

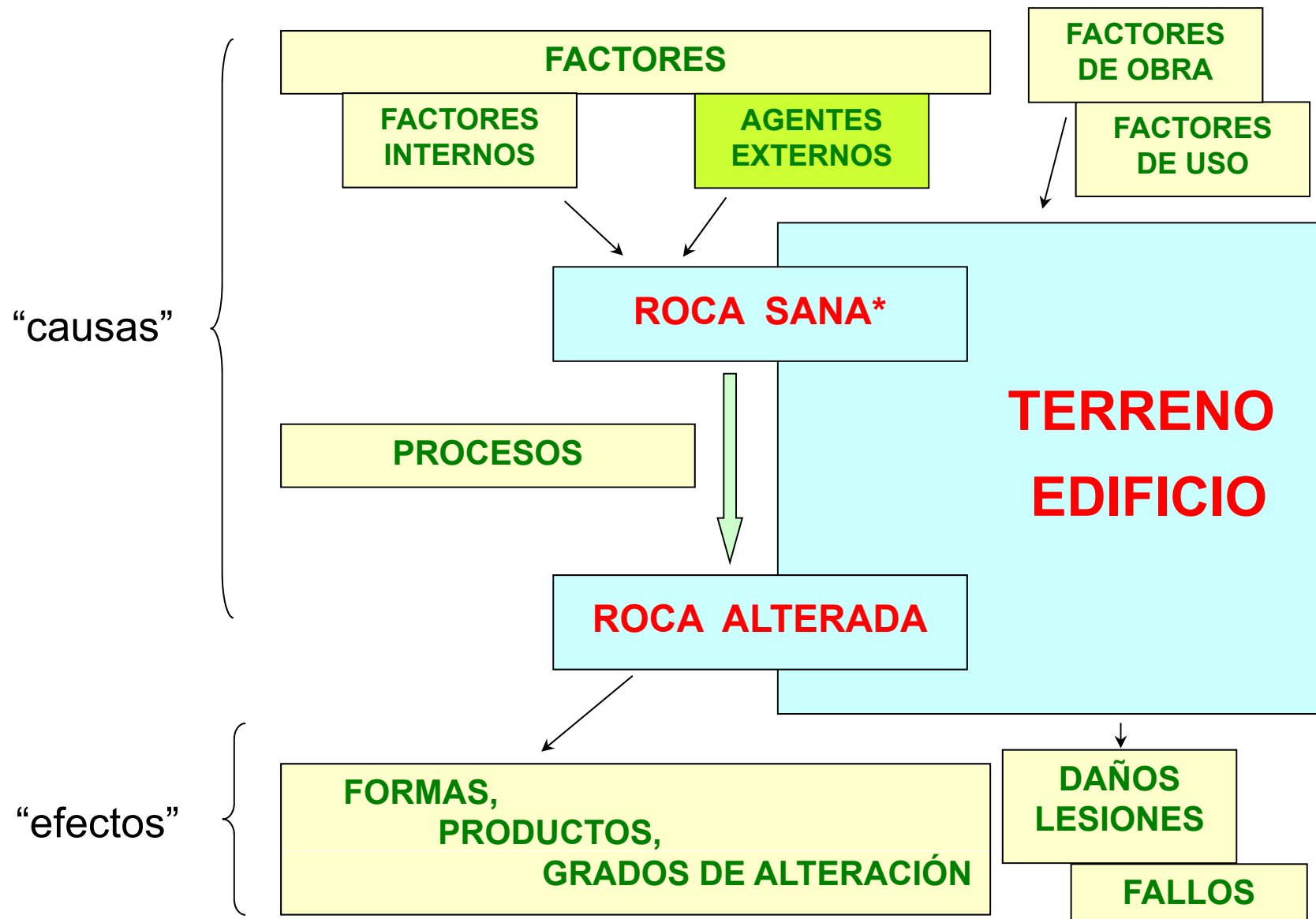
ALTERACIÓN, DURABILIDAD Y CONSERVACIÓN DE MATERIALES ROCOSOS

Tema 4. AGENTES EXTERNOS

4.1. Temperatura. Agua, humedad, hielo



ANÁLISIS DE LA ALTERACIÓN



AGENTES EXTERNOS

- ⇒ *relativos a las actuaciones del ambiente*
- ⇒ *agresiones, uso abusivo o inadecuado*
- ⇒ *activos frente a los factores internos*

■ CLIMA / MICROCLIMA

- precipitación: lluvia, nieve...
- humedad relativa
- temperatura: insolación
- presión: viento...

⇒ sufren cambios

⇒ **importan las variaciones**

■ CONTAMINACIÓN

- aire: gases, partículas, COV...
- lluvia ácida, aerosoles salinos
- suelo: sales solubles...

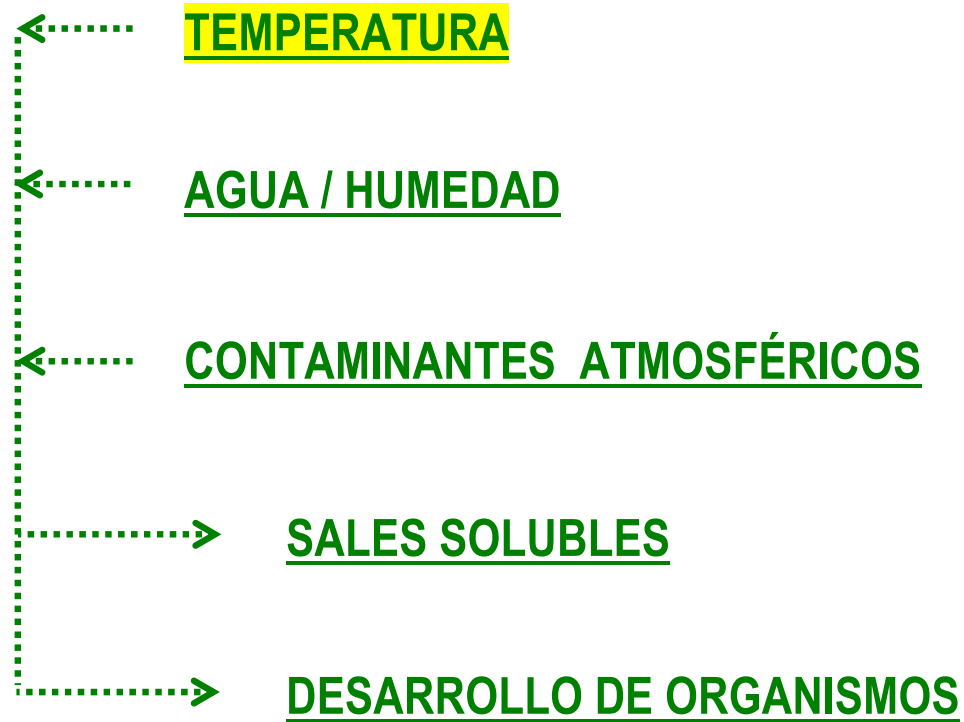
⇒ se acumulan

⇒ **importa la concentración**

■ COLONIZACIÓN BIOLÓGICA



FACTORES EXTERNOS

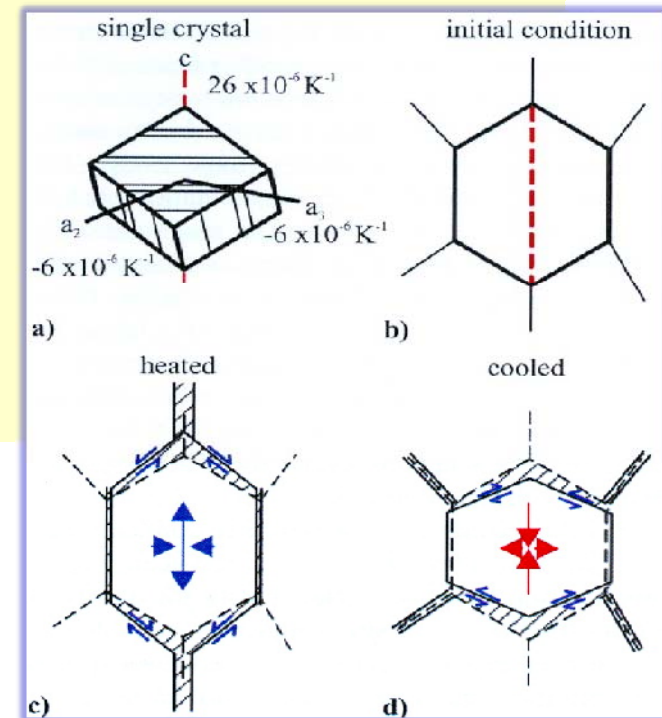


► Alonso F.J. et al. (2006). *Análisis del deterioro de los materiales pétreos de edificación*. ReCoPaR (rev. electrónica) 3, 23-32.

Temperatura

➤ Importancia de la temperatura como agente de alteración

- Pequeña, normalmente su acción está ligada a la humedad
- Procesos de expansión y contracción: $\Delta V = 15-33 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
 - función de la mineralogía $\Rightarrow \Rightarrow$
 - función de la textura: tamaño de grano, orientaciones... $\Rightarrow \Rightarrow$
- Importa el número de ciclos ($T > 0^\circ\text{C}$)
- Afecta a los mármoles:
 - calcita anómala $\Rightarrow \Rightarrow$
- Afecta a las rocas ígneas
 - minerales coloreados



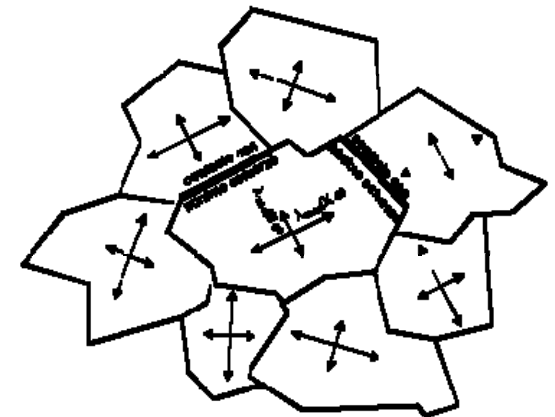
Coeficiente de expansión térmica de minerales

Temperatura

Mineral	Linear thermal expansion coefficient (K^{-1})		Temp. range ($^{\circ}C$)
	Parallel to c-axis	Perpendicular to c-axis	
Calcite ^a	$25.1 \cdot 10^{-6}$	$-5.6 \cdot 10^{-6}$	0–85
Dolomite ^b	$25.8 \cdot 10^{-6}$	$6.2 \cdot 10^{-6}$	24–700
Quartz ^a	$7.7 \cdot 10^{-6}$	$13.3 \cdot 10^{-6}$	0–80
Albite ^c	$10.5 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-6}$	25–970
Gypsum ^d	$54 \cdot 10^{-6}$	$*7-117 \cdot 10^{-6}$	$**25-42$
Micas ^e	$8.7 \cdot 10^{-6}$	$17.8 \cdot 10^{-6}$	
Clays ^f	$6 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$	25–350

Coeficiente de expansión térmica de rocas

Rock class	Rock type	Linear expansion coefficient ($10^{-6} K^{-1}$)		
		Average	Max	Min
Magmatic	8 rock types	7.4	10	5
Metamorphic	5 marbles	11	15	8
	1 gneiss, 1 schist	7.9	9	6
	2 quartzitic rocks	12.5	14	11
Sedimentary	2 calcareous sandstones	7.5	8	7
	2 limestones	4	6	2
	1 travertine	5	6	4
	5 sandstones	10.8	12	9.5

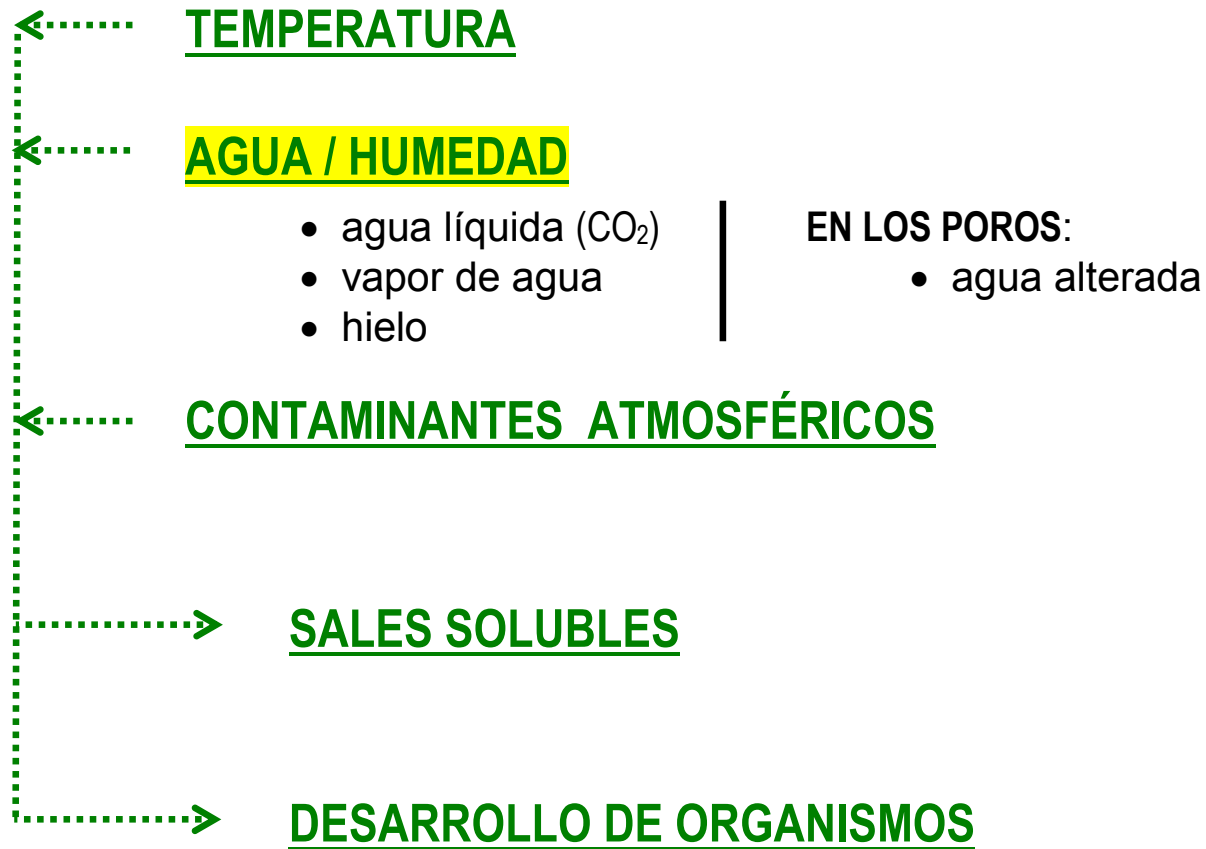


Acción del fuego:

- **Ennegrecimiento:** depósito de carbono o alquitrán derivados de la descomposición térmica de madera, algodón, lana, etc.
- **Fracturas:** por calentamiento de una superficie previamente muy fría.
- **Descomposición:** el carbonato cálcico se descompone a 550°C.
- **Oxidación:** produce cambios de color.



FACTORES EXTERNOS

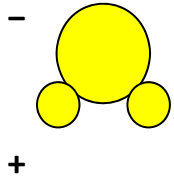


Agua - Humedad - Hielo

- **Importancia del agua como agente de alteración**
- **Propiedades químicas y físicas del agua**
- **Estado del agua en las rocas: tipos de agua**
- **Procesos de sorción y de succión**
- **Circulación del agua: transporte de humedad**
- **Origen del agua en los materiales en edificación**
- **Comportamiento hídrico de los materiales**
- **Acción del agua: procesos y daños**

Agua - Humedad - Hielo

- **Importancia del agua como agente de alteración**
 - **Principal factor de alteración: “*necesaria y suficiente*”**
 - en si misma, por su propia acción
 - como vehículo de otros agentes: hielo, sales...
 - **Distintas formas de presentarse en ambientes naturales**
 - fase líquida, vapor, sólida...
 - variaciones en composición, temperatura...
 - **Materiales pétreos son hidrófilos**
 - **Asociada a los otros agentes externos**
 - depósito húmedo de contaminantes
 - circulación de sales solubles
 - desarrollo de vegetación



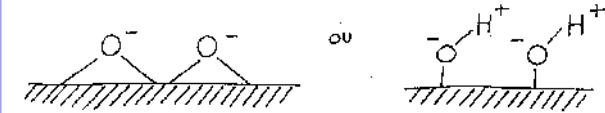
Agua - Humedad - Hielo

➤ Propiedades químicas del agua

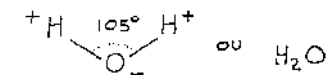
⇒ características de las moléculas

- **Disolvente universal**
→ de compuestos polares: sales
- **Gran estabilidad de las moléculas**
→ a presión y temperatura ambiente
- **Reactivo químico muy activo:**
 - propiedades oxidantes y reductoras
 - propiedades de ácido y de base (anfótera)
- **Puede fijarse a los sólidos**
→ agua alterada: distintas propiedades

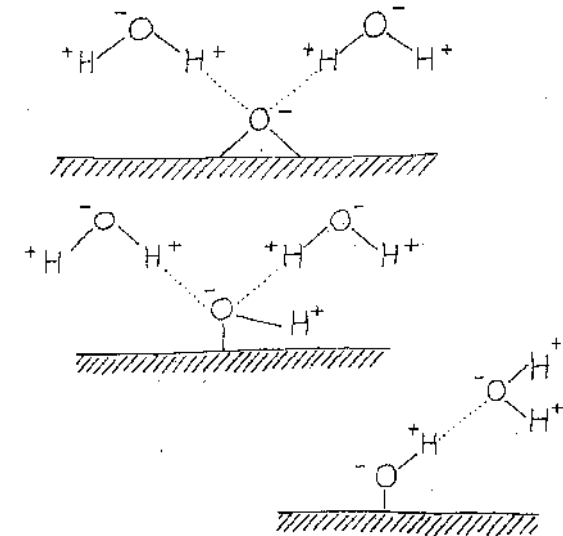
FIGURE 2. LA SURFACE HYDROPHILE.



LA MOLECULE D'EAU



ATTRACTION DE L'EAU PAR UNE SURFACE HYDROPHILE

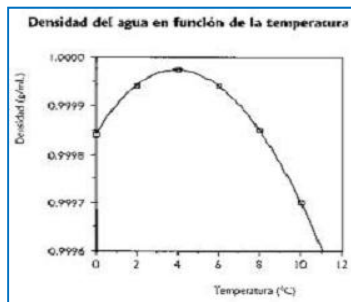


► Torraca G. (1986). *Materiaux de construction poreux*. ICCROM, Roma, 148 p.

Agua - Humedad - Hielo

➤ Propiedades físicas del agua

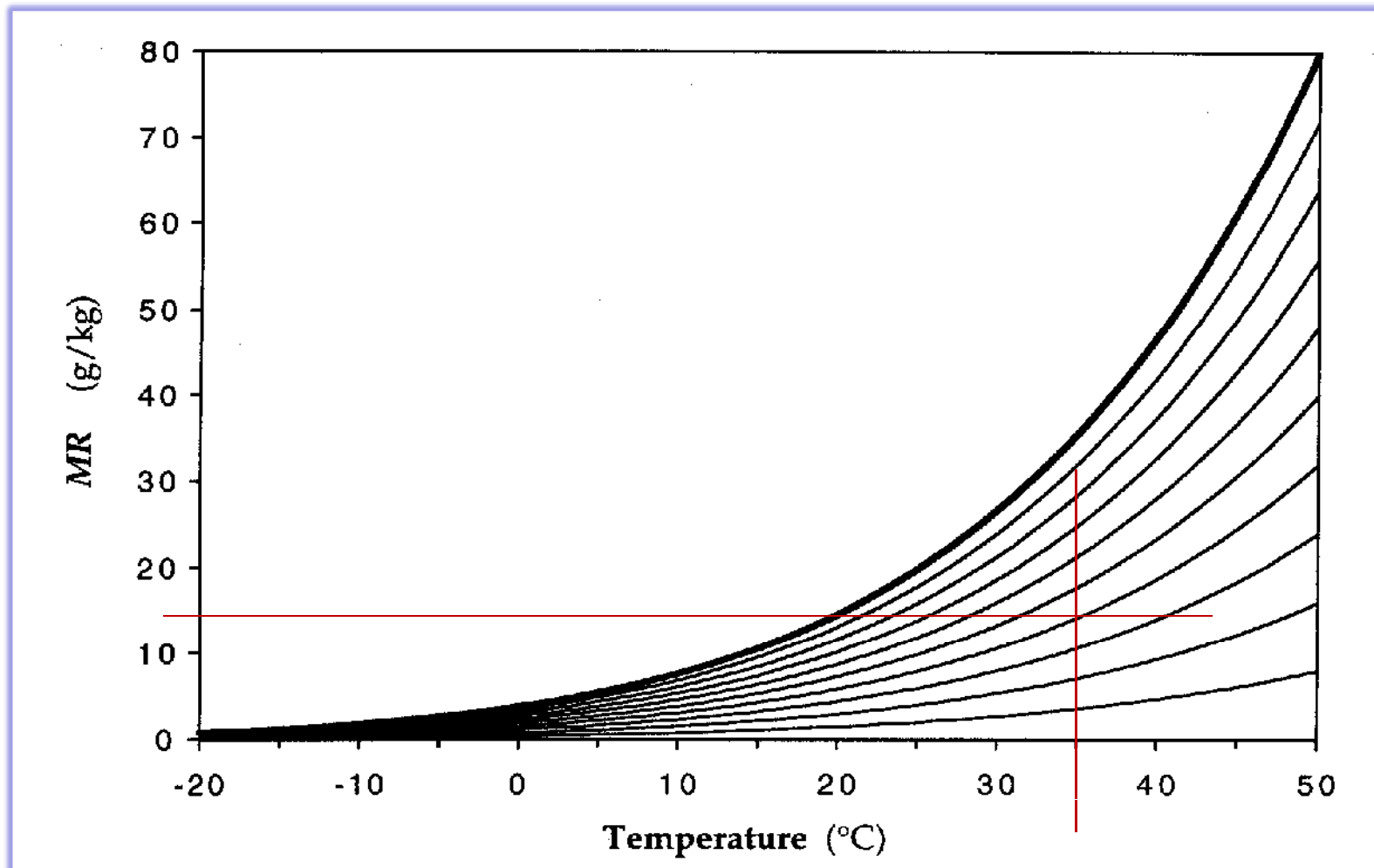
- Baja densidad (4°C máxima, hielo menor → anomalía) ⇒ ⇒
- Presión de vapor crece mucho con la T (evapora/condensa) ⇒
- Tensión superficial muy elevada: Fuerza capilar
- Viscosidad normal (aumenta con la P → en los poros)
- Calor específico elevado: Regula el clima
- Conductividad térmica baja (mayor en el hielo, anomalía)
- Constante dieléctrica alta: Buen aislante
- Solubilidad en agua:
 - sólidos aumenta con la T (excepción: la calcita) ⇒ ⇒
 - gases disminuye con la T (ejemplo: el CO₂) ⇒ ⇒



Propiedades físicas del agua

t °C	Density g/cm ³	C_p J/g K	Vap. pres. kPa	Visc. μPa s	Ther. cond. mW/K m	Diel. const.	Surf. ten. mN/m
0	0.99984	4.2176	0.6113	1793	561.0	87.90	75.64
10	0.99970	4.1921	1.2281	1307	580.0	83.96	74.23
20	0.99821	4.1818	2.3388	1002	598.4	80.20	72.75
30	0.99565	4.1784	4.2455	797.7	615.4	76.60	71.20
40	0.99222	4.1785	7.3814	653.2	630.5	73.17	69.60
50	0.98803	4.1806	12.344	547.0	643.5	69.88	67.94
60	0.98320	4.1843	19.932	466.5	654.3	66.73	66.24
70	0.97778	4.1895	31.176	404.0	663.1	63.73	64.47
80	0.97182	4.1963	47.373	354.4	670.0	60.86	62.67
90	0.96535	4.2050	70.117	314.5	675.3	58.12	60.82
100	0.95840	4.2159	101.325	281.8	679.1	55.51	58.91

Propiedades físicas del agua



Contenido en vapor de agua en el aire (g/kg) en función de la temperatura (°C)

Práctica 8. Humedad y temperatura en el aire

Propiedades físicas del agua

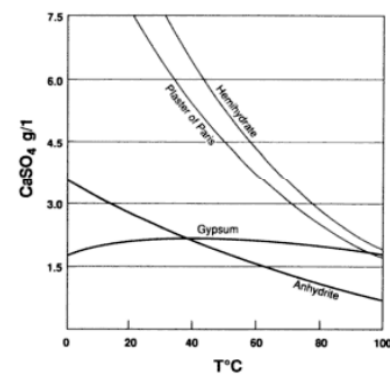
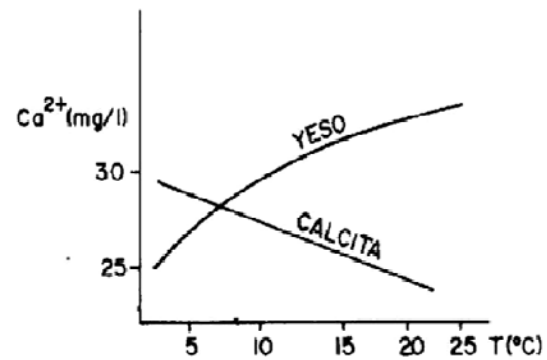
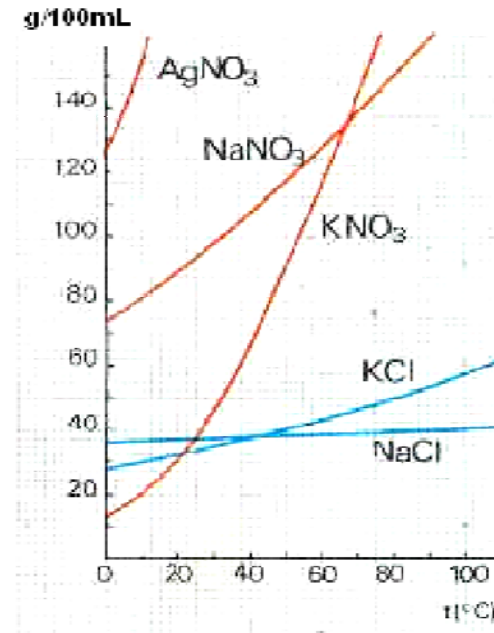
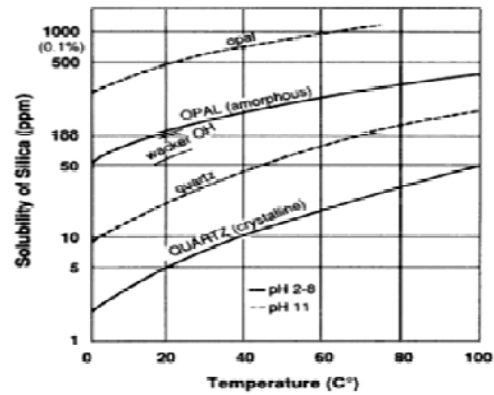
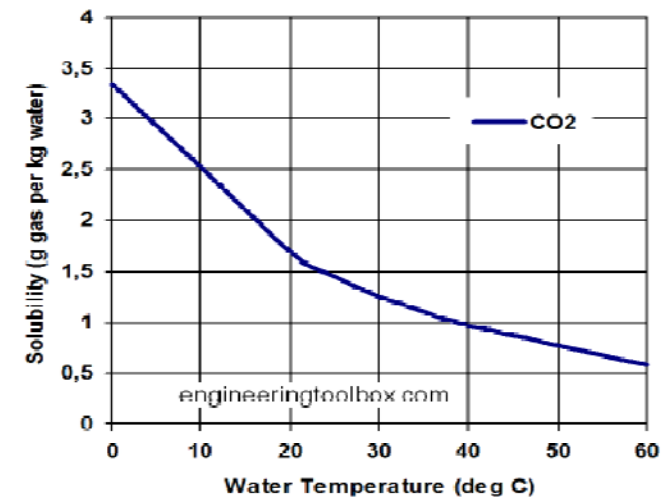


Fig. 7.4. Solubilities of the sulfates of calcium as a function of temperature. (Adapted from Braitsch 1962)



Agua - Humedad - Hielo

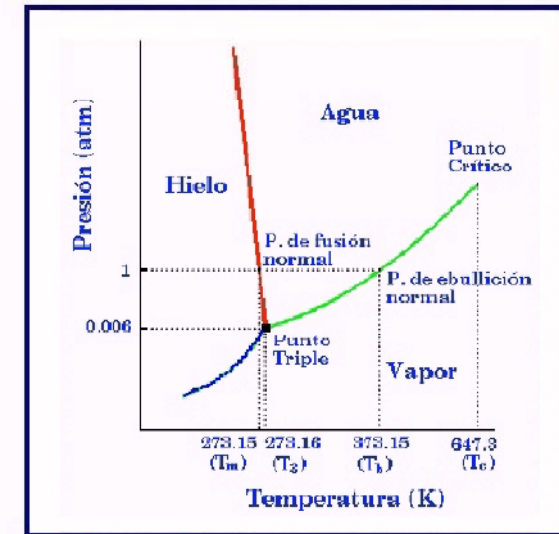
➤ Estado del agua

■ En la naturaleza: volumen libre de agua

⇒ fases, en función de P y T

- Líquida: Agua (s.e.) ↔ Humedad
- Gaseosa: Vapor de agua → Húmedad
- Sólida: Hielo (Δ volumen 9 %)

DIAGRAMA DE FASES DEL AGUA



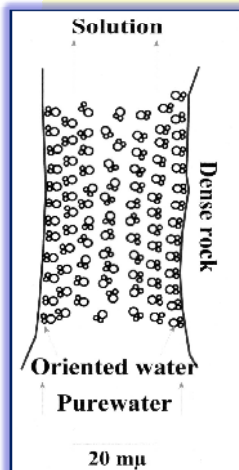
■ En las rocas: en los espacios vacíos

⇒ no tiene las mismas propiedades

- Agua líquida subenfriada (- 40°C)
- Agua líquida sobrecalentada (+ 300°C)

→ Agua alterada – ligada – ordenada ➡ **Tipos de agua**

Energía de retención ⇒ energía para su extracción



Agua - Humedad - Hielo

➤ Estado del agua en las rocas: Medios porosos

■ Medios saturados (zona freática)

- Poros llenos de agua ($w_s = 100\%$) → transporte de agua por ΔP

■ Medios no saturados (zona vadosa)

- Poros: humedad y aire ($w = 0$ a 100%) → absorción / desorción por ΔP_v
⇒ agua con distintas propiedades = comportamientos

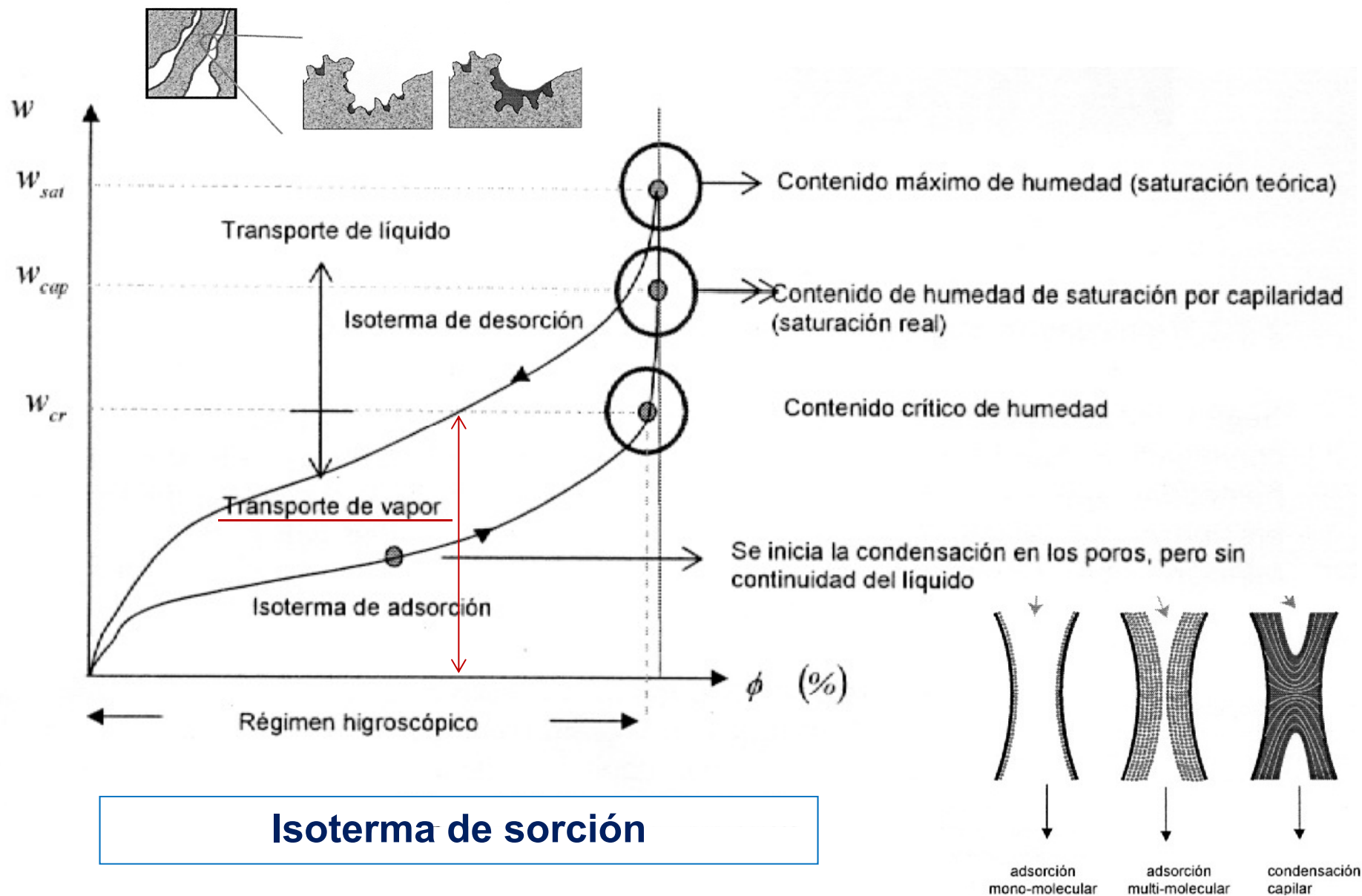
⇒ **Tipos de agua:** → *en medios no saturados*

- **Agua de constitución o cristalización**
- **Agua adsorbida** (adsorción molecular) → agua higroscópica
- **Agua capilar** | (condensada por capilaridad) → agua higroscópica
| (absorbida por capilaridad)
- **Agua libre o gravitacional**

► F.J. Alonso F.J. (2011). *El agua en los materiales rocosos*. Documento interno. Dpto. Geología, Univ. Oviedo, 12 p.

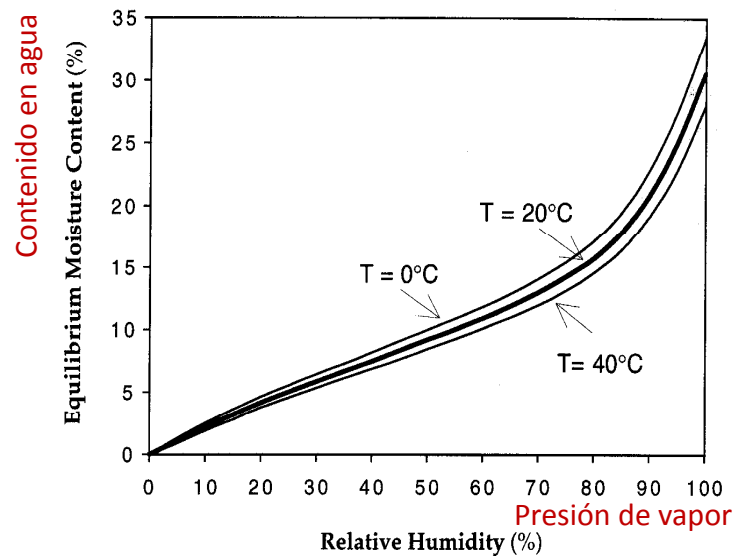


Procesos de sorción



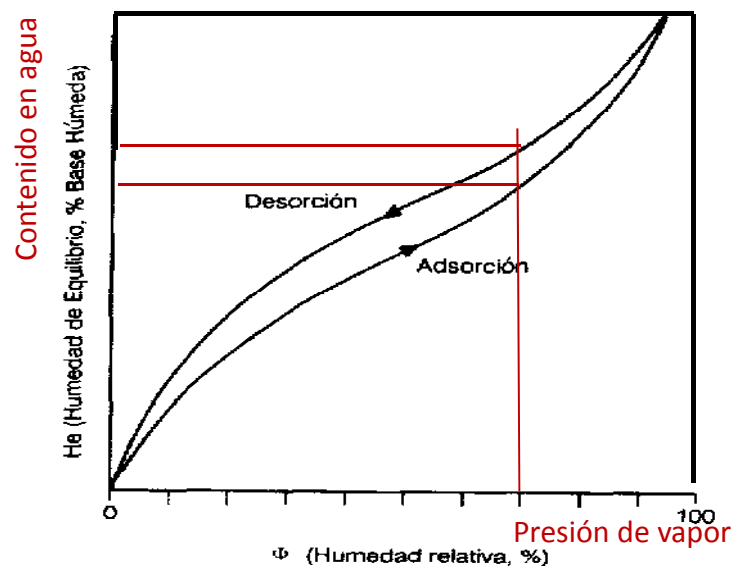
Isoterma de sorción

Procesos de sorción



← función de la temperatura

Isotermas de sorción



← fenómeno de histéresis

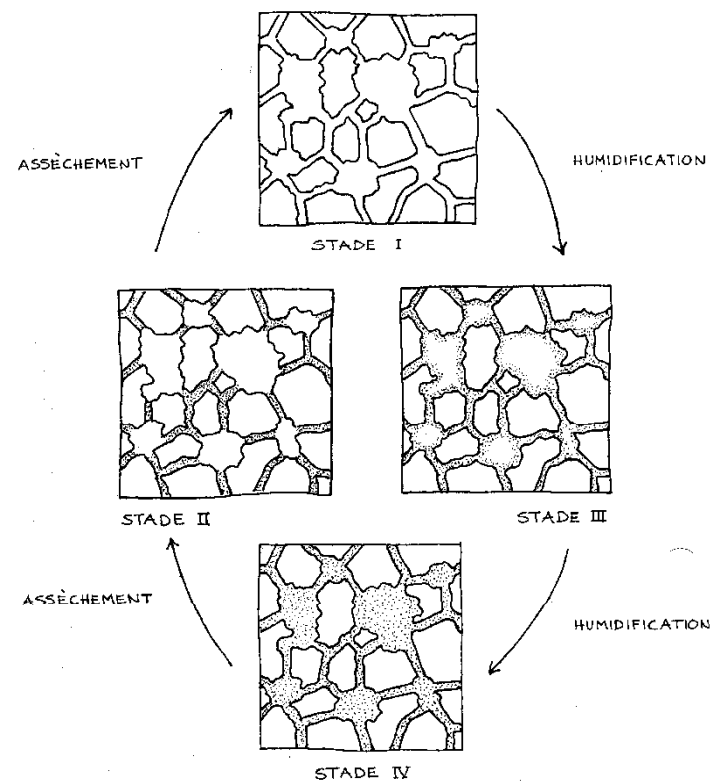


FIGURE 4. DISTRIBUTION DE L'EAU À L'INTÉRIEUR D'UN CORPS POREUX HYDROPHYLE

Procesos de sorción

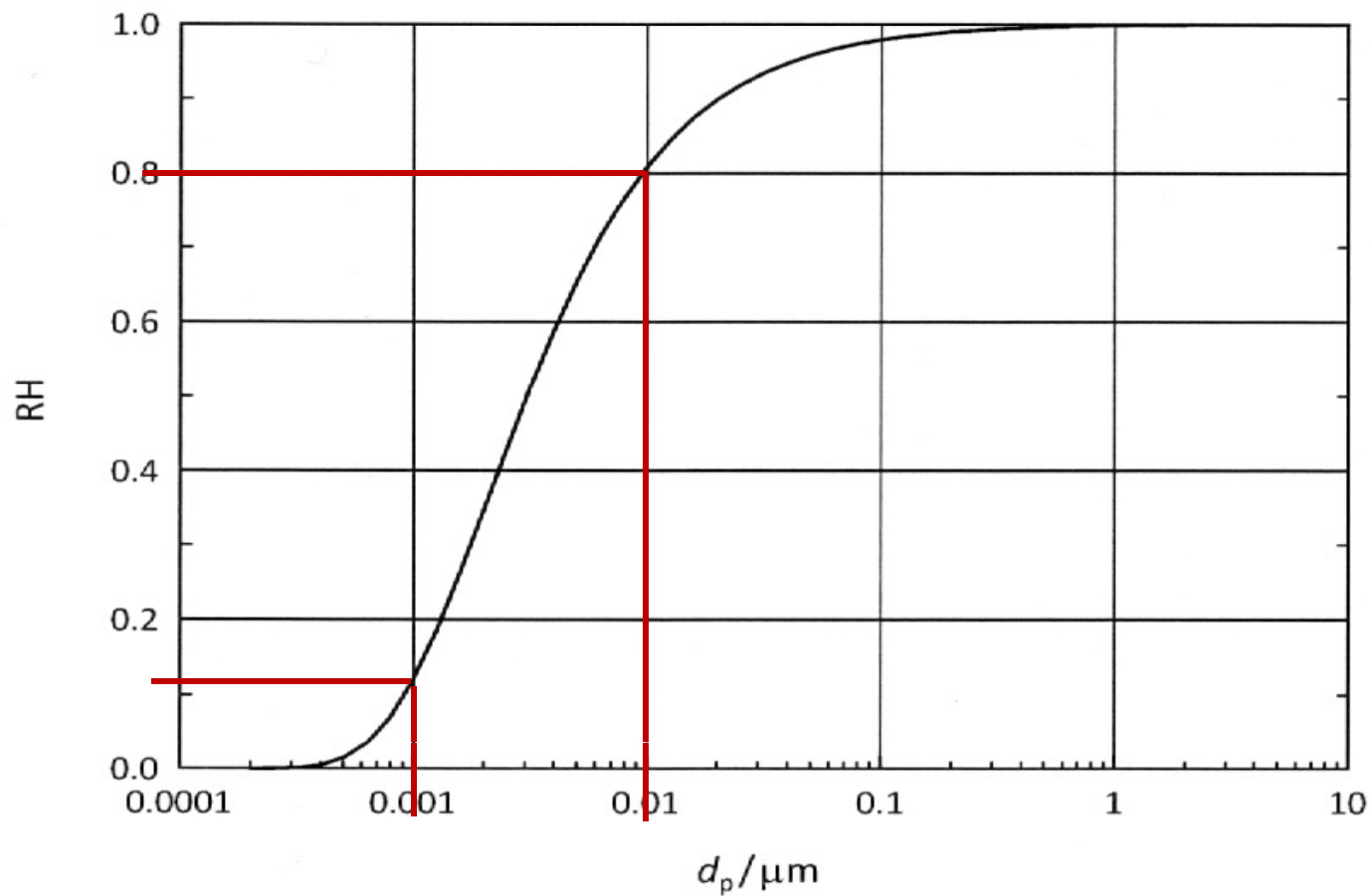
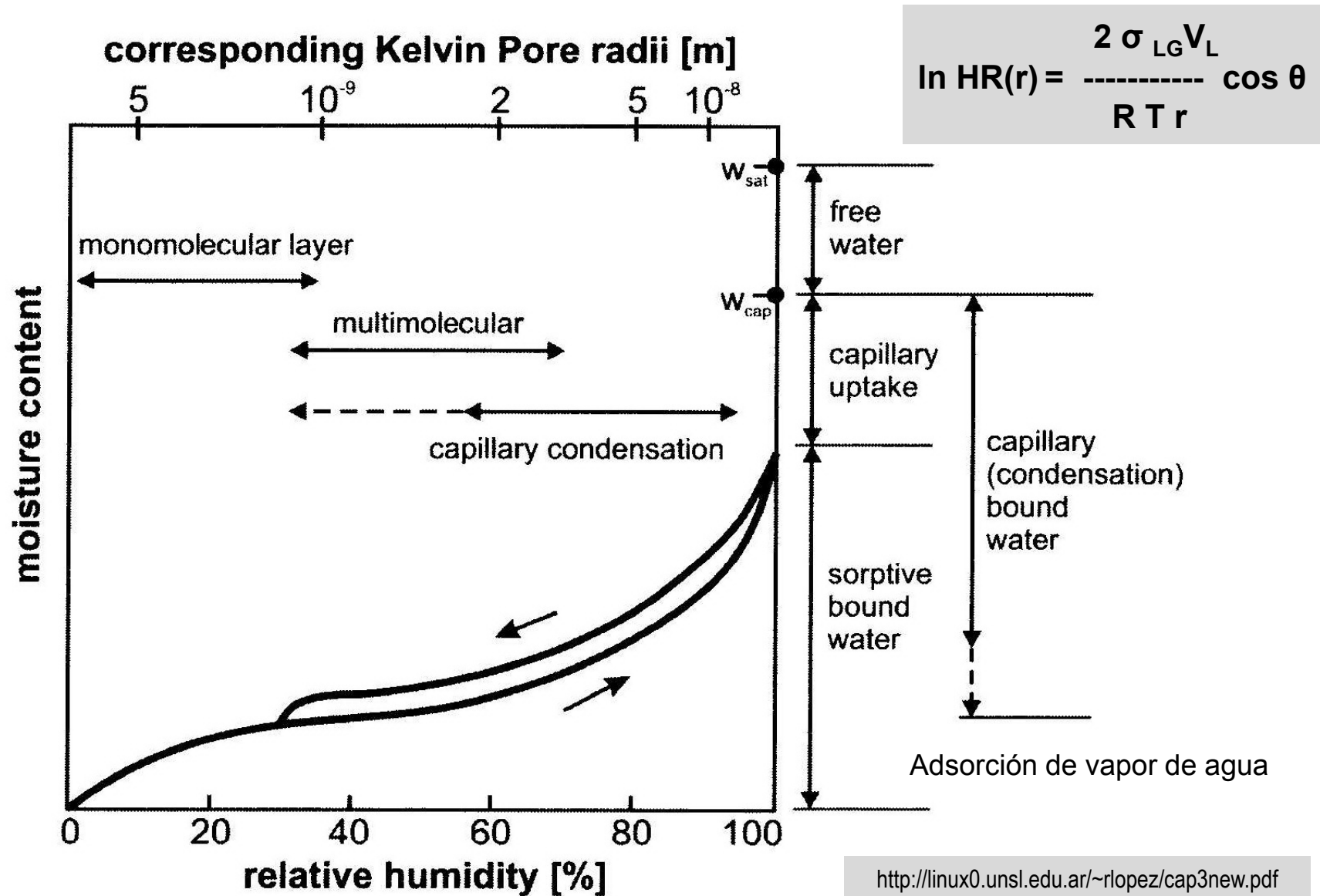


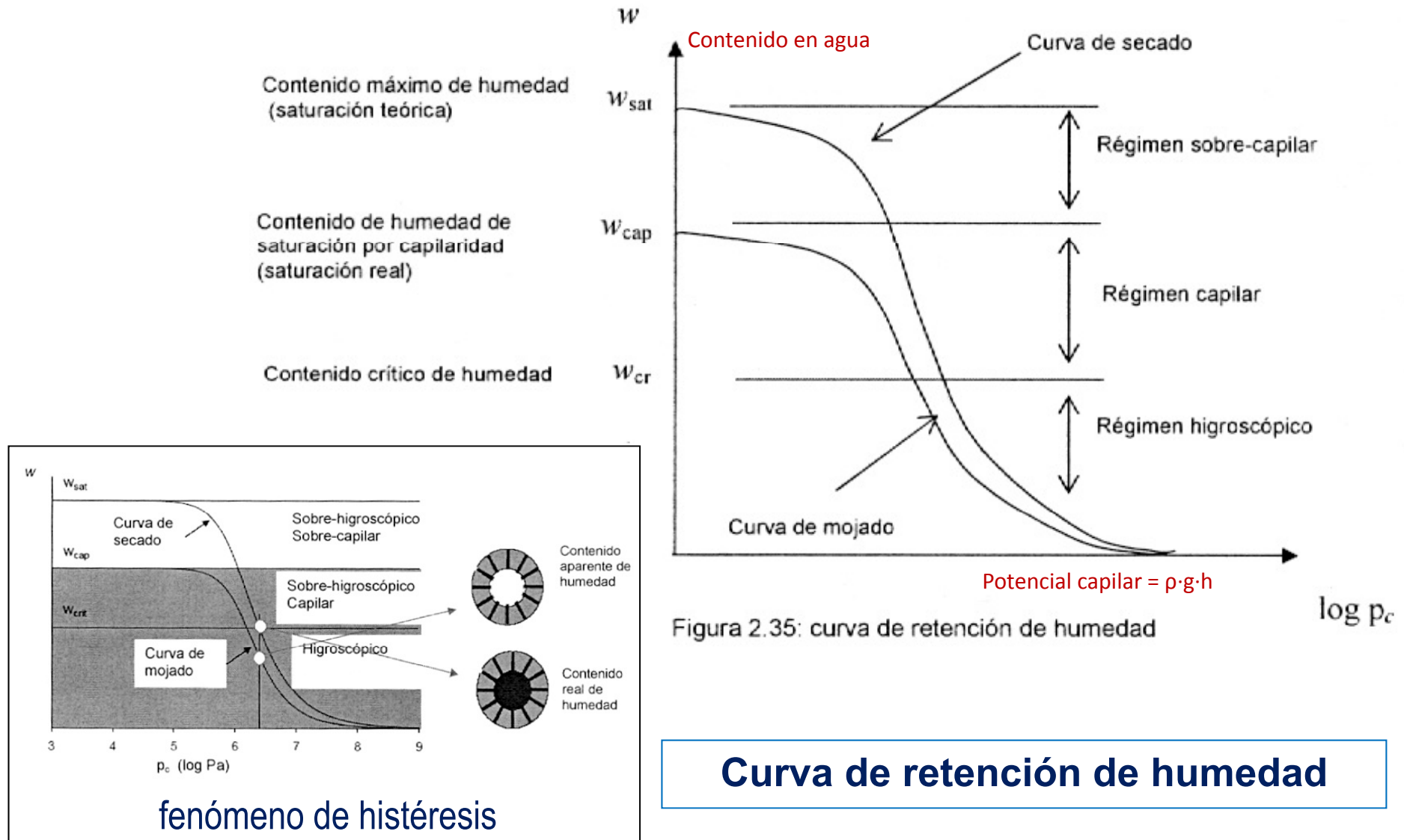
Fig. 4.4 Capillary condensation for pores with various diameters d_p as calculated with the Kelvin-Thomson equation

Práctica 8. Humedad y temperatura en el aire. Procesos de sorción y de succión

Porosimetría por sorción de vapor de agua



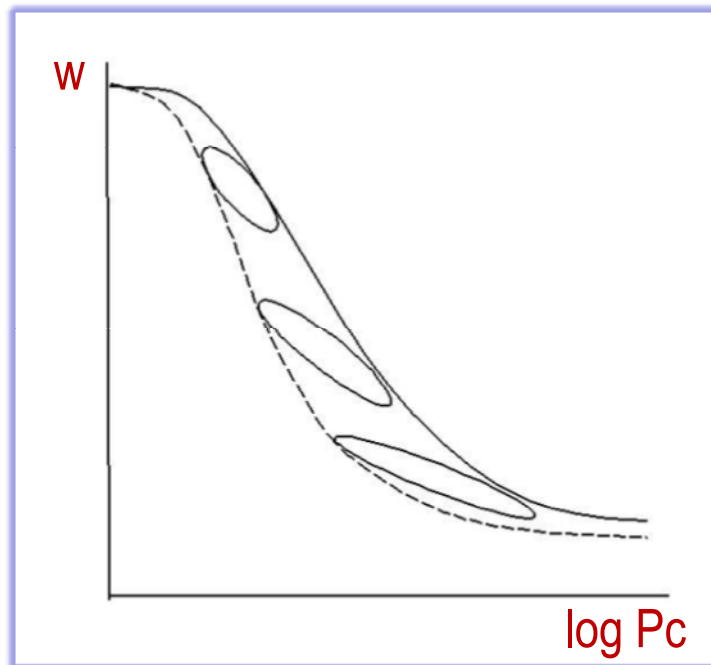
Procesos de succión



Curva de retención de humedad

Procesos de succión

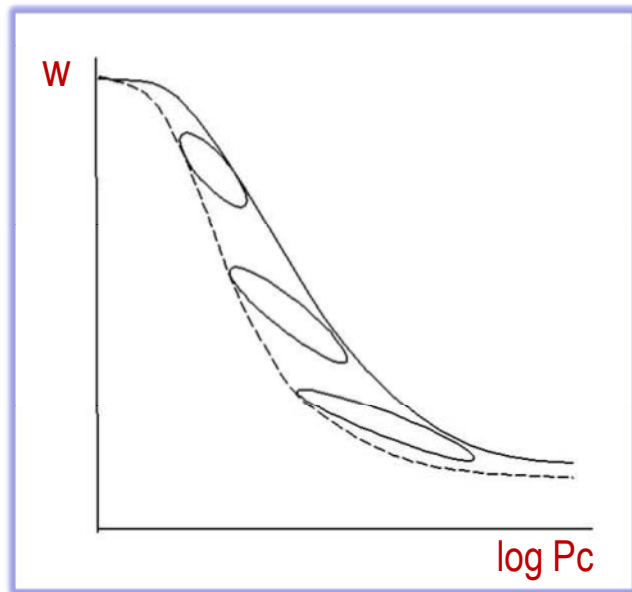
- **Potencial capilar (energía):** $P_c = \rho \cdot g \cdot h$; $P_c \text{ (atm)} = 10^{-1} \cdot h \text{ (m)}$
- **Índice de succión:** $pF = \log_{10} h \text{ (cm)}$; $10^{pF} = h \text{ (cm)} = 100 h \text{ (m)}$
- **Radio de poro:** $r = 2 \sigma / P_c = 2 \sigma / \rho \cdot g \cdot h$; $r \text{ (}\mu\text{m)} = 15 / h \text{ (m)}$
 ρ = densidad (998,6 Kg/m³); g = gravedad (9,80 m/s²); σ = tensión superficial (72,75 dinas/cm)



- **Agua constitucional: pF superior a 7**
 - Potencial capilar: superior a 10.000 atm.
 - Radio nominal de los poros: inferior a 0,00015 μm (1,5 Å).
 - Diámetro inferior a 0,0003 μm**
- **Agua higroscópica: pF entre 7 y 4,43**
 - Potencial capilar: entre 10.000 y 30 atm.
 - Radio nominal de los poros: entre 0,00015 y 0,06 μm .
 - Diámetro entre 0,0003 y 0,1 μm**
- **Agua capilar: pF entre 4,43 y 2,5**
 - Potencial hídrico: entre 30 y 0,3 atm.
 - Radio nominal de los poros: entre 0,06 y 4,7 μm .
 - Diámetro entre 0,1 y 10 μm**
- **Agua libre: pF inferior a 2,5**
 - Potencial hídrico total: inferior a 0,3 atm.
 - Radio nominal de los poros: superior a 4,7 μm .
 - Diámetro superior a 10 μm**

Porosimetría por succión de agua

- Índice de succión: $pF = \log_{10} h$ (cm) $10^{pF} = h$
 - Potencial capilar (energía): $P_c = \rho \cdot g \cdot h$; P_c (atm) = $10^{-1} \cdot h$ (m)
 - Radio de poro: $r = 2 \sigma \cos \alpha / P_c = 2 \sigma / \rho g h$ **r (μm) = $15 / h$ (m)**
- ρ = densidad (998,6 Kg/m³); g = gravedad (9,80 m/s²); σ = tensión superficial (72,75 dinas/cm)



- **Agua constitucional:** pF superior a 7
 - Potencial capilar: superior a 10.000 atm.
 - Radio nominal de los poros: inferior a 0,00015 μm (1,5 Å).
 - Diámetro inferior a 0,0003 μm**
- **Agua higroscópica:** pF entre 7 y 4,43
 - Potencial capilar: entre 10.000 y 30 atm.
 - Radio nominal de los poros: entre 0,00015 y 0,06 μm .
 - Diámetro entre 0,0003 y 0,1 μm**
- **Agua capilar:** pF entre 4,43 y 2,5
 - Potencial hídrico: entre 30 y 0,3 atm.
 - Radio nominal de los poros: entre 0,06 y 4,7 μm .
 - Diámetro entre 0,1 y 10 μm**
- **Agua libre:** pF inferior a 2,5
 - Potencial hídrico total: inferior a 0,3 atm.
 - Radio nominal de los poros: superior a 4,7 μm .
 - Diámetro superior a 10 μm**

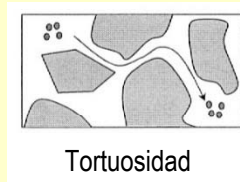
Agua - Humedad

➤ Circulación del agua en las rocas

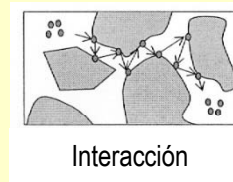
→ PERMANENTE

⇒ transporte de humedad en medios porosos no saturados

- Vapor de agua → **Difusión (Convección)** $\Leftarrow \Delta \text{concentración} = \Delta P_{\text{vapor}}$



Tortuosidad



Interacción



Grado de saturación

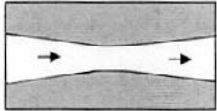
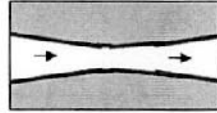
- Agua líquida → **Difusión superficial** $\Leftarrow H_r = 60 \%$
Succión capilar $\Leftarrow \Delta P_{\text{capilar}}$
Presión, gravedad

En medios porosos :

→ mezcla de ambos mecanismos

en función de la H_r del ambiente

ABSORCIÓN ↔ EVAPORACIÓN
 ↘ T, H_r, viento

	Mecanismo microscópico	Transporte macroscópico
	Difusión pura + efusión	VAPOR
	Difusión pura + efusión + difusión superficial	VAPOR
	Difusión + condensación capilar	VAPOR
	Capilaridad	LÍQUIDO

Agua - Humedad

➤ Origen del agua en los materiales en edificación

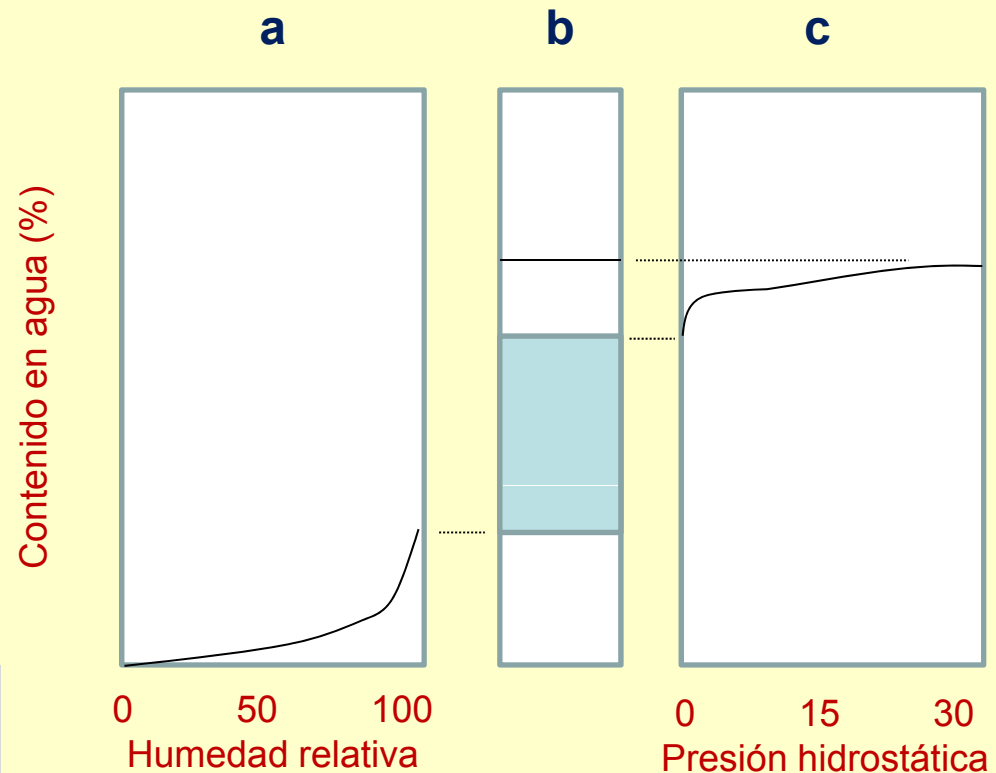
- **Parte superior ↔ Atmósfera**
 - **Agua líquida: lluvia, nieve, granizo...**
→ absorción, penetración capilar
 - **Vapor de agua: humedad del aire, niebla...**
→ adsorción, condensación capilar
- **Paste inferior ↔ Terreno**
 - **Agua líquida: nivel freático**
→ ascensión capilar



Agua - Humedad

➤ Comportamiento hídrico de los materiales en edificación

- a) Absorción de vapor
- b) Absorción capilar
- c) Absorción líquida



► Soledad García Morales (1995). *Metodología de diagnóstico de humedades de capilaridad ascendente y condensación higroscópica en edificios históricos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. [en la red](#)

Abaco de comportamiento hídrico

Agua - Humedad

➤ Acción del agua en las rocas

⇒ líquida + vapor = humedad, sólida = hielo

■ Procesos

- **Físico-mecánicos:** | ciclos de humedad-sequedad
| ciclos hielo-deshielo
- **Químicos:** flujo de humedad permanente

■ Efectos /daños

- **Zona de lavado** → agua de escorrentía periódicamente
 - decoloración, disolución, lavado diferencial...
- **Zona seca protegida** → baja humedad: agua higroscópica
 - depósitos de polvo, ennegrecimiento, pátinas...
- **Zona con humedad** → alta humedad permanente: agua líquida
 - costras, ampollas, disgregación, eflorescencias...