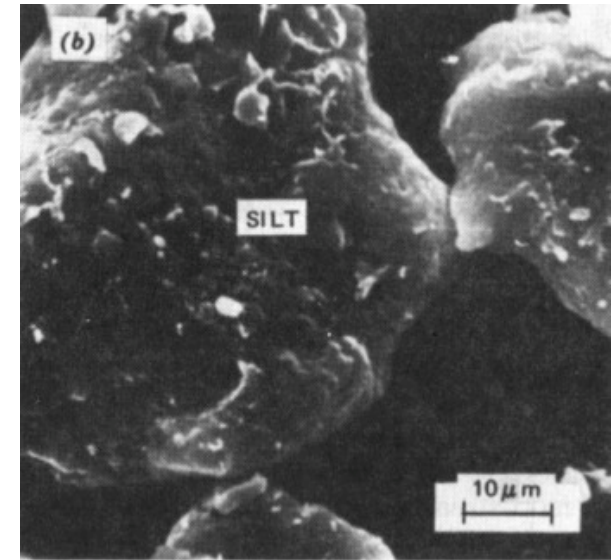
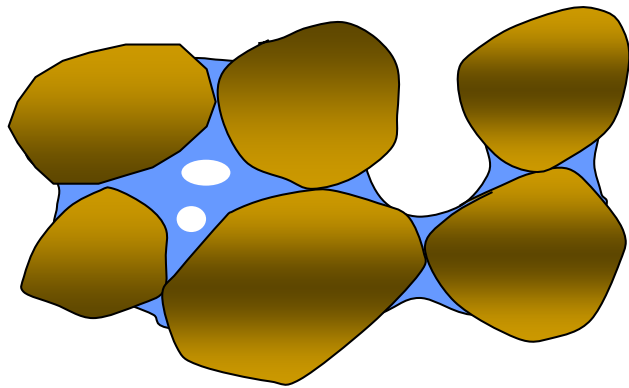


Introducción a los suelos no saturados



Mecánica de Suelos y Geología
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

¿Cómo, cuándo, por qué sucedió esto?



Rta: vamos a tratar de responder la pregunta con la clase de hoy

Índice

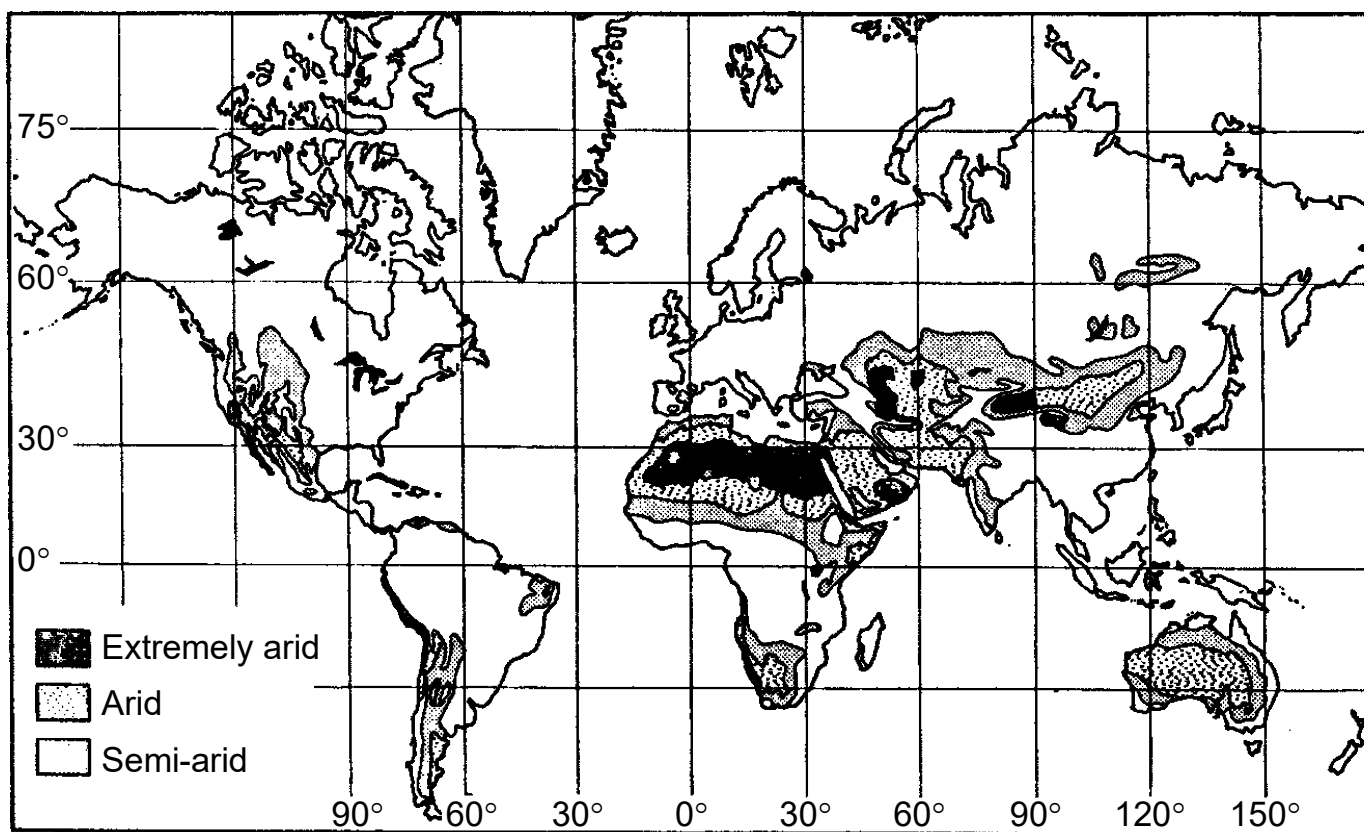


- Breve introducción a los suelos no saturados
- Suelos expansivos
- Suelos colapsables



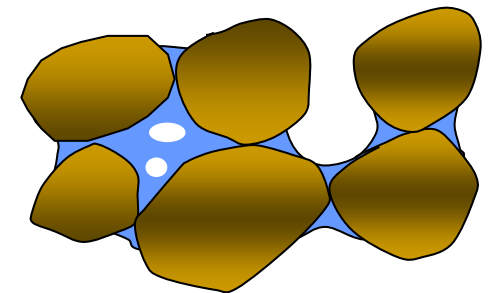
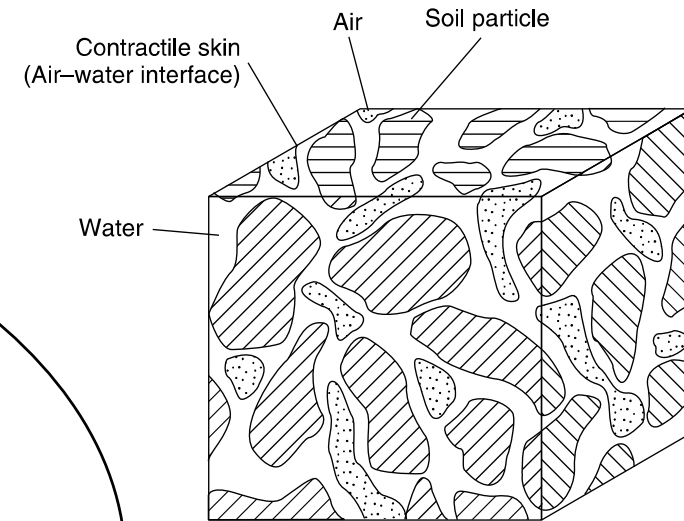
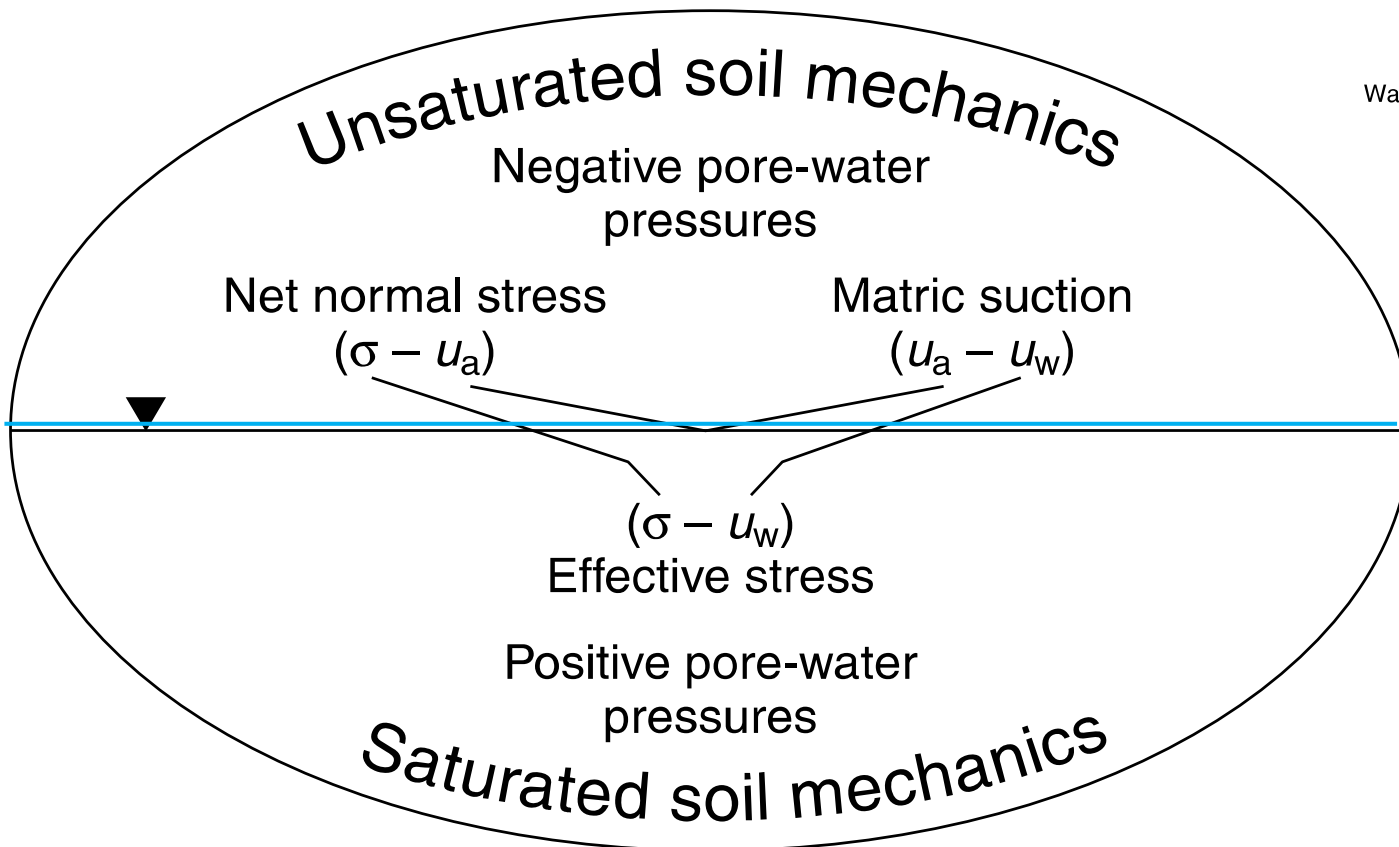
Suelos no saturados: presencia en regiones extremas, áridas y semi-áridas

- Problemática: suelos expansivos, colapsibles, residuales



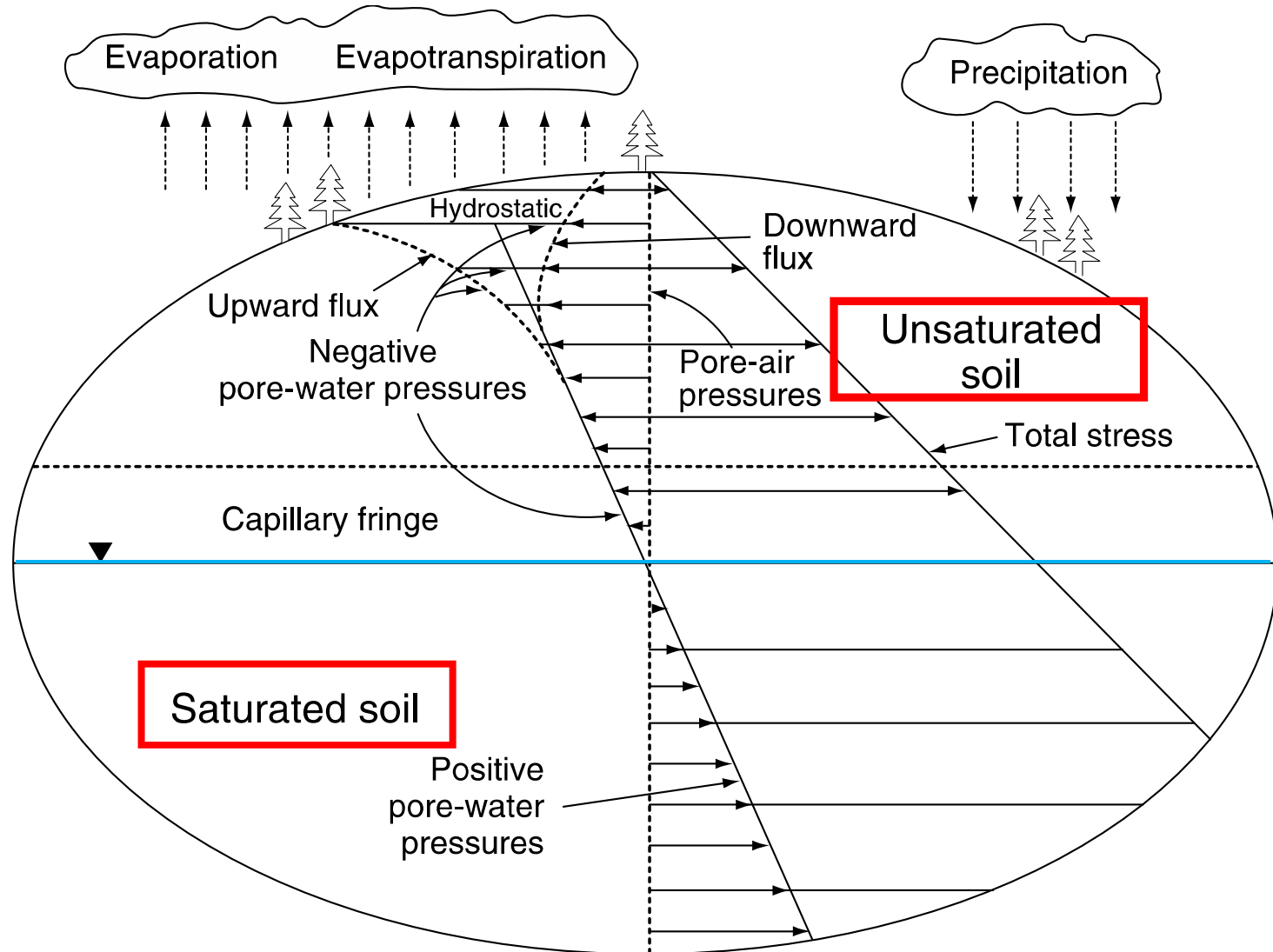
(Meigs, 1953; Dregne, 1976; after Fredlund, 1996)

Suelos no saturados: concepto



(Fredlund, 1996)

Suelos no saturados: intercambio de agua en la superficie

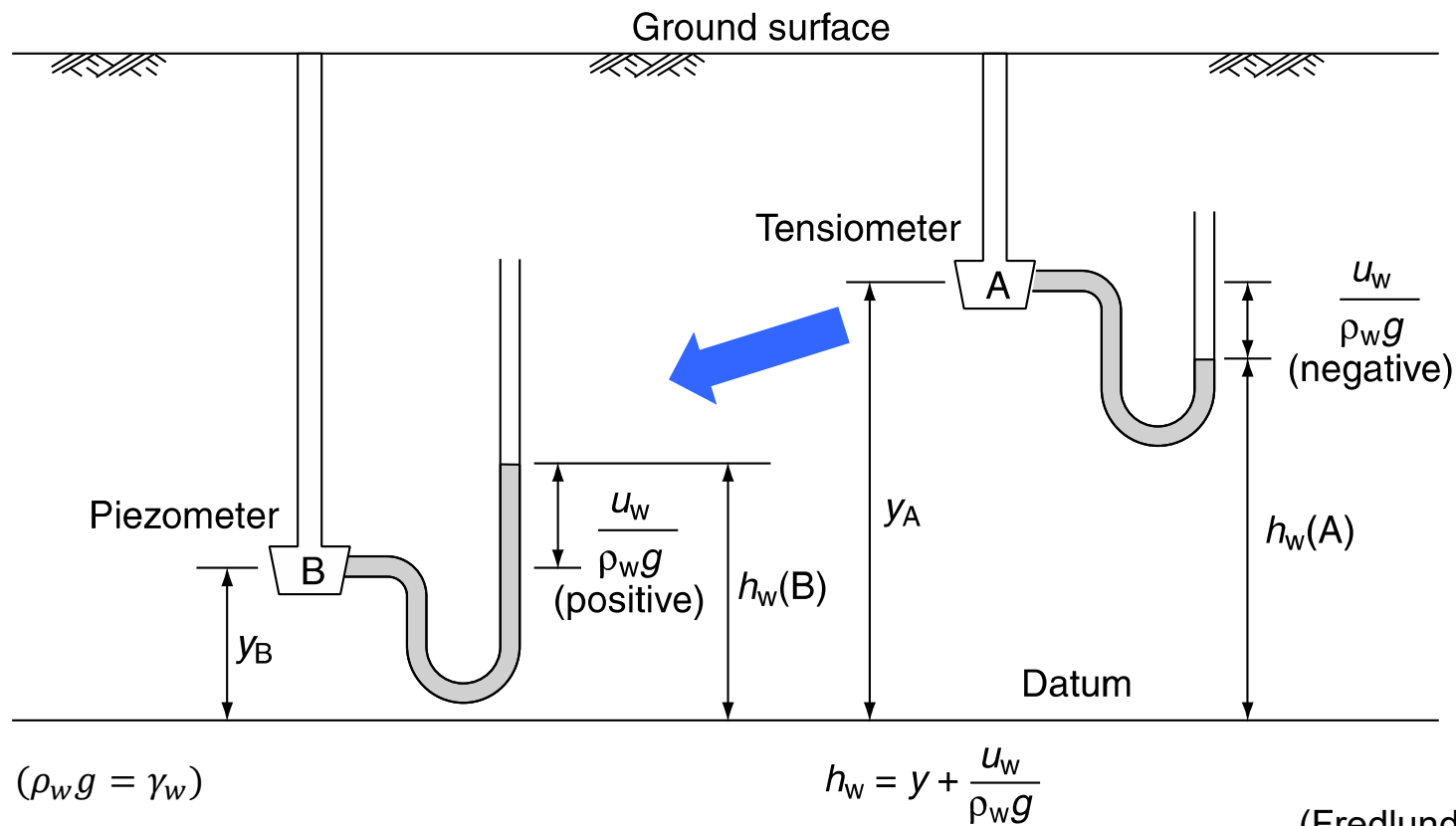


(Fredlund, 1996)

Suelos no saturados: energía piezométrica y presión de poros



- El flujo de agua se mueve siempre del nivel de mayor energía al de menor energía



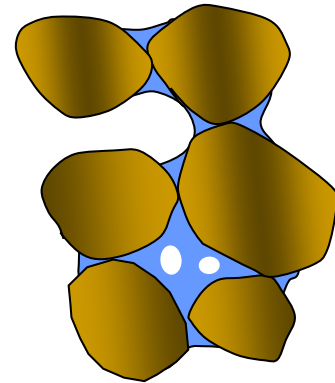
(Fredlund y Rahardjo, 1993)

Suelos no saturados: continuidad de fases líquida y gaseosa



Suelo parcialmente saturado: agua y aire en los poros

- $S_r < 40\%$ El agua no tiene continuidad
- $S_r < 80\%$ El aire tiene continuidad
- $S_r > 90\%$ El aire está en forma de burbujas



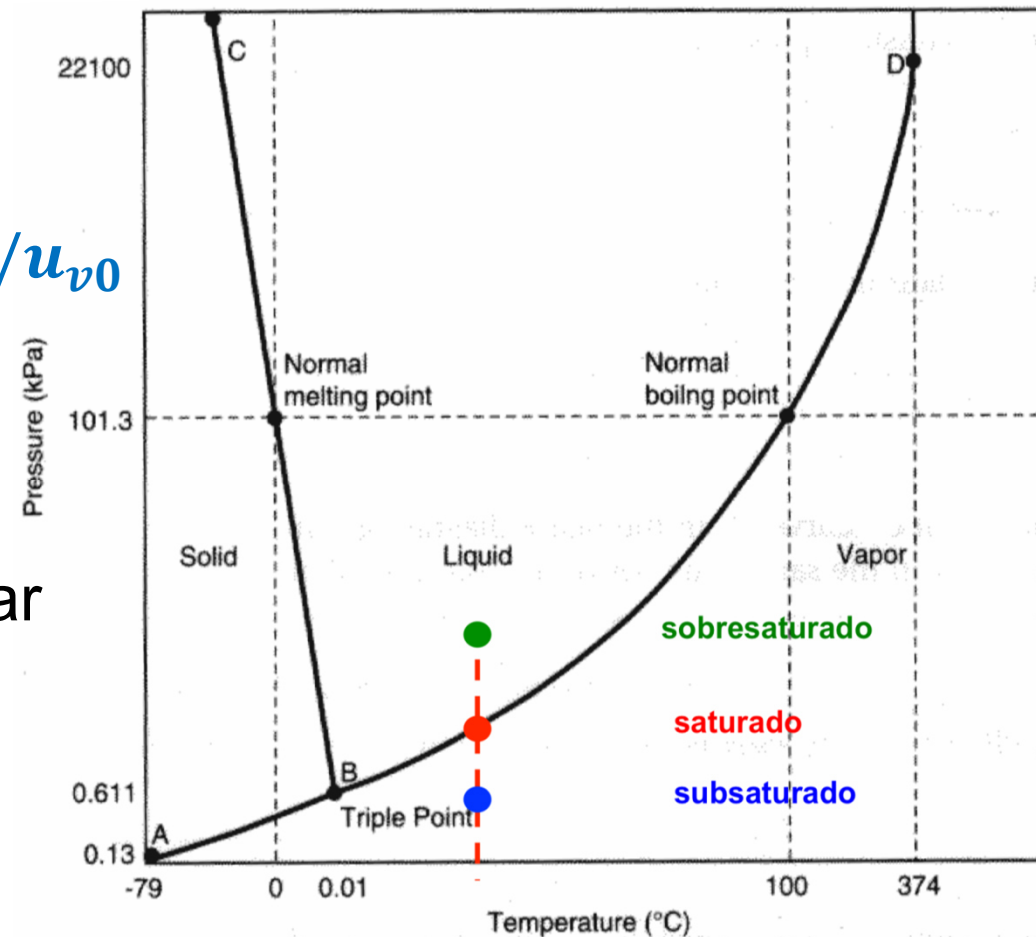
La fase gaseosa es una mezcla de gases y vapor de agua

- Ley de Boyle: $p \cdot v = n \cdot R \cdot T$
La fase se comporta como un gas perfecto
- Ley de Dalton $p = \sum p_i$
El comportamiento de un gas en la mezcla es independiente de los otros gases

Suelos no saturados: fase gaseosa - vapor de agua



- Presión de saturación de vapor: $u_{v0} = f(T^{\circ})$
- Presión parcial de vapor: u_v
- **Humedad relativa:** $RH = u_v / u_{v0}$
- Si $RH = 100\%$ la tasas de condensación y evaporación son iguales
- El vapor en el aire puede estar
 - **Sobresaturado:** $u_v > u_{v0}$
 - **Saturado:** $u_v = u_{v0}$
 - **Subsaturado:** $u_{v0} < u_v$



Suelos no saturados: la definición de “tensión efectiva”



- El equilibrio implica

$$\sigma \cdot A = \sigma' \cdot A + u_a \cdot A_a + u_w \cdot A_w$$
- La tensión en fase sólida es

$$\sigma' = \sigma - u_a \cdot \frac{A_a}{A} + u_w \cdot \frac{A_w}{A} =$$

$$= \sigma - u_a \cdot (1 - S_r) + u_w \cdot S_r$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + S_r(u_a - u_w)$$

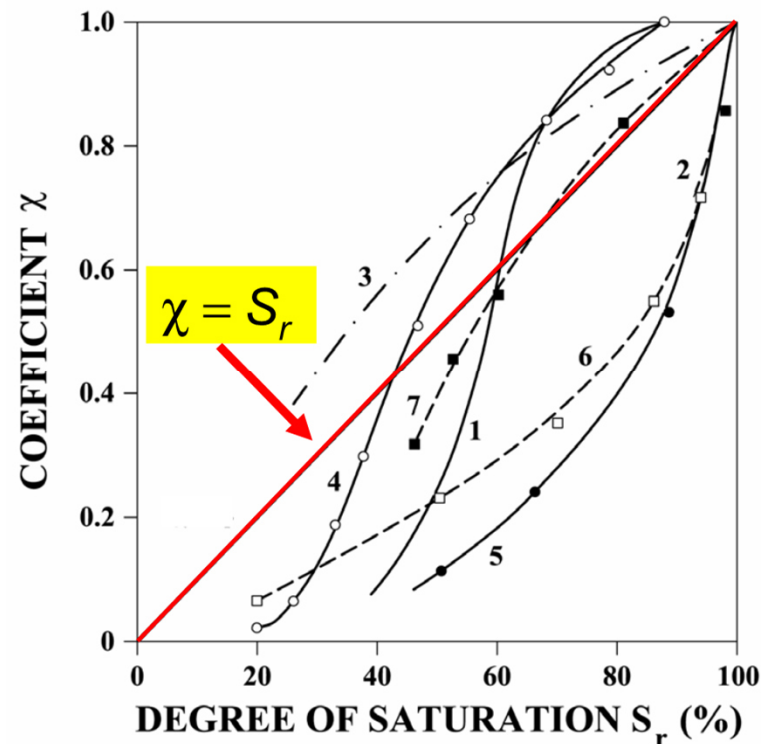
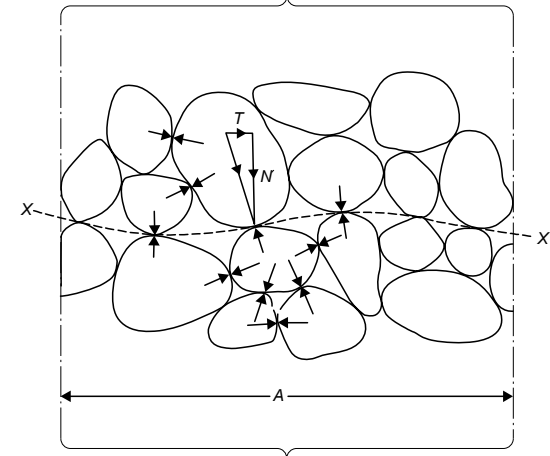
- Empíricamente

$$\sigma' \sim (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$



(desafortunadamente)

Esta expresión no anda bien



- 1 COMPACTED BOULDER CLAY (Bishop et al, 1960)
- 2 COMPACTED SALE (Bishop et al, 1960)
- 3 BREAHED SILT (Bishop & Donald, 1961)
- 4 SILT (Jennings & Burland, 1962)
- 5 SILTY CLAY (Jennings & Burland, 1962)
- 6 STERREBEEK SILT (Zerhouni, 1991)
- 7 WHITE CLAY (Zerhouni, 1991)

Suelos no saturados: la definición de “tensión efectiva”



- Otras propuestas de varios autores
- Desprendimiento de la ecuación de Terzaghi
- Tampoco resultaron exitosas

$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$	χ = parameter related to degree of saturation u_a = the pressure in gas and vapour phase	Bishop (1959)
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	β' = holding or bonding factor which is measure of number of bonds under tension effective in contributing to soil strength	Croney, Coleman and Black (1958)
$\sigma = \bar{\sigma} a_m + u_a a_a + u_w a_w + R - A$	a_a = fraction of total area that is air-air contact $\bar{\sigma}$ = mineral interparticle stress a_m = mineral particle contact area a_w = water phase contact area R = repulsive pore fluid stress due to chemistry A = attractive pore fluid stress due to chemistry	Lambe (1960)
$\sigma' = \sigma + \psi p''$	ψ = parameter with values ranging from zero to one p'' = pore-water pressure deficiency	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta p''$	β = statistical factor of same type as contact area; should be measured experimentally in each case	Jennings (1960)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m(h_m + u_a) + \chi_s(h_s + u_a)$	χ_m = effective stress parameter for matric suction h_m = matric suction h_s = solute suction χ_s = effective stress parameter for solute suction	Richards (1966)

(Fredlund, 1987)



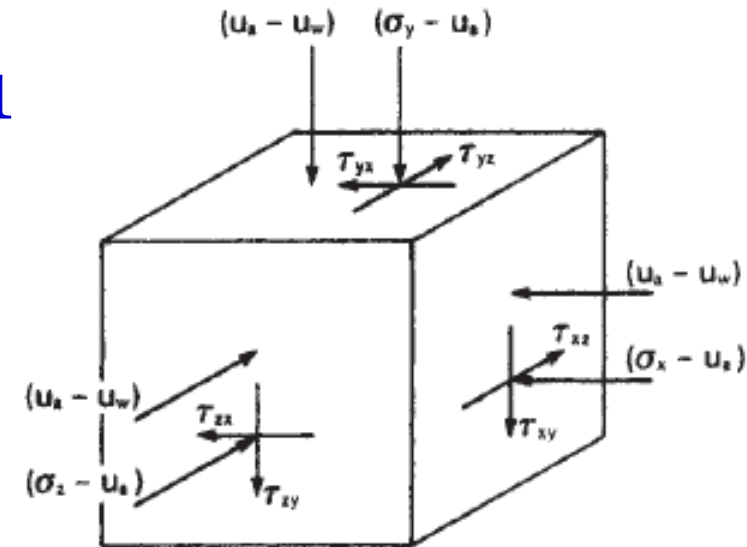
Suelos no saturados: tensores de tensiones (Fredlund & Morgenstern, 1977)

El estado del material queda definido por $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_n + \mathbf{s}$

- Tensor de tensión neta: $\boldsymbol{\sigma}_n = \boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1}$
- Tensor de succión: $\mathbf{s} = (u_a - u_w) \mathbf{1}$

Se debe cumplir $\sigma > u_a > u_w$

- Si $u_a > \sigma$ la muestra explota
- Si $u_a = u_w$ el suelo está saturado
 $\boldsymbol{\sigma}_n = \boldsymbol{\sigma}'$ y $\mathbf{s} = \mathbf{0}$



$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\sigma}$

$\boldsymbol{\sigma}_n$

\mathbf{s}



Suelos no saturados: definición de succión total (ψ)

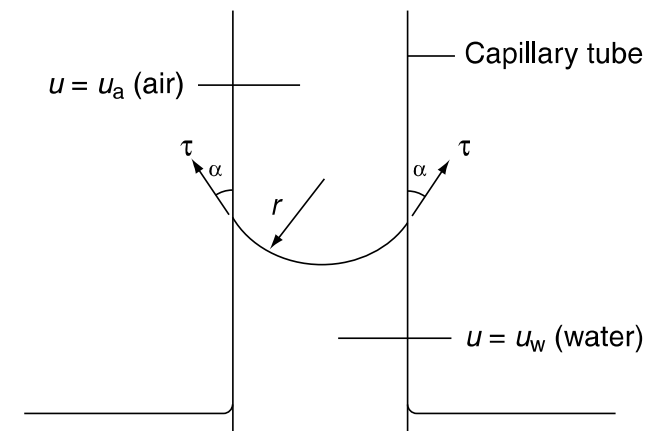
La succión es – físicamente – una medida del estado de energía libre del agua (Edlefsen & Anderson, 1943)

- Ley de Richards: Relación termodinámica entre energía libre del agua y presión parcial de vapor (u_v, u_{v0})

$$\psi = \frac{RT}{\omega_v / \rho} \ln \left(\frac{u_v}{u_{v0}} \right) = - \frac{RT}{\omega_v / \rho} \ln(RH) \xrightarrow{T=20^\circ\text{C}} -135 \ln(RH) \text{ [kPa]}$$

La succión total es $\psi = \pi + s$

- Succión osmótica π
- Succión mátrica ($u_a - u_w$)



Suelos no saturados: componentes de la succión total (ψ)



La succión total ψ es la suma de dos términos: $\psi = \pi + s$

- **Succión osmótica π**
 - Producida por cationes atraídos por las partículas
 - Depende de tipo y concentración de sales disueltas en agua
 - Varía poco con el contenido de humedad
 - Existe aún para suelos saturados
- **Succión mátrica $s = (u_a - u_w)$**
 - Producida por meniscos aire-agua (curvatura proporcional a RH , o sea, a $u_a - u_w$)
 - Depende de tamaño de poros y humedad
 - Su variación es más común en la práctica estándar

Suelos no saturados: variación de succión total con contenido de humedad

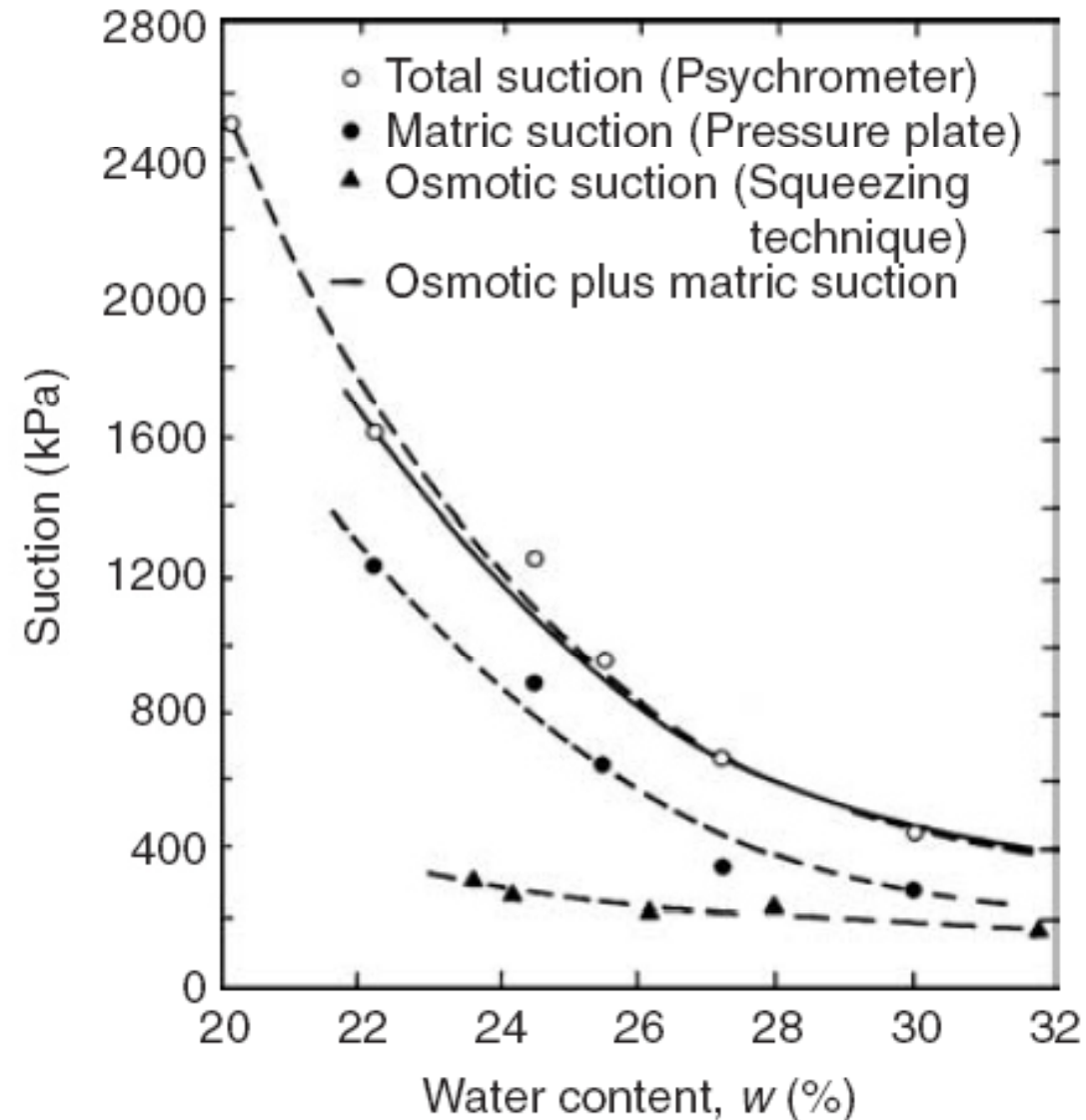


Medición directa

- Humedad relativa (RH)

Medición indirecta

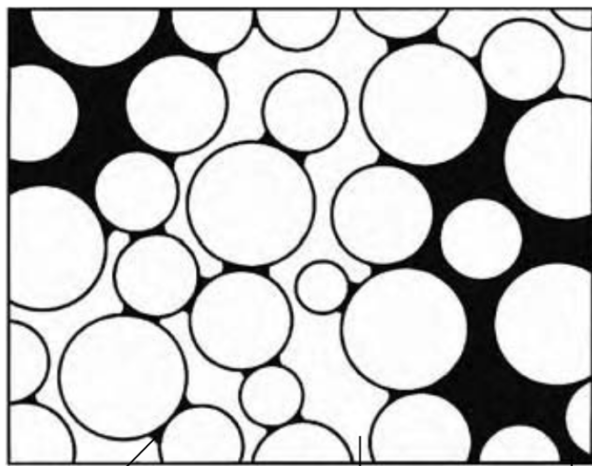
- Humedad
- Temperatura
- Conductividad térmica
- Conductividad eléctrica





Suelos no saturados: succión mátrica ($u_a - u_w$)

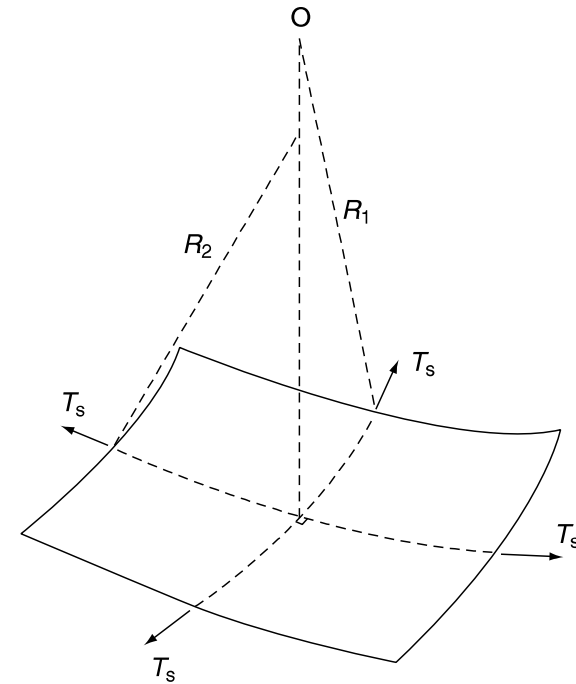
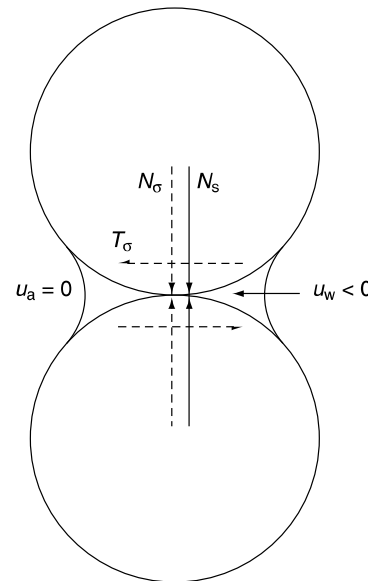
- En general se asume $u_a = 0 \text{ kPa}$
- La tensión superficial en la interfaz es directam. proporcional al valor de succión $\Delta u = u_a - u_w = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$
- Para $T = 20^\circ\text{C} \rightarrow T_s \sim 72 \text{ mN/m}$



Miniscus water

Air

Bulk water



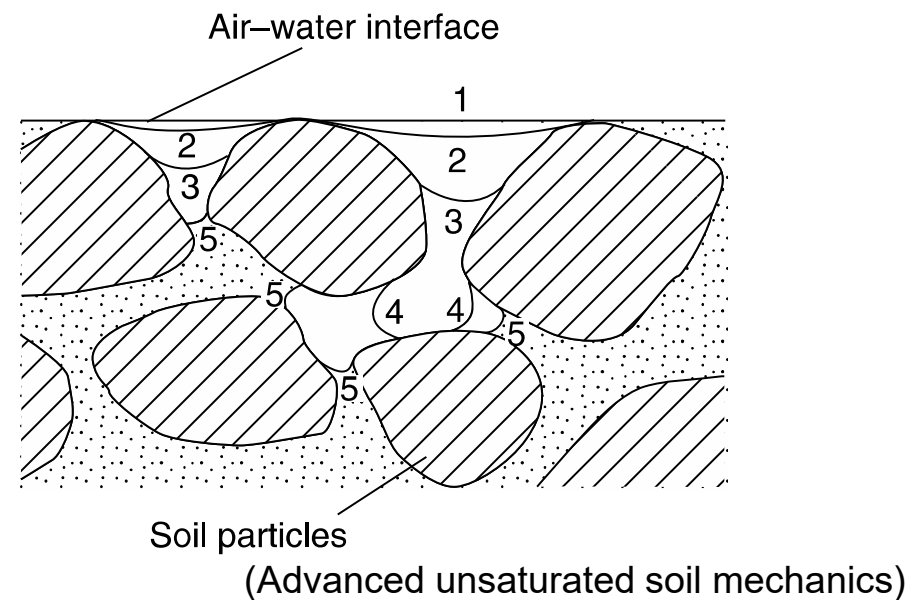
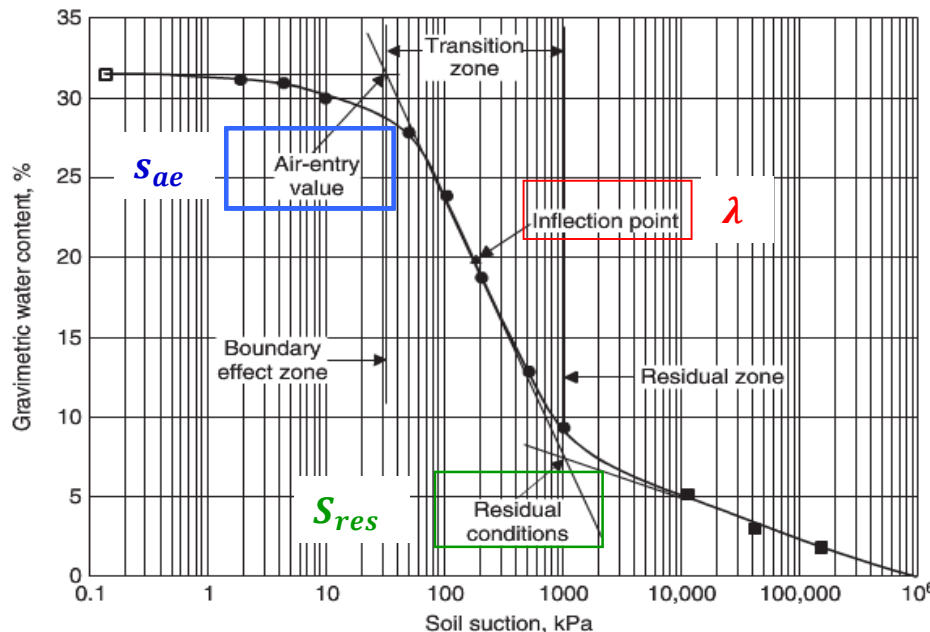
(Advanced unsaturated soil mechanics)



Suelos no saturados: curva de retención característica (SWCC)

- Relación grado de saturación (S_r) y succión mátrica ($u_a - u_w$)
- Se “levanta”, “desplaza” y “suaviza” a mayor contenido finos

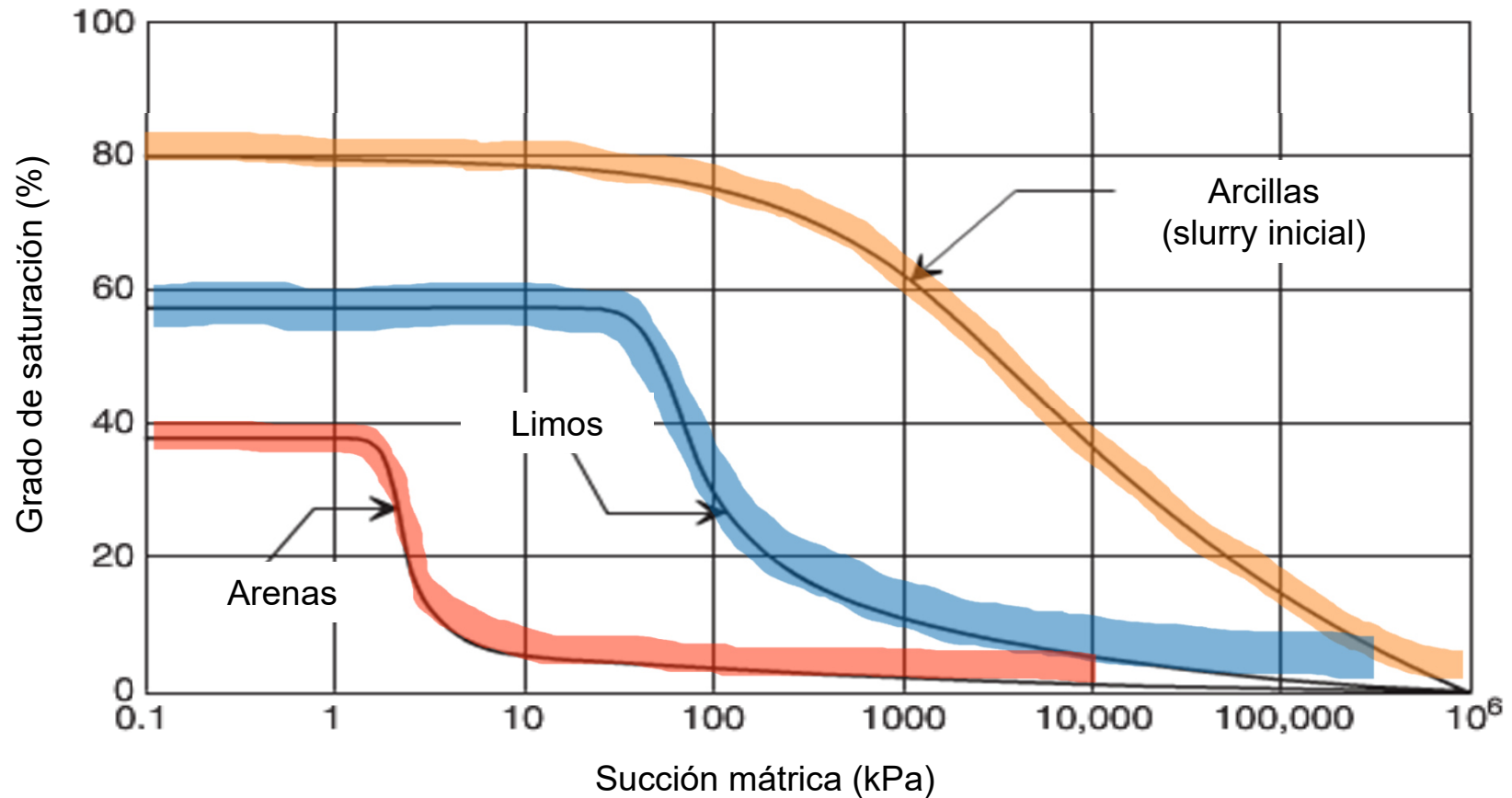
$$S_r = \left[1 + \left(\frac{u_a - u_w}{S_{ae}} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \cdot (1 - S_{res}) + S_{res}$$



Suelos no saturados: curva de retención característica (SWCC)



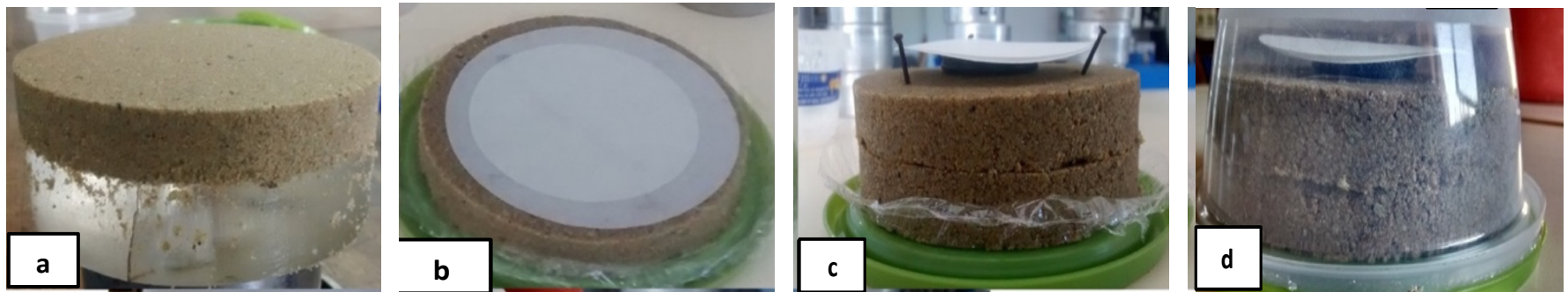
- Amplio rango en suelos ($0 - 10^6$ kPa)



Suelos no saturados: curva de retención característica (SWCC)



- Colocación papeles de filtro intermedio y de sacrificio
- Recipiente hermético + cámara higrotérmica (>7 días)
- Medición humedad papel filtro intermedio, balanza 0.0001gr
- Determinación de succión mátrica ($u_a - u_w$) y total (ψ) mediante curva de calibración (Whatman No. 42) y grado de saturación (S_r)

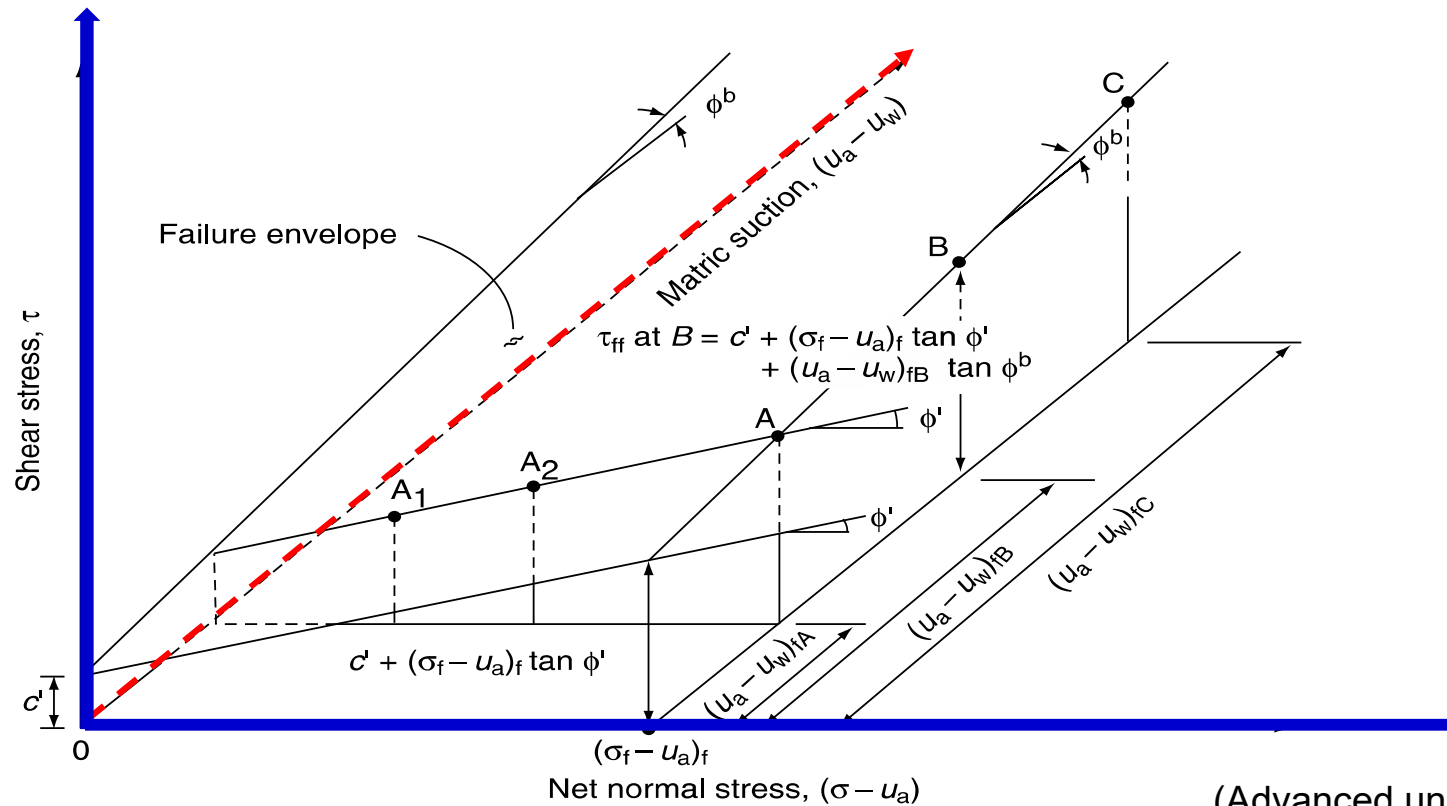


Secuencia de armado de muestras para determinación de curva de retención (ASTM D5298)

Suelos no saturados: resistencia al corte (vuelvan a mirar en 3-4 clases)



- Unsat ($S_r < 100\%$) $\tau = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi^b$
- Sat ($S_r = 100\%$) $\tau = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi'$

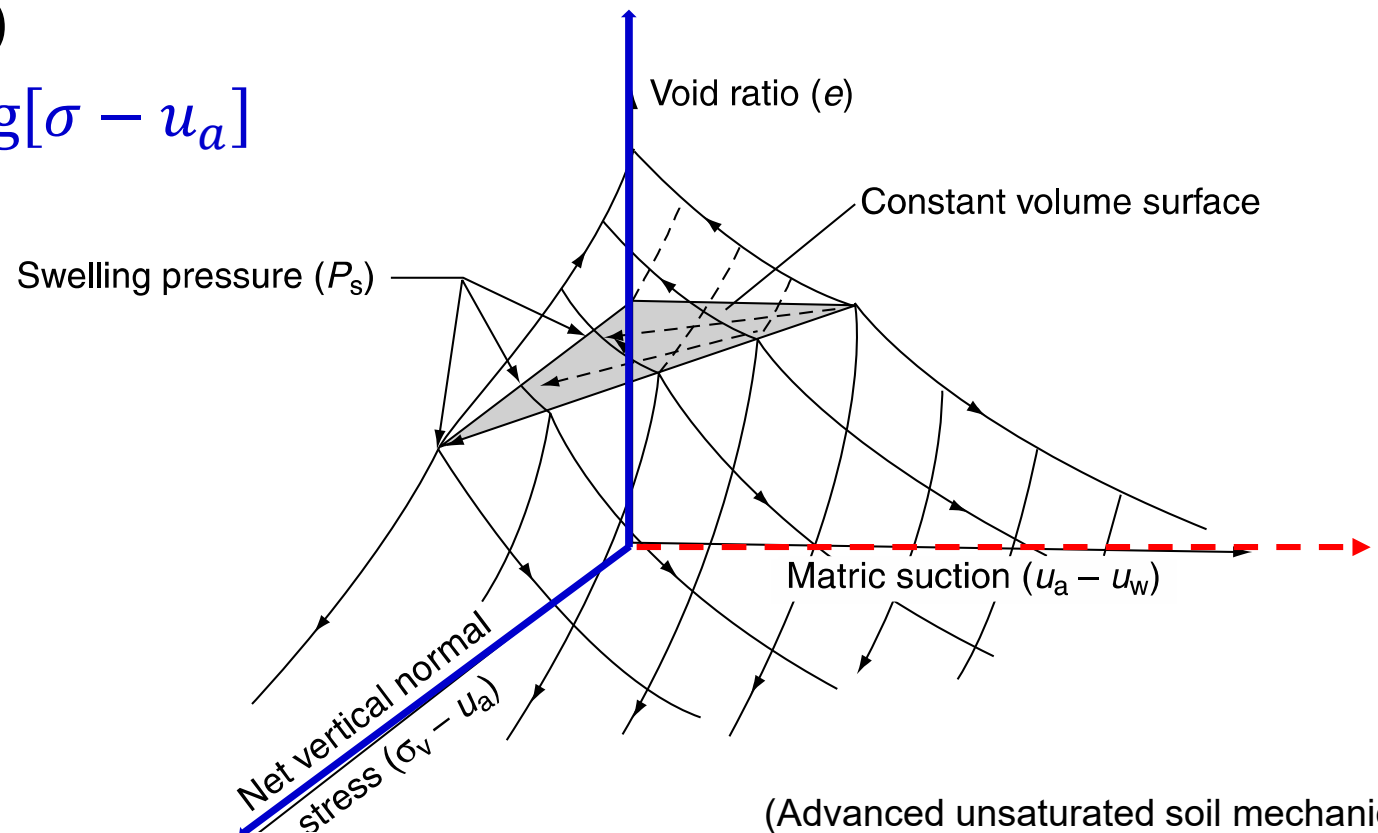


(Advanced unsaturated soil mechanics)

Suelos no saturados: compresibilidad (vuelvan a mirar en 1-2 clases)



- Unsat ($S_r < 100\%$)
 - $\Delta e = C_b \cdot \Delta \log[\sigma - u_a] + C_a \cdot \Delta \log[u_a - u_w]$
- Sat ($S_r = 100\%$)
 - $\Delta e = C_b \cdot \Delta \log[\sigma - u_a]$



(Advanced unsaturated soil mechanics)

Suelos no saturados de comportamiento “especial”



Suelos expansivos

- parcialmente saturados (en general) que **aumentan su volumen cuando aumenta su humedad**, a carga constante



Suelos colapsables

- parcialmente saturados que **reducen su volumen cuando aumenta su humedad**, a carga constante

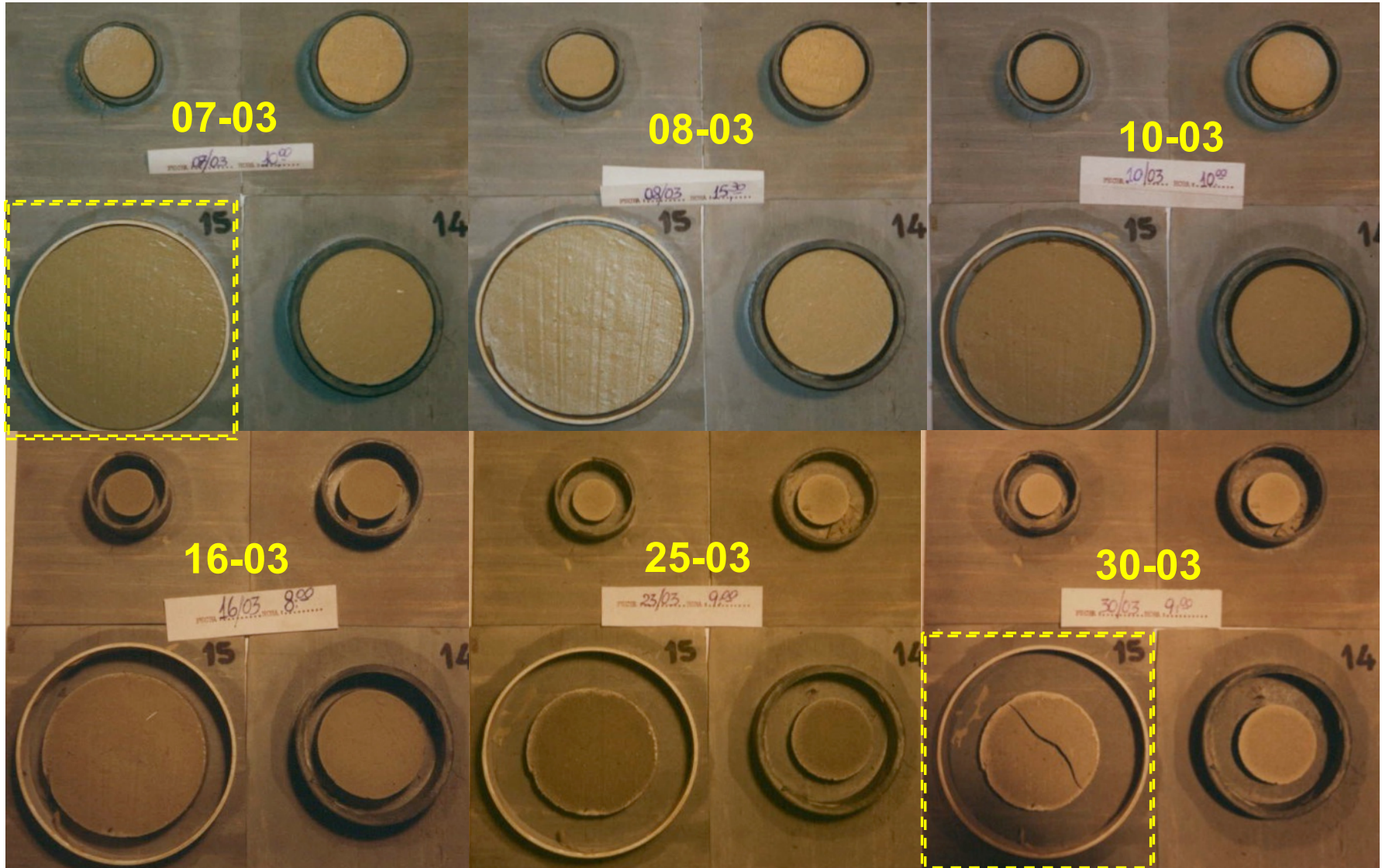


Índice



- Breve introducción a los suelos no saturados
- **Suelos expansivos**
- Suelos colapsables

Suelos expansivos: contracción volumétrica de arcillas (laboratorio)



Suelos expansivos: contracción volumétrica de arcillas (campo)



- Contracción por secado (expulsión de agua, reducción de volumen)
- A menor tamaño de partícula, mayor contracción por secado
- Existe una diferencia de presión en la interfaz agua-aire ($u_a - u_w$) que evoluciona durante el proceso de secado:

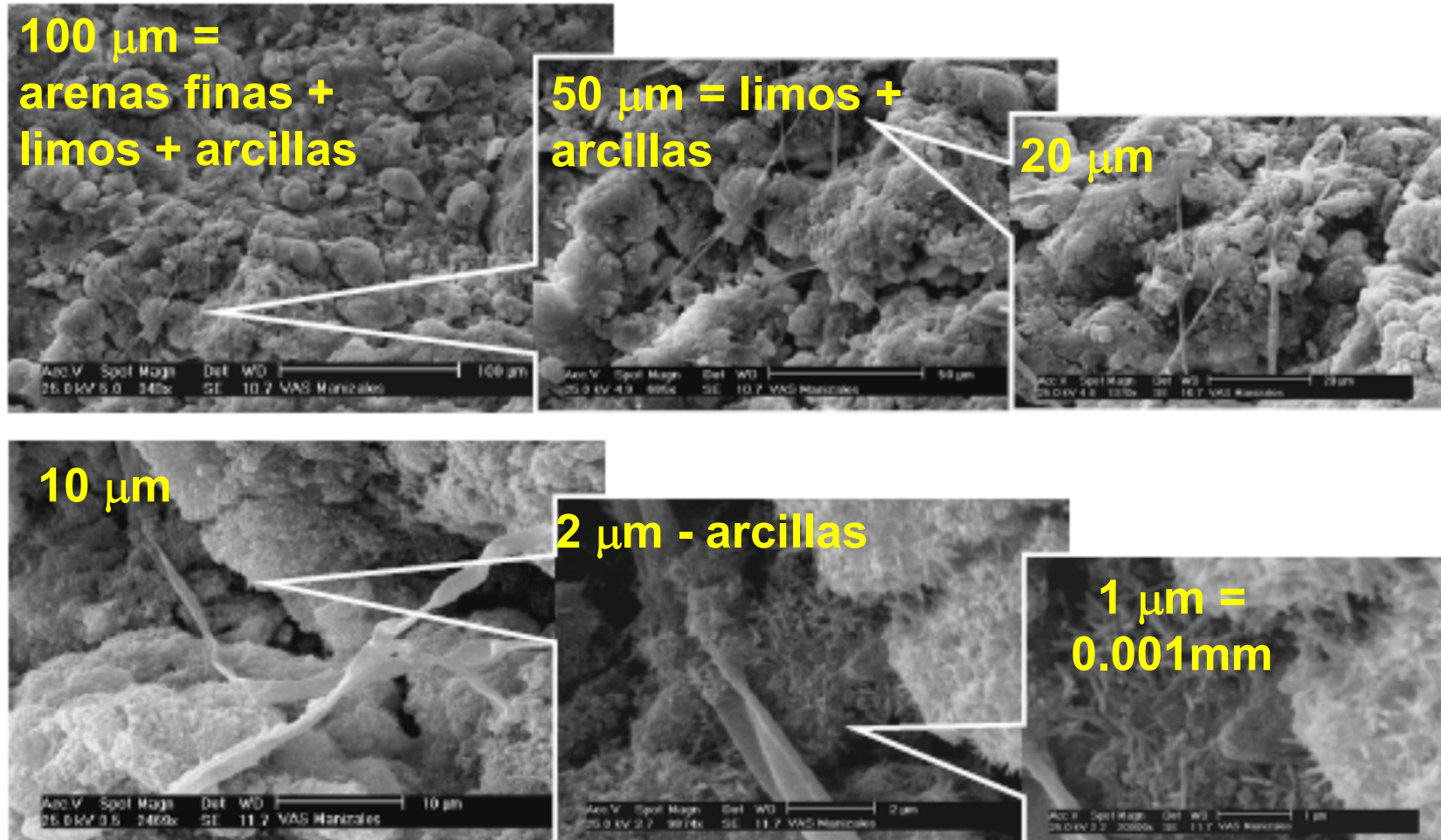
$$u_a - u_w = T_s / R_s$$



T_s : tensión superficial ($\frac{kN}{m}$) R_s : radio medio del menisco (m)



Suelos expansivos: mecanismo de expansión por interacción fluido-partícula



Imágenes de microscopio electrónico de barrido

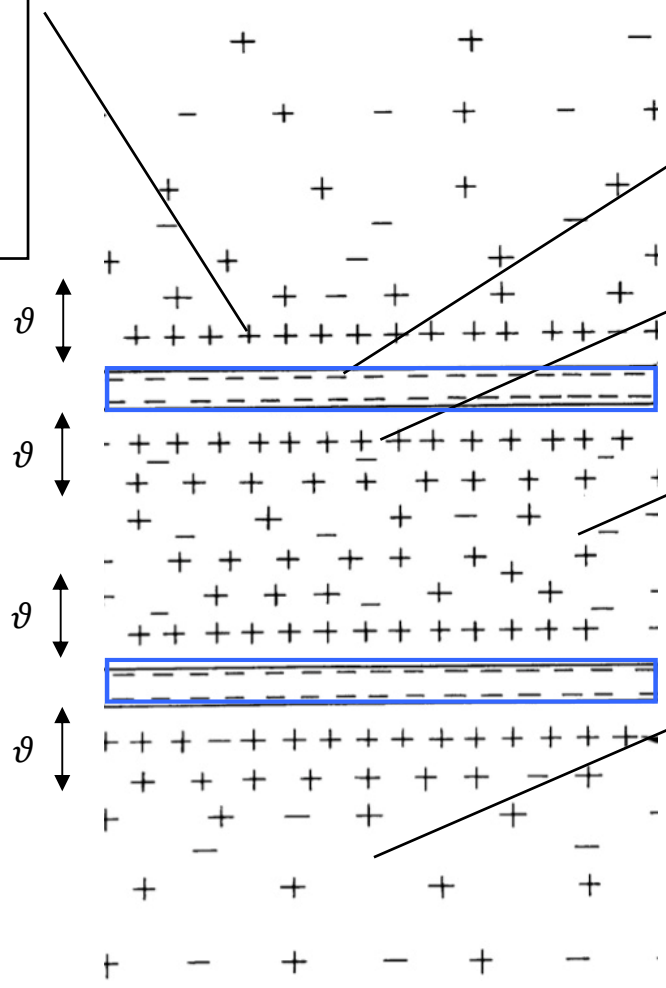


Suelos expansivos: mecanismo de expansión por interacción fluido-partícula

cación retenido por atracción eléctrica con cara de arcilla: **no puede salir**

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_0 R T}{2F^2 c_0 z^2}}$$

Espesor de doble capa difusa (DDL)



partícula de arcilla (cargas -)

agua y cationes adsorbidos

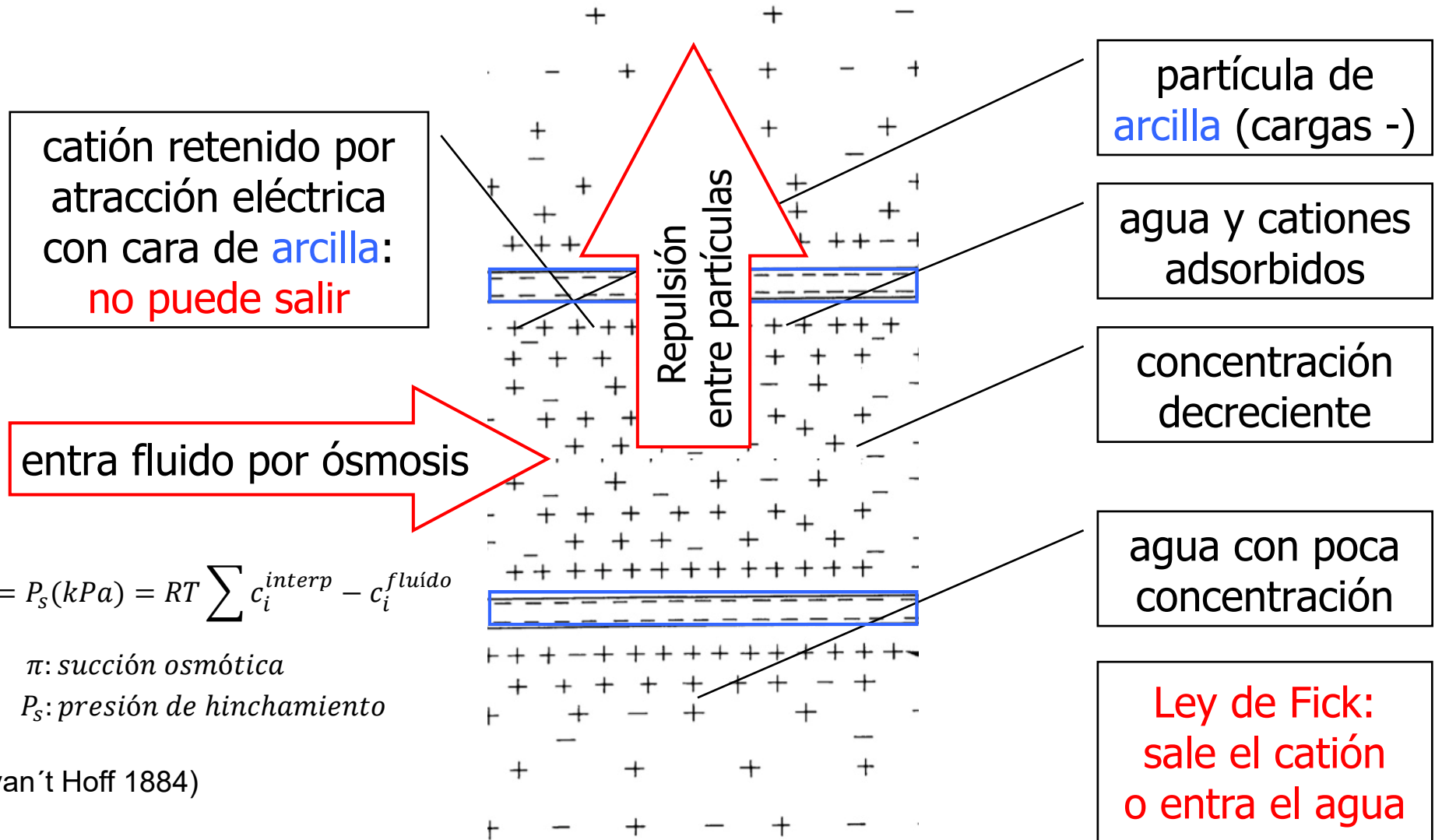
concentración decreciente

agua con poca concentración

Ley de Fick: sale el catión o entra el agua



Suelos expansivos: mecanismo de expansión por interacción fluido-partícula



$$\pi = P_s (kPa) = RT \sum c_i^{interp} - c_i^{fluido}$$

π : succión osmótica

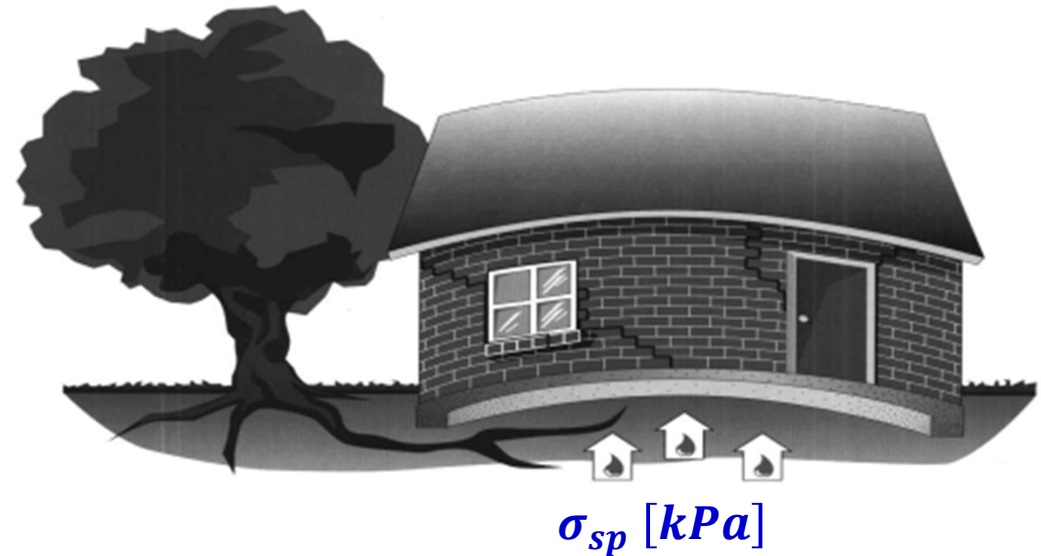
P_s : presión de hinchamiento

(van 't Hoff 1884)

Suelos expansivos: consecuencias no deseadas



Cuando el suelo se humedece (regamos las plantas, pierde un caño,...) puede “hincharse”



La presión de expansión $\sigma_{sp} [kPa]$ puede ser mucho mayor que el peso de la estructura (vivienda, camino, etc.)



La expansión no es uniforme: daños a la construcción



Caracterización de expansividad: Índice de actividad (A)

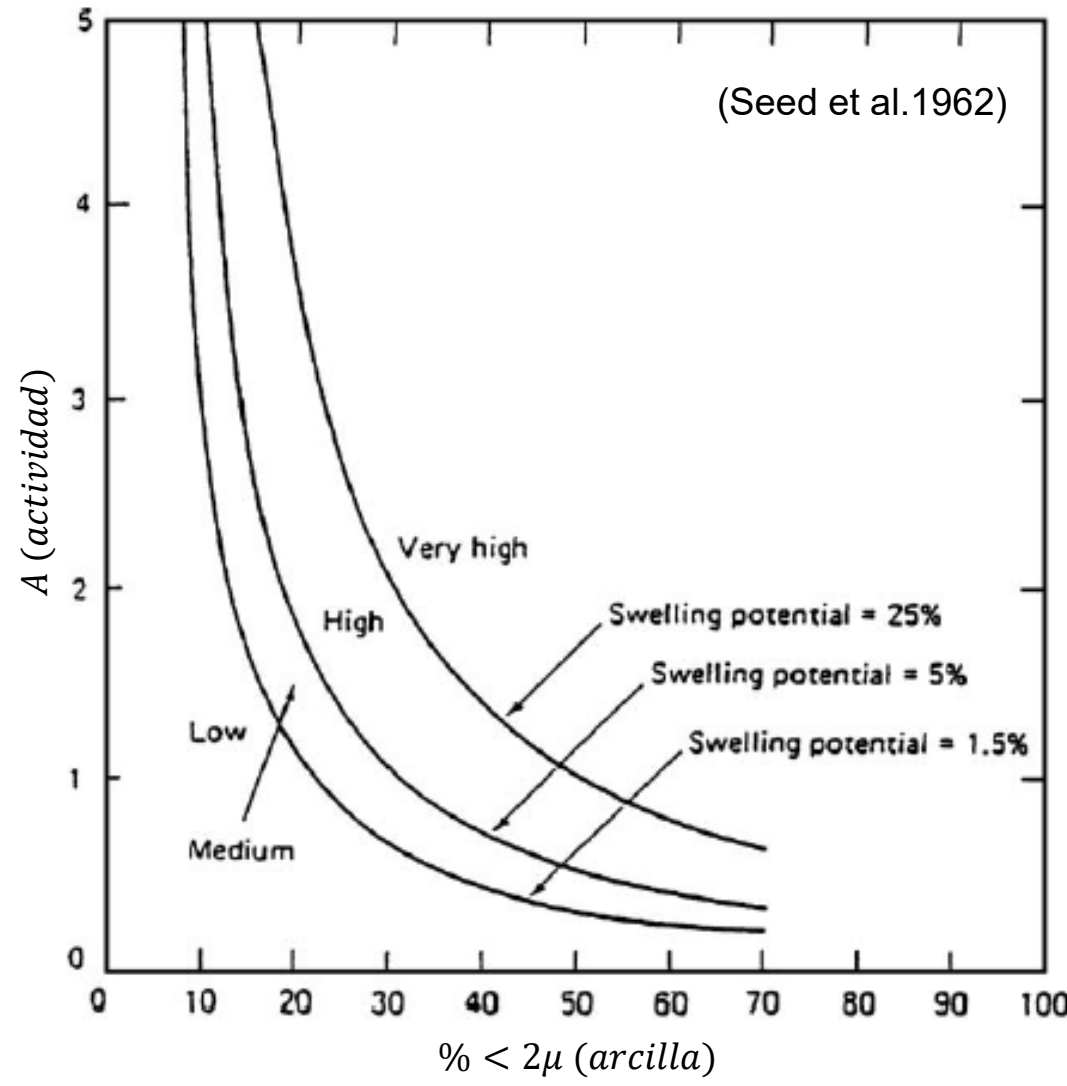
Mide la actividad eléctrica de la arcilla

$$A = \frac{IP}{\% < 2\mu} \longrightarrow \text{hidrometría}$$

Si el IP es alto con poca arcilla, ésta es muy activa

Mineral	Activity
Na-montmorillonite	4-7
Ca-montmorillonite	1.5
Illite	0.5-1.3
Kaolinite	0.3-0.5
Halloysite (dehydrated)	0.5
Halloysite (hydrated)	0.1
Attapulgitte	0.5-1.2
Allophane	0.5-1.2
Mica (muscovite)	0.2
Calcite	0.2
Quartz	0

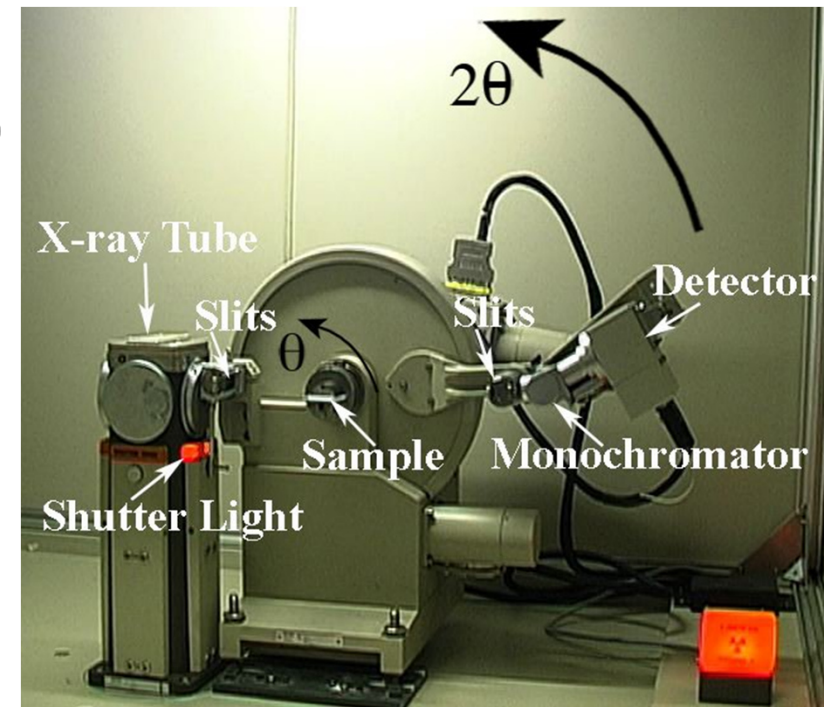
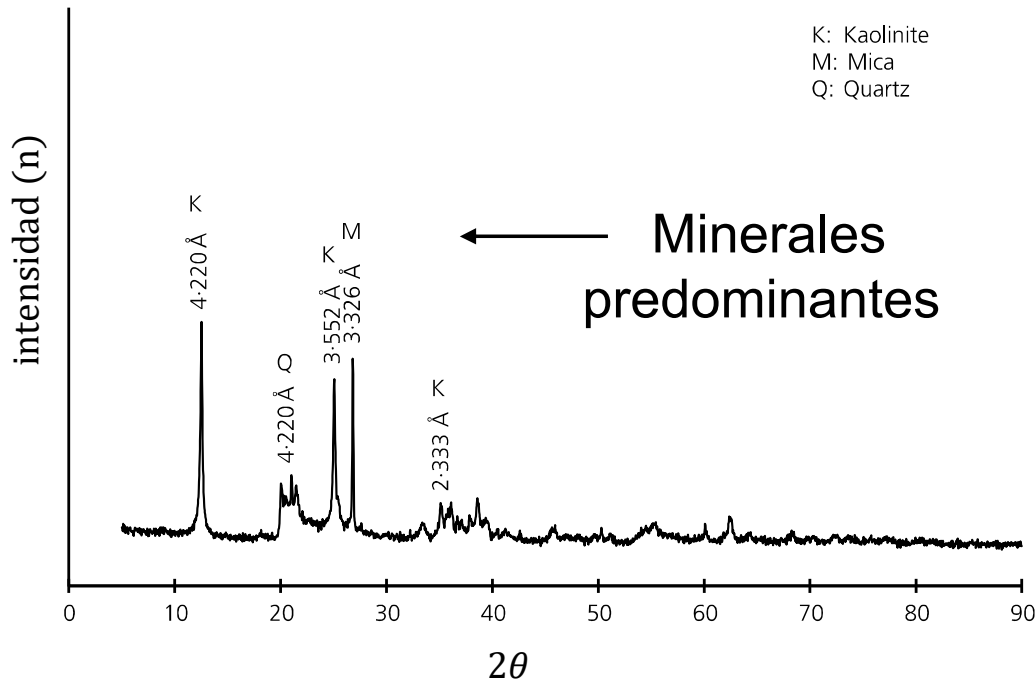
(Skempton 1953, Mitchell 1976)





Caracterización de expansividad: Difracción por rayos X (XRD)

- Se ataca una muestra (2-5gr) con rayos α
- Se cuentan las veces que se difracta un rayo con ángulo θ , característico de un mineral
- Se cuantifican los minerales con $d(\text{Å})$

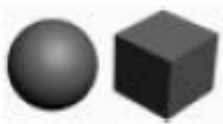




$$d(\text{Å}) = n \cdot \frac{\lambda}{2\text{sen}(\theta)} \rightarrow \text{Ley de Bragg}$$

Caracterización de expansividad: Superficie específica (S_s)



- Relación entre la superficie de una partícula (m^2) y su masa (gr)
- Mide el grado de aglomeración de paquetes de hojas de arcilla

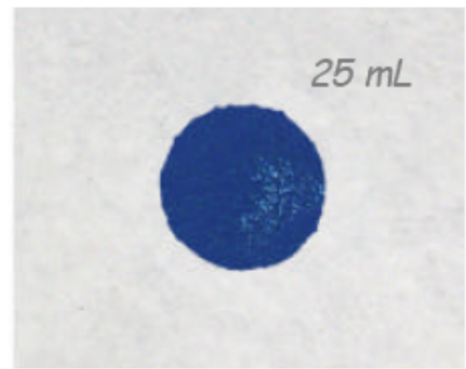
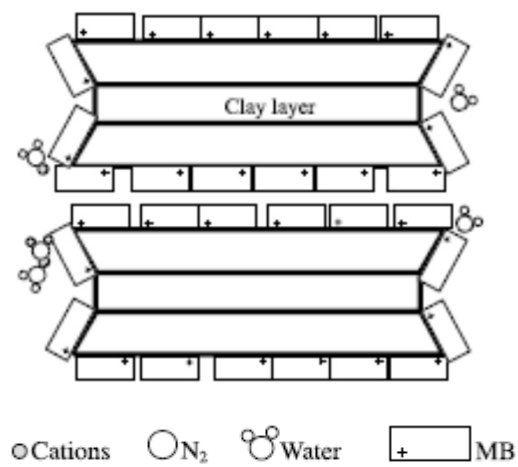
Forma o Geometría	Dimensiones	Ejemplos	Superficie específica
Esferas y cubos 	Diámetro (o lado) D	Alo fanas	$S_e = \frac{6}{D \cdot \rho_w \cdot G_s}$
Cilindros y primas 	Diámetro (o lado) D , largo L (con $L \gg D$)	Halo isita, Imogolita	$S_e = \frac{4}{D \cdot \rho_w \cdot G_s}$
Formas aplanadas 	Espesor t , ancho D , y largo L (con $t \gg L > D$)	Montmorillonita, Caolinita, Mica	$S_e = \frac{2}{t \cdot \rho_w \cdot G_s}$

ρ_w = densidad del agua, G_s = gravedad específica, S_e = superficie específica

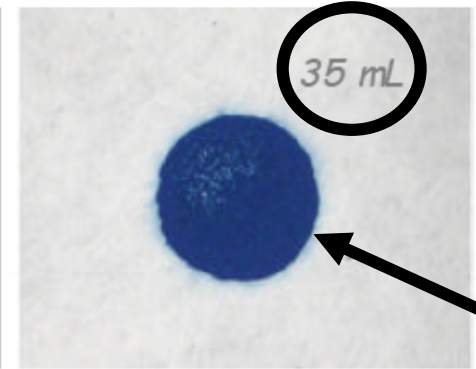


Caracterización de expansividad: Superficie específica (S_s)

- Técnica de absorción de azul de metileno (MB)



Absorción total
MB



MB en exceso
(fin ensayo)

Número
($N = 70$)

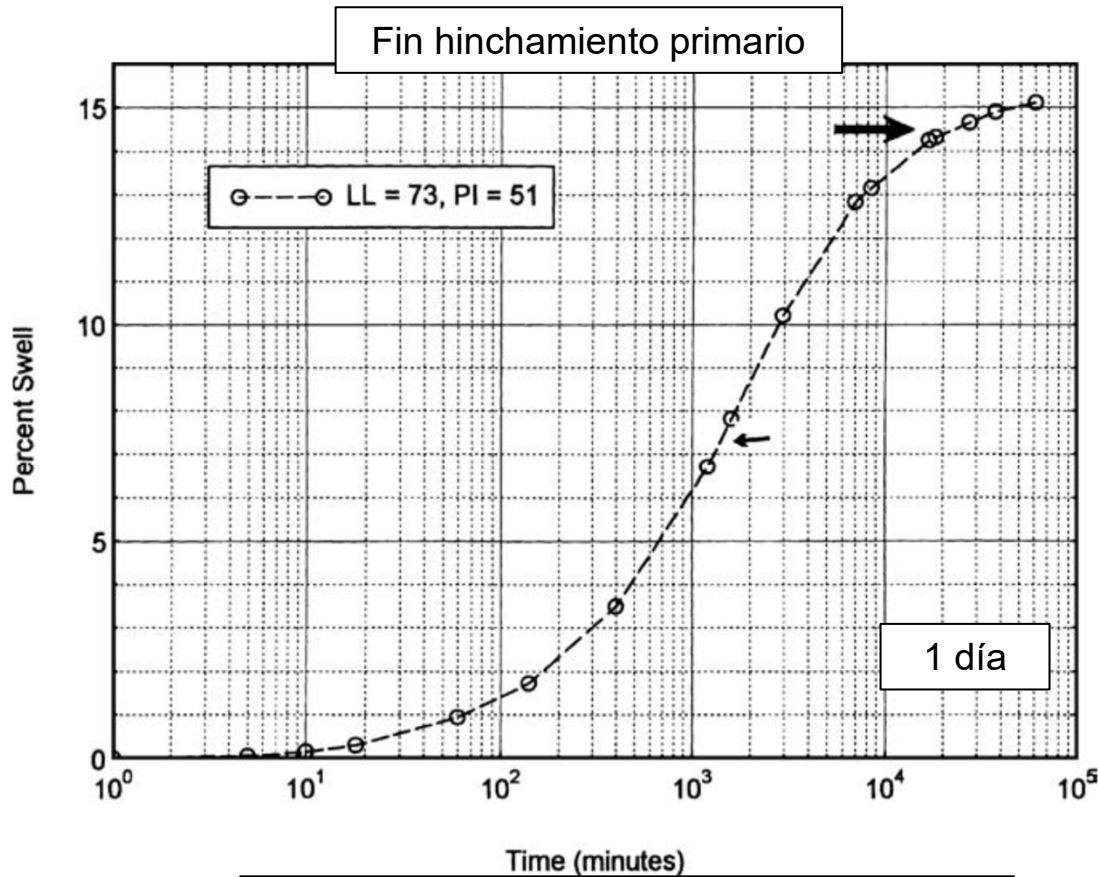
Halo celeste

$$S_s \left[\frac{m^2}{gr} \right] = \frac{1gr}{319,87 \frac{gr}{mol}} \cdot \frac{1}{200mL} \cdot (N \cdot 0,5mL) \cdot N_{Av} \cdot A_{AM} \cdot \frac{1}{10gr}$$

	Montmorillonite	Illite	Kaolinite	Attapulgate
S_s (m ² /g)	400–800	80–100	10–20	140–170
LL (%)	100–950	60–120	30–110	160–230
PL (%)	50–100	35–60	25–40	100–140
Activity	0.9–7.0	0.5–1.0	0.3–0.5	0.5–1.2

(Yong and Warkentin 1975;
Zelazny and Calhoun 1977;
Mitchell 1993)

Caracterización de expansividad: expansión libre en edómetro (EI)

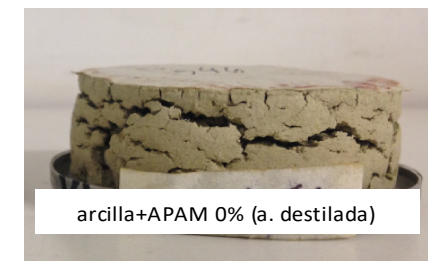


$$EI = \frac{1000\Delta H}{H_1}$$

$$EI_{50} = EI - (50 - S_r) \times \frac{65 + EI}{220 - S_r}$$

Índice de expansión del ensayo y corregido al 50% (ASTM D4829)

Expansion Index, EI	Potential Expansion
0–20	Very Low
21–50	Low
51–90	Medium
91–130	High
>130	Very High



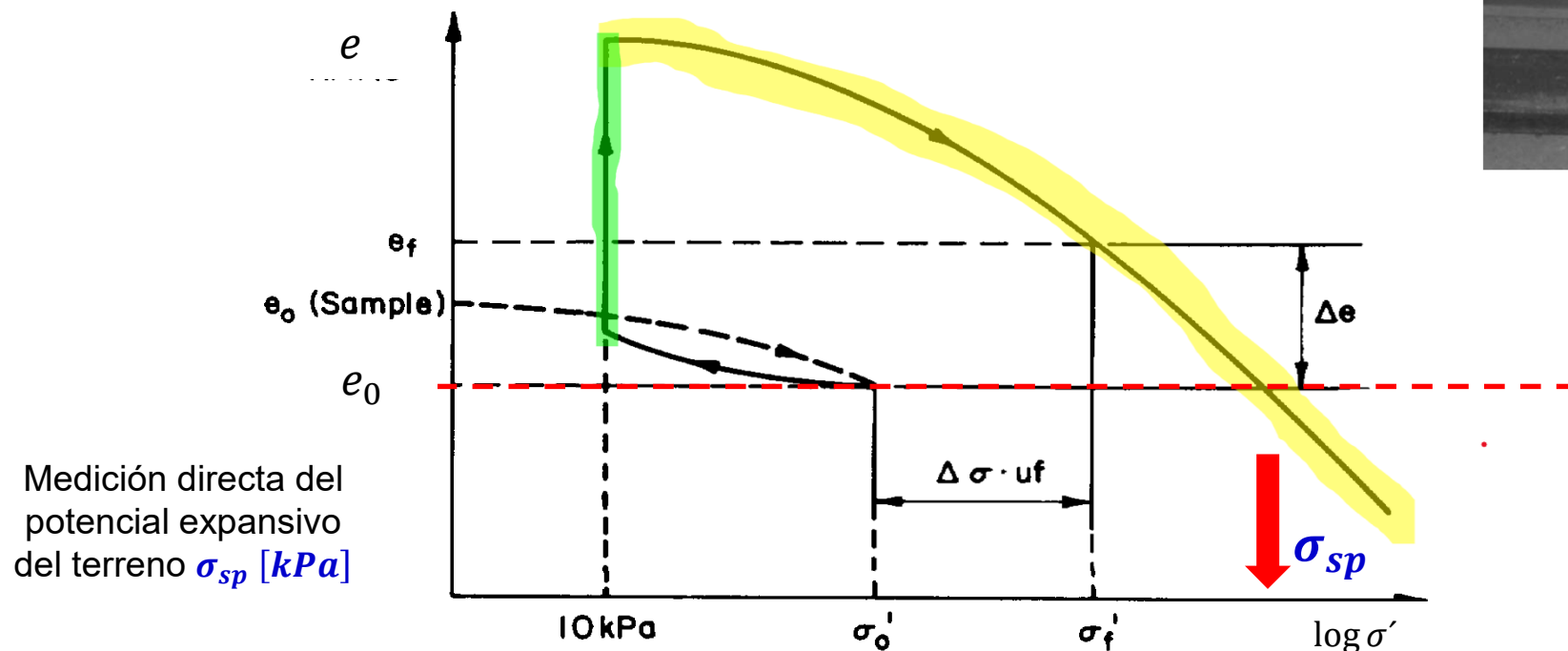
(Marti L., 2015)



Caracterización de expansividad: presión de hinchamiento en edómetro (σ_{sp})

1º etapa: deformación uniaxial por ingreso de fluido bajo carga preestablecida (10 kPa u otra)

2º etapa: incremento de carga en forma escalonada hasta alcanzar la relación de vacíos inicial (e_0)



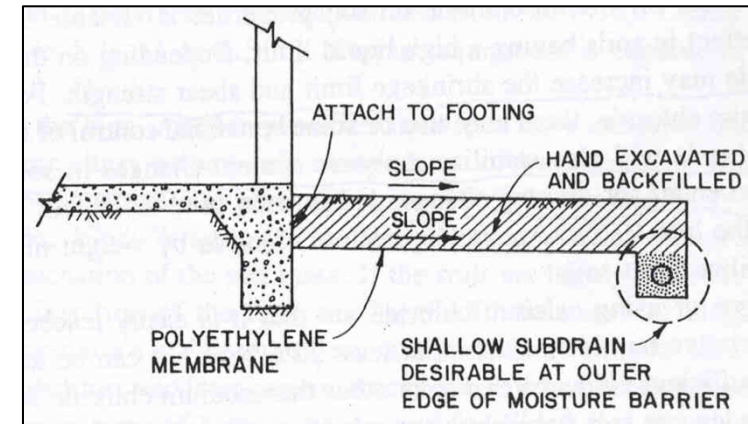
Suelos expansivos: técnicas de remediación



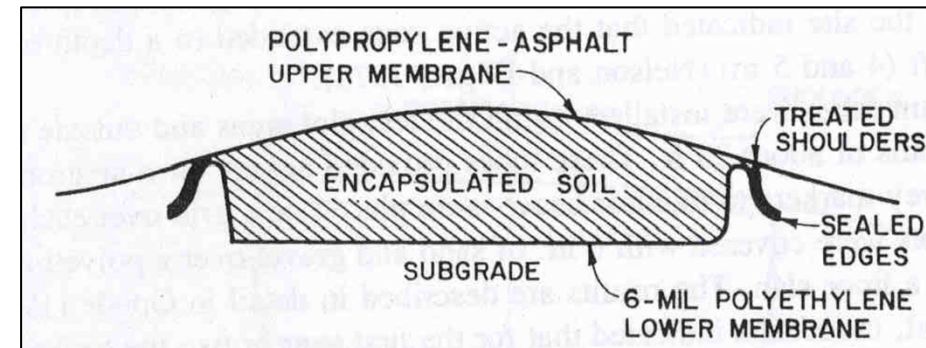
- Retiro y recolocación
- Barreras verticales y horizontales
- Incorporación de cal
- Inundación
- Sobrecarga

Soil Type	Approximate Treatment Percent by Soil Weight	
	Hydrated Lime	Quicklime
Clayey gravels (GC, GM-GC)(A-2-6, A-2-7)	2-4	2-3
Silty Clays (CL) (A-6, A-7-6)	5-10	3-8
Clays (CH) (A-6, A-7-6)	3-8	3-6

Incorporación de cal para diferentes tipos de suelos



Barrera H (membrana PVC + concreto)



Barreras + recambio (membrana PVC encapsulada + suelo no expansivo)

Índice



- Breve introducción a los suelos no saturados
- Suelos expansivos
- **Suelos colapsables**

Suelos colapsables: propiedades básicas



- Suelos loésicos (arenas finas, limos y arcillas transportadas por viento), residuales, coluviales
- Baja plasticidad (poca actividad electroquímica)
- Bajo grado de saturación (hay tensión capilar $\uparrow \sigma'$)
- Muy bajo peso unitario seco (alta relación de vacíos)
- Agentes cementantes débiles que mantienen al suelo en una posición estable

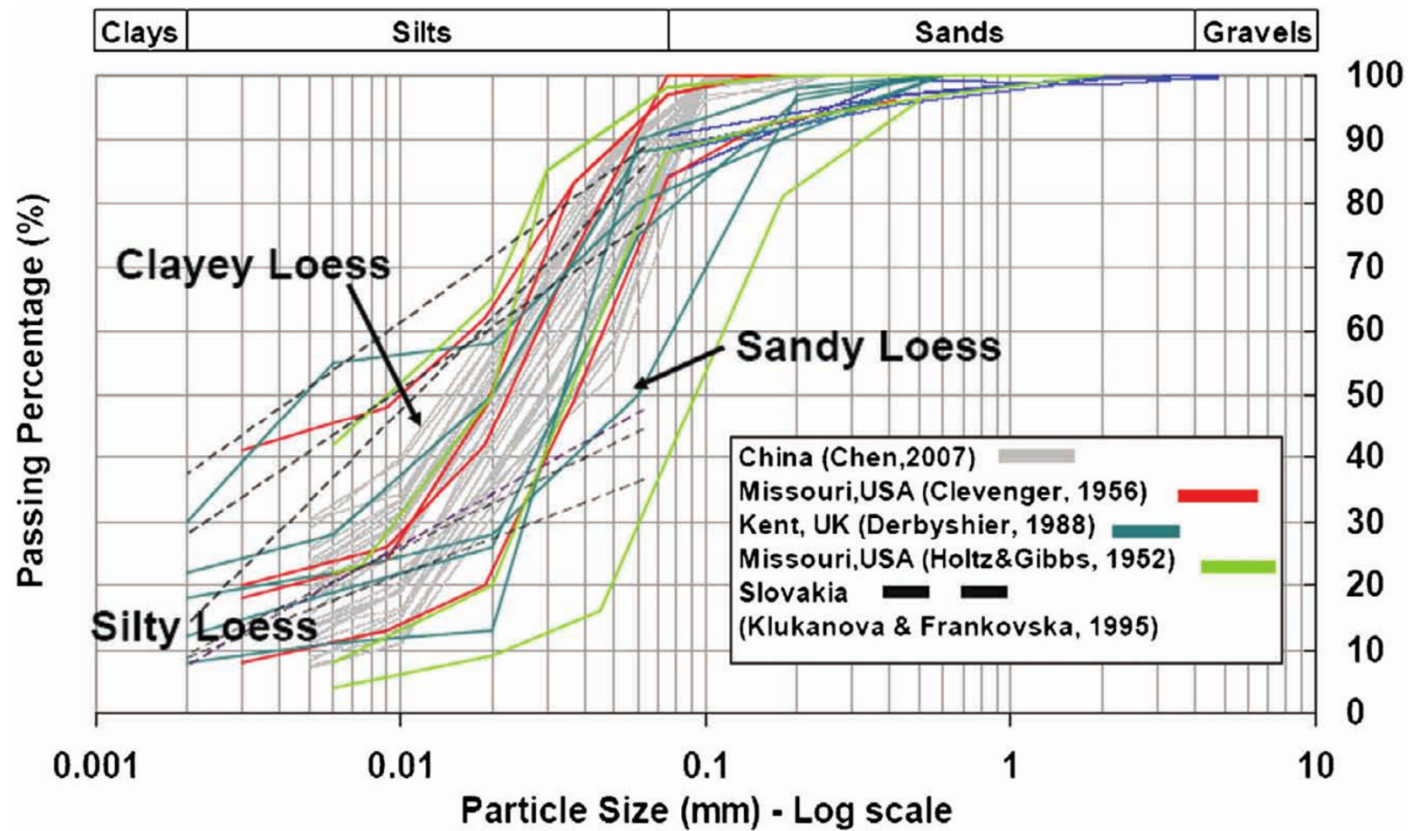


Distribución geográfica del Loess en Argentina (Teruggi 1957, Kröhling 1999 y Zárate 2003)

Suelos colapsables: propiedades básicas



- Identificación en curva granulométrica

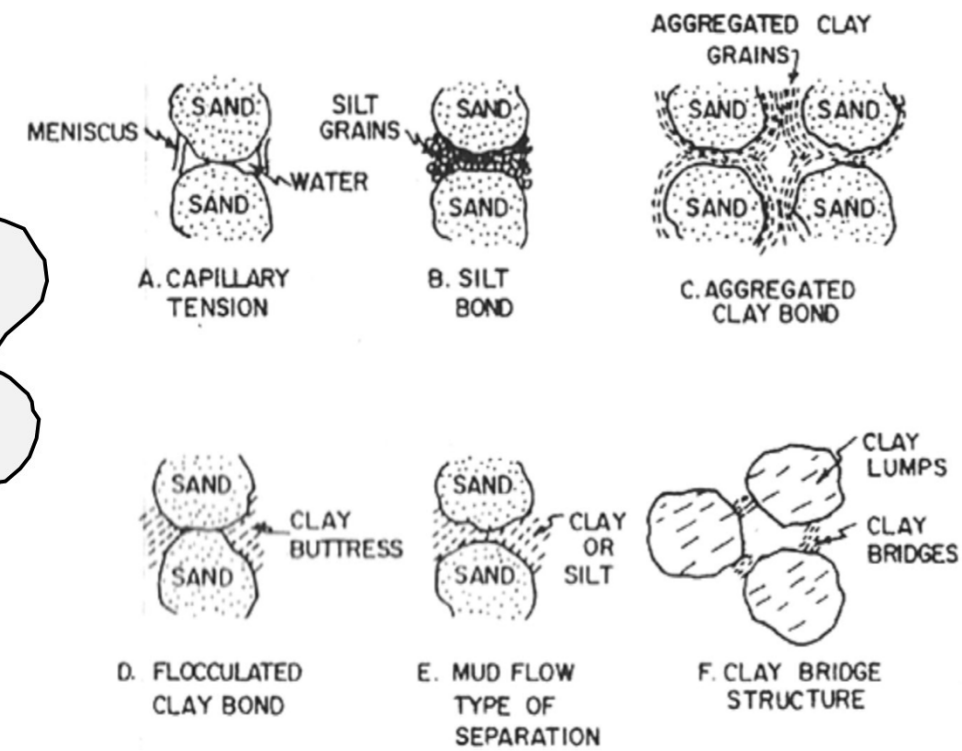
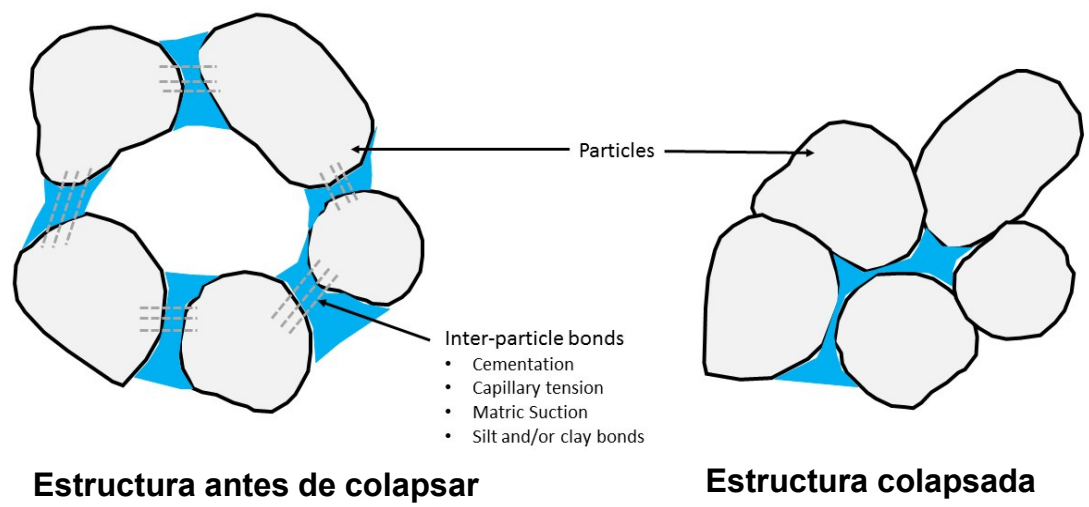


(Chen et al. 2007; Clevenger 1956; Derbyshire and Mellors 1988; Holtz and Gibbs 1956; Klukanova and Frankovaska 1994)



Suelos colapsables: propiedades básicas

- Diferentes vinculaciones naturales (“agente cementante”) entre partículas



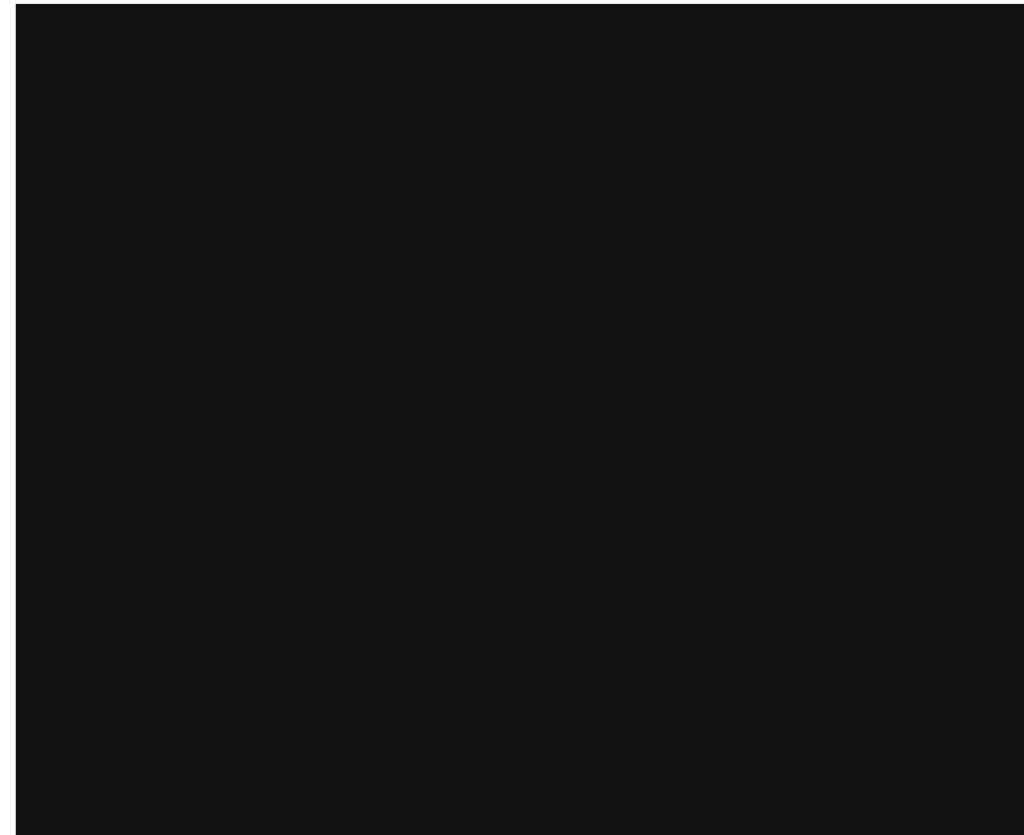
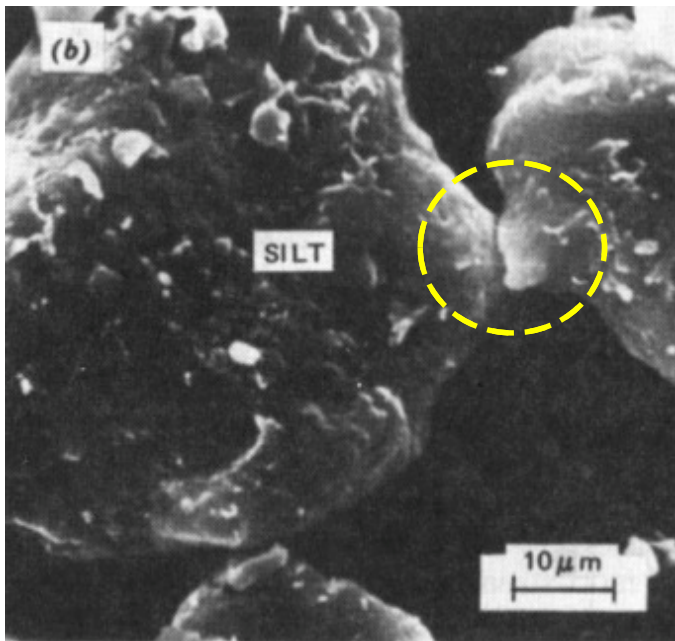
https://fl-nzgs-media.s3.amazonaws.com/uploads/2022/06/Brink_NZGS2_021_Submission_Ref-0059_Create-1.pdf

(Clemence and Finbarr 1981)



Suelos colapsables: mecanismo de colapso por saturación

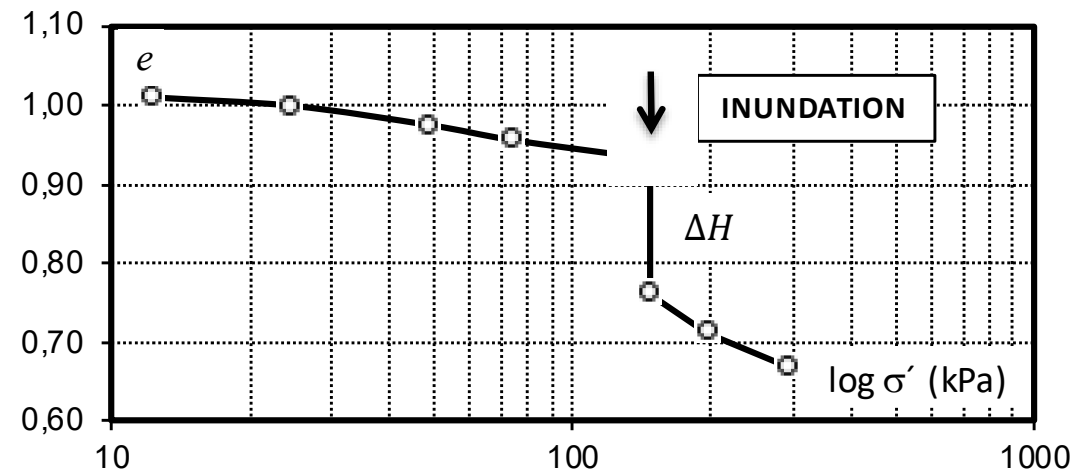
- El fluido “rompe” los agentes cementantes entre partículas
- Brusca reducción de volumen, las partículas “colapsan” y caen a una posición más estable
- **El proceso es irreversible**



Caracterización de colapsabilidad: índice de colapso (I_c)



- Sobre muestra inalterada
- Se lleva la muestra a la presión efectiva objetivo o 200kPa, sin saturar
- Se satura la muestra y se mide ΔH
- Se calcula el índice de colapso I_c o I_e



Degree of Specimen Collapse	Collapse Index I_e , %
None	0
Slight	0.1 to 2.0
Moderate	2.1 to 6.0
Moderately severe	6.1 to 10.0
Severe	>10

$$I_c = 100 \times \frac{\Delta H}{H_0}$$

$$I_e = 100 \times \frac{\Delta H}{H_0} \Big|_{\sigma' = 200 \text{ kPa}}$$

Suelos “autocolapsibles” o “potencialmente colapsibles”



- **Suelo autocolapsible**

- Cuando la presión efectiva actual es mayor a la presión de colapso ($\sigma'_{v0} > \sigma_{col}$)
- Si el suelo se humedece, colapsa por peso propio

- **Suelo potencialmente colapsible**

- Cuando la presión de tapada es menor a la presión de colapso ($\sigma'_{v0} < \sigma_{col}$)
- Si el suelo se humedece, no colapsa
- Si el suelo se humedece y se aumenta la carga, colapsa

Suelos colapsibles: técnicas de remediación



- Retiro y recolocación
- Compactación in situ
- Inundación
- Fundaciones indirectas



¿Cómo distinguir suelos expansivos de colapsables?



- Los suelos expansivos **reducen/aumentan** su volumen cuando se **reduce/aumenta** su humedad
- Los suelos colapsables **reducen** su volumen cuando **aumenta** su humedad
- En laboratorio: el límite líquido permite distinguirlos bien
 - expansivo $LL > 50, IP > 20, \omega_{sat} \ll LL$
 - colapsable $LL < 35, IP < 10, \omega_{sat} \cong LL$
- En campo: inspección tacto-visual permite distinguirlos bien
 - expansivo retiene agua, “difícil” romper seco
 - colapsable no tiene agua, “fácil” romper seco

Resumen de clase



- Se presentaron algunos conceptos básicos de la mecánica de suelos no saturados
- Se presentaron los aspectos característicos de suelos expansivos y colapsables como así también algunos ensayos de caracterización en laboratorio y técnicas de remediación.
- Se enfatizó la necesidad de contemplar en los diseños de fundaciones la existencia de suelos “especiales” o “problemáticos”.

¿Puede ahora responder?



108 Introducción suelos no saturados



Bibliografía



Básica

- Fredlund et al. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley
- Redolfi E. Pilotes en suelos colapsables. Tesis CEDEX
- Jiménez Salas y otros. Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda

Complementaria

- ASTM D4089. Description of Frozen Soils
- Mitchell. Fundamentals of soil behavior. Wiley.
- Arroyo. Comportamiento de suelos crióticos. Tesis FIUBA



Material complementario (filmillas no presentadas en clase)



Caracterización de expansividad: capacidad de intercambio catiónico (*CEC*)

- Mide la capacidad de intercambio de cationes que presentan las partículas de arcilla al hidratarse
- Los cationes de mayor valencia reemplazan a los de menor ($Li^+ < Na^+ < H^+ < K^+ < NH_4^+ \ll Mg^{2+} < Ca^{2+} \ll Al^{3+}$)
- El medio ambiente determina los cationes presentes en la arcilla
- En presencia de materia orgánica, poco intercambio

Clay Mineral	CEC Milliequivalents per 100 g.
Kaolinite	3-15
Halloysite, 2 H ₂ O	5-10
Montmorillonite	80-150
Illite	10-40
Vermiculite	100-150
Chlorite	10-40

(Grim 1968)

$$CEC \left[\frac{meq}{100gr} \right] = 100 \frac{E \cdot N \cdot 0,5mL}{2gr}$$

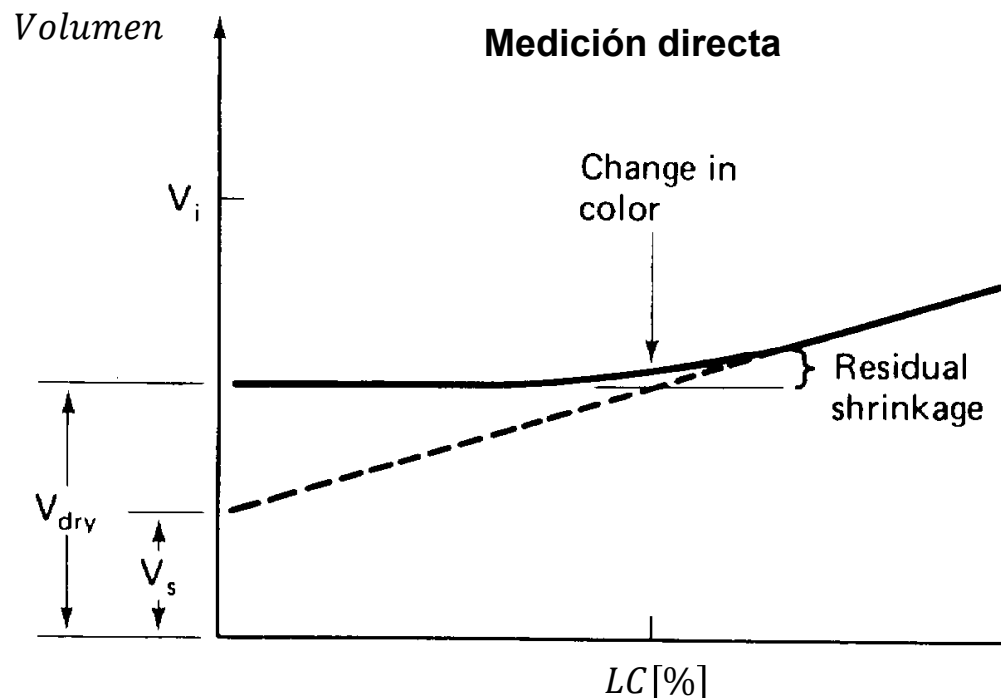
Determinación de CEC
mediante azul de metileno



Caracterización de expansividad: Límite de contracción

El límite de contracción es la humedad en la que el suelo deja de contraer, cambia de color y se de-satura

A menor límite de contracción, mayor potencial de expansión



Medición directa

Medición indirecta (LL, LP)

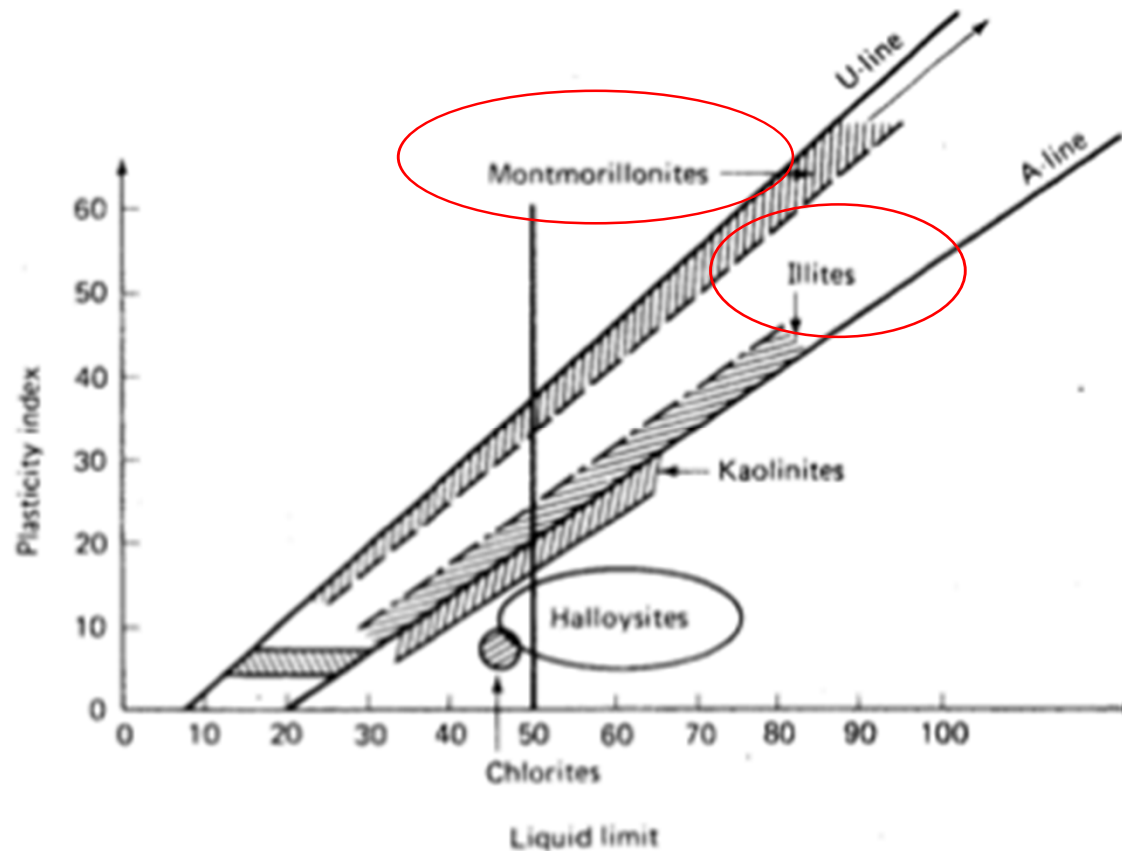
$$LC[\%] \sim 46.38 \frac{LL[\%] + 43.53}{IP[\%] + 46.38} - 43.53$$

$$0\% < LC[\%] < LP[\%] < LL[\%]$$



Caracterización de expansividad: Difracción por rayos X (XRD)

- Minerales de arcilla en carta de plasticidad



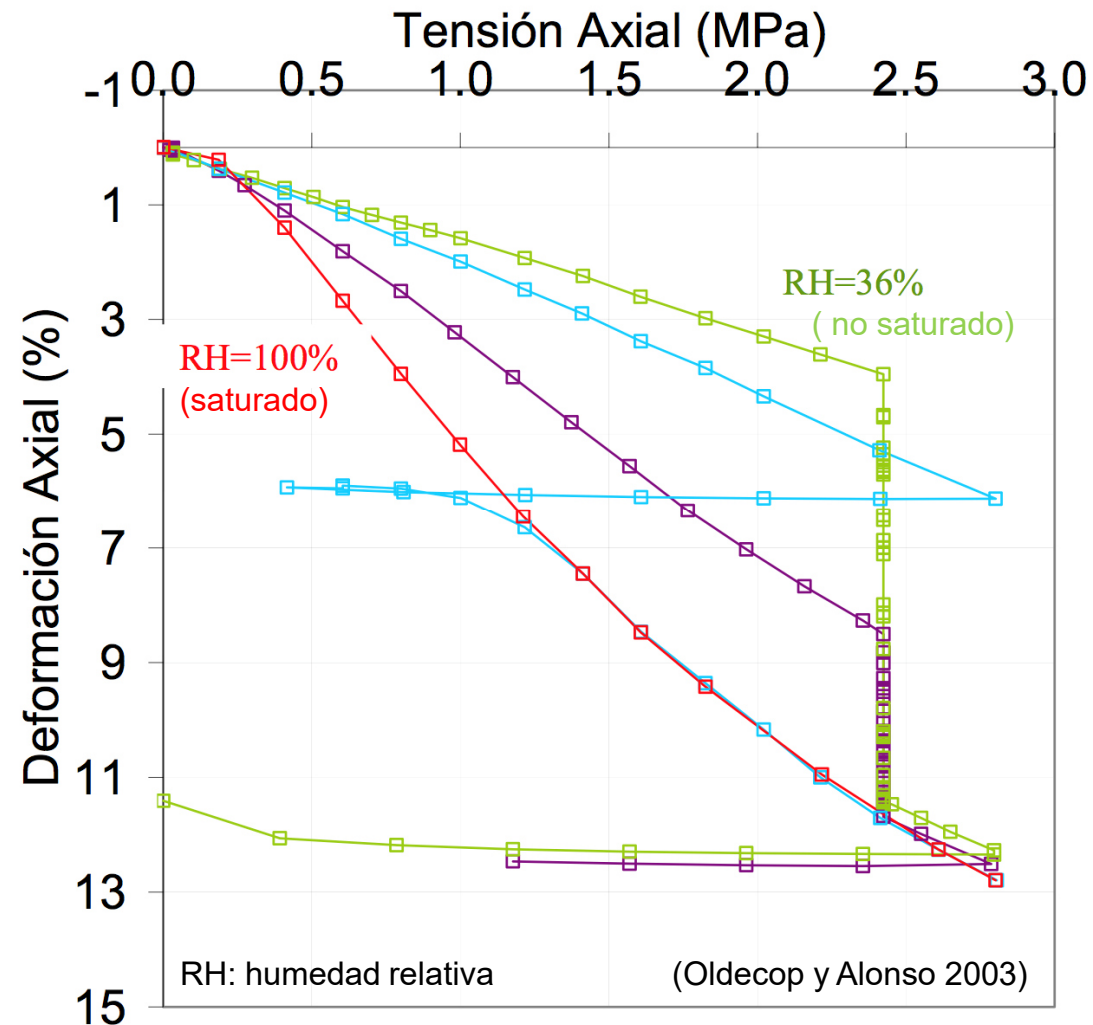
(Mitchell 1976)

Caracterización de colapsabilidad: mecanismo de colapso de enrocados



Mecanismo de colapso por humedecimiento

- Asentamiento de presas luego de su construcción (ingreso de agua por llenado de embalse)
- Fisuras en terraplenes (asentamientos del terreno de fundación)
- Similar comportamiento $\sigma - \epsilon_1$ cuando RH=100% en edómetro



Suelos de comportamiento “especial” en el triaxial

Suelos cementados ($c' \rightarrow \tau$)

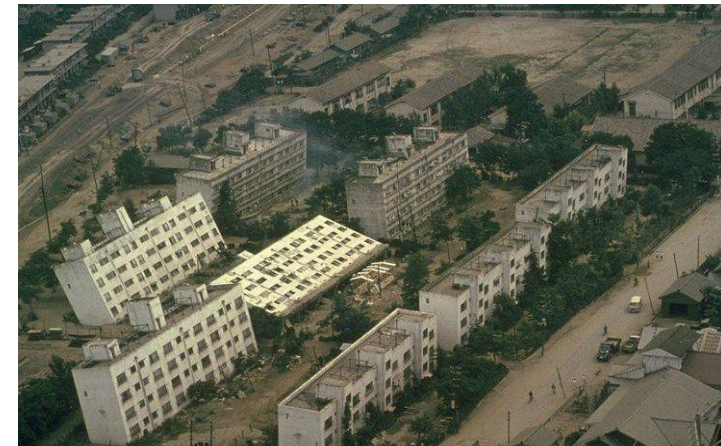
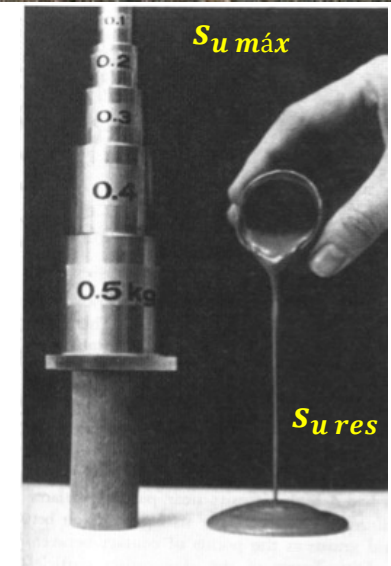
- poseen una componente de la resistencia que se pierde con el progreso de la deformación

Suelos sensitivos ($S = \frac{S_{u \text{ máx}}}{S_{u \text{ res}}}$)

- reducen su resistencia con el progreso de la deformación

Suelos licuables ($\tau \rightarrow 0$)

- exhiben rigidez y resistencia (casi) nulas cuando se los somete a carga rápida

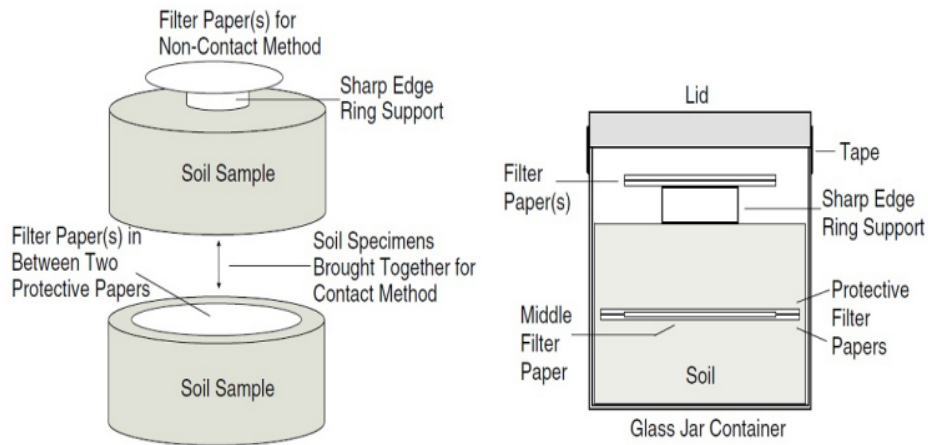


Medición de succión (matricial y total)



Papel filtro calibrado

- 7 días de equilibrio higrotérmico



Calibración papel filtro



Preparación ensayo



Predicción del cambio de volumen en función de la succión mátrica

- Índice de compresión de presión neta en descarga C_{ts}
- Índice de compresión de succión en descarga C_{ms}

$$\Delta e = C_{ms} \cdot \Delta \log[u_a - u_w] + C_{ts} \cdot \Delta \log[\sigma - u_a]$$

- Se debe medir la succión del suelo in situ
- Se debe estimar la succión del suelo a largo plazo
- Se deben medir los índices de compresión del suelo

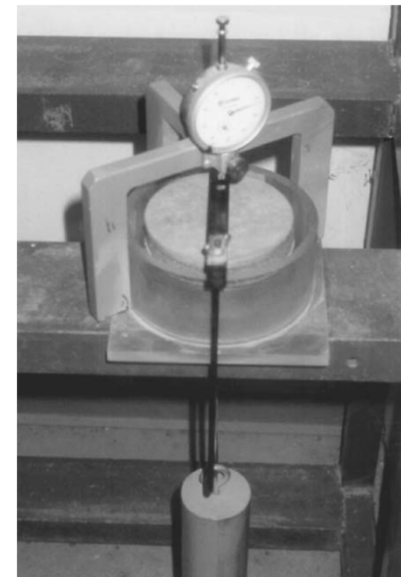
Caracterización de expansividad: expansión libre en edómetro (*EI*)



Mide el potencial de hinchamiento que experimenta una muestra parcialmente saturada por hidratación, bajo una sobrecarga de 6kPa



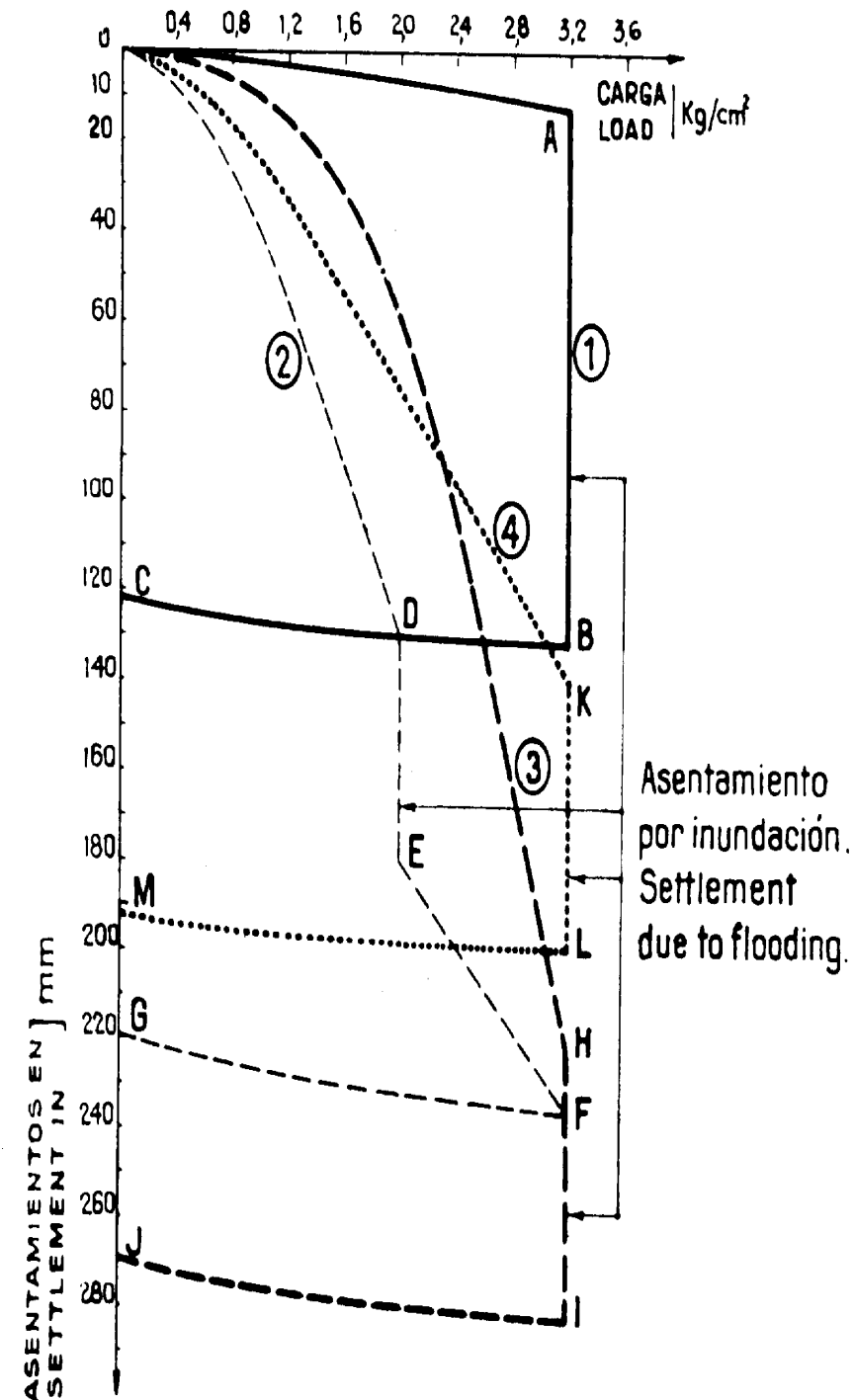
Preparación muestra



Ensayo

Otro ensayo de campo (carga-desplazamiento)

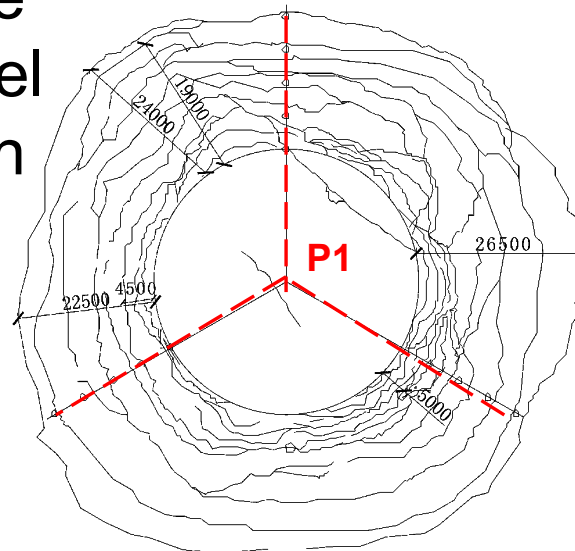
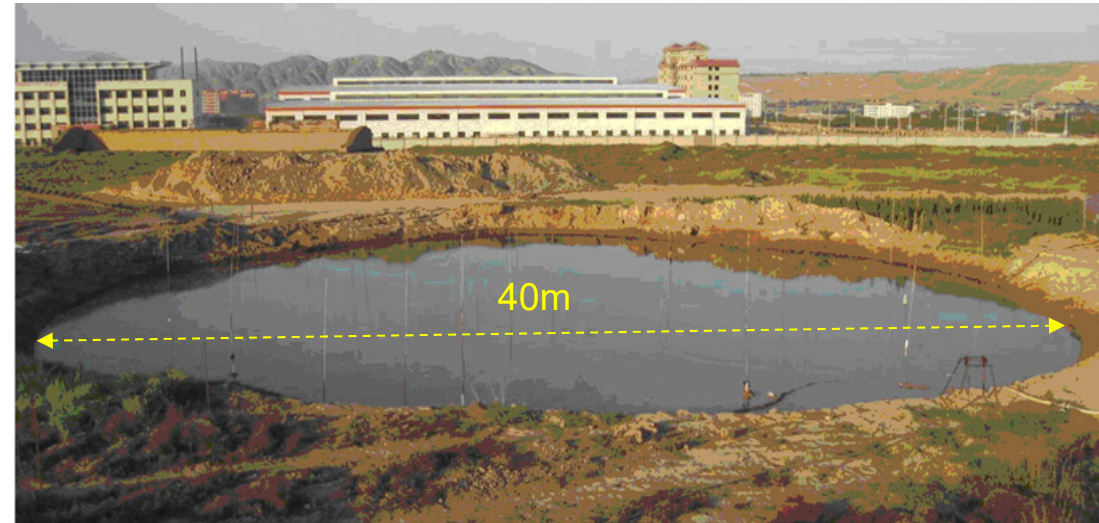
- Ensayo 1 (mayor rigidez inicial)
 - carga
 - inundación
- Ensayo 2, 3 y 4 (menor rigidez)
 - inundación
 - carga
 - inundación
- Asentamientos finales
 - Colapso (B) / no colapso (A) > 7
 - distintos colapsos (L-F-I): 1.4



Ensayo a gran escala (Lanzhou, China)



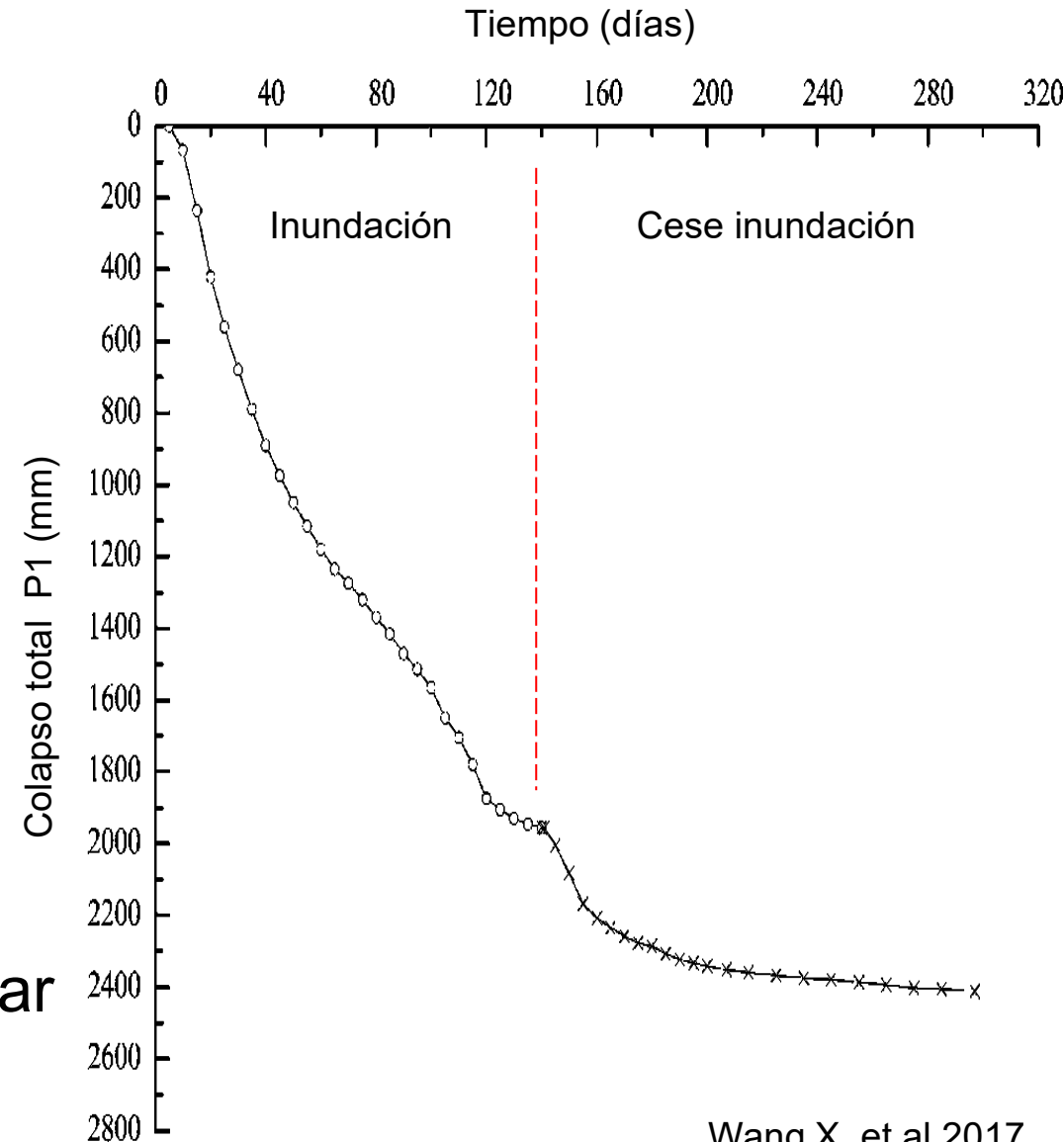
- Depósito natural suelos loessicos del cuaternario
- Espesor de 37m de suelos autocolapsibles
- 297 días de ensayo, de los cuales 140 días se correspondieron con el período de inundación
- 3 ejes de control de desplazamientos verticales (centro en P1)



Ensayo a gran escala (Lanzhou, China)



- 2.4m de colapso total P1 con tasa de cambio no uniforme
- El “anillo de agrietamiento” tuvo un espesor promedio de 25m
- El cambio de humedad no es uniforme en profundidad (mayor en primeros 20-25m)
- Subsistencia del terreno baja por debajo de los 20m (dato relevante en caso de proyectar – diseñar una estructura)

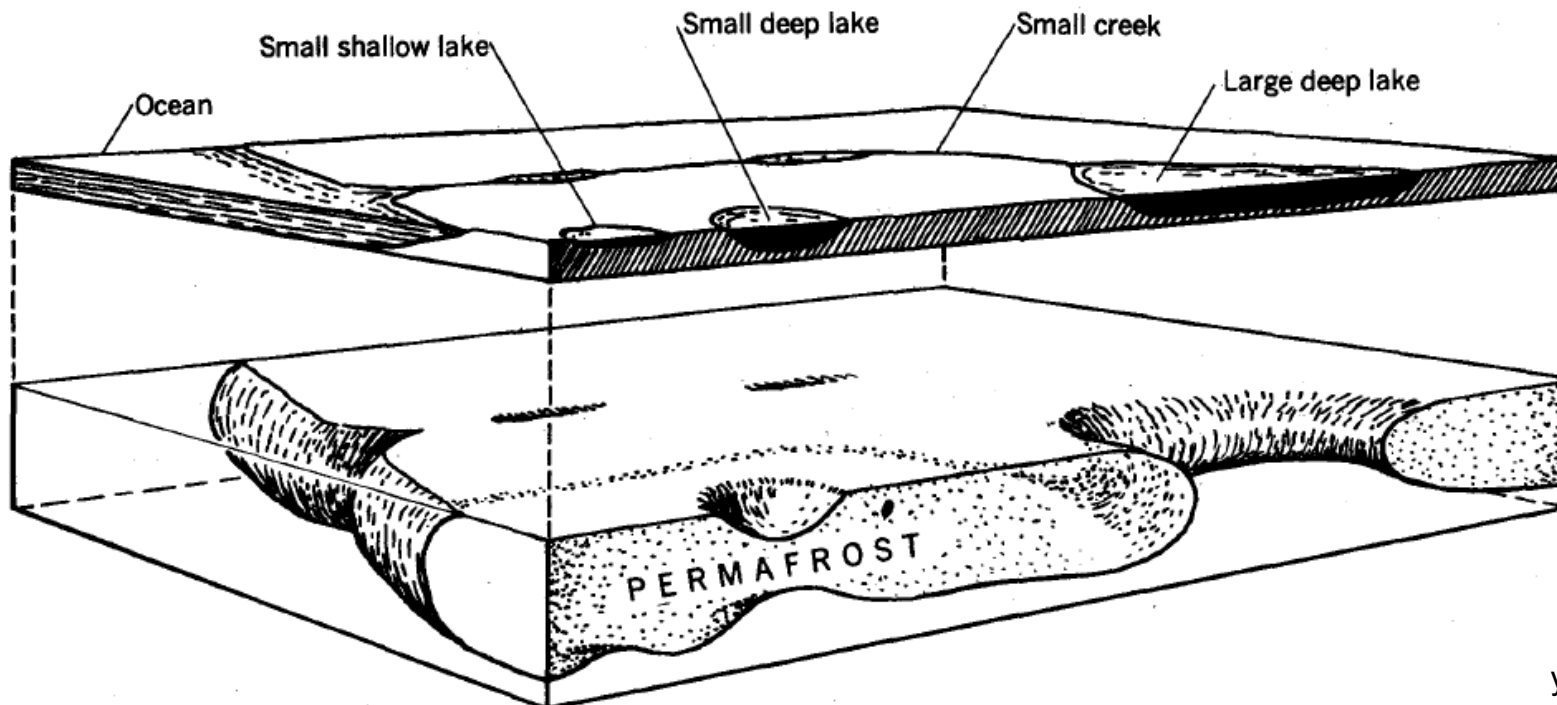


Wang X. et al 2017

Efecto de cuerpos de agua en suelos crióticos



Los cuerpos de agua son grandes reservorios de calor que establecen un equilibrio dinámico con el Permafrost

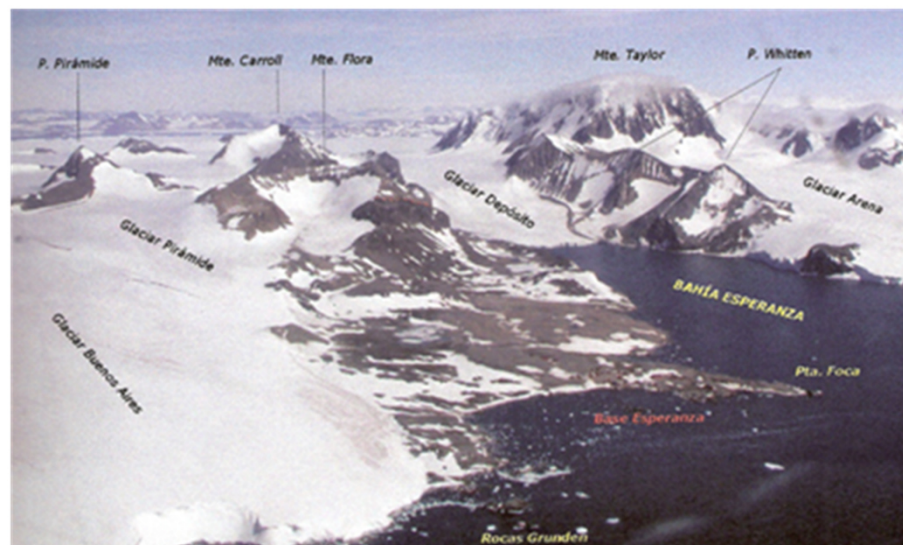
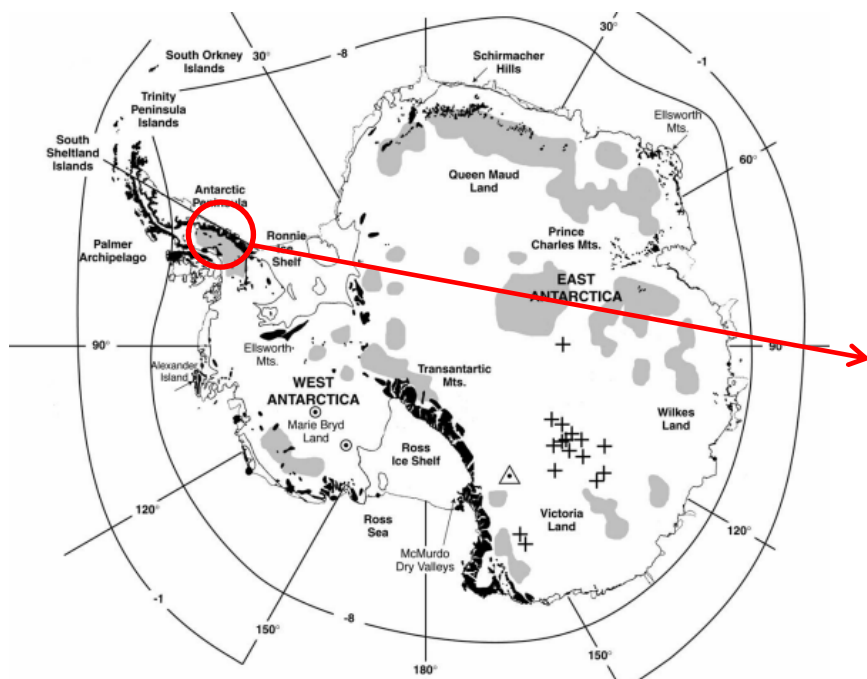


(Andersland
y Ladanyi 2004)

El problema del lago Boeckella en la Base Esperanza (Tesis F. Arroyo)



- Temperatura media anual: $268^{\circ}\text{K} = -5^{\circ}\text{C}$
- Temperatura media del suelo: $270^{\circ}\text{K} = -3^{\circ}\text{C}$
- Toma agua del Lago Boeckella (prof. 4m)



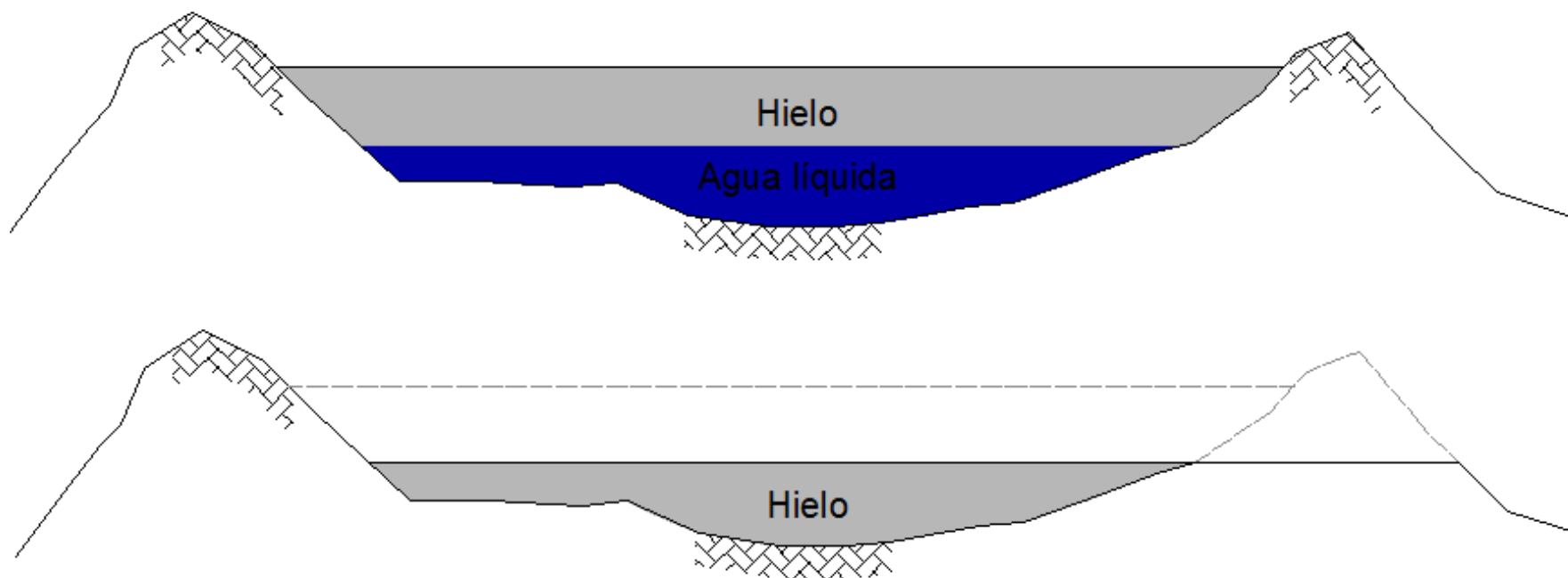
(J. G. Bockheim 2004)

Falla de costa Lago Boeckella



Enero 2002

- Colapso de 32m. de la cuenca natural
- Disminución brusca del nivel del lago
- Desabastecimiento de agua potable



Falla de costa Lago Boeckella



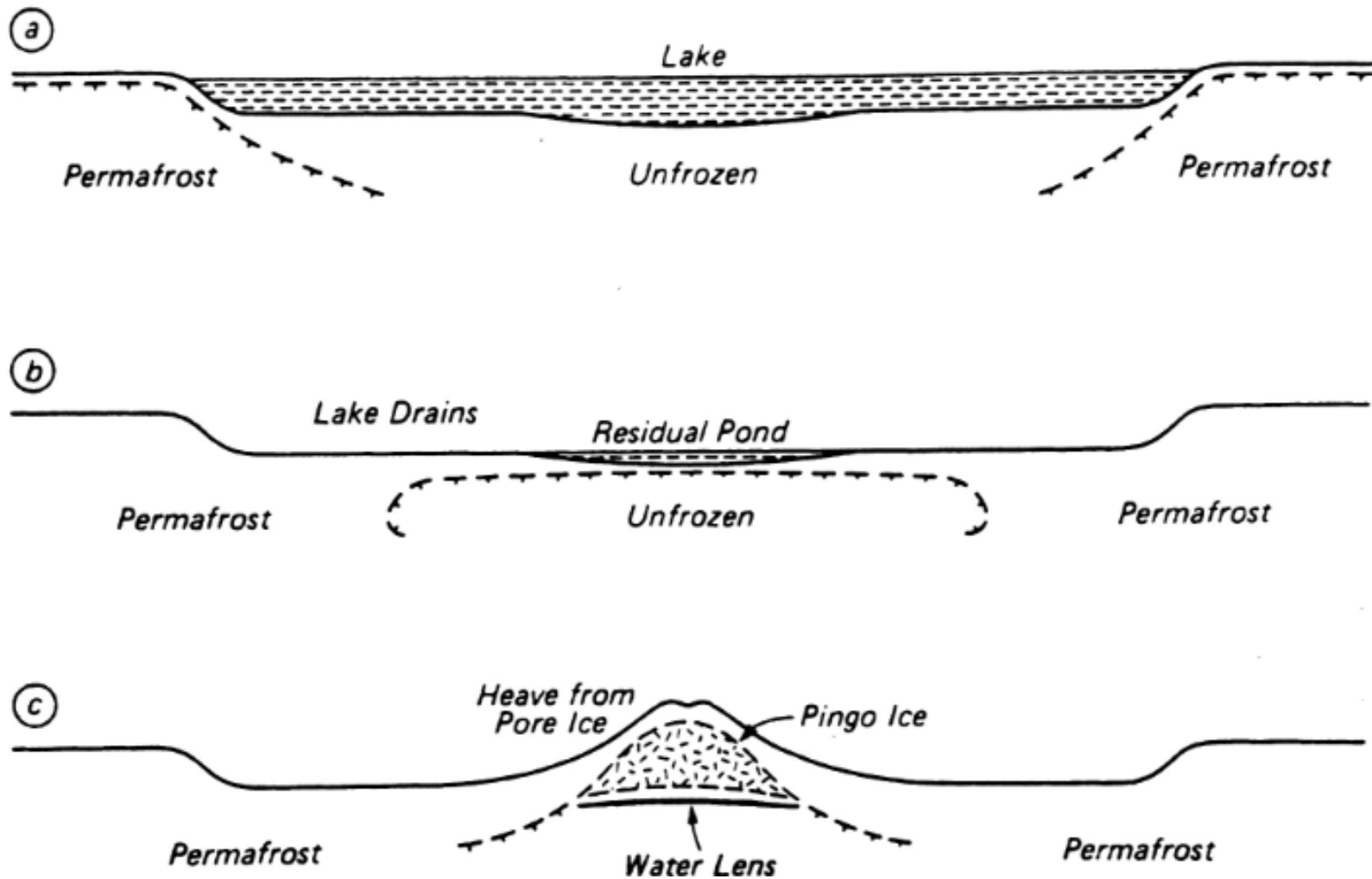
Enero 2002

- Colapso de 32m. de la cuenca natural
- Disminución brusca del nivel del lago
- Formación de un domo de congelamiento (Pingo)



(Fotografía Base Esperanza)

Falla de costa Lago Boeckella



(Washburn y Mackay)

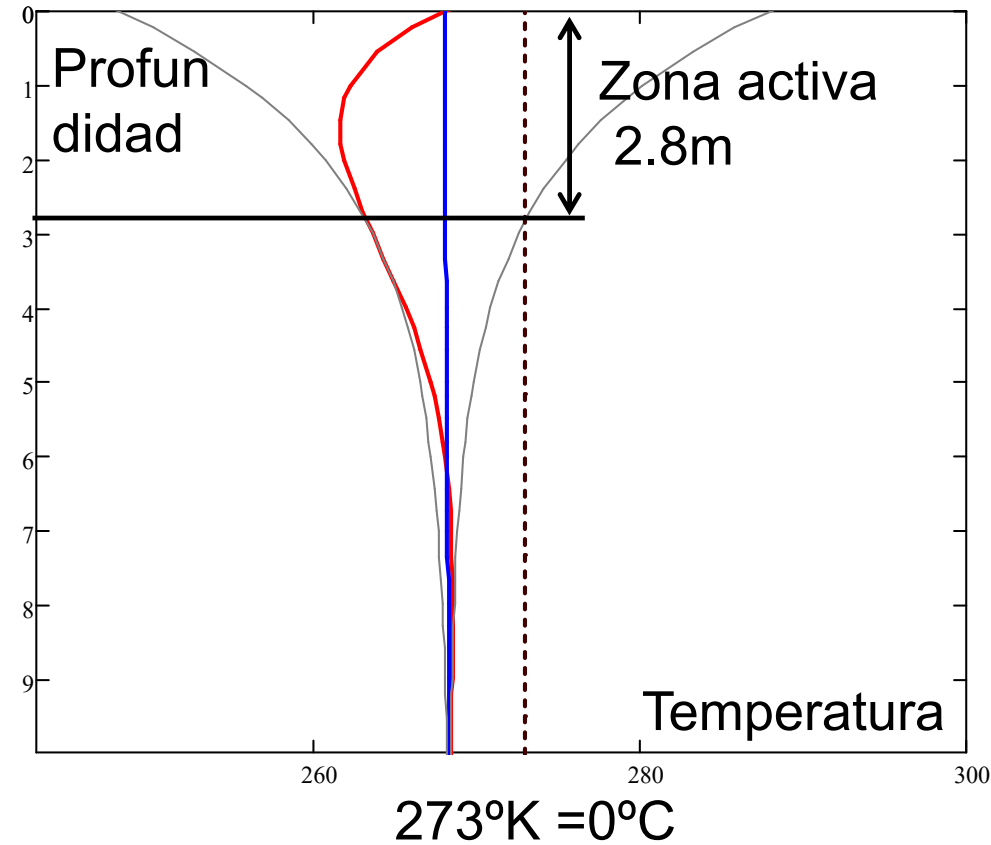
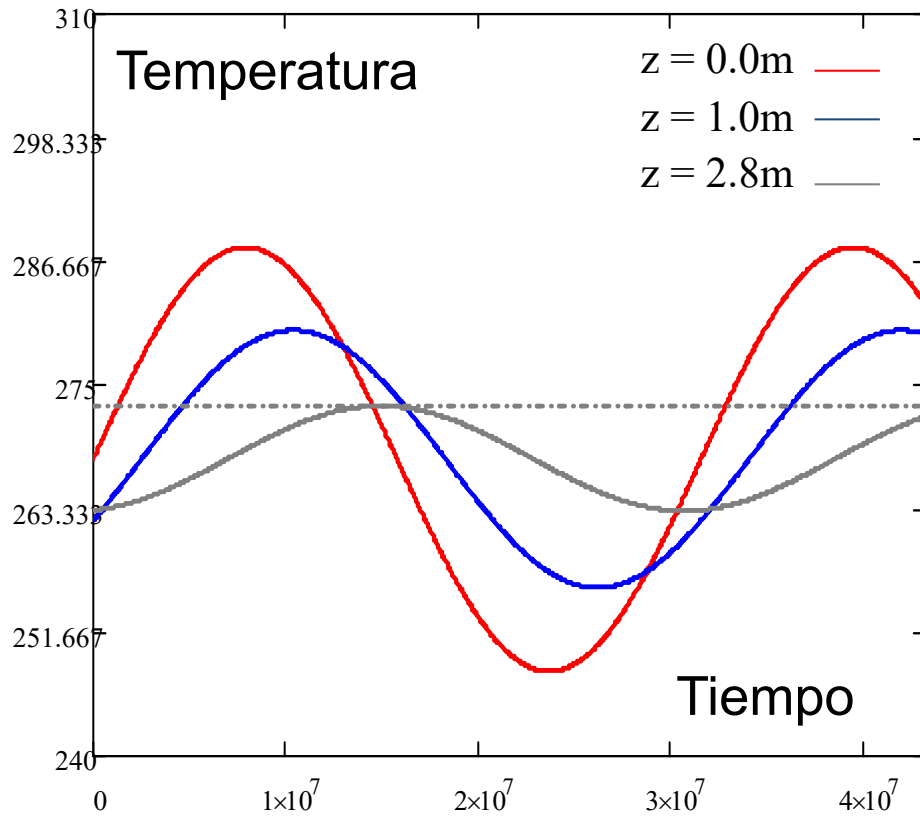
Solución: dique + termosifones



- Se relleno el sector con áridos (continentales)
- Se construyó un dique de hormigón
- Se colocaron termosifones para congelar los áridos y evitar filtraciones



Trumpet curve en el Lago Boeckella



Termosifones en dique Boeckella



El calor de extracción requerido depende del escenario

- Sin flujo de agua pasante (difusión)
- Con flujo de agua pasante (convección)
- Con una geomembrana temporaria (flujo controlado)

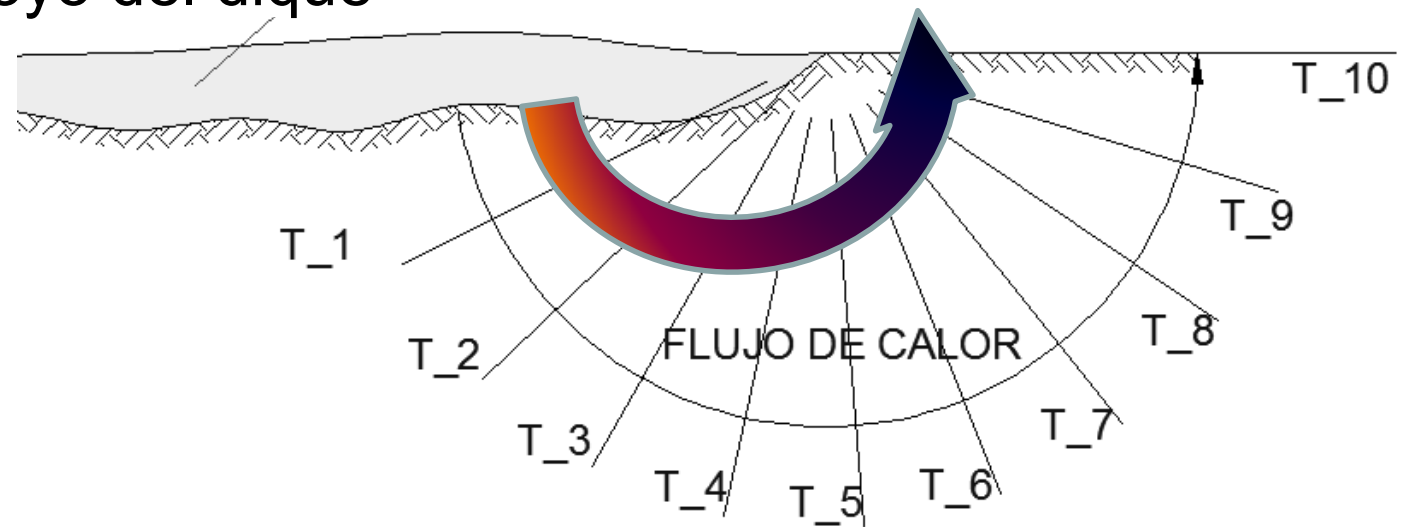
Escenario	Capacidad de congelamiento ($Q_t - Q_{min}$ (BTU/m))	Tiempo de congelamiento
Sin flujo de agua	$9.26 \cdot 10^5$	Dos años
Brecha de agua abierta	$-3.18 \cdot 10^6$	Degradación de Permafrost
Geomembrana con fallas	$9.00 \cdot 10^5$	Dos años

Patología remanente



Si no se instala una geomembrana (de acción temporaria), el transporte advectivo de calor es demasiado potente para que los termosifones logren el congelamiento del terreno

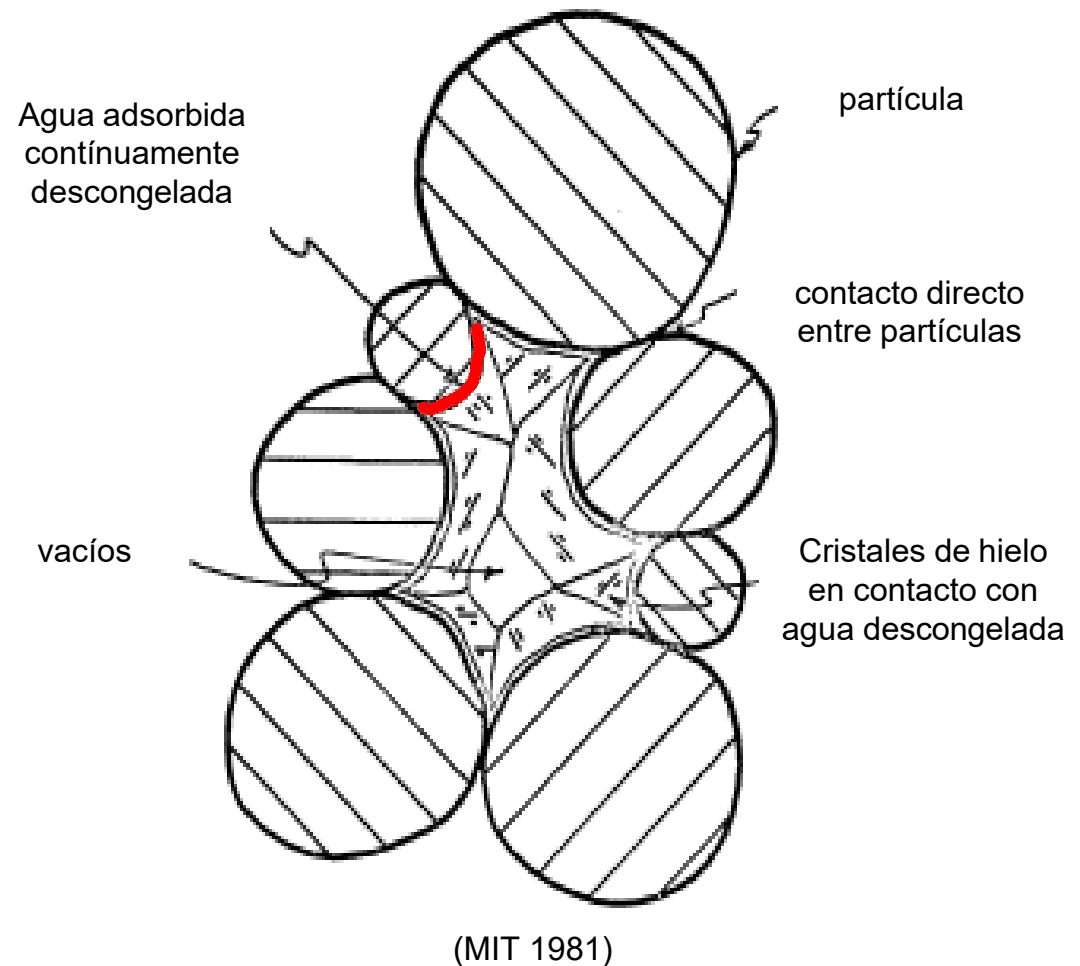
- Filtraciones
- Ampliación de la zona de Talik
- Pérdida de apoyo del dique



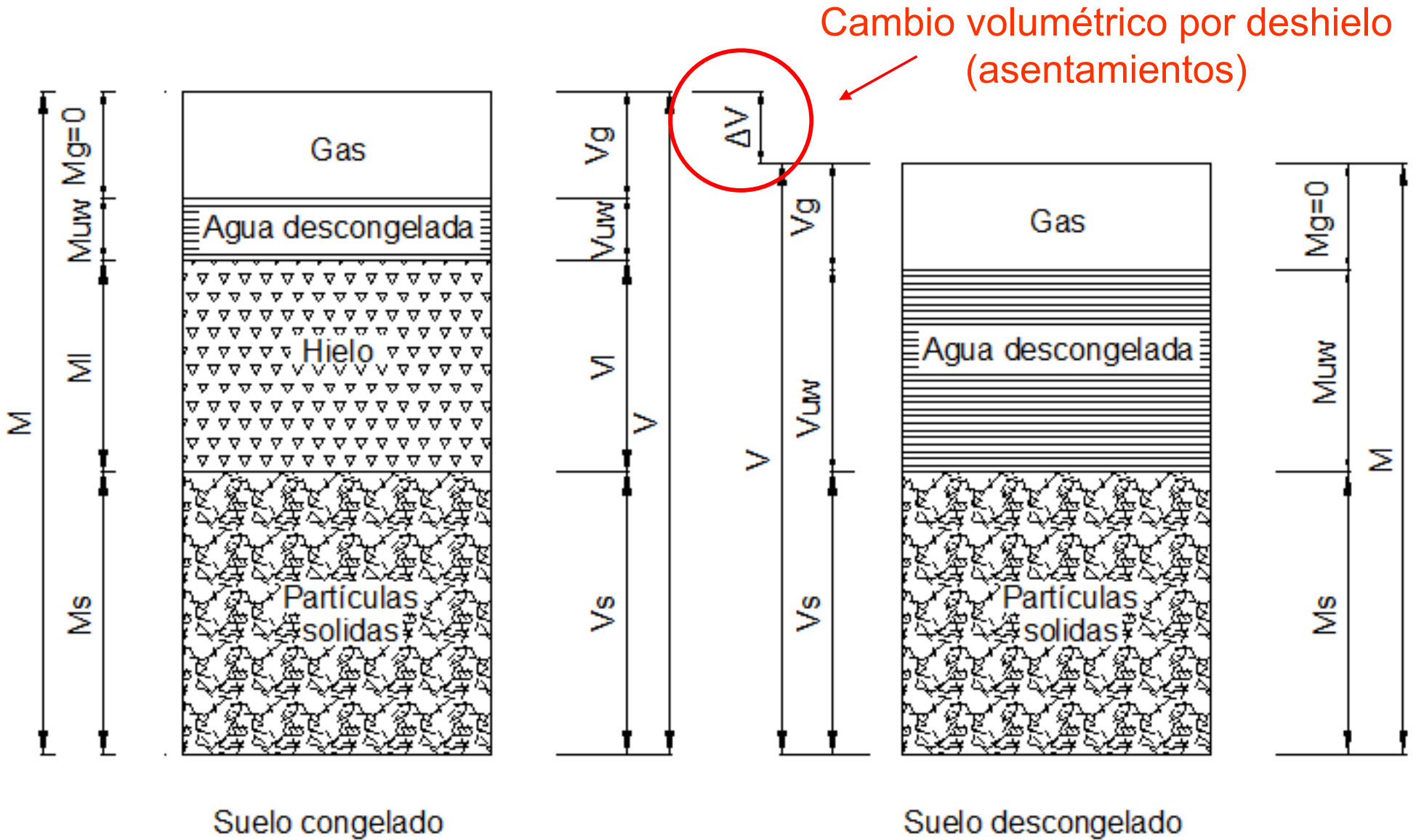
Suelos crióticos: concepto



- El agua congelada es parte del volumen de sólidos
- Algunas partículas tienen contacto directo
- Otras están cementadas por el hielo
- En los bordes de grano el agua permanece en estado líquido
- Fenómeno de expansión por formación de hielo (suelos con $\#200 > 10\%$)



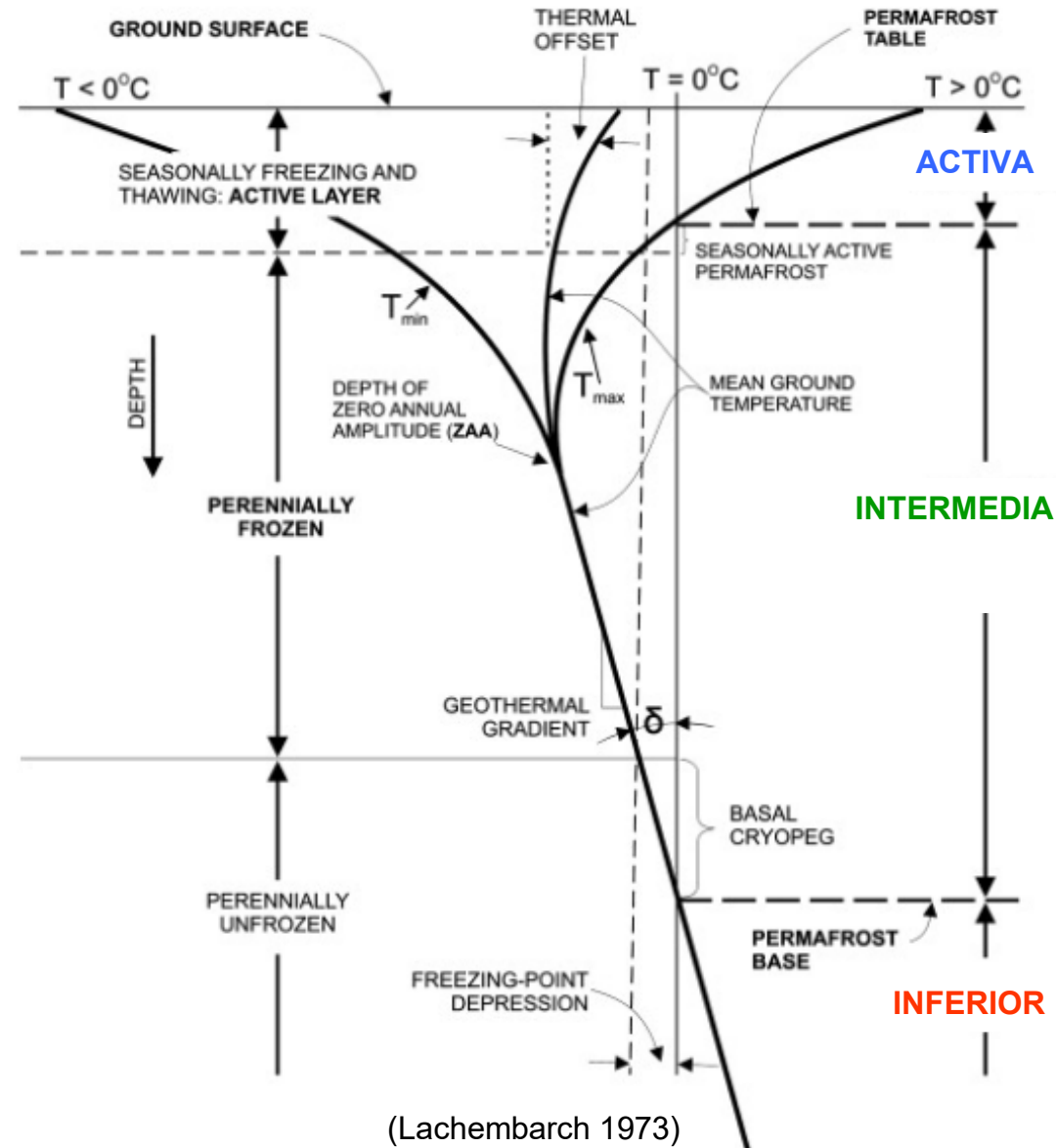
Suelos crióticos: diagrama de fases



Suelos crióticos: perfil térmico (Trumpet curve)



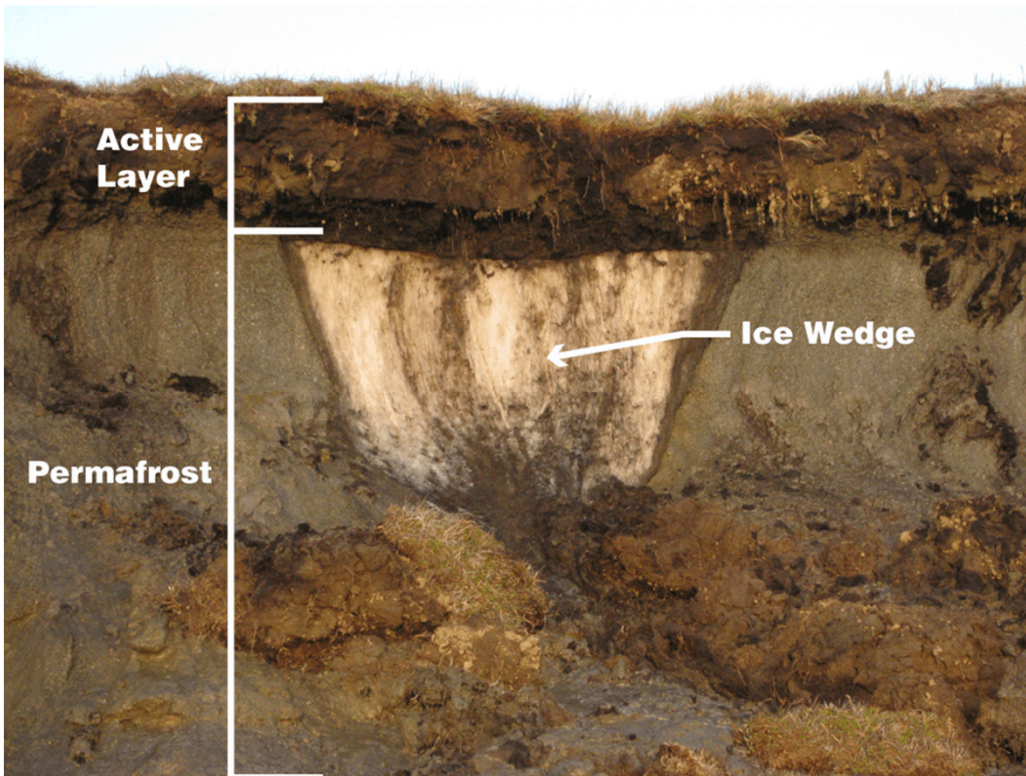
- Zona superior **activa**:
 - Congelamiento y deshielo estacional
- Zona **intermedia**:
 - Permafrost: suelo permanentemente congelado durante por lo menos un ciclo de 2 años
- Zona **inferior**:
 - Suelo no congelado



Suelos crióticos: consecuencias del deshielo



Corte transversal en suelo con permafrost



Deshielo natural



Deshielo inducido por acción antrópica

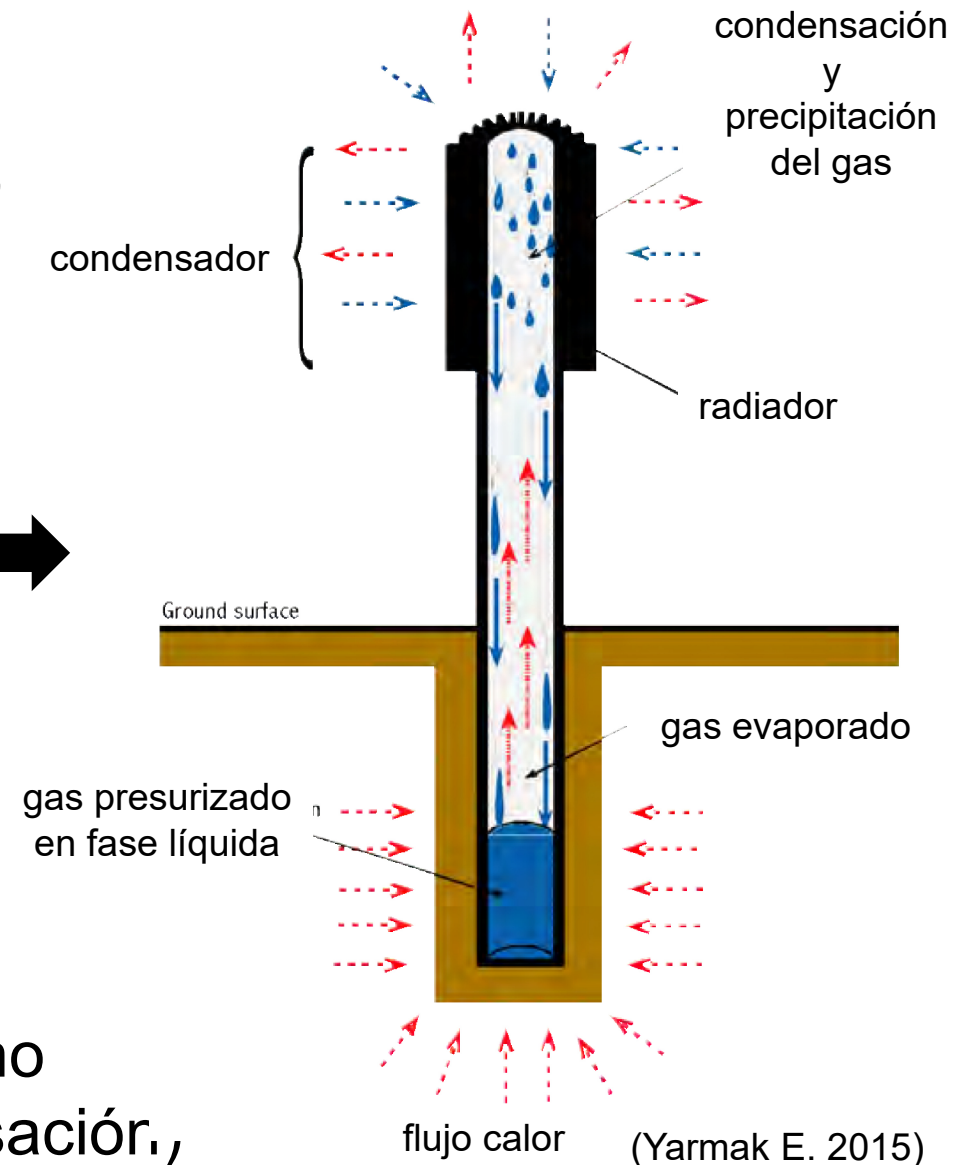


(Fuente: <https://climatekids.nasa.gov/permafrost/>)

Suelos crióticos: técnicas de remediación - tratamiento con termosifones



- Transferencia de calor al terreno para mantenerlo congelado
- Termosifón de una fase:
 - Funcionan por convección
- Termosifón dos fases:
 - Evaporación en parte inferior y condensación en parte superior
 - Gran intercambio de calor entre las partes
 - Se “bloquea” durante el verano (no hay evaporación-condensación,)



Suelos crióticos: técnicas de remediación - tratamiento con termosifones



Apoyos de tuberías (Barker J. 2013)



Fundaciones edificios (Yarmak E. 2015)



Terraplenes
ferroviarios