

Tema 5. Los elementos en la Tierra.

- 5.1 Abundancia de los elementos.
- 5.2 Compuestos químicos en la corteza terrestre.
- 5.3 Minerales en la corteza terrestre.
- 5.4 Formación y alteración de los suelos.
- 5.5 Propiedades de los suelos.

5.1 Abundancia de los elementos.

- Los elementos se distribuyen de forma desigual en la Tierra. Algunos elementos, como el O y Si, son los constituyentes mayoritarios de la mayor parte de los minerales; otros, como el He o Au son escasos.
- Se observa que existe un gran rango de abundancia de los elementos que se expande en 10 potencias de 10, entre los más comunes (O, Si) y los menos abundantes (Os, Te, Xe).

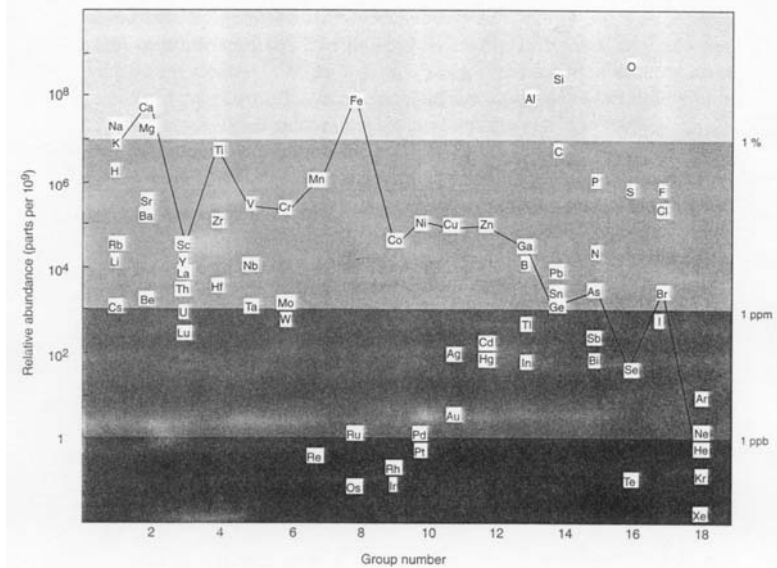


Figura 5.1. Abundancia de los elementos en la corteza terrestre.

- La composición de la superficie de la corteza terrestre no es típica de todo el volumen de la Tierra.
- La composición del manto terrestre se puede obtener a partir de las rocas que se estiman que profundizan en el mismo → Mg y Cr son relativamente más abundantes, mientras que otros metales alcalinos lo son menos.
- La información acerca del núcleo de la Tierra es menos directa → su composición se estima a partir de los análisis efectuados a meteoritos procedentes del espacio.
 - El hierro es el elemento dominante junto con una fracción minoritaria de Ni y otros elementos de transición.
 - Otros elementos metálicos también han de estar presentes en el núcleo, tal y como se presupone a partir de sus densidad y otras propiedades.
 - De los elementos no-metálicos, el S es el predominante, considerándose también la posibilidad de la existencia de C y Si.

- Al considerar la composición global de la Tierra, se puede concluir que algunos elementos se concentran en la superficie (Mg, Na, C), mientras que otros lo hacen en el núcleo (elementos del grupo del Pt).

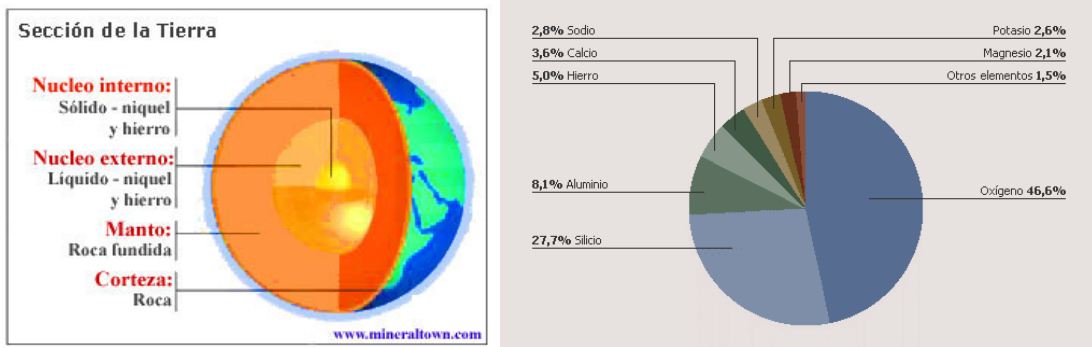


Figura 5.2. Composición del núcleo (izquierda) y la corteza terrestre (derecha).

- La composición de la Tierra resulta muy diferente respecto a la del sistema solar.
 - La mayor parte de la masa del sistema solar se contiene en su cuerpo central, el Sol.
 - La composición del Sol se puede conocer a partir del espectro de la luz solar → líneas espectrales de los elementos.
 - Su composición se ha confirmado a partir del estudio de meteoritos.

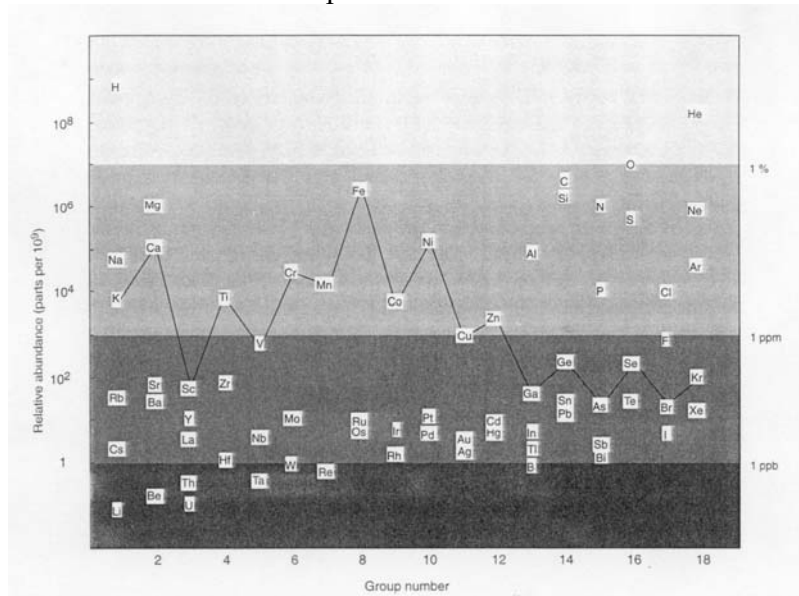


Figura 5.3. Abundancia de los elementos en el sistema solar.

- Los elementos más abundantes en el universo son, claramente, el H y He.
- El resto de elementos se han originado por reacciones nucleares ocurridas en las estrellas.
 - Los núcleos de He se fusionaron para producir C y O, los siguientes elementos más abundantes.
 - Mediante reacciones nucleares subsiguientes se formaron los elementos más pesados.
 - Las proporciones de los elementos se controlan por la relativa estabilidad y reactividad del núcleo atómico.
- De la abundancia de los elementos en el sistema solar se puede concluir:
 - La existencia de una disminución en la abundancia conforme los elementos aumentan en número atómico → los elementos Li, Be y B son una excepción.

- Existe una alternancia en la abundancia, siendo los elementos de número atómico (Z) par más abundantes que los de Z impar.
- Existe un pico pronunciado en la abundancia del Fe, que es el núcleo más estable de cualquier elemento.
- Las diferencias entre la abundancia de los elementos en el sistema solar y la Tierra refleja los procesos químicos que tuvieron lugar cuando los planetas se formaron.
 - Los planetas se formaron a partir de partículas de polvo sólidas que condensaron fuera del material gaseoso nebuloso solar.
 - Los elementos que forman fases sólidas estables, bien metales (Fe, Ni, etc) u óxidos (Al, Si, etc.) condensaron de manera eficiente en el polvo y predominaron en la Tierra.
 - Aquellos elementos presentes como gases volátiles (H₂, gases nobles, CH₄, NH₃) tienen menor abundancia en la Tierra.
 - Las reacciones de síntesis nuclear proporcionaron los elementos primarios que según su comportamiento químico dieron origen a la Tierra en su conjunto.
 - En ella, los elementos se dividieron para dar las diferentes partes de la Tierra.
 - Los fraccionamientos químicos continuos han dado origen a las diferentes composiciones de océanos, atmósfera y depósitos minerales.
- Ciertos rasgos del origen primigenio son importantes en la química de la Tierra → Los elementos que dominan el entorno físico-químico (C, O, Si, S y Fe) son aquellos que se formaron en grandes proporciones en reacciones nucleares, y son generalmente abundantes en el Universo.

5.2 Compuestos químicos en la corteza terrestre.

- Los diferentes tipos de compuestos formados en la corteza terrestre reflejan las características químicas de cada elemento, así como la abundancia relativa de los mismos en las etapas iniciales de formación del planeta.
- La presencia dominante del oxígeno obedece tanto a su gran abundancia como a su alta electronegatividad → se encuentra en la Tierra combinado con la mayoría de los elementos. Así, conforme se formaron los elementos, y la nebulosa solar comenzó a enfriarse, estos reaccionaron con el oxígeno presente en nubes de vapor de agua:

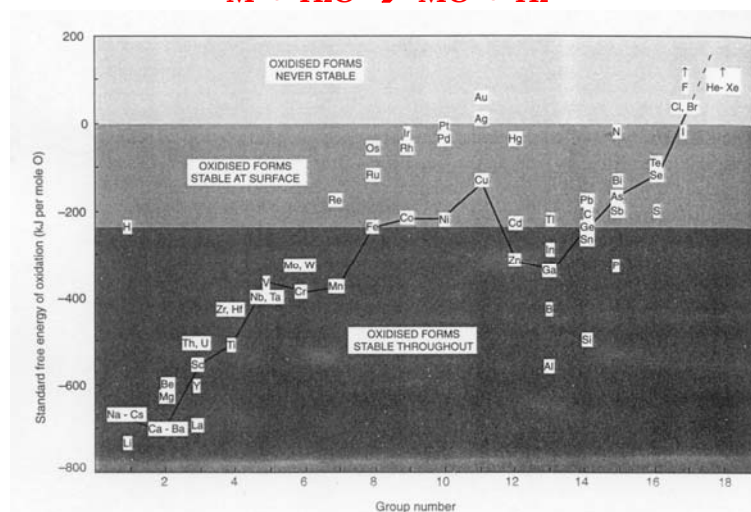


Figura 5.4. Afinidad de los elementos hacia el oxígeno. ΔG_f medida por mol de oxígeno para el elemento y el O₂ a 25 °C de y 1 Atm de presión. El valor expresado se refiere a la forma más estable del óxido del elemento en agua a pH=7.

- La estabilidad de las formas oxidadas de los elementos en la Tierra se puede dividir en tres regiones.
 - La zona inferior contiene elementos tales como Na, Mg y Si que tienen una afinidad más alta hacia el oxígeno que hacia el hidrógeno → La mayoría de estos elementos se encuentran como óxidos.
 - Los elementos de la zona superior poseen óxidos con energía libre de formación positiva, por tanto no son estables → Au, F, Cl, Br, y los gases nobles.
 - Los elementos de la zona media forman óxidos estables en contacto con el oxígeno atmosférico, pero inestables en presencia de hidrógeno → No es de esperar que estos elementos formaran óxidos al enfriarse la nebulosa solar → Incluyen los elementos *siderofílicos* encontrados en el núcleo y los *calcofílicos* que se encuentran en la corteza como sulfuros.
- El C aparece en la zona intermedia, en cambio el 80 % del mismo en la Tierra aparece en la forma oxidada de CO_3^{2-} → El carbón fósil tiene un origen secundario y aparece como consecuencia del proceso de fotosíntesis de las plantas.
- El hierro es el segundo elemento más abundante de la Tierra, y aparece en varias formas químicas: $\text{Fe}(0)$ en el núcleo, Fe^{2+} en el manto y corteza más profunda terrestre, y Fe^{3+} en la superficie.
 - El hierro tiene una afinidad muy parecida tanto para el hidrógeno como para el oxígeno.
 - Cuando la nebulosa se comenzó a enfriar por debajo de $1200\text{ }^\circ\text{C}$ contenía $\text{Fe}(0)$ → Se comenzó a oxidar por reacción con vapor de agua a unos $300\text{ }^\circ\text{C}$ aunque ya se formaron algunos sulfuros → La Tierra se formó por nubes de polvo a diferentes temperaturas que por efecto gravitacional se depositaban en forma de cuerpos alargados → El hierro metálico en el centro de estos cuerpos no se habría expuesto a los gases más fríos que lo habrían oxidado → explica su aparición en el núcleo de la Tierra.
 - Similar situación se describe para otros elementos que presentan similar ΔG_f : Co, Ni, Ge, Sn.
- La Tierra no se encuentra en equilibrio químico y los elementos ocurren en varios estados de oxidación.
 - La transferencia de oxígeno mediante reacciones redox es la característica principal de la química en la superficie de la Tierra.
 - Principales pares redox: HCO_3^-/C , N_2/NH_4^+ , $\text{SO}_4^{2-}/\text{S}/\text{H}_2\text{S}$, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$.

5.3 Minerales en la corteza terrestre.

- Los iones complejos, especialmente los oxoaniones (CO_3^{2-} , SiO_4^{2-} , SO_4^{2-}) junto con el OH^- son característicos de muchos minerales.
- El enlace entre átomos para formar un ión complejo suele ser de carácter covalente, y su direccionalidad condiciona la estructura del ión.
- Los enlaces electrostáticos entre iones de diferente signo no requieren de una estructura específica → el número de coordinación de la relación de radios de los iones participantes.
- Los iones muy pequeños o ligeramente cargados se encuentran como oxoaniones y aparecen como sales con elementos metálicos, especialmente el calcio.
- Los iones de más baja o más larga carga aparecen como silicatos como consecuencia de la gran abundancia de Si.

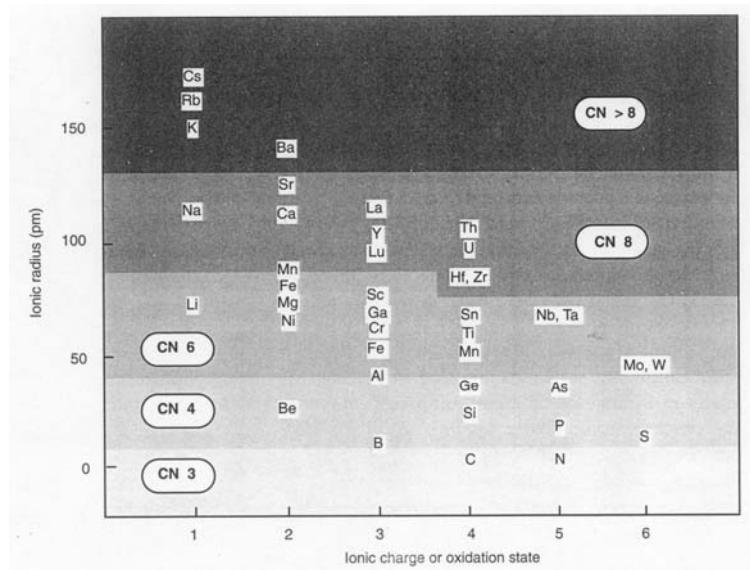


Figura 5.5. Radio iónico y número de coordinación habitual de algunos cationes en óxidos minerales.

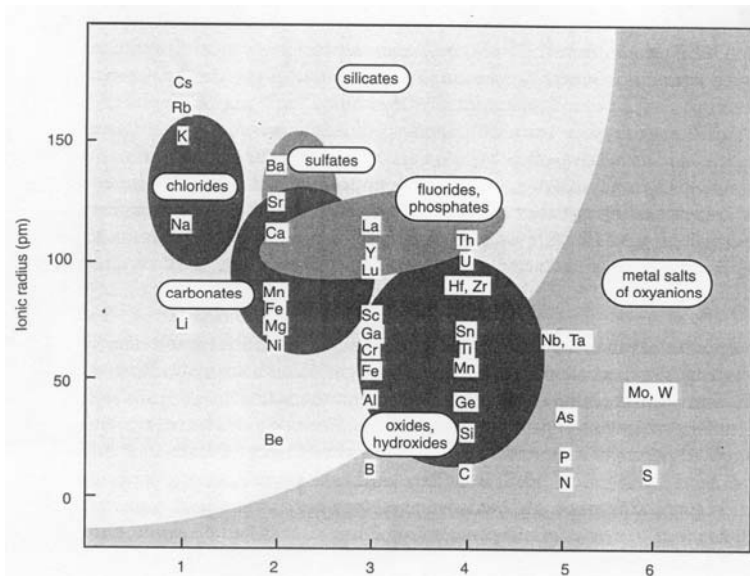


Figura 5.6. Especies minerales en la corteza terrestre y distribución de carga de los elementos

Silicatos y Aluminosilicatos.

- Los silicatos son los componentes básicos de rocas, suelos y sedimentos. Tres factores influyen en la amplia existencia de estos compuestos:
 - Gran abundancia de Si, Al y O en la corteza terrestre.
 - La elevada fuerza del enlace Si-O.
 - La capacidad de polimerización del enlace Si-O-Si.
- Los silicatos se componen de tetraedros de O con un átomo de Si en el centro (SiO_4^{4-}).
- La carga negativa se compensa por la presencia de iones metálicos (*olivino*: $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$ y *circonita*: ZrSiO_4) → **Ortosilicatos**
- Los tetraedros tienen tendencia a polimerizar dando lugar a anillos, cadenas y redes más complejas en las que los tetraedros comparten vértices.

- En los silicatos menos complejos, la carga negativa es importante y se halla concentrada en torno a los átomos de oxígeno → se favorece la unión con cationes metálicos pequeños o de elevada carga.
- La polimerización → aumenta el contenido relativo en Si → la carga iónica en la red disminuye → hace más favorable a la unión con iones grandes como el Ca^{2+} o de carga pequeña como el K^+ y Na^+ .

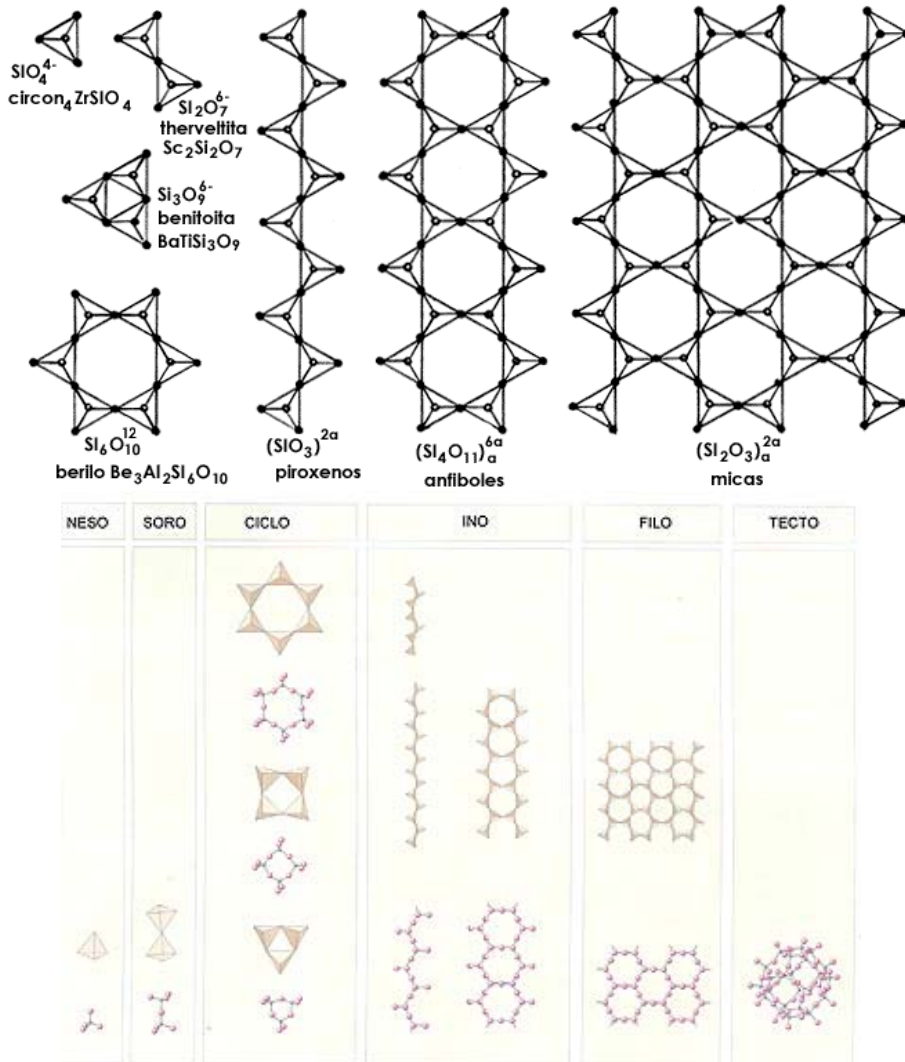


Figura 5.7: Estructura de los silicatos.

- La sustitución de átomos de Si por Al es posible dado lo similar de sus tamaños atómicos ($R_{\text{Si}} = 117 \text{ pm}$ vs. $R_{\text{Al}} = 125 \text{ pm}$), poseyendo también el enlace Al-O una gran fuerza → **Aluminosilicatos**.
- La incorporación del aluminio en estos materiales puede ocurrir de dos formas diferentes:
 - ▣ **Feldespatos:** sustitución isomórfica de los iones Al^{3+} por Si^{4+} en los tetraedros SiO_4^{4-} .
 - ▣ **Arcillas:** intercalación de láminas de octaedros AlO_6 entre las láminas de tetraedros SiO_4^{4-} .
- Entre las redes tridimensionales destacamos por su abundancia los *feldespatos*. La estructura resultante es abierta con grandes cavidades donde residen cationes como Ca^{2+} , K^+ y/o Na^+ que compensan la pérdida de carga positiva

Aluminosilicate Framework

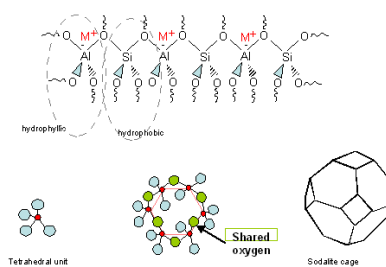


Figura 5.8: Aluminosilicatos.

Arcillas.

- Redes bidimensionales de aluminosilicatos → de gran importancia por su capacidad de retener e intercambiar iones.
- La expansión estructural → capacidad de intercambio de iones
- Su estructura se caracteriza por un apilamiento de capas de tetraedros SiO₄ y de octaedros AlO₆.

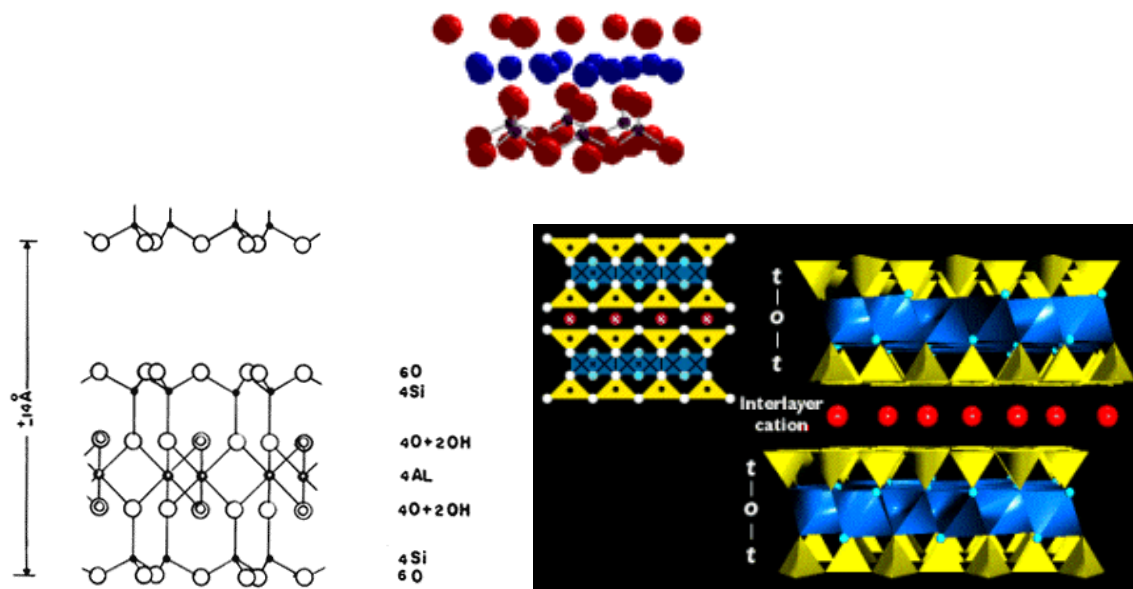


Figura 5.8: Representación esquemática de arcillas 1:1 y 2:1.

- El ordenamiento alternativo de dichas capas origina diversos tipos de arcillas.

Tabla 5.1: Componentes de la arcilla.

Tipo	Lámina SiO ₄	Lámina AlO ₆	Entre láminas	Denominación
1:1	4 Si	4 Al	Enlace de H	Caolinita
	4 Si	4 Al	H ₂ O	Halloisita
2:1	4 Si	4 Al		Pirofilita ^a
	3 Si + Al	4 Al	K ⁺	Illita ^a
	4 Si	5 Al + Mg	Varios cationes y agua	Montmorillonita ^b
2:2	3 Si + Al	6 (Al, Mg, Fe)	Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Vermiculita
	3 Si + Al	6 (Al, Mg, Fe)		clorita

a: no expandibles; b: expandibles

- Arcillas del **tipo 1:1**, vgr. *caolinita* → posee sus láminas unidas por enlaces de H que impiden la introducción de iones en el espacio interlaminar, aunque sí sobre su superficie externa.
- En las del **tipo 2:1**, se distinguen tres grupos generales. Las *esmeclitas* y *vermiculitas* incluyen minerales del tipo expandibles, mientras que el tercero, las *micas*, es poco expandible.
- El grupo de las *esmeclitas* se caracteriza por la expansión interlaminar que ocurre cuando los minerales son mojados y el agua entra forzando la separación entre las láminas.
 - ▢ Los cristales laminares se caracterizan por la sustitución isomórfica de Al^{3+} por Mg^{2+} en las láminas octaédricas → origina una carga negativa en las láminas compensada por la presencia de cationes entre aquéllas.
 - ▢ La débil unión entre las láminas origina la fácil expansión de las mismas.
 - ▢ El miembro más importante es la *montmorillonita*.
- La *vermiculita* sufre sustitución isomórfica en las láminas de tetraedros además de en las de octaédros.
 - ▢ Se origina carga negativa sobre las láminas que favorece la introducción de cationes y moléculas de agua.
 - ▢ La expansión es limitada debido a que las moléculas de agua actúan de puente entre láminas manteniéndolas más juntas que separadas.
- Las *micas* se componen de una capa doble de tetraedros SiO_4^{4-} , sobre un 20% de los átomos de Si están parcialmente sustituidos por Al^{3+} .
 - ▢ La carga negativa generada es elevada → atrae hacia el interior una considerable cantidad de cationes (K^+) → estos actúan como puente entre las láminas dificultando su expansión.
 - ▢ Entre las micas destacamos:

<i>Moscovita</i>	$K_2Al_4[Si_6Al_2O_{20}](OH,F)_4$
<i>Biotita</i>	$K_2(Mg,Fe,Al)[Si_6-5Al_2-3O_{20}](OH,F)_4$
- Las arcillas del **tipo 2:1:1** están representadas por el grupo de las *cloritas*.
 - ▢ Son básicamente silicatos de Fe y Mg con algo de Al presente.
 - ▢ La estructura consiste en unidades 2:1 del tipo vermiculita con sustituciones isomórficas de Fe y Al → originan una elevada carga negativa, superior que en las vermiculitas.
 - ▢ La carga se compensa por la intercalación entre las unidades 2:1 de laminas octaédricas $[Mg_2Al(OH)_6]^+$.
 - ▢ La elevada interacción electrostática interlaminar repele considerablemente a los iones del medio → expansión limitada.

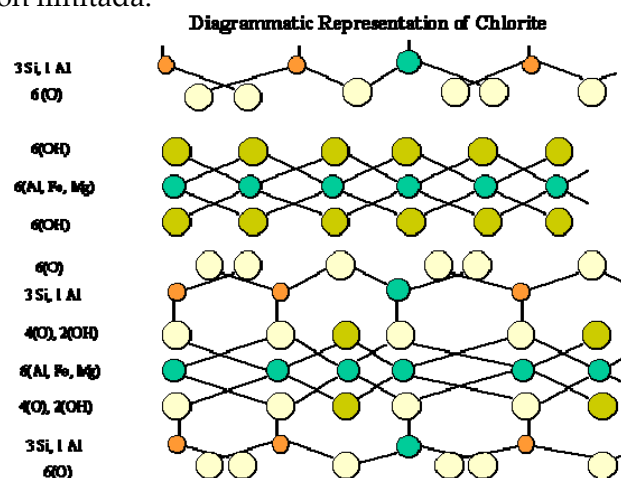


Figura 5.9: Representación esquemática de arcillas 2:1:1.

- Aunque las arcillas son un componente minoritario de los suelos → poseen un componente medioambiental significativo.
- Se forman a partir de la meteorización de rocas denominadas *minerales primarios*:

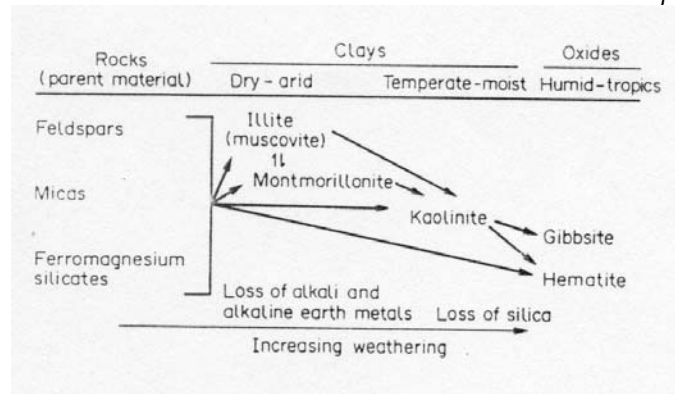
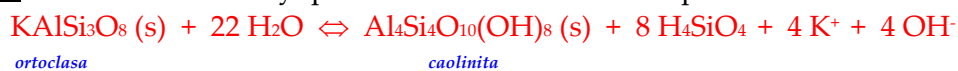
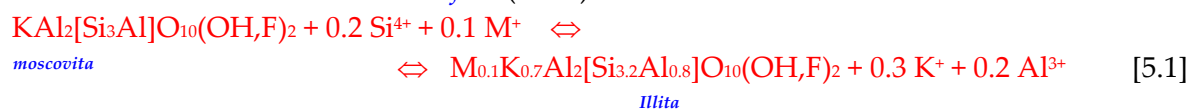


Figura 5.10: Esquema de meteorización de rocas y arcillas.

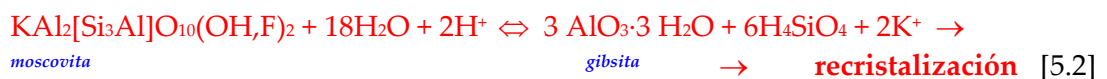
- **Alteración:** modificación física y química de ciertos minerales primarios.



- ▣ A su vez, la moscovita (2:1) puede sufrir la pérdida de K^+ y adición de átomos de Si → La mica resultante se denomina *mica fina* (**illita**).



- **Recristalización:** descomposición o ruptura completa de la estructura cristalina y recristalización de la arcilla a partir de los productos de la ruptura → requiere una intensa meteorización



- ▣ La recristalización implica un desplazamiento de los equilibrios anteriores ([5.1] y [5.2]) hacia la derecha.

- ▣ La expresión de la constante de equilibrio de las reacciones anteriores:

$$K = \frac{[\text{K}^+]^2[\text{H}_4\text{SiO}_4]^6}{[\text{H}^+]^2}$$

$$\log K = \Delta G / 2.303 RT = - 12.8$$

- ▣ Los valores de energía libre de las reacciones se obtienen a partir de la energía libre de formación de las diferentes especies que participan en la reacción:

$$-12.8 = 2 \log [\text{K}^+]/[\text{H}^+] + 6 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] \quad \text{para [5.1]}$$

$$-18.6 = 2 \log [\text{K}^+]/[\text{H}^+] + 6 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] \quad \text{para [5.2]}$$

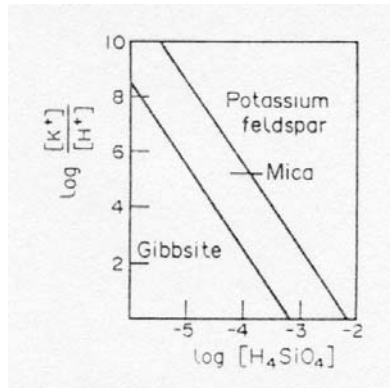


Figura 5.11: Diagrama de estabilidad para el feldespato de potasio, mica y gibbsite.

Óxidos, hidróxidos, carbonatos y otros minerales

- En el suelo se encuentran habitualmente óxidos tales como Al_2O_3 y TiO_2 .
- los más importantes son los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso → $FeO(OH)$ Goetita; $Mn_7O_{13} \cdot 5H_2O$ birnesita; $(Al_2Li(OH)_6) \cdot (Mn_{0.5}Mn_{2.5}O_6)$ litioforita.
- El $CaCO_3$ es el carbonato predominante en suelos en la forma calcita.
- Otros minerales encontrados en suelos son fosfatos de calcio, hierro y aluminio, sulfato, sulfuros y cloruros.

5.4 Formación y alteración de los suelos.

Meteorización y sedimentación

- La meteorización es una combinación de cambios físicos-químicos, que involucran la acción de constituyentes atmosféricos (O_2 y CO_2).

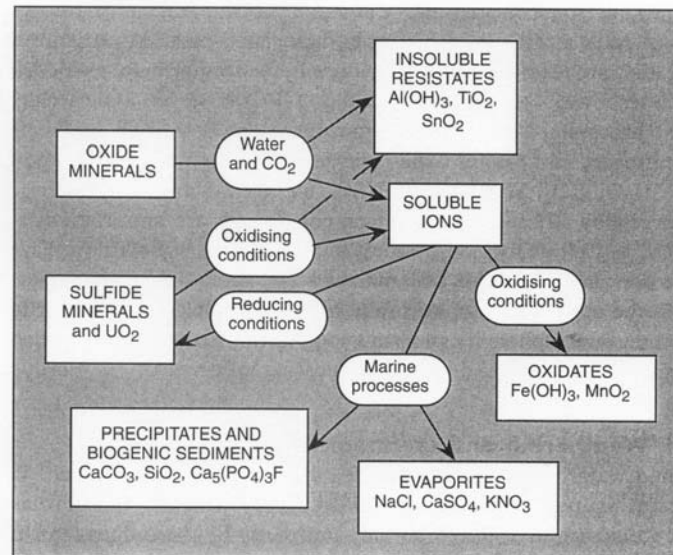


Figura 5.12: Resumen de algunos procesos involucrados en la meteorización y sedimentación de suelos.

- La acción más evidente del agua en las rocas es la separación de los constituyentes solubles e insolubles.
- La meteorización se completa por la existencia de abundantes lluvias y altas temperaturas (ambiente Tropical) y la presencia de un medio ácido:



- Además la meteorización se acelera por la existencia de otras fuentes de acidez el ácido sulfúrico, nítrico y *ácidos húmicos*.
- El crecimiento de las raíces de plantas facilita la ruptura física de las rocas.
- Los minerales insolubles procedentes del proceso de meteorización se les denomina *resistatos* → $\text{Al}(\text{OH})_3$, óxidos de Ti y Sn → forman sedimentos.
- Los elementos solubles pasan en su mayoría al mar → precipitan o se concentran por evaporación.
 - También los sedimentos marinos se forman por restos de los organismos vivos que los habitan (CaCO_3 , SiO_2).
 - Los elementos solubles, alcalinos (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) y halógenos (Cl^- , Br^- , I^-), permanecen más tiempo en el agua de mar y forman finalmente los minerales denominados *evaporitas*.
- Las reacciones redox también son importantes en los procesos de sedimentación.
 - Algunos elementos se liberan en forma soluble: $\text{Mn}^{2+}(\text{ac}) \rightarrow \text{MnO}_2(\text{s})$; $\text{Fe}^{2+}(\text{ac}) \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$.
 - Los sulfuros minerales se pueden depositar en condiciones anaeróbicas → las bacterias actúan sobre sulfatos.
- También son importantes las reacciones de complejación (hidroxi- u oxi-complejos), por asociación de especies solubles ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{SnO}(\text{OH})_3^-$, SO_4^{2-} , MoO_4^{2-}).
 - Las especies predominantes de Al, La y Au en el mar son los complejos $\text{Al}(\text{OH})_3$, LaCO_3^+ y AuCl_2^- .
 - El ácido húmico se constituye de complejos orgánicos que atrapan elementos trazas y los mantienen en los suelos.

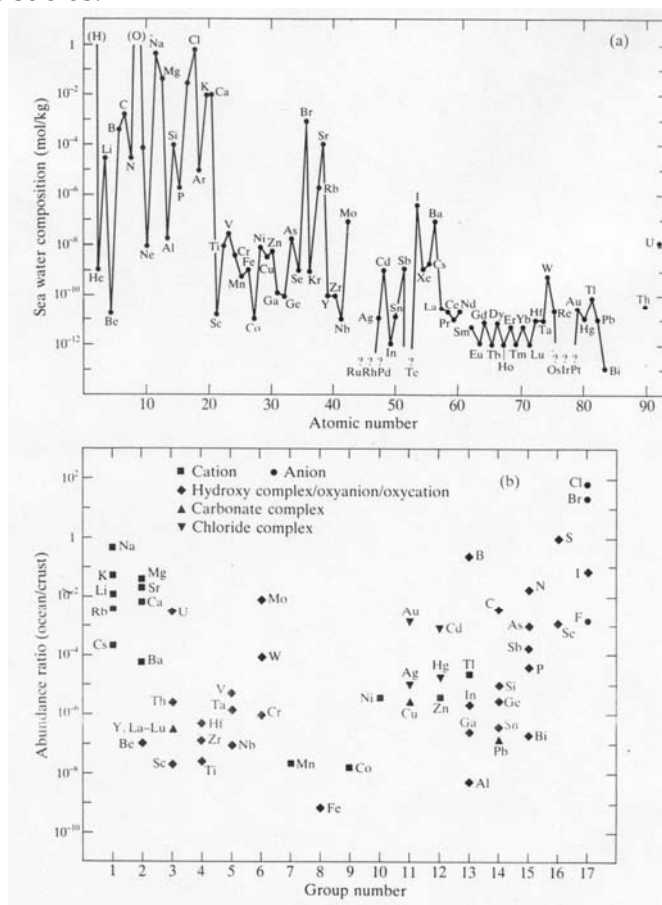


Figura 5.13: Abundancia de elementos en océanos.

- La adsorción es un proceso indudablemente importante en la sedimentación y liberación de elementos de los océanos.
 - ▣ Los iones se adsorben normalmente sobre la superficie de partículas de arcilla y otros minerales.
 - ▣ Los elementos minoritarios son adsorbidos por los organismos vivos y luego liberados cuando estos mueren.
 - ▣ Los elementos liberados se retiran del agua, ocurriendo principalmente la precipitación de cationes trivalentes y tetravalentes (Al, Ti, Fe).

Formación de minerales

- La formación de depósitos de minerales es consecuencia de la movilidad química y fraccionamiento discutidos hasta ahora.

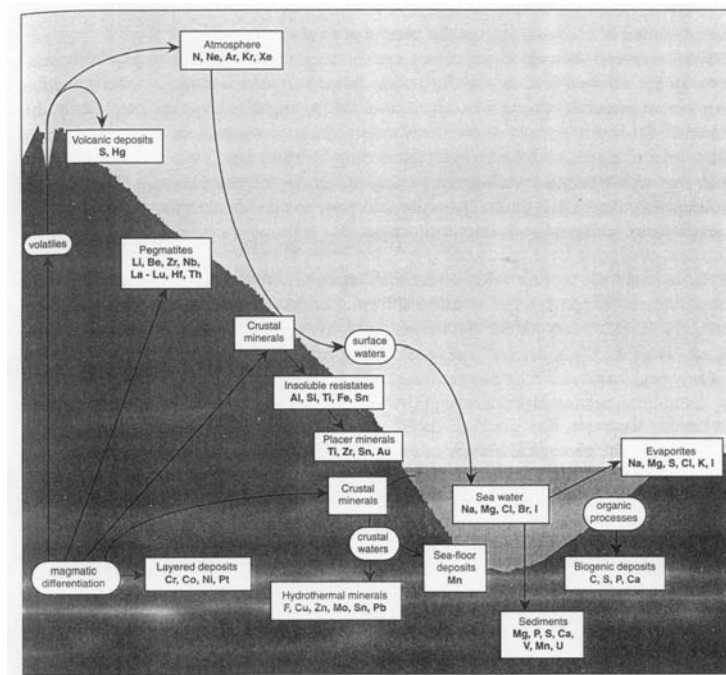


Figura 5.14: Origen de los elementos.

- Los procesos de formación de rocas *ígneas* originan la fuente principal de la mayoría de los minerales.
- La acción subsiguiente del agua resulta ser a menudo crucial.
 - ▣ Muchos minerales importantes se originan por procesos *hidrotermales* → La presión y temperatura en la profundidad de la corteza se elevan y en esas condiciones los compuestos insolubles se pueden disolver.
 - ▣ Cu, Zn, Mo, Sn y Pb se movilizan por la formación de complejos con aniones como el Cl⁻ y F⁻ y se disuelven de las rocas ígneas.
 - ▣ Óxidos y sulfuros minerales precipitan al contactar con agua fría.
- Las partículas de resistatos se separan mecánicamente, en densidad y tamaño, por la escorrentía de agua resultando concentraciones locales de minerales.
- Los procesos redox llevan a la solubilización de elementos → posteriormente sedimentan por formación de minerales insolubles.

Tabla 5.2: Historia geológica de la formación de menas minerales.

Era (millones de años antes)	Características geológicas y químicas	Principales menas
Arcaeno Primario (3.8-3.0)	Formación de zanjas marinas; magma flota y forma rocas primarias	Fe, Ni, sulfuros de Cu, Au
Arcaeno Último (3.0-2.5)	Reciclado de rocas primarias; procesos hidrotermales La corteza se levanta y erosiona.	Sulfuros hidrotermales de Cu, Zn Depósitos de Au
Proterozóico Primario (2.5-1.7)	Se origina O ₂ por fotosíntesis; oxidación de Fe ²⁺	Formación franjas Fe
Proterozóico Medio-último (1.7-0.7)	Se conforma la gruesa corteza continental. Aumenta contenido de O ₂ atmosférico; química redox de sulfuro activa.	Ti, óxidos de Cr, sulfuros de Fe, metales del Pt. Depósitos de Co, Cu, U
Fanerozóico (0.7-presente)	Reciclado extensivo de la corteza. Condiciones de meteorización; enriquecimiento secundario	Cu, Zn, Mo, Sn, Pb hidrotermales Resistatos de Fe, Al; Minerales Co, Ni, Cu

- Muchos procesos químicos de formación de minerales se activaron cuando comenzó la aparición de oxígeno.
- Los primeros ciclos magmáticos e hidrotermales fueron efectivos en la movilización de elementos como Ni y Au, mientras que los depósitos hidrotermales de Mo, Sn y Pb son más recientes.
- Los depósitos de Cu son más variados en su aparición ocurriendo durante todas las eras.
- Algunos elementos se han concentrado sólo después de un intenso reciclado de la corteza terrestre.
- *Formaciones de franjas de hierro* → aparecen cuando existió disponibilidad suficiente de oxígeno proveniente de los procesos de fotosíntesis.
- Conforme se elevó el contenido de oxígeno atmosférico → oxidación de sulfuros insolubles y de UO₂.
- La localización geográfica de los depósitos minerales depende del periodo en el que se formaron:
 - Continentes más antiguos → rocas inalterables formadas en las primeras eras: depósitos de Cr, Ni, Au y los metales de Pt (Asia central, África central y sur, Canadá, y norte de Australia)
 - Áreas geológicamente activas → minerales hidrotermales recientes (*Borde Pacífico* y la cordillera de Sudamérica)

5.5 Propiedades de los suelos.

Componentes del suelo

- Las dos grandes divisiones de la corteza terrestre son rocas y suelo.
- El **suelo** → mezcla de materiales inorgánicos y orgánicos que oscilan enormemente en su tamaño y que contienen material muerto y vivo, agua y gases en proporción variable y en un balance dinámico.
- Principales componentes inorgánicos del suelo → Arena, limo y arcillas¹

Tabla 5.3: Clasificación de materiales inorgánicos en suelos por su tamaño

<i>Partícula</i>	<i>Composición</i>	<i>Tamaño (mm)</i>
Arena	Cuarzo	0.063-2.0
Limo	Cuarzo	0.002-0.063
Arcilla	Silicatos y aluminosilicatos	< 0.002

- Materia orgánica: puede contribuir en 2-5% del total de la masa del suelo, sin embargo tiene un papel muy importante.
 - Se concentra en la parte superior del suelo.
 - Consiste en sustancias orgánicas muertas como plantas y animales en descomposición; y vivientes tales como bacterias, hongos, algas, insectos, moluscos, etc.
 - La cantidad depende de las condiciones climáticas y la topografía.
 - El contenido en ácido húmico del *humus* influye en la capacidad del suelo para retener agua, así como su capacidad de intercambio y enlace a iones metálicos.
- Agua y aire: rellenan los huecos intersticiales entre las partículas del suelo.
 - Su movimiento está controlado por la cantidad de espacio y tamaño de los poros, y éste, a su vez, por el tamaño de las partículas presentes.
 - La atmósfera del suelo influye en los procesos redox.
 - La concentración de CO₂ es elevada en la atmósfera del suelo.
- La cantidad y naturaleza de estas especies en disolución en agua depende de diversos factores entre ellos el pH.

Factores en la formación del suelo

- Varios factores determinan el tipo de suelo:
 - Los materiales de partida → determinan el contenido mineral básico y las proporciones de arena, limo y arcilla.
 - La topografía, es decir, la pendiente y su exposición influye en el drenaje del suelo y el impacto del clima.
 - Los organismos vivos influyen sobre la continua fertilidad del suelo.
- Todos estos factores están interrelacionados.
- La formación del suelo puede observarse a través de un perfil del mismo.

¹El término arcilla es aplicado aquí exclusivamente a una clasificación por tamaño y no a la estructura cristalina



Figura 5.15: Horizontes del suelo.

Propiedades del suelo

- La capacidad de intercambio y el pH del suelo, son propiedades interrelacionadas e influyen en la disponibilidad de nutrientes de las plantas y ambos son susceptibles de ser interferidos por la contaminación.

Capacidad de intercambio iónico.

- Se define como la disponibilidad del suelo para retener e intercambiar iones → La materia orgánica y las arcillas son intercambiadores efectivos.
- La fuerza de *adsorción de cationes* en arcillas depende del potencial iónico (Z/r) del catión.



- El orden refleja bien el orden según la carga y tamaño de los iones.
- El tamaño de catión se considera el del catión hidratado.

Tabla 5.4: Hidratación de Na⁺ y K⁺.

	Na ⁺	K ⁺
Radio iónico (pm)	95	113
Radio de ión hidratado (pm)	276	232
Número de moléculas de asociadas al catión	16.6	10.5

- La capacidad de adsorción de las distintas arcillas estudiadas dependerá de su capacidad para expandir la interlámina → a mayor capacidad tenga de expansión, mayor será su capacidad para acumular metales pesados y otros componentes tóxicos. Se ha establecido el siguiente orden:

esmectita (montmorillonita) > vermiculita > micas : illita (2:1; poco hinchable), clorita > caolinita

- La capacidad de *intercambio de aniones* (vgr. arseniato y seleniato) en arcillas no es tan significativa como la de cationes.



- El arseniato se une fuertemente a los átomos de hierro y aluminio de la arcilla al igual que a los átomos de Fe, Al y Mn presentes en óxidos. Esta adsorción es poco reversible por lo que el elemento pesado queda eficazmente retenido.
- La capacidad de intercambio iónico de un suelo se mide en equivalentes o miliequivalentes por gramo de suelo (1 mequiv.= 1 mmol de M⁺ = 1/2 mmol de M²⁺ = 1/3 mmol de M³⁺)
montmorillonita (1.0-1.5) > vermiculita (0.7-1.2) > clorita (0.1-0.4) > caolinita (0.03-0.15 equiv·g⁻¹)

pH del suelo

- Está influenciado por los cationes adsorbidos en las arcillas.
Arcilla-Na + H₂O ⇌ Arcilla-H + Na⁺ + OH⁻ → *aumento pH*
- Los cationes de Al y Fe y algunos elementos pesados que por su elevado potencial iónico sufren hidrólisis producen disoluciones ácidas en el suelo cuando se desorben:
Arcilla-Al + 5 H₂O ⇌ Arcilla-H₃ + Al(OH)₄⁻ + H₃O⁺
- Los suelos ácidos se relacionan con climas húmedos → arcillas protonadas
Arcilla-H + H₂O ⇌ Arcilla⁻ + H₃O⁺
- Los suelos áridos donde las sales de Ca, Mg, Na y K se acumulan tienen un pH más elevado.