



fcfm

Geología
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Introducción al metamorfismo

Petrología Ígnea y Metamórfica GL5103-1, Primavera 2022

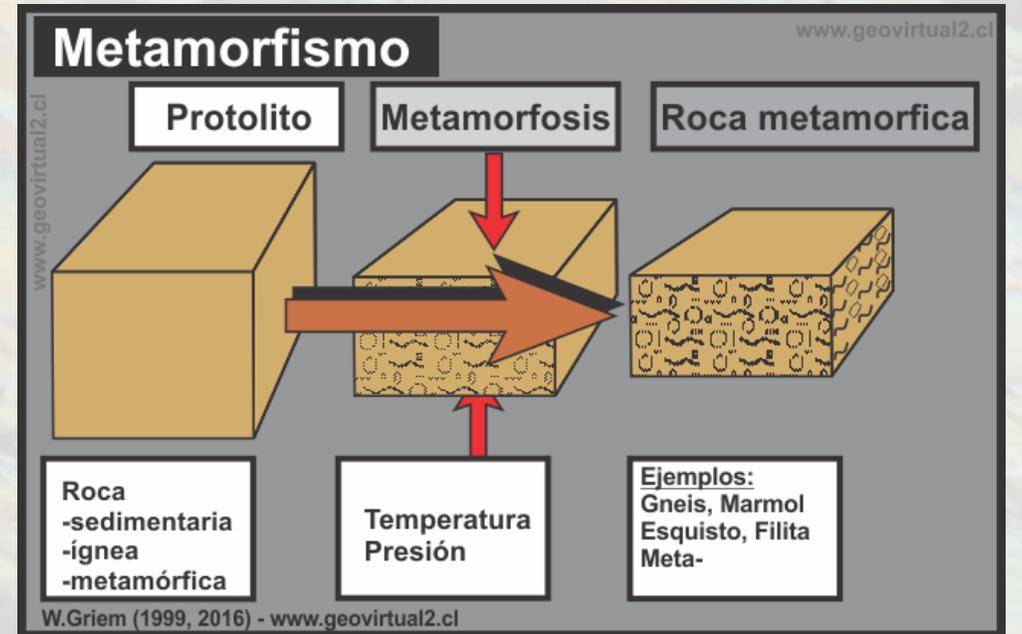
Profesor: Diego Morata

Auxiliar: Luis Naranjo

Ayudante: Javiera Terán

Metamorfismo

- Roca originalmente ígnea, sedimentaria o metamórfica.
- Cambios mineralógicos y/o texturales que ocurren predominantemente en estado sólido.
- Ajuste de la roca a condiciones físicas nuevas (PT) diferentes a las cuales se originó y, que además, difieren de las condiciones físicas que ocurren normalmente en la superficie de la tierra y en la zona de Diagénesis.



Agentes

Temperatura

Presión (esfuerzos diferenciales)

Fluidos químicamente activos

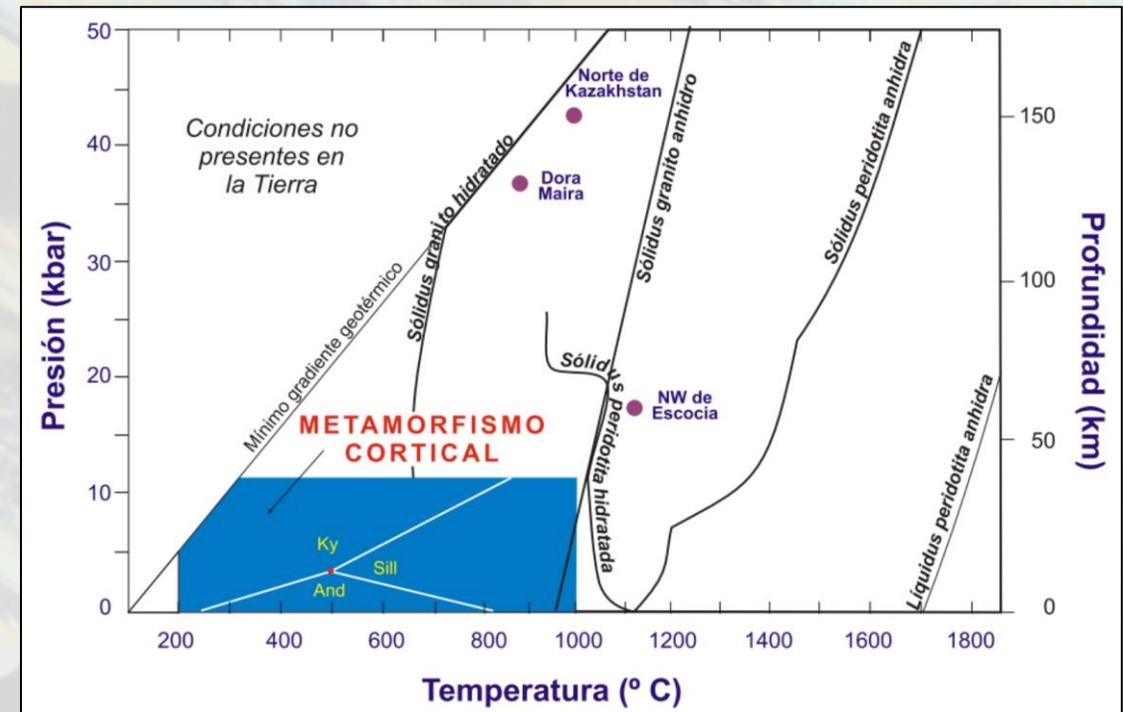
Cambios

Mineralógicos (recristalización y neomineralización).

Texturales

(reordenamiento/plegamientos)

- Temperatura: proporciona la energía que impulsa las reacciones químicas para que recristalicen nuevos minerales.
- Presión de confinamiento: compacta la roca y disminuye la porosidad.
- Presión dirigida (esfuerzo diferencial): fuerzas desiguales “acortan” o “alargan” la roca. **Esta P produce el plegamiento.**
- F.Q.A; catalizadores de recristalización (fomenta la migración iónica).



Grado metamórfico

El grado metamórfico estará siempre caracterizado por una asociación mineral.

Grado creciente de metamorfismo

Gradiente geotérmico: Incremento de la T con la profundidad ~ 25 – 30°C/km

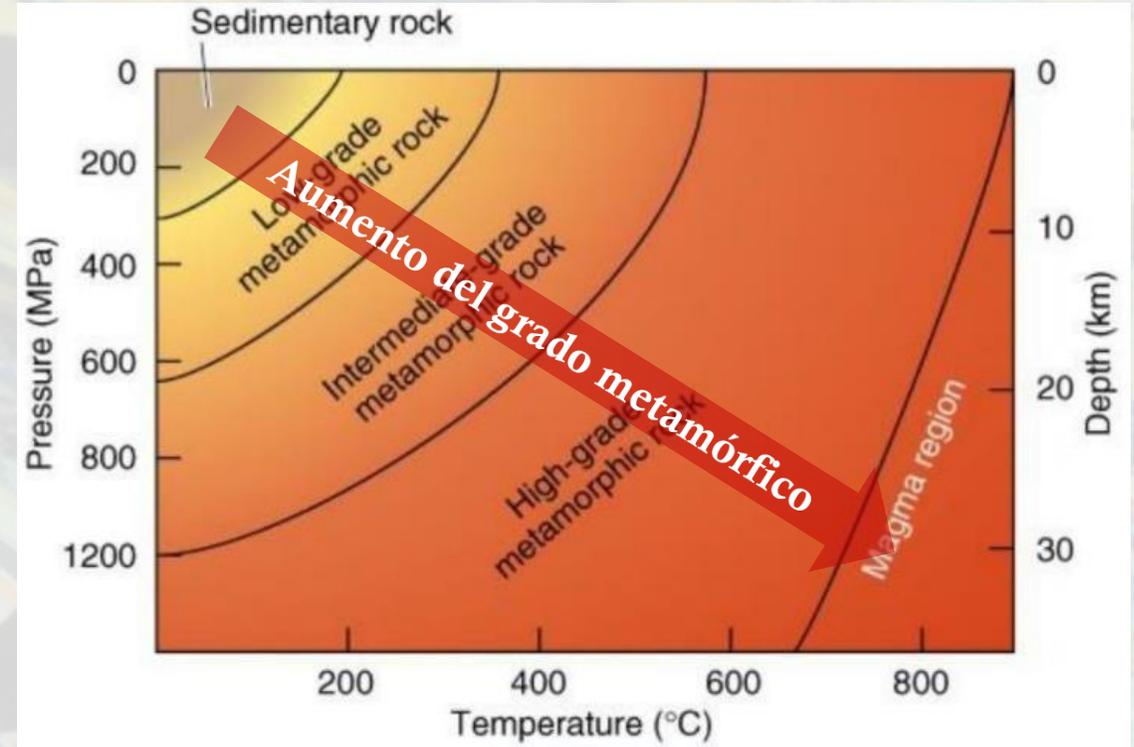
Grado metamórfico \equiv Temperatura

Bajo grado metamórfico: 200 – 320°C

Medio grado metamórfico: 320 – 550°C

Alto grado metamórfico: > 550°C

- ↑ °Metamorfismo → Deshidratación progresiva
- ↑ °Metamorfismo → Aumento tamaño cxs
- ↑ °Metamorfismo → Deformación (Independiente!)



Tipos de metamorfismo: Según el ambiente geológico

- **Regional – Orogénico:** Ocurre en un área de gran extensión, i.e., afecta un gran volumen de roca. Se relaciona con procesos tectónicos a gran escala.
- **Contacto** Metamorfismo de extensión local. Afecta a la roca caja alrededor de cuerpos de magma emplazados en una variedad de ambiente. Causado principalmente por la transferencia de calor.
- **Cataclástico:** Metamorfismo de extensión local, asociado a zonas de fallas o zonas de cizallamiento.
- **Hidrotermal:** **Metasomatismo**. Causado por la circulación de fluidos intersticiales. A escala local o regional.
- **De choque** Generalmente de extensión local. Causado por el paso de una onda de choque de material a otro, e.g., debido al impacto de un cuerpo (meteorito) sobre una superficie (planeta).

Metamorfismo vs Metasomatismo

Tanto el metamorfismo como el metasomatismo implican el reequilibrio de los minerales debido a cambios de presión, temperatura y/o entorno químico.

Metasomatismo

- Sistema abierto. La composición de la roca cambia debido a la adición/remoción de cationes.
- Resultado de la interacción de la roca con fluidos hidrotermales*.
- La roca se mantiene en estado sólido.

Metamorfismo

- Sistema cerrado e isoquímico. La composición de la roca no cambia sustancialmente, con la única excepción de la pérdida/ingreso de volátiles (e.g., H₂O).
- La roca se mantiene en estado sólido.

Definiciones importantes

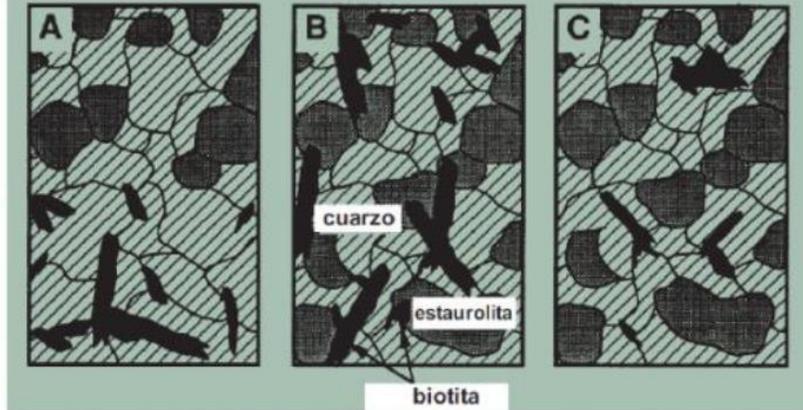
Asociación mineral en equilibrio

- Grupo de minerales presentes en la roca que **se encuentran en equilibrio**.
- En la práctica, una asociación mineral corresponde a aquellos minerales que **se encuentran en contacto sin reaccionar**.
- Debería comprobarse con otros estudios, como filtros químicos

Paragénesis mineral

- **Sucesión de asociaciones** minerales que se reemplazan unas otras.
- Una paragénesis representa un evento metamórfico.

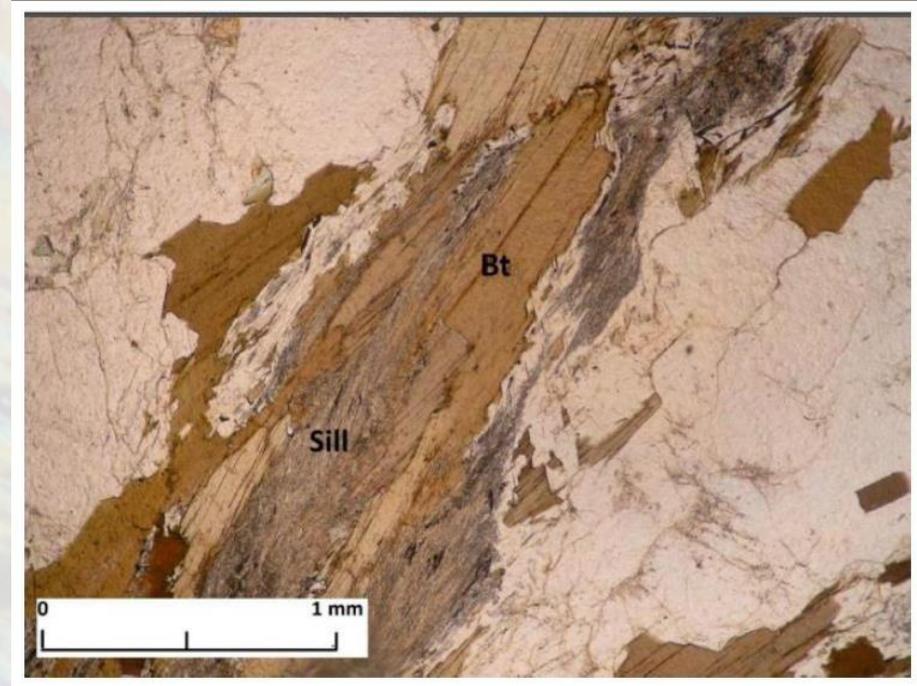
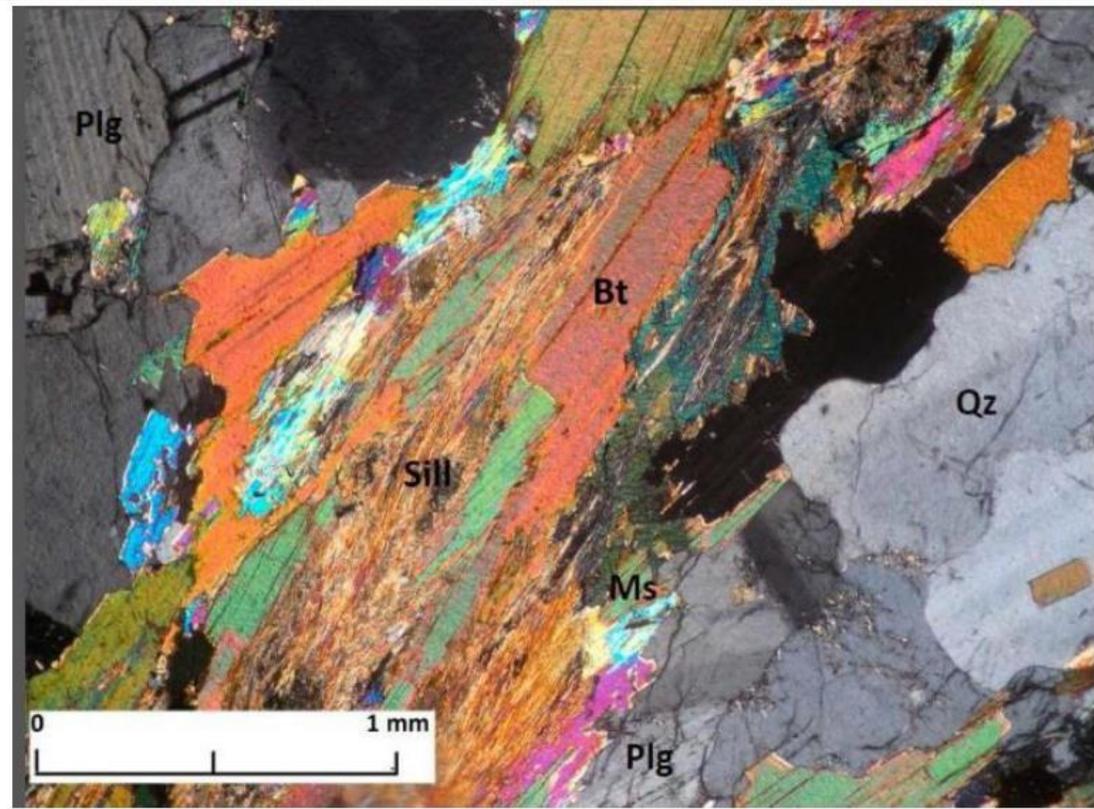
Asociación mineral



	Roca A			Roca B			Roca C		
	Cuarzo	Estaurolita	Biotita	Cuarzo	Estaurolita	Biotita	Cuarzo	Estaurolita	Biotita
Cuarzo	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Estaurolita		X		X	X			X	
Biotita			X			X			X

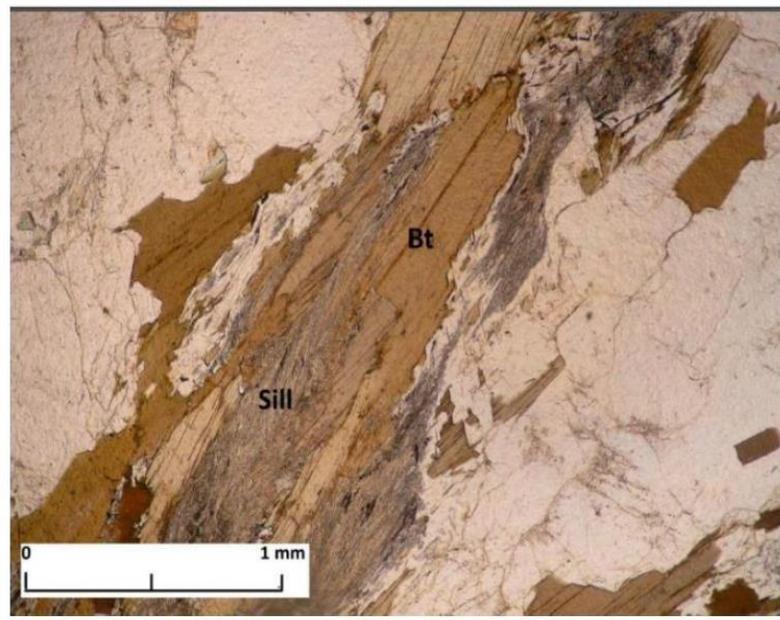
Heterogénea No equilibrio Homogénea Equilibrio Homogénea No equilibrio

Paragénesis mineral



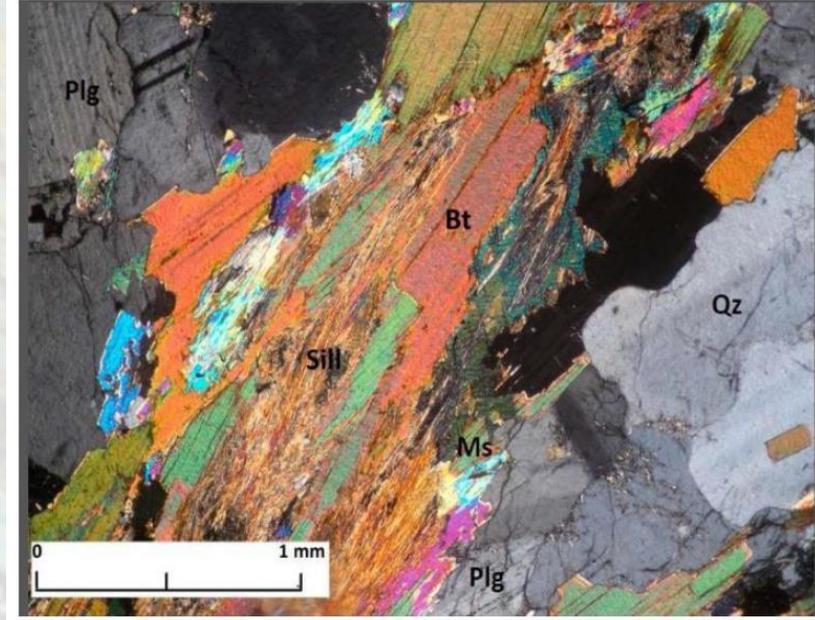
	Sill	Bt	Ms	Qz	Plg	
Sill	x	x	x	x		
Bt		x	x	x	x	
Ms			x	x	x	
Qz				x	x	
Plg					x	

Paragénesis mineral



- Asociaciones minerales:

- Sill + Bt
- Sill + Ms
- Sill + Qz
- Bt + Ms
- Bt + Qz
- Bt + Plg
- Ms + Plg
- Ms + Qz
- Qz+ Plg



- Paragénesis:

- Sill + Bt + Qz + Ms
- Bt+ Ms + Qz + Plg

	Sill	Bt	Ms	Qz	Plg	
Sill	x	x	x	x		
Bt		x	x	x	x	
Ms			x	x	x	
Qz				x	x	
Plg					x	

Texturas

- Granoblástica (equigranular, poligonal, inequigranular y decusada)
- Nodulosa
- Lepidoblástica
- Nematoblástica
- Porfidoblástica

- Poiquiloblástica
- Blastoporfídica
- Coronítica
- Esquistosidad de crenulación

Granoblástica

Mosaico equi o inequigranular de cristales equidimensionales o inequidimensionales con orientación aleatoria. Ocurre debido a que los granos ajustan sus límites entre sí, en estado sólido, para lograr el equilibrio textural. Común en rocas metamórficas no foliadas. Ej: Corneanas, Granulitas, Mármoles y cuarcitas. Se subdivide en cuatro tipos:

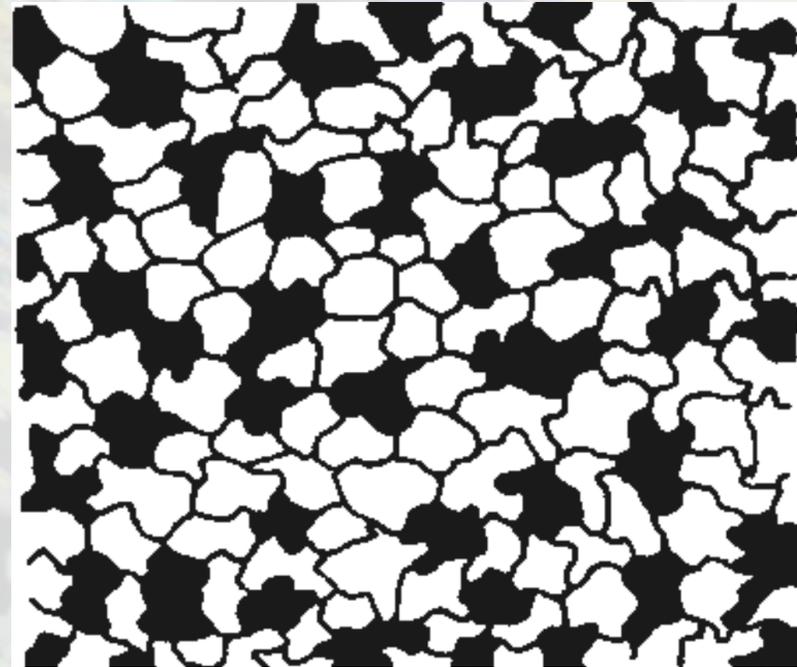
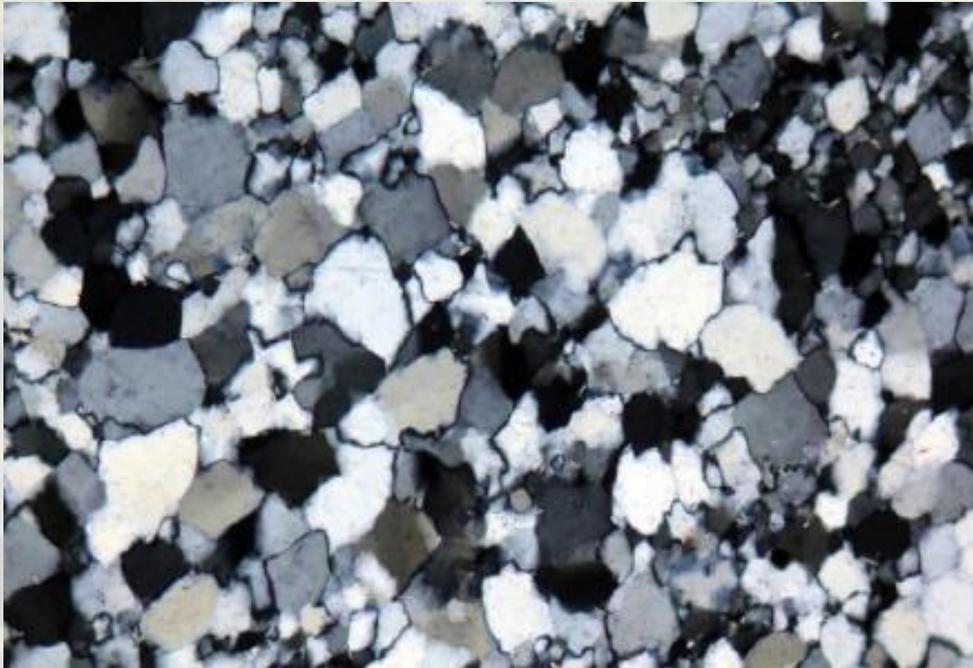
- ✓ Equigranular
- ✓ Poligonal
- ✓ Inequigranular
- ✓ Decusada

Metamorfismo térmico sin
orientación

**Minerales
orientados al azar**

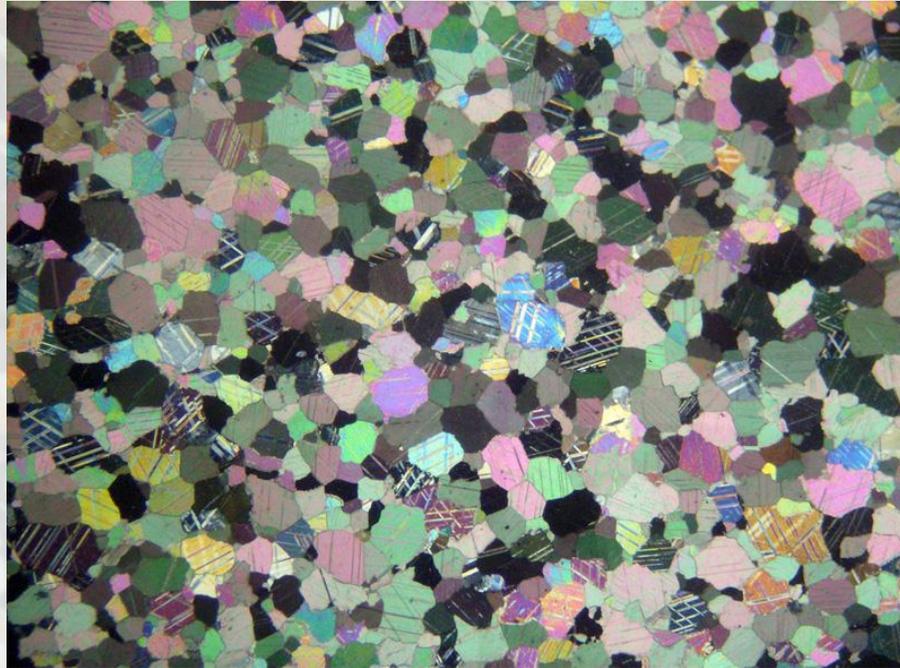
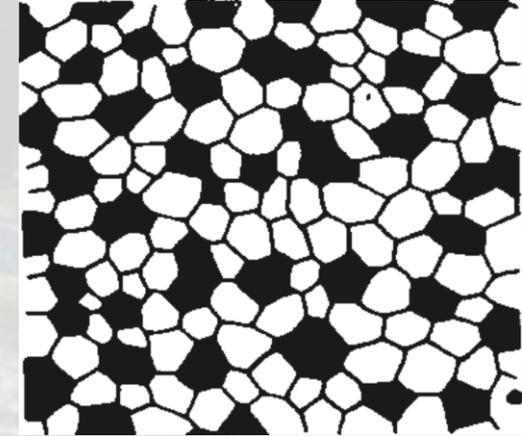
Granoblástica- Equigranular

Mosaico equigranular de cristales equidimensionales.



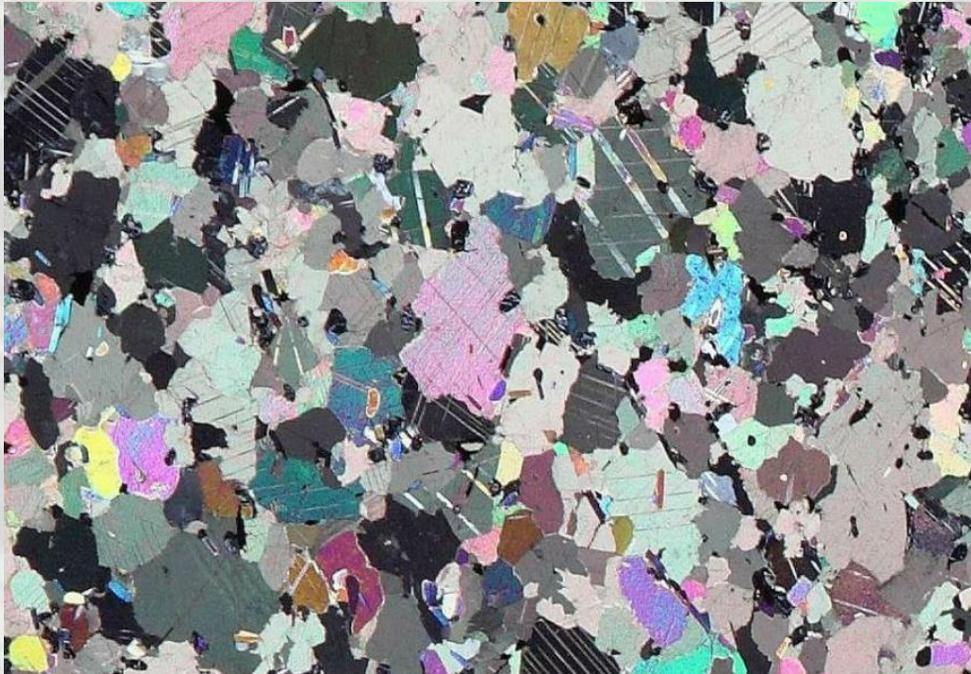
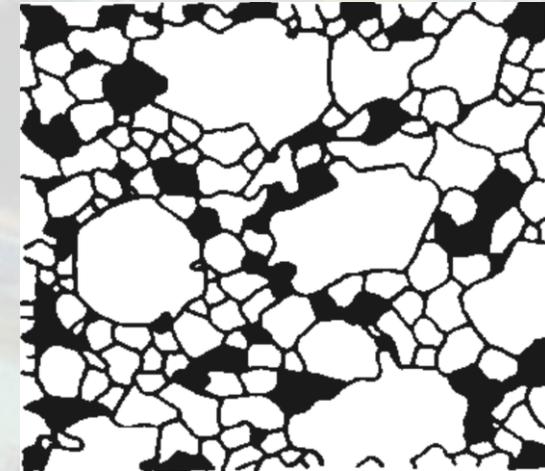
Granoblástica-Poligonal

Caso particular de la equigranular , los contactos entre los cristales son planos, predominan uniones triples y en general las caras del cristal están bien desarrolladas.



Granoblástica- Inequigranular

Mosaico inequigranular de cristales equidimensionales.



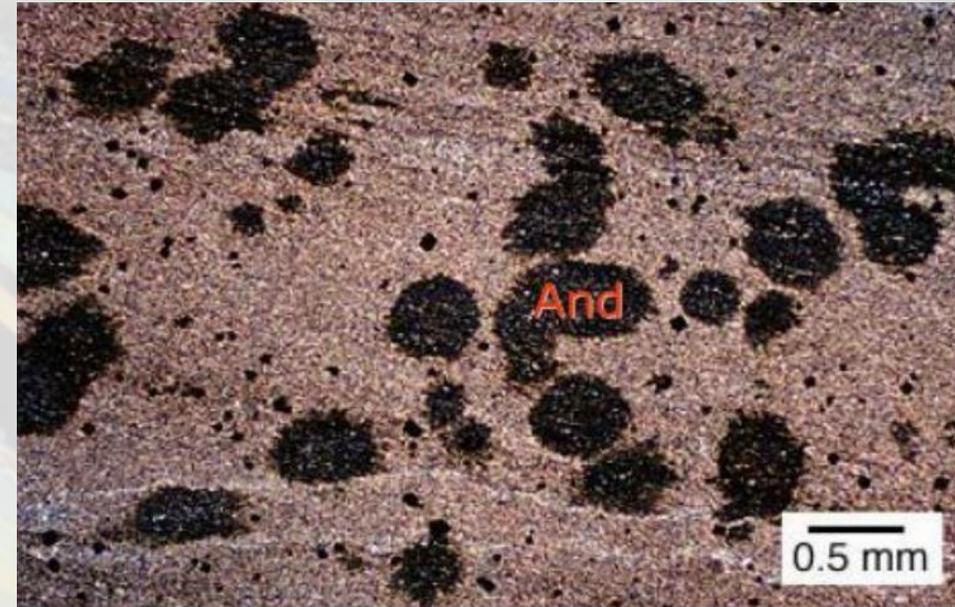
Granoblástica-Decusada

Textura donde los cristales entrelazados y orientados al azar son algo alargados y/o prismáticos. Suele aplicarse a rocas con una o dos fases minerales distintas. Las uniones triples son comunes. **Mosaico hipidiomórfico:** cristales subhedrales.



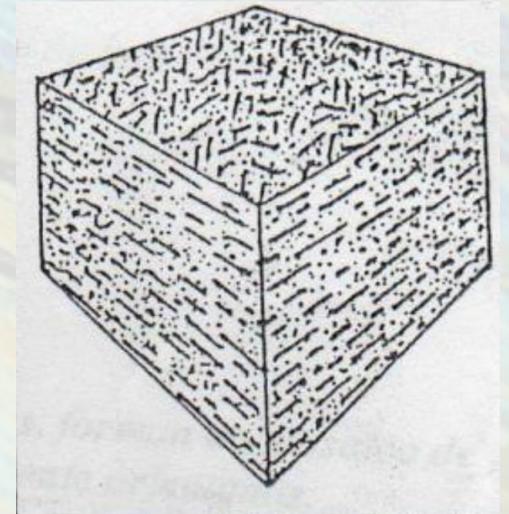
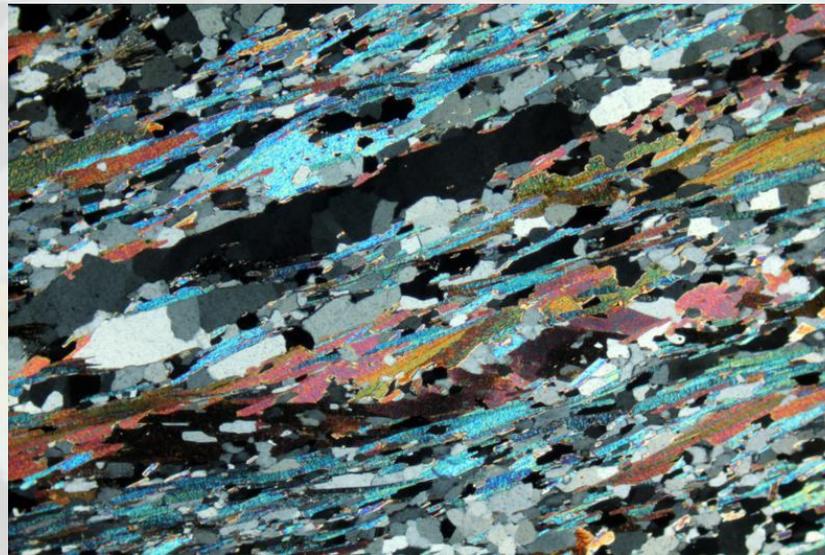
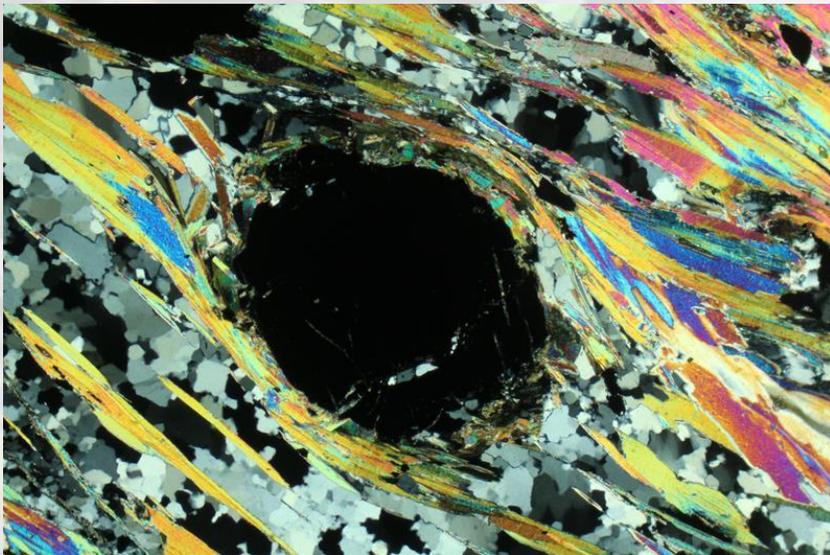
Nodulosa

Porfídoblastos (fenocristales metamórficos) relativamente equidimensionales (generalmente de forma ovalada), en asociación con otros minerales orientados al azar. Típica de corneanas pelíticas de bajo grado donde los poiquiloblastos son de andalucita o cordierita.



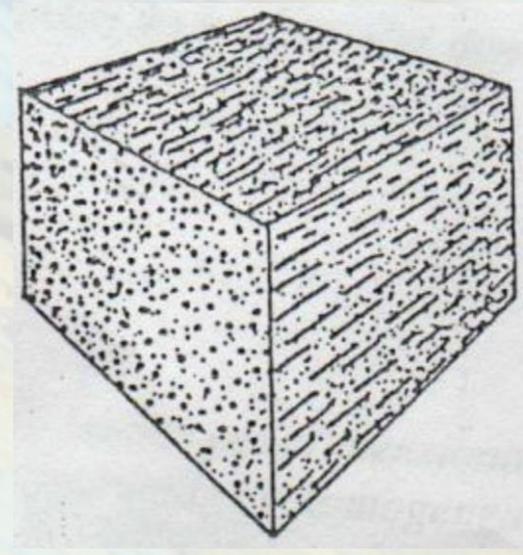
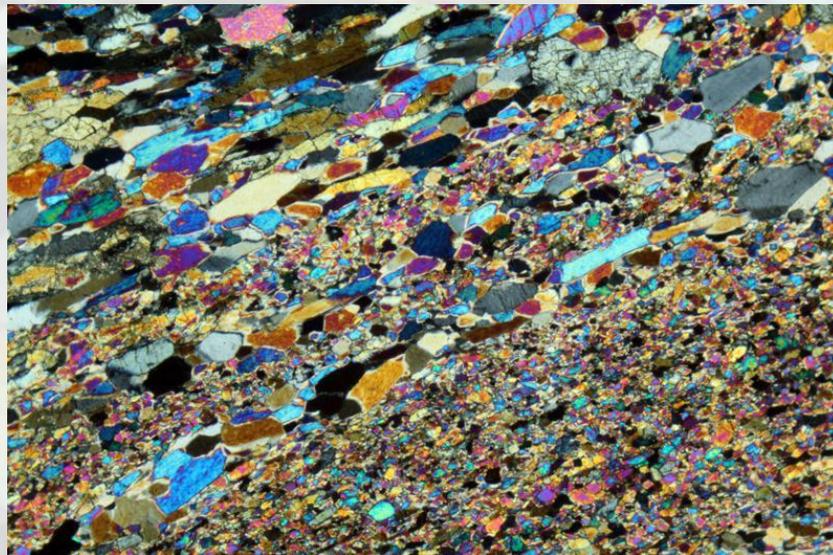
Lepidoblástica

Orientación preferente subparalela de minerales planares (filosilicatos normalmente), los que se alinean para producir una fabrica planar. Visible en pizarras, filitas y esquistos. Se genera debido a la orientación paralela de los cxs durante la recrystalización de mxs con hábito micáceo.



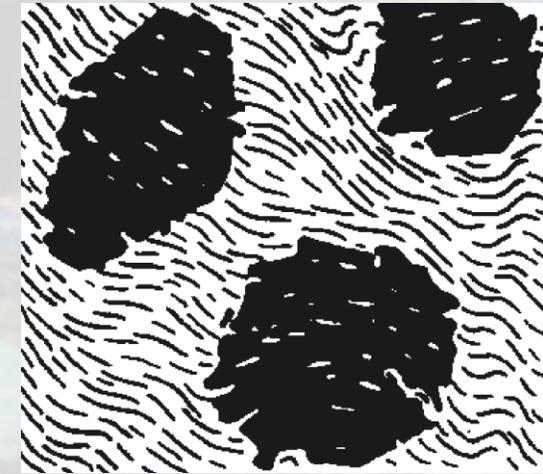
Nematoblástica

Orientación preferente subparalela de minerales prismáticos (normalmente inosilicatos: Sill, Anf o Px).
Fabrica lineal. Típica en anfibolitas pobres en micas.

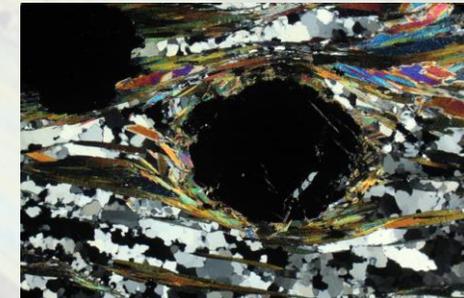


Porfidoblástica

Textura formada por cristales relativamente grandes que han crecido durante el metamorfismo (origen metamorfico) inmersos en una matriz de tamaño de grano más fino. Estos cristales se denominan Porfidoblastos.

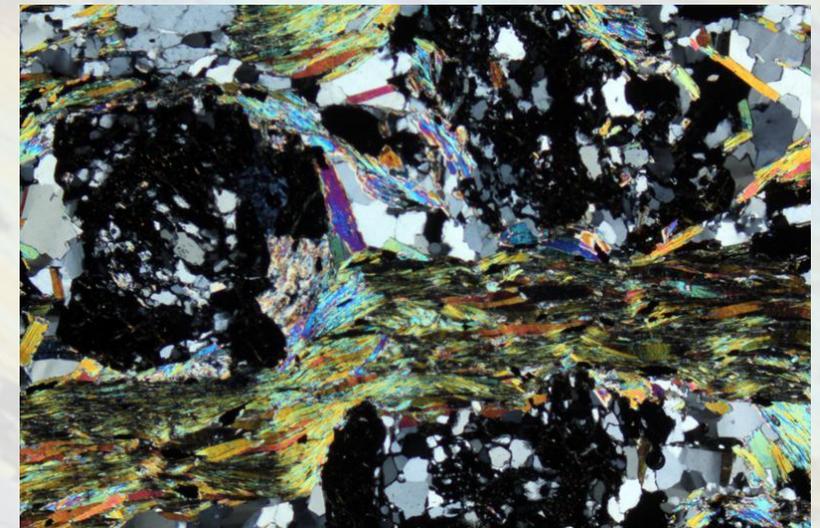
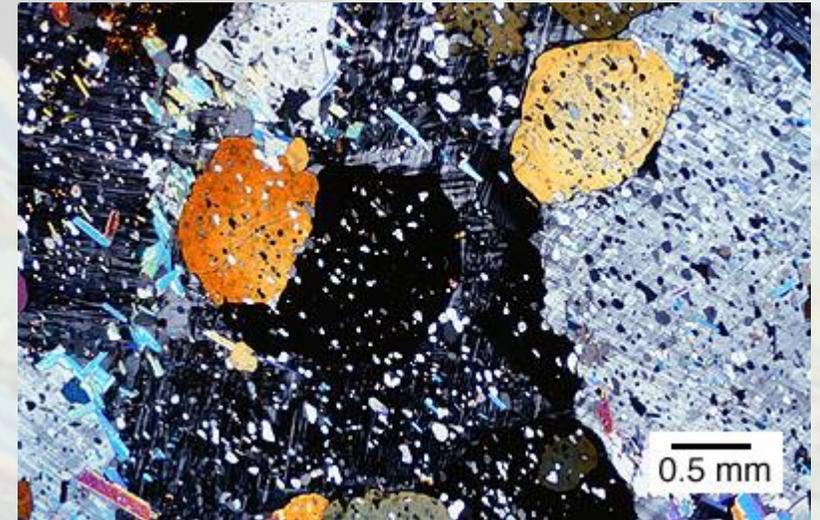


Pre-tectonic $P < D_1$	Inter-tectonic $D_n < P < D_{n+1}$	Syn-tectonic $D_n > P$	Post-tectonic $D_n < P$	
a	c	e	g	Deformation does not cause folding of matrix foliation
b	d	f	h	
<ul style="list-style-type: none"> - Presence of strain shadows common - Deflection of S_e around porphyroblasts - Distinction between pre-, inter- and syn-tectonic porphyroblasts is only possible if inclusions are present 			<ul style="list-style-type: none"> - No strain shadows - No deflection of S_e around porphyroblasts 	



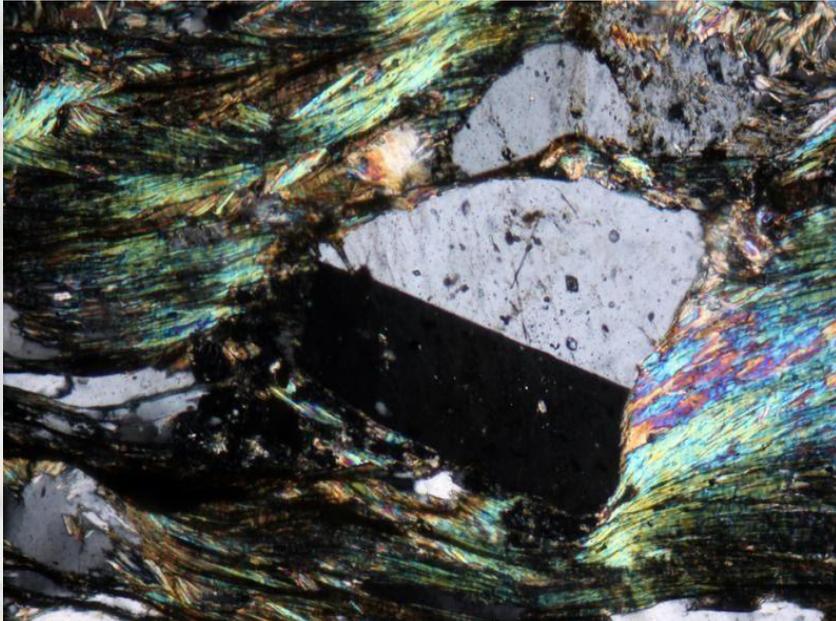
Poiquiloblástica

Caracterizada por minerales metamórficos (poiquiloblastos), que incluyen numerosos minerales más pequeños o relictos minerales. Se debe al crecimiento nuevo de minerales metamórficos alrededor de numerosos relictos de minerales originarios, por ej. ortoclasas, que incluyen minerales diminutos de plagioclasa, cuarzo y biotita de un gneis (i.e., poiquiloblastos con textura poiquilítica).



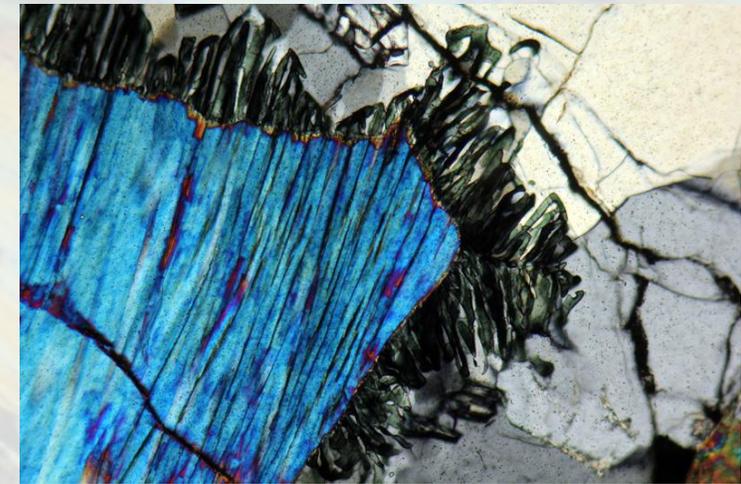
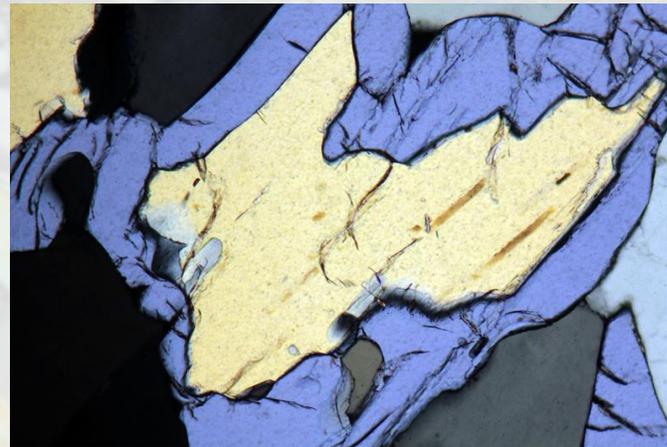
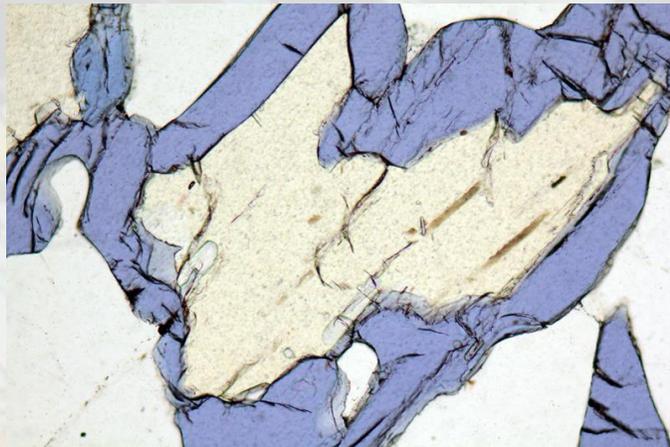
Blastoporfídica

Textura porfídica heredada, se observan fenocristales relictos de rocas ígneas, aunque pueden estar reemplazados por agregados de minerales metamórficos, todavía muestras hábitos característicos



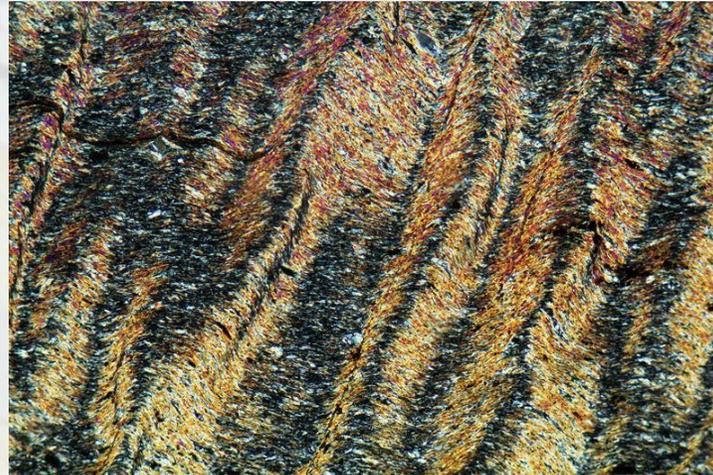
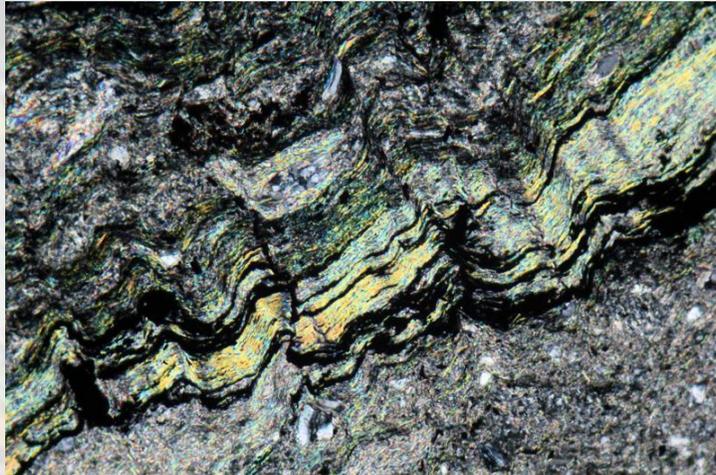
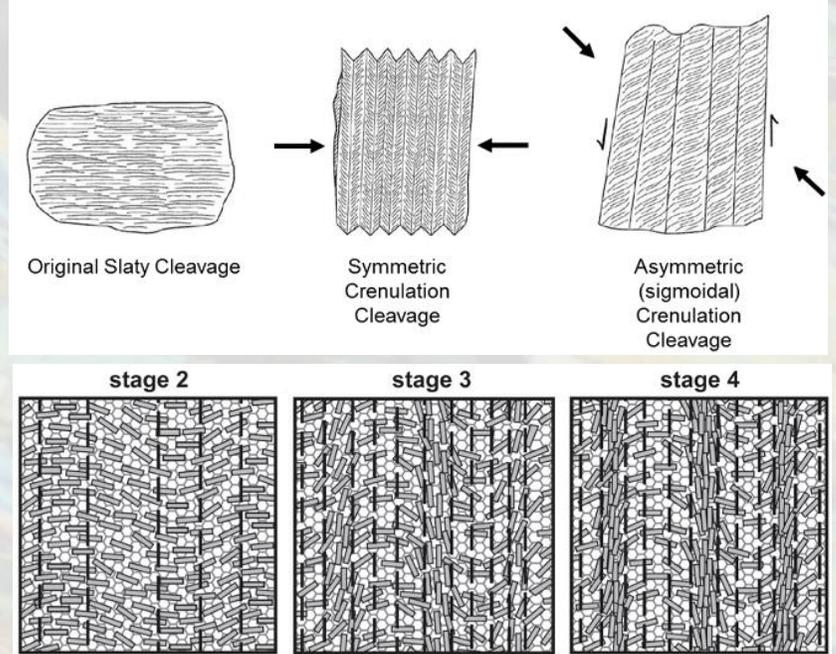
Coronítica

Capas concéntricas de uno o más mxs rodeando completamente a una fase **mineral más antigua (relicta)**. Las capas representan una secuencia de **rx incompleta** que ha ocurrido para sustituir al mineral del núcleo. Común en metabasitas con metamorfismo de alto grado.

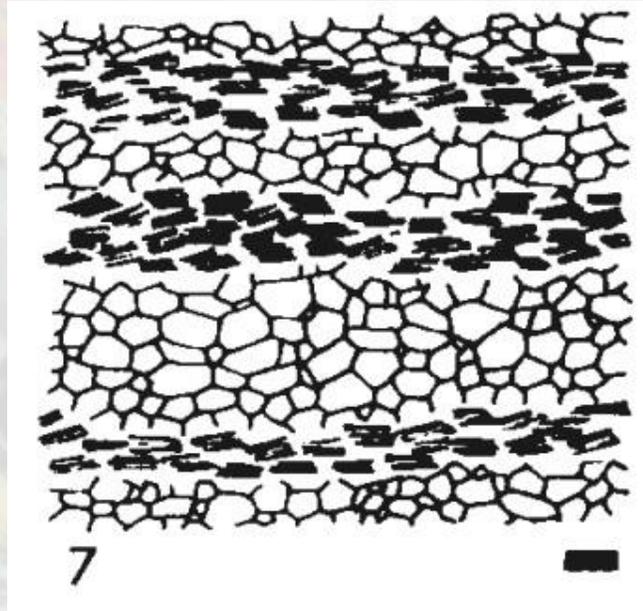


Esquistosidad de crenulación

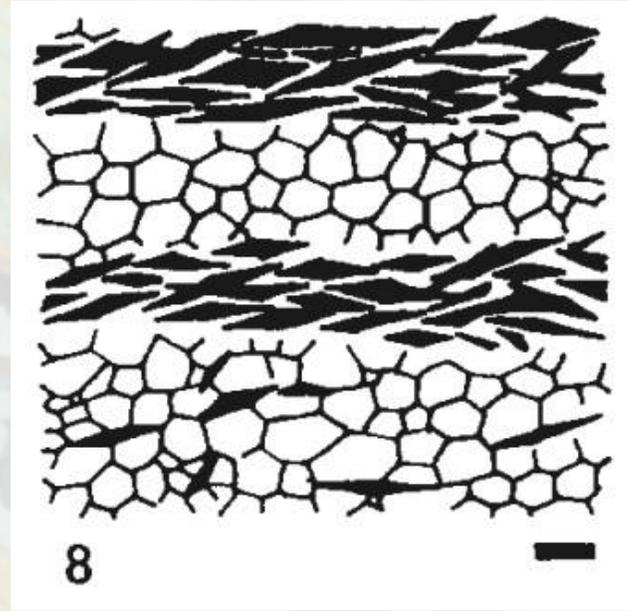
Uno de los tipos de foliación más comunes en *metapelitas* de grado intermedio a alto de metamorfismo. **Dominios ricos en filosilicatos** definiendo el clivaje general, separados por **dominios ricos en Qz y Fsp**.



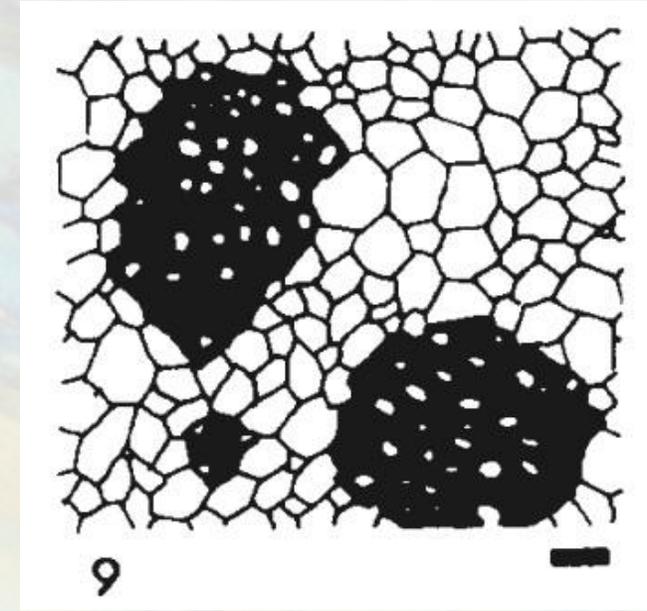
Texturas compuestas



Granolepidoblástica



Granonematoblástica



Granoporfidoblástica

- El nombre de las texturas se pone en orden de predominancia

Lepidoporfidoblástica



Lepidogranoblástica



Metapelitas

Protolito pelítico: Cuarzo ± Albita ±
Feldespato alcalino ± Clorita,
Muscovita, Granate, Pirofilita.



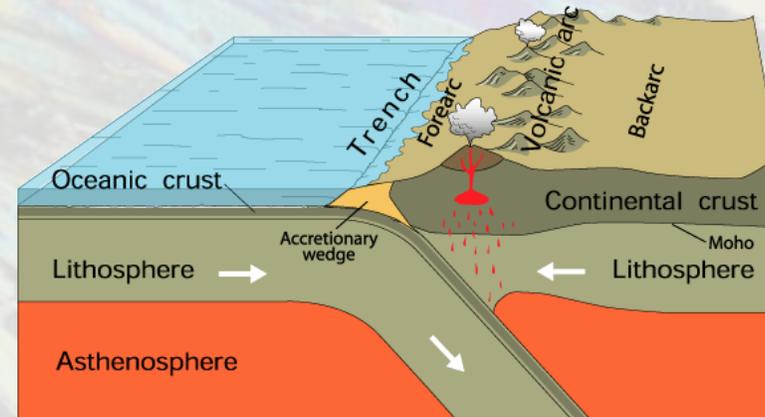
Protolito sedimentario (rocas pelíticas) de grano fino

- Ricos en K, Al, Fe y H₂O
- Pobres en Ca y Mg
- SiO₂ + Al₂O₃ + K₂O + (MgO + FeO)

Las rocas pelíticas pueden dividirse en:

- Lutitas pobres en Al (no desarrollan cloritoide)
- Lutitas ricas en Al (desarrollan cloritoide)

El considerable contenido de agua del protolito es importante para la ocurrencia de reacciones minerales



Se relacionan a los prismas de acreción → ya que hay acumulación de sedimentos pelíticos que vienen desde el continente.

Metapelitas

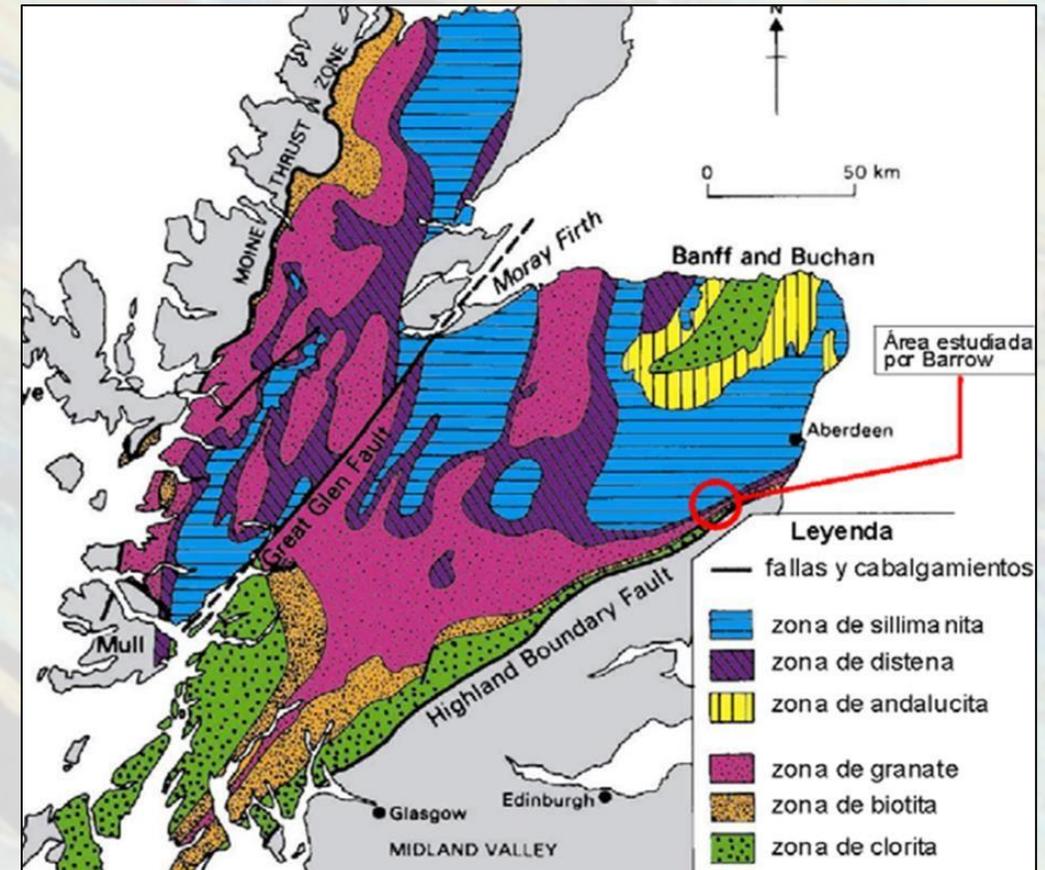
- Rocas metamórficas derivadas de sedimentos ricos en arcilla y cuarzo (lutitas – 60% de rxs sedimentarias).
- El metamorfismo débil transforma las lutitas en pizarras.
- Minerales de arcilla: illita, clorita, caolinita, esmectita.
- Filosilicatos: 50% de la roca.
- Cuarzo: hasta 30% en volumen.
- Otros: feldespatos, óxidos e hidróxidos de Fe (hematita, limonita, goethita), carbonatos, sulfuros.
- Mineralogía resultante: illita (moscovita), clorita, cuarzo, hematita.
- Composición química de mantiene, disminuye agua.

Tabla 6.I. Composición química promedio de una lutita pelágica.

Óxido	Porcentaje (en peso)
SiO ₂	54.9
TiO ₂	0.78
Al ₂ O ₃	16.6
Fe ₂ O ₃	7.7
FeO	2.0
MgO	3.4
CaO	0.72
Na ₂ O	1.3
K ₂ O	2.7
H ₂ O	9.2
CO ₂	-
C	-

Zonas de Barrow

- Definidas por George Barrow en las metapelitas ubicada en los Highlands (Escocia)
- Corresponden a asociaciones minerales resultantes de un metamorfismo progresivo.
- La construcción de estas zonas se basa en la **aparición** de un mineral índice, el cual le asigna el nombre a la zona metamórfica.
- La aparición progresiva de estos minerales implica un **aumento en el grado metamórfico**.
- Zona mineral → unir puntos de minerales índice → límite de zona mineral o isógrada.
- Permite definir condiciones de P-T del metamorfismo.



Zonas de Barrow

Zona metamórfica	Zona de clorita	Zona de biotita	Zona de granate almandino	Zona de Estaurolita	Zona de Distena	Zona de Sillimanita
Clorita	—————					
Muscovita	—————					
Biotita		—————				
Granate (Al)			—————			
Estaurolita				—————		
Distena					—————	
Sillimanita						—————
Plagioclasa-Na	—————					
Cuarzo	—————					

AUMENTO EN EL GRADO METAMÓRFICO



Zonas de Barrow

Zona metamórfica	Zona de clorita	Zona de biotita	Zona de grt almandino	Zona de Estauroлита	Zona de Distena	Zona de Sillimanita	2da zona de Sillimanita	Zona Opx
Clorita Muscovita Biotita Granate (Al) Estauroлита Distena Sillimanita Plagioclasa-Na Cuarzo Fsp – K Opx	Chl Micas blancas Qz Ab	Bt Chl Micas blancas Qz Ab	C L O R I T O I D E	Gt Bt Chl MB Qz Ab Olg	Est Bt MB Qz Gt Pl	Ky Bt MB Pl (Est) (Gt)	Sill Bt MB Qz Pl Gt (Est)	Fsp – K Sill Bt MB Qz Pl Gt (Est)

Zonas de Barrow

Zona de clorita

Chl + Ms + Qz + Ab (Pizarra o Filita)

Zona de biotita

Bt + Chl + Ms + Qz + Ab (Pizarra → Filita, Esquisto)

Zona de granate

Gt (Al) + Bt + Chl + Ms + Qz + Alb/Pl (Esquistos con porfidoblastos de granate)

Zona de estaurolita

Est + Bt + Ms + Qz + Gt + Pl + Chl (Esquisto)

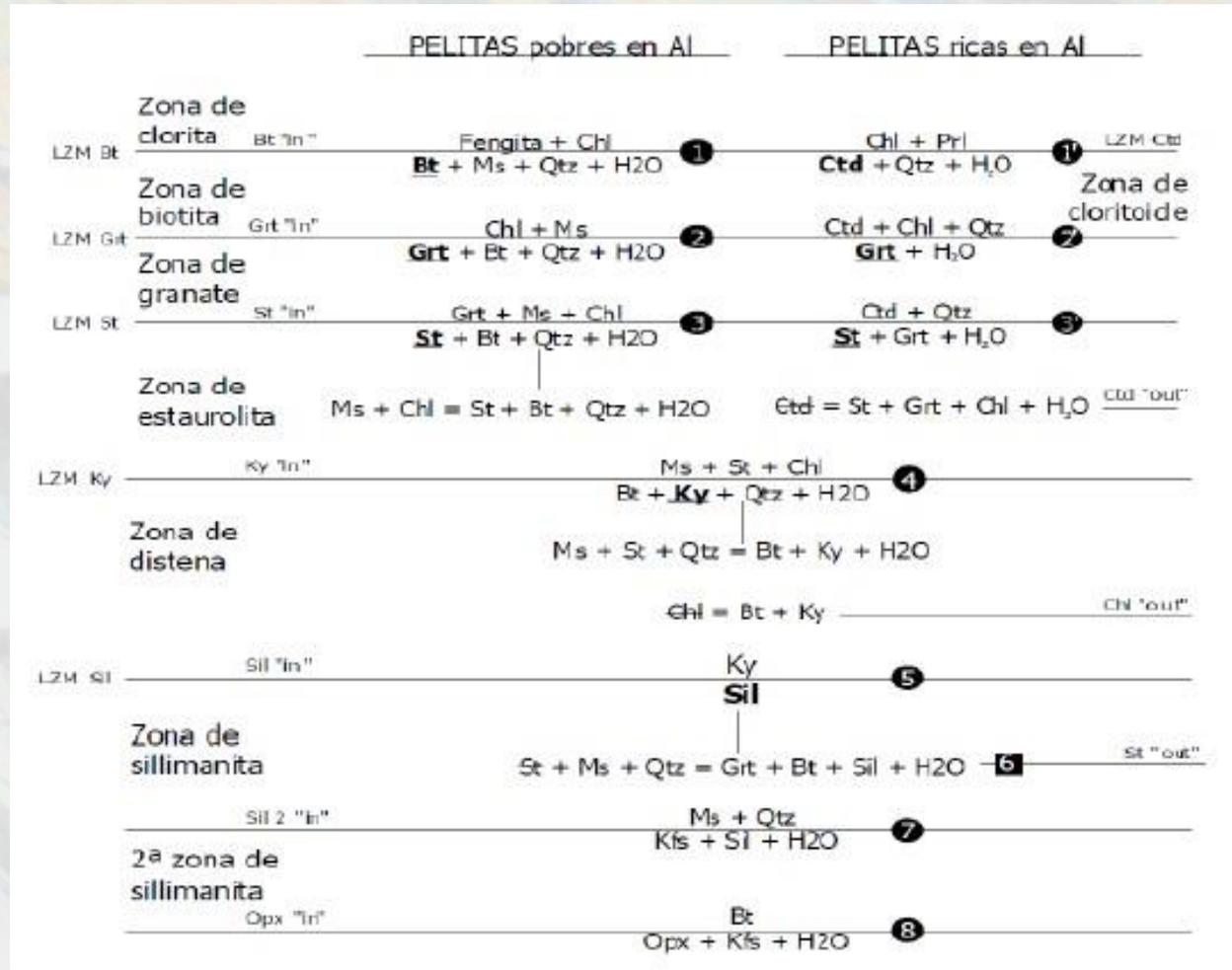
Zona de distena

Distena + Bt + Ms + Qz + Pl + Gt + Est (Esquisto)

Zona de sillimanita

Sill + Bt + Ms + Qz + Pl + Gt +/- Est (Esquisto - Gneiss)

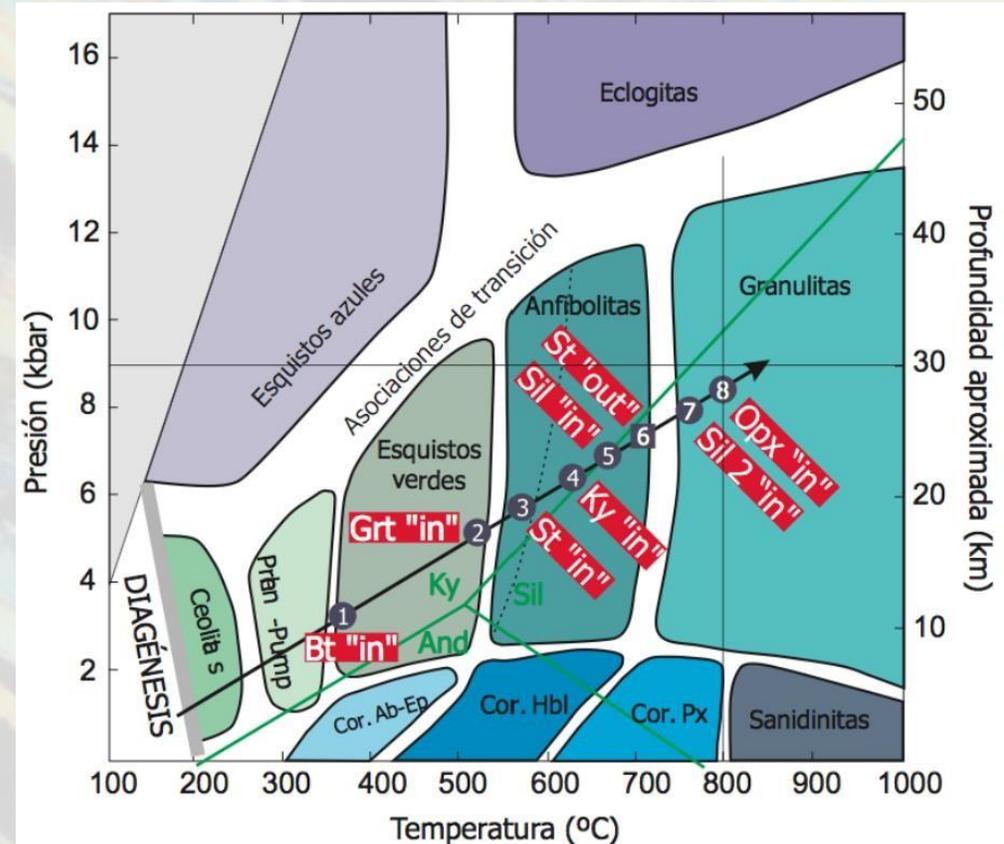
Asociaciones minerales



Facies metamórficas

- Están definidas para **Metabasitas**. Pero podemos hacer el símil con Metapelitas.
- Cada facie metamórfica tiene mxs índices, sin embargo, estos mxs no necesariamente son visibles o existen en la roca, si la roca no tiene la composición química adecuada NO cristalizan.
- Conociendo la composición química de la roca + sus condiciones PT → Podemos predecir su asociación mineral.
- Si conocemos la composición química + asociación mx → Podemos deducir las condiciones PT.

Conjunto de asociaciones minerales que han cristalizado en las mismas condiciones de PT



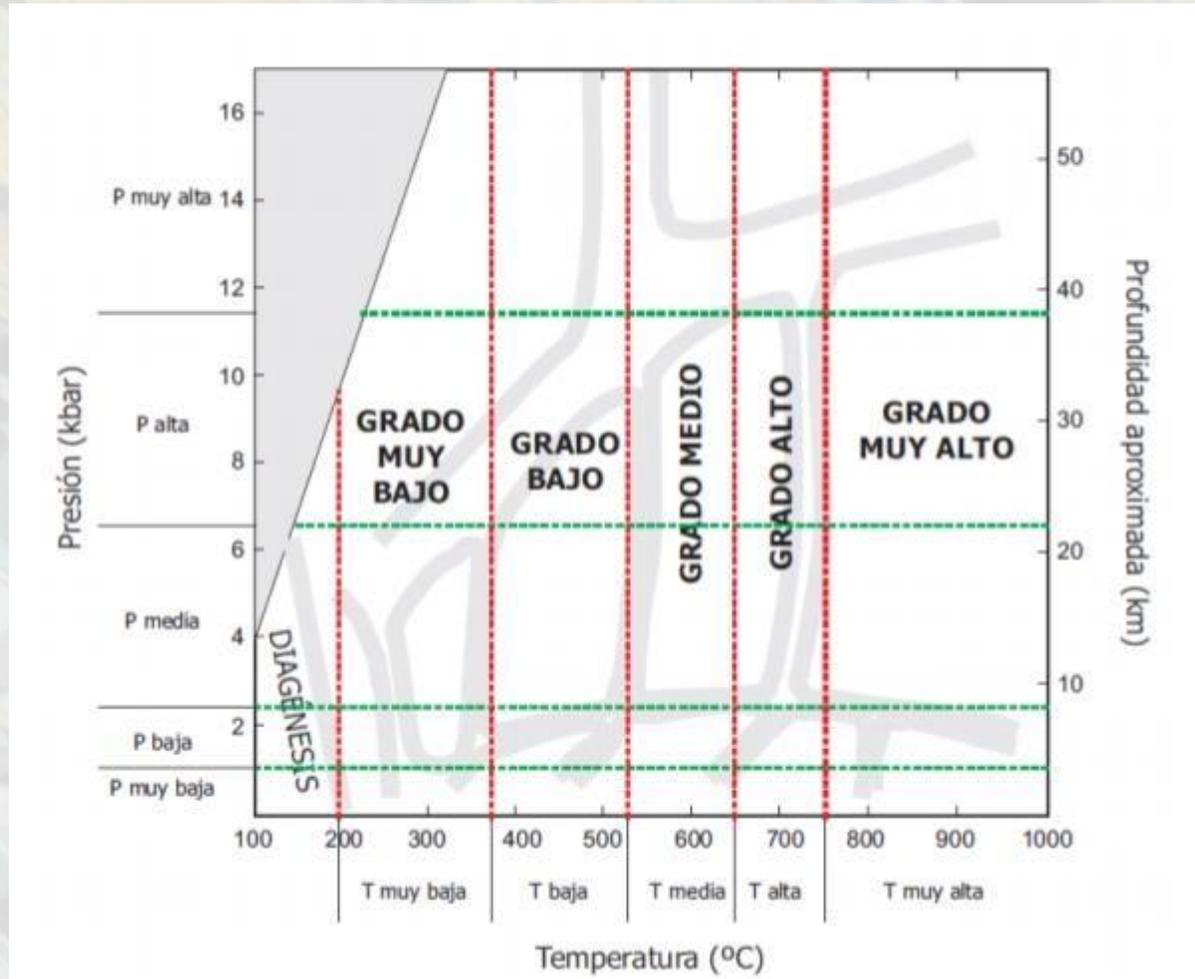
Metapelitas sólo necesitan la identificación de un mineral índice o diagnóstico, para así identificar la zona metamórfica, y con ello, la facies

Facies metamórficas

Rocas pelíticas (metapelitas)	Rocas básica (metabasitas)
Zona de clorita	Facies de sub-esquistos verdes
Zona de biotita	Facies de esquistos verdes
Zona de granate	Facies de anfibolitas con epidota
Zona de estaurolita	
Zona de distena	Facies de anfibolitas
Zona de sillimanita	
Zona de sillimanita-feldespató potásico	Facies de granulitas con piroxeno y hornblenda

Facies	Asociaciones minerales diagnósticas	
	Metabasitas	Metapelitas con cuarzo
Ceolitas	Laumontita	
Prehnita-Pumpellyita	Prehnita + pumpellyita, prehnita + actinolita, pumpellyita + actinolita	
Esquistos verdes	Actinolita + clorita + epidota + albita	Cloritoide
Anfibolitas	Hornblenda + plagioclasa	Estaurolita
Granulitas	Ortopiroxeno + clinopiroxeno + plagioclasa	Sillimanita+feldespató potásico <i>Sin estaurolita, sin moscovita</i>
Esquistos azules	Glaucofana, lawsonita, piroxeno jadeítico, aragonito	Glaucofana <i>Sin biotita</i>
Eclogitas	Onfacita + granate <i>Sin plagioclasa</i>	
Facies de metamorfismo de contacto	Las asociaciones minerales en las metabasitas no difieren sustancialmente de las correspondientes a las facies de presión mayor	

Grado metamórfico



Mineralogía

- Cuarzo
- Feldespato potásico
- Mica Blanca
- Clorita
- Biotita
- Granate
- Estauroлита
- Cloritoíde (ricas en Al)
- Cordierita (baja presión)
- Talco
- Corindón (no existe si hay cuarzo)
- Espinela
- Óxidos de Fe – Ti
- Glaucofano (alta presión)
- Ortopiroxeno (muy alta temperatura)
- Aluminosilicatos
 - Andalusita (baja presión)
 - Cianita (baja presión)
 - Silimanita (alta temperatura)



**Zonas metamórficas y
mineralogía**

Zona de Clorita

Clorita

Filosilicato con estructura T – O – T. Miembro importante de rocas metamórficas **regionales y de contacto de grado bajo a medio**, normalmente alcanza $T < 400^{\circ}\text{C}$. Se forma por alteración de mxs máfico como Pxs, Anf, Bt, entre otros.

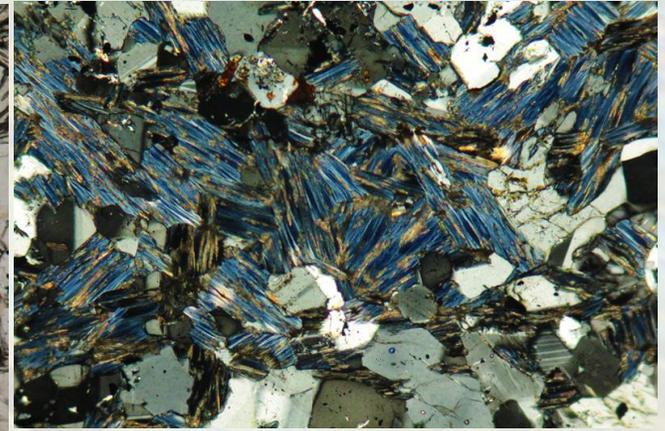
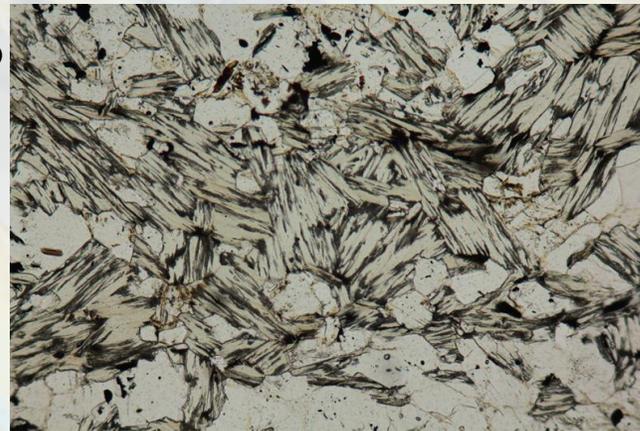
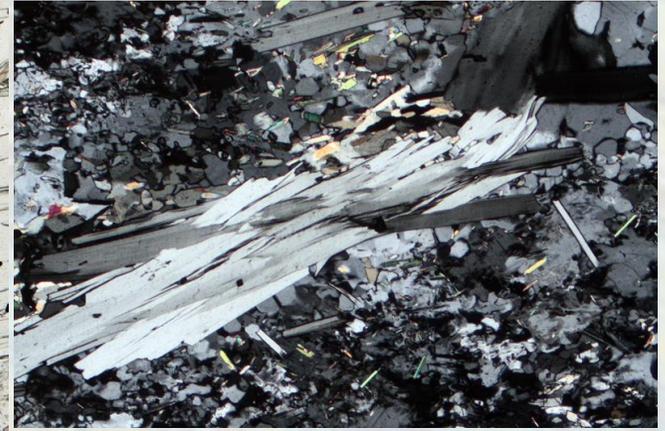
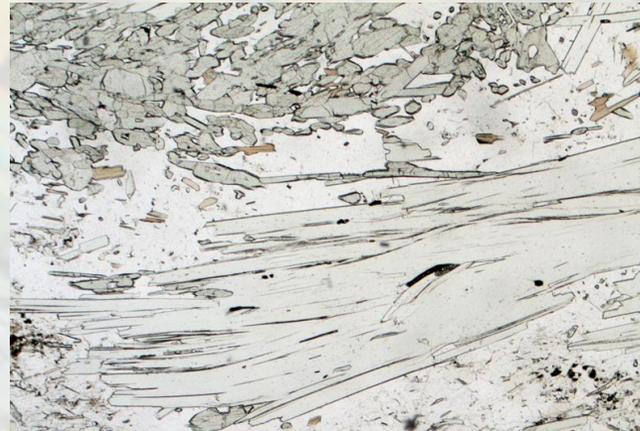
También ocurre como mx hidrotermal (recristalización de mxs de arcilla).

Propiedades ópticas

- Color: Verde mineral incoloro, verde pálido
- Hábito: Cristales tabulares con forma pseudo-hexagonal o micáceo.
- Clivaje perfecto
- CI: Muy débiles (marrón, verde profundo, gris), “azul Berlín” profundo anómalo.
- Relieve: Bajo a moderado

Grado metamórfico de más bajo grado en las rocas pelíticas, pizarras y filitas afaníticas con mica blanca, clorita y cuarzo.

Posibles óxidos de Fe-Ti y Pirita



Zona de Biotita

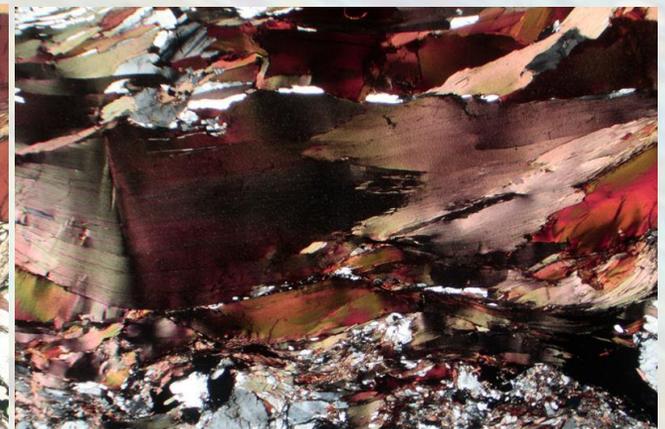
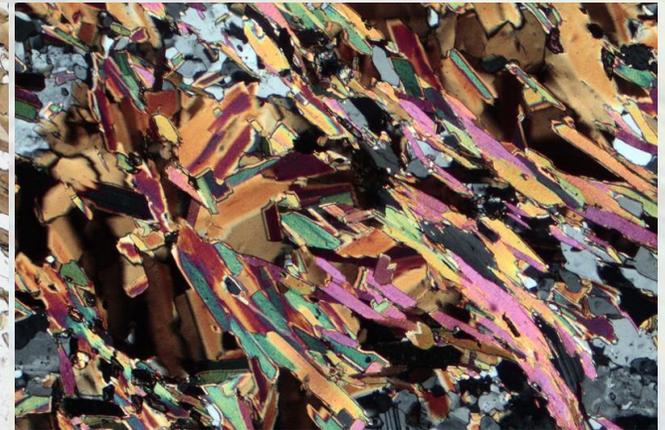
Biotita

La biotita es una **solución sólida** entre los miembros finales flogopita y annita. Pequeñas cantidades de Na, Rb, Cs y Ba pueden sustituir al K y, al igual que otros minerales, el F puede sustituir al OH y aumentar la estabilidad de la biotita a temperaturas y presiones más altas.

Propiedades ópticas

- Color: marrón a negro
- Hábito: micáceo
- Clivaje perfecto
- CI: 3er orden
- Relieve: Moderado

Aumento de temperatura en la Zona de Clorita comienza a formar biotita en porfidoblastos. Filitas y esquistos
Fengita + Clorita → Biorita + Muscovita + Cuarzo + H₂O



Zona de Granate

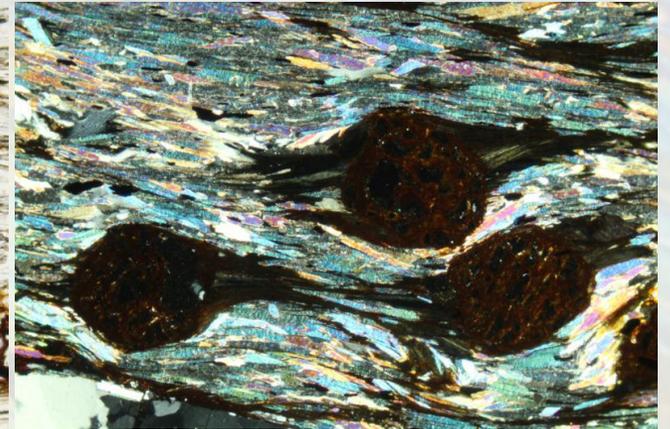
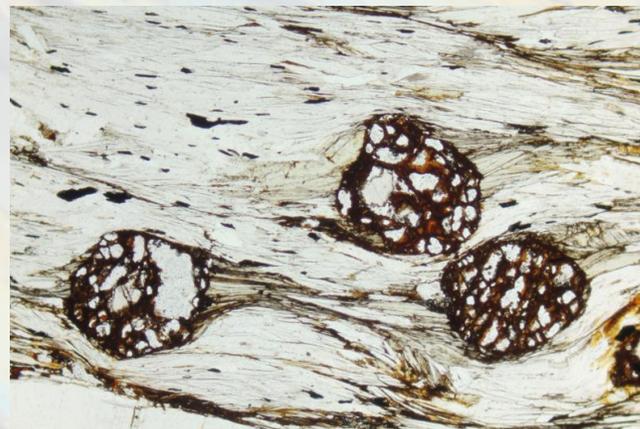
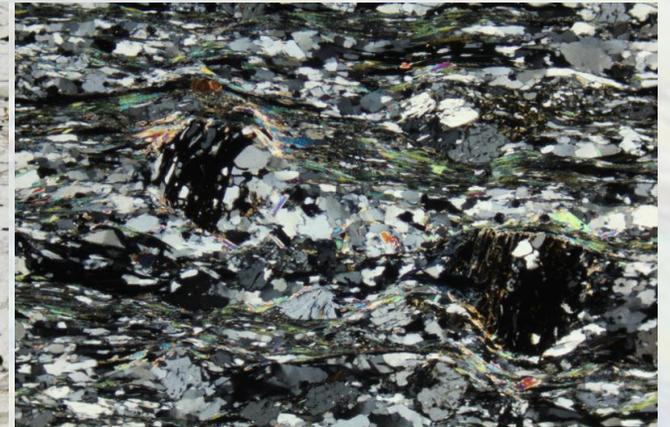
Granate

Tienen la fórmula general $X_3Y_2(SiO_4)_3$. El sitio X suele estar ocupado por cationes divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+}) y el sitio Y por cationes trivalentes (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}) en un marco octaédrico/tetraédrico con $[SiO_4]^{4-}$ ocupando los tetraedros.

Propiedades ópticas

- Color: Incoloro a rosa
- Hábito: cxs euhedrales de hábito generalmente dodecaédrico
- CI: Isotrópico
- Relieve: Alto

Comienzan a aparecer granates pequeños en pelitas con alto Mn, Ca y Fe^{+3} . Esquistos porfidoblásticos
Clorita + Muscovita \rightarrow Granete + Clorita Mg + Biotita + H_2O



Zona de Estauroлита

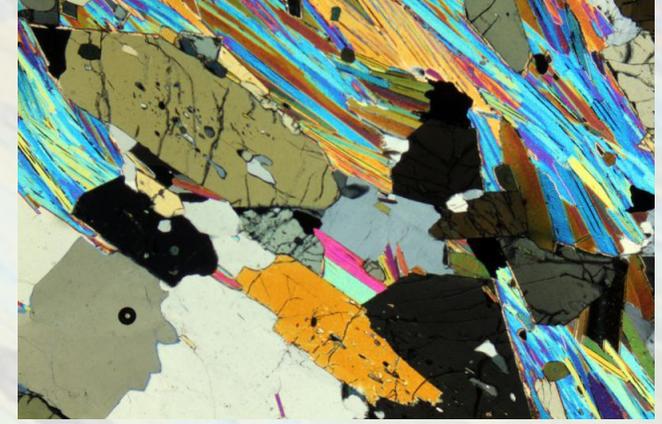
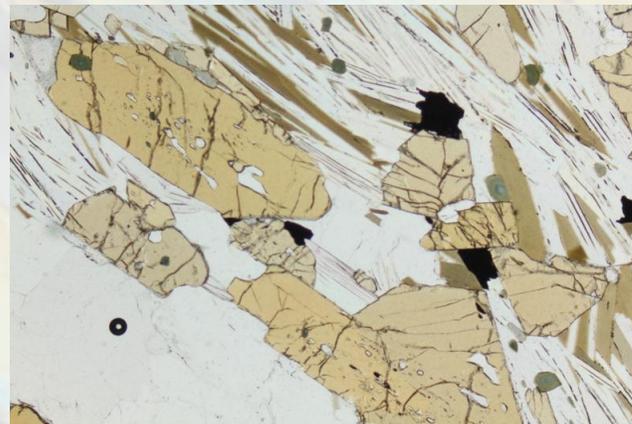
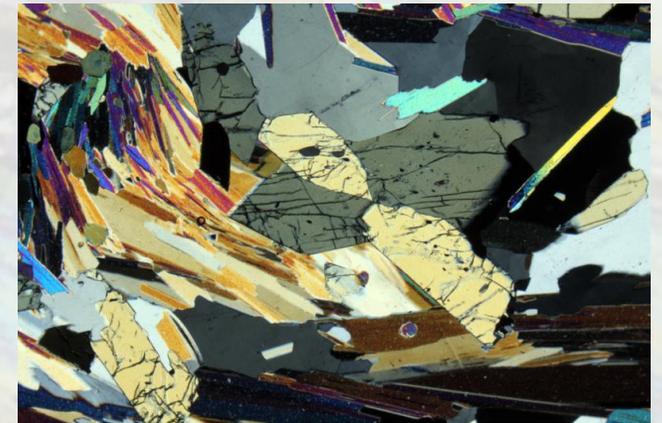
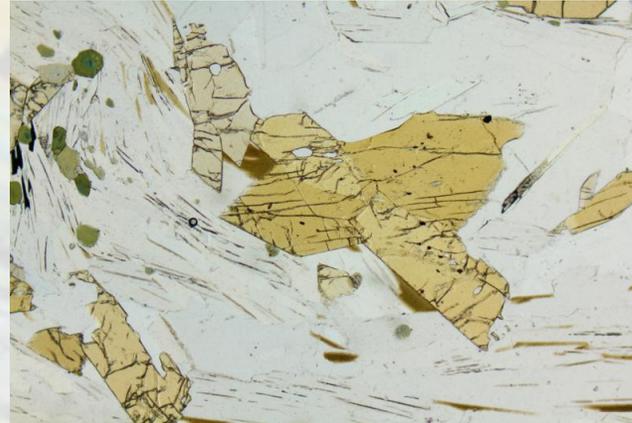
Estauroлита

La estructura de la estauroлита consiste básicamente en capas de Al_2SiO_5 (composición de cianita) y capas de $\text{AlFe}_2\text{O}_2(\text{OH})_2$ alternadas paralelas a (010). Se asocia con la cianita comúnmente en rocas pelíticas de grano medio.

Propiedades ópticas

- Color: amarillo a amarillo pálido
- Presenta pleocroísmo
- Hábito: prismático
- CI: bajos de 1er orden
- Relieve: Alto
- Maclas en cruz

Granate + Clorita + Muscovita \rightarrow Estauroлита +
Biotita + Cuarzo + H_2O
Poiquiloblastos de estauroлита con inclusiones
de cuarzo en esquistos



Zona de Cianita

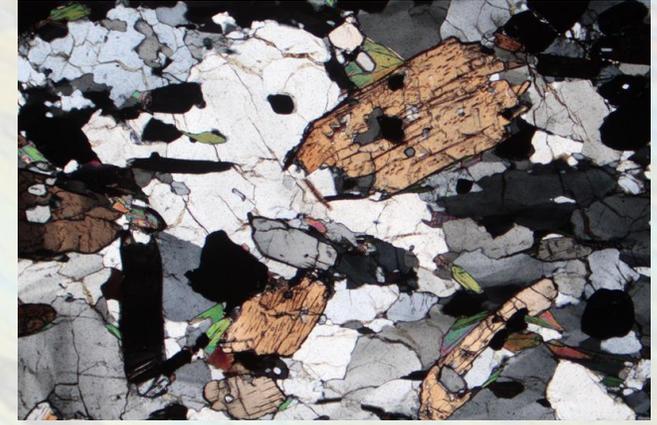
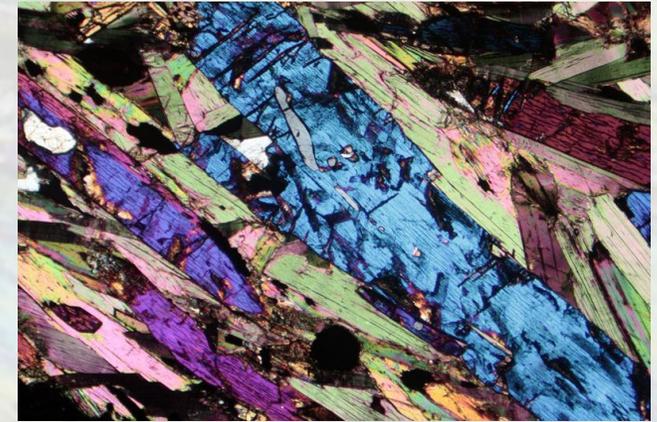
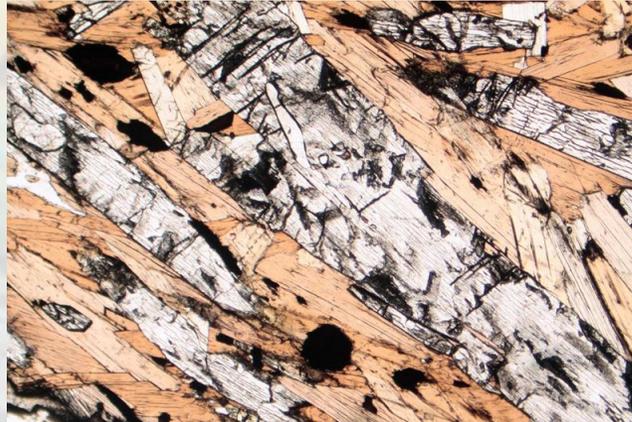
Estauroлита + Clorita + Muscovita + Cuarzo → Cianita + Biotita + H₂O. Esquistos

Cianita

La cianita en rocas metamórficas generalmente se forma a **presiones medias a altas y temperaturas bajas a moderadas** en metamorfismo regional de tipo Barrowiano. A temperaturas más altas, la kyanita se invierte en silimanita, en un amplio rango de presiones y altas temperaturas.

Propiedades ópticas

- Color: Incoloro o azul pálido
- Hábito: prismas subhedrales con “forma de hoja”
- CI: bajos a moderados. Tonos azules a amarillos
- Relieve: alto



Zona de Sillimanita

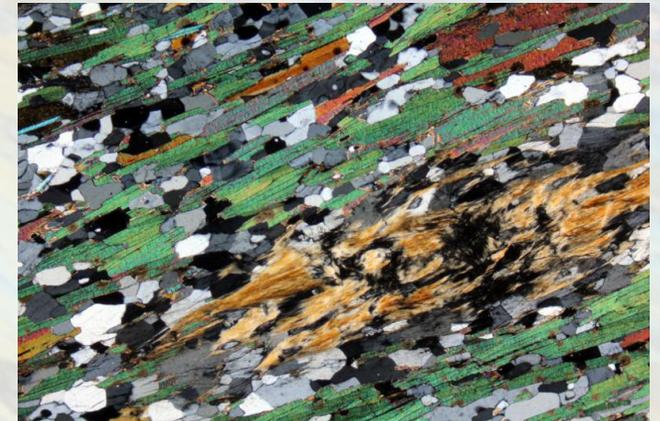
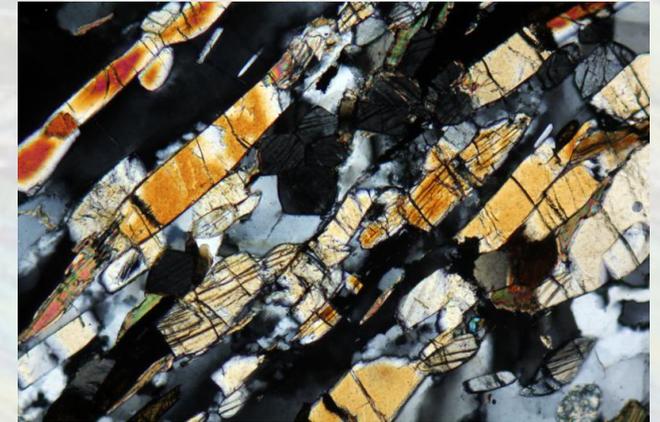
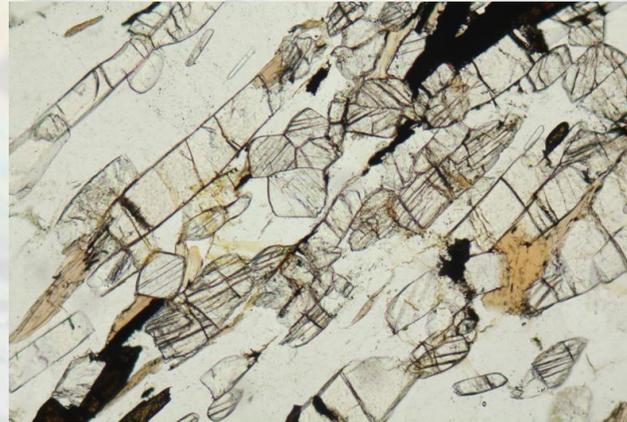
Polimorfo de Al_2SiO_5 de alta temperatura.
Esquistos y gneiss

Sillimanita

Tanto las formas fibrosas como las tradicionales de sillimanita son comunes en las rocas sedimentarias metamorfoseadas. Es un mineral índice que indica alta temperatura pero presión variable.

Propiedades ópticas

- Color: Incoloro
- Forma: prismas alargados o cxs fibrosos.
- CI: amarillos a naranjos de primer orden. Amarillo pálido.
- Relieve: alto

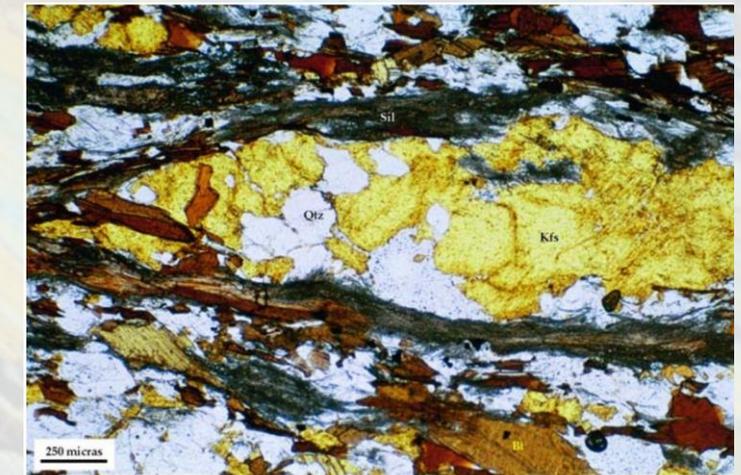
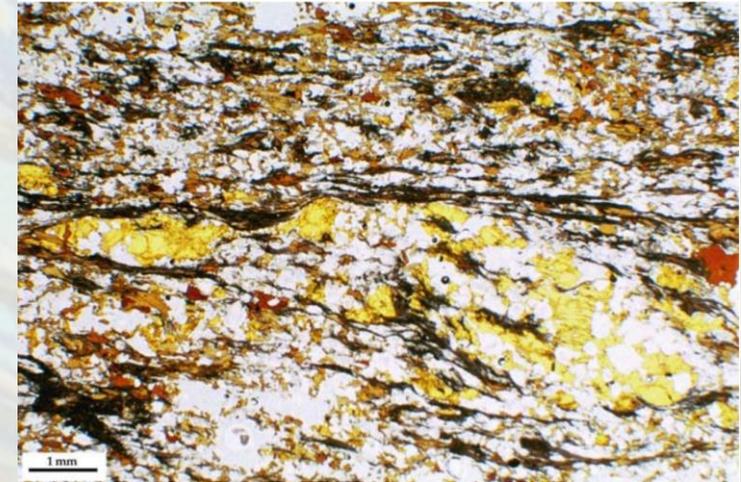


Zona de Fsp-K y Sillimanita

Muscovita + Albita + Cuarzo \rightarrow Feldespato potásico
+ Sillimanita + H₂O
Sillimanita + Granate + Cuarzo \leftrightarrow Plagioclasa (An)
Esquistos y gneiss

- En el caso de que las temperaturas suban de los 750°C, las soluciones solidas de muscovita reaccionan con el cuarzo para formar feldespato potásico y un aluminio silicato.
- Se encuentra a presiones intermedias.

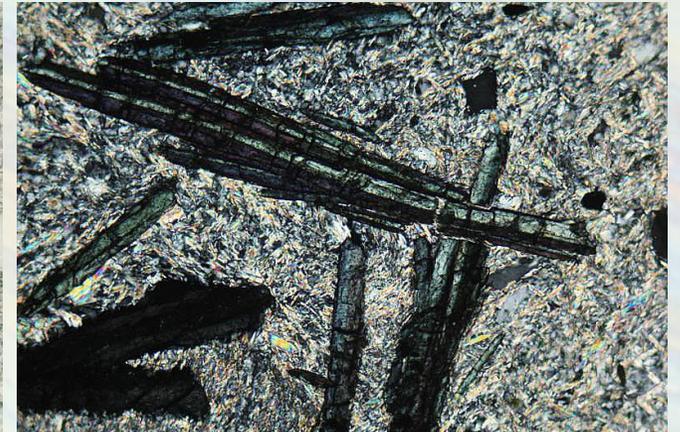
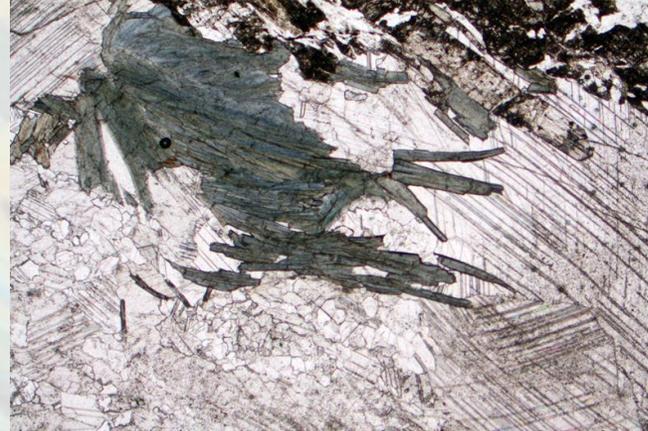
Cristales de feldespato potásico generados durante la migmatización M2. Los cristales aparecen estirados paralelamente a L2, a la vez que desarrollan colas de recristalización asimétricas.



Cloritoide

Propiedades ópticas

- Color: Incoloro-gris azulado, verde claro
- Forma: prismas alargados o cxs fibrosos.
- CI: grises-blanco primer orden
- Relieve: alto

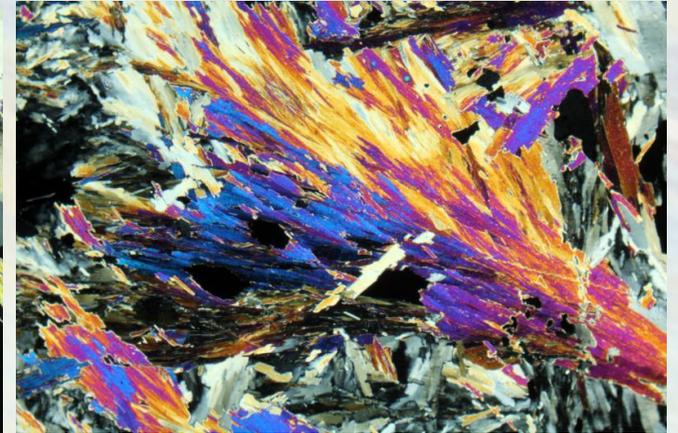
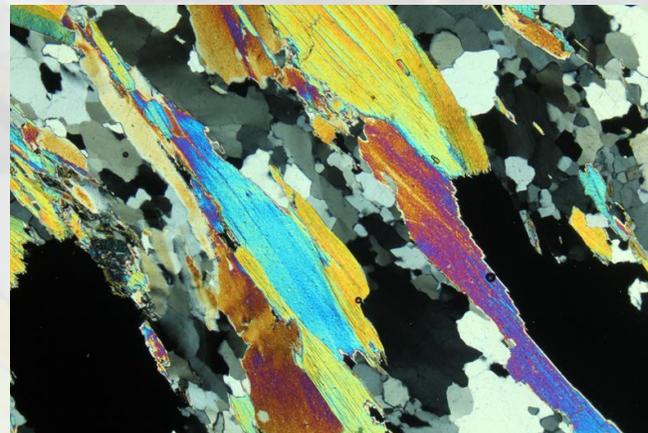
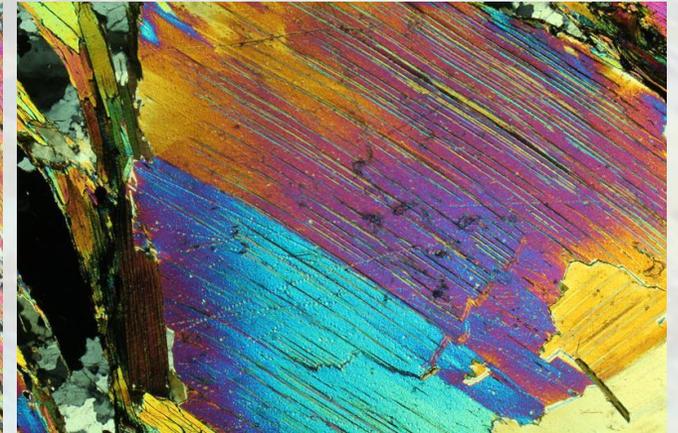
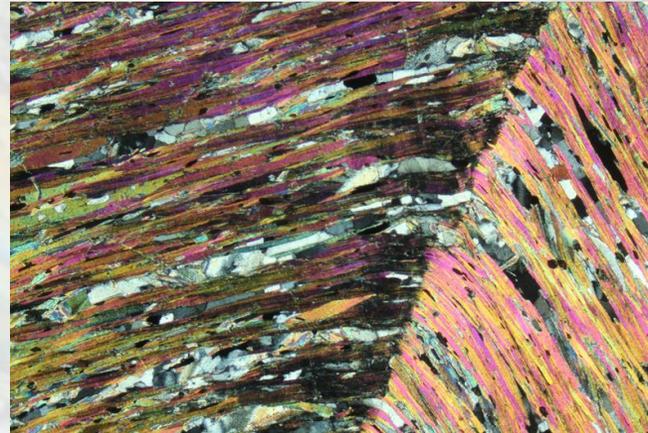


Muscovita

Muscovita principalmente (paragonita cuando Na sustituye a K). Característico de rocas metamórficas. Uno de los primeros mxs en aparecer en metamorfismo regional; en metamorfismo de contacto tiende a “disociarse”.

Propiedades ópticas

- Color: Incoloro
- Hábito: micáceo
- Clivaje perfecto
- CI: 2do a 3er orden. Débiles en sección basal
- Relieve: Moderado





fcfm

Geología
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Introducción al metamorfismo

Petrología Ígnea y Metamórfica GL5103-1, Primavera 2022

Profesor: Diego Morata

Auxiliar: Luis Naranjo

Ayudante: Javiera Terán