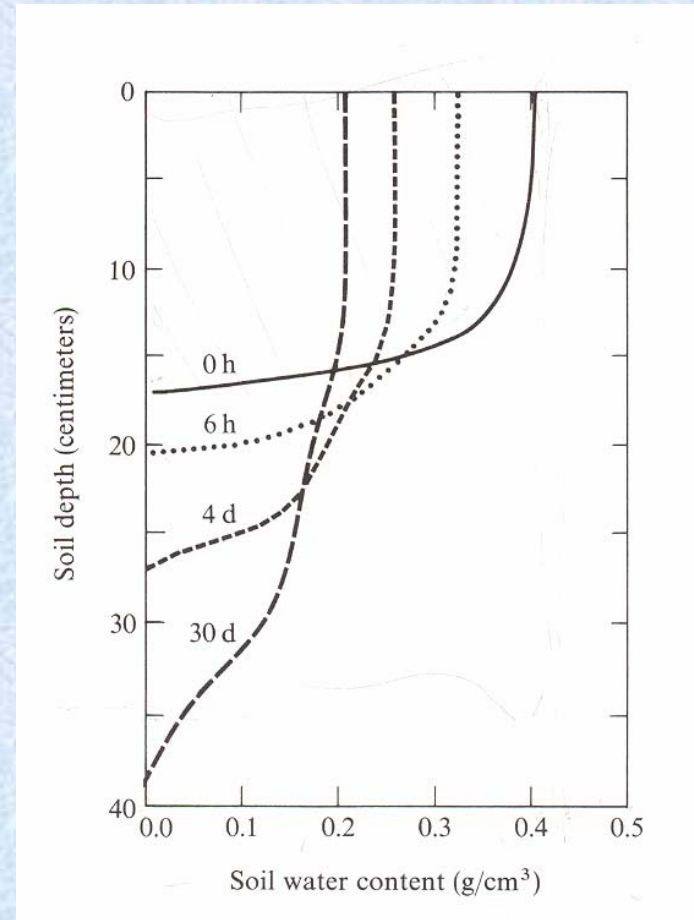
MOVIMIENTO DEL AGUA DENTRO DEL SUELO

El agua se mueve dentro del suelo por **diferencias de potencial hídrico**, de las zonas de mayor potencial (generalmente más húmedas) a las zonas de menor potencial (generalmente más secas), siguiendo la dirección en que es mayor la pérdida de potencial por unidad de longitud recorrida.

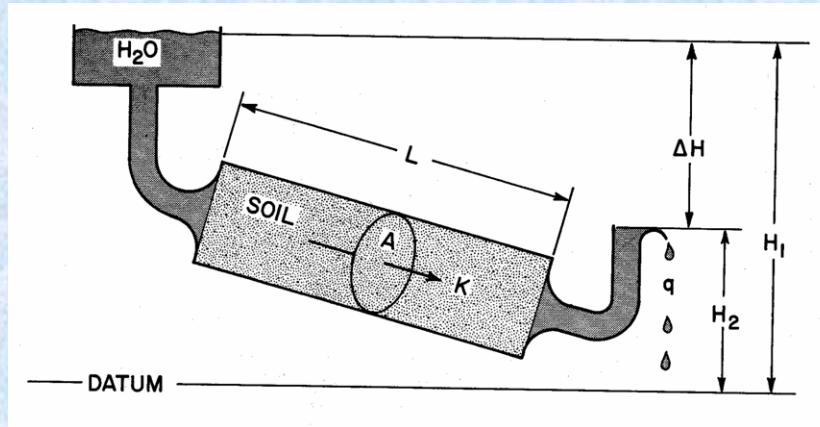
El resultado de este movimiento es la redistribución de la humedad en su interior.

Perfiles de humedad de un suelo, en diferentes momentos después de la aplicación de una lluvia.

Dunne & Leopold (1978)



La ley que rige el movimiento del agua dentro del suelo es la **ley de Darcy**:



$$V = K \frac{\Delta h}{L}$$

Dunne & Leopold (1978)

$$Q = A * V = wd * K (\Delta h / L) \quad q = \frac{Q}{wd} = K \frac{\Delta h}{L}$$

Q es el caudal circulante entre dos puntos, a través de una sección perpendicular al sentido de flujo; q es el caudal específico, por unidad de superficie

w y d son la anchura y profundidad de la sección de paso

K es la conductividad hidráulica

Δh es la diferencia de potencial entre los dos puntos

L es la distancia entre los dos puntos, en el sentido del flujo

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y PERMEABILIDAD

La **conductividad hidráulica** (K) de un suelo es la capacidad que tiene ese suelo para dejar circular el agua a su través:

$$K = \frac{Q}{wd(\Delta h / \Delta l)} = \frac{q}{(\Delta h / \Delta l)} \quad K = [LT^{-1}]$$

La conductividad hidráulica K puede definirse como el caudal específico (por unidad de superficie) que circula por el suelo entre dos puntos, cuya diferencia de potencial y distancia son la unidad.

$$K = k * \rho g / \eta$$

K tiene dos componentes:

- k **permeabilidad intrínseca** del suelo, que depende de la estructura y geometría de los poros.

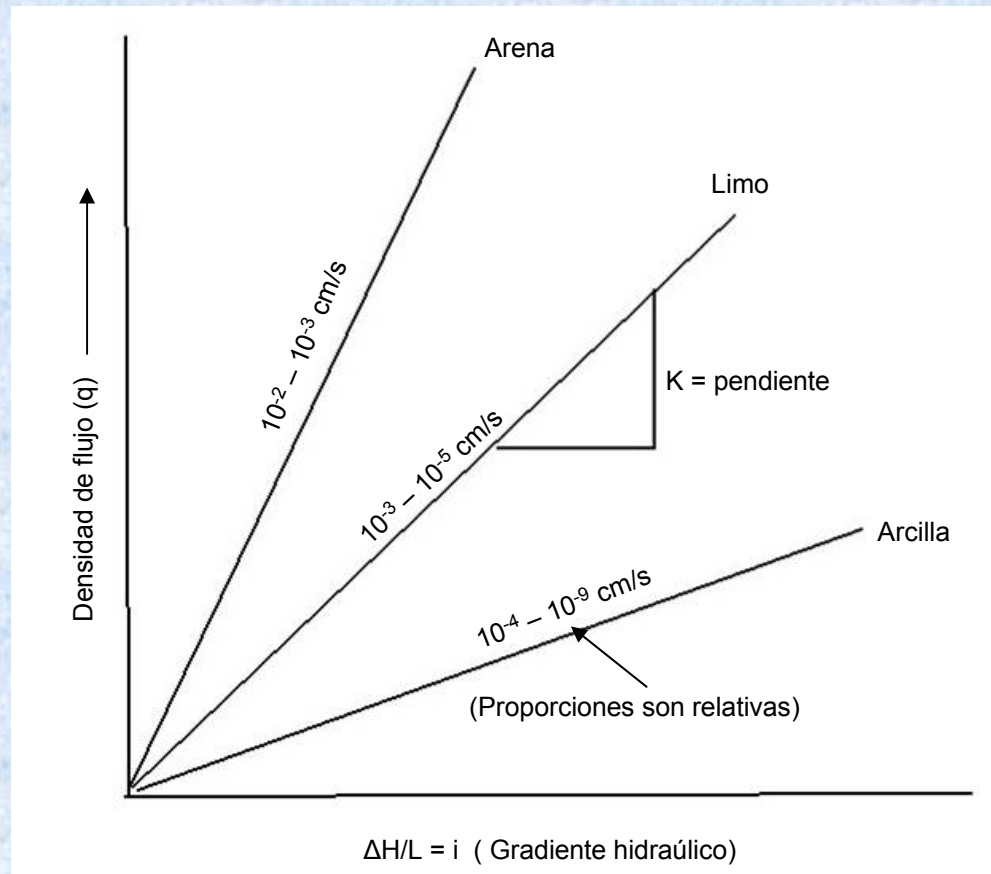
$$k = [L^2]$$

- el componente ligado a la fluidez del agua, relacionado con su viscosidad.



CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS SATURADOS

Es una **constante**, que depende de la permeabilidad intrínseca, ligada a las propiedades del medio poroso.



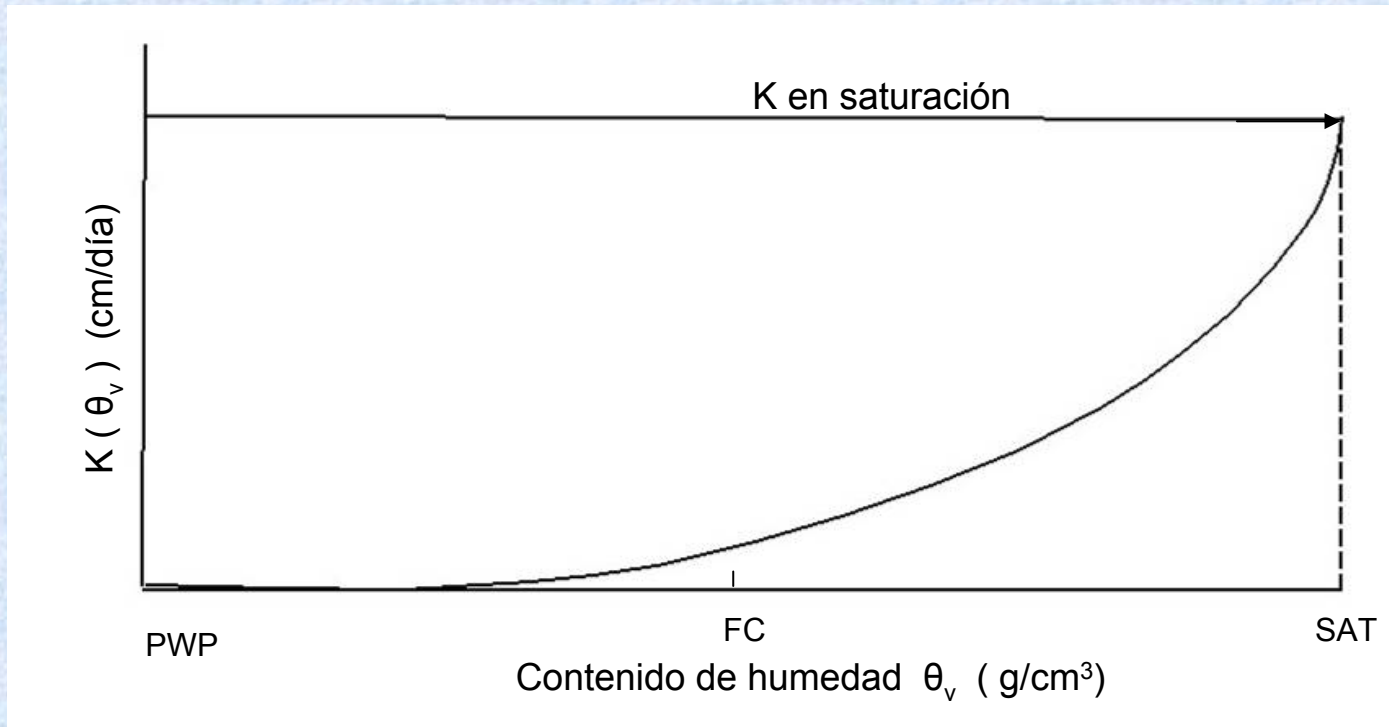
Modificado de Tindall y Kunkel (1999)



CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS NO SATURADOS

Es una **variable**, que depende de la permeabilidad intrínseca, ligada a las propiedades del medio poroso, y de su contenido de humedad.

$$K = f(\theta)$$

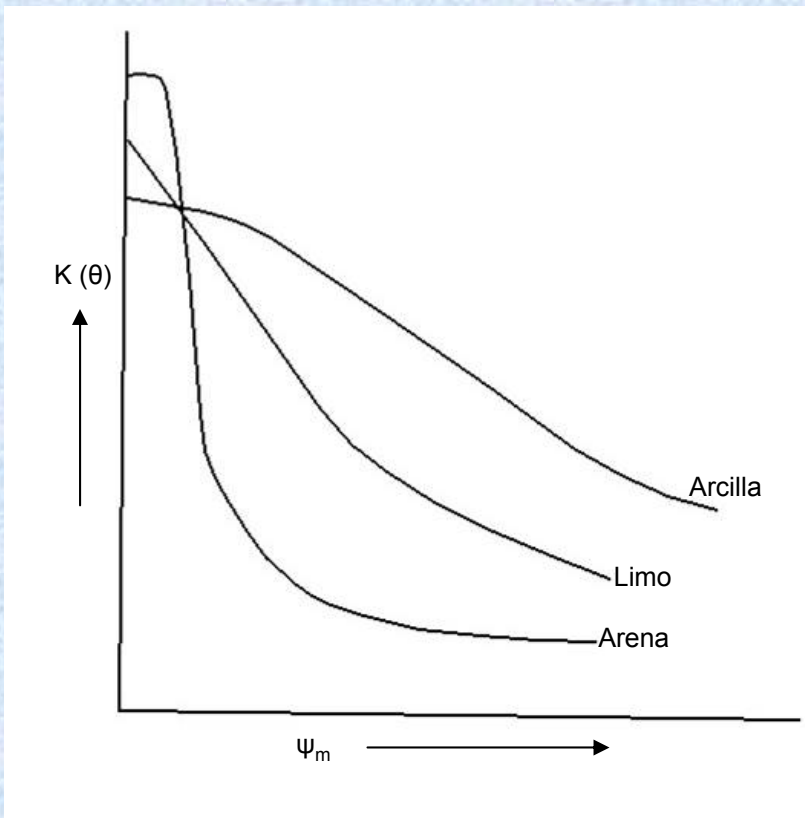


Ley de Buckingham-Darcy:

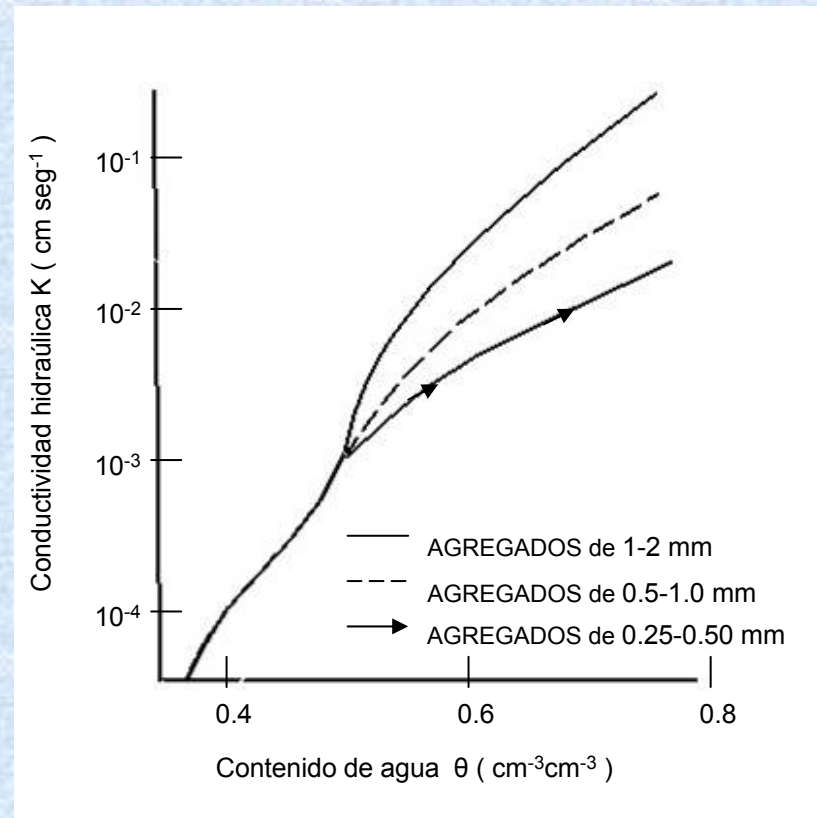
$$q = K(\theta) \frac{\Delta h}{L}$$

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS NO SATURADOS

Efecto de la **textura**



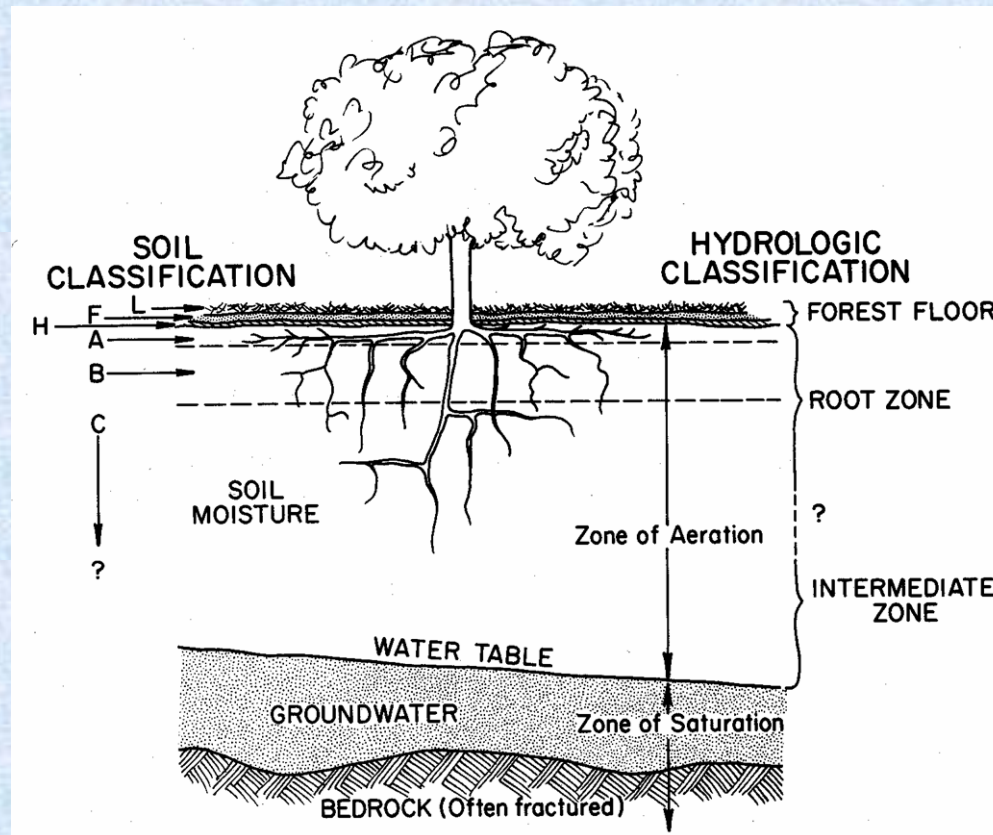
Efecto de la **estructura**



Modificado de Ghildyal y Tripathi (1987)

Perfil de un suelo y niveles de humedad

La mayor parte del agua de las precipitaciones entra en el suelo y pasa a incrementar la “humedad del suelo” (en la zona no saturada) o el “agua subterránea” (en la zona saturada o acuífero).



L (litter)

F (fermentación)

H (humus)

Hewlett (1982)

ACUÍFEROS: Zonas saturadas de agua que se encuentran en el interior del suelo.

Se originan en ciertas formaciones geológicas porosas y permeables que están llenas de agua, las cuales son capaces no solo de almacenar agua sino también de transmitirla a otras zonas.

A escala global, se estima que en los acuíferos se almacena una cantidad de agua 200 veces superior a la que circula por los ríos.

Los acuíferos están conectados con el resto de la cuenca, donde se pueden reconocer:

Áreas de recarga de los acuíferos:

Son las zonas por donde entra el agua en el suelo y percola hasta la zona saturada (Zonas con buenas condiciones de infiltración y drenaje interno).

Áreas de descarga de los acuíferos:

Son las zonas donde la topografía del terreno corta a las zonas saturadas, aflorando el agua almacenada. Corresponden a zonas bajas, vaguadas o depresiones, o valles fluviales.



TIPOS DE RÍOS

- **Ríos efluentes** o ganadores:

Actúan como zonas de descarga.

- Descarga o Recarga, en función del nivel de los caudales.

- **Ríos influentes** o perdedores:

Actúan como zonas de recarga.

TIPOS DE ACUÍFEROS

- **Acuífero libre:** Está en contacto con la capa freática, que oscila en función del contenido de humedad del suelo. Sobre ellos actúa la presión atmosférica.

- **Acuífero confinado:** Se encuentra limitado por una capa superior impermeable.

- **Acuífero colgado:** Acuífero confinado de reducido tamaño y carácter temporal, formado a poca profundidad del suelo.



La permeabilidad del acuífero expresa su habilidad para transmitir el agua, y depende del tamaño y forma de los poros.

En general, esta permeabilidad disminuye con la profundidad.

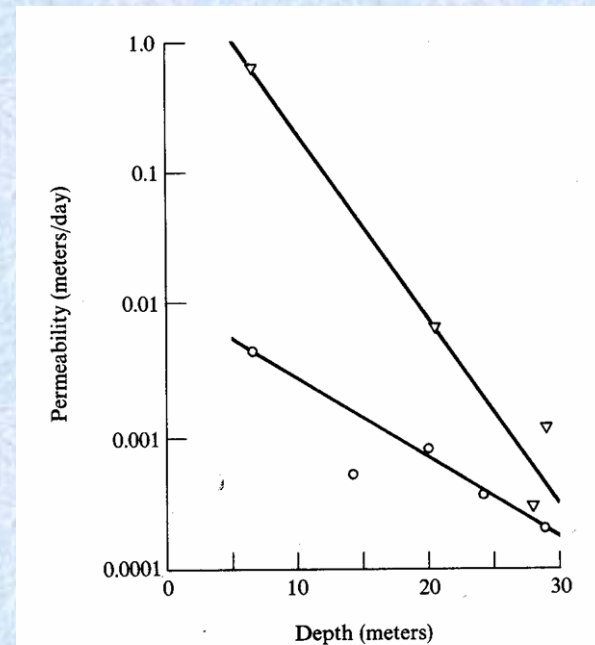


Figure 7-8 Variability of permeability with depth below the ground surface for two rock types in southern British Columbia. Open circles are measurements in granodiorite and gabbro, the closed circle is from a sheared granodiorite, and the triangles represent measurements in a volcanic tuff. (Modified from Lawson 1968. Reproduced by permission of the National Research Council of Canada from the *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 5, pp. 813-824.)

Dunne & Leopold (1978)



CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LAS ROCAS

- Porosidad
- Permeabilidad
- Propiedades acuíferas:

a) *Retención específica del acuífero:*

Cociente entre el volumen de agua capilar y el volumen de agua total

b) *Aportación específica del acuífero:*

Cociente entre el volumen de agua gravitacional y el volumen de agua total

*Porosidad del acuífero =
Aportación específica + Retención
específica*

Tabla 2.7.- Rangos de valores medios de porosidad y permeabilidad de las distintas rocas (Recopilados por Gregory y Walling, 1985).

Roca	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/día)
No consolidada: Arcilla	45 - 60	$10^{-6} - 10^{-4}$
Limo	20 - 50	$10^{-3} - 10$
Arena	30 - 40	$10 - 10^4$
Grava	25 - 40	$10^2 - 10^6$
Consolidada: Argillita	5 - 15	$10^{-7} - 10$
Arenisca	5 - 20	$10^{-2} - 10^2$
Caliza	1 - 10	$10^{-2} - 10$
Conglomerados	5 - 25	$10^{-4} - 1$
Granito	$10^{-5} - 10$	$10^{-7} - 10^{-3}$
Basalto	$10^{-4} - 50$	$10^{-5} - 10^{-2}$
Pizarra metamórfica	$10^{-4} - 1$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Esquistos	$10^{-4} - 1$	$10^{-9} - 10^{-5}$
Gneiss	$10^{-5} - 1$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Roca volcánica	10 - 80	$10^{-6} - 10^{-2}$

