

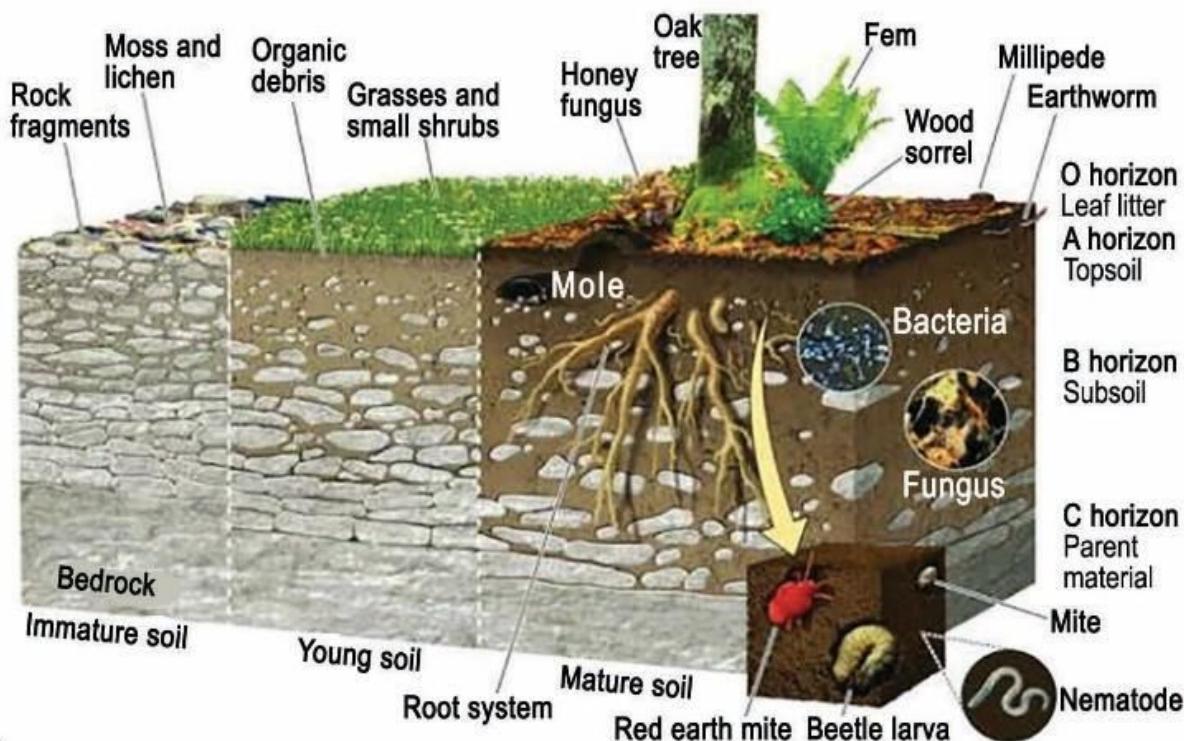
Meteorización: procesos, perfiles y geoformas

Este documento presenta los conceptos fundamentales de la meteorización abarcando desde los procesos físico-químicos hasta la clasificación de perfiles para ingeniería.

La meteorización es la alteración *in situ* de las rocas y minerales en la superficie de la Tierra (o cerca de ella) en respuesta a las condiciones físicas, químicas y biológicas. De acuerdo con Anon es la desintegración (física) y descomposición (química) de la roca en su lugar de origen, sin un transporte significativo del material resultante.

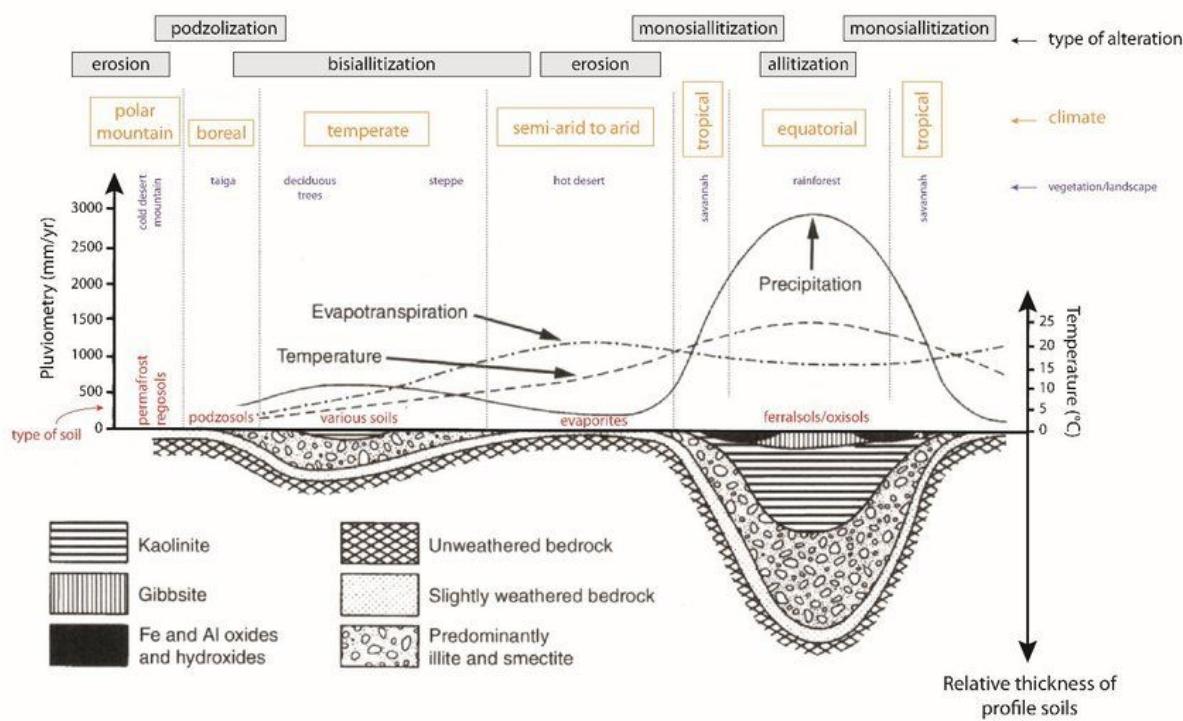
La causa fundamental es el desequilibrio termodinámico. Las rocas, especialmente las ígneas y metamórficas, se forman a altas temperaturas y presiones en el interior de la Tierra, donde son estables. Cuando el levantamiento tectónico y la erosión las exponen en la superficie, se encuentran en un ambiente radicalmente diferente (baja T°, baja P°, alta O₂, alta H₂O). En estas nuevas condiciones, sus minerales constituyentes son inestables y reaccionan químicamente para alcanzar un nuevo estado de equilibrio, transformándose en minerales más estables en la superficie (como las arcillas).

Soil Formation Over Time

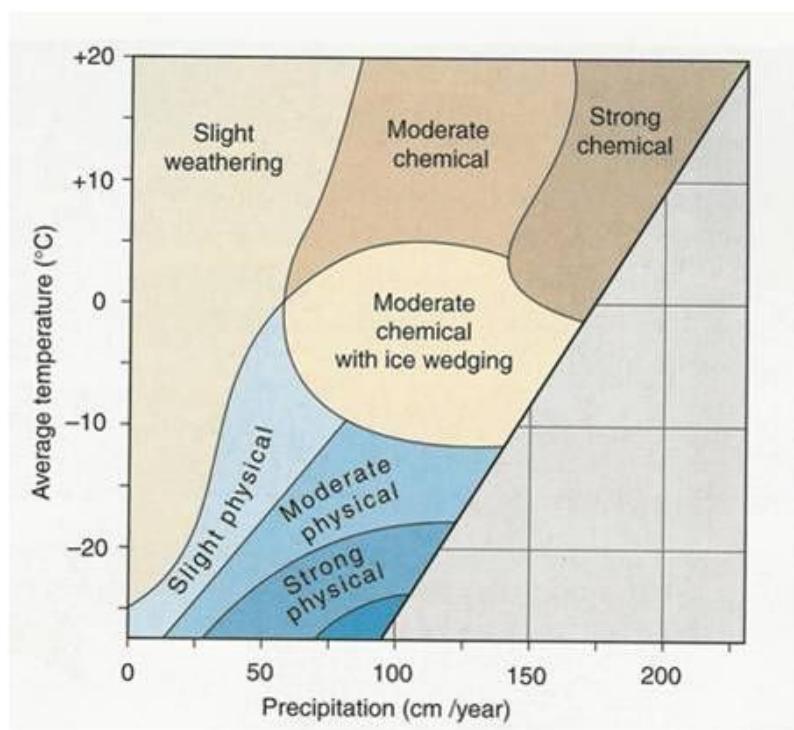


El clima es el motor de la meteorización.

- **Temperatura:** Controla la tasa de las reacciones químicas (la regla de van't Hoff sugiere que la tasa se duplica por cada 10°C de aumento). También habilita procesos físicos como la gelificación.
- **Precipitación (Agua):** Es el **agente** principal. Actúa como el solvente universal, transporta reactivos (CO₂ disuelto, O₂) y elimina los productos de la reacción (lixiviación).
-



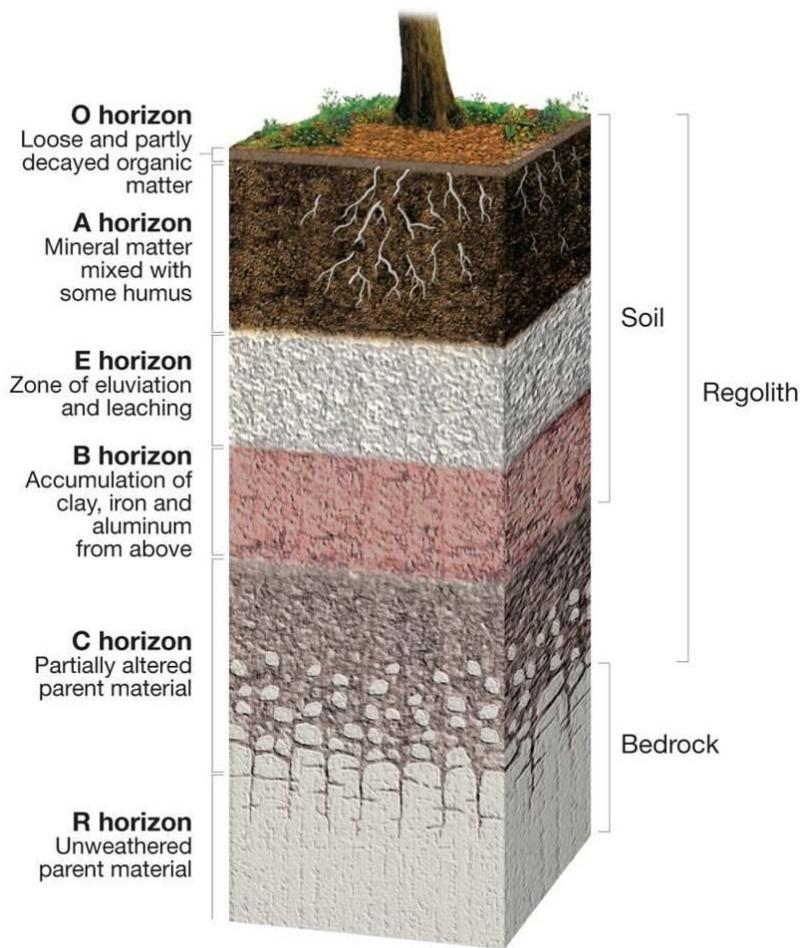
Un clima cálido y húmedo (tropical) maximiza la meteorización química, mientras que un clima frío y moderadamente húmedo (periglacial) maximiza la meteorización física.



1. Perfil de meteorización

- Perfil de Meteorización:** Es la secuencia vertical completa de material alterado, desde la roca fresca (R) en la base hasta el material más alterado en la superficie. Puede tener decenas de metros de espesor.
- Suelo:** Es la parte superior, biológicamente activa, del perfil de meteorización. Incluye los horizontes O, A y B, donde la materia orgánica se acumula y la estructura original de la roca ha sido destruida y reorganizada por procesos pedogenéticos.

La **meteorización** es el proceso destructivo de alteración de la roca madre. Es el primer paso y el *insumo* para la formación del suelo. La **formación de suelos (pedogénesis)** es un proceso constructivo y organizativo. Implica la meteorización, pero añade cuatro factores más (Clima, Organismos, Relieve, Tiempo) que actúan sobre el material parental (el producto de la meteorización) para crear horizontes estructurados y biológicamente activos.



En resumen: todo suelo es parte de un perfil de meteorización, pero no todo perfil de meteorización (especialmente las partes profundas como el saprolito) se considera "suelo" en el sentido pedológico.

2. Suelos In Situ y Suelos Transportados

- **Suelos In Situ (Residuales):** Son aquellos que se forman directamente sobre su roca madre. El perfil es coherente, pasando gradualmente de suelo a roca alterada y a roca fresca.
- **Suelos Transportados:** Son aquellos formados sobre un material parental que fue transportado y depositado por un agente geológico (agua, viento, hielo, gravedad). Ejemplos: suelos aluviales (ríos),

coluviales (gravedad), eólicos (loess).

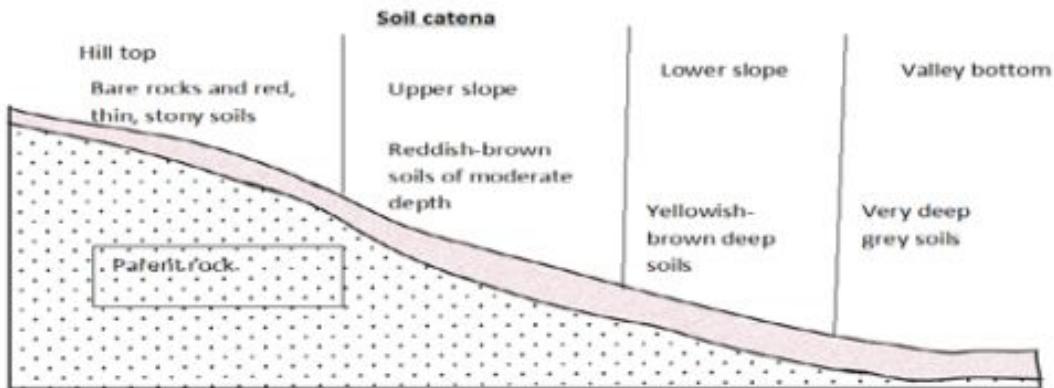
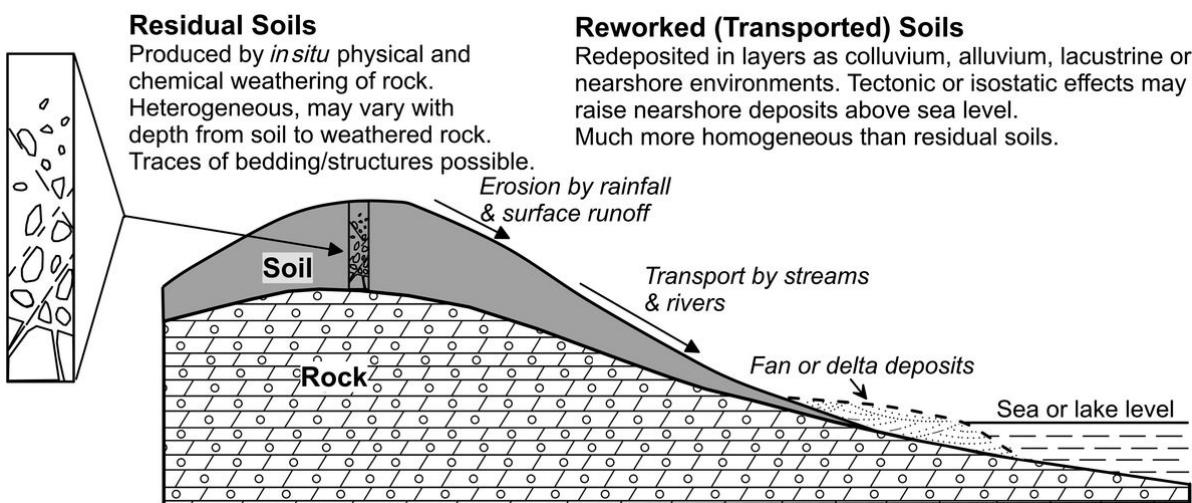


Figure 7.185: Soil catena

Una **catena** (o toposecuencia) es una secuencia de tipos de suelo o perfiles de meteorización que cambian sistemáticamente a lo largo de una ladera. Refleja la influencia del relieve en la meteorización.

- **Cima:** Suelos delgados, lixiviados (zona de pérdida neta).
- **Media Ladera:** Perfiles más desarrollados, con posible transporte (coluvión).
- **Base de la Ladera:** Suelos gruesos, de acumulación (zona de ganancia neta de agua y sedimentos), a menudo hidromórficos (saturados).
-



3. Métodos de descripción de perfiles de meteorización (Ingenieril)

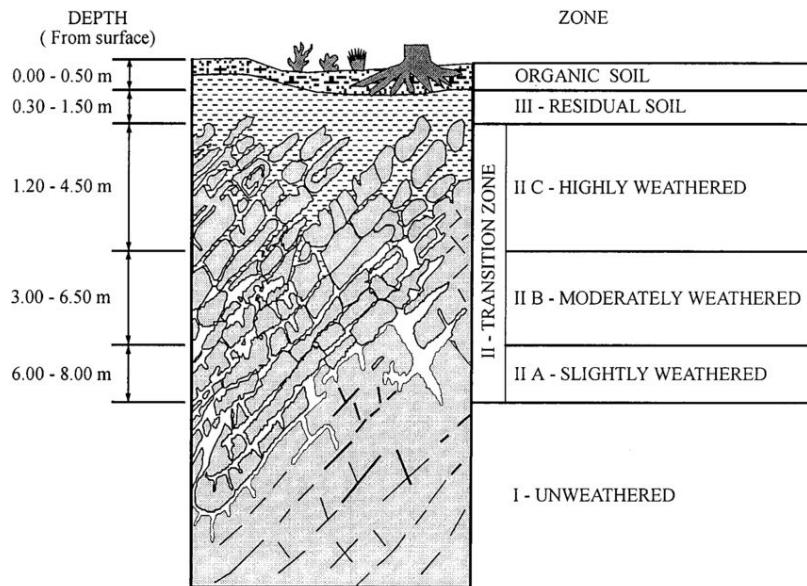
Para fines de ingeniería geotécnica, es crucial clasificar el *grado* de meteorización, ya que controla las propiedades mecánicas de la masa rocosa. La clasificación más utilizada (basada en Little, 1969) divide el perfil en seis grados:

- **Grado VI (Suelo Residual):** La fábrica de la roca ha sido completamente destruida y reemplazada por una estructura de suelo.
- **Grado V (Roca Completamente Meteorizada - Saprolito):** Toda la roca está convertida en suelo, pero la **fábrica original (textura y estructura) de la roca se conserva**.

- Grado IV (Roca Altamente Meteorizada):** La mayor parte de la roca está alterada; la fábrica original se preserva, pero el material se puede deshacer a mano.
- Grado III (Roca Moderadamente Meteorizada):** Decoloración penetra la matriz; la roca intacta se debilita.
- Grado II (Roca Ligeramente Meteorizada):** Decoloración en discontinuidades; roca intacta aún fuerte.
- Grado I (Roca Fresca - R):** Sin signos visibles de meteorización.
-

WEATHERING PROFILE		DESCRIPTION
SOIL	VI Residual soil	Soil material with complete disintegration of texture, structure and mineralogy of the parent rock.
ROCK AND SOIL	V Completely weathered	Rock is totally discoloured and decomposed and in a friable condition with only fragments of the rock texture and structure preserved. The external appearance is that of a soil.
	IV Highly weathered	Weathering extends throughout rock mass and the rock material is partly friable. Rock has no lustre. All material except quartz is discoloured. Rock can be excavated with geologist's pick.
	III Moderately weathered	Slight discolouration extends through the greater part of the rock mass. The rock is not friable (except in the case of poorly cemented sedimentary rocks). Discontinuities are stained and/or contain a filling comprising altered materials.
ROCK	II Slightly weathered	Penetrative weathering developed on open discontinuity surfaces but only slight weathering of rock material. Discontinuities are discoloured and discolouration can extend into rock up to a few mm from discontinuity surface.
	I Unweathered (fresh)	No visible signs of weathering. Rock fresh, crystals bright. Few discontinuities may show slight staining.

El suelo residual corresponde al horizonte VI donde se ha perdido la estructura y textura de la roca parental. Mientras el suelo saprolítico corresponde al horizonte V, donde el material ya es un suelo geotécnicamente (se comporta como un suelo), pero visualmente aún retiene las estructuras de la roca original (vetas, foliación, etc.) y textura.

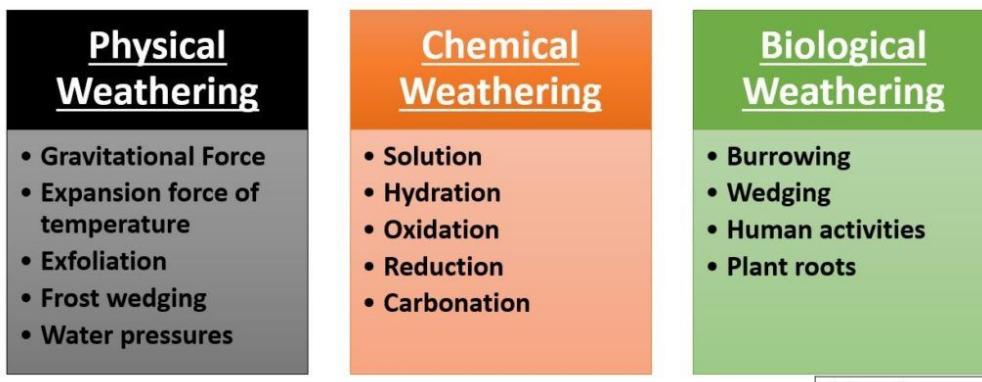


(Modified from Deere and Patton 1971)

4. Tipos de Meteorización

La meteorización se divide en tres tipos principales que actúan en conjunto:

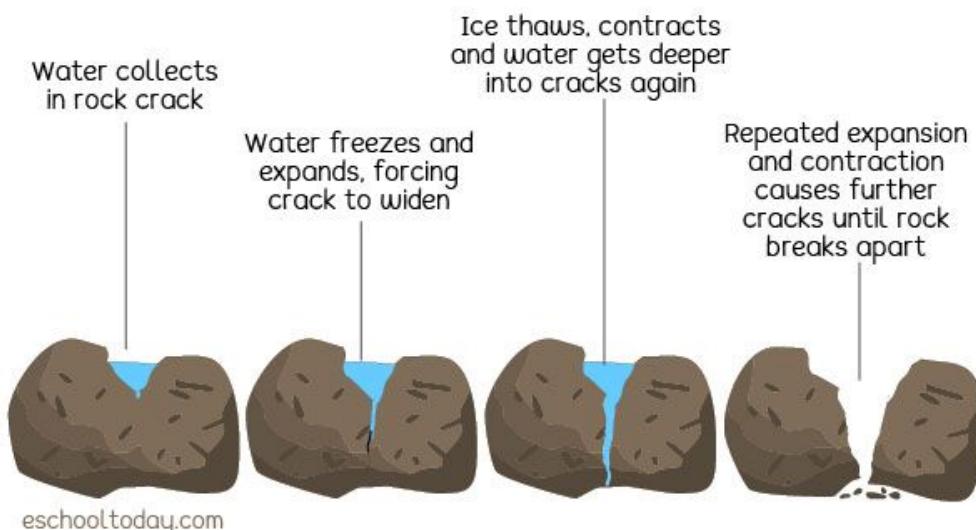
- Física (Mecánica):** Desintegración sin cambio químico.
- Química:** Descomposición con cambio químico.
- Biológica:** Procesos físicos o químicos mediados por organismos (ej. raíces, ácidos orgánicos).



5. Meteorización Física

Aumenta el área superficial, facilitando la meteorización química.

- Gelifracción (Frost Wedging):** El proceso más efectivo. El agua en las fisuras se congela, se expande (~9%) y actúa como una cuña, rompiendo la roca. Produce depósitos angulosos llamados **gelifractos** o **derrubios de talud**.



eschooltoday.com

- **Exfoliación (Descompresión):** Ocurre en rocas masivas (ej. granitos) que se formaron a gran profundidad. Al ser exhumadas por la erosión, se expanden y se fracturan en grandes lajas (*sheeting*) paralelas a la superficie, formando **domos de exfoliación**.



- **Haloclastia (Crecimiento de Sales):** El crecimiento de cristales de sal (ej. halita, yeso) en los poros de la roca ejerce presión y la desintegra. Común en climas áridos y costeros.

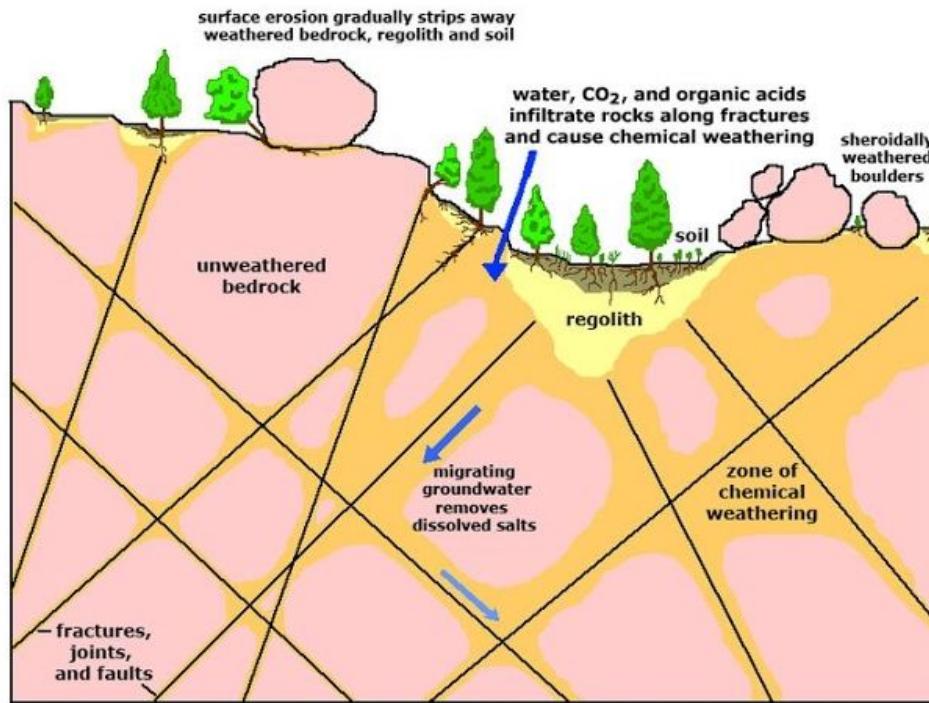


- **Termoclastia:** La expansión y contracción diferencial de los minerales en la roca debido a cambios bruscos de temperatura (ej. desiertos, incendios).



6. Meteorización Química

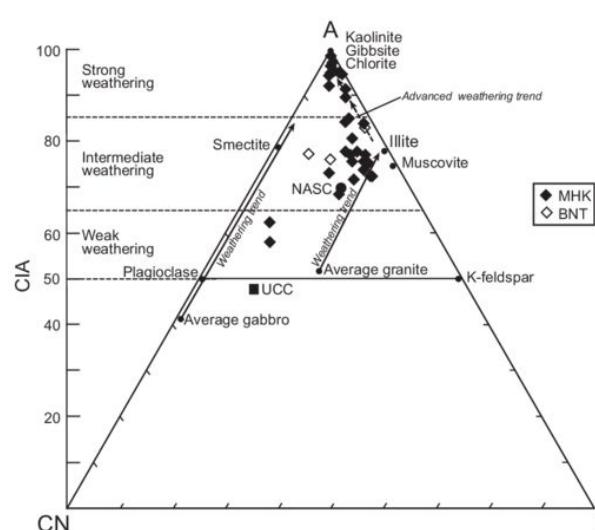
Es la descomposición de los minerales. El **agua** es el agente esencial: (i) Es el **solvete** (para disolución). (ii) Es el **medio de transporte** (trae ácidos, O₂; retira productos). (iii) Es un **reactivo** directo (en la hidrólisis y la hidratación).



Durante la meteorización química, los iones se liberan de la red cristalina. Su movilidad (facilidad para ser lixiviados por el agua) varía desde **Muy Móviles**: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} (se lavan fácilmente), **Poco Móviles**: Si^{4+} (relativamente inmóvil, aunque puede disolverse como H_4SiO_4), hasta **Inmóviles (Residuales)**: Al^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} . Esta movilidad diferencial es la razón por la cual los suelos tropicales muy meteorizados (Oxisoles) son esencialmente concentraciones de óxidos de Hierro y Aluminio (laterita, bauxita).

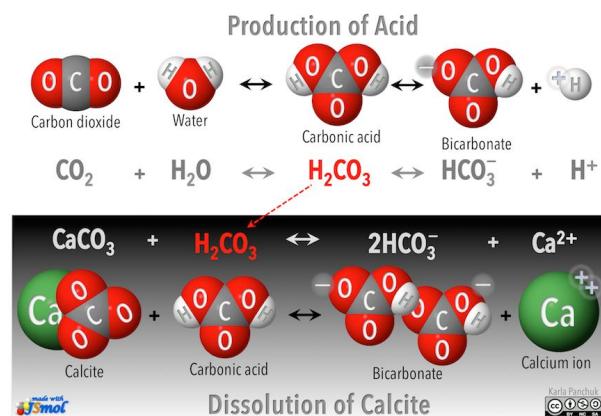
Los **Índices de Meteorización Química** cuantifican el grado de lixiviación de cationes móviles.

- **CIA (Chemical Index of Alteration):** Mide la conversión de feldespatos a arcillas de aluminio.
 - $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] * 100$ (en moles; CaO^* es solo el de los silicatos).
 - *Roca Fresca (Granito)* $\approx 50-55$
 - *Suelo muy meteorizado (Kaolinita pura)* ≈ 100
- **Diagrama A-CN-K:** Un diagrama ternario ($A = \text{Al}_2\text{O}_3$; $CN = \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$; $K = \text{K}_2\text{O}$) que muestra la **trayectoria de meteorización** de una roca a medida que pierde cationes.
-



7. Disolución y Ambiente Kárstico

La disolución es la disociación de minerales en sus iones en un solvente (agua). Es el proceso dominante en rocas solubles (carbonatos, evaporitas).

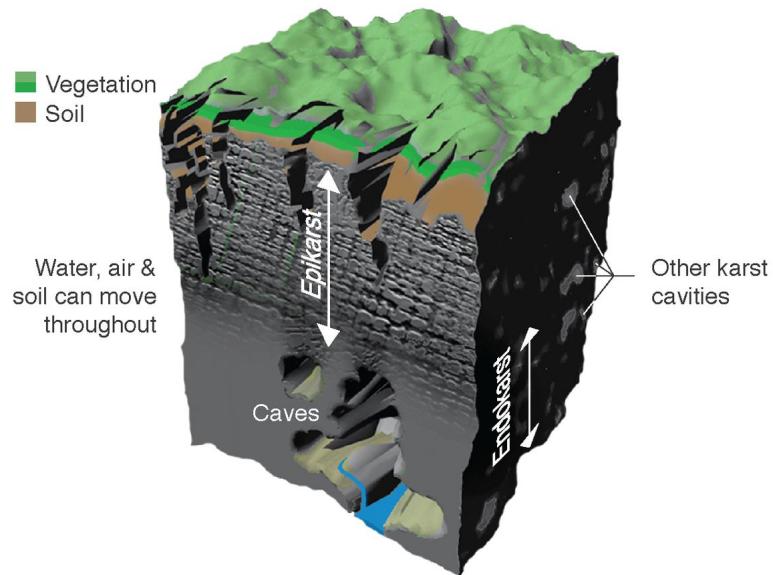


- **Karst:** Es un tipo de paisaje formado por la disolución de la roca subyacente.
- **Pseudokarst:** Geoformas similares al karst, pero formadas por procesos no disolutivos (ej. tubos de lava, cuevas en hielo).



Exokarst (Formas Superficiales)

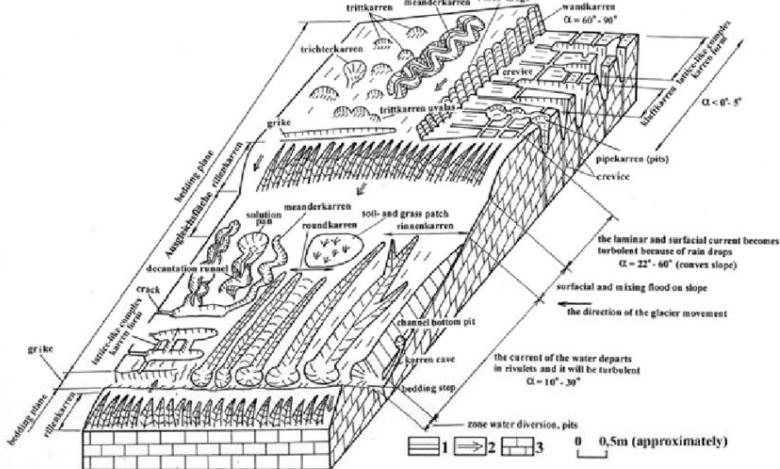
- **Epikarst:** La zona superficial de la roca carbonatada (los primeros metros), intensamente disuelta y muy porosa.



- **Pavimento (Limestone Pavement):** Superficies planas de roca desnuda disectadas por fracturas disueltas.

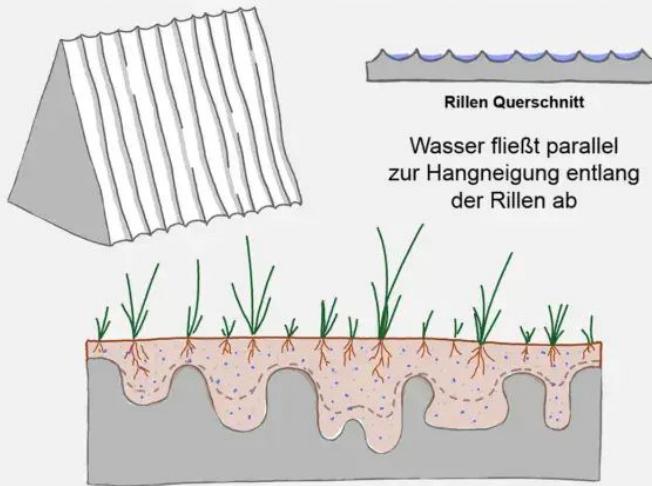


- **Karren (Lapiaces):** Microformas de disolución sobre la roca desnuda (surcos, acanaladuras, pináculos).



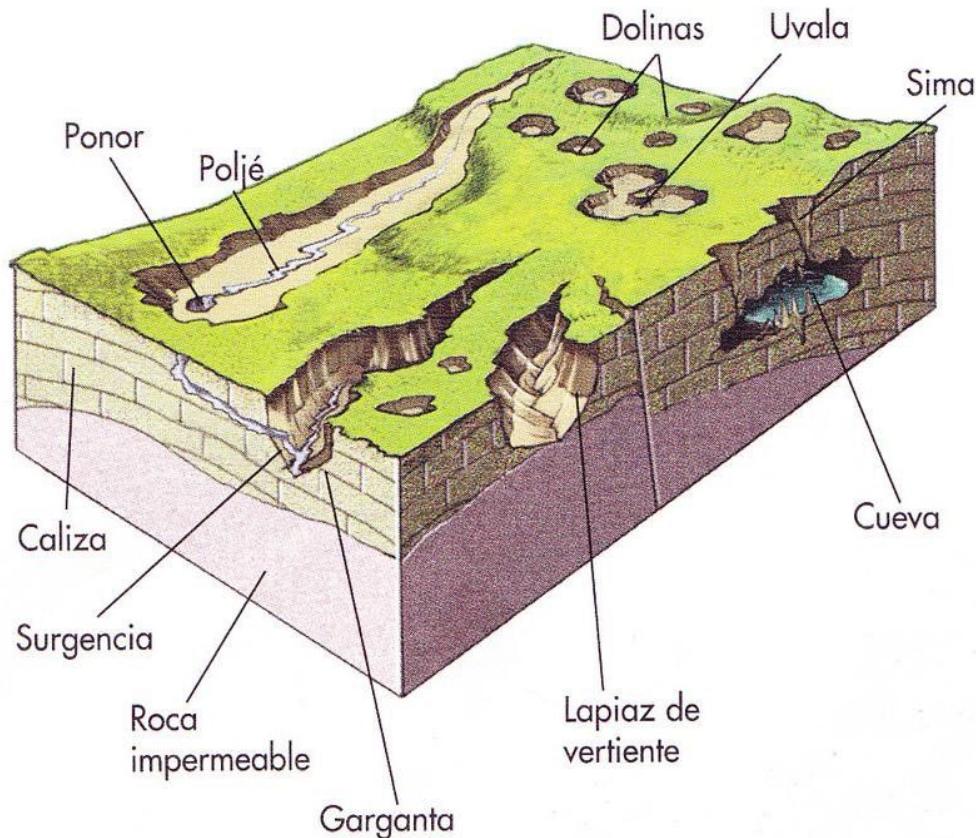
Rillenkarren (nackter Karst)

Scharfkantige Rillen auf geneigter Gesteinoberfläche



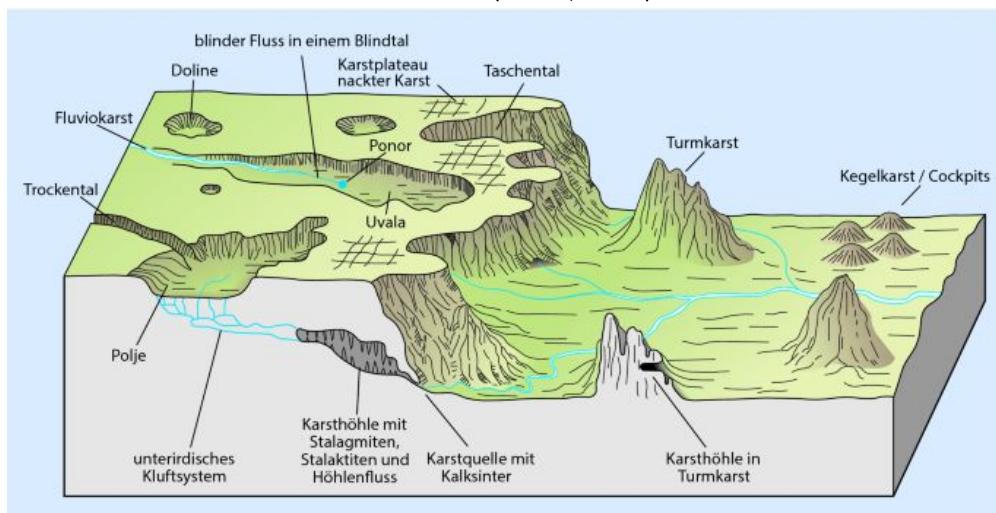
Rundkarren (bedeckter Karst) CO_2 -Konzentration im feuchten Boden führt zu gleichmäßiger Lösung und runden Formen

- **Dolina:** Depresión cerrada circular. Puede ser de disolución (hundimiento lento) o de colapso (caída del techo de una cueva).
- **Uvala:** Una depresión compuesta, grande e irregular, formada por la coalescencia (unión) de varias dolinas.
- **Poljé:** Una depresión kárstica muy grande, de fondo plano (relleno de sedimentos) y bordes escarpados, a menudo controlada por la tectónica.



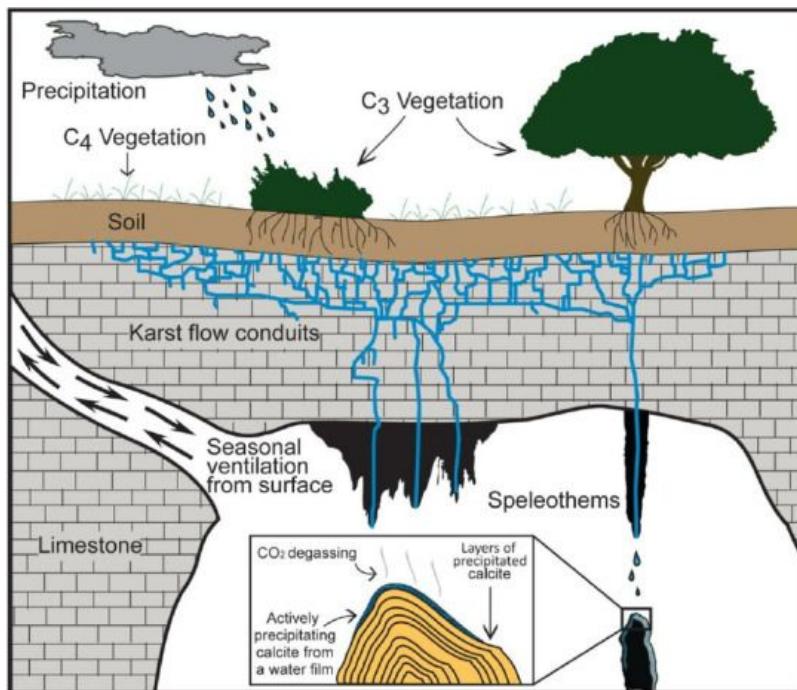
- **Karst Tropical (Cónico y de Torres):**

- **Kegelkarst (Karst Cónico):** Paisaje de colinas cónicas regulares (Alemania).
- **Cockpits:** Las depresiones en forma de estrella entre las colinas del Kegelkarst (Jamaica).
- **Turmkarst (Karst de Torres):** Torres de caliza muy empinadas y aisladas (Mogotes), que se elevan desde una llanura aluvial (China, Cuba).

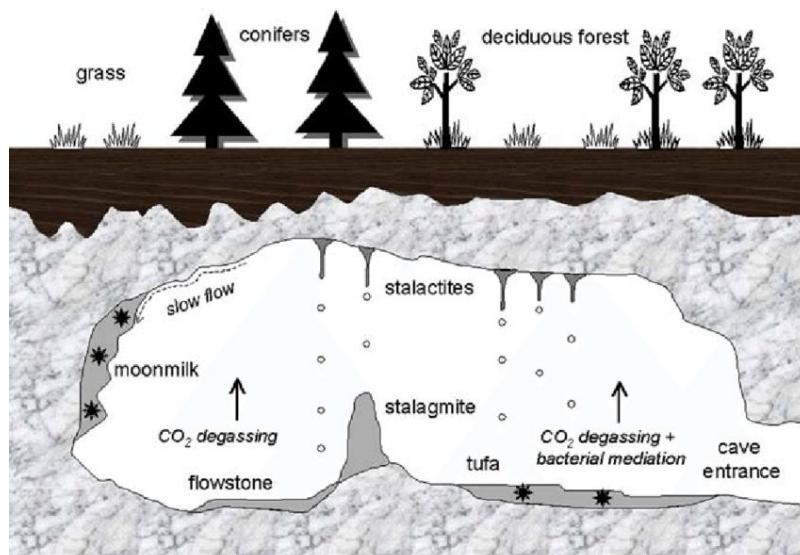


Endokarst (Formas Subterráneas)

Se refiere a las cuevas y sus depósitos (espeleotemas), formados por la precipitación de carbonato de calcio (calcita, aragonito) a partir del agua que gotea.



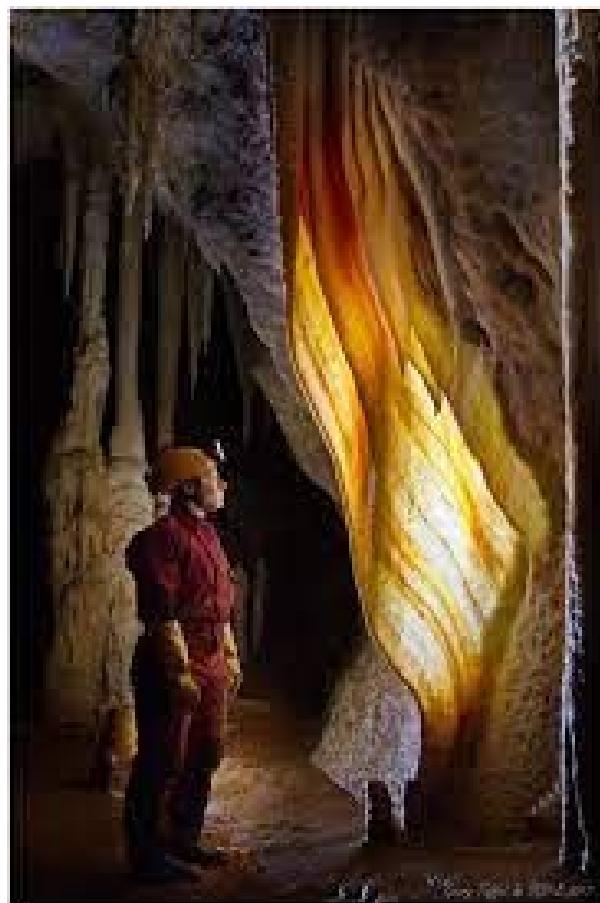
- **Estalactitas:** Crecen desde el techo (hacia abajo).
- **Estalagmitas:** Crecen desde el suelo (hacia arriba).
- **Columnas:** Unión de una stalactita y una stalagmita.



- **Gour (Represas):** Pequeñas represas de calcita que escalonan el suelo de una cueva.



- **Banderas (Draperies):** Depósitos en forma de cortina formados por goteo lateral en una pared inclinada.



- **Helictitas:** Formas excéntricas que crecen en cualquier dirección, desafiando la gravedad (controladas por capilaridad).



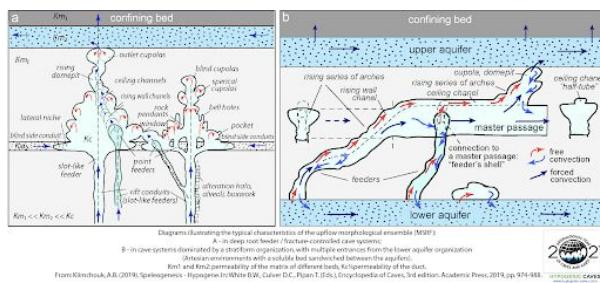
- **Moonmilk:** Precipitados blandos, blancos y pastosos, a menudo mediados por bacterias.



- **Frostwork:** Agregados delicados de cristales de aragonito en forma de aguja.



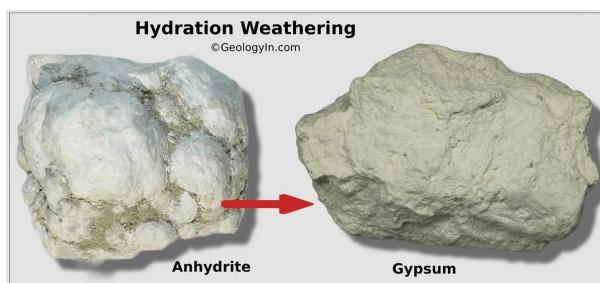
- Karst Hipogénico Un tipo especial de karst donde las cuevas son disueltas por fluidos profundos, calientes y a menudo ácidos (ej. H_2S derivado de hidrocarburos) que ascienden desde abajo, en lugar de ser formadas por agua meteórica (lluvia) que desciende desde la superficie.



8. Hidratación

La absorción de moléculas de agua en la estructura cristalina de un mineral, sin que haya una reacción química mayor. El principal efecto es un aumento de volumen, que genera estrés físico.

- Ejemplo: Anhidrita ($CaSO_4$) + Aqua \rightarrow Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

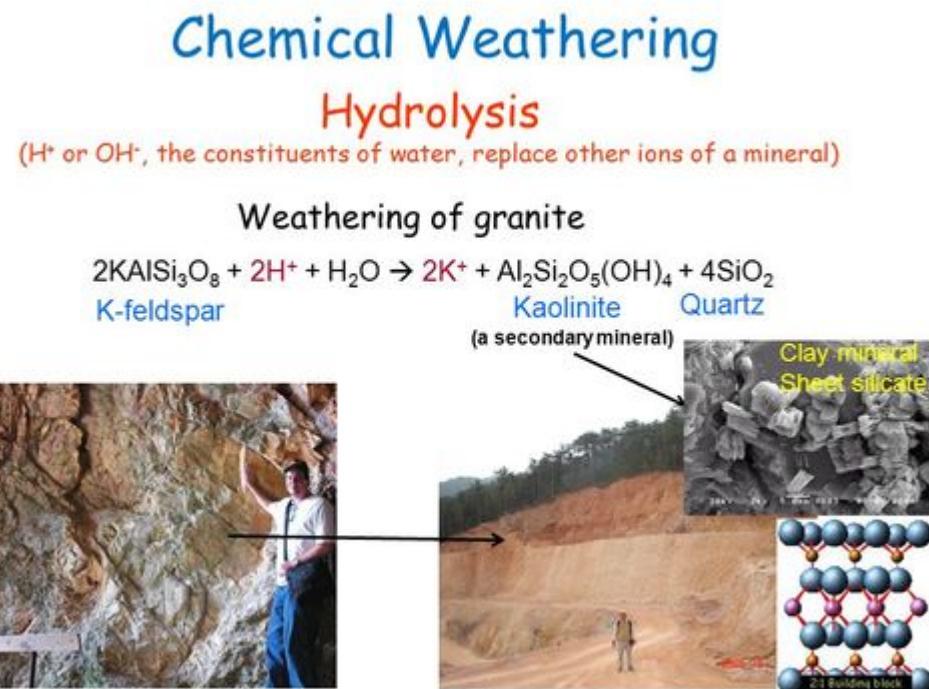


9. Hidrólisis

Es la reacción de meteorización más importante para los silicatos (el 90% de la corteza). Es una reacción química compleja donde un mineral reacciona con el agua, usualmente acidificada por el CO₂ atmosférico (ácido carbónico, H₂CO₃).

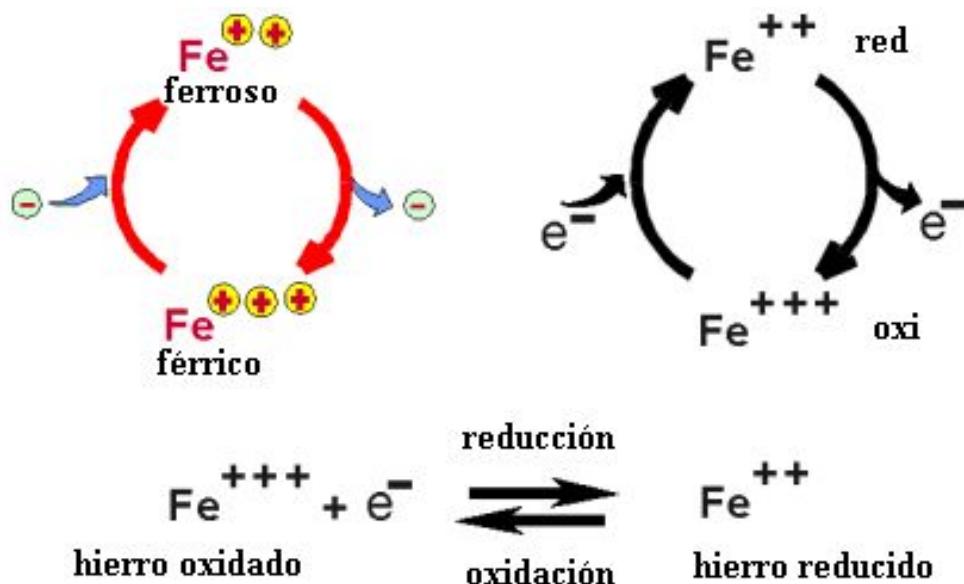
El agua rompe los enlaces del mineral, liberando cationes y sílice, y formando minerales de arcilla como producto residual.

- Reacción Clave (Simplificada): Feldespato + Ácido Carbónico + Agua → **Caolinita (Arcilla)** + Cationes disueltos (K^+ , Na^+) + Sílice disuelta

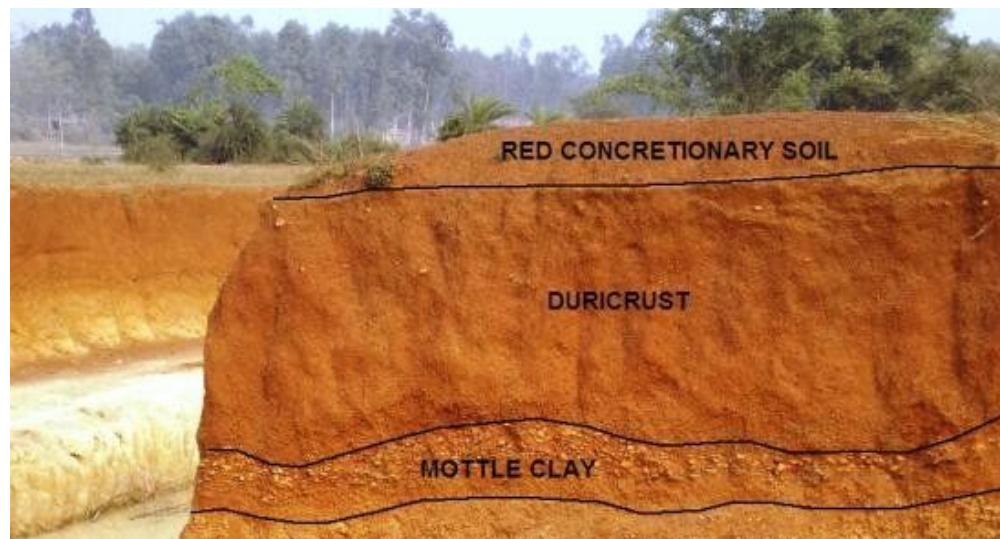
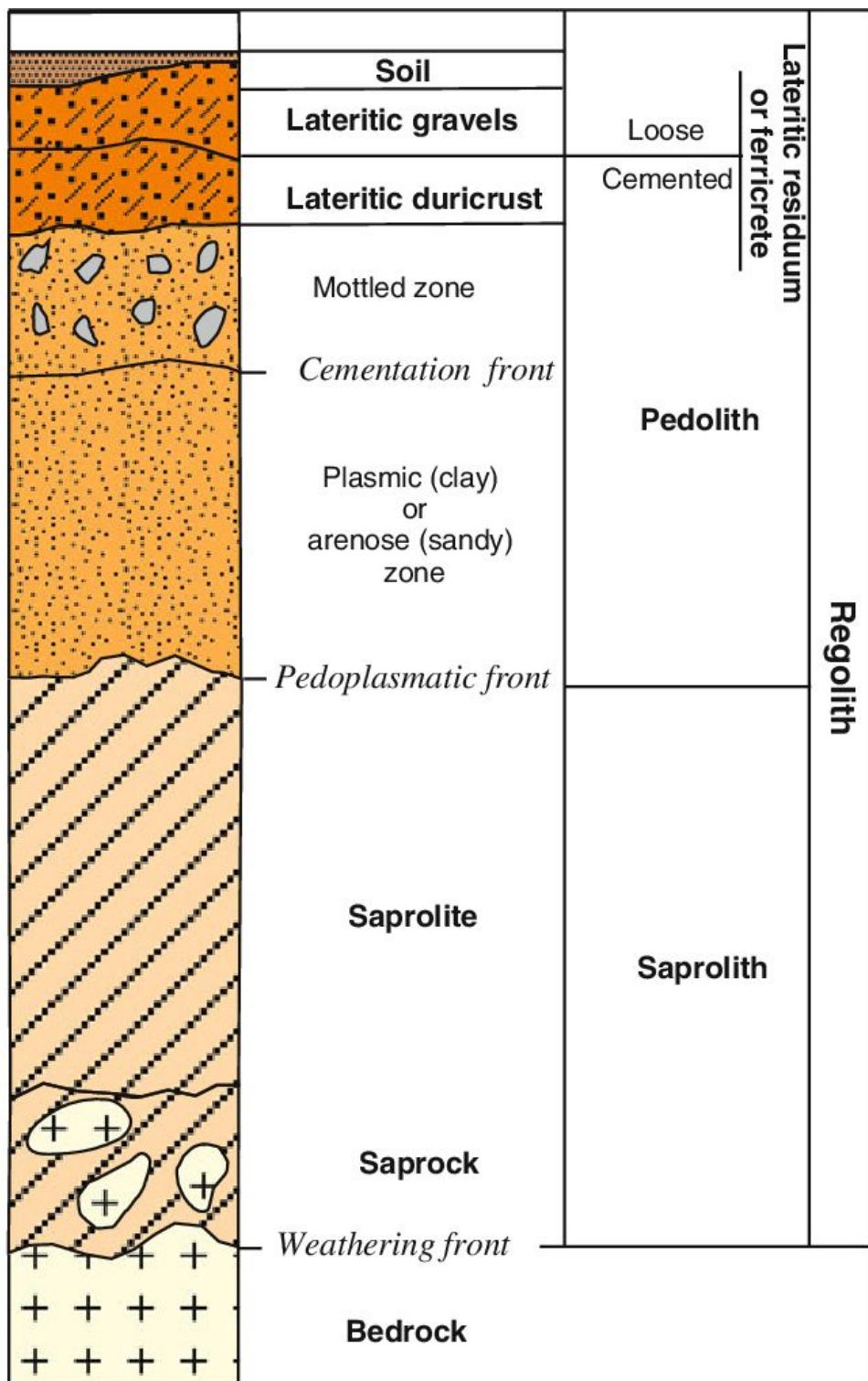


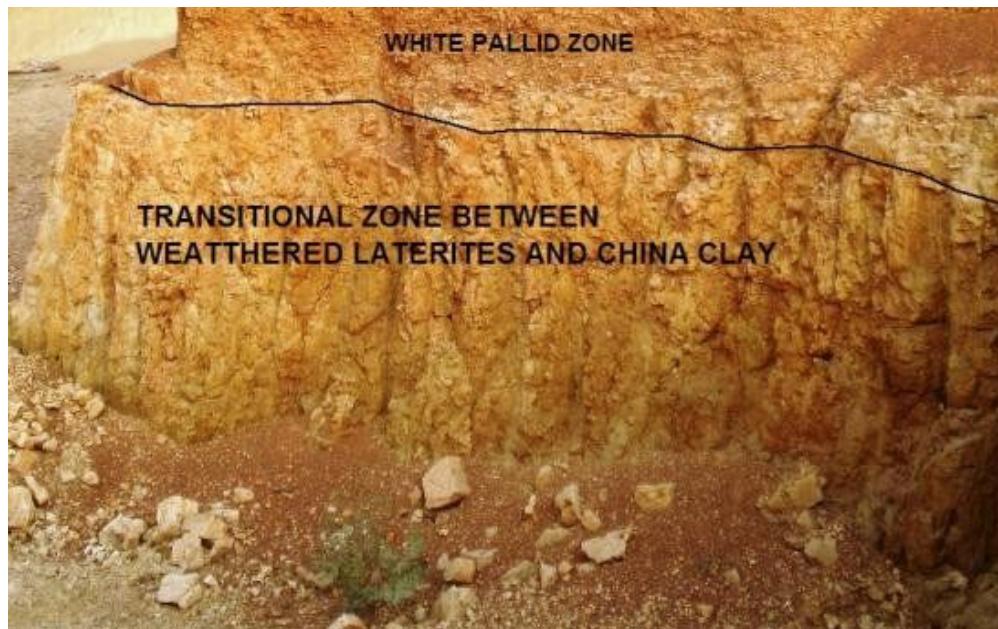
10. Oxidación-Reducción (Redox)

La pérdida (oxidación) o ganancia (reducción) de electrones. Es crucial para elementos con múltiples estados de valencia, especialmente el Hierro (Fe).



- **Reducción (Ambientes anóxicos, saturados):** El Hierro está como Fe²⁺ (**Ferroso**). Es **soluble** y móvil en el agua. Produce colores grises o verdosos en el suelo.
- **Oxidación (Ambientes aireados):** El Hierro está como Fe³⁺ (**Férrico**). Es **insoluble** y precipita como óxidos e hidróxidos (Hematita, Goethita). Produce los característicos colores rojos, ocres y amarillos.
- **Oxisoles (Suelos Lateríticos):** Suelos tropicales profundos, intensamente meteorizados, lixiviados de cationes y sílice, y enriquecidos en óxidos de Fe y Al (residuales).
- **Ferricretes:** Un tipo de *duricrust* formado por la cementación masiva de sedimentos por óxidos de hierro.
- **Duricrust (Costras):** Horizontes superficiales o subsuperficiales endurecidos y cementados. Se forman por dos vías principales:





1. **Por Acumulación Relativa (Lixiviación):** Típico de climas húmedos. Se lava todo el material soluble (sílice, cationes), dejando una concentración residual de los óxidos más insolubles.
 - **Ferricrete** (rica en Fe)
 - **Alcrete** (rica en Al, Bauxita)
2. **Por Acumulación Absoluta (Precipitación):** Típico de climas áridos/semiáridos. El agua subterránea asciende por capilaridad, se evapora y precipita los minerales que lleva disueltos, cementando el suelo.
 - **Calcrete** (Carbonato de calcio)
 - **Silcrete** (Sílice)

