

Universidad de Los Andes
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Escuela de Ingeniería Forestal.

El Agua en el Suelo

Clifford D. Peña Guillén

TEMA 5

- Conceptos básicos fundamentales
- Relación entre el contenido de humedad y la energía de retención
- Clasificación física del agua
- Agua Disponible retenida en el suelo
- Contenido de Agua en el Suelo.

El agua es esencial para el funcionamiento adecuado de los procesos del suelo, la vegetación y la vida sobre el planeta.



Es disolvente y medio de transporte para los nutrientes de las plantas, fuente de hidrógeno, moderador de la temperatura del suelo y de la aireación, así como un agente de disolución de sustancias tóxicas de los suelos.

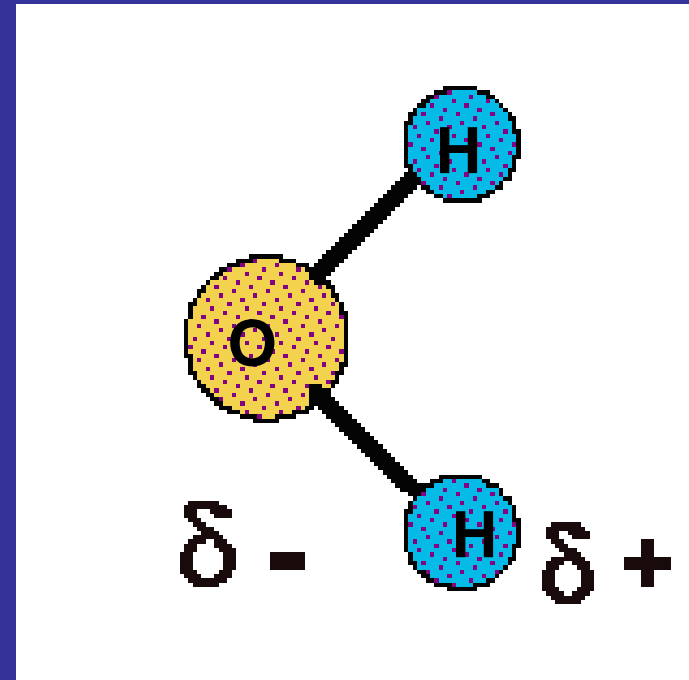
Finalmente, el golpe del agua de lluvia sobre la superficie del suelo determina en alto grado la incidencia de la erosión, amenaza devastadora que pone en peligro la fertilidad del suelo, induce al sellado y encostramiento de los suelos.

El Ciclo Hidrológico

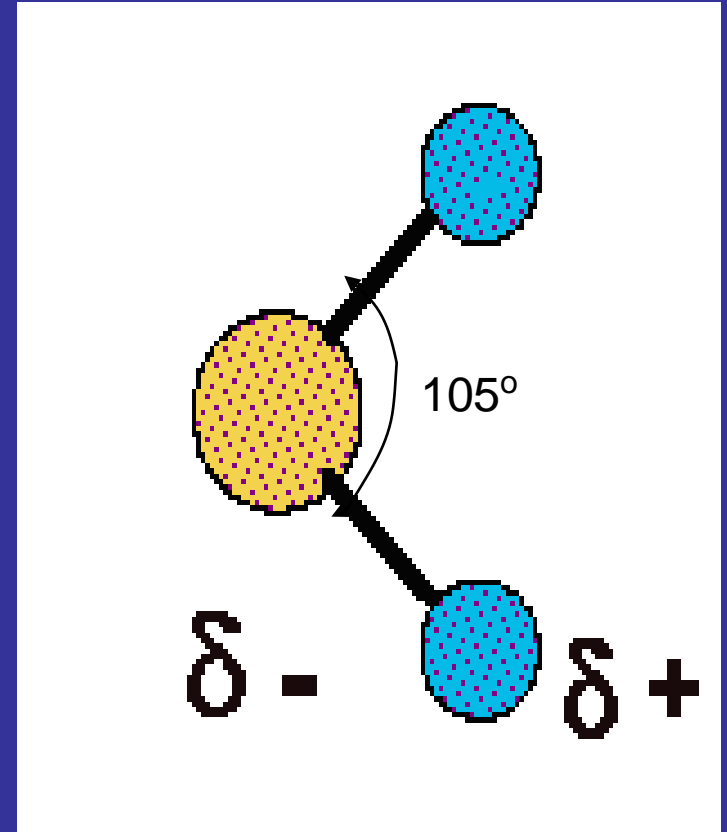


Estructura y Propiedades Moleculares del Agua

- La molécula de agua está formada por dos átomos de H unidos a un átomo de O por medio de dos **enlaces covalentes**.



- La disposición tetraédrica del oxígeno determina un ángulo entre los enlaces H-O-H aproximadamente de 105° , además el oxígeno es más **electronegativo** que el hidrógeno y atrae con más fuerza a los electrones de cada enlace.

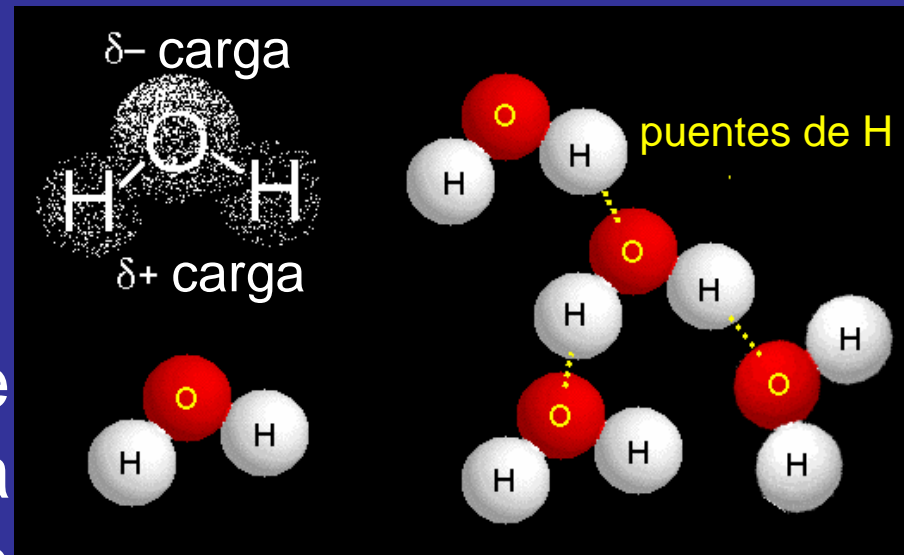


Propiedades del agua

Acción disolvente

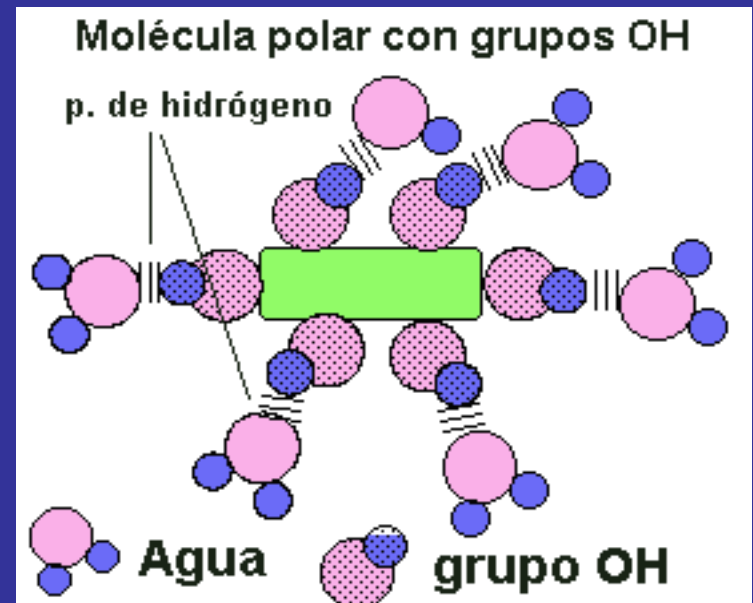
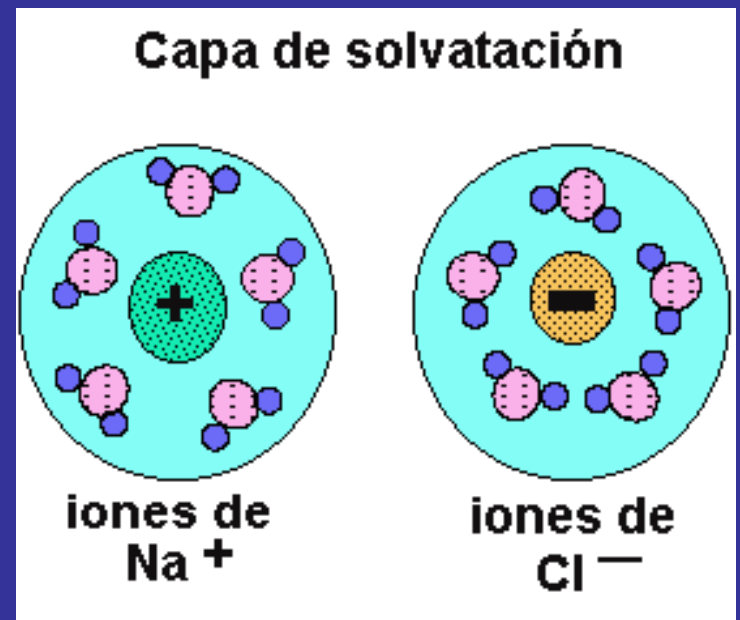
El agua es el líquido que más sustancias disuelve, por eso decimos que es el disolvente universal.

Esta propiedad, se debe a su capacidad para formar puentes de hidrógeno.

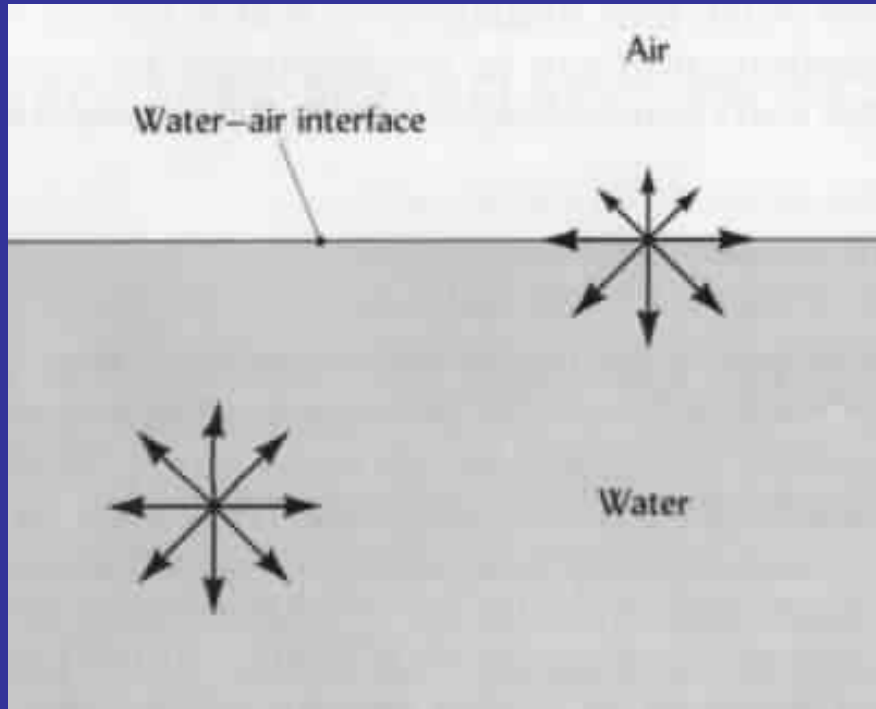


Moléculas de agua pueden disolver a sustancias salinas que se disocian formando *disoluciones iónicas*

Algunos grupos polares (alcoholes, azúcares con grupos $R-OH$, aminoácidos y proteínas con grupos que presentan cargas + y -), da lugar a *disoluciones moleculares*



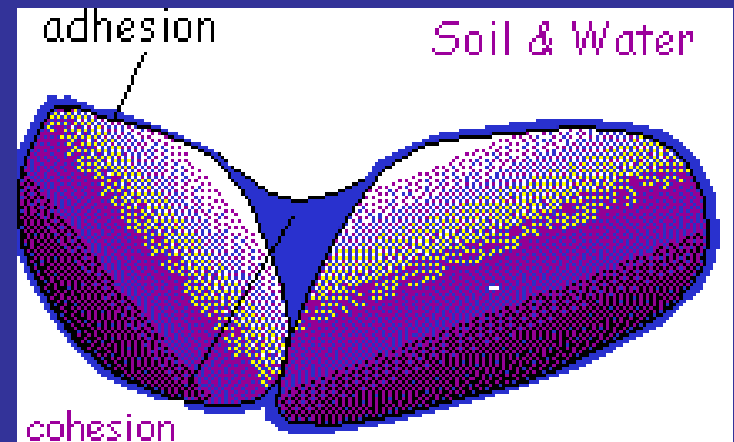
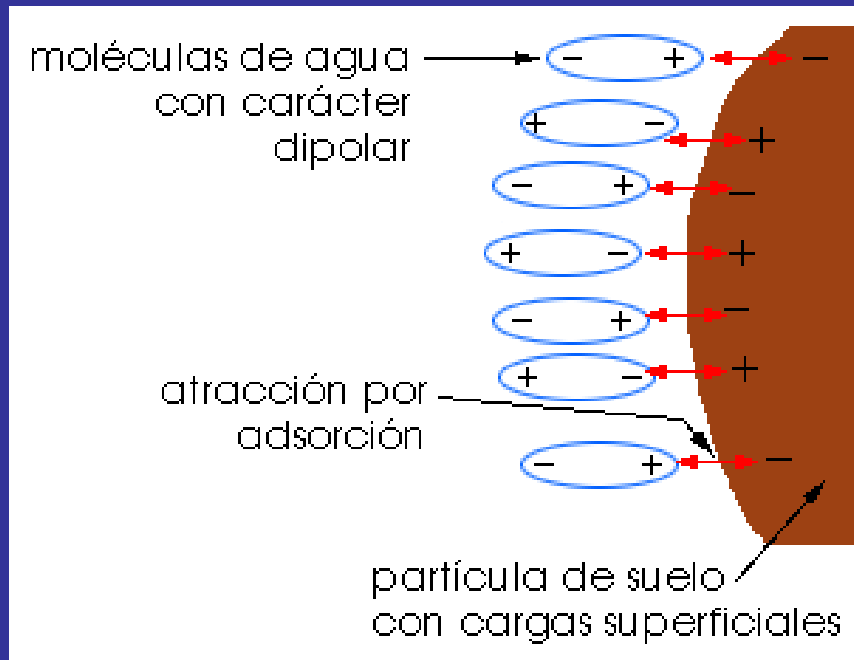
Tensión Superficial



- La tensión superficial es una medida de la resistencia que ofrecen los líquidos a la rotura de su superficie, o dicho de otro modo, de la tendencia del líquido a la formación de gotas.
- Los puentes de H confieren al agua una **tensión superficial** relativamente **alta**, lo que significa que tiene un grado de resistencia más o menos alto a la formación de gotas.

Elevada fuerza de adhesión

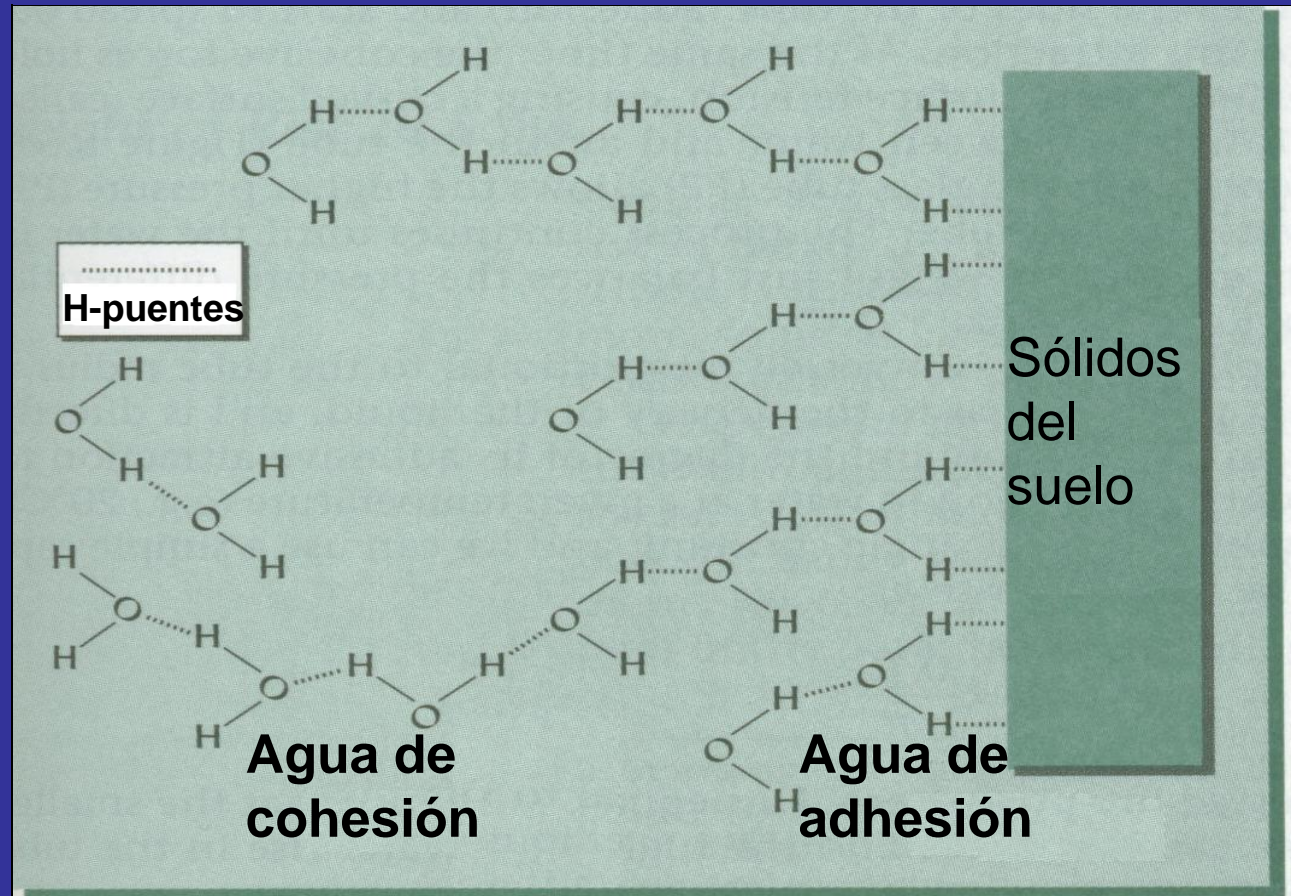
La fuerte atracción que ejerce el suelo en las moléculas de agua



Agua no disponible para las plantas

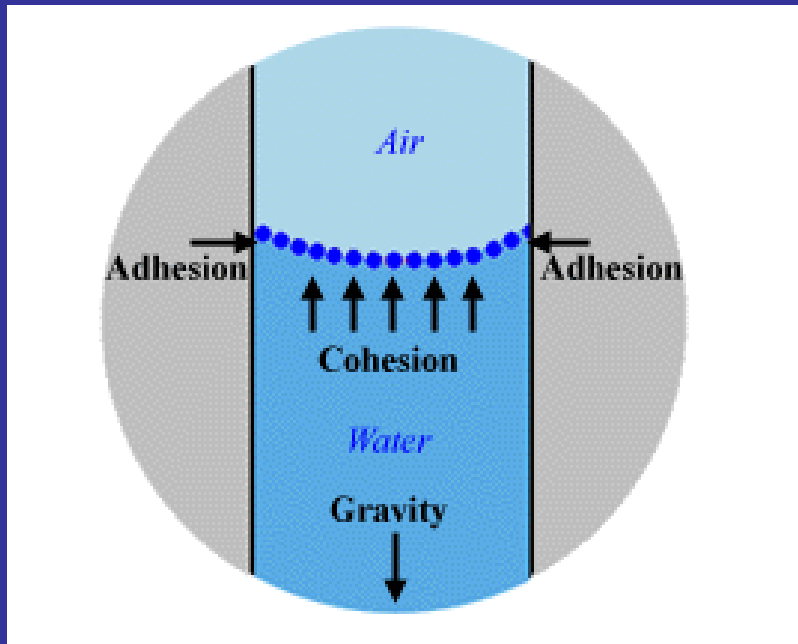
Elevada fuerza de cohesión

Los puentes de hidrógeno mantienen las moléculas de agua fuertemente unidas, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incomprensible.

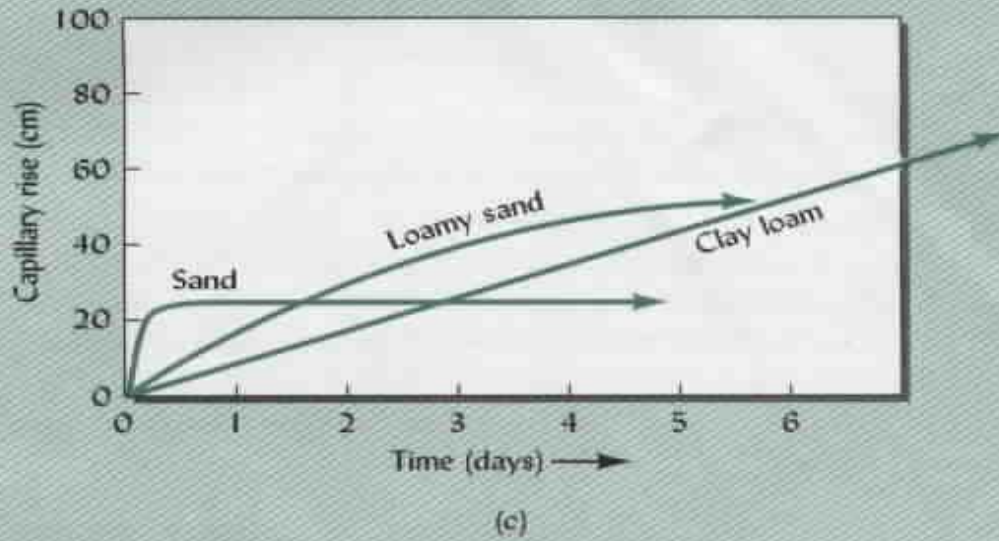
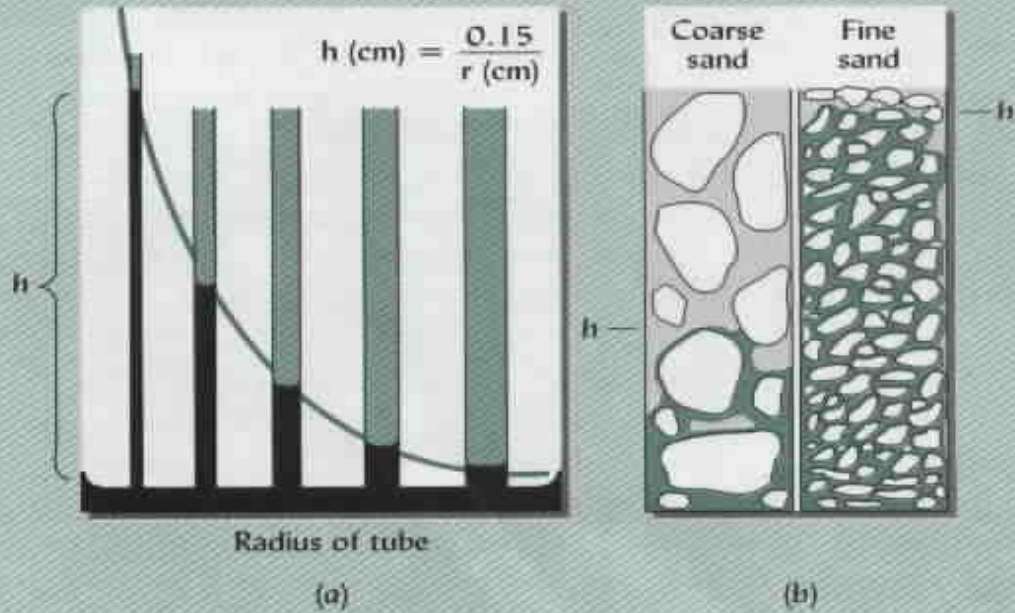


Capilaridad

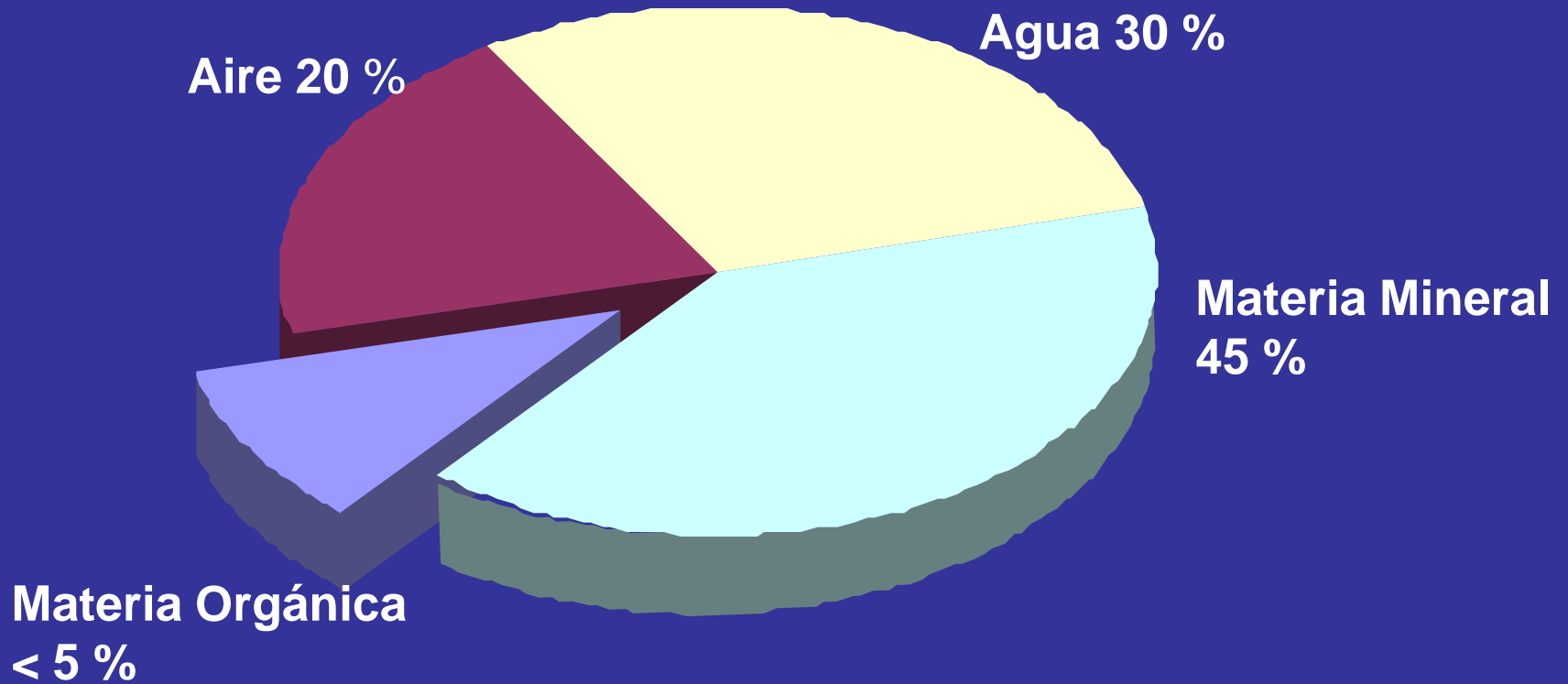
- La capilaridad es una propiedad del agua que se debe tanto a la adsorción como a la tensión superficial provocada por la cohesión.
- Cuando se introduce un capilar, o tubo fino, (ver figura) en un recipiente con agua, ésta asciende por el capilar como si trepase agarrándose por las paredes, hasta alcanzar un nivel superior al del recipiente.
- El agua se adhiere a la superficie del capilar ascendiendo como un continuo, producto de la cohesión entre las moléculas del agua.



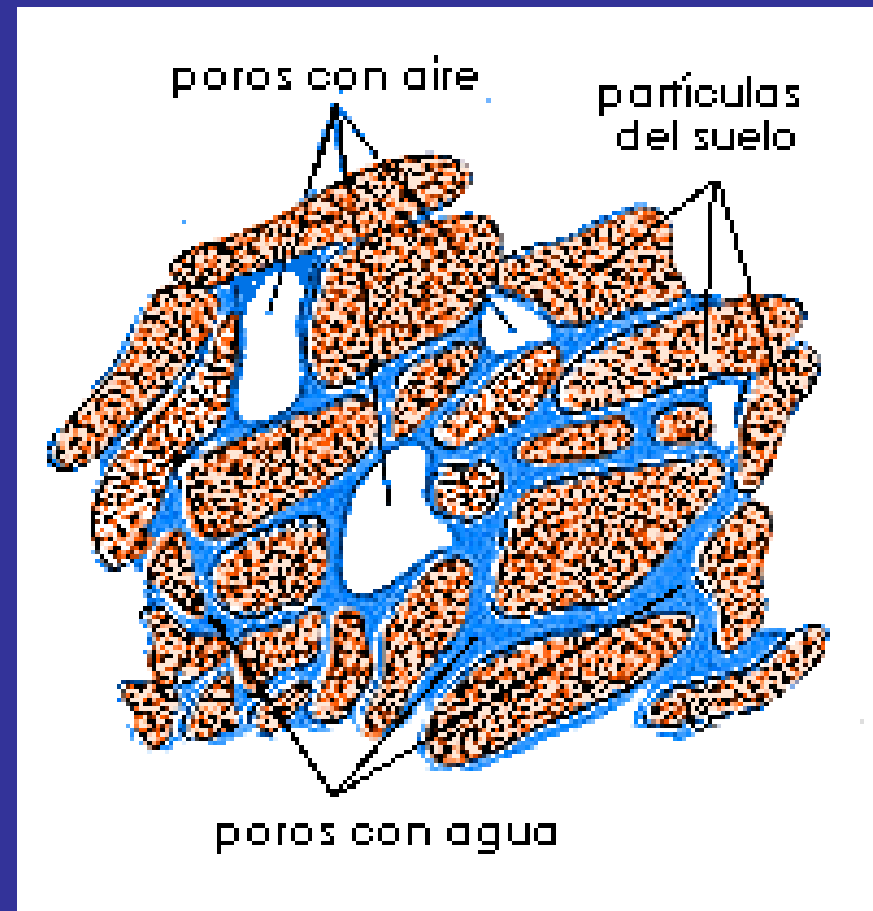
Unsaturated flow by capillarity



Componentes del Suelo



La fase líquida circula a través del espacio poroso, queda retenida en el suelo y esta en constante competencia con la fase gaseosa. Las condiciones atmosféricas hacen variar los porcentajes de cada fase en cada momento



Relación entre el contenido de humedad y la energía de retención

La energía con que el agua esta retenida, permite emplear términos para definir diferentes constantes de energía en los suelos, las cuales caracterizan dichos estados de retención hídrica.

- Saturación,
- Capacidad de campo,
- Punto de marchitez permanente,
- Coeficiente higroscópico

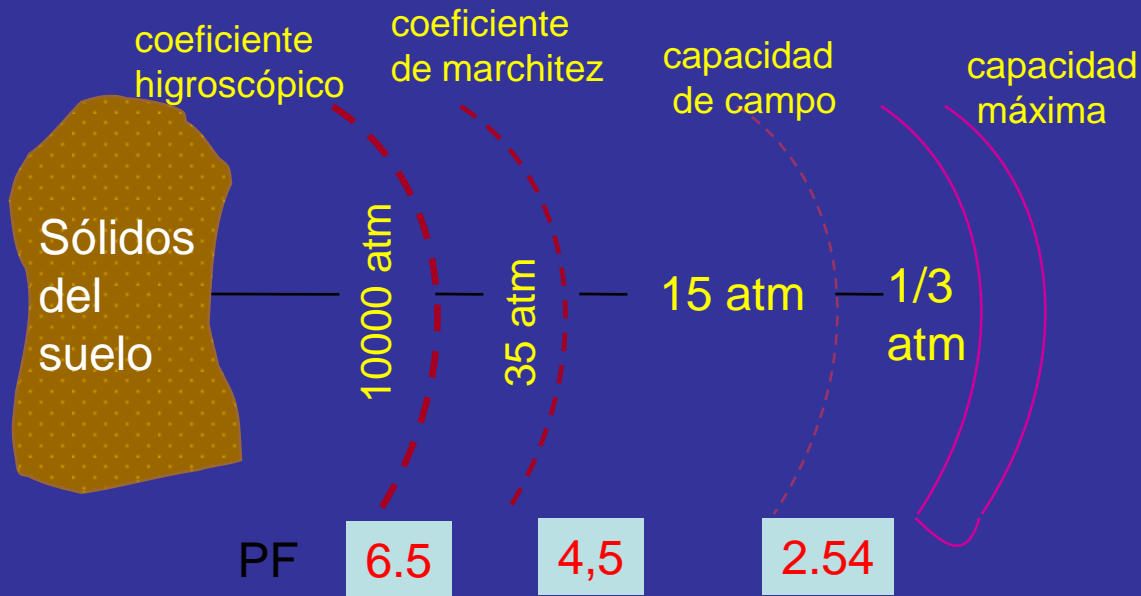


Diagrama que muestra la relación entre el espesor de las películas de agua y la tensión con que el agua es retenida en la interfase liquido-aire (la tensión se expresa en atmósferas).

Clasificación Física del Agua

Las curvas de humedad-tensión nos indican que a medida que la humedad del suelo aumenta o disminuye, existe un cambio gradual en la tensión, según el cual el agua esta retenida.

- Agua gravitacional o libre
- Agua de capilaridad
- Agua higroscópica
- Agua molecular

Agua Gravitacional o Libre

El agua gravitacional se mantiene en los macroporos del suelo, después de los periodos de lluvia.

- No está retenida en el suelo
- Se habla de agua gravitacional de **flujo lento** y agua gravitacional de **flujo rápido** en función de su velocidad de circulación.
- Tensiones a que esta sometida: esta sometida a tensiones inferiores de 0,1 a 0,5 atm.

De flujo rápido

- La que circula por poros mayores de 30 micras.
- Es un agua que no queda retenida en el suelo y es eliminada al subsuelo, pudiendo alcanzar el nivel freático.
- Es un agua inútil, ya que cuando está presente en el suelo los poros se encuentran totalmente saturados de agua, el medio es asfixiante y las raíces de las plantas no la pueden tomar.
- Es una agua no aprovechable por las plantas.
- Causa erosión.

De flujo lento

- La que circula por poros comprendidos entre 8 y 30 micras de diámetro.
- Se admite que está retenida levemente por la matriz del suelo.
- Tarda de 10 a 30 días en atravesar el suelo y en esos días es utilizable por las plantas.

Agua Capilar

Llena los espacios capilares mas finos e intermedios del suelo. Queda en este después que el agua gravitacional o libre percola. El movimiento de esta agua puede tener cualquier sentido según la fuerza de tensión que exista y ser descendente, lateral y ascendente.

Agua Capilar

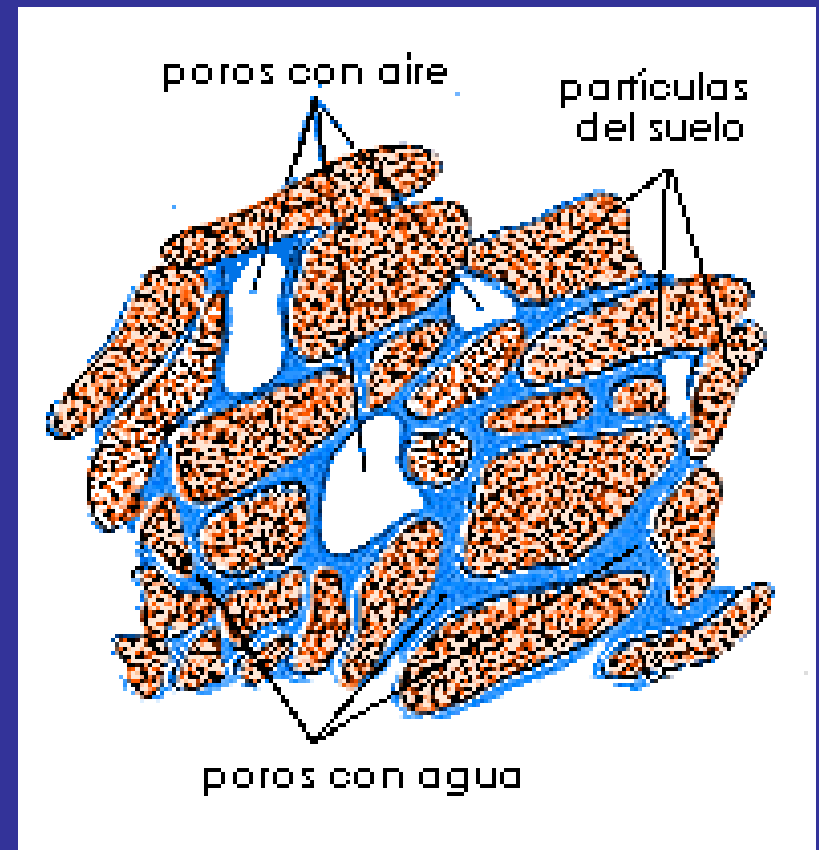
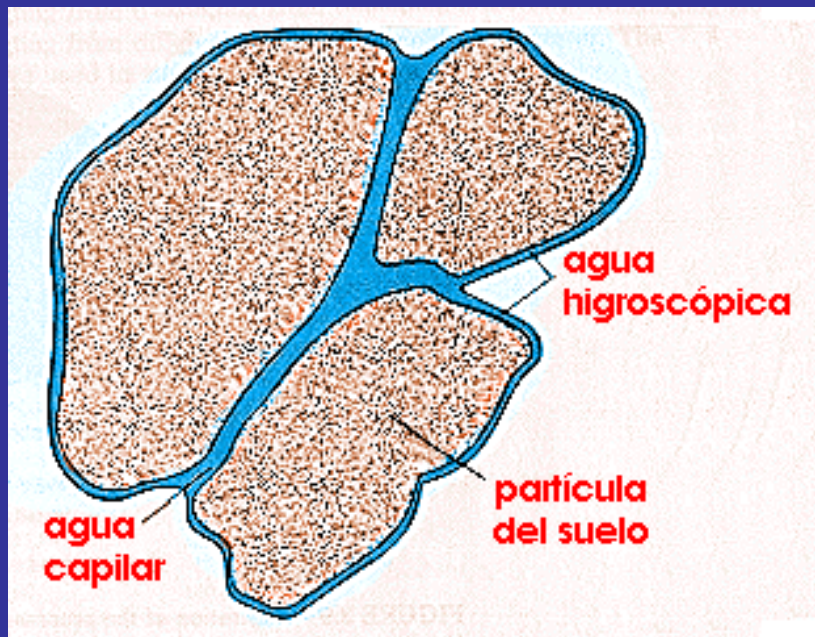
- Llena los espacios capilares mas finos e intermedios. (10 – 0.2 μ).
- Permanece en el suelo por efecto capilar.
- Tensiones a que esta retenida: se encuentra adherida por la capacidad de campo hasta el coeficiente higroscópico. Las tensiones varían desde 0,1 hasta 31 atm.

Importancia

- Funciona como disolución del suelo.
- Es la forma de agua que las plantas utilizan en mayor proporción.
- Permanece mucho mas tiempo en el suelo que la gravitacional.
- No produce arrastre de elementos nutricionales.
- Se encuentra en mayor proporción en suelos arcillosos que en suelos arenosos.

Agua higroscópica

- Es el agua absorbida por los suelos que depende de la humedad atmosférica, forma una fina película que recubre a las partículas del suelo. por poros comprendidos entre 8 y 30 micras de diámetro
- No está sometida a movimiento, no es asimilable por las plantas porque esta en forma de vapor.
- Tensiones a que esta retenida: se encuentra adherida por el coeficiente higroscópico. La tensión varia entre 31 y 10000 atm.





Saturado



Capacidad de campo

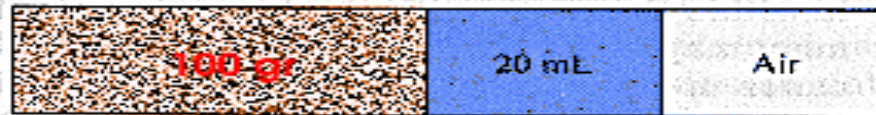


Punto de marchitez permanente

Saturado



Capacidad de Campo

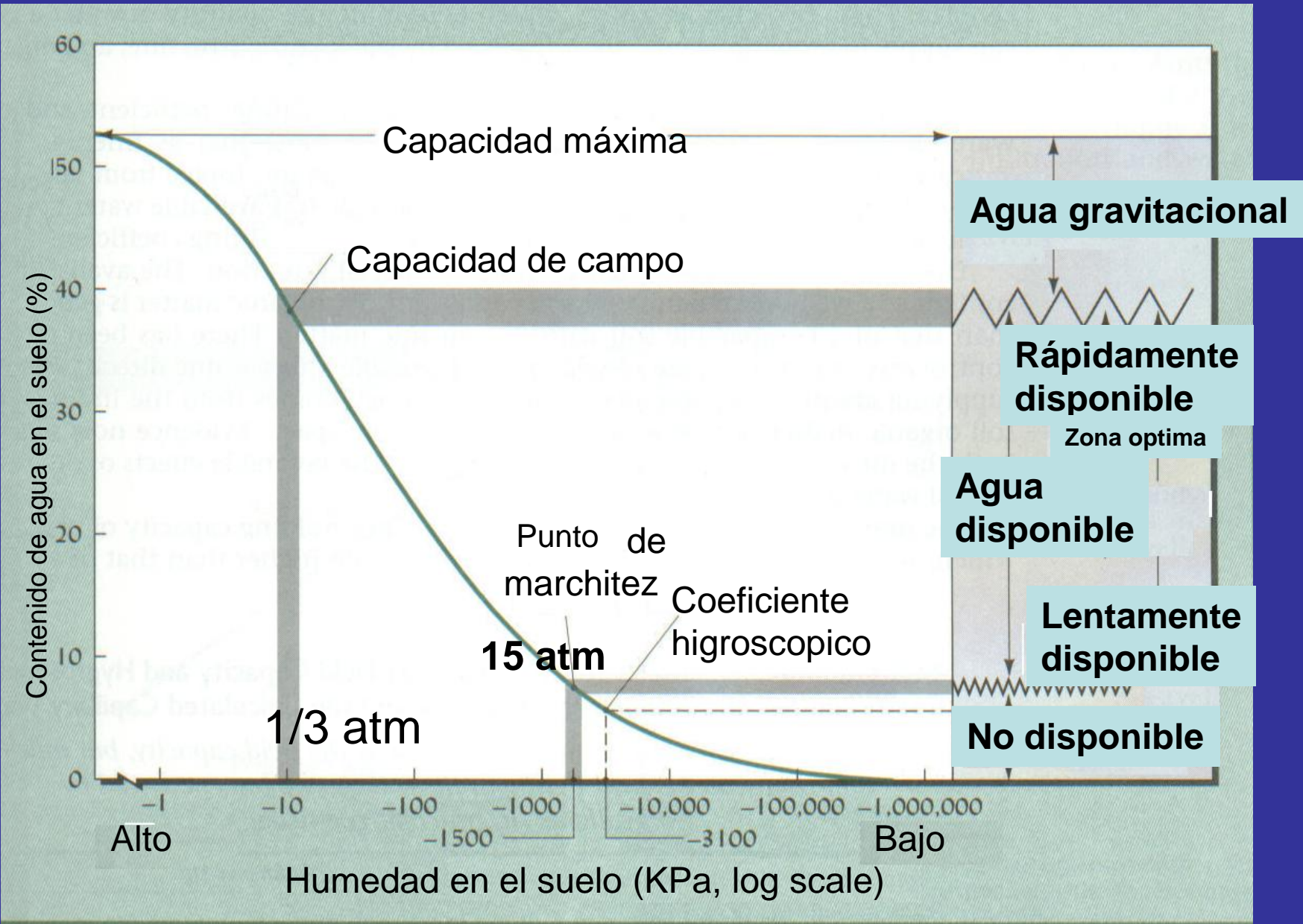


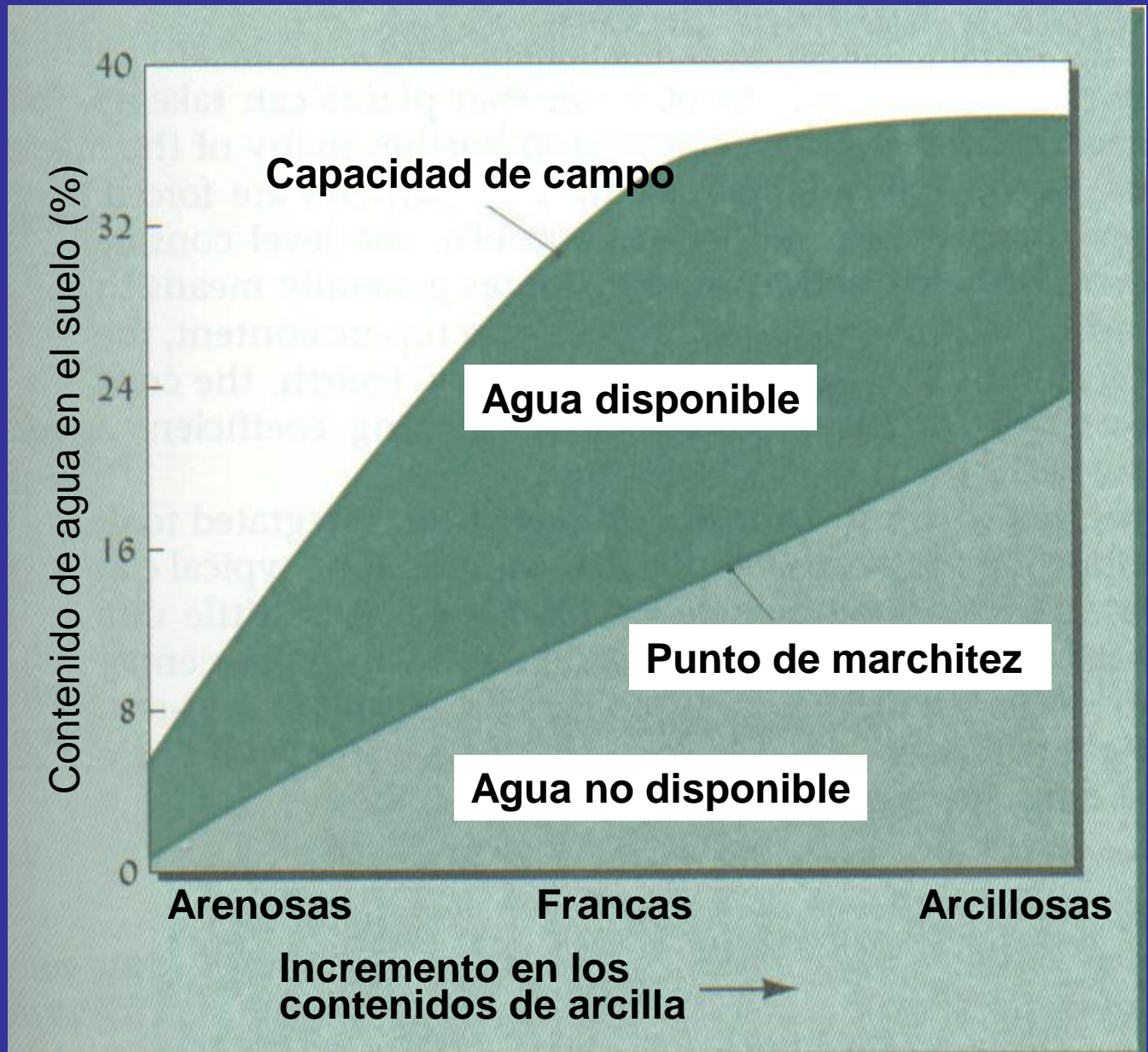
Punto de marchitez temporal



Punto de marchitez permanente







Relación entre el contenido de humedad y la textura

- Capacidad de Retención de Agua Disponible para las Plantas (CRAD)

- ❖ **Definición**

- Agua que puede retener el suelo contra la fuerza de gravedad, con menos energía que la que pueden vencer las raíces, en el espesor de suelo explorado.

- ❖ **Importancia**

- Suministro de agua a las plantas para afrontar la demanda atmosférica (ETP) entre lluvias (y/o riegos).

CRAD

Depende de:

Textura

Materia orgánica

Estructura (DAp)

Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD).

$$CRAD = \sum_i (CC - PMP)_i e_i$$

Siendo,

CC=Capacidad de Campo del horizonte i

PMP=Punto de Marchitez Permanente del horizonte i

e_i = espesor del horizonte i (cm)

EL almacenamiento o retención del agua por el suelo es el resultado de las fuerzas de atracción entre la fase sólida y la fase líquida

MECANISMOS:

- 1) Adhesión directa de las moléculas de agua a las superficies sólidas por fuerzas de London van der waals.
- 2) Por capilaridad.
- 3) Por enlaces osmóticos del agua en la doble capa.
 - a. Adhesión: atracción entre moléculas de diferentes sustancias.
 - b. Cohesión: Atracción entre moléculas de una misma sustancia.

ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO

A mayor profundidad considerada, mayor será la cantidad de agua almacenada en el suelo.

Agua almacenada en el suelo

$$AAS = \int_0^z \Theta dz$$

Prof. cm	Θ_v	AAS (cm)
0 – 15	0,33	4,95
15 – 30	0,42	6,30
30 - 45	0,35	5,25
	0,367	$\Sigma= 16,5$

$$\Theta_v = \frac{\text{La min adeagua}}{\text{lá min adesuelo}}$$

Contenido de Agua en el Suelo

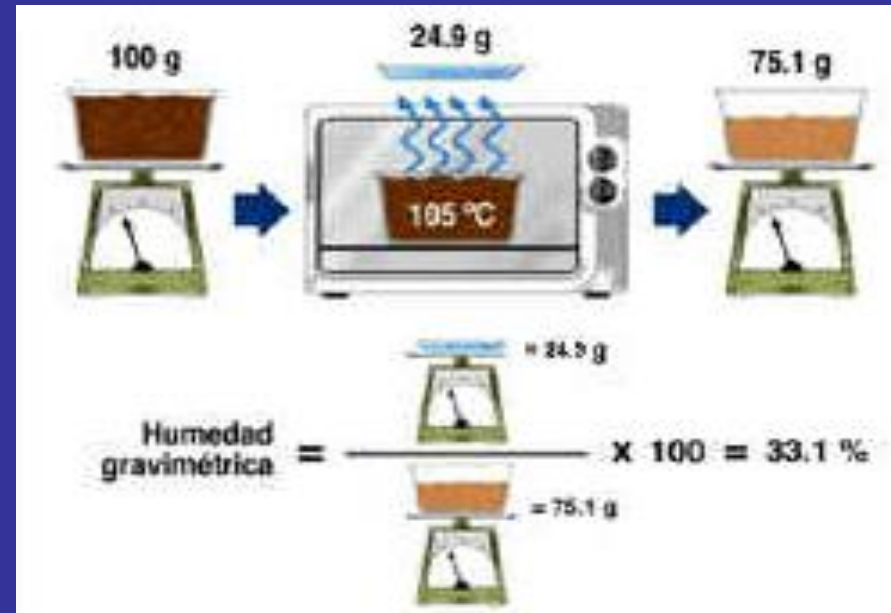
1. Masa de agua relativa a la Masa de Suelo

$$\theta_m = \frac{\text{masa de agua en el suelo}}{\text{masa de suelo seco}}$$

$$\theta_m = \frac{(\text{masa de suelo humedo}) - (\text{masa de suelo seco})}{(\text{masa de suelo seco})}$$

Unidades

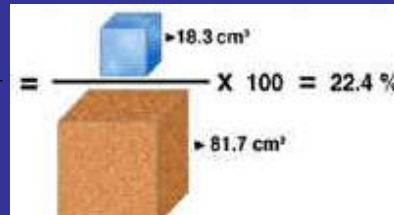
$$\theta_m = \frac{[kg]}{[kg]} = kg \ kg^{-1}$$



Contenido de Agua en el Suelo

2. Volumen ocupado por el agua relativa al volumen ocupado por el suelo

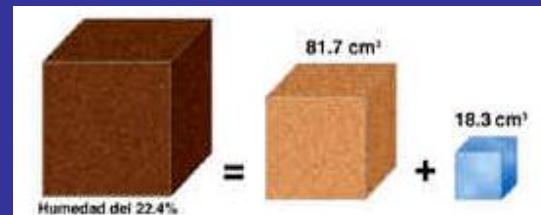
$$\theta_v = \frac{\text{volumen ocupado por el agua}}{\text{volumen ocupado por el suelo}}$$



Unidades

$$\theta_v = \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} \right] = \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\theta_v = \frac{\left(\frac{\text{masa de agua}}{\text{densidad del agua}} \right)}{\text{(volumen de la muestra)}}$$



Contenido de Agua en el Suelo

Conversión entre contenido de agua en términos de masa y volumen

$$\theta_v = \theta_m \frac{\rho_b}{\rho_w}$$

$$\theta_v = \theta_m \rho_a$$

ρ_b = Densidad del suelo seco

ρ_w = Densidad del agua

ρ_a = Densidad aparente

$$\rho_w = 1000 \text{ kg m}^{-3} \text{ a } 20 \text{ C}$$

Textura del suelo	Densidad aparente (da) g/cm ³
Arenoso	1.65
Franco-arenoso	1.50
Franco	1.40
Franco-arcilloso	1.35
Franco-limoso	1.30
Arcilloso	1.25

Contenido de Agua en el Suelo

3. Relativo a la cantidad de AeS cuando el suelo se encuentra saturado

$$\Theta = \frac{\text{volumen del agua ocupando espacios vacios en el suelo (poros)}}{\text{volumen total de los espacios vacios en el suelo}}$$

$$\Theta = \frac{\theta_v}{\theta_{vs}}$$

θ_{vs} = Volumen relativo de agua en el suelo completamente saturado de agua

$\Theta = 0 \rightarrow$ Suelos completamente seco

$\Theta = 1 \rightarrow$ Suelos completamente saturado

Grado de saturación

Saturación efectiva

Contenido de Agua en el Suelo

4. Profundidad equivalente o agua almacenada en el suelo

Cantidad de agua en una capa de suelo a una profundidad específica y de un espesor D en términos del agua almacenada en el suelo o profundidad equivalente de agua en el suelo (en unidades de longitud).

$$D_e = \theta_v D$$

D_e → Profundidad equivalente de agua en el suelo (unidades de longitud)

θ_v → Cantidad relativa de agua en términos de volumen

D → Espesor de la capa de suelo (unidades de longitud)

Con frecuencia es necesario sumar las relaciones de profundidad equivalente de capas discretas de suelos que poseen distintos contenidos de agua.

$$D_e = \sum_{i=1}^n \theta_{vi} D_i$$

i → Contador para las distintas capas de suelo

Medida del contenido de agua en el suelo

1. Termogravimetría

La muestra se pesa en sus condiciones iniciales de humedad

La muestra se seca para remover el agua absorbida entre las partículas, pero no el agua atrapada en la estructura cristalina de las arcillas

El protocolo incluye secado a 105 C durante un periodo de 24 a 48 horas, hasta que la muestra se encuentre estable

La diferencia entre los valores del peso del suelo húmedo y el suelo seco es igual al peso del agua en la muestra original de suelo



Método para determinar el (% de RH) a CC (1/3atm) y a PPM (15atm)

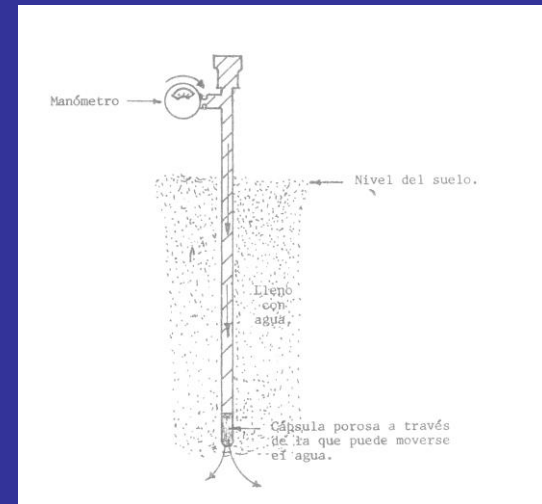
OLLA DE PRESIÓN:

- 1. Saturar la muestra.**
- 2. Someterlas a las diferentes presiones para obtener peso húmedo.**
- 3. Secado en estufa para obtener Peso seco.**
- 4. Calcular y graficar los contenidos de humedad retenido a diferentes tensiones.**



Tensiómetros

- Determinan la tensión con que el agua esta retenida en el suelo.
- Medidas limitadas a valores de succión menores a 1 bar, ya que mide la depresión provocada en relación a la atmósfera.



Medida del contenido de agua en el suelo

3. Métodos eléctricos

Cambios en las propiedades eléctricas del suelo debido a cambios en el contenido de agua en el suelo

- a. Resistencia eléctrica
- b. Capacitancia
- c. Reflectometría resuelta en el tiempo
- d. Reflectometría resuelta en amplitud: impedancia
- e. Métodos en el dominio de la frecuencia.

Resistencia Eléctrica.



TDR:

Consta de varillas metálicas que se introducen en el suelo y un emisor receptor de impulsos magnéticos. Genera un pulso electromagnético y mide el tiempo que tarda en recorrer las varillas, que será mayor o menor atendiendo al contenido de humedad del suelo.



Movimiento del agua del suelo

Infiltración: Entrada de agua al suelo. Recarga de agua a partir de las precipitaciones o el riego. Si la velocidad de aporte de agua (Intensidad de lluvia) supera a la velocidad con la que el suelo la deja infiltrar, se produce el *escurrimiento*

3 tipos de movimiento: flujo saturado, flujo no saturado y flujo de vapor.

Movimiento de agua en el suelo

Al movimiento del agua en el suelo se aplica la Ley de Darcy, la que expresa:

$$q = -K \frac{\Delta\Psi}{\Delta x, y, z} \quad \text{donde}$$

q = densidad de flujo;

$\Delta\Psi$ = Diferencia de potencial total del agua entre dos puntos considerados.

$\Delta x, y, z$ = distancia entre dos puntos considerados, en el sentido del flujo;

$\Delta\Psi/\Delta z$ = gradiente de potencial del agua entre ambos puntos;

K = coeficiente de proporcionalidad que relaciona el gradiente de potencial con la densidad del flujo.

Movimiento del agua del suelo

Movimiento de agua dentro del suelo.

El movimiento de agua entre dos puntos del suelo se produce espontáneamente cuando:

Dirección del movimiento o sea,

$\Psi_{\text{suelo 1}} > \Psi_{\text{suelo 2}}$

$(\Psi_m + \Psi_o + \Psi_g + \Psi_p)_1 > (\Psi_m + \Psi_o + \Psi_g + \Psi_p)_2$

Dirección del movimiento



$\Psi_{\text{suelo}} > \Psi_{\text{raíz}} > \Psi_{\text{tallo}} > \Psi_{\text{hoja}} > \Psi_{\text{atmósfera}}$

Por lo tanto debe de haber diferencia de potencial entre 2 puntos para que exista movimiento

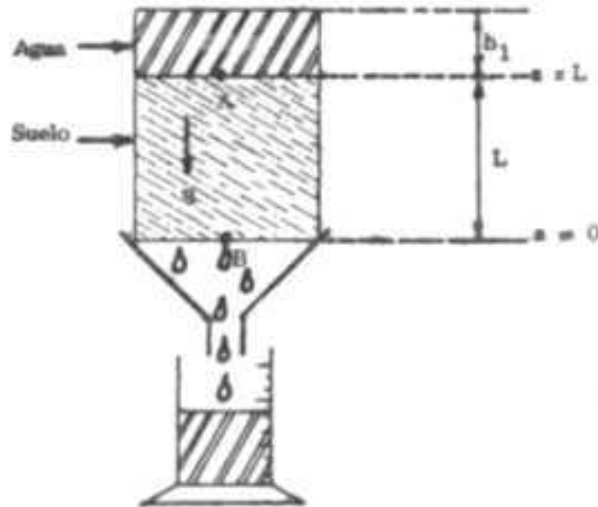
Conductividad Hidráulica (K)

Refiere a la capacidad del suelo de permitir el movimiento generado por la diferencia de potencial. La densidad de flujo será mayor a mayor diferencia de potencial generada en un medio (suelo) capaz de permitir dicho movimiento. Los factores que la afectan varían según el movimiento sea en flujo saturado o no saturado.

Movimiento en flujo Saturado

Cuando el suelo está saturado, el agua que principalmente se mueve es el agua gravitacional y su movimiento tiene lugar a través de los macroporos, impulsado por gradientes de potencial gravitacional (Ψ_g).

Conductividad Hidraulica en flujo Saturado



$$\Psi_A = \Psi_{mA} + \Psi_{sA} + \Psi_{pA} + \Psi_{qA}$$

$$\Psi_{mA} = 0$$

$$\Psi_{pA} = h \text{ cm.}$$

$$\Psi_{qA} = L \text{ cm.}$$

$$\Psi_B = \Psi_{mB} + \Psi_{sB} + \Psi_{pB} + \Psi_{qB}$$

$$\Psi_{sA} = \Psi_{sB}$$

$$\Psi_{pB} = 0$$

$$\Psi_{qB} = 0$$

$$\frac{\Delta\Psi}{\Delta z} = \frac{(h + L) \text{ cm}}{L \text{ cm.}}$$

$$q = -K_o \frac{(h + L)}{L}$$

$$K_o = \frac{q \cdot L}{h + L}$$

Figura 30 Flujo saturado (percolación) en una columna de suelo de longitud vertical L. Todos los poros del suelo están llenos con agua. Se indican los valores de Ψ en los puntos A y B, en ambos extremos de la columna de suelo así el de como sus componentes y se ilustra el cálculo de la conductividad hidráulica en flujo saturado (K_o), según la ecuación de Darcy.

Permeabilidad

❖ Definición

- La facilidad con la que el agua libre y los gases se mueven en el suelo.

❖ Importancia

- Lixiviación de solutos (nutrientes, agroquímicos)
- Drenaje interno (afecta infiltración del suelo saturado).

LA AFECTAN LOS MISMOS FACTORES QUE A LA POROSIDAD

Existe flujo descendente y horizontal

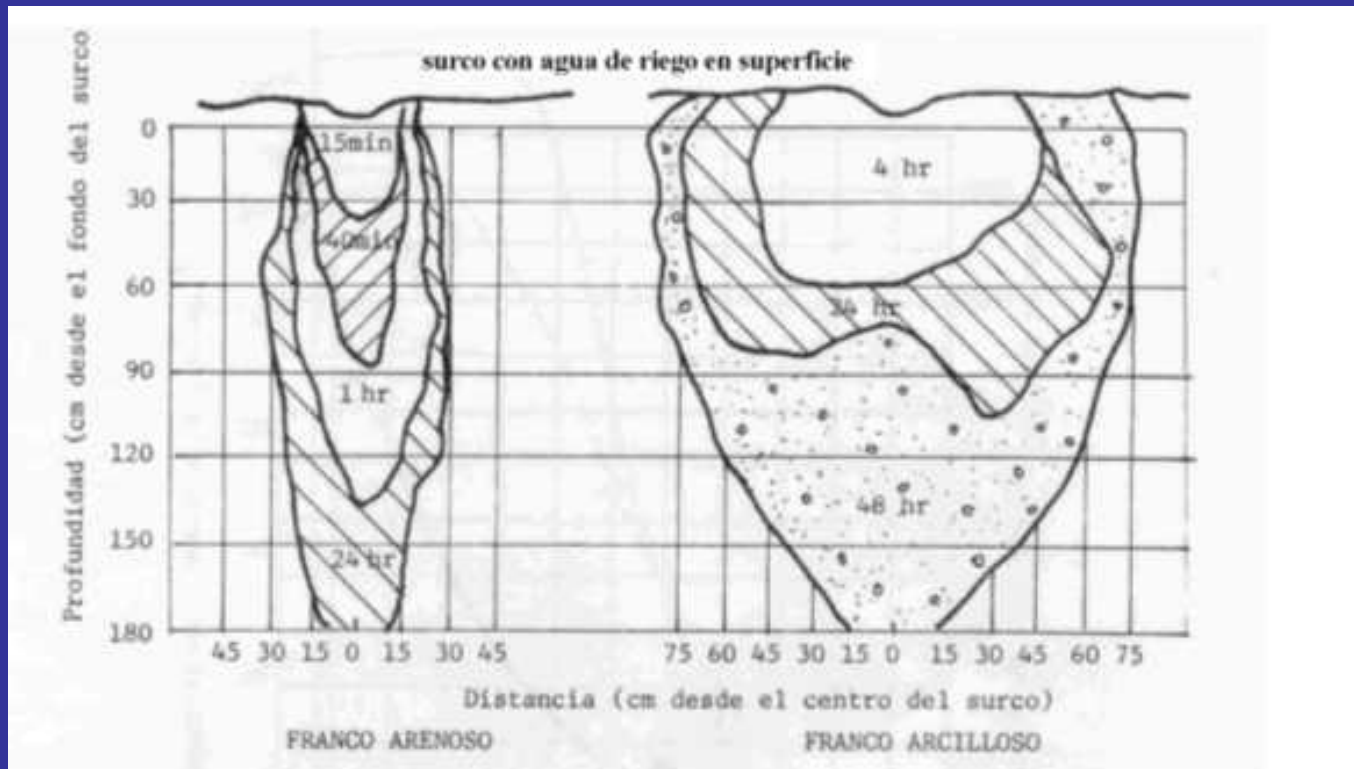


Figura 31. Velocidades comparativas del movimiento del agua de riego en un suelo franco arenoso y en uno franco arcilloso. Nótese la velocidad de movimiento mucho más rápida en el suelo franco arenoso, especialmente en dirección descendente (Brady, 1984).

Depende del volumen total de macroporos

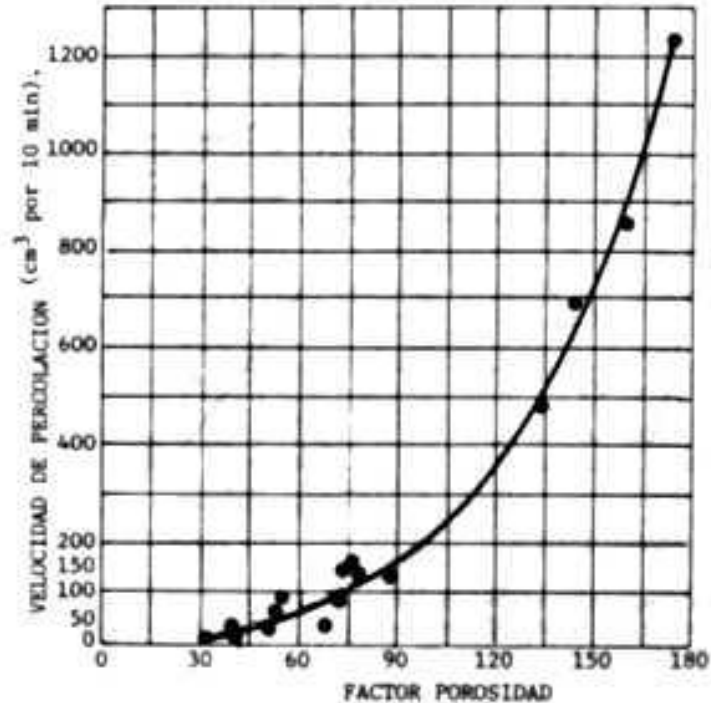


Figura 32. Relación entre la velocidad de percolación y la porosidad no capilar (Baver, 1956).

Movimiento del agua en flujo no saturado

En condiciones de campo, la mayor parte del movimiento del agua del suelo ocurre cuando los poros del suelo no están completamente saturados con agua. Los macroporos del suelo están mayormente llenos de aire y los microporos (poros capilares) con agua y algo de aire. Más aún, la irregularidad de los poros del suelo da como resultado que existan zonas con agua que no están en contacto entre sí. El movimiento del agua en tales condiciones es muy lento comparado con el que ocurre cuando el suelo está saturado.

K depende del contenido de agua del suelo

A altos valores de contenido de agua, especialmente cerca de la saturación –potenciales de matriz próximos a cero – una gran proporción del agua del suelo está en los macroporos y el flujo saturado es relativamente rápido. A medida que el contenido de agua y el potencial de matriz disminuyen, el agua del suelo está retenida mayormente en los microporos y la conductividad hidráulica se reduce exponencialmente

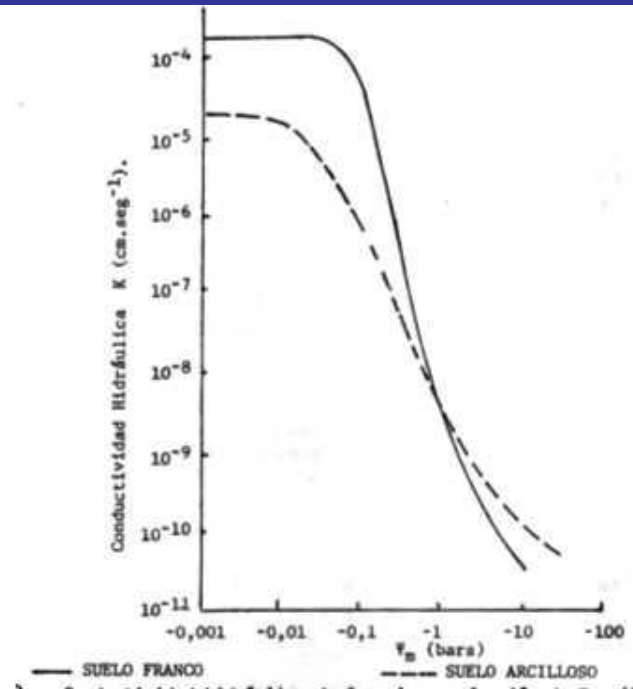


Figura 34. Conductividad hidráulica en 2 suelos en función de Ψ_m (Gardner, 1960)

Al margen de las diferencias señaladas entre el movimiento de agua en flujo saturado y no saturado, ambos están gobernados por los mismos principios generales, por los cuales la dirección y la velocidad del flujo están relacionados a la conductividad hidráulica y a una fuerza de impulsión. La conductividad es, como se dijo, esencialmente constante en el flujo saturado, pero varía sensiblemente con el contenido de agua del suelo en el flujo no saturado. A su vez, la fuerza de impulsión es siempre una diferencia de potencial: – gravitacional en el caso del flujo saturado y de matriz (o capilar) en el no saturado .

Movimiento del suelo a la raíz

Para que haya movimiento desde el suelo a las raíces, el potencial en éstas debe ser menor que el potencial del agua en el suelo.

A medida que el potencial en el suelo disminuye, el potencial de la raíz debe disminuir en una magnitud mayor aún. Ello se debe a que para mantener la velocidad de flujo cuando el suelo se va secando, no basta con que se mantenga el gradiente raíz–suelo sino que éste debe aumentar cada vez más, porque Ψ disminuye con el contenido de agua en el suelo.

Ascenso capilar a partir de la napa freática

La velocidad del ascenso capilar a partir de la napa es generalmente mayor en los suelos livianos, pero la altura del ascenso máximo, una vez alcanzado el equilibrio, es mayor en los de texturas medias y pesadas.

Un suelo con estructura posee propiedades capilares (capacidad de retención de agua) dentro de los agregados y al mismo tiempo permite un movimiento rápido del agua en los poros mayores, situados entre los mismos. Aparte de la textura, la estructura es también un factor de importancia en el movimiento de ascenso capilar del agua en el suelo.

Infiltración del agua en el suelo.

La entrada de agua en el suelo desde la superficie, llamada *infiltración*, es un fenómeno que tiene lugar siguiendo los gradientes de potencial gravitacional y de matriz. A través de los poros gruesos (macroporos) el agua "cae" impulsada por la gravedad y desde ellos, es "succionada" por los poros finos (microporos) vacíos, debido a atracción capilar siguiendo el gradiente de Ψ_m .

Velocidad de infiltración

- ❖ Velocidad con que el agua pasa del exterior al interior del perfil del suelo.
- ❖ Si la velocidad es muy lenta, aunque el suelo sea capaz de retener mucha agua disponible por unidad de volumen y sea profundo, no tendrá suficiente humedad para las plantas, puesto que la mayoría del agua que recibe de las lluvias escurrirá superficialmente.
- ❖ Si la velocidad es muy alta y en el suelo hay algún horizonte subsuperficial poco permeable, se pueden originar problemas de exceso de agua en esa zona del perfil.
- ❖ Es de importancia práctica, sobre todo cuando se trata de planificar la aplicación del riego

Determinación de la velocidad de infiltración

Se puede determinar la velocidad de infiltración como diferencia entre la lluvia y el escurrimiento.

Ello es factible tanto en pequeñas parcelas como en cuencas hidrográficas; en las primeras, puede utilizarse lluvia artificial (lluvia simulada).

Infiltrómetro de doble anillo



Variabilidad de la infiltración en función de la estructura

0.1 in/min

5 in/min



35%

88%

Agregados Estables al Agua

Agregados Estables al Agua

Factores que afectan la velocidad de infiltración

La velocidad de infiltración es una propiedad dinámica del suelo que varía significativamente a lo largo de un mismo año y aún durante el ciclo de un cultivo.

- ❖ la pendiente del lugar considerado y de su ubicación en el paisaje.
- ❖ Contenido inicial de agua en el suelo.
- ❖ Estado o condición física de la superficie del suelo.
 - Espesor del horizonte A.
 - Compactación del horizonte superficial,
 - Porosidad del horizonte.
 - Presión de pastoreo.
 - Encostramiento: Limo y/o arena muy fina
- ❖ Desuniformidad del perfil del suelo.

Contenido inicial de agua en el suelo

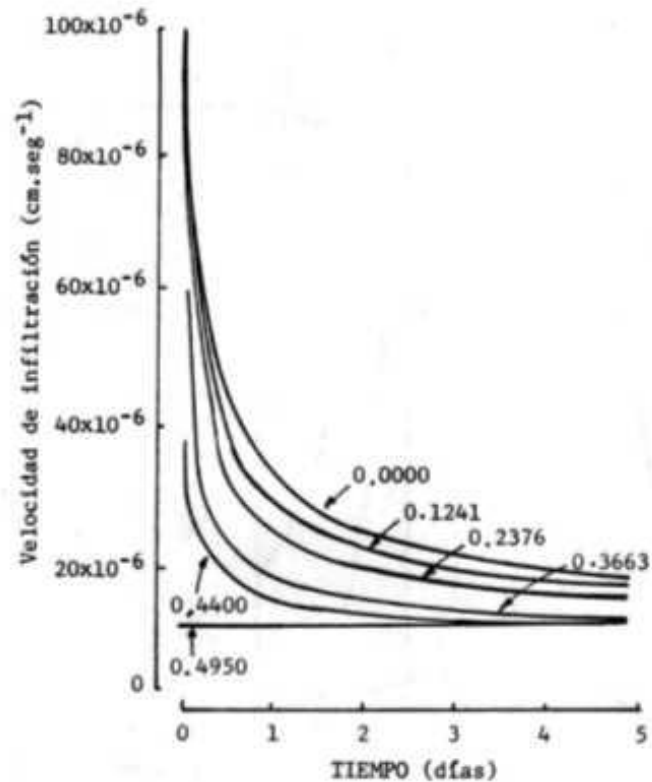


Figura 41. Cómputo de la influencia del contenido inicial de agua (θ_0) sobre la velocidad de infiltración en un suelo arcilloso liviano. Los números en cada curva son los respectivos valores de θ expresados en cm^3 de agua. cm^{-3} de suelo. La curva con $\theta = 0,4950$ corresponde al suelo saturado desde el comienzo (Philip, 1957, cit. por Slatyer, 1967).



Clifford Peña

Movimiento del agua en el suelo

El movimiento del agua en el suelo, que hace que ésta se infiltre, se redistribuya, percole y se desplace hacia las raíces de las plantas, se debe a que posee cierta cantidad de energía.

Procesos muy lentos  energía cinética = 0

 Potencial

“cantidad de trabajo que debe ser efectuado por una unidad de masa de agua, con el objeto de transportar, reversible e isotérmicamente, una cantidad infinitesimal de agua desde un reservorio de agua pura, situado a una elevación específica y bajo presión atmosférica, hasta un cierto punto del suelo”

Para cuantificar el potencial se parte de un nivel de referencia, que en este caso `por convención, es el agua libre y pura a determinada elevación.

Así, el potencial del agua en el suelo difiere del potencial del agua libre y pura por los siguientes factores:

- a) Fuerzas que operan en la interfase sólido-líquido.
- b) Fuerzas que actúan en la interfase líquido-aire (tensión superficial).
- c) Presencia de solutos.
- d) Presión hidrostática;
- e) Presión aerostática;
- f) Fuerza de la gravedad.

Potencial asociado con cada fuerza

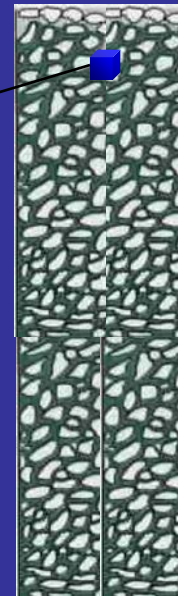
$$\psi_i = -\int_{z_1}^{z_2} F_i dz$$

Trabajo que hay que realizar para vencer esta fuerza

Condiciones de equilibrio

$$F_{neta} = \sum_i F_i = 0$$

$$\psi_t = \text{valor constante}$$



Condiciones de equilibrio

$$F_{neta} = \sum_i F_i = 0$$

$$\psi_t = \text{valor constante}$$



Condiciones de equilibrio termodinámico

1. Equilibrio térmico o temperatura uniforme
2. Equilibrio mecánico, no convección neta que produzca una fuerza
3. Equilibrio químico, no transporte difusional o reacciones químicas

2. El potencial total del AeS y sus componentes

La fuerza con la que el agua es retenida por un suelo depende del contenido de AeS.

Entre más seco se encuentre el suelo, el agua es retenida con más fuerza, y como resultado se necesita realizar más trabajo para extraer agua de este suelo.

A este trabajo se le llama Potencial total del AeS

$$\psi_T = \psi_w + \psi_g$$

Potencial total del AeS

Potencial hídrico

Potencial gravitacional

2. El potencial total del AeS y sus componentes

$$\psi_T = \psi_w + \psi_g$$

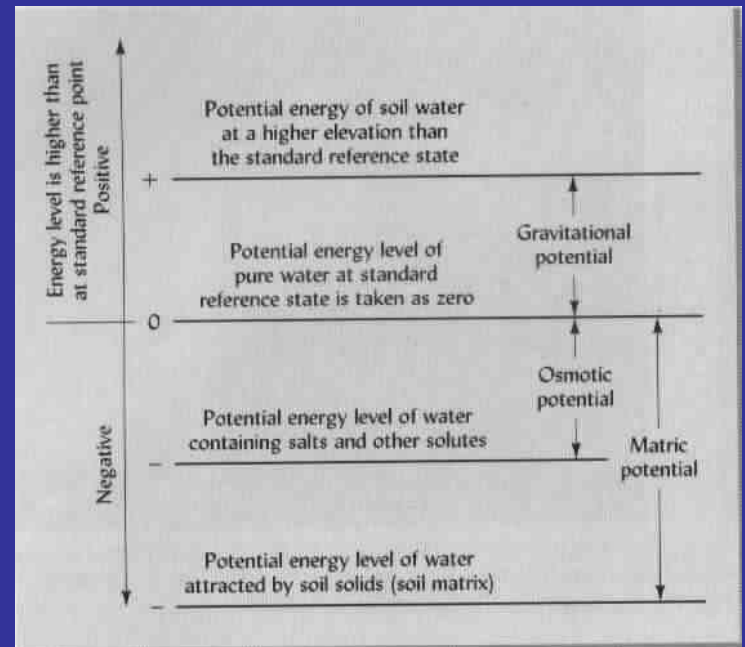
Potencial total del AeS

Potencial gravitacional

Potencial Hídrico

$$\psi_w = \psi_m + \psi_o + \psi_p$$

El potencial Hídrico resulta de propiedades inherentes al AeS en si misma, y de sus interacciones físicas y químicas con el ambiente que le rodea.



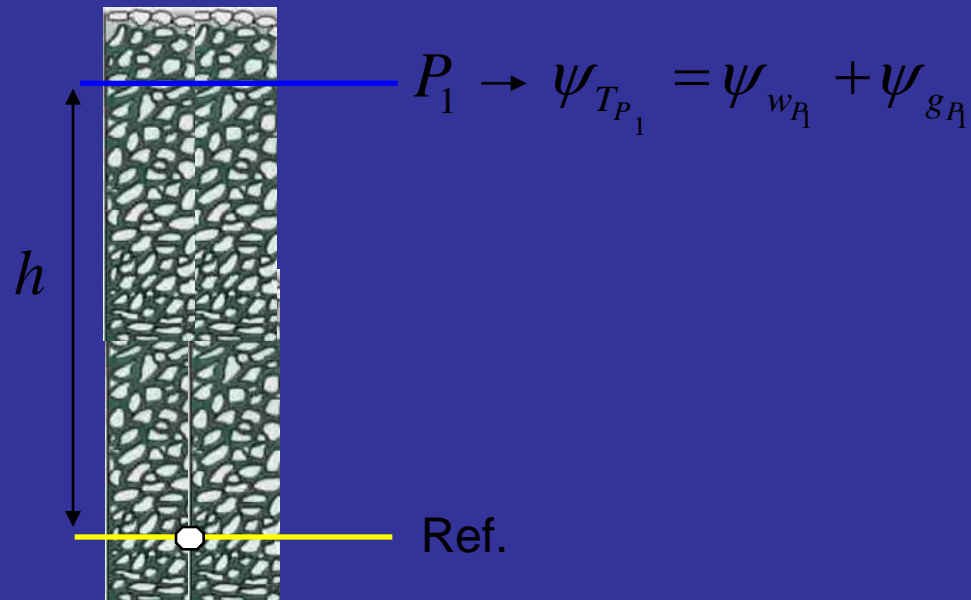
2. El potencial total del AeS y sus componentes

Potencial gravitacional

$$\psi_g = gh$$

Aceleración de gravedad $\rightarrow g = 9.81 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$

Altura (distancia) del AeS con respecto al nivel de referencia $\rightarrow h$



2. El potencial total del AeS y sus componentes

Potencial Mátrico ψ_m

Suelo saturado $\rightarrow \psi_m \cong 0 \text{ mm}$

Suelo seco $\rightarrow \psi_m \cong -1000 \text{ mm}$

Succión mátrica \equiv Tensión mátrica $\equiv |\psi_m|$

Mecanismos dominantes

1. Adhesión de moléculas de agua a la superficie del sólido
2. Capilaridad causada por las interfases liquido-gas y sólido-liquido, cuando interacciona con la geometría de los poros.
3. Hidratación de iones y captura de agua en la doble capa difusa.

2. El potencial total del AeS y sus componentes

Potencial Osmótico ψ_o

Esta determinado por la presencia de solutos en el AeS, lo que reduce la energía potencial y la presión de vapor.

Es importante en la presencia de:

1. Cantidades apreciables de soluto
2. Un membrana permeable selectiva o un barrera de difusión

No es apreciable su efecto cuando:

1. Cuando se considera solamente el flujo de agua liquida
2. No existen barreras de difusión

Las dos más importantes barreras de difusión en el suelo son:

- 1 La interfase suelo-raíz de la planta (las membranas celulares son selectivamente permeables).
- 2 La interfase suelo –AeS (cuando el agua se evapora las sales se quedan en el suelo).

$$\psi_o = -36(CE_s)$$

Conductividad eléctrica de la solución del suelo en condiciones de saturación, CE_s en $dS\ m^{-1}$

2. El potencial total del AeS y sus componentes

Potencial debido a la presión ψ_p

Presión hidrostática ejercida por el agua no soportada (i.e., saturando el suelo) descansando sobre el punto de interés.

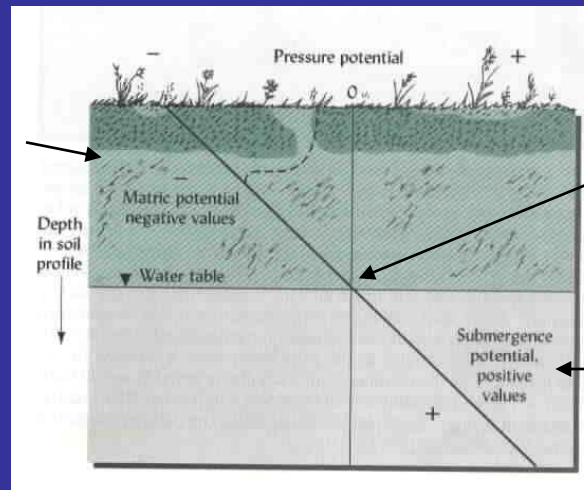
Distancia vertical desde el punto de interés a la superficie del agua libre (elevación del nivel freático no confinado).

$\psi_p > 0$ Por debajo del nivel freático

$\psi_p = 0$ Por arriba del nivel freático

$\psi_p = 0$ $\psi_m < 0$

condiciones de no saturación



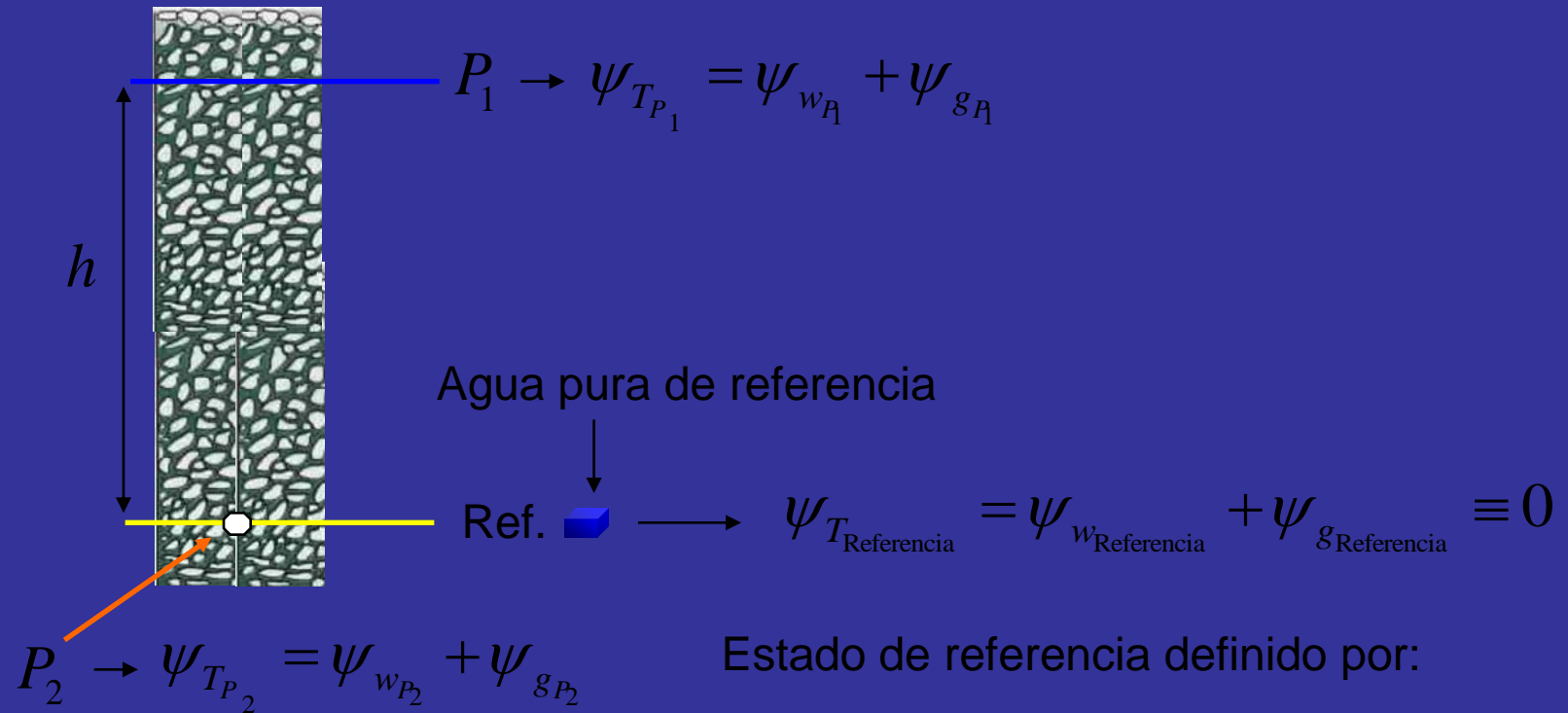
$\psi_p = 0$ $\psi_m = 0$

En la superficie del nivel freático

$\psi_p > 0$ $\psi_m = 0$

condiciones de saturación

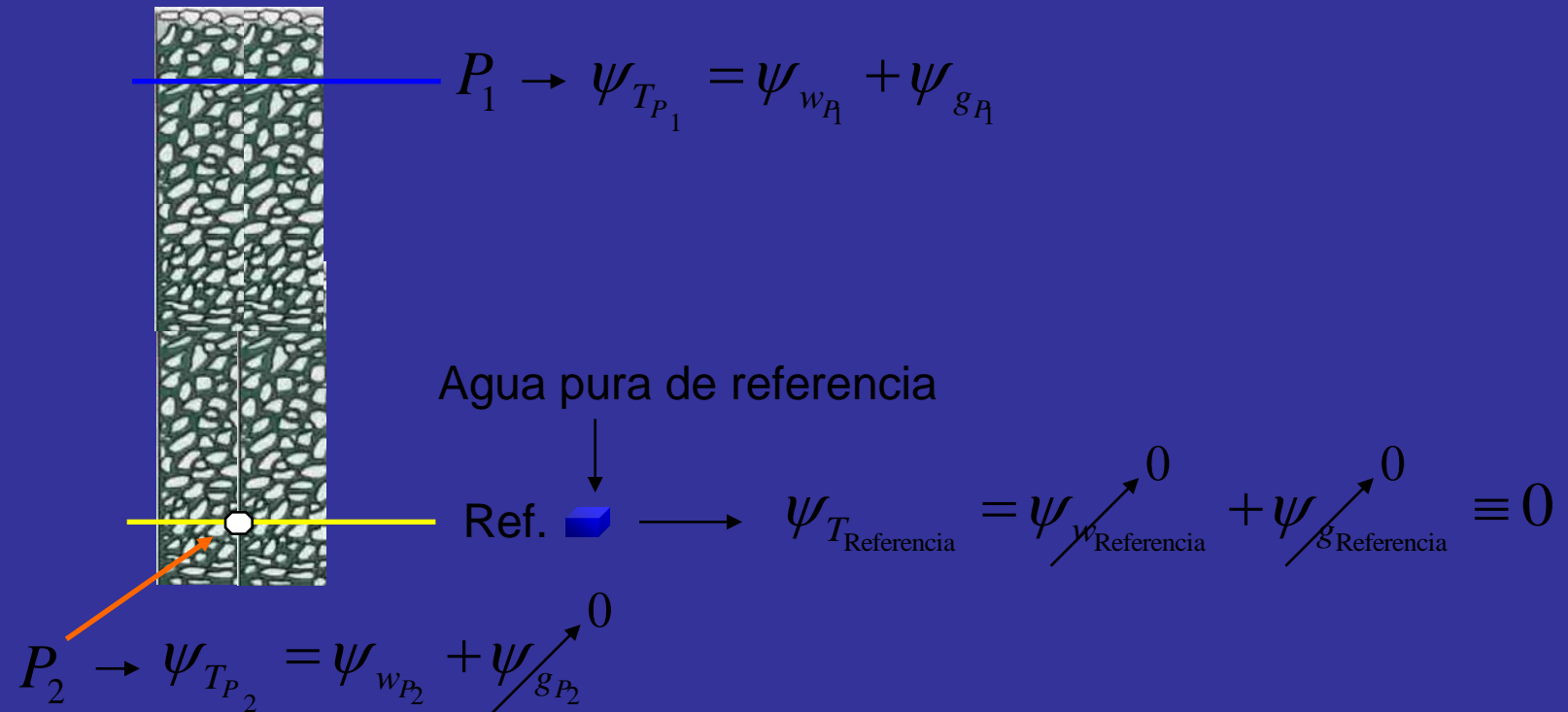
Energía del AeS



Estado de referencia definido por:

1. Agua pura
2. Presión y temperatura estándar
3. Localizado a una elevación de referencia

Energía del AeS



Potencial del AeS $\rightarrow \psi_{T_{P_2}} - \psi_{T_{\text{Referencia}}} = \psi_{w_{P_2}}$

Potencial total del AeS $\rightarrow \psi_{T_{P_1}} - \psi_{T_{\text{Referencia}}} = \psi_{w_{P_1}} + \psi_{g_{P_2}}$

4. Métodos para expresar los niveles de energía del AeS

Unidades	Símbolo	Nombre	Dimensiones	SI unidades	Unidades cgs
Energía/masa	μ	Potencial Químico	L^2t^{-2}	Jkg^{-1}	$erg\ g^{-1}$
Energía/volumen	ψ	Potencial del AeS Succión o Tensión	$M(Lt^2)^{-1}$	$Nm^{-2}\ (Pa)$	$erg\ cm^{-1}$
Energía/peso	h	Columna de Presión	L	m	cm

La equivalencia entre las diferentes expresiones del nivel de energía de AeS

$$\mu = \frac{\psi}{\rho_w} = gh$$

$$\rho_w = 1000\ kg\ m^{-3}\ \text{a } 20\ C$$

$$g = 9.81\ m\ s^{-2}$$

4. Métodos para expresar los niveles de energía del AeS

Altura de una columna de agua, cm	Potencial del AeS, bars	Potencial del AeS, kPa
0	0	0
10.2	-0.01	-1
102	-0.1	-10
306	-0.3	-30
1020	-1	-100
15300	-15	-1500
31700	-31	-3100
102000	-100	-10000

1 kPa = 0.01 bars