

La Tierra: un laboratorio cristaloquímico

Manuel Prieto Rubio

mprieto@geol.uniovi.es

Departamento de Geología

Universidad de Oviedo

La mineralogía 'presentista'

A. Putnis (1992) Mineral Sciences. Cambridge U. Press.

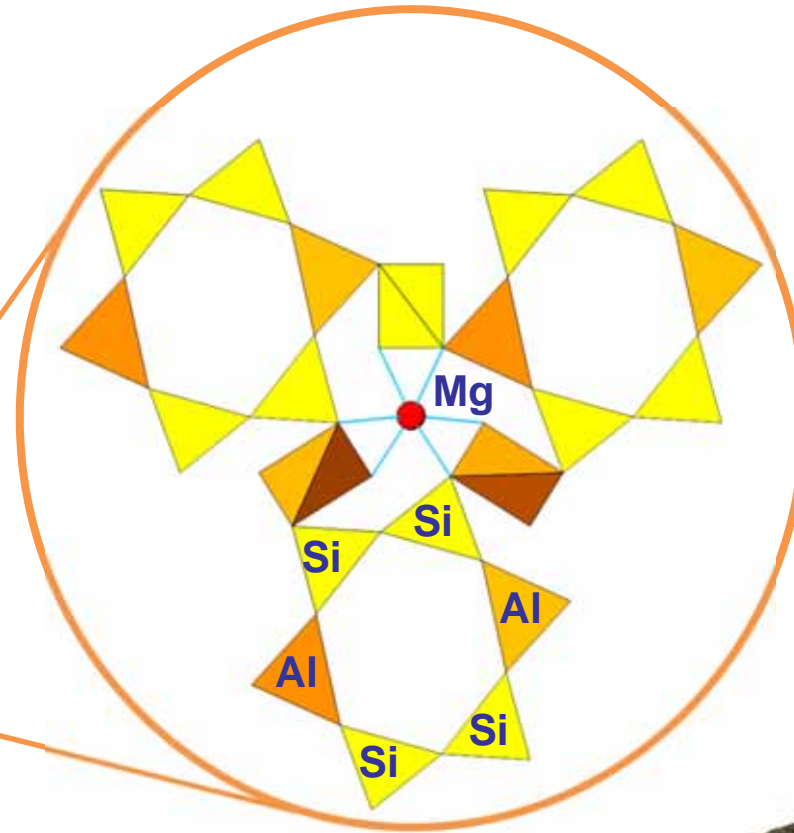
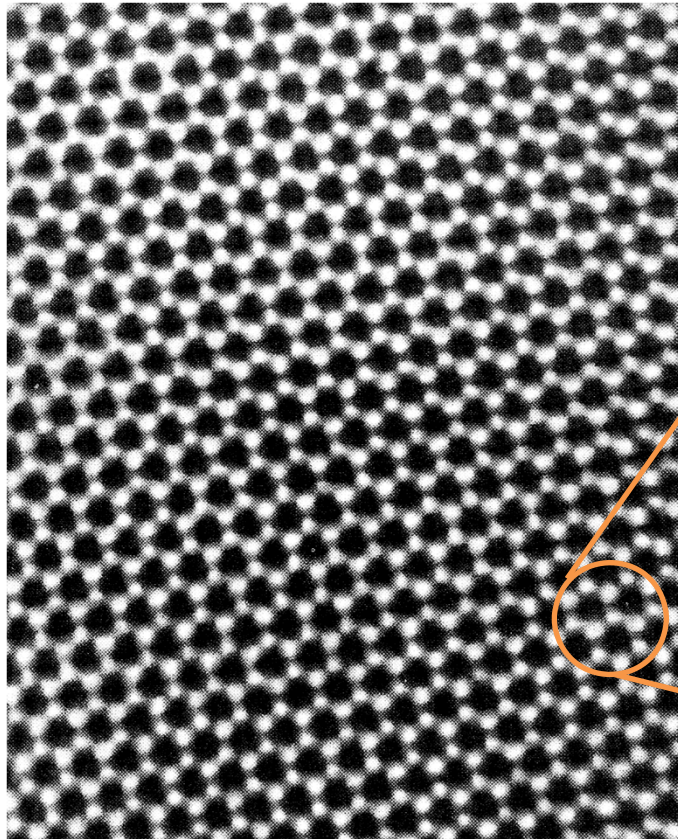
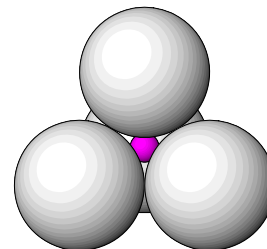


Imagen de alta resolución (TEM) de un cristal de cordierita ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$)

Sistema: Rómbico, $2/m2/m2/m$
Grupo espacial: Cccm

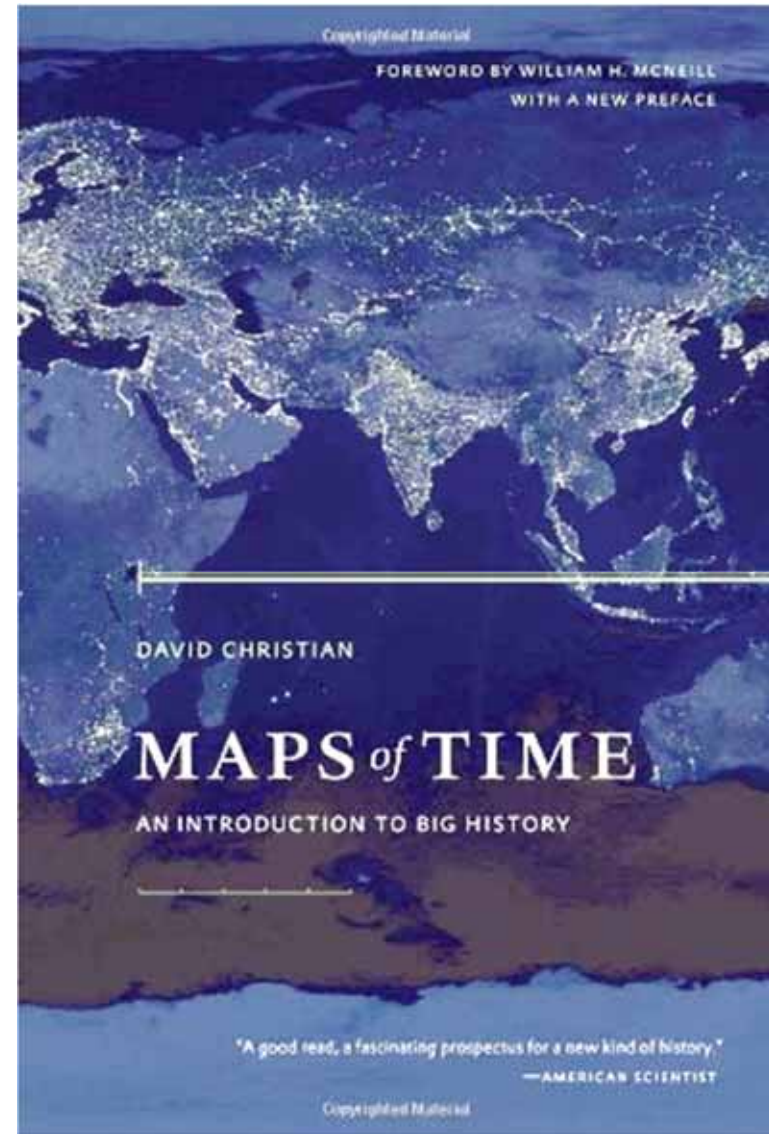


<http://www.irocks.com>

Los minerales y la gran historia

Big History is a framework for all knowledge. From the Big Bang to the modern day — and to what may lie ahead

Mineralogía en la cuarta dimensión: del polvo de estrellas a la huella humana

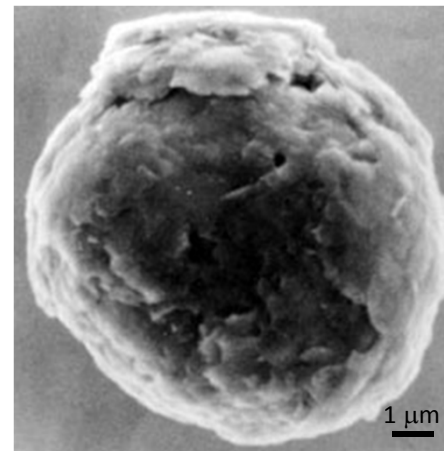


Los primeros minerales



Imagen de rayos X de una supernova Azul (Si y S)
Verde (Mg)
Naranja (O)

<http://chandra.harvard.edu>



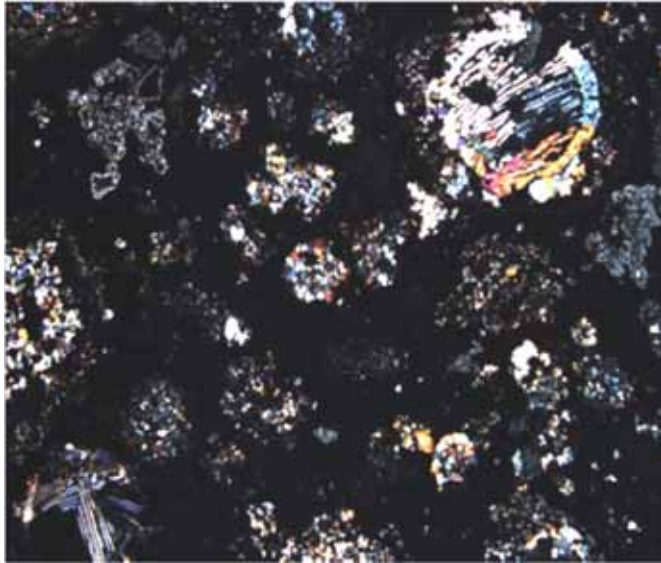
≈ 12

Grafito pre-nebular

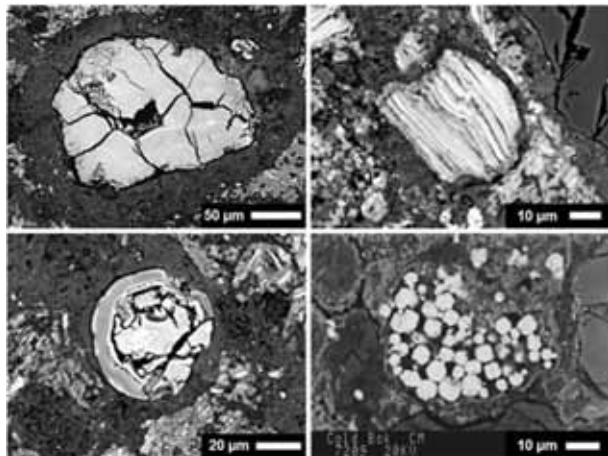
<http://news.wustl.edu/news/>

Minerales condríticos

Hazen et al. (2008) Mineral Evolution.
Am. Mineral. 93, 1693-1720.



Microfotografía de un condrito. El olivino es el mineral birrefringente más abundante.



<http://www.uni-muenster.de/Planetology>

Cóndrulos

Olivino (rico en Mg)	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
Piroxeno (rico en Mg)	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$
Kamacita (metal)	$\alpha\text{-(Fe,Ni)}$
Taenita (metal)	$\beta\text{-(Fe,Ni)}$
Troilita (sulfuro)	FeS
....	

Inclusiones ricas en Ca y Al

Corindón	Al_2O_3
Espinela	MgAl_2O_4
Perovskita	CaTiO_3
Hibonita	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
Ca-piroxenos (diópsido)	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
....	

Matriz (silicatos)

Olivino	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
Piroxeno	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$
Augita	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
....	

Matriz (opacos)

Grafito	C
Kamacita (metal)	$\alpha\text{-(Fe,Ni)}$
Taenita (metal)	$\beta\text{-(Fe,Ni)}$
Troilita (sulfuro)	FeS
....	

H₂O

Clorita, serpentina, talco, etc.

Horneados (< 950°C) y agitados

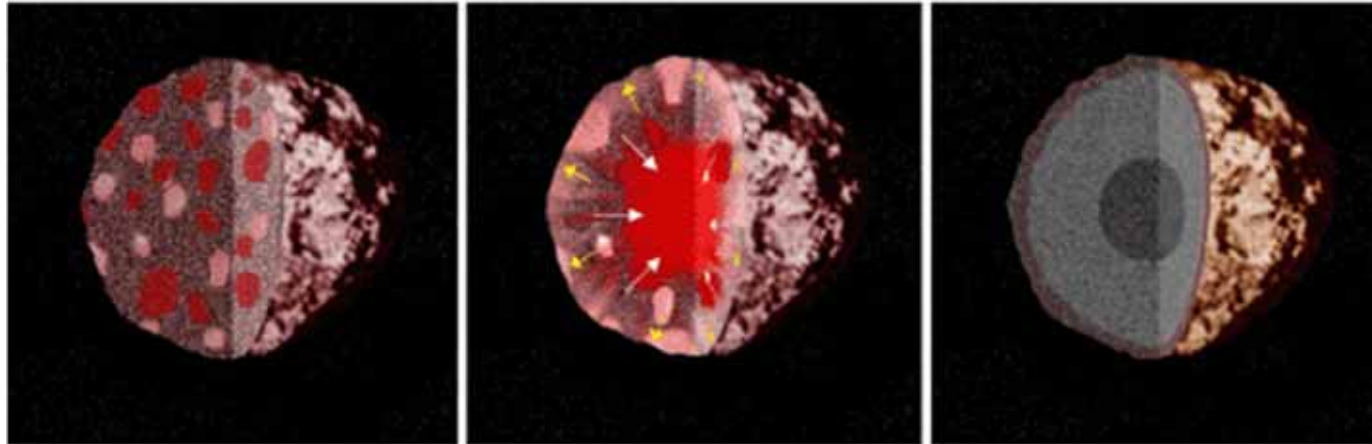
Albita, feldespatoïdes, micas, piroxenos, anfíboles

Majorita, coesita, estisovita, silicato-espinela, etc.

Acondritas y planetesimales

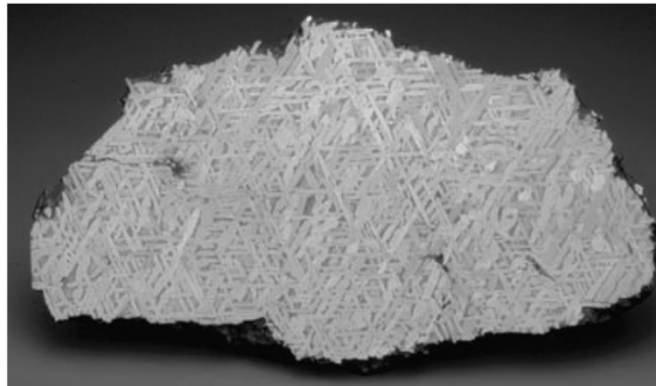
Fusión parcial (> 950°C)

<http://www.psr.d.hawaii.edu>



Meteorito acondrítico

<http://www.meteorlab.com>



Meteorito metálico. Intercrecimiento de kamacita y taenita.

≈ 250

Nuevos minerales

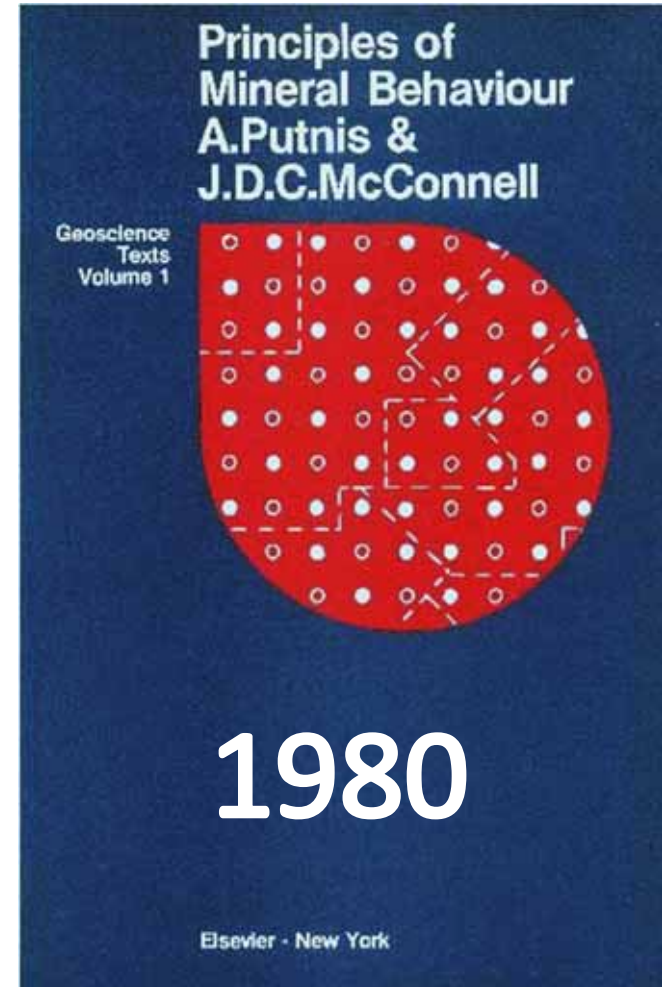
Cuarzo, feldespato potásico, titanita, zircón, sulfuros de metales de transición, etc.

Los diez estadios de la evolución mineral en la Tierra

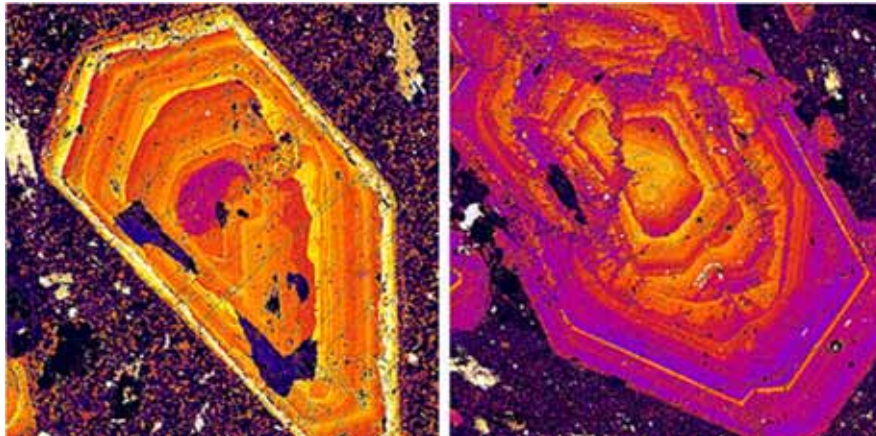
ERA/Estadio	Edad (Ga)	Nº Especies
Minerales Prenebulares	> 4.6	12
Era de la acreción planetaria		
1. Minerales condríticos primarios	> 4.56	60
2. Acondritas y planetesimales	> 4.56 – 4.55	250
Era del retrabajo del manto y la corteza		
3. Evolución de las rocas ígneas	4.55 – 4.0	350 – 500
4. Formación de granitos y pegmatitas	4.0 – 3.5	1000
5. Tectónica de placas	> 3.0	1500
Era de la mineralogía mediatizada biológicamente		
6. El mundo biológico anóxico	3.9 – 2.5	1500
7. La gran oxidación	2.5 – 1.9	> 4000
8. El océano “aburrido”	1.9 – 1.0	> 4000
9. La Tierra “bola de nieve”	1.0 – 0.542	> 4000
10. La era fanerozoica	0.542 - Presente	4400 +

La mineralogía de los años 70-90

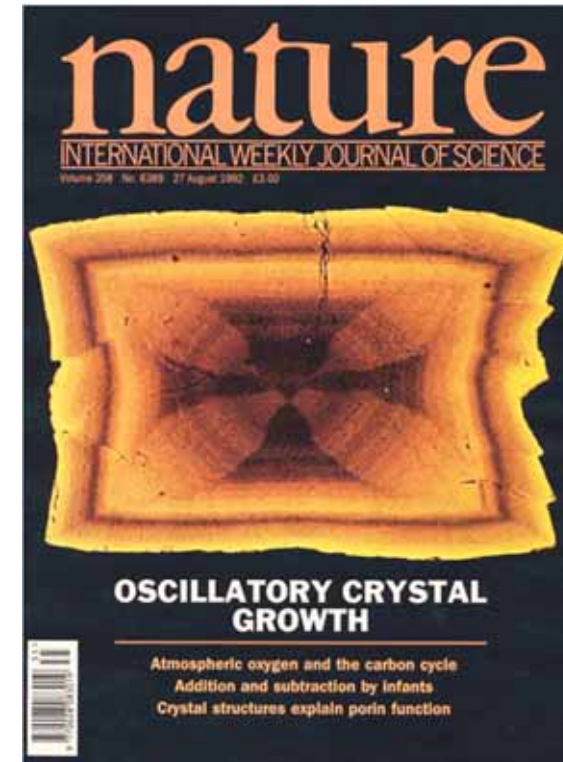
¿Cómo se comportan los minerales ante los cambios de temperatura y presión?



SEM-EDS y Microsonda electrónica (EMPA)



“Mapa de elementos” mostrando la zonación de Ca y Na en cristales de plagioclasa



Putnis A., Fernández-Díaz L. & Prieto M. (1992)
Experimentally produced oscillatory zoning in the
(Ba,Sr)SO₄ solid solution. NATURE 358, 743-745.

Microscopía electrónica de transmisión

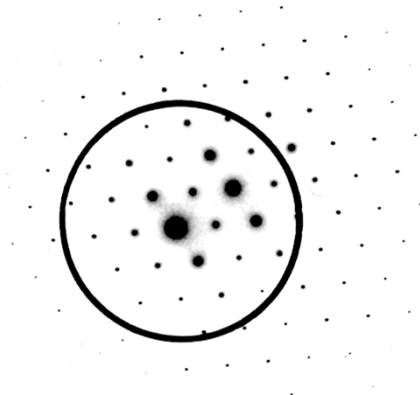


Diagrama de difracción de electrones

Desmezcla augita pigeonita

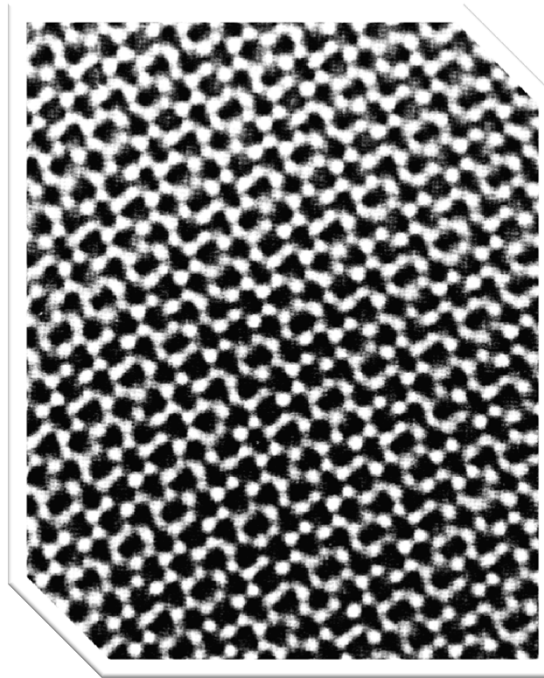


Imagen de microscopía electrónica de alta resolución de un cristal de cordierita $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$.



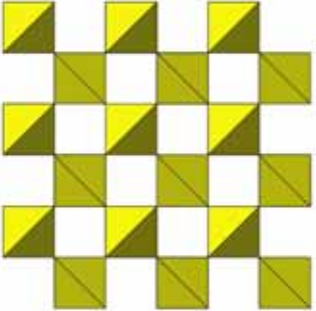
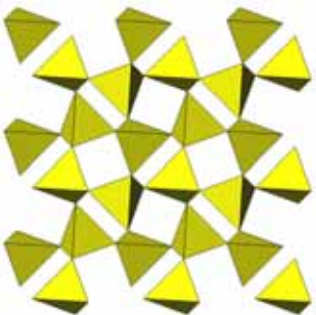
JEM-3200FS Transmission Electron Microscope

Busec et al. (1980) Subsolidus phenomena in pyroxenes. Rev. Min. 7.

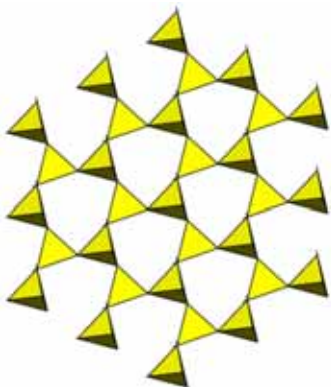
Polimorfos de la sílice



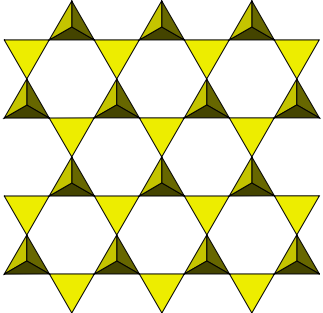
α -Cristobalita



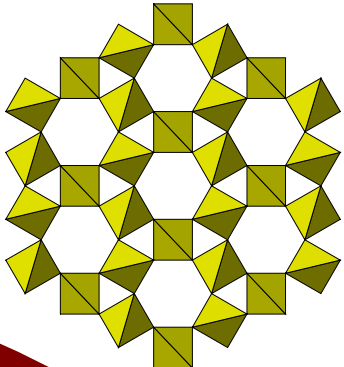
β -Cristobalita



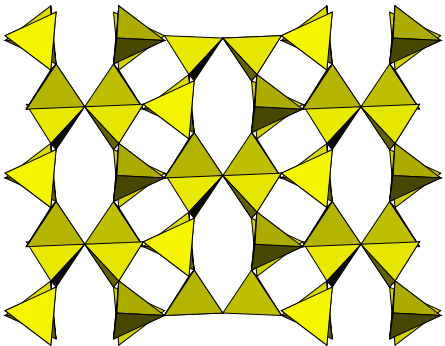
α -Tridimita



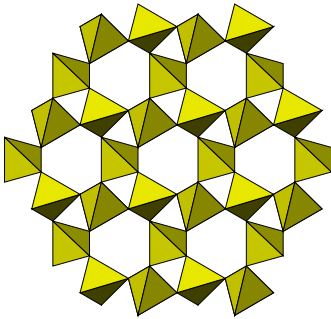
β -Tridimita



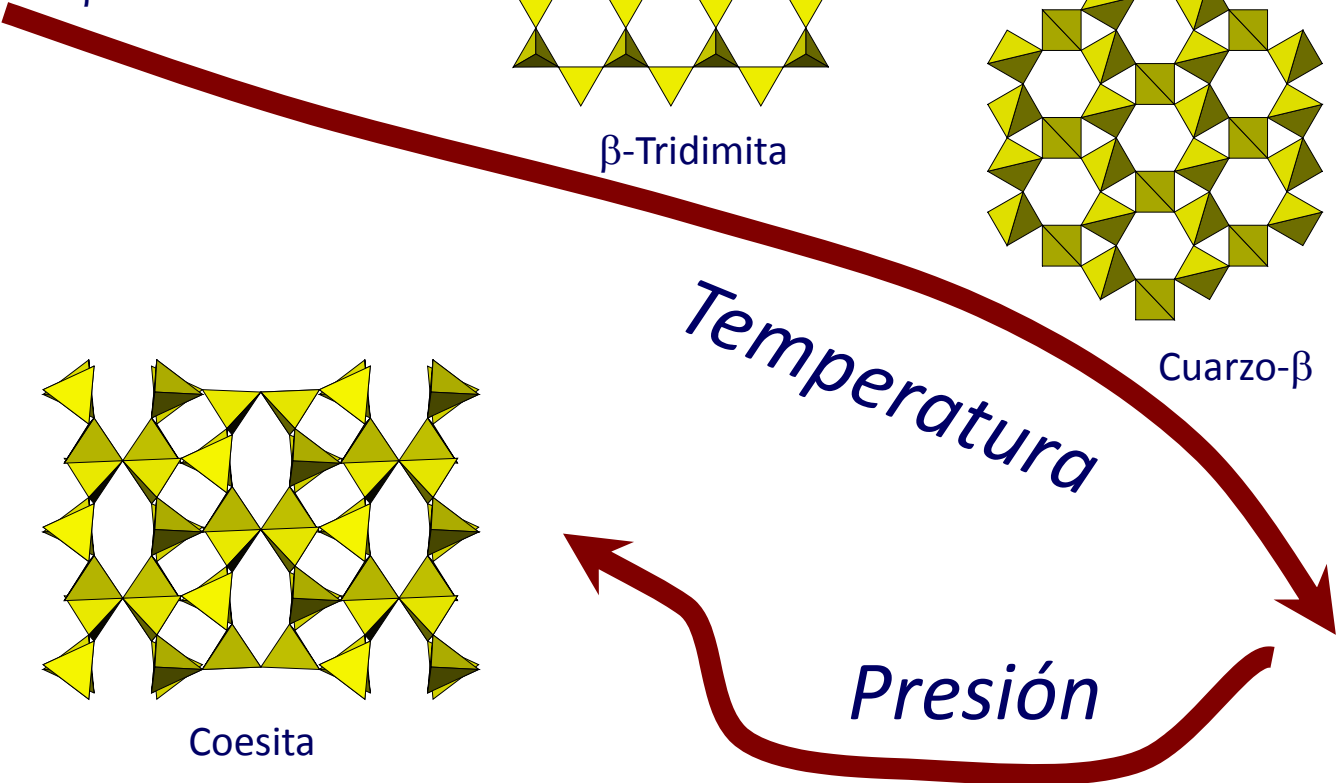
Cuarzo- β



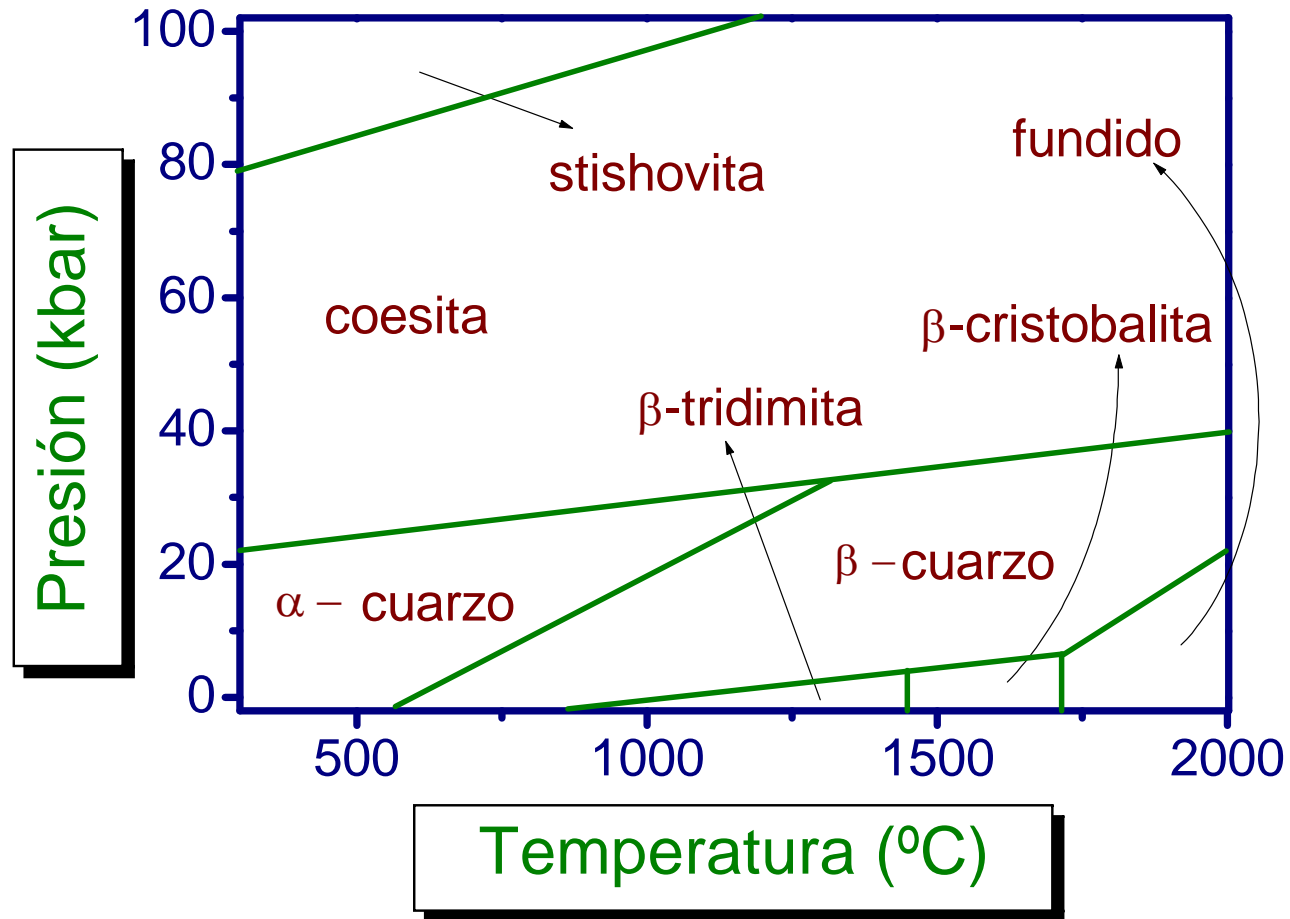
Coesita



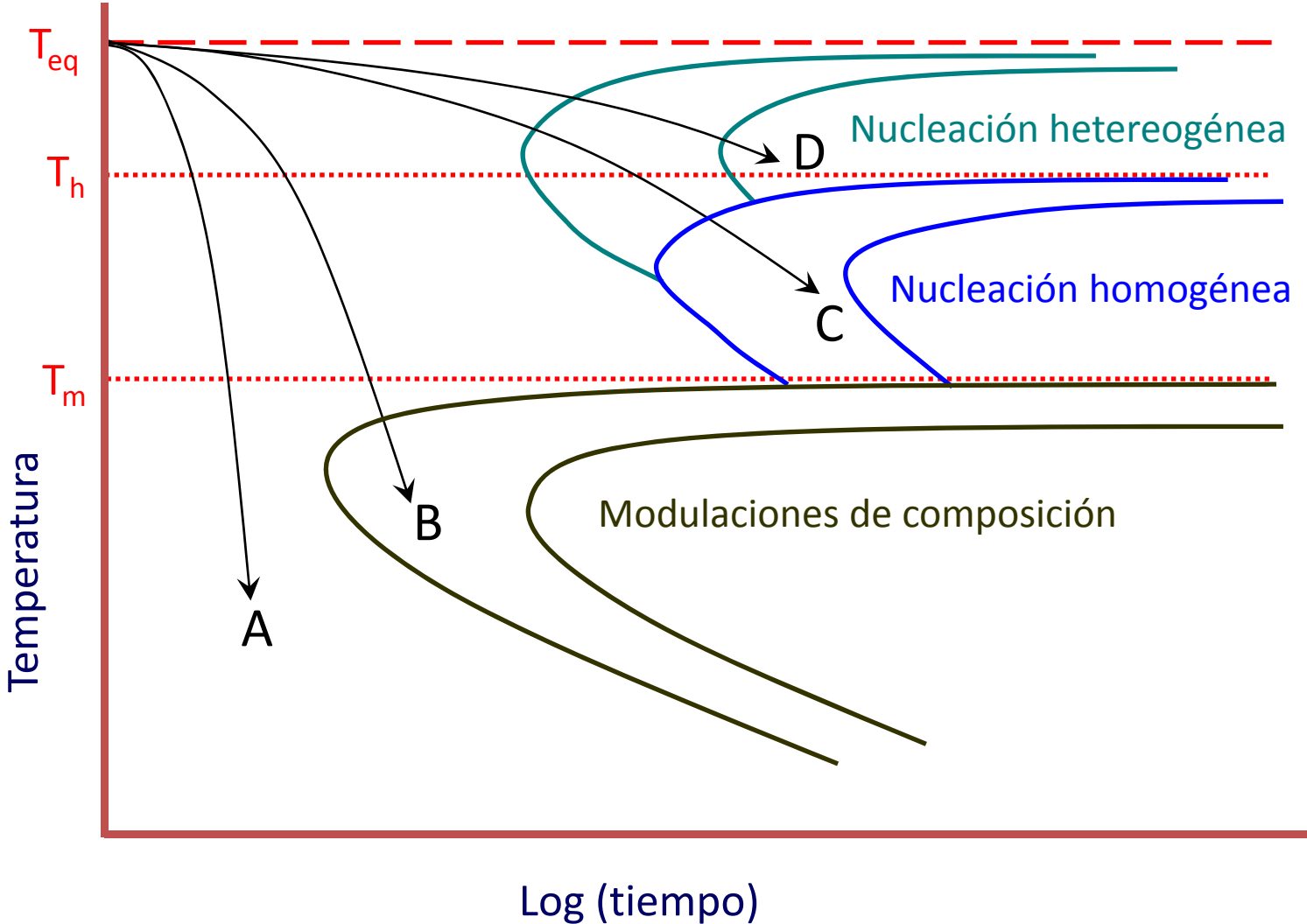
Cuarzo- α



Polimorfos de la sílice: diagrama de fases

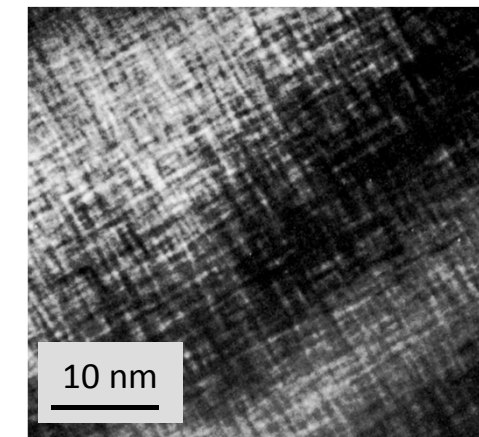
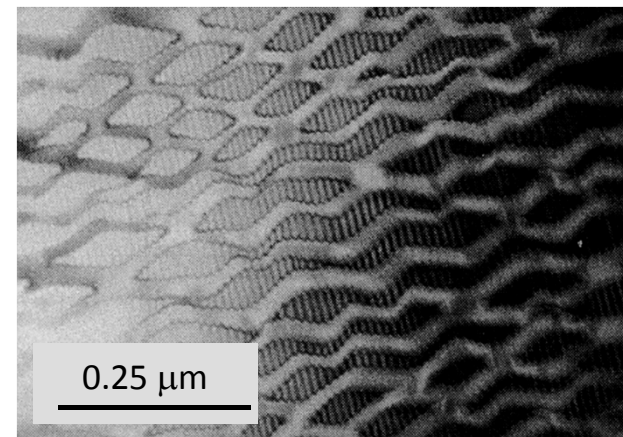
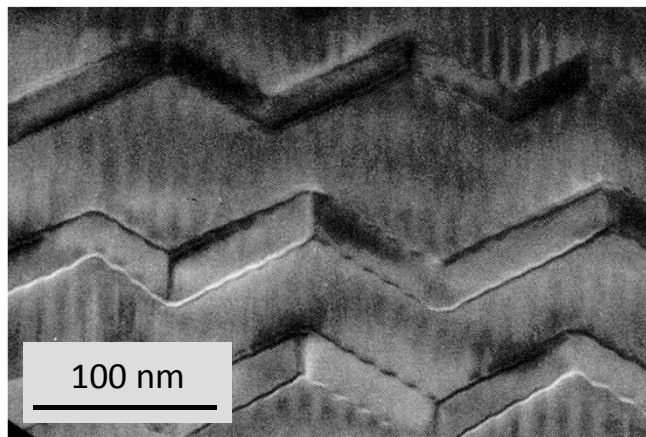
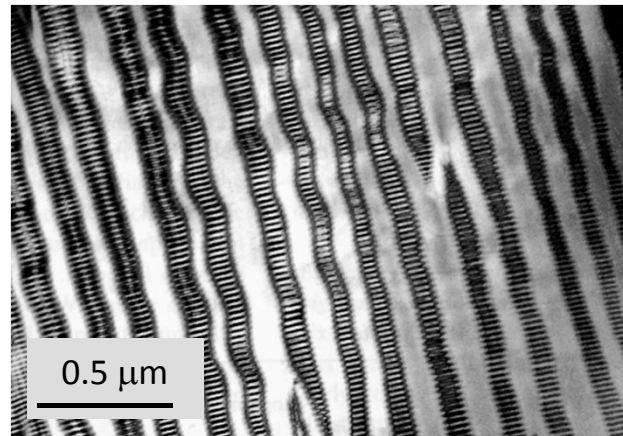
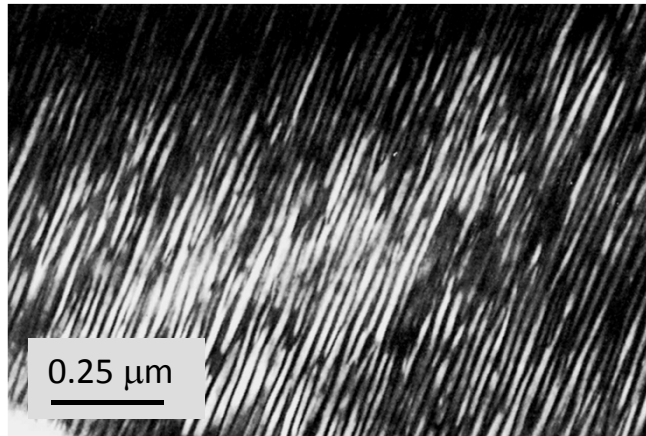


Diagramas Temperatura-Transformación-Tiempo



Micro y nano-estructuras de enfriamiento

A. Putnis (1992) Mineral Sciences. Cambridge U. Press.

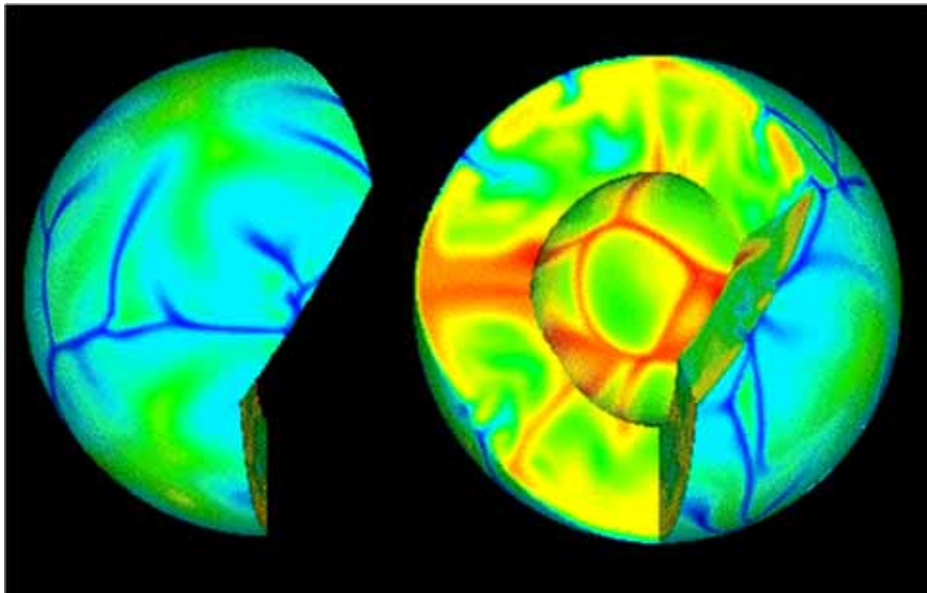


Desmezcla en feldespatos alcalinos $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ y maclado en las regiones ricas en sodio

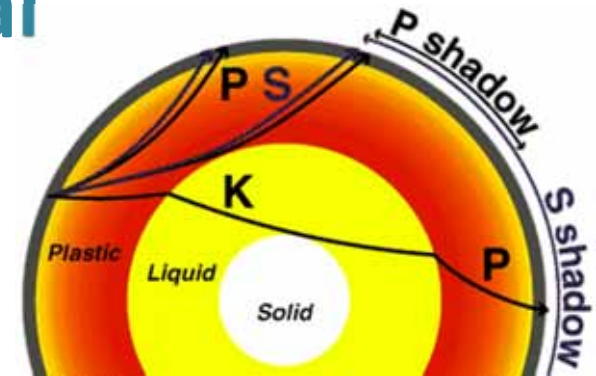
Transformaciones cristalinas en el manto terrestre y la dinámica global

El manto inaccesible

¿De qué está constituido?
¿Cómo se comporta?
¿Qué fuerzas y procesos operan en él?



<http://www.geophysik.uni-muenchen.de/research/geodynamics/research>



<http://crack.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/plate/velocity.html>

Fuentes de información

Observaciones indirectas
(geofísica, geoquímica, geología,
astronomía, astrofísica,...)

Experimentación
(mineralogía-petrología experimental,
reología experimental,...)

Simulación
(simulaciones moleculares, reología y
transporte)

Un material de partida para la experimentación

¿De qué está
constituido el manto
terrestre?

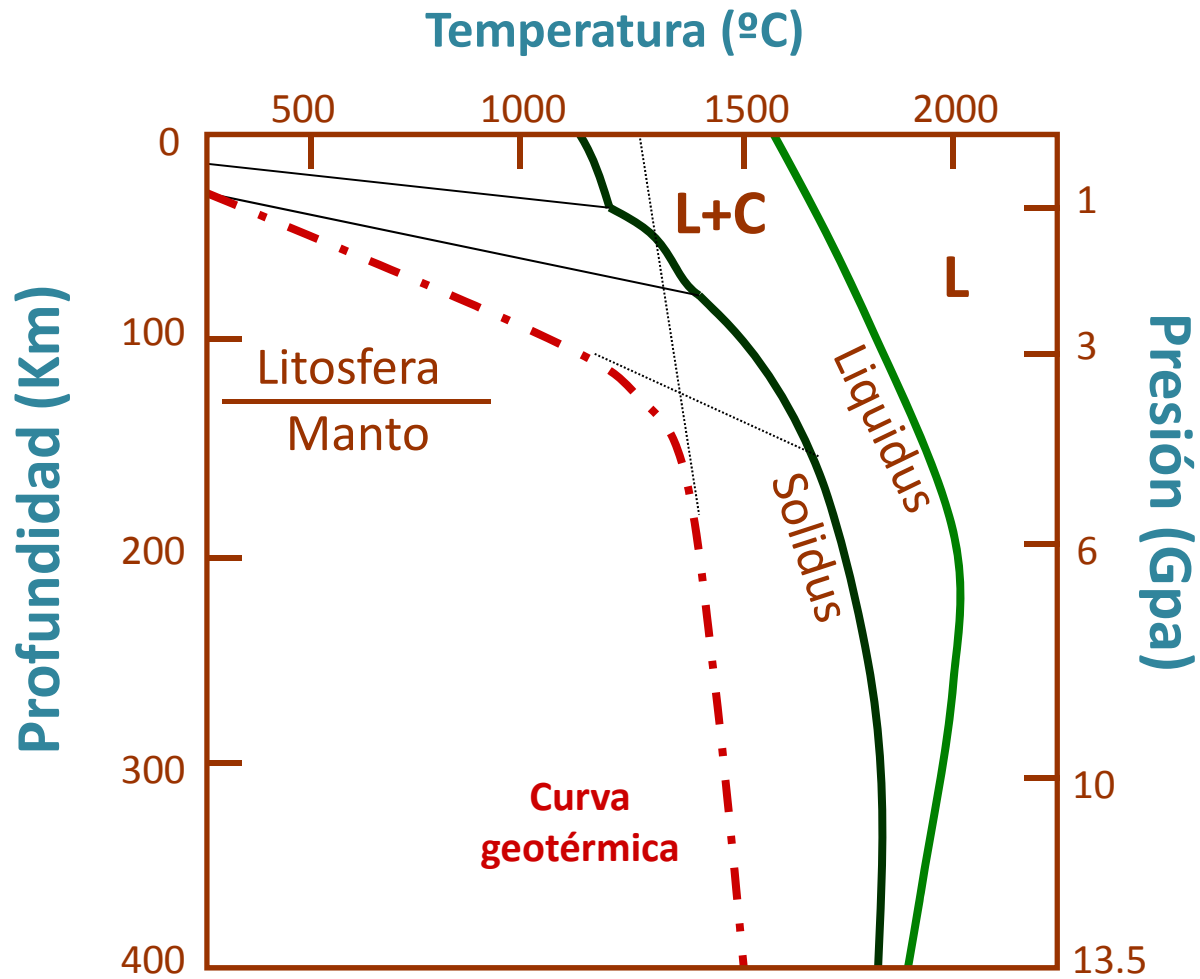
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pillow_basalt_crop_1.jpg



Existe amplia evidencia de que los magmas basálticos derivan de la fusión parcial del manto superior.

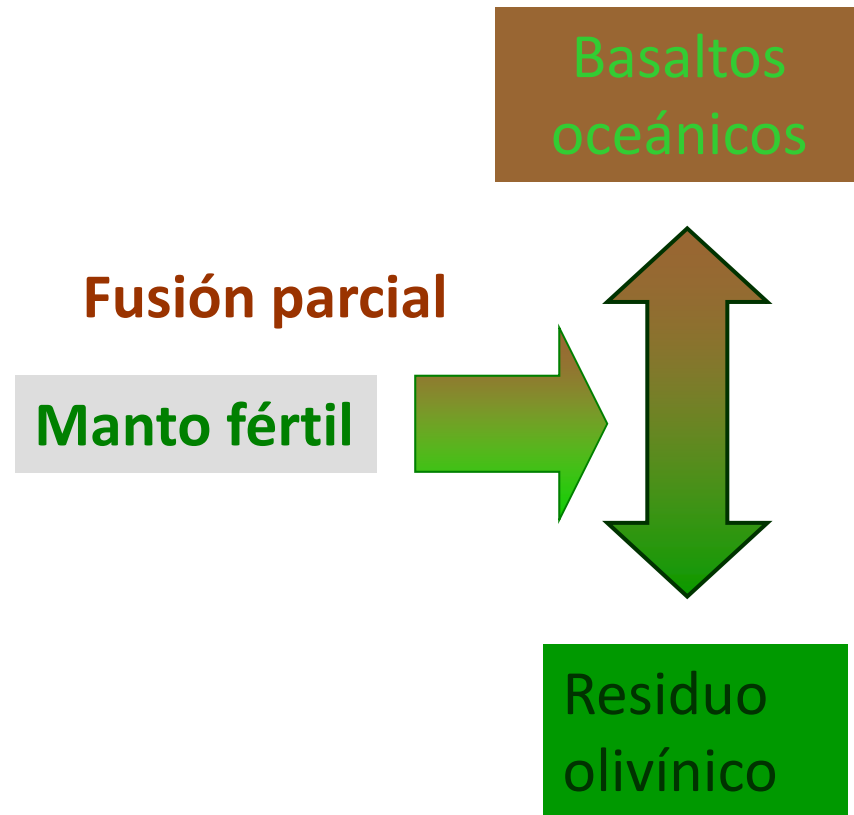
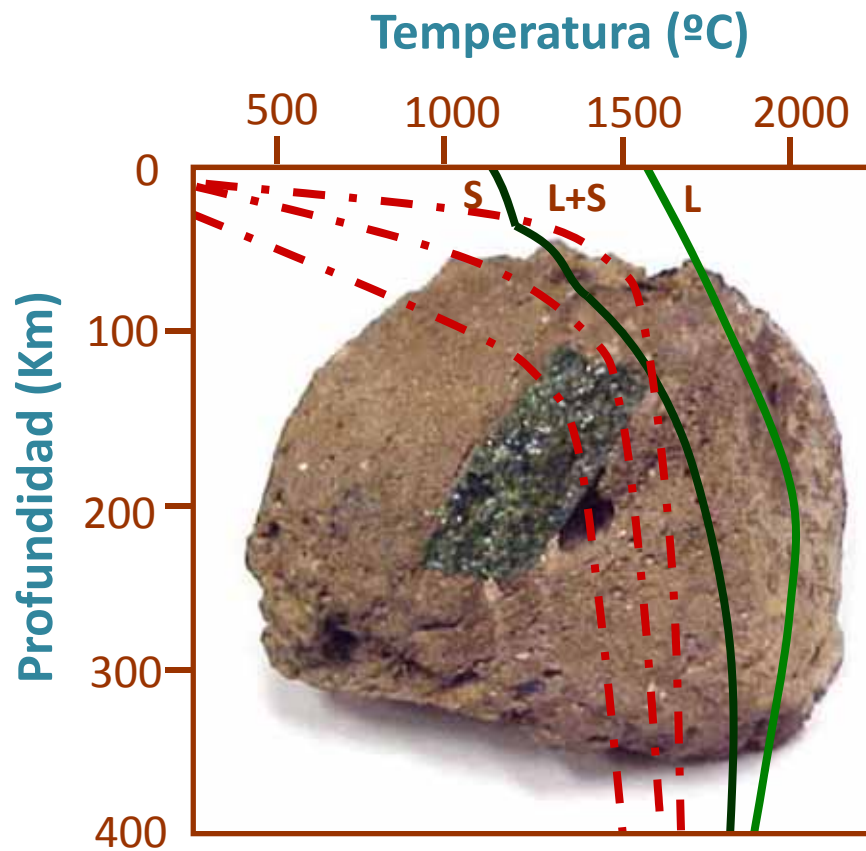
La cuestión es... ¿qué materiales fuente podrían fundirse parcialmente para producir basalto?

La fusión parcial del manto terrestre (i)



Green & Falloon (1998) Pyrolite: a Ringwood concept and its current expression. In: The Earth Mantle: Composition Structure and Evolution (ed. I. Jackson) Cambridge U. Press.

La fusión parcial del manto terrestre (ii)

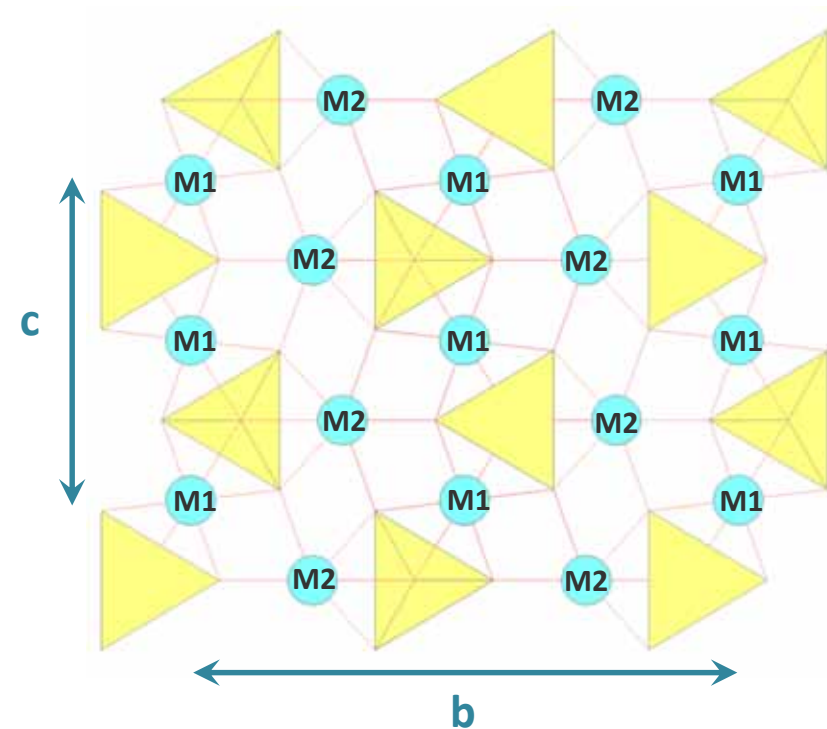
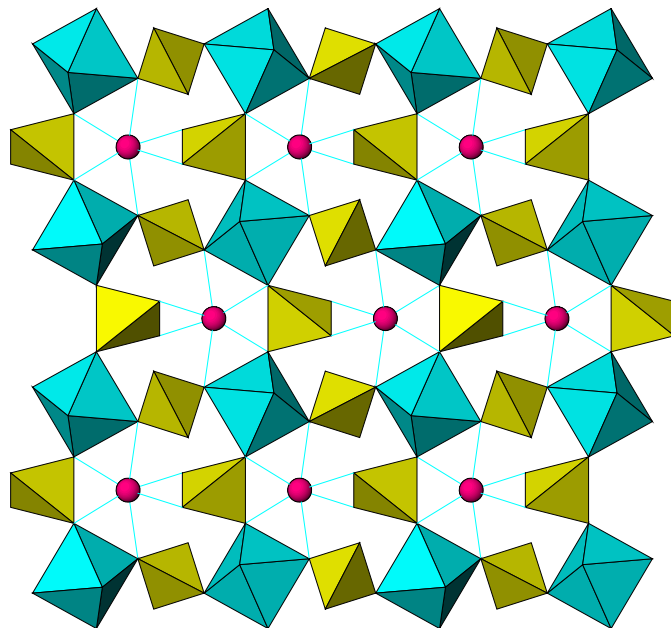


Prieto (2004). Transformaciones cristalinas en el manto terrestre.: de los procesos a nano-escala a la dinámica global. Macla 1, 29-36.

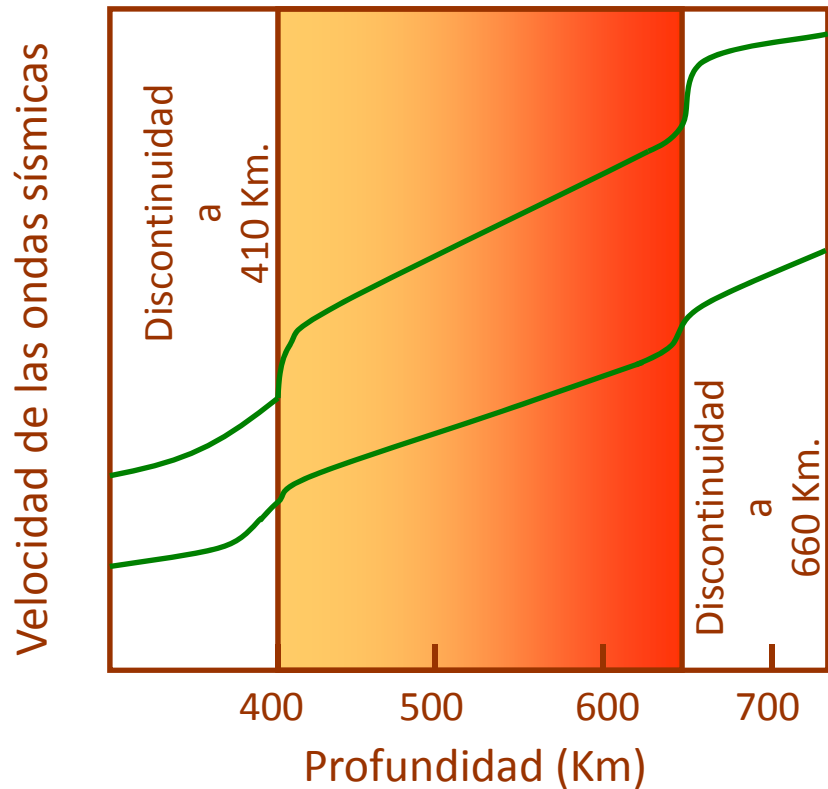
Composición mineral del manto

Pirolita

Olivino	62.6% (vol.)
Ortopiroxeno	25.0%
Clinopiroxeno	2.0%
Granate	10.0%



La zona de transición del manto superior



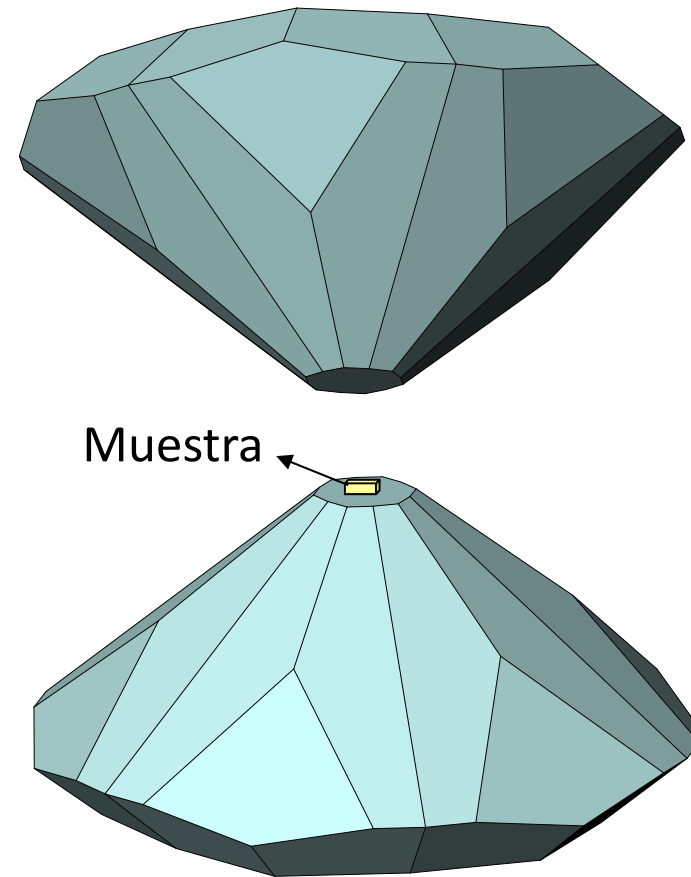
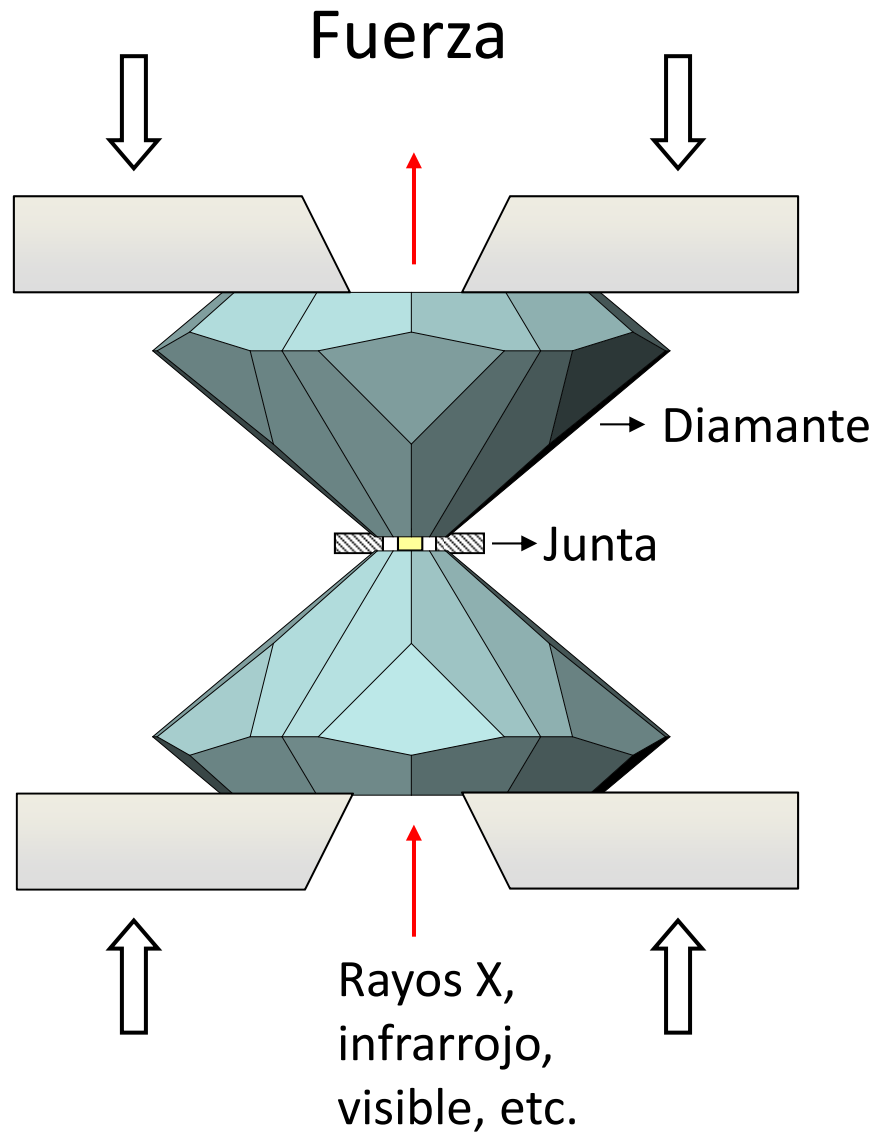
¿Qué transformaciones sufren los minerales de las capas altas del manto al incrementarse la presión y la temperatura con la profundidad?

Olivino	62.6% (vol.)
Ortopiroxeno	25.0%
Clinopiroxeno	.0%
Granate	10.0%

↓ P, T

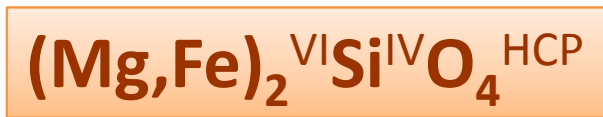
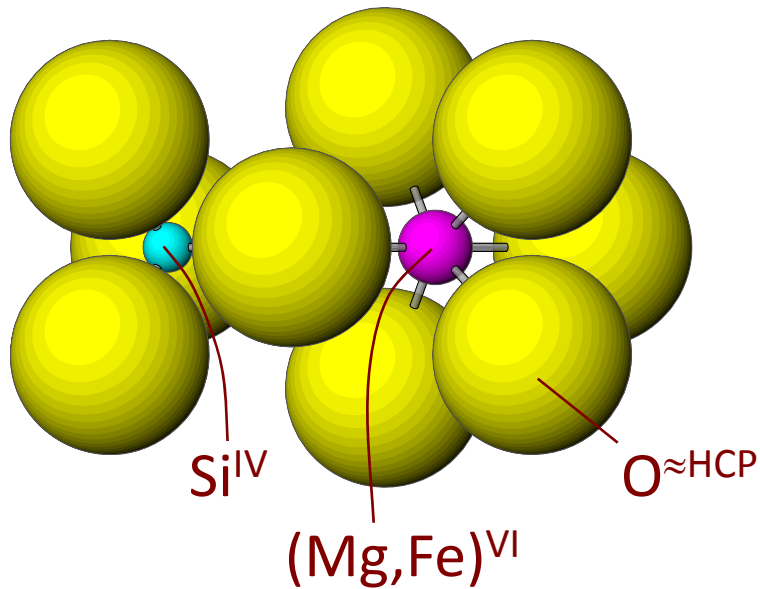
¿?

Una ventana abierta hacia el interior de la Tierra



Prieto (2004). Transformaciones cristalinas en el manto terrestre.: de los procesos a nano-escala a la dinámica global. Macla 1, 29-36.

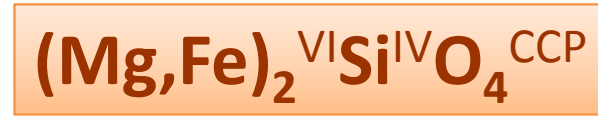
Cristaloquímica de las zonas de transición (i)



α -Olivino

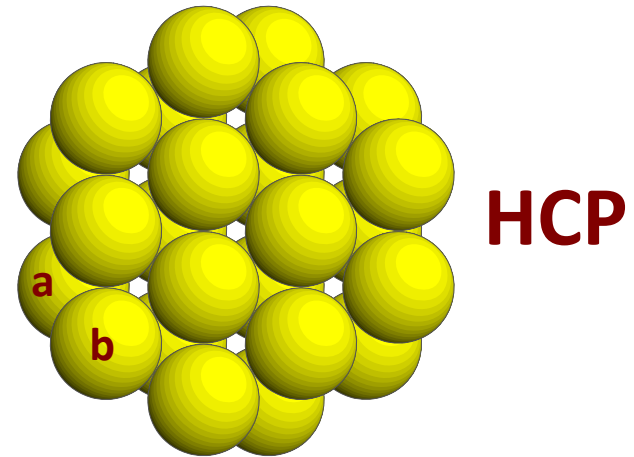


$\Delta\rho \approx 7.7\%$

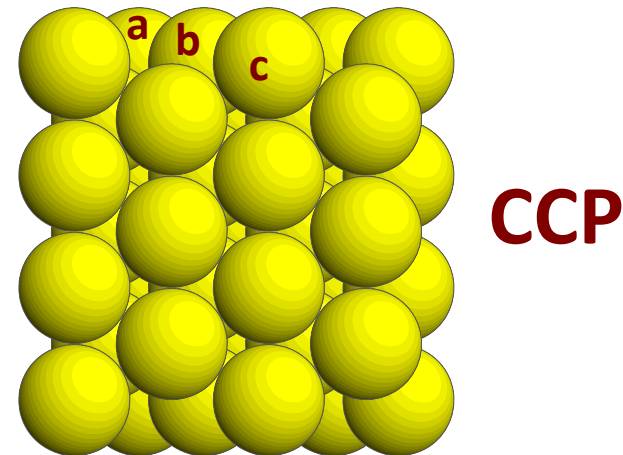


β -silicato-espinel

γ -silicato-espinel

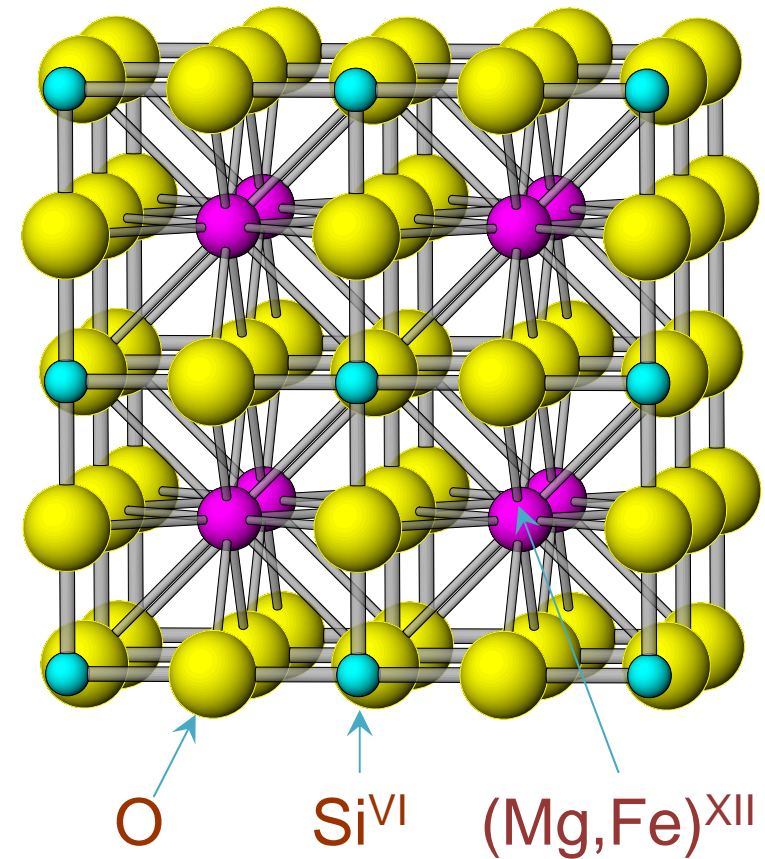
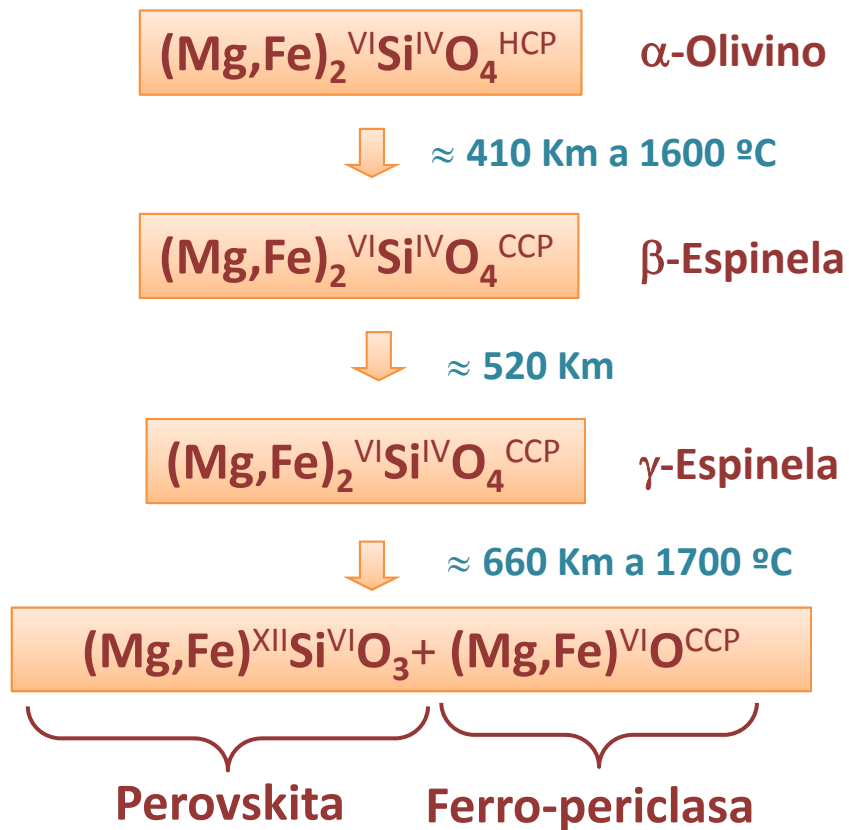


HCP



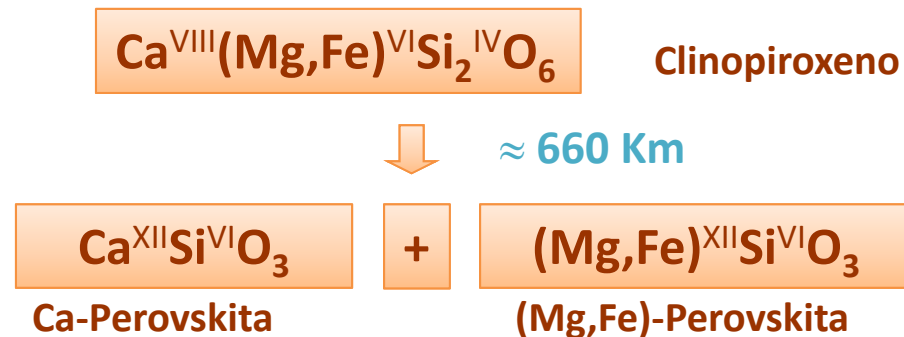
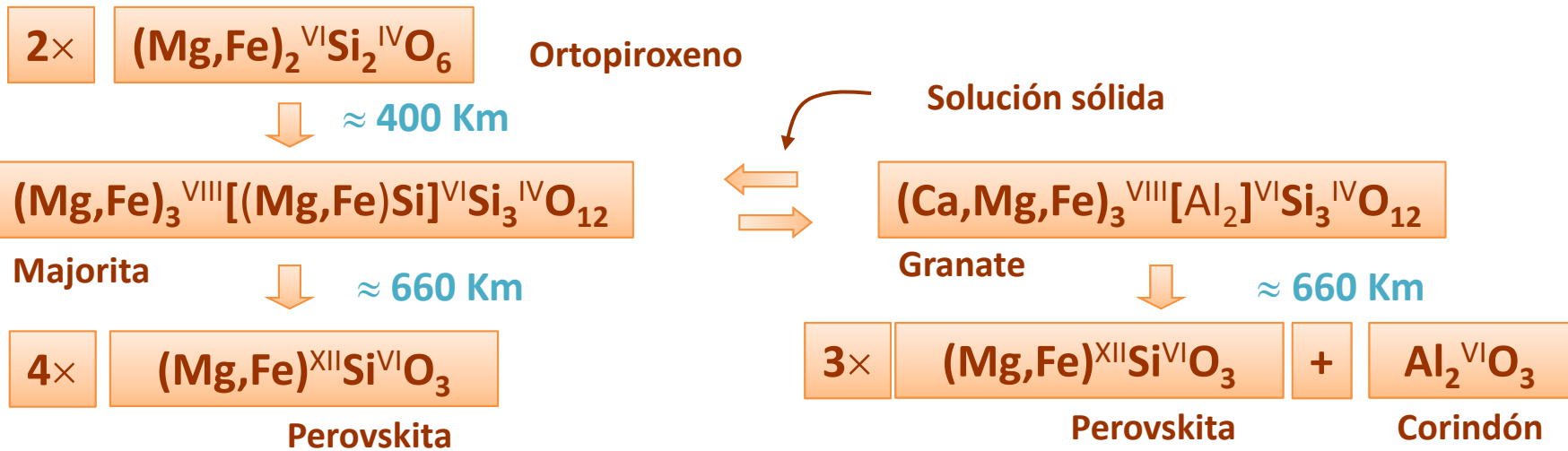
CCP

Cristaloquímica de las zonas de transición (ii)

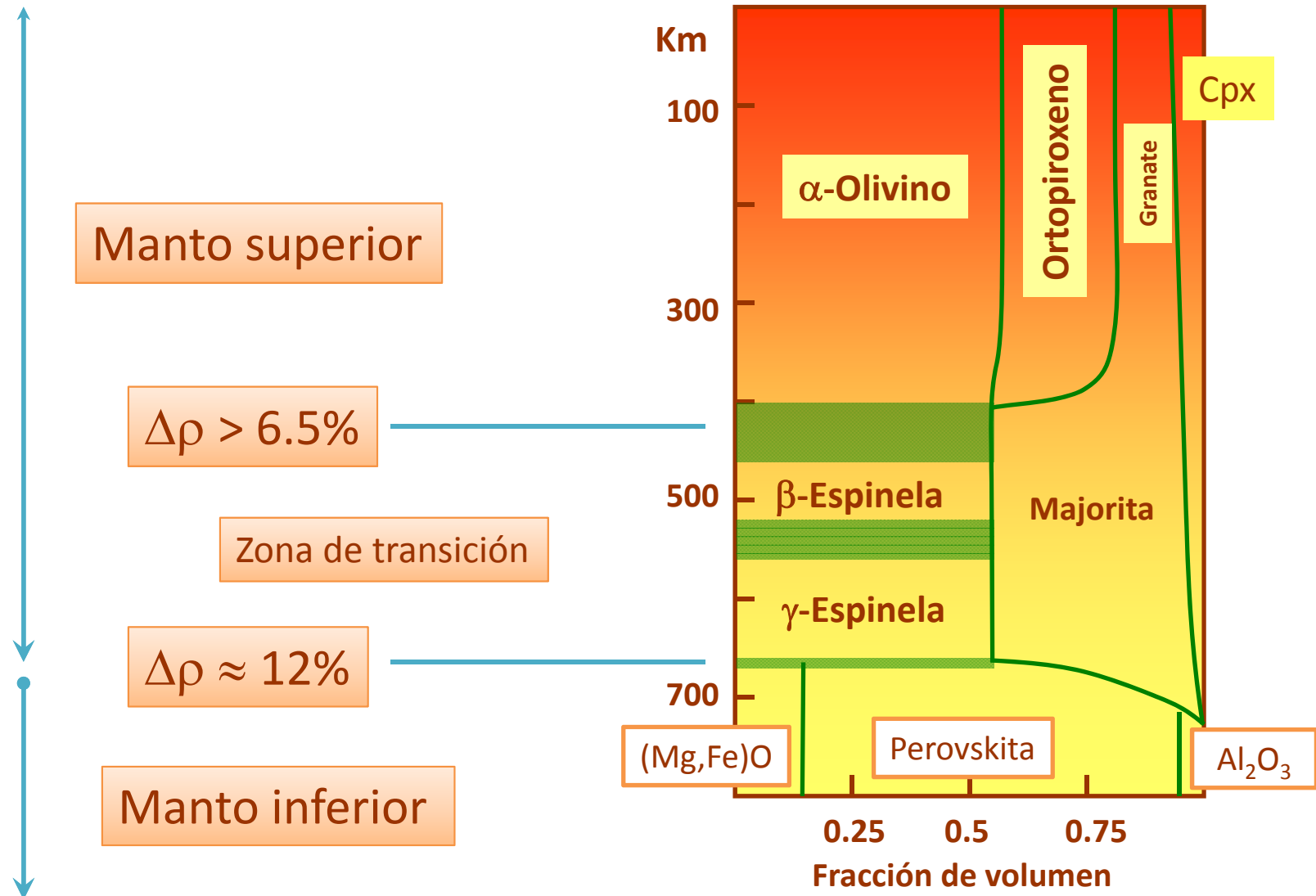


$$\rho_{\text{perovskita}} - \rho_{\text{olivino}} \approx 23\%$$

Cristaloquímica de las zonas de transición (iii)

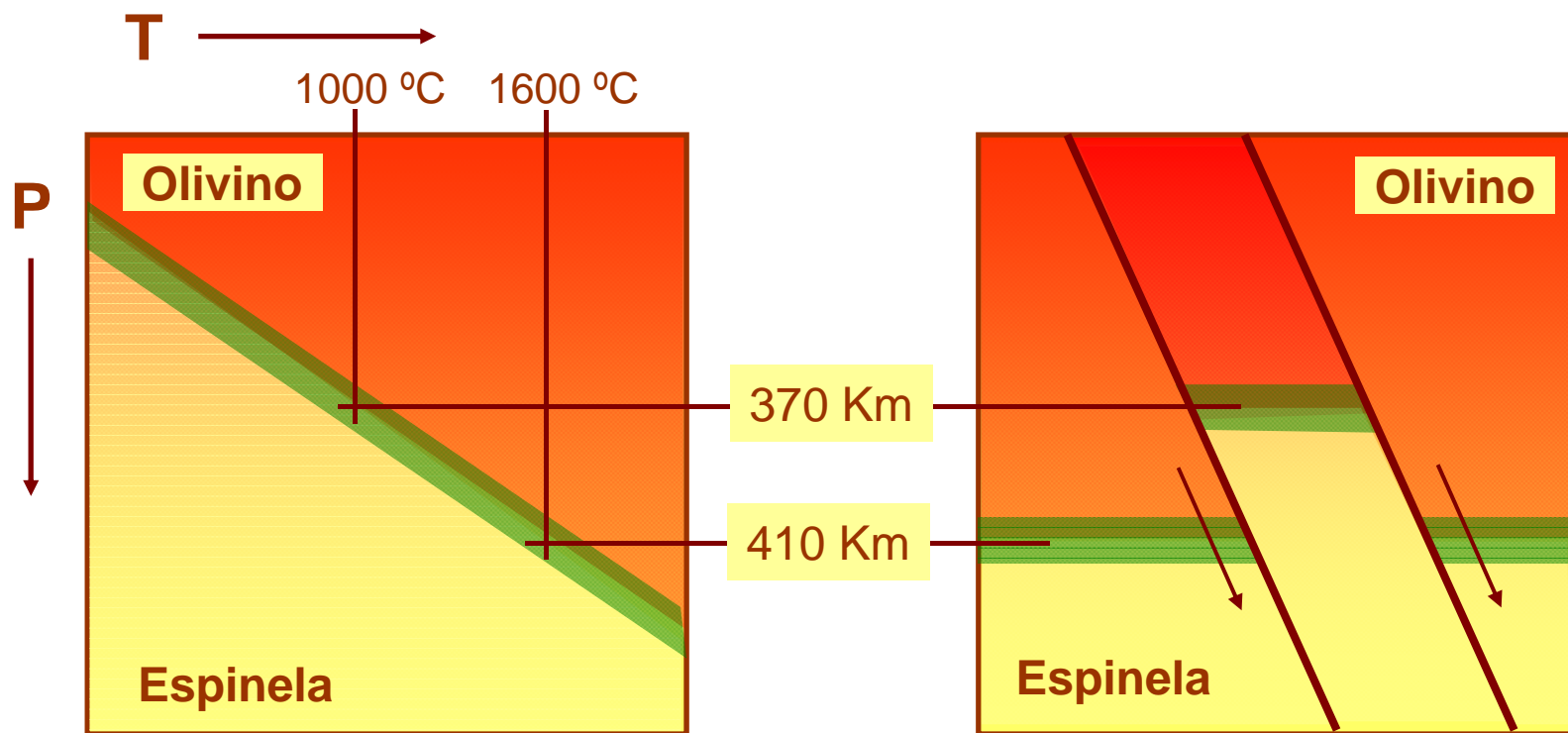


Constitución volumétrica del manto



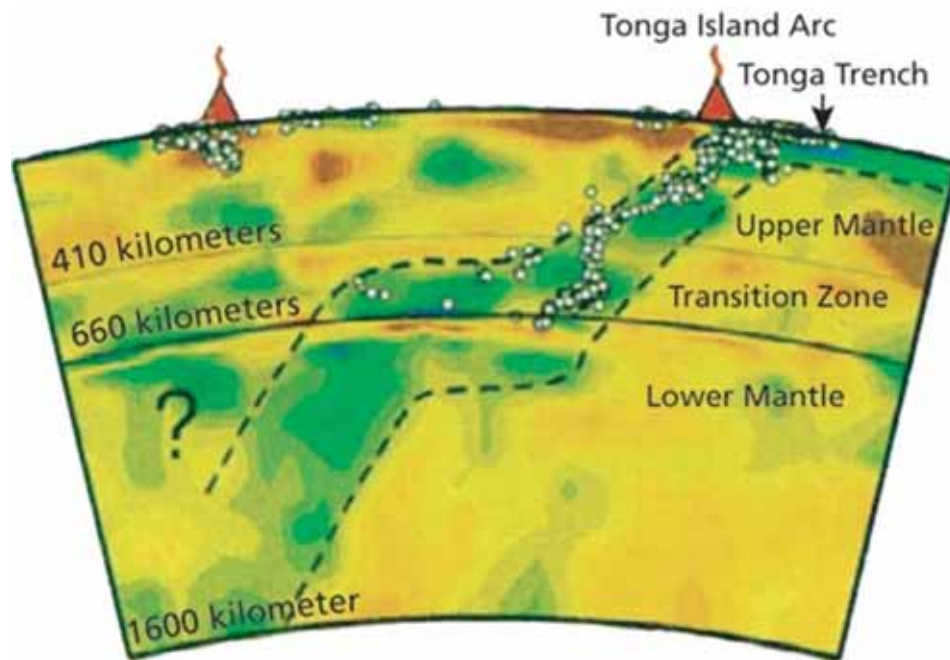
¿Cruza la convección la discontinuidad de los 410 Km?

Efecto de la transición exotérmica olivino-espínela en la subducción de una placa: Incremento de la velocidad del descenso

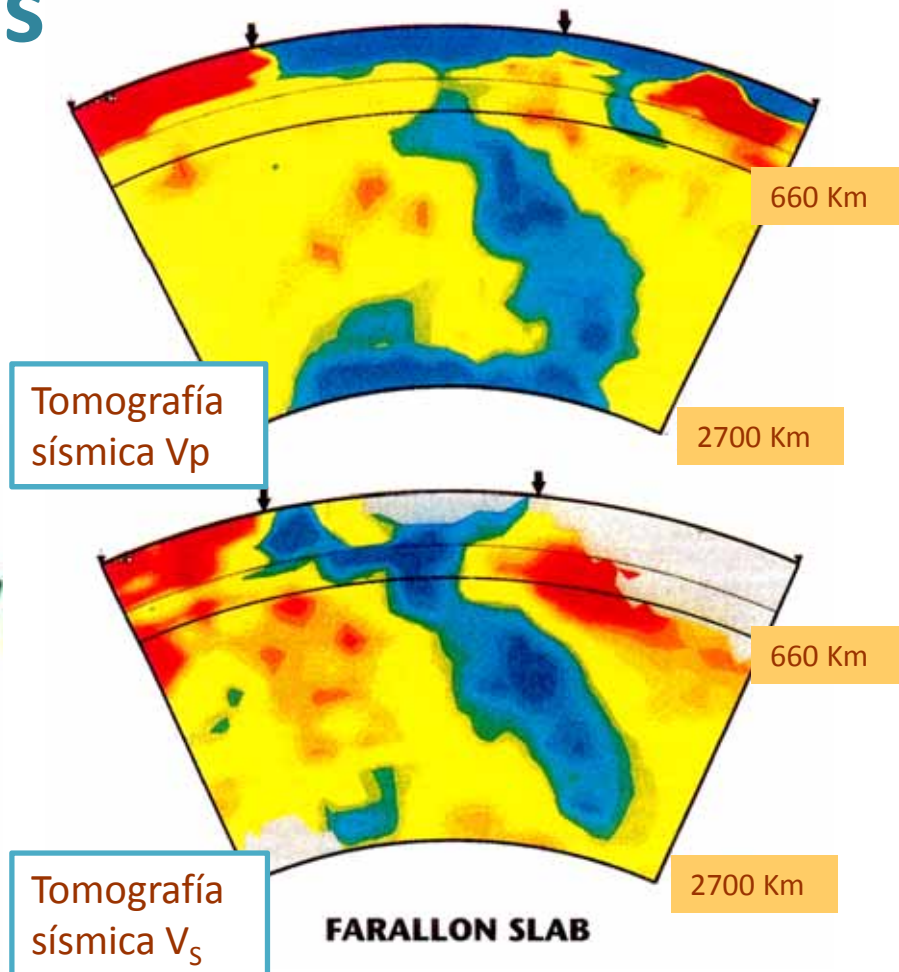


¿Cruza la convección la discontinuidad de los 660 Km?

Tomografía
sísmica V_S



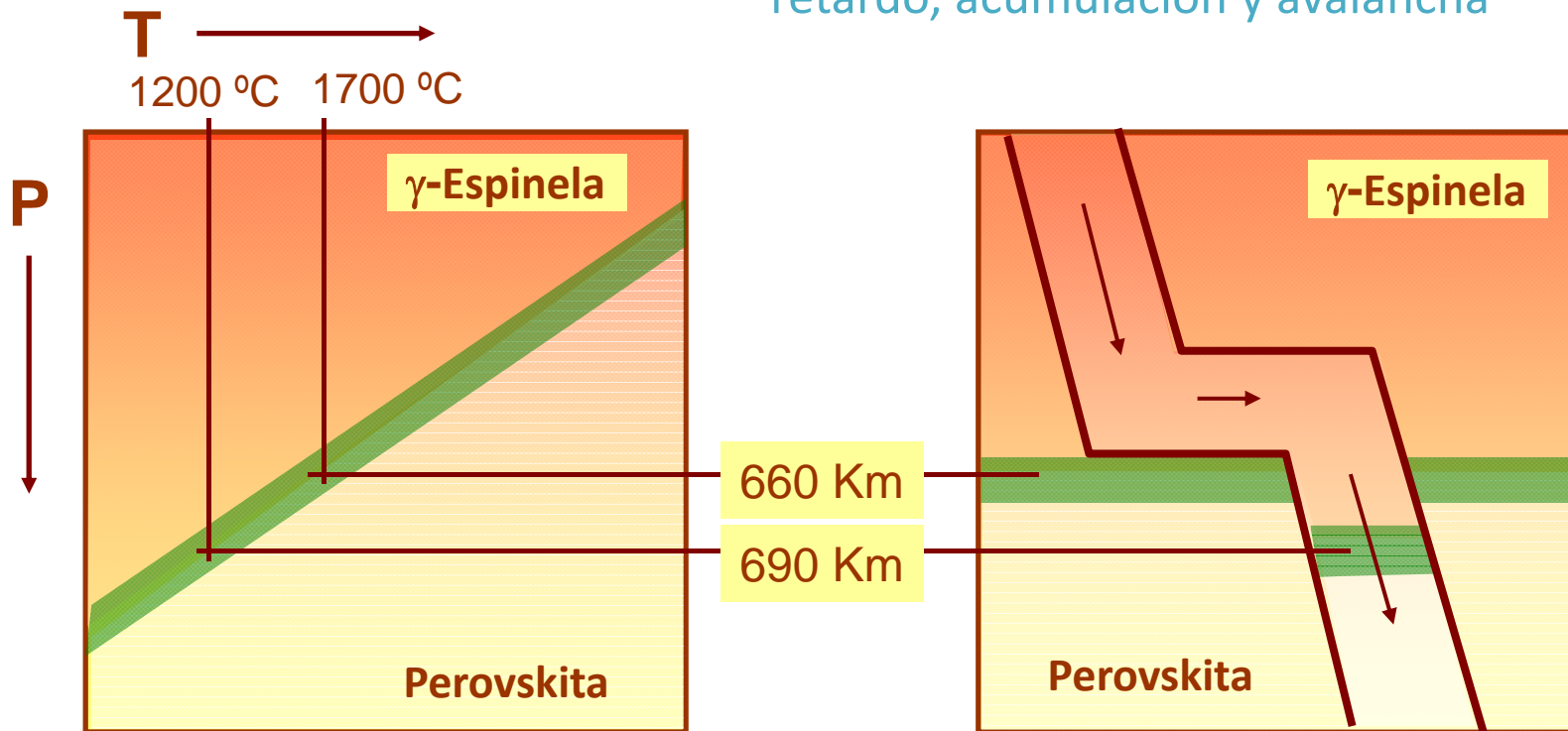
<http://www.who.edu/oceanus/viewImage.do?aid=2438&id=5301>



Schubert, Turcotte & Olson (2001) Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge U. Press.

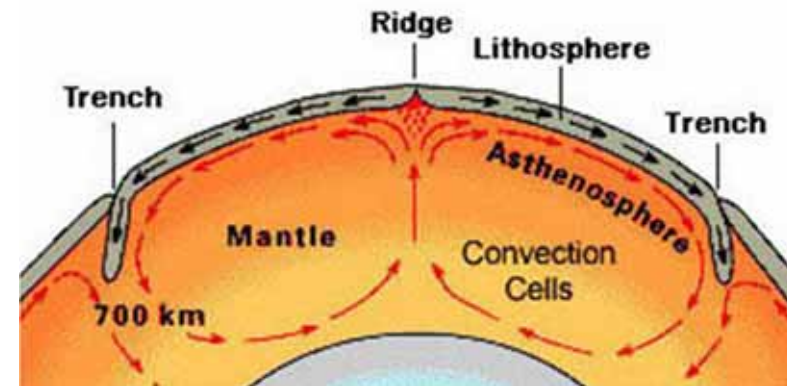
¿Avalanchas en el manto?

Efecto de la transición endotérmica γ -espinela-perovskita en la subducción: retardo, acumulación y avalancha



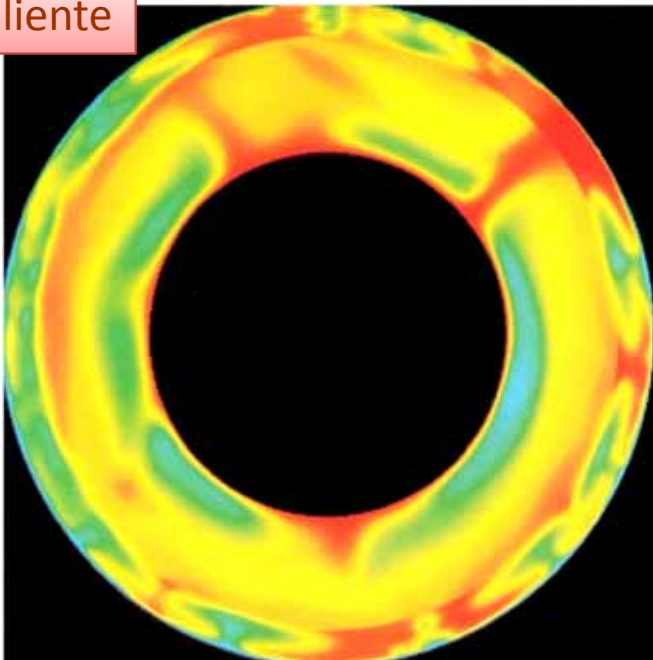
¿Uno o dos niveles separados de convección?

Modelos realizados considerando la transición de los 660 Km

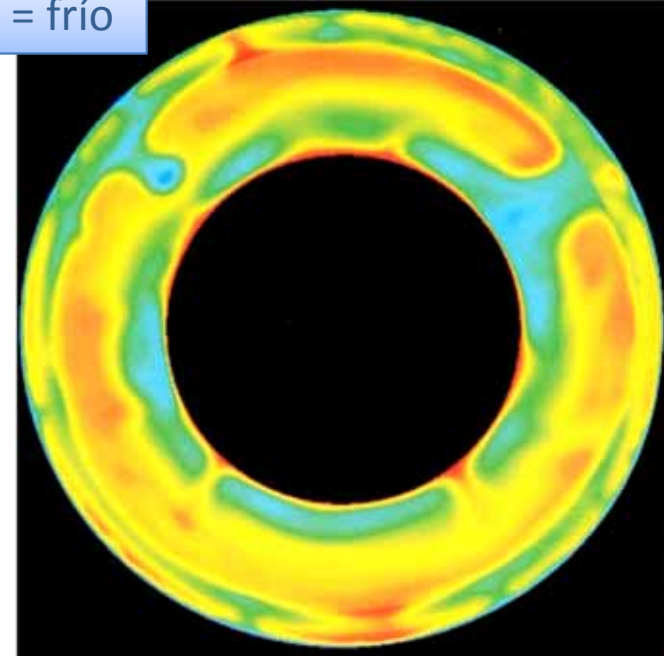


<http://www.earthhistory.org.uk/key-concepts/plate-tectonics-1>

Rojo = caliente

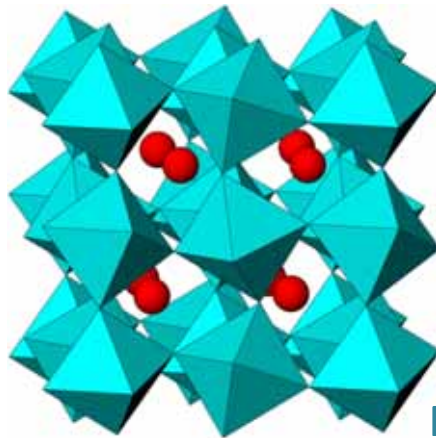


Azul = frío

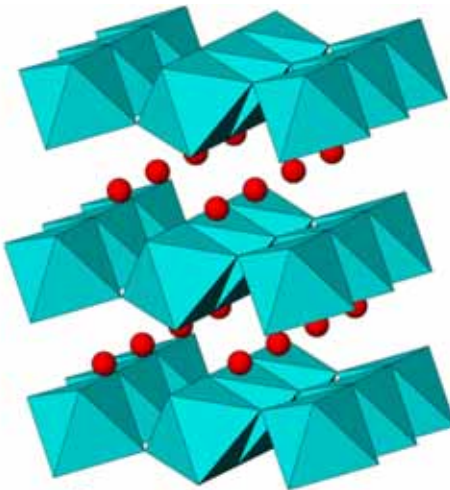


Schubert, Turcotte & Olson (2001) Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge U. Press.

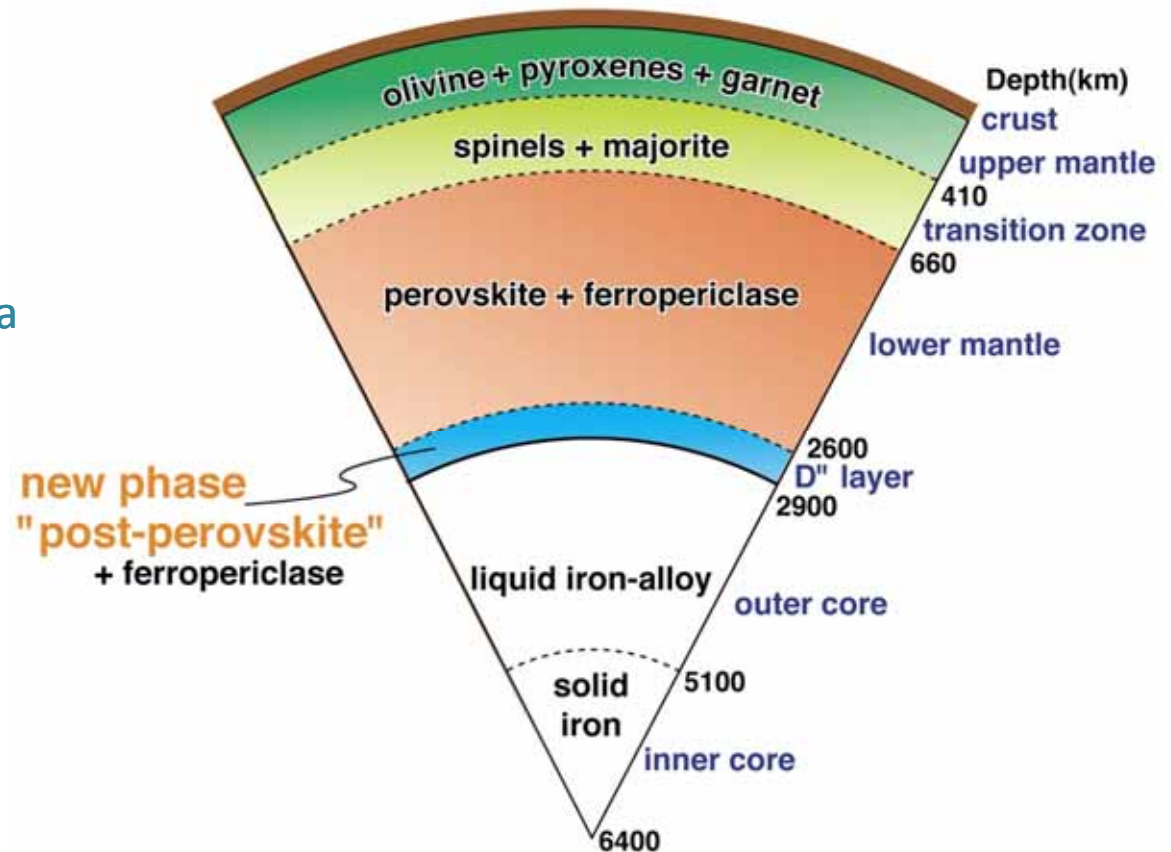
Descubrimiento de la Post-Perovskita y nueva visión de la transición Manto-Núcleo



Perovskita



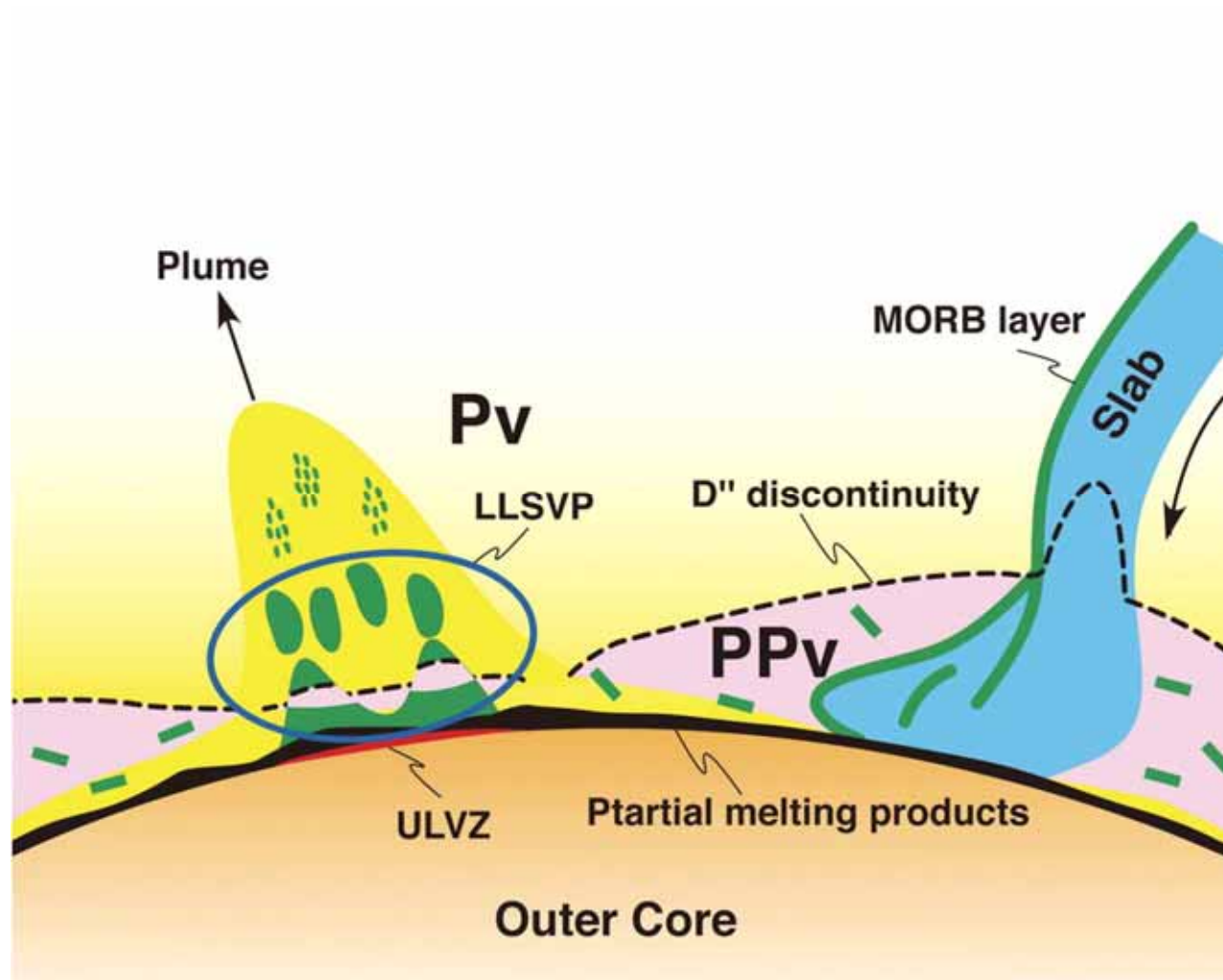
Post-Perovskita



http://www.public.asu.edu/~sshim5/images/mantle_minerals.html

Hirose & Lay (2008) Discovery of Post-Perovskite and New Views on the Core-Mantle Boundary Region. Elements 4, 183-189.

Chimeneas, avalanchas y la región D''



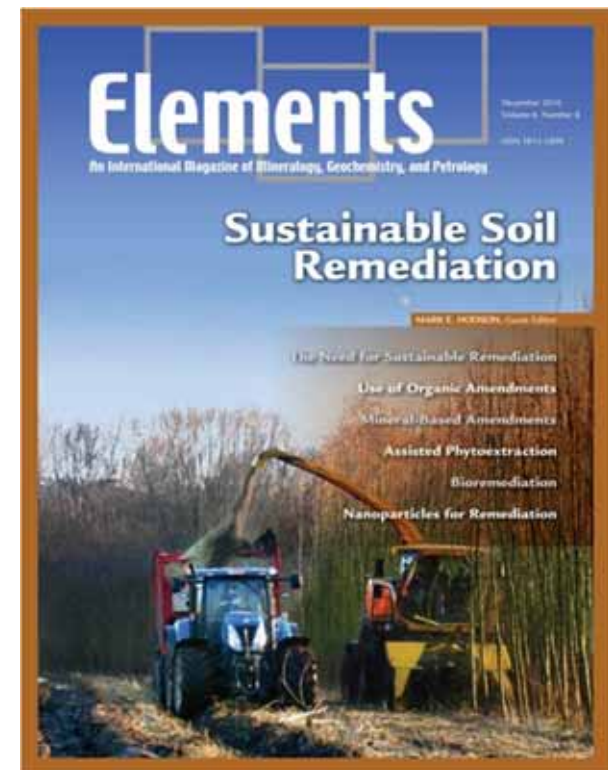
Hirose & Lay (2008) Discovery of Post-Perovskite and New views on the Core-Mantle Boundary Region. Elements 4, 183-189.

... desde la Gran Explosión hasta el presente y lo que esté por venir...

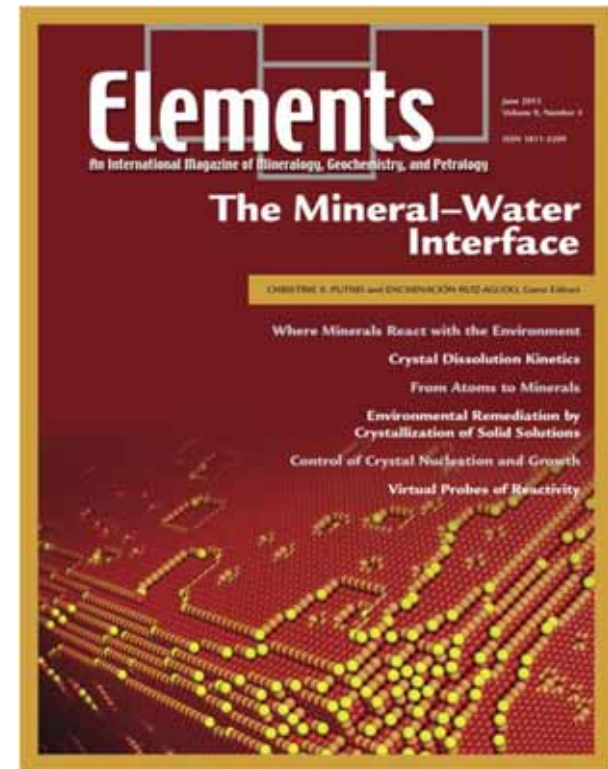
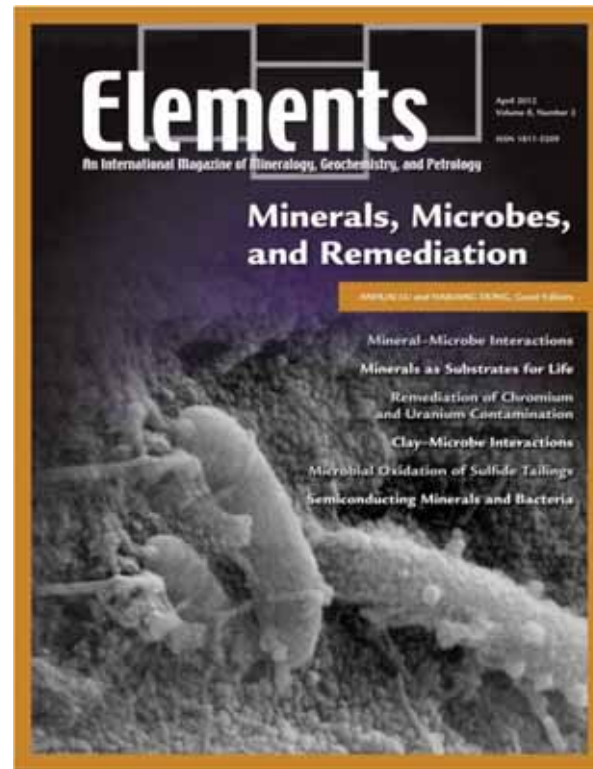
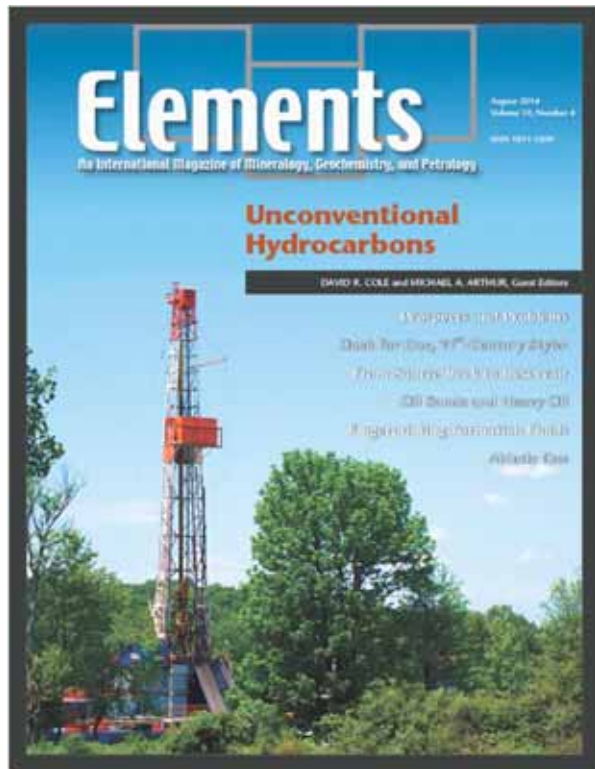
El cuaternario y los impactos antrópicos



La mineralogía de los 2000 (i)



La mineralogía de los 2000 (ii)



Medioambiente y demandas sociales

Nano-mineralogía

0.495958300039

mili ↔ *nano*
deci ↔ *micro* ↔ *pico*

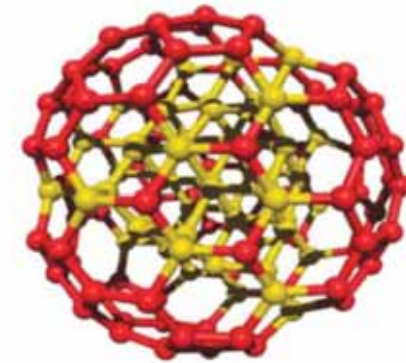
10^{-9}

Angstrom (Å) ⇒ distancias interatómicas

Micra (μm) ⇒ resolución de la microsonda electrónica

1 nm = 10 Å

100 nm = 0.1 μm → **Nano-escala**



Estructura de un nano-diamante (1.2 nm)

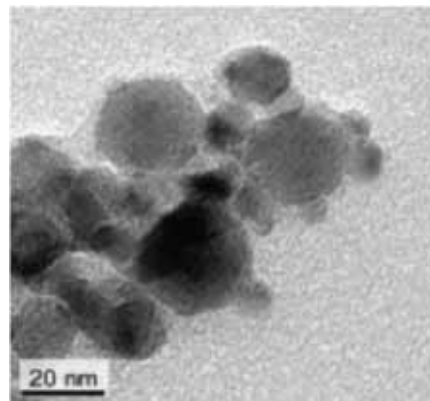
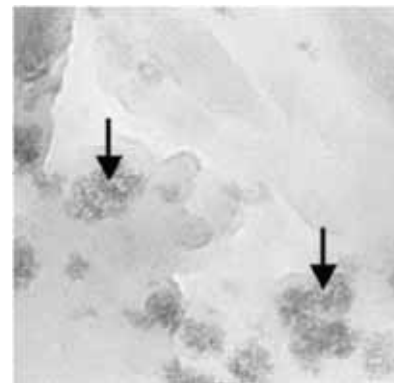
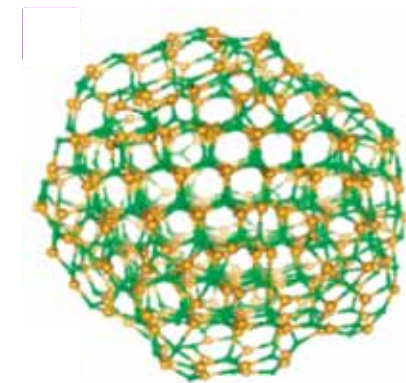


Imagen TEM de coloides de FeO_x

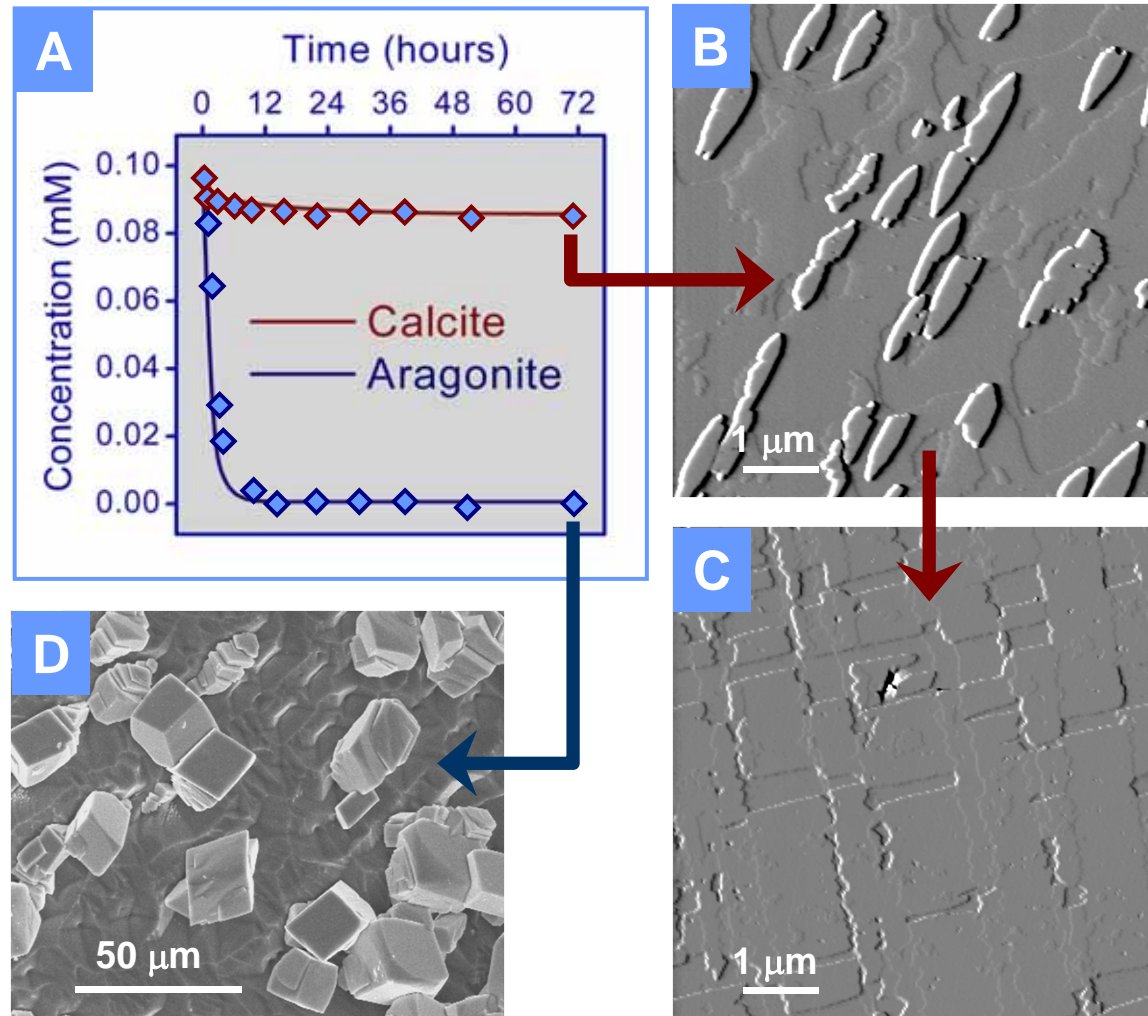


Nano-partículas amorfas de ZnS



Estructura de una nano-partícula de ZnS (3 nm)

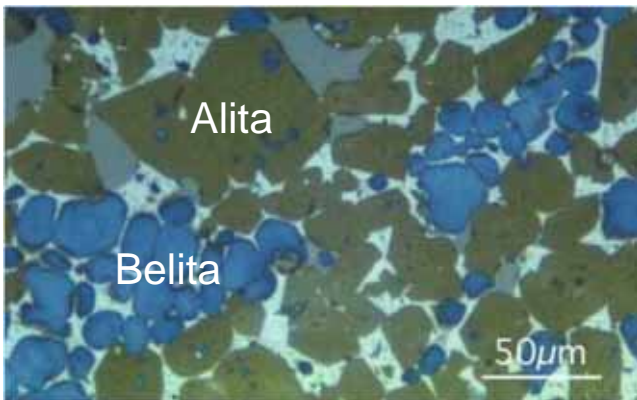
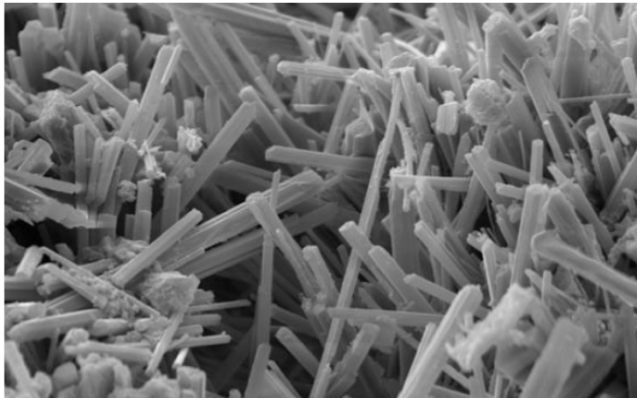
Atrapamiento de cadmio mediante cristalización de $(\text{Cd,Ca})\text{CO}_3$ (*aragonito versus calcita*)



Prieto, Astilleros & Fernández-Díaz (2013) Environmental remediation by crystallization of solid solutions. Elements 9, 195-201.

La Gran Historia y el concepto de mineral

¿Materiales naturales?



Incrustaciones de estruvita:
 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$



Incrustaciones de calcita:
 CaCO_3

Minerales del cemento:

Cristales de etringita
 $(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaSO}_4)_3 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$

Minerales del cemento:

Alita: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

Belita: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

C3A: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

C4AF: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

C3A3S: $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$

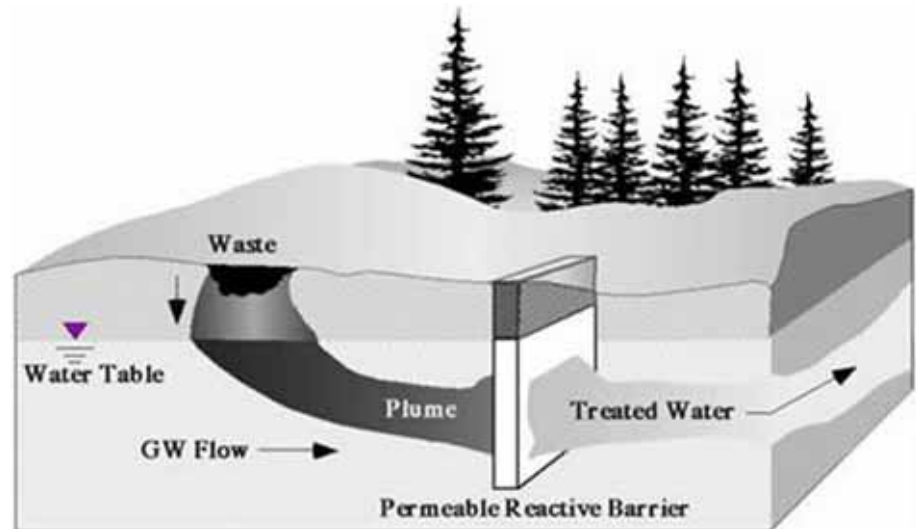
etc.



Vertederos incontrolados: Reactores minerales?



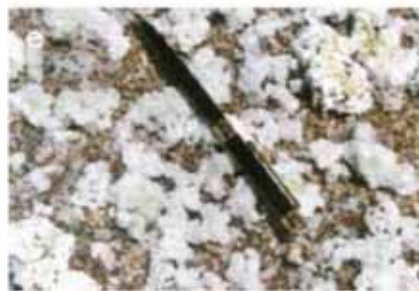
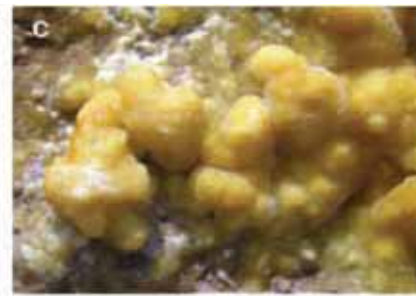
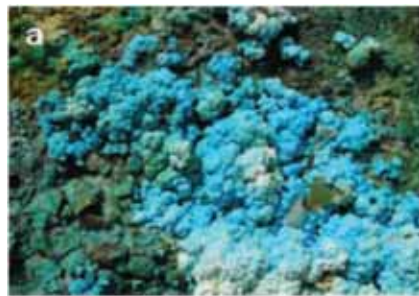
Escombros de
cemento y hormigón



Efectos antropogénicos

Formación de minerales por interacción de suelos, acuíferos etc. con aguas contaminadas por residuos industriales

Sánchez-España (2008) Acid Mine Drainage in the Iberian Pyrite Belt. *Macla* 10, 34-43.



Precipitación mineral durante el drenaje ácido de minas: sulfatos y oxi-hidroxi-sulfatos de hierro y aluminio.

¿Y PARA QUE SE PUEDE USAR ESTO?

NO SABEMOS, LO QUE HACEMOS ES INVESTIGACION BASICA

QUE BONITO, NOSOTROS NOS MATAMOS EMPUJANDO PIEDRAS Y ARRASTRANDO ANIMALES SALVAJES, MIENTRAS LOS SEÑORES SE ENTRETienen HACIENDO COSAS QUE NO SIRVEN PARA NADA

