

Geología estructural, geomorfología e hidrogeología



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

Índice



- **Geología estructural**
- Geomorfología
- Hidrogeología

Geología estructural



- Análisis del esfuerzo y la deformación en la corteza terrestre
- Análisis de la respuesta de las rocas frente al esfuerzo

Intereses:

- Conocimiento científico
- Aplicaciones industriales, económicas y ambientales, ej.:
 - Energías renovables y no renovables
 - Minerales y metales estratégicos
 - Rocas industriales
 - Aguas subterráneas
 - Estudios geotécnicos
 - Riesgo geológico



<http://estructural.materias.gl.fcen.uba.ar/>

Deformación



Acción de procesos endógenos: movimiento de placas tectónicas, vulcanismo, sismos.

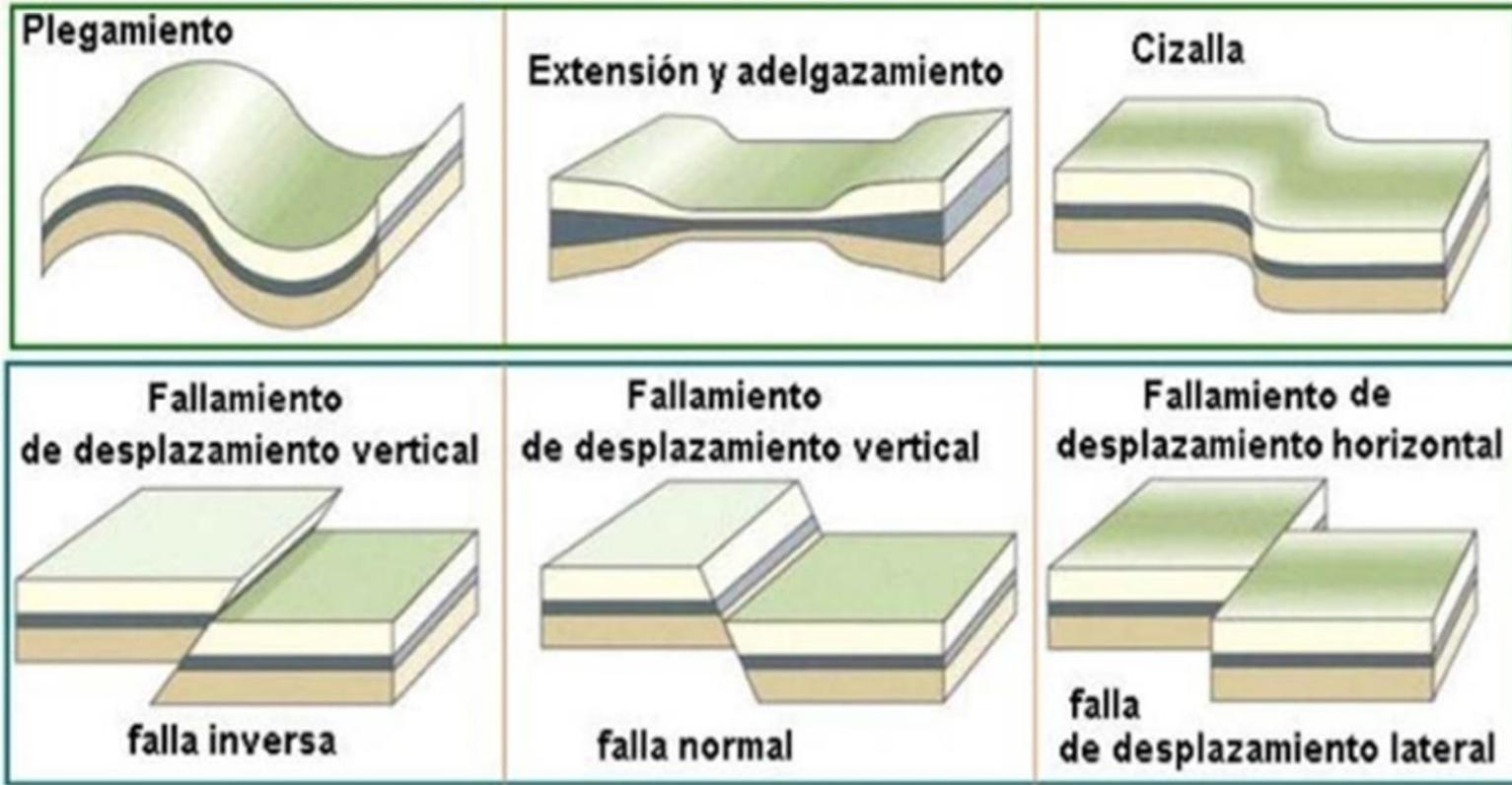
Factores que controlan la deformación:

- Tipo y magnitud de esfuerzos
- Tipo de roca
- Temperatura
- Presión de confinamiento
- Tiempo de aplicación de esfuerzos
- Presencia y presión de fluidos
- Anisotropías preexistentes

Tipo de esfuerzos



Estructuras resultantes de cada tipo de esfuerzos



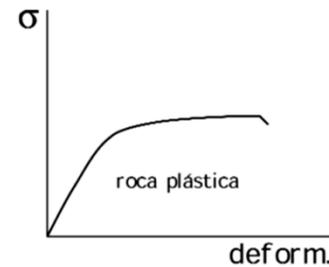
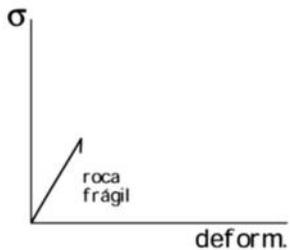
<http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/cursos/33b-DEFORMACION.pdf>

Tipo de roca

La misma roca en distintos ambientes geológicos se deforma de manera diferente.



Ej.: cuarcitas de Sierra de la Ventana: (a) En superficie comportamiento frágil; (b) 20 km de profundidad deformación plástica



<https://hablemosdeargentina.com/c-buenos-aires/sierra-de-la-ventana/>

Tipo de roca

En el mismo ambiente geológico distintas rocas se deforman de manera diferente.

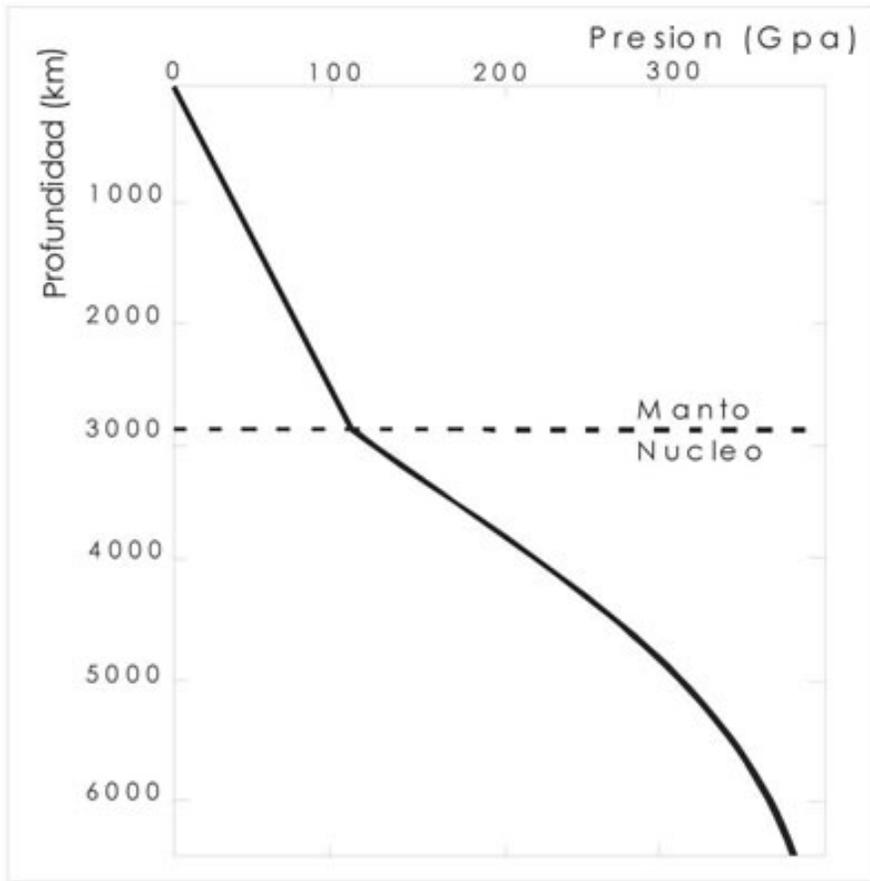


Isla Blå Jungfrun, Suecia (M.V. Altinier, 2019)

Rocas incompetentes: se deforman bajo acción de tensiones bajas a moderadas.
Ej.: rocas arcillosas, deformación plástica

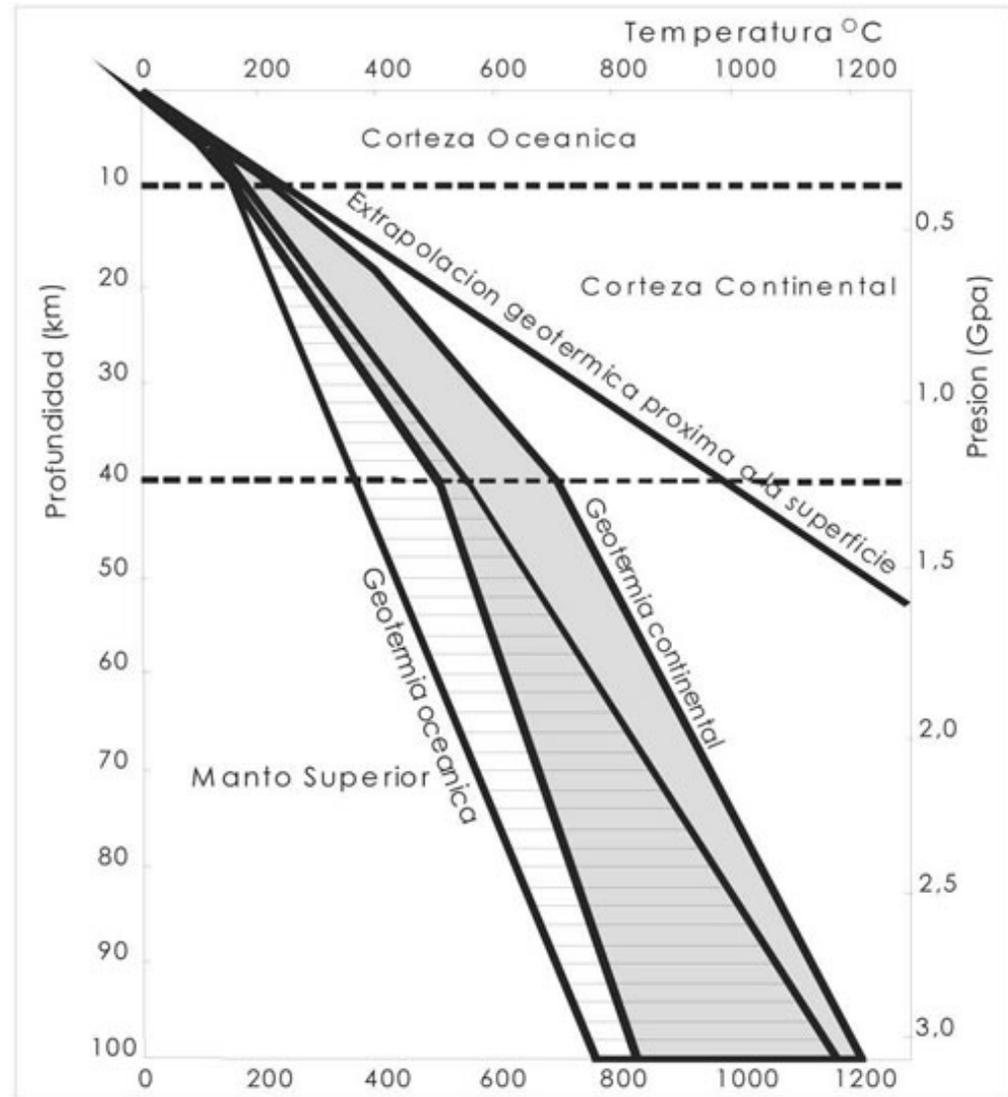
Rocas competentes: se deforman por acción de grandes tensiones.
Ej.: granitos y granodioritas, comportamiento frágil

Temperatura y presión



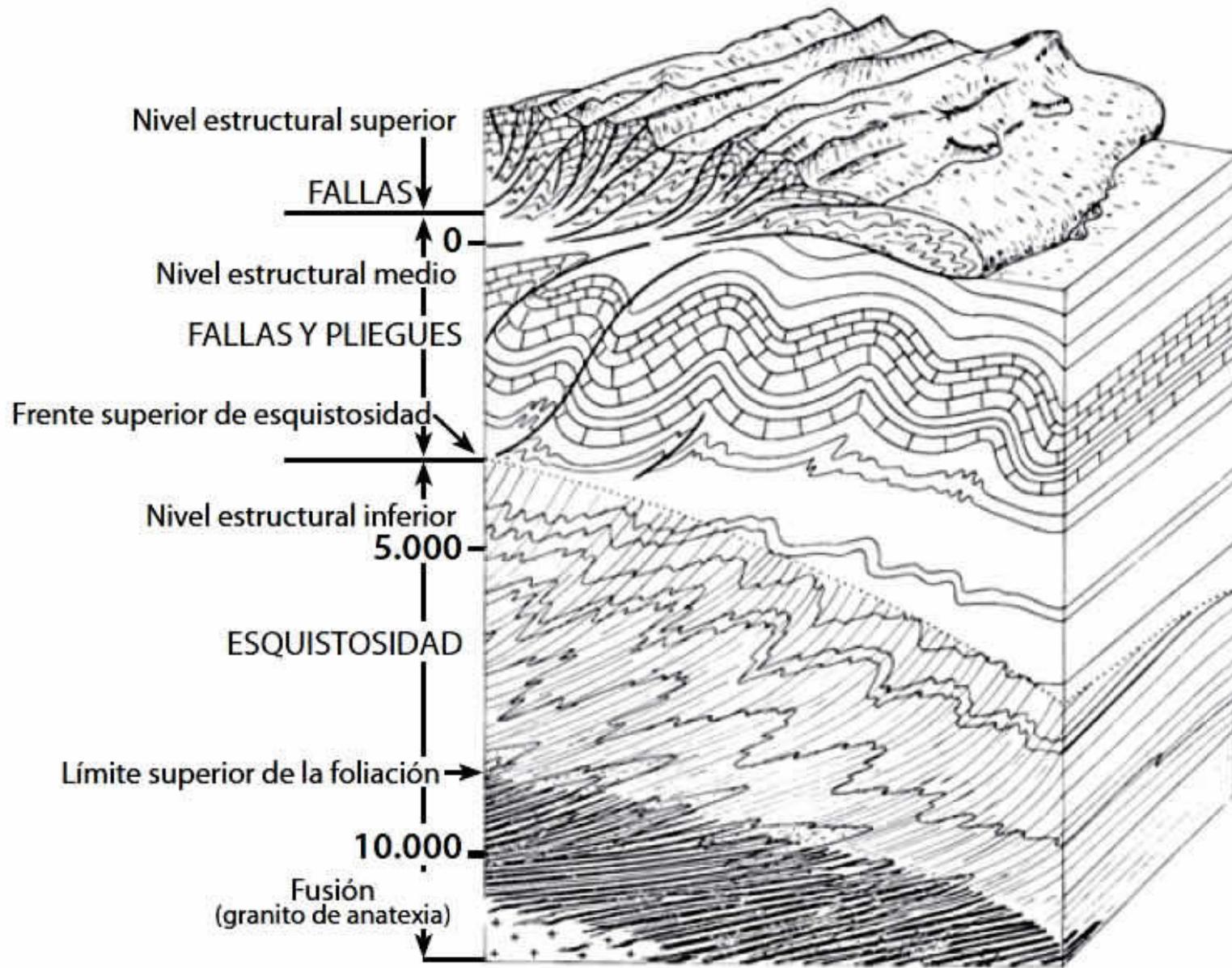
http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/01.htm

Variación de la presión con la profundidad



Rango de variación del gradiente geotérmico en áreas oceánicas (rayado horizontal) y en áreas continentales (gris), hasta los 100 km
(http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/01.htm)

Temperatura y presión



Niveles estructurales de la corteza terrestre (Mattauer, 1976)

Temperatura y presión

Calizas plegadas



Calizas diaclasadas



<https://fernandobastida-ib.blogspot.com/p/fotos-geologia-diaclasas-joints.html>

Temperatura



Basalto en superficie → frágil



<https://www.rocasym minerales.net/basalto/#prettyPhoto>

Lava basáltica extruida
(700° C – 1200° C) → dúctil



<https://ingeoexpert.com/articulo/coladas-lava-tipos-caracteristicas/?v=5b61a1b298a0>

Pliegues

Esfuerzos compresivos

Deformación plástica

Engrosamiento de la corteza terrestre



- Reacción plástica a la aplicación del esfuerzo
- Estado plástico: profundidad (P y T) depende del tipo de roca

Pliegues

Partes de un pliegue



Tarback y Lutgens (2005)

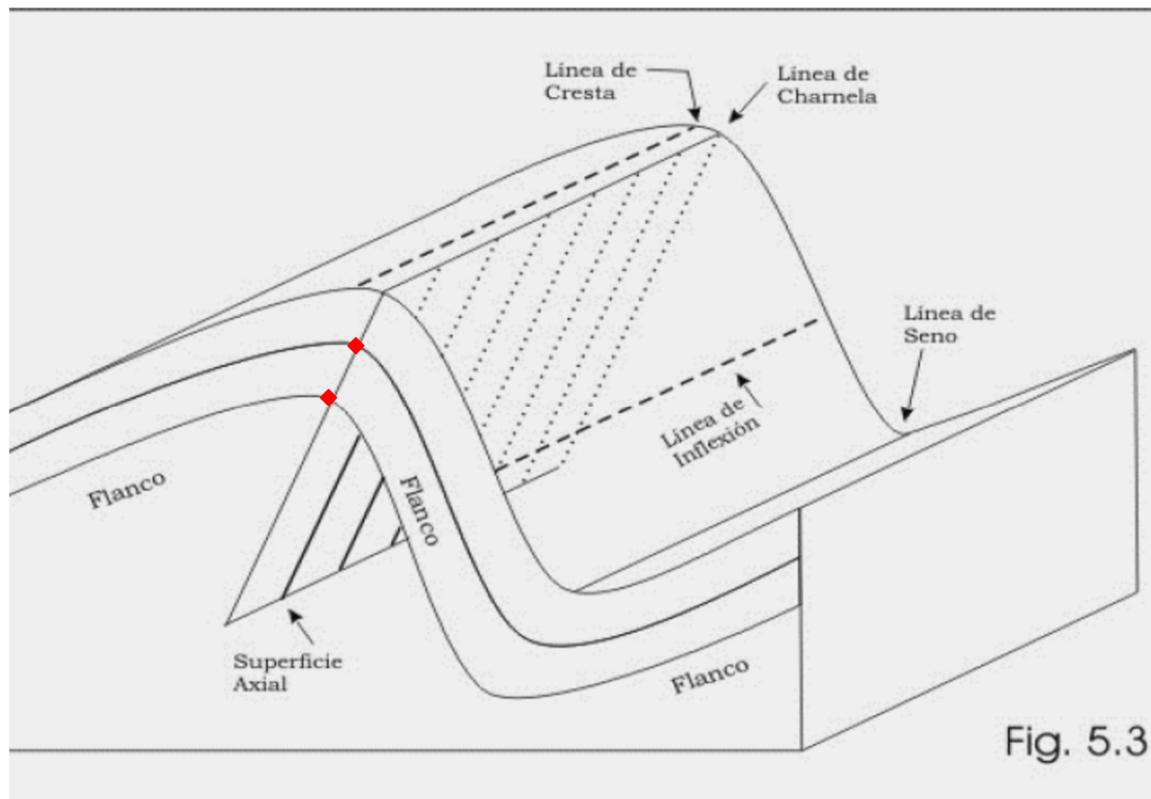
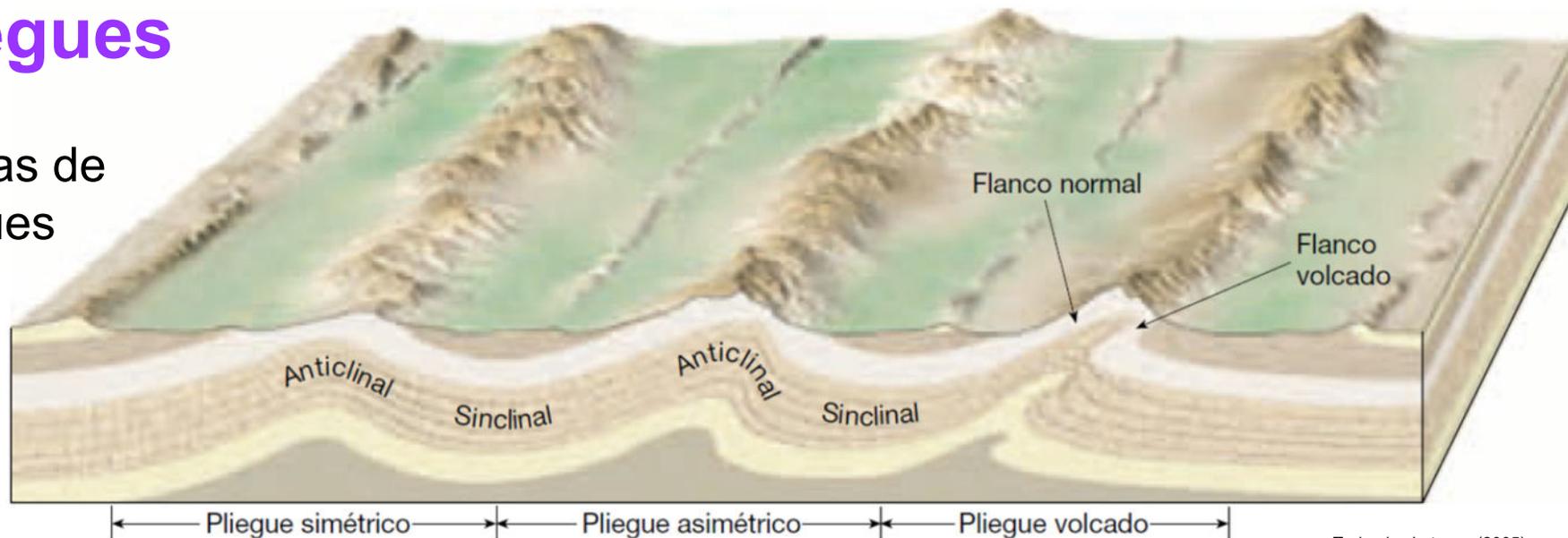


Fig. 5.3

- ♦ Charnela: punto o zona de máxima curvatura de cada estrato
- Eje o línea de charnela: línea que une los puntos de máxima curvatura
- Superficie axial: superficie imaginaria que une los puntos de máxima curvatura de todos los estratos
- Flanco: superficie menos curvada del pliegue (lado)

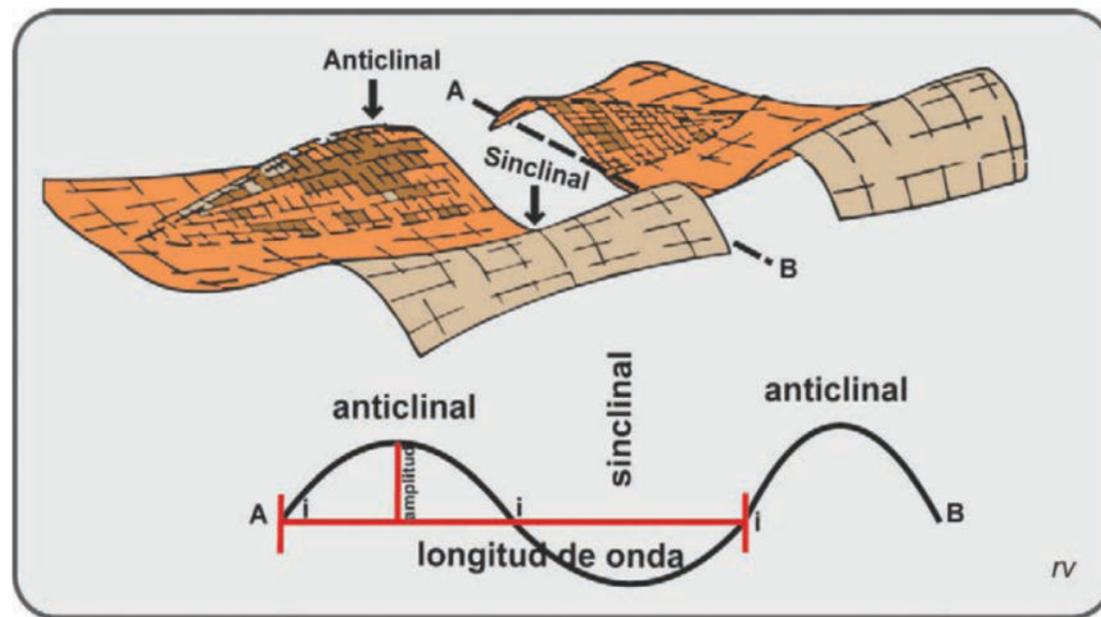
Pliegues

Formas de pliegues



Tarback y Lutgens (2005)

- Anticlinal: pliegue convexo
- Sinclinal: pliegue cóncavo
- Pliegue simétrico
- Pliegue asimétrico
- Pliegue volcado: ángulo de inclinación entre superficie axial y horizontal $>45^\circ$
- Pliegue recostado: superficie axial y flancos horizontales

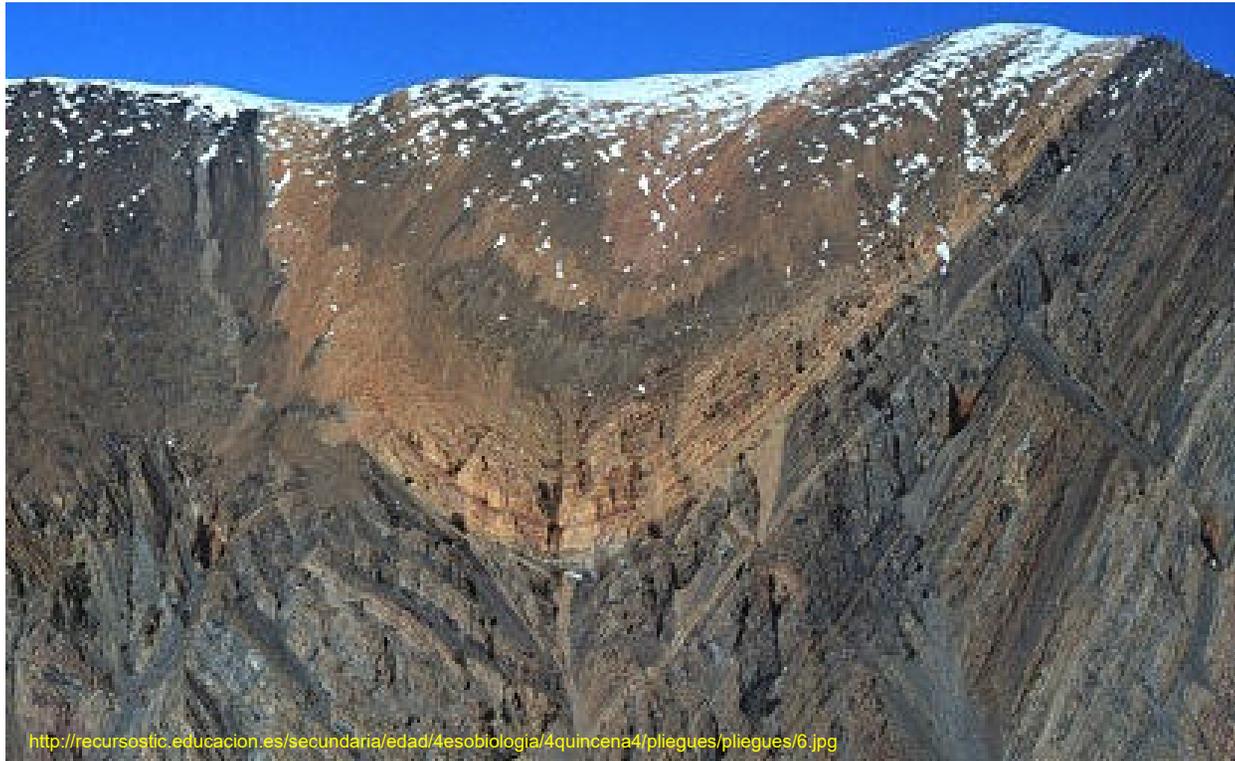


http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_21/pdf/varela_miscelanea_21_manual_de_geologia.pdf

IV

Anticlinales y sinclinales

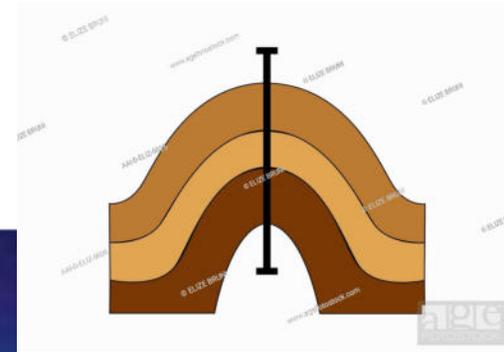
Sinclinal



Anticlinal

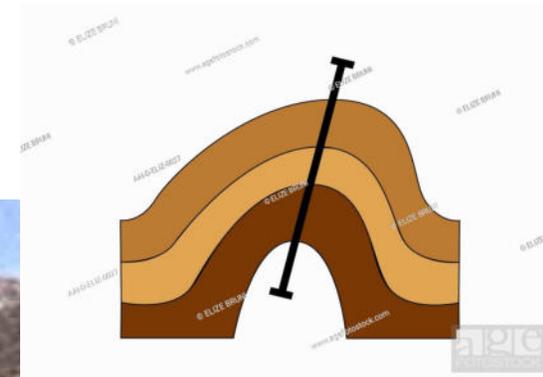


Pliegues simétricos

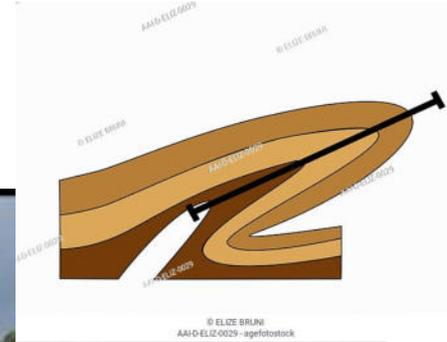


<http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esobiologia/4quincena4/pliegues/pliegues/8.jpg>

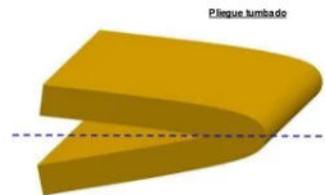
Pliegues asimétricos



Pliegues volcados



Pliegues tumbados



Fracturas

Discontinuidades estrechas y planas ↔ comportamiento frágil de la roca.

Diaclasas

- Desplazamiento paralelo al plano de fracturación nulo o imperceptible.
- Desplazamiento de bloques perpendicular al plano de fracturación.



https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/with/72157624907313759

Fallas

Desplazamiento de bloques paralelo al plano de fracturación.



https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157624907549475/with/5023987322/

Fallas

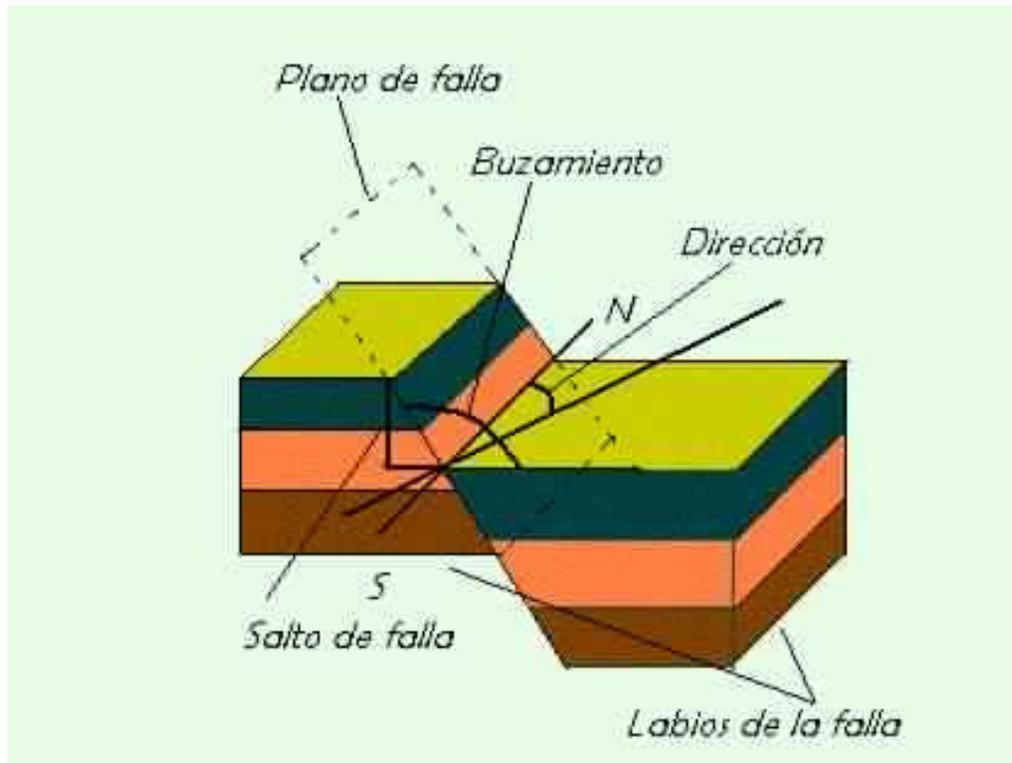


Esfuerzos tensionales, de cizalla o compresivos.

Comportamiento frágil → formación de fracturas.

Desplazamiento de bloques paralelo al plano de fracturación.

Elementos de una falla

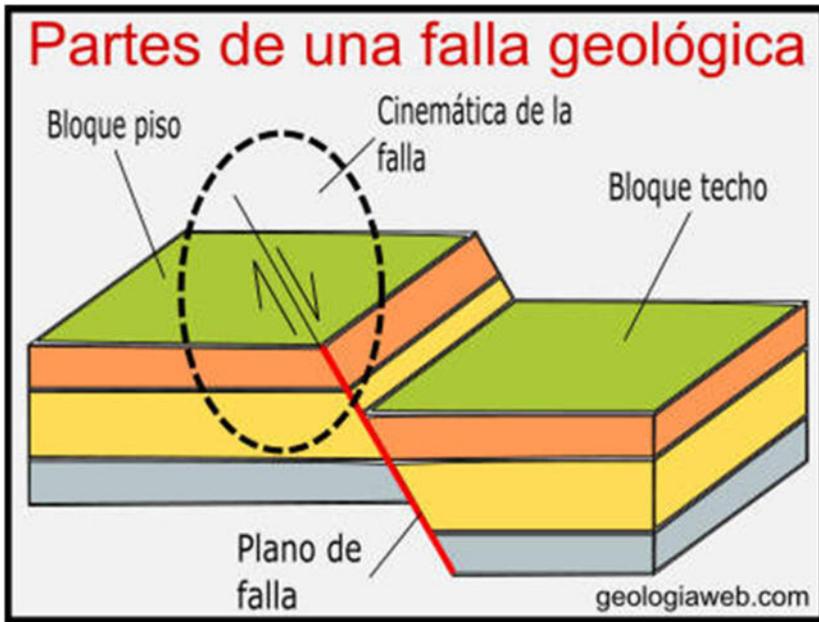


Plano de falla: superficie de rotura sobre la que se produce el desplazamiento de bloques.

Bloques de falla (Labios): cada uno de los bloques que se desplaza

Salto de falla: desplazamiento de un bloque con respecto al otro medido en las componentes vertical y horizontal

Fallas

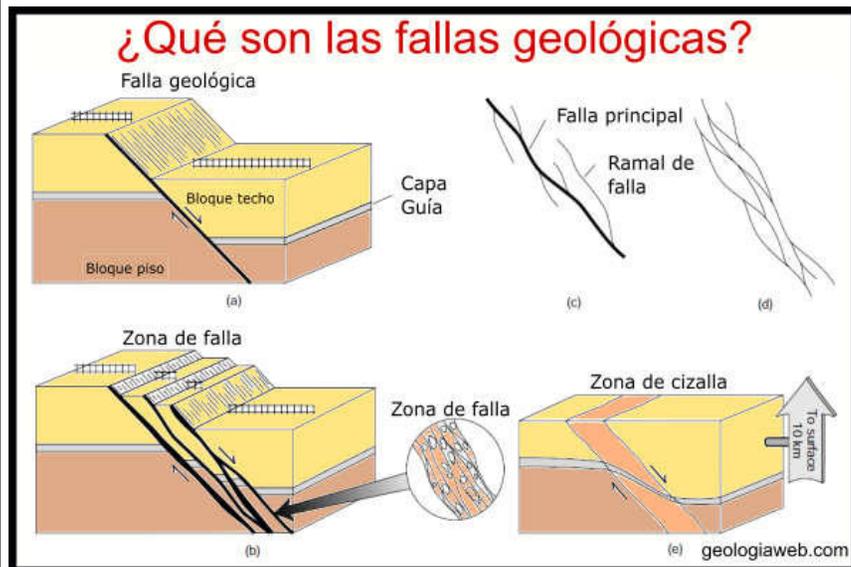


Bloque de piso o bloque inferior: bloque ubicado debajo del plano de falla

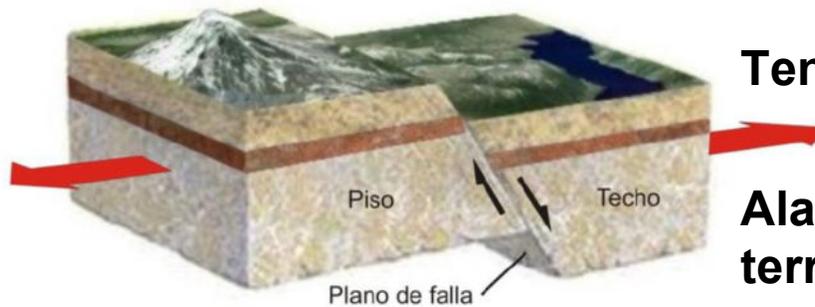
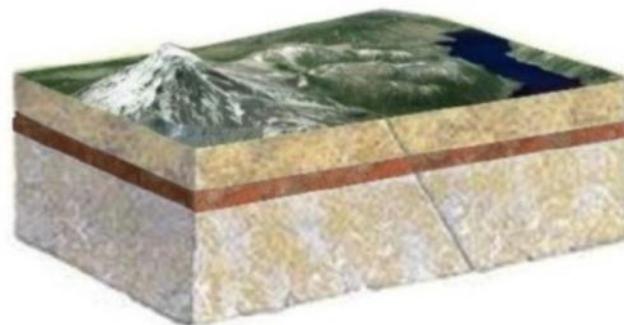
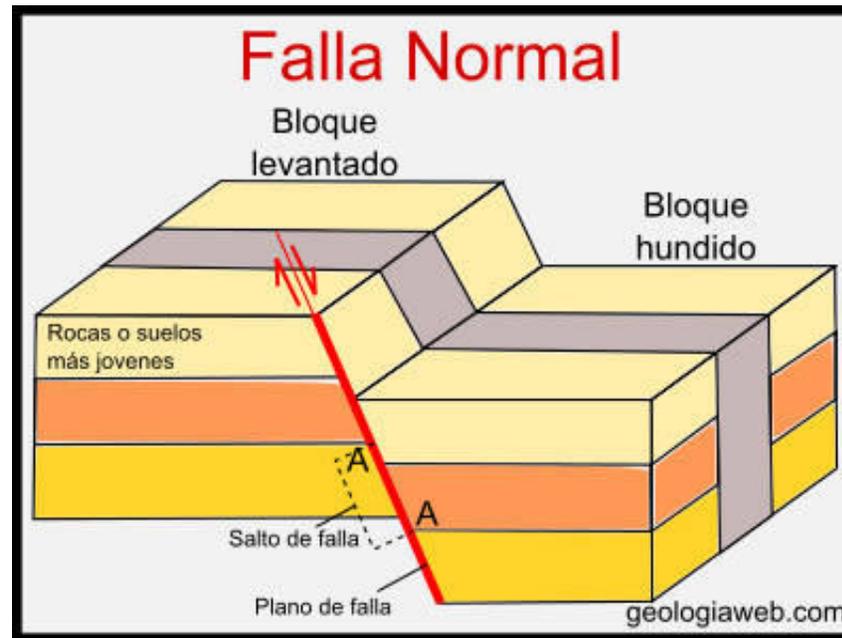
Bloque de techo o bloque superior: bloque ubicado encima del plano de falla.



<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>



Fallas normales



Tensión horizontal

Alargamiento del terreno

<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>

Bloque superior (techo): desliza hacia abajo, se hunde

Bloque inferior (piso): desliza hacia arriba, se levanta

Falla normal



Fallas normales

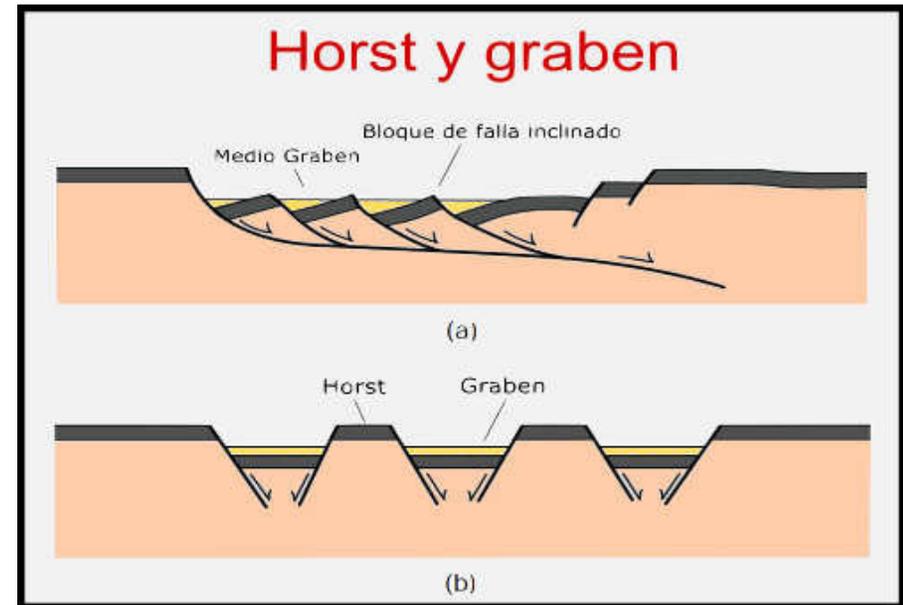


https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157624907549475/with/5023987322/

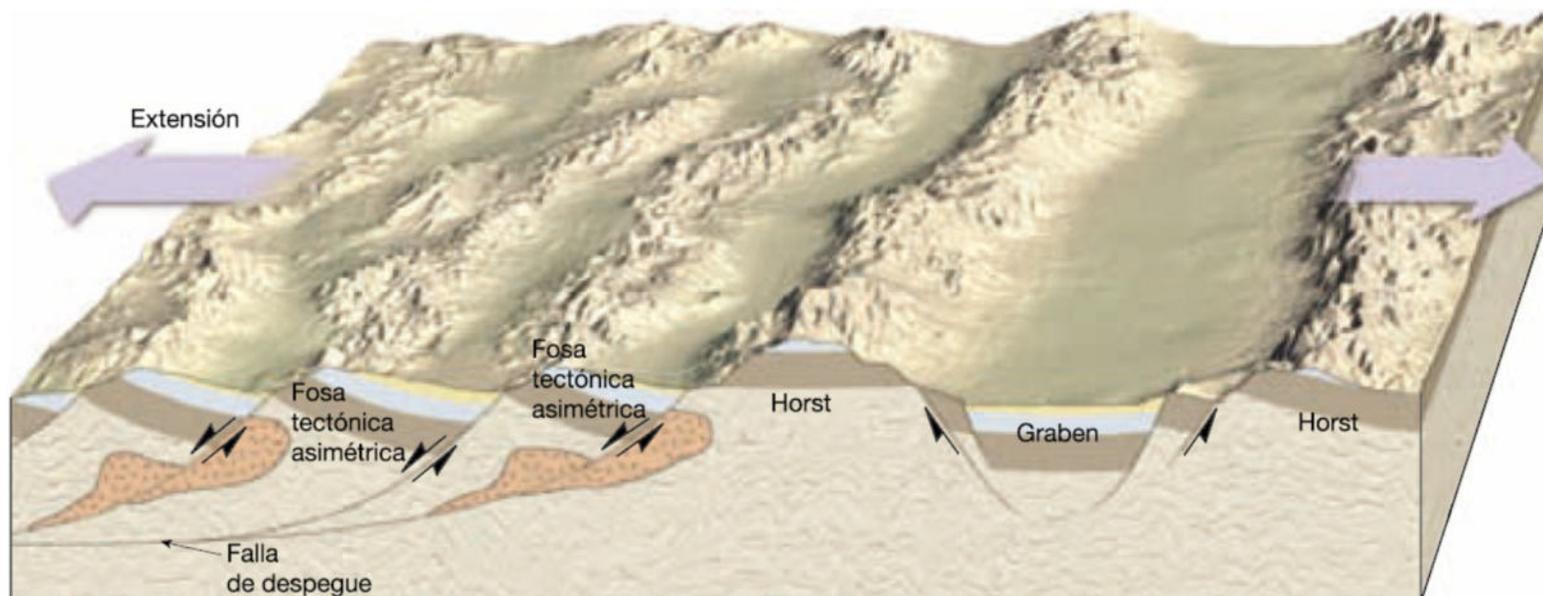
Fallas normales

Sistemas de fallas normales ↔ zonas de extensión cortical (rift, dorsales oceánicas, márgenes pasivos)

Estructuras asociadas: graben, horst, hemigraben

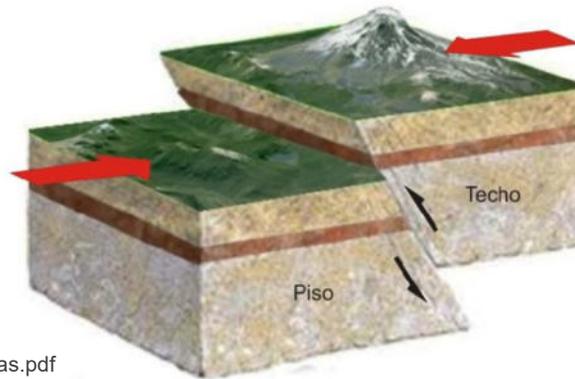
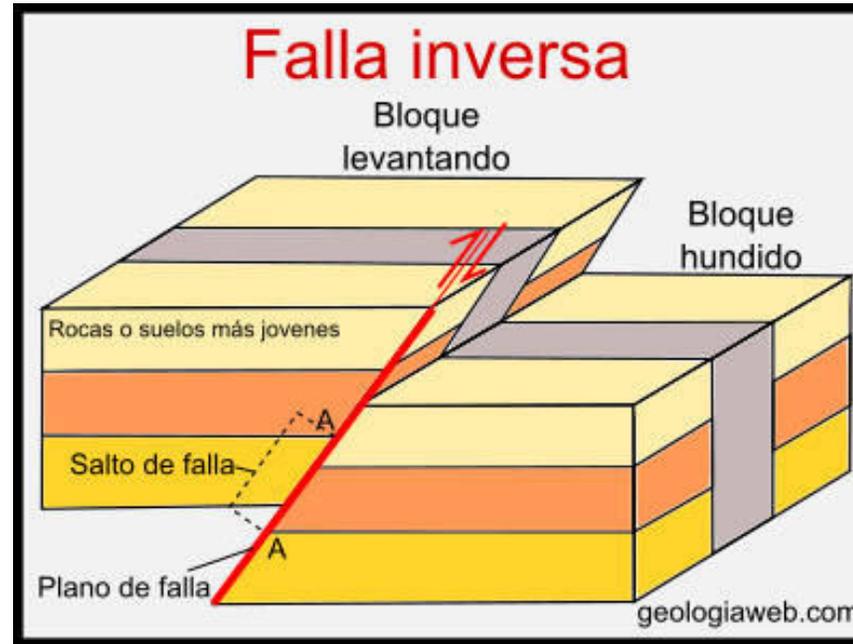


<https://geologiaweb.com/geologia-general/fallas-geologicas/>



Tarback y Lutgens (2005)

Fallas inversas



Compresión horizontal

Acortamiento del terreno

<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>

Bloque superior (techo): desliza hacia arriba, se levanta

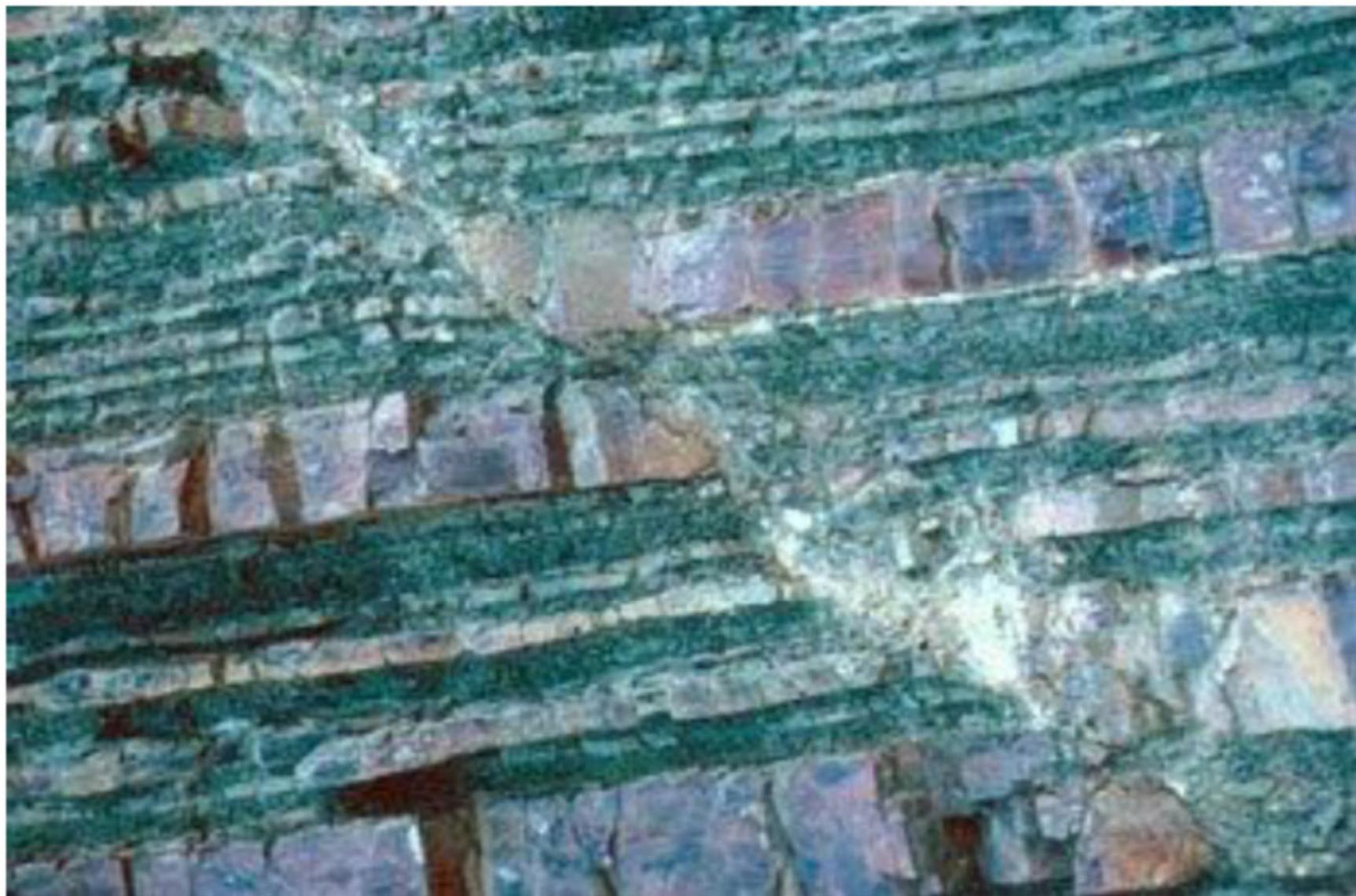
Bloque inferior (piso): desliza hacia abajo, se hunde

Falla inversa

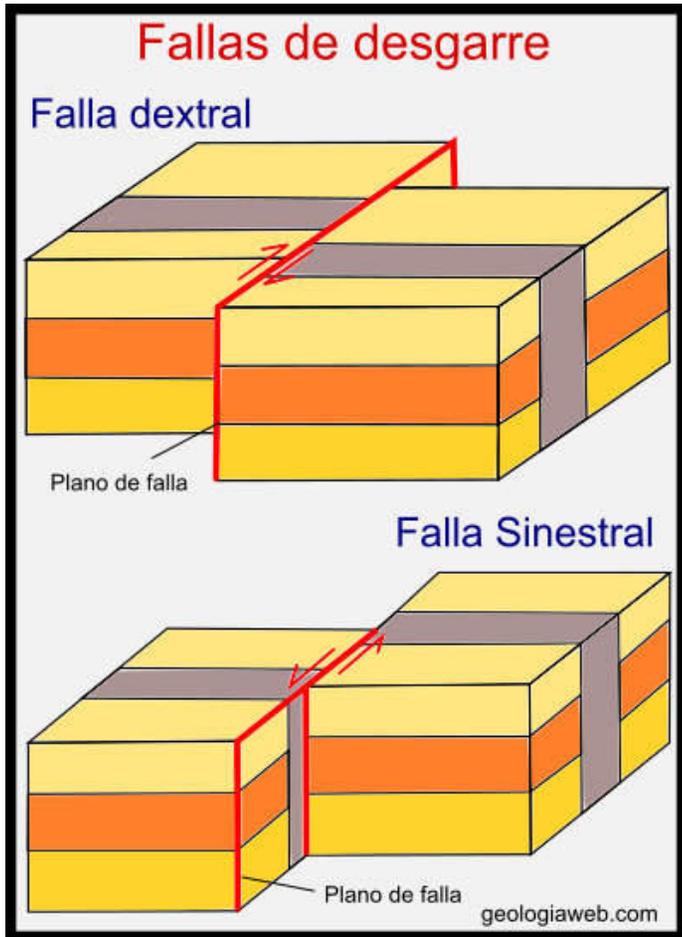


<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>

Fallas inversas



Fallas de desgarre o transcurrentes

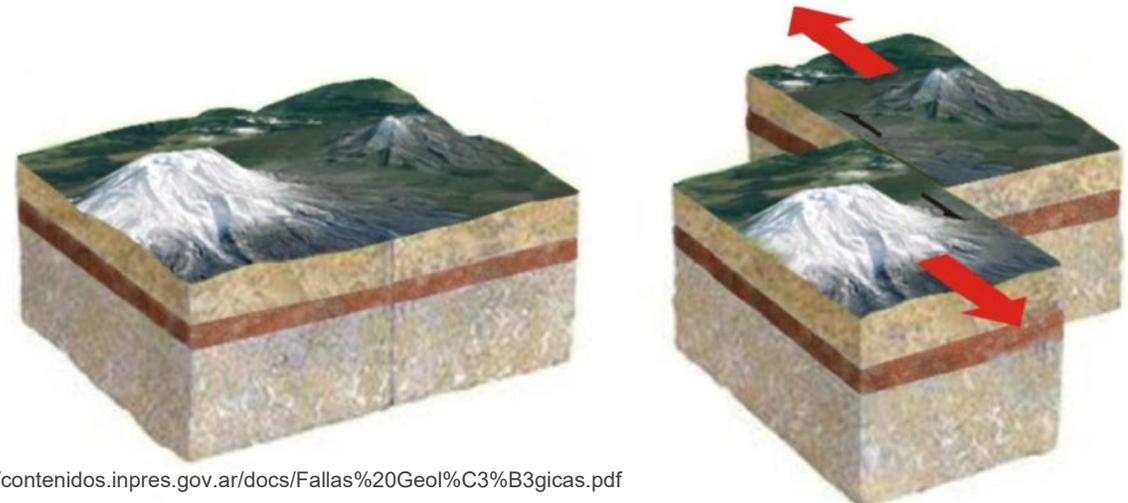


Zonas de fallas → varios km

Planos de falla verticales

Esfuerzos de cizalla

Desplazamiento de bloques paralelo a la superficie del terreno



<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>

Fallas de desgarre o transcurrentes



Falla de San Andrés (<https://static3.a24.com/images/2019/9/6/r1I9K7JUH-900x000.jpeg>)

Fallas de desgarre o transcurrentes



Fallas de desgarre o transcurrentes



<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>

Índice



- Geología estructural
- **Geomorfología**
- Hidrogeología

Geomorfología



Procesos geológicos

Cambios físicos y químicos que modifican la superficie terrestre

Procesos endógenos formadores de relieve

- Movimientos tectónicos
- Vulcanismo
- Actividad sísmica

Procesos exógenos modeladores del relieve

- Meteorización (física, química, biológica)
- Erosión
- Transporte
- Depositación
- Procesos gravitacionales

Procesos exógenos



Meteorización

Desagregación y alteración de materiales *in situ*

Meteorización física: desagregación por procesos físicos (ej.: gelifracción, expansión y contracción térmicas, descompresión)

Meteorización química: desagregación por alteración química de minerales (ej.: oxidación, disolución, hidrólisis)

Meteorización biológica: fracturación o alteración química por intervención de seres vivos (ej.: acción radicular, ácidos secretados por líquenes)

Erosión

Remoción del material por acción de agentes geomórficos

Transporte

Traslado de los materiales por medio de agentes geomórficos hasta su depositación

Procesos exógenos



Deposición

Acumulación de los materiales transportados en cuencas sedimentarias

Procesos gravitacionales

Movimiento pendiente abajo por acción de la gravedad

Agentes geomorfológicos

Incorporan y transportan material: ríos, glaciares, viento, precipitación, olas, corrientes marinas, etc.



Factores determinantes en el modelado del relieve

- Agente geomórfico actuante
- Estructura geológica
- Clima ↔ procesos, agentes y vegetación
- Litología
- Cubierta vegetal
- Tiempo
- Procesos exógenos y endógenos
- Acción antrópica

Diferencia entre valles glaciarios y fluviales



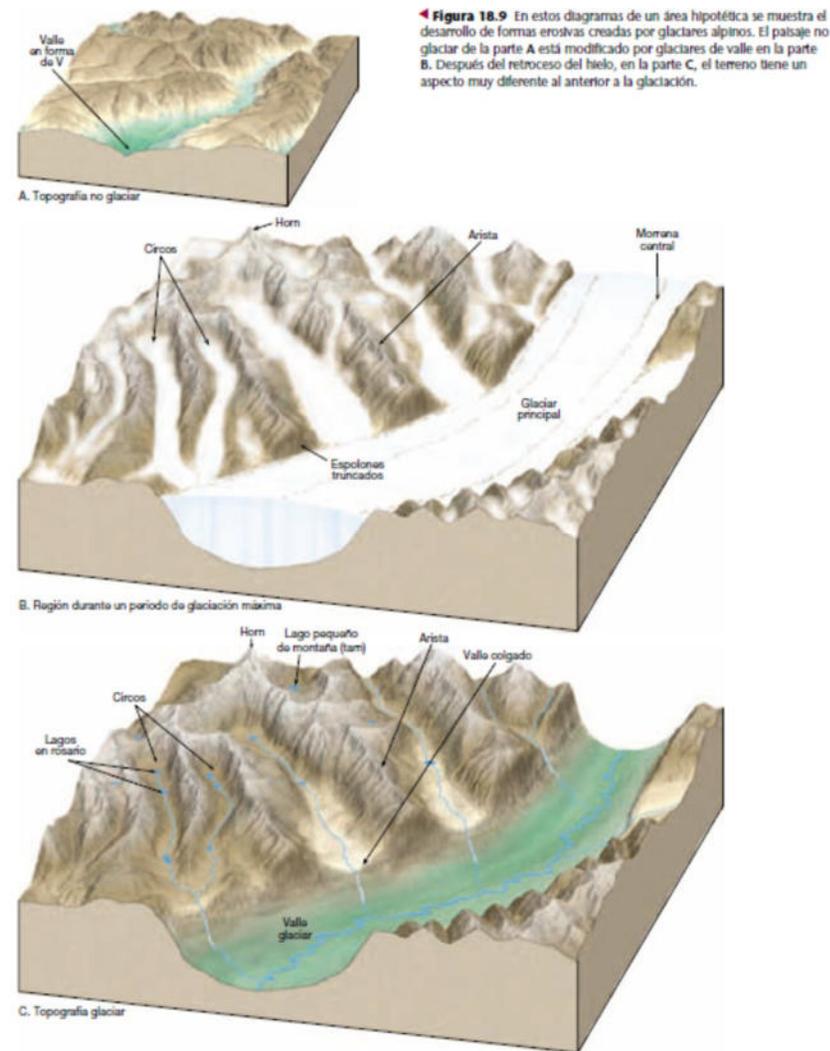
<https://www.voydeviaje.com.ar/argentina/san-martin-de-andes-una-joya-en-orillas-del-lago-lacar/>

Valle glaciario. Ej.: Lago Lácar (San Martín de los Andes)



https://www.researchgate.net/publication/301889952_Peligros_geomorfologicos_inundaciones_y_procesos_de_ladera_en_la_cuenca_alta_del_rio_General_Perez_Zeledon_Costa_Rica

Valle fluvial



Tarbutck y Lutgens (2005)

Deforestación: erosión, degradación y pérdida de suelo por acción antrópica



<https://elpais.com/internacional/2021-04-24/el-superpoder-de-la-soja-en-brasil.html>

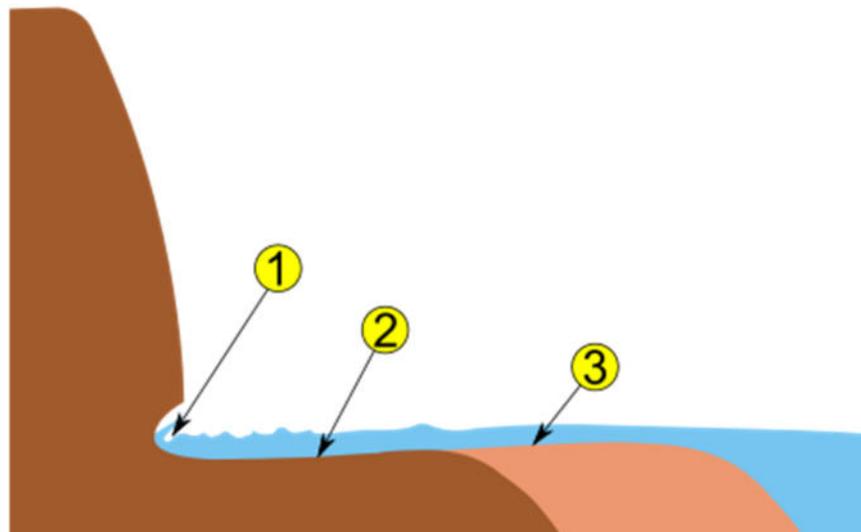
Deforestación del Amazonas (Brasil) por malas prácticas agrícolas asociadas al cultivo de soja

Geoformas marinas



Erosión

- Acantilados
- Arcos
- Pilares
- Plataformas de abrasión



1. Socavón
2. Plataforma de abrasión
3. Plataforma de acumulación

Acantilados



Acantilados de Mar del Plata

Plataforma de abrasión



Península Valdés, Chubut

Geoformas marinas



Acumulación

- Playas
- Planicies de marea
- Marismas
- Terrazas de acumulación
- Espigas e islas de barrera
- Tómbolos
- Territorios cuspidados



Planicies de mareas y marismas



Punta Rasa, Provincia de Buenos Aires Argentina)

Geoformas fluviales



Acción de cursos superficiales de agua

- Formas erosivas:

- Valle
- Canal
- Escarpa fluvial

- Formas de acumulación:

- Planicies aluviales
- Abanicos aluviales
- Barras
- Deltas



Deltas



Desloîtres, MODISRapid Response Team, NASA/GSFC

Delta del Paraná

Abanico aluvial



Geoformas glaciarias

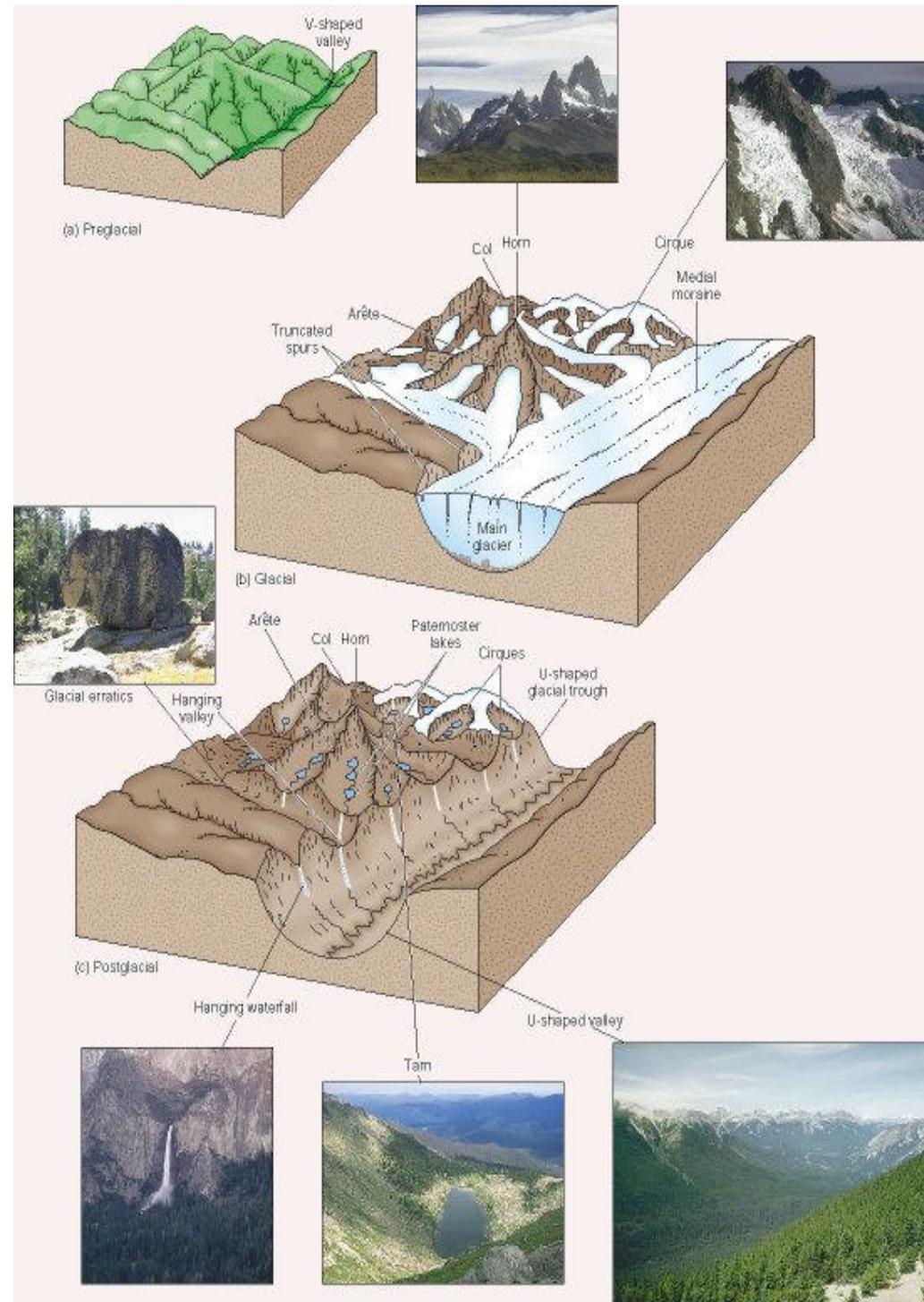
- Casquetes polares
- Glaciares de valle

Erosión

- Valle
- Valles colgados
- Circos
- Agujas
- Lagos en rosario

Acumulación

- Morenas
- Bloques erráticos
- Rocas aborregadas



Valle glaciario



Valle glaciario



Circos glaciarios



Agujas



Cerro Fitz Roy (Argentina)

Morenas



Figura 1. El glaciar Vinciguerra presenta una superficie de aproximadamente 0,6 km². En la imagen se puede observar la abrupta pared posterior del anfiteatro (circo) que contiene al glaciar. Por delante del glaciar se observa una colina alargada de rocas y sedimentos (morena frontal) depositados por el frente del glaciar durante una fase de avance, posiblemente unos 150 a 200 años atrás.

<http://coleccionlalupa.com.ar/1764-2/>

Bloques erráticos



Åspo, Suecia (M.V. Altinier, 2019)

Geoformas eólicas



Acción del viento muy importante en áreas poco o nada vegetadas

Formas erosivas

- Pavimento rocoso
- Hoyos de deflación

Formas de acumulación

- Dunas
- Loess



Pavimento del desierto

Concentración superficial de material grueso por erosión del material fino (arenas, limos y arcillas) debido a la acción del viento



https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/5013519435/in/album-72157624884384307/



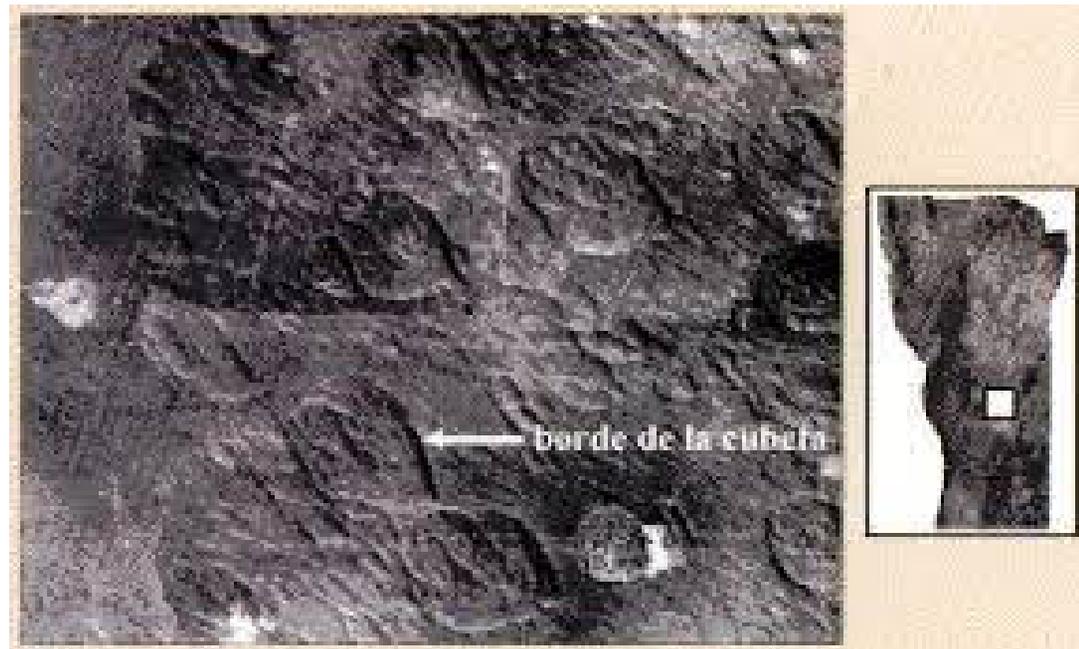
https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/5013519265/in/album-72157624884384307/



https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/5014123632/in/album-72157624884384307/

Hoyas o cubetas de deflación

Remoción de la capa superficial de suelo



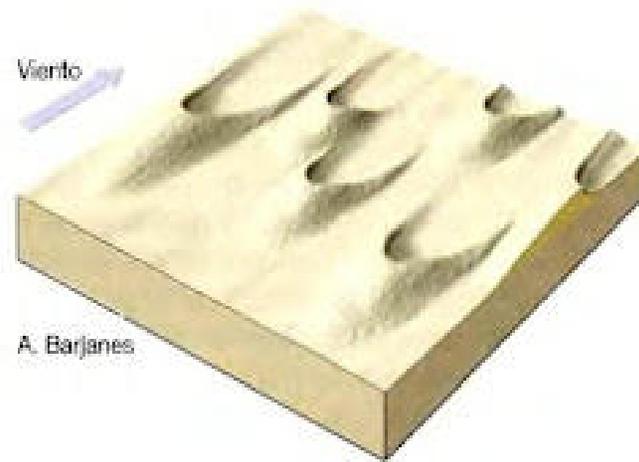
https://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/21-formas_erosion_eolica_san_luis.pdf



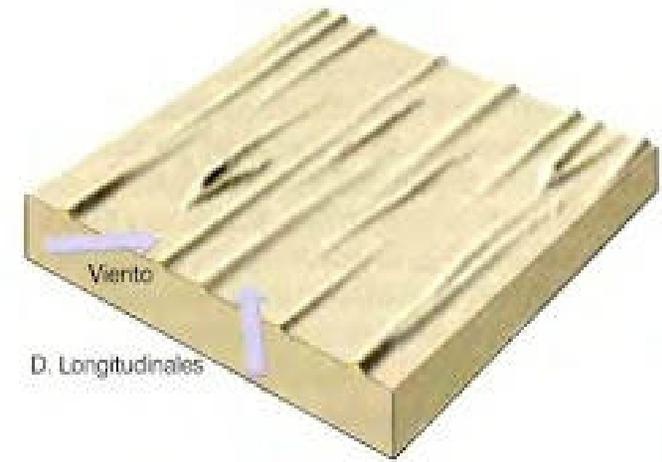
<https://inta.gob.ar/documentos/erosion-eolica>

Dunas

Tipos de duna:
disponibilidad
de arena e
intensidad y
dirección
de vientos



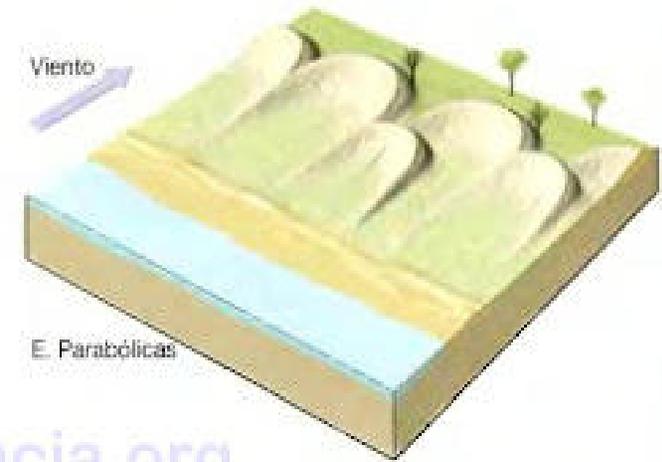
A. Barjanes



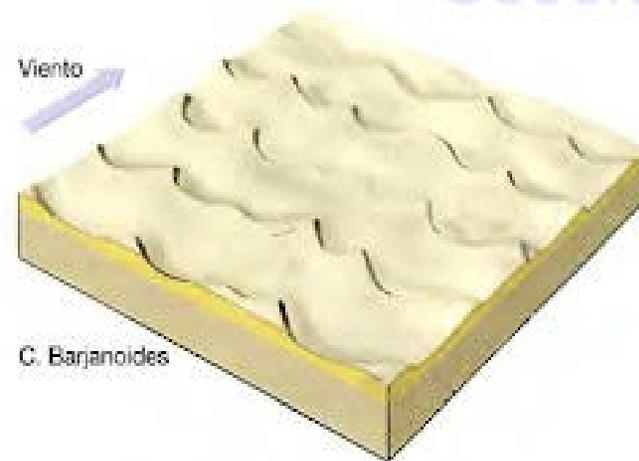
D. Longitudinales



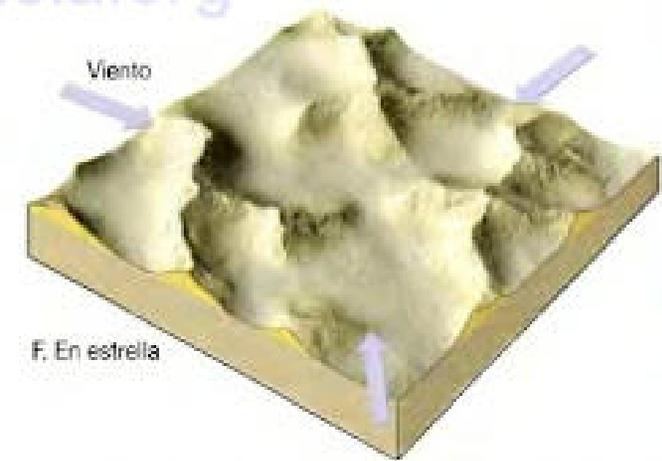
B. Transversas



E. Parabólicas



C. Barjanoides



F. En estrella

Geociencia.org

Loess



Acumulación de sedimentos finos (limos finos y arcillas) de material transportado por viento

Procesos gravitacionales o de remoción en masa



Movimientos de roca, regolito o suelo pendiente abajo por influencia de la gravedad

- No necesita agente de transporte
- Disparadores
 - Terremotos
 - Pérdida de cobertura vegetal
 - Lluvias torrenciales
 - Deshielo
 - Variación en el nivel freático



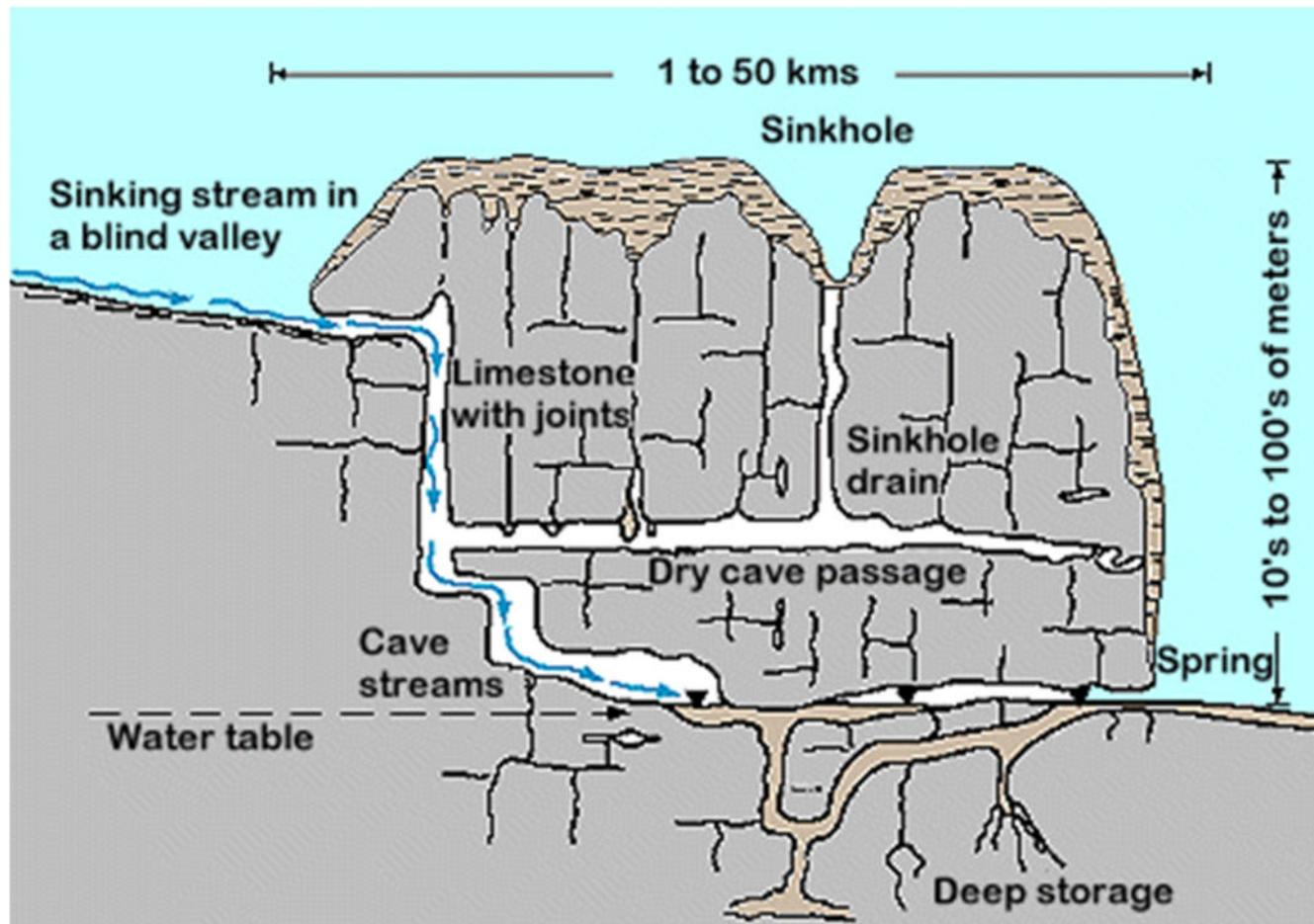
<https://www.geotecnia.online/wp-content/uploads/2017/03/landslide3-1024x683.jpg>

Geoformas Kársticas



Disolución y precipitación de la roca

- Roca soluble (calizas, halita, yeso)
- Diferencias de resistencia y solubilidad
- Lluvias intensas
- Lluvias estacionales
- Aguas pH ácido



Geoformas Kársticas



https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157624904292587/with/50505667053/

Índice



- Geología estructural
- Geomorfología
- **Hidrogeología**

Ciclo hidrológico



Circulación del agua desde los océanos a la atmósfera, de la atmósfera a los continentes y de los continentes al océano

- **Interacción de todos los componentes de la hidrósfera**
- **Motor del ciclo hidrológico: energía solar**
- **Flujo del agua en la tierra en todos sus estados físicos**
- **Procesos: evaporación, condensación, precipitación, transpiración de plantas, etc.**



Regulación del clima
Moldeado del relieve
Vida en el planeta.

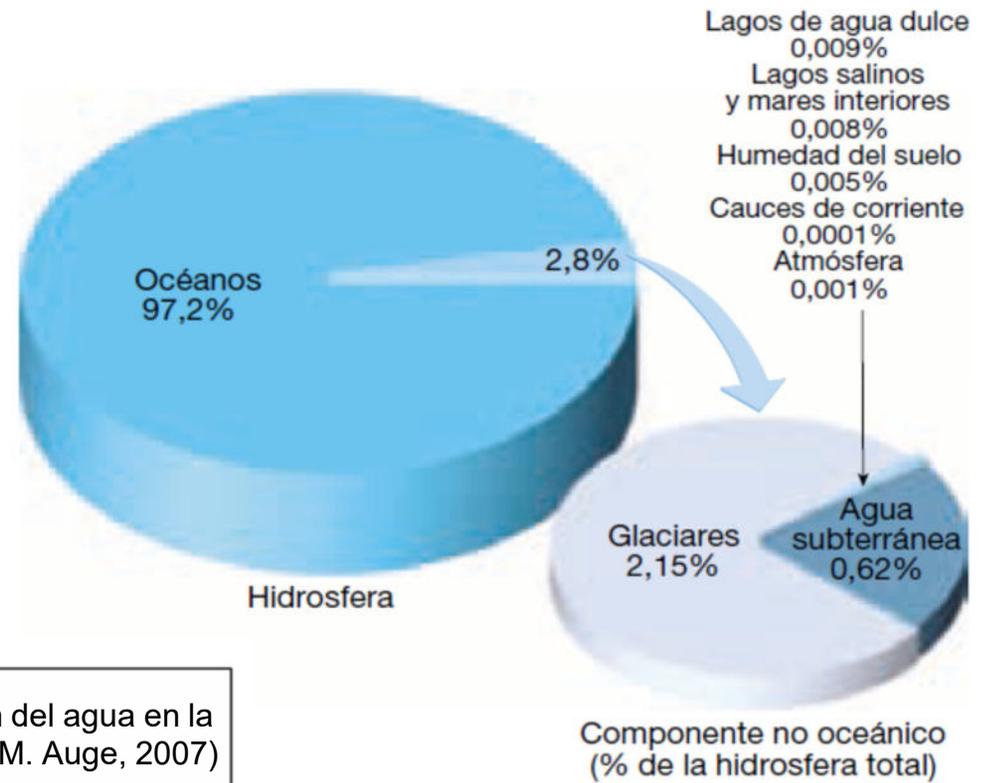
El Ciclo del Agua



U.S. Dept. of the Interior
U.S. Geological Survey
Howard Perlman, John Evans, USGS
<https://www.usgs.gov/water-science-school>
Este diagrama muestra solo el ciclo natural del agua, ignorando las influencias humanas.

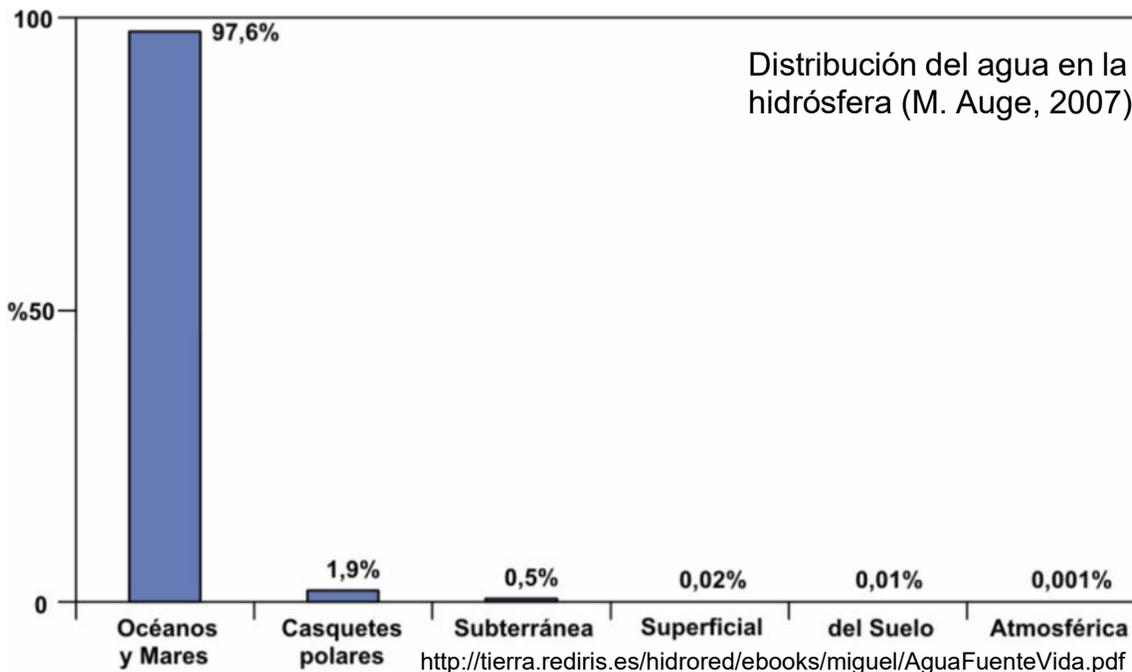
Distribución del agua en la hidrósfera

- Mayor proporción de agua dulce concentrada en casquetes polares y glaciares (~ 2%)
- Agua subterránea: mayor reservorio de agua dulce fácilmente extraíble (~ 0,6%)



Distribución del agua de la Tierra.

Tarback y Lutgens (2005)



<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/AguaFuenteVida.pdf>

Aguas subterráneas



Del total de agua dulce en el planeta:

- Agua subterránea ~ 14%
- Glaciares y casquetes polares ~ 85%
- Aguas superficiales ~ 1%



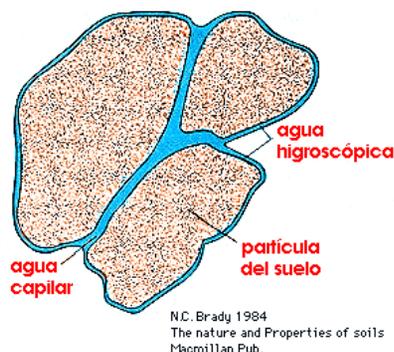
Aguas subterránea mejor calidad química que superficial ↔ filtrado natural

Aguas subterráneas

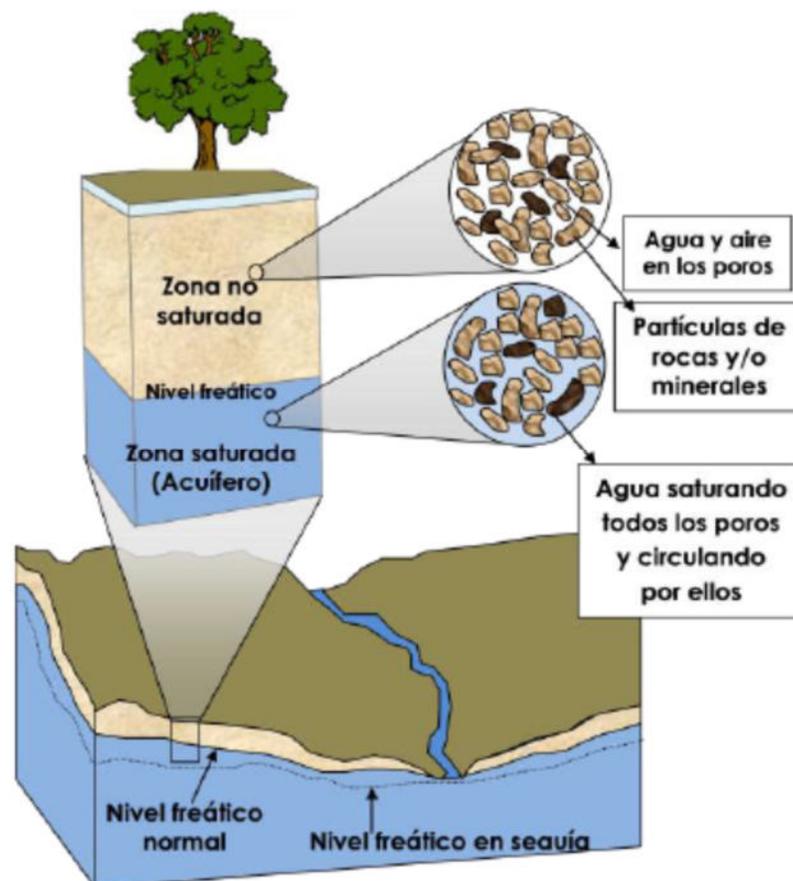


- **Agua retenida en el suelo:** agua capilar (tensión superficial) y agua higroscópica (adsorbida en partículas del suelo) ↔ funciones vitales y transpiración de plantas.

Zona no saturada.



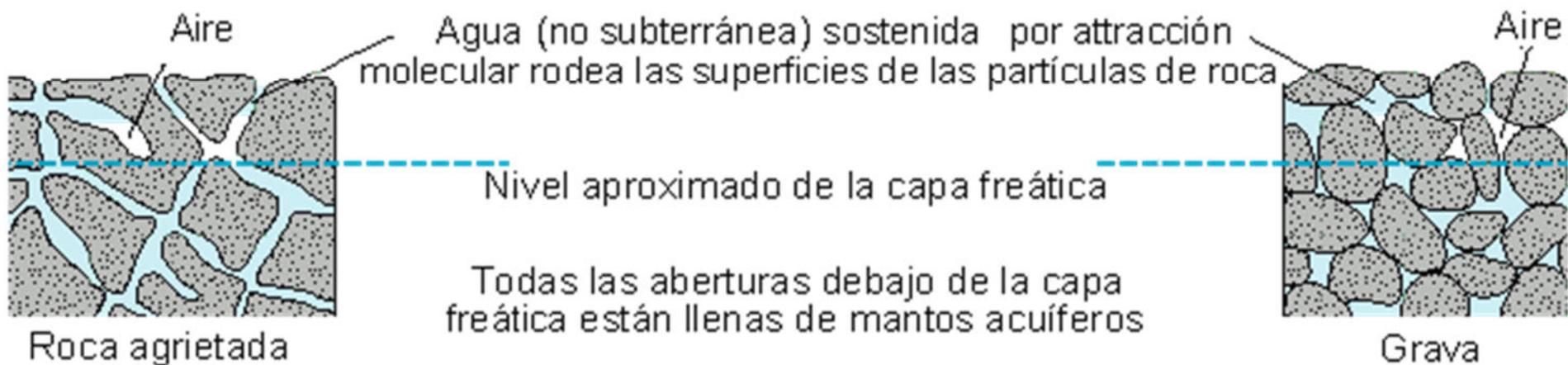
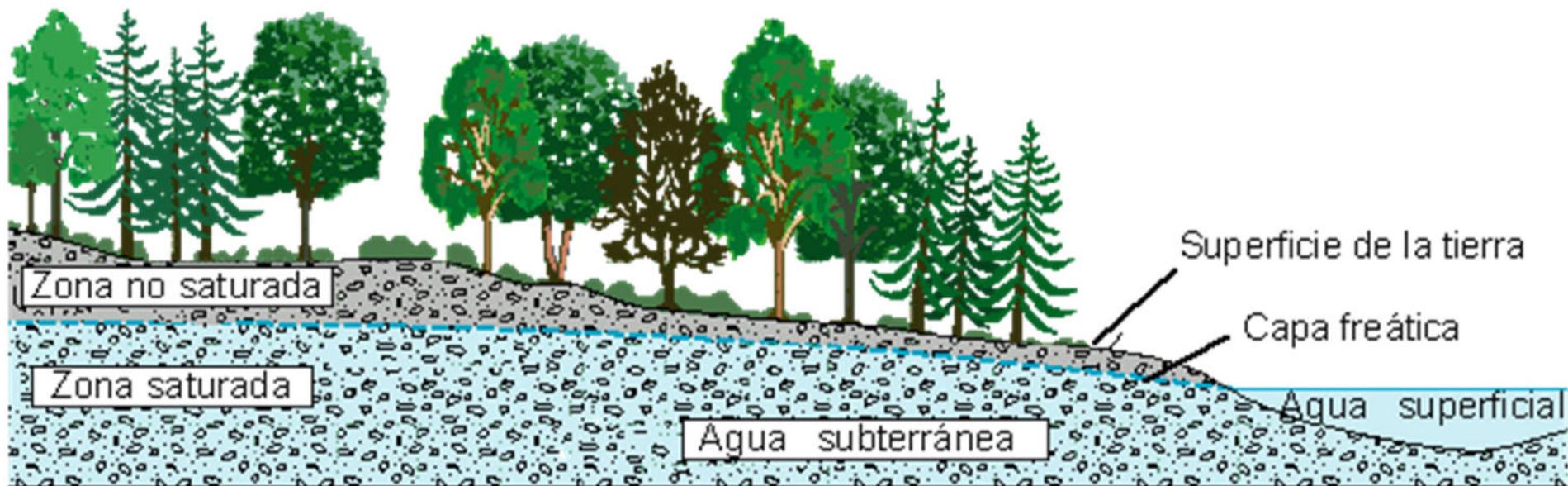
- **Agua subterránea:** porción de agua no retenida por el suelo que percola en profundidad hasta llegar a la **zona saturada**.
Depende de la geología y del clima
Almacenada en formaciones geológicas: capas de rocas o sedimentos.



Aguas subterráneas



Geología aplicada



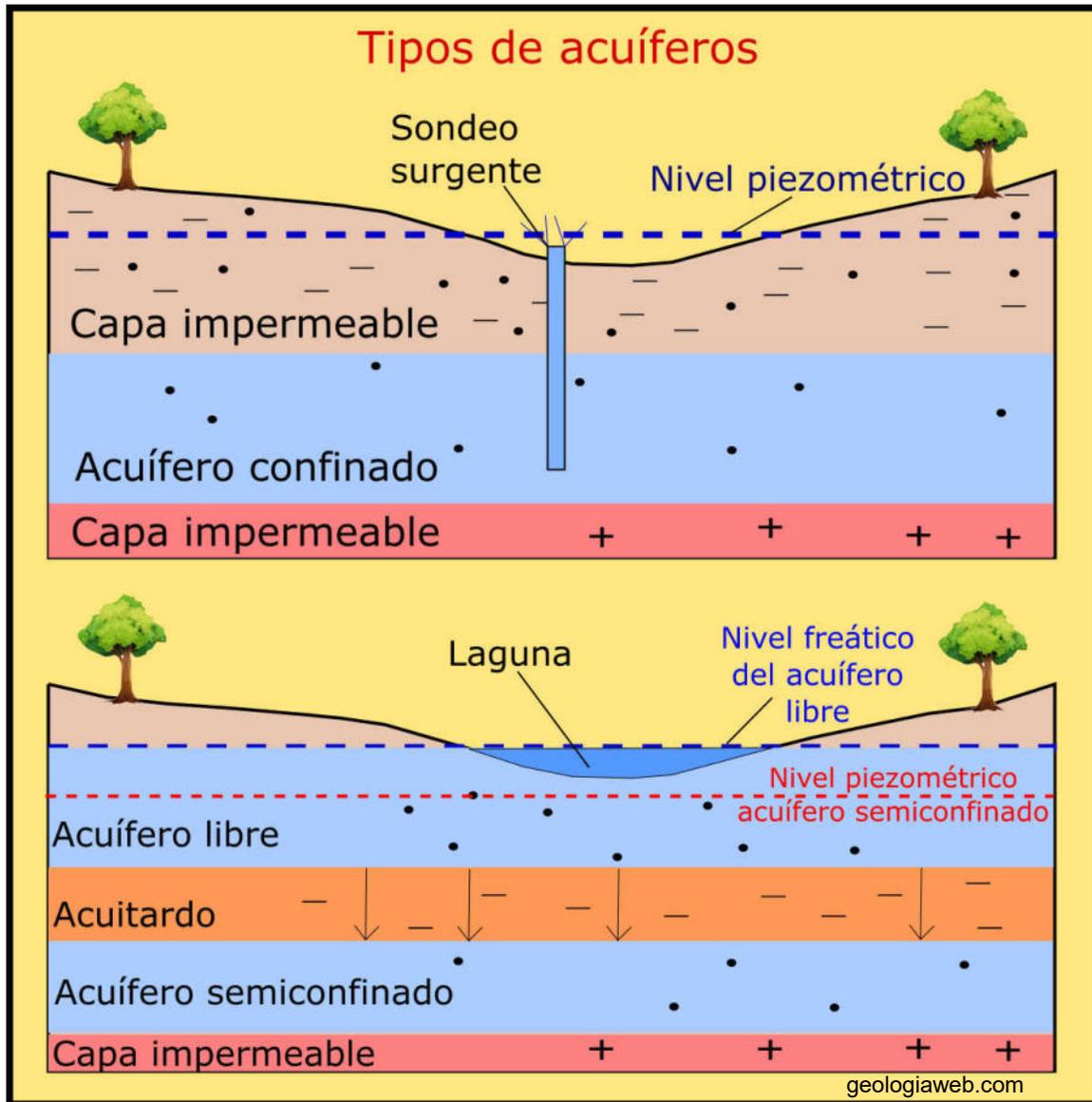
Agua subterránea



Los estratos de roca o sedimentos pueden actuar como:

- **Acuífero:** capacidad de recibir, almacenar y transportar agua. Altas permeabilidad y porosidad primaria o secundaria e importante interconexión de poros o fracturas. Explotable. Ej.: arenas, gravas, granitos fracturados o cualquier otra roca compacta con fracturación.
- **Acuitardo:** capacidad de almacenar agua y moderada a baja permeabilidad. Transmiten agua lentamente a acuíferos adyacentes. Ej.: arenas arcillosas, arenas limosas, limos, rocas compactas poco fracturadas.
- **Acuícludo:** muy baja permeabilidad aunque contiene agua. No explotables. Ej.: arcillas, arcillas limosas.
- **Acuífugo:** unidades que no contienen ni transmiten agua, baja proporción de vacíos interconectados. Ej.: granitos y otras rocas compactas.

Agua subterránea

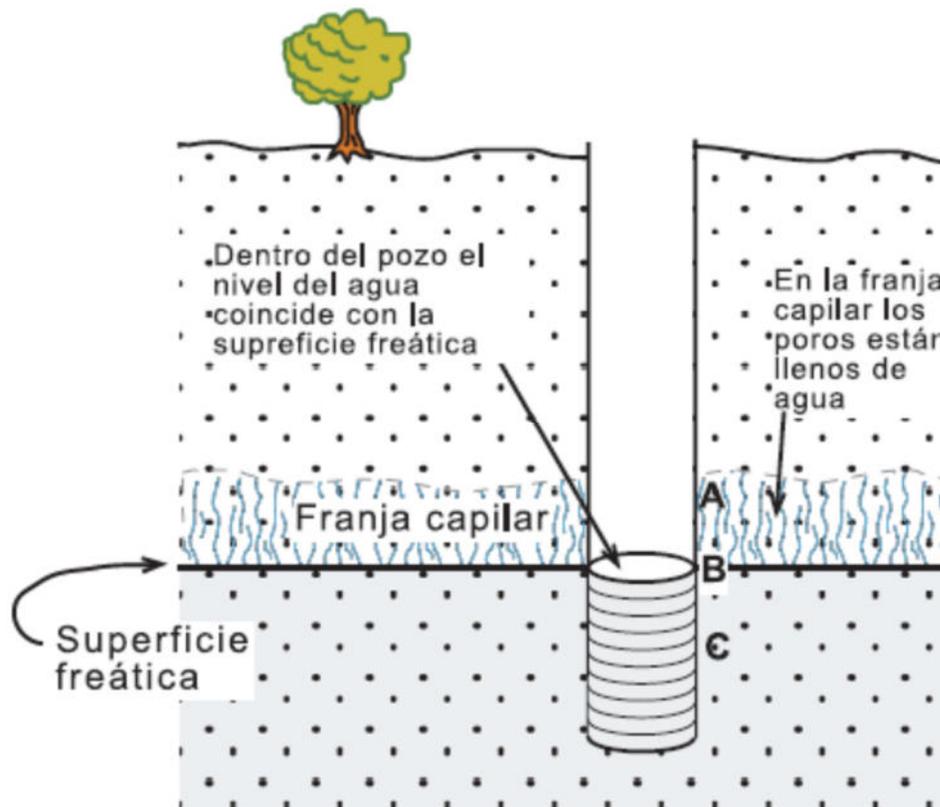


- **Acuífero libre o freático:** límite superior (techo) coincide con la superficie freática $\rightarrow P_{\text{agua}} = P_{\text{atm}}$
Espesor varía con las oscilaciones de la superficie freática: espesor saturado
- **Acuífero confinado:** limitado en su base y techo por formaciones impermeables $\rightarrow P_{\text{agua}} > P_{\text{atm}}$ Nivel de agua coincide con el nivel piezométrico
Espesor fijo = espesor de la formación geológica que lo constituye
- **Acuífero semiconfinado:** limitado por un acuitardo en el techo y un acuicludo en la base. Recarga desde el acuitardo $\rightarrow P_{\text{agua}} > P_{\text{atm}}$ Nivel de agua corresponde al nivel piezométrico

Agua subterránea



- **Superficie freática:** superficie formada por los puntos en que $P_{\text{agua}} = P_{\text{atm}}$
- **Nivel freático:** punto en la superficie freática en el que $P_{\text{agua}} = P_{\text{atm}}$. El nivel de agua alcanzado en un pozo, en un acuífero libre, coincide con el nivel freático
- **Zona saturada:** por debajo de la superficie freática. Todos los **poros y fisuras están llenos de agua**



$$A: P_{\text{agua}} < P_{\text{atm}}$$

$$B: P_{\text{agua}} = P_{\text{atm}}$$

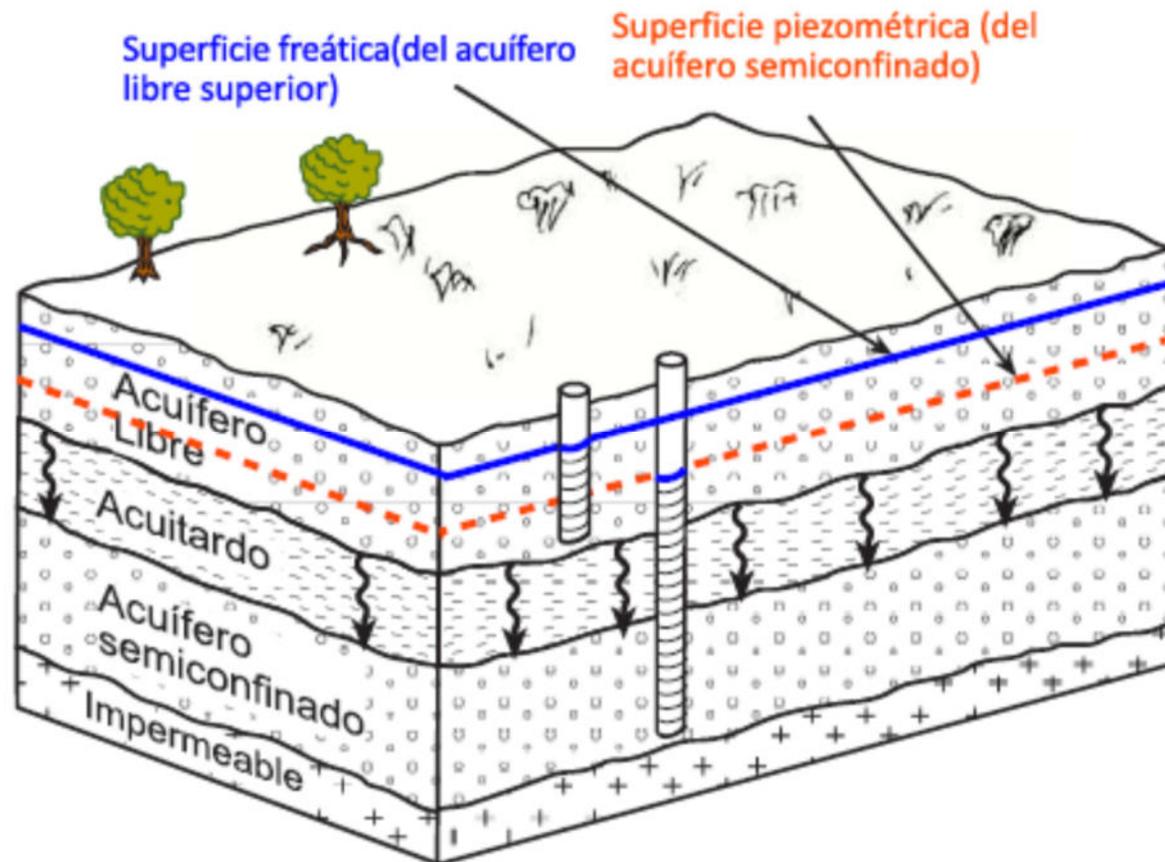
$$C: P_{\text{agua}} > P_{\text{atm}}$$

Agua subterránea

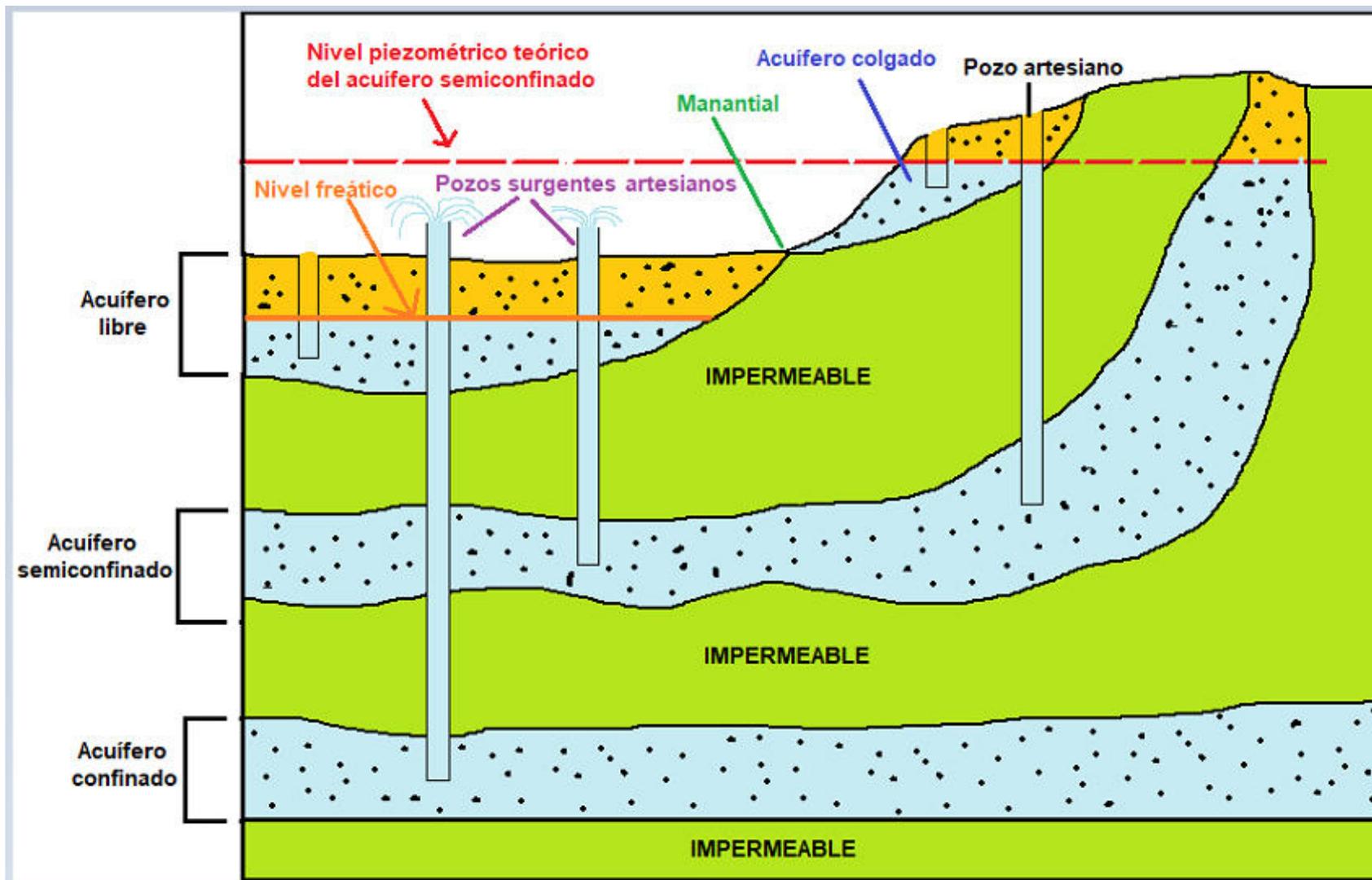


Nivel piezométrico: cota que alcanzaría el agua en un pozo al equilibrarse con la presión atmosférica en un acuífero confinado o semiconfinado

Superficie piezométrica: superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua ($P_{\text{agua}} = P_{\text{atm}}$) si se hicieran infinitas perforaciones en un acuífero confinado o semiconfinado



Agua subterránea



http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/07022019/78/es-an_2019020712_9084331/42acuferos_estructura_y_tipos.html

Donde la superficie piezométrica está por encima de la topográfica hay surgencia de agua: manantiales y, en caso de perforaciones, pozos surgentes

Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día)



		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁵	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1 a 50				
	Arena fina	0,02 a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
	Arcilla	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷		
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, dolomías	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed.(Shale) fracturadas/alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁵
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
	Gabro alterado	0,05 a 0,3				

Bibliografía



Básica

- **Tarbuck. Ciencias de la Tierra. Pearson***
- **Walthan. Foundations of Engineering Geology. Spon Press**

Complementaria

- Bell. Engineering Geology. Elsevier
- Blyth. A Geology for Engineers. Elsevier
- Goodman. Engineering Geology. Wiley
- Price. Engineering Geology. Springer

***Cap.: 1, 2, 3, 4, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 17**