



Metalogénesis Otoño 2010

# Alteración Hidrotermal

Primera parte

Susana Henríquez G.

# Que es una alteración hidrotermal?

- ◆ Intercambio químico ocurrido durante una interacción fluido hidrotermal-roca.
- ◆ **Fluido hidrotermal** → fluido a altas temperaturas con distintos rangos de Ph, capaz de transportar metales y otros compuestos en solución a su lugar de deposición alterando la roca caja a su paso.
  - **Origen:** magmático, meteórico, metamórfico, oceánico, sedimentario

# Factores que controlan la alteración hidrotermal?

- ❖ **Temperatura** → a mayor T, mayor intensidad.
- ❖ **Composición del fluido** → a menor Ph, mayor intensidad.
- ❖ **Permeabilidad** → tanto primaria como secundaria.
- ❖ **Duración de la interacción agua/roca**
- ❖ **Volumen de agua**
- ❖ **Composición de la roca** → relevante en bajas intensidades de alteración
- ❖ **Presión** → de forma indirecta al controlar profundidad de ebullición de los fluidos, fracturamiento hidráulico y explosiones hidrotermales.

# Procesos debidos a la alteración hidrotermal

- ◆ **Deposición directa:** a partir de las soluciones hidrotermales. Directamente asociada a la permeabilidad que conduce el fluido.
- ◆ **Reemplazo:** de minerales inestables en nuevas condiciones por otros estables o metaestables.
- ◆ **Lixiviación:** componentes que son extraídos de la roca (disolución) por el paso de fluidos hidrotermales, especialmente cationes metálicos, dejando la roca deprimida en dichos componentes o lixiviada.

# Mineralización

- ◆ Se refiere al proceso y presencia de minerales valiosos (mena) en la roca.
- ◆ Epigenética → introducida con posterioridad a la formación de su roca de caja o huésped
- ◆ Singenética → forma o deposita simultáneamente con sus rocas huéspedes.
- ◆ Hipógena → producida por procesos internos de la tierra (endógena).
- ◆ Supérgena → producida por los efectos exógenos sobre cuerpos mineralizados como meteorización, oxidación, descomposición de minerales y formación de nuevos minerales estables en el ambiente supérgeno.

# Características de la alteración

- ◆ Intensidad: Porcentaje de la roca que ha sido alterada.  
Grado de alteración:
  - Débil o poco pervasiva: si solo esta en la vecindad a fracturas.
  - **PERVASIVA:** si la alteraciones penetrativa en todo el volumen de la roca.
- ◆ Selectiva: si afecta solo a un grupo de minerales.
- ◆ Extensión: distribución espacial de la alteración no al grado.
- ◆ Una misma roca puede estar afectada por **UNO O MAS EVENTOS** de alteración con o sin mineralización asociada.

# Secuencia paragenética o Paragénesis

- ◆ Se entiende como el orden cronológico de deposición de los minerales
- ◆ Según **cambian** y evoluciona **el fluido** mineralizador en composición ,  $T^{\circ}$  , P, pH, etc . los minerales se acercan a sus **distintas constantes de estabilidad** y precipitan en una cierta secuencia.
- ◆ Esta deposición secuencial provee un registro detallado de la **evolución en tiempo y espacio** de una solución mineralizadora
- ◆ Se determina a través de microtexturas y microestructuras, o por relación de cortes de filones mineralizados

# Modelo Paragénesis

**TABLA 6-2 Paragénesis de yacimientos minerales hidrotermales, según Edwards (1947, 1952).**

---

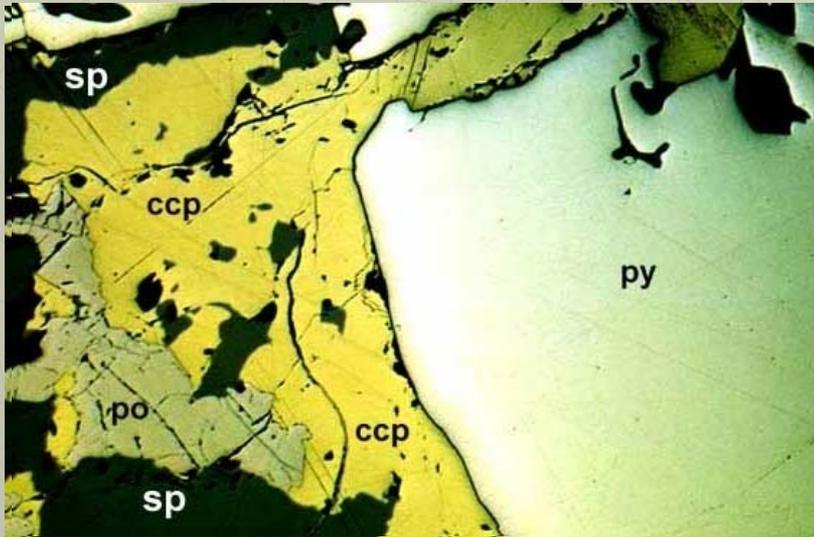
## *Minerales de mena*

1. Magnetita, ilmenita, cromita, hematita.
2. Casiterita, tantalita, wolframita, molibdenita.
3. Pirrotina, pentlandita, lollingita, arsenopirita (mispiquel), pirita, arseniuros de cobalto y níquel.
4. Calcopirita, esfalerita (intercambiable), bornita.
5. Tetraedrita, galena, sulfosales de plomo, sulfosales de plata, bismuto nativo y bismutina, telururos, estibina, cinabrio.

## *Minerales de ganga*

1. Cuarzo, turmalina, topacio.
  2. Siderita (frecuentemente manganesífera), fluorita, calcita, barita, calcedonia.
-

# Ejemplos Paragénesis



Paragénesis de calcopirita y pirita visto en el microscopio



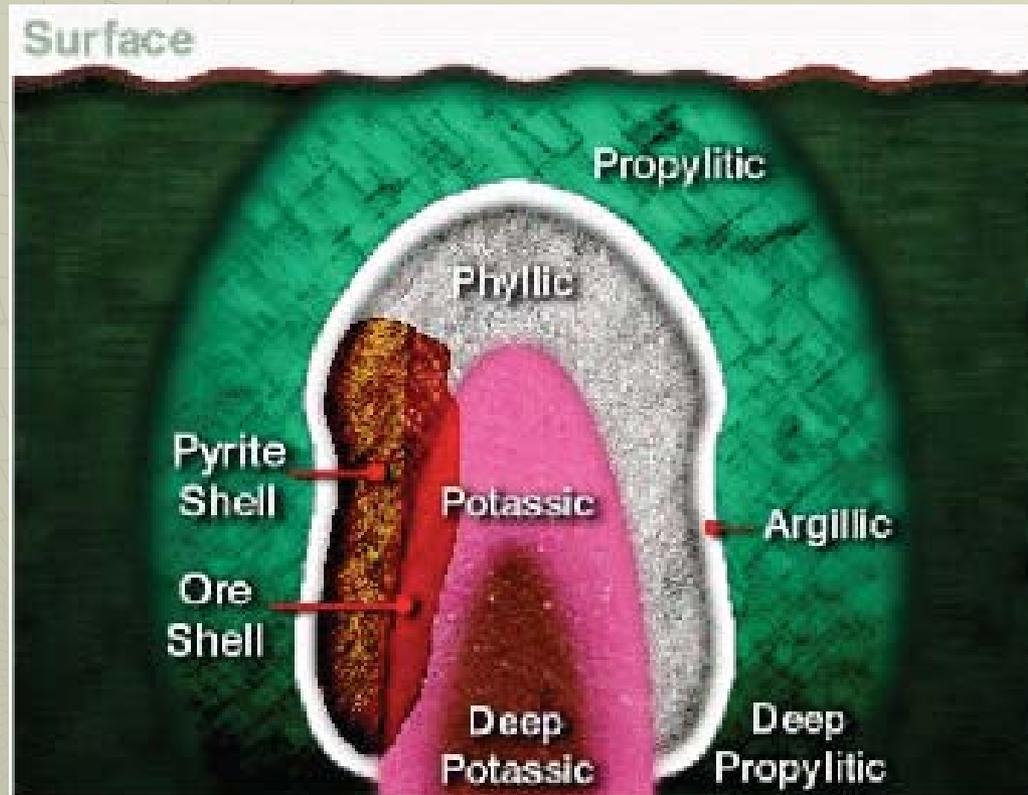
Paragénesis de calcopirita (1), esfalerita (2) y cuarzo (3) en una muestra de mano

# Zonación

- ◆ Se entiende por la **distribución espacial** de los minerales tanto vertical como horizontal.
- ◆ Cualquier **patrón regular** en la distribución de **minerales o elementos en el espacio** en yacimientos minerales. (minerales de mena, ganga, contenido de azufre, tierras raras, etc).

Reflejan las distintas condiciones físico-químicas en un mismo depósito mineral (Cogenética a paragénesis)

# Ejemplo de Zonación



Modelo Lowell y Gilbert de zonación para pórfidos cupríferos, en cada una de las distintas alteraciones se encuentran distintos minerales

# Tipos de alteración hidrotermal

Para su clasificación se acepta una **asociación de minerales de alteración** presentes en las rocas. Esto **refleja** las condiciones de P y T, composición del fluido hidrotermal, mineralogía de la roca original y el tiempo que tomó para lograr un equilibrio termodinámico roca/fluido.

- ◆ Potásica
  - ◆ Propilítica
  - ◆ Sódico-cálcica
  - ◆ Skarn
- Fílica (sericítica)
  - Argílica
  - Argílica avanzada
  - Silicificación

# Alteración potásica

- ◆ Se produce por **intercambio catiónico** con la adición de K  
ej, reemplazo de cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^{+}$  de la superficie de los minerales por cationes de la solución  $\text{K}^{+}$ .
- ◆ Temperatura: 400 – 800 °C
- ◆ Ph: neutro a alcalino

En general es selectiva y penetrativa



# Asociación mineral de alteración potásica

<b>Alteración potásica (rica en Bt), biotítica</b>	Generalmente se encuentra en el <b>núcleo</b> de depósitos de pórfidos, particularmente en aquellos asociados a <b>intrusiones MÁFICAS</b> o a rocas volcánicas a volcanoclásticas máficas a intermedias.
<b>Minerales característicos</b>	<b>BIOTITA, FELDESPATO POTÁSICO, MAGNETITA</b>
<b>minerales asociados</b>	<b>Cuarzo, pirita</b> , anhidrita, albita sodica, plagioclasa, actinolita, rutilo, apatito, sericita, clorita, epidota

<b>Alteración Potásica</b>	En el núcleo de sistemas porfíricos, particularmente asociado a <b>intrusiones FÉLSICAS</b> .
<b>Minerales característicos</b>	<b>FELDESPATO POTÁSICO</b>
<b>minerales asociados</b>	<b>cuarzo</b> , albita, muscovita, anhidrita, epidota

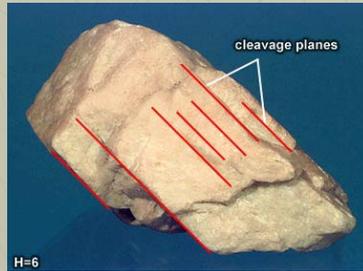
❖ Cuando la alteración es TEMPRANA suele tener **textura isotrópica** de grano fino (sugiere metamorfismo de contacto) por reemplazo selectivo de Hb por Bt.

❖ Cuando la alteración es POSTERIOR suele ser **penetrativa y pervasiva** por ciclos convectivos asociada a la circulación de fluidos hidrotermales.

❖ La mineralización en **vetillas** sugiere T° inferiores incluso < 400°C.

# Asociación mineral de alteración potásica

<b>BIOTITA</b>	$K(Mg, Fe^{2+})_3(Al, Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH, F)_2$
<b>características</b>	Micácea, negra-café-verde, puede crece asociado a vetas, pervasivo en zonas de cizalle



<b>FELDESPATO POTÁSICO</b>	$KAlSi_3O_8$
<b>características</b>	Puede ser <b>blanco, rosado, rojo o canela</b> . El cambio de color se debe a la presencia de <b>Fe</b> en la estructura cristalina o inclusiones solidas diseminadas finamente de óxidos de Fe. Dureza: 6 a 6,5; densidad: 2,6 a 2,8; raya blanca. Ocurre <b>pervasivo, selectivo o controlado por vetas</b>

<b>MAGNETITA</b>	$Fe_3O_4$
<b>características</b>	<b>Negra</b> , con una iridiscencia azul. Ocurre en octaedros, decaedros o masas granulares. <b>Fuertemente magnética</b> y con raya negra. Puede ocurrir en <b>vetillas o diseminada</b> en alteraciones pervasivas.

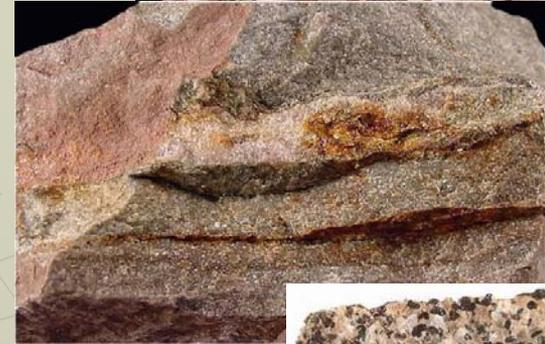


# Alteración Skarn / Calco-silicatada

- ❖ Transformación de rocas carbonatadas (calizas, dolomitas) a minerales **calcosilicatados en zonas adyacentes** a intrusivos.
- ❖ Temperatura: amplio rango
  - ❖ **Altas** → metamorfismo de contacto
  - ❖ **Menores** → metasomatismo
- ❖ Ph: neutro alcalino

Endoskarn → en la intrusión

Exoskarn → reemplazo en roca huésped



# Asociación mineral de alteración Skarn

- ◆ **Caliza** → granates (andradita y grosularita), wollastonita, epidota, diópsido(Px), idocrasa, clorita, actinolita
- ◆ **Dolomita** → fosterita (olivino), serpentinita, talco, tremolita, clorita.

La asociación zeolita-clorita-carbonatos se forma a bajas temperaturas

La actinolita seguida de epidota ocurre a temperaturas progresivamente menores.

# Asociación mineral de alteración skarn

<b>Skarn cálcico</b>	<b>Andradita (gte) y diópsido (px)</b> ocurren en <b>ambientes oxidados</b> relacionados a pórfidos Cu, mientras que <b>grosularita (Gte)</b> y <b>hedembergita (Px)</b> son mas comunes en <b>skarns reducidos (Au, W y Sn)</b>
<b>Minerales característicos</b>	<b>GRANATE, CLIONOPIROXENO, WOLLASTONITA</b>
<b>minerales asociados</b>	actinolita, tremolita, vesuvianita, epidota

<b>Skarn magnésico</b>	Desarrollados por reemplazo metasomático de <b>calizas dolomíticas</b> (ricas en Mg). <b>Forsterita (ol Mg) y diopsido</b> ocurren en skarn Mg de alta Tº, mientras que los skarn Mg <b>de baja Tº</b> contienen <b>serpentina y talco</b> , ambos ocurren como minerales <b>retrógrados después de forsterita y clinopiroxeno.</b>
<b>Minerales característicos</b>	<b>FORSTERITA(OL)-DIOPSIDO(CPX) O SERPENTINA-TALCO</b>
<b>minerales asociados</b>	calcita, magnetita, tremolita

# Asociación mineral de alteración skarn

<b>Skarn retrógrado</b>	Comúnmente <b>reemplazan</b> alteraciones skarn tempranas, pudiendo sobreimponerse a esta y/o afectar zonas adyacentes.
<b>Minerales característicos</b>	<b>CAICITA, CLORITA</b>
<b>minerales asociados</b>	hematita, illita-esmectita, montmorillonita-nontronita, pirita

# Asociación mineral de alteración skarn

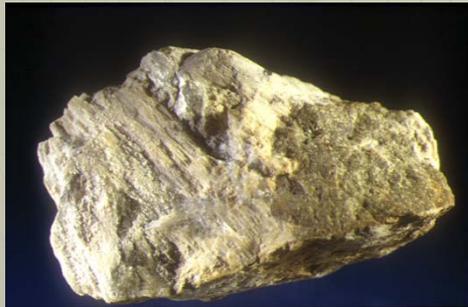
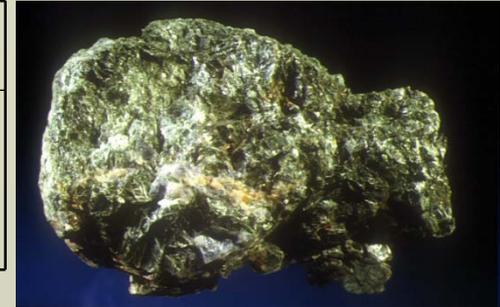
<b>GRANATE</b>	$(Ca,Mn,Fe,Mg)_3(Al,Fe, Mn,Cr,Ti)_2(SiO_4)_3$
<b>características</b>	<p>Mineral que tiende a ser resistente a la meteorización. Se presenta tanto en el endoskan como en el exoskan. Ocurre como mxx <b>diseminados, masas irregulares, vetillas</b> o reemplazos masivos.</p> <p>Dureza <b>6,5 a 7,5</b>, puede ser de <b>variados colores</b> (rojo, café, verde, gris, amarillo, amarillo cafesosos), con brillo <b>vítreo</b> a veces graso o resinoso, raya blanca a blanca cafesosa</p> <p><u>Ejemplos:</u> Andradita (<math>Ca_3Fe^{+++}_2(SiO_4)_3</math>) grosularia (<math>Ca_3Al_2(SiO_4)_3</math>)</p>



<b>CLINOPIROXENO</b>	$Ca(Mg,Fe,Mn,Al)Si_2O_6$
<b>características</b>	<p><b>Verde claro a oscuro.</b> Px de Fe o Mn marrón oxidado. Se presenta tanto en el endoskan como en el exoskan. Ocurre como cxx <b>diseminados, masas irregulares, vetillas</b> o reemplazos masivos.</p> <p>Ejemplos: Diópsido (<math>CaMgSi_2O_6</math>), Hedenbergita (<math>CaFeSi_2O_6</math>)</p>

# Asociación mineral de alteración skarn

<b>CLORITA</b>	$(\text{Mg,Fe}^{+2},\text{Fe}^{+3})_6\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
<b>características</b>	<b>Azul grisácea a verde;</b> generalmente micácea, a veces acicular radial. Por meteorización a hematita roja, rosada o café.



<b>WOLLASTONITA</b>	$\text{Ca}(\text{SiO}_3)$
<b>características</b>	<b>Blanco a gris claro, café, amarillo, verde.</b> Dureza 4.5 – 5. <b>Brillo sedoso a vítreo.</b> Ocurre como agregados de cxx elongados, prismáticos, radiados. Cxx tabulares son raros

<b>CALCITA</b>	$\text{CaCO}_3$
<b>características</b>	<b>Efervesce fuertemente en HCl,</b> generalmente blanco lechoso, habito <b>romboédrico</b> , H:3



# Alteración propilítica

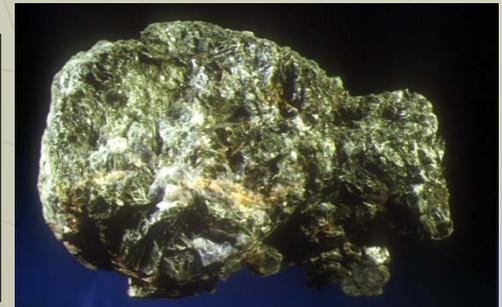
- ◆ Ocurre por lo general como HALO GRADACIONAL Y DISTAL de una alteración potásica.
- ◆ Esta característica zonal y gradacional es reflejo de un **gradiente termal decreciente** hacia afuera.
- ◆ Temperatura: 200 – 250 °C
- ◆ Ph: neutro alcalino



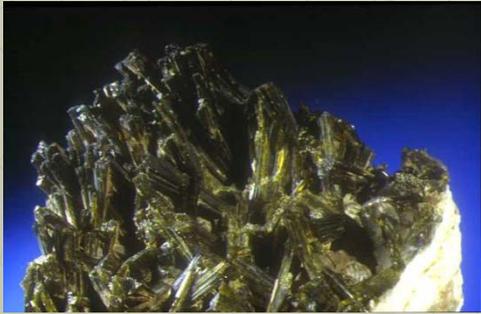
# Asociación mineral de alteración propilítica

<p><b>Alteración Propilítica</b></p>	<p>zona de alt. mas externa, niveles intermedios a profundos de sist. porfídicos.</p> <p>Involucra <b>hidrólisis</b>, hidratación y carbonatación.</p> <p>En la hidrólisis <b>cationes</b> como <math>K^+</math>, <math>Na^+</math>, <math>Ca^{2+}</math> se transfieren de los minerales a la solución acuosa y el <b>H<sup>+</sup></b> se <b>incorpora</b> en las fases sólidas remanentes (Metasomatismo de hidrogeno). Este proceso hace que tiende a aumentar el Ph del fluido</p>
<p>Minerales característicos</p>	<p><b>CLORITA, EPIDOTA, ALBITA, CALCITA</b></p>
<p>minerales asociados</p>	<p>actinolita, sericita, arcillas, <b>pirita</b></p>

<p><b>CLORITA</b></p>	<p><math>(Mg, Fe^{+2}, Fe^{+3})_6AlSi_3O_{10}(OH)_8</math></p>
<p><b>características</b></p>	<p>azul grisácea a verde botella; generalmente micácea, a veces acicular radial; por meteorización a hematita roja, rosada o café.</p>



# Asociación mineral de alteración propilítica



<b>EPIDOTA</b>	$(Ca_2(Al,Fe)_3Si_3O_{12}(OH))$
<b>características</b>	<b>verde pistacho</b> , reemplazo de mxx en roca volcánicas y rellenando espacios abiertos, hábito acicular radial.

<b>CALCITA</b>	$CaCO_3$
<b>características</b>	<b>efervece</b> fuertemente en HCl, generalmente blanco lechoso, habito romboédrico, H:3



ALBITA 59mm Brasil



<b>ALBITA</b>	$NaAlSi_3O_8$
<b>Características</b>	Varia de <b>blanca a rosada</b> o rojiza con el aumento de hematita fina. Dureza 7. El color verde pálido indica presencia de sericita fina. Generalmente asociada a <b>fracturas o vetas</b> , mas <b>pervasiva</b> hacia el centro de la zona de alteración. Precipita cuando el fluido posee una alta $a_{Na^+}/a_{K^+}$ .

# Alteración propilítica

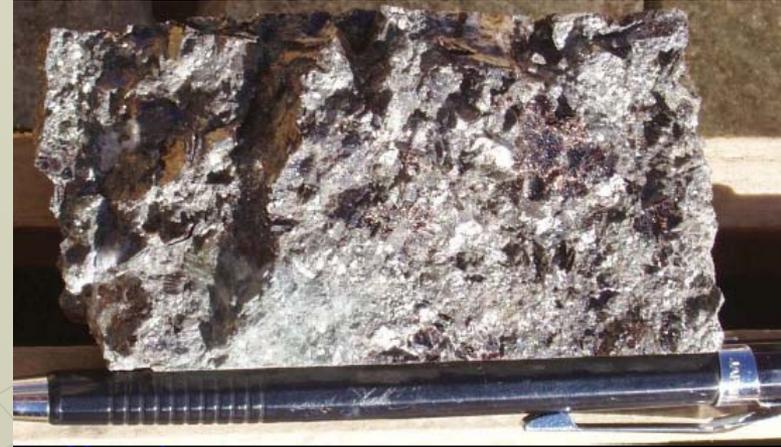
- ◆ Puede presentar una zonación desde zonas con alteración potásica y/o cuarzo-sericitica donde el fluido va progresivamente perdiendo agua, T

Grada de:

- **ACTINOLITA-BIOTITA** próximo al núcleo
- a **ACTINOLITA-EPIDOTA**
- a asociaciones de **EPIDOTA-CLORITA-ALBITA-CARBONATOS** hacia zonas más distales
- a zonas periféricas más ricas en **CLORITA** Y **ZEOLITAS** hidratadas formadas a bajas condiciones de temperatura

# Alteración Sódico-cálcica

- ◆ Alteración ocurre en la porción **profunda** de pórfidos cupríferos y se desarrolla en forma simultánea (temprana) con la alteración potásica a niveles más altos.
- ◆ Temperatura: 360-480°C



## Sódica, Sódica-cálcica

Ocurre con **menor mineralización** en las partes profundas de sistemas porfíricos. Puede alojar la mineralización en depositos porfiricos asociados a **intrusiones alcalinas**

Minerales  
característicos

**ALBITA, ACTINOLITA**

minerales asociados

**Oligoclasa, clinopiroxeno, cuarzo, magnetita, titanita, clorita, epidota, anhidrita, titanita**

# Asociación mineral de alteración sódico-cálcica

## ALBITA



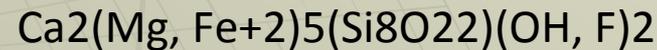
Varia de blanca a rosada o rojiza con el aumento de hematita fina. Dureza 7. El color verde pálido indica presencia de sericita fina. Generalmente asociada a fracturas o vetas, mas pervasiva hacia el centro de la zona de alteración. Precipita cuando el fluido posee una alta  $a_{\text{Na}^+}/a_{\text{K}^+}$ .



## características



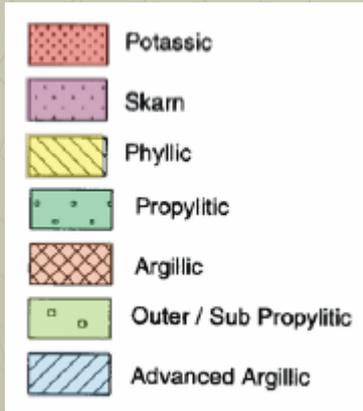
## ACTINOLITA



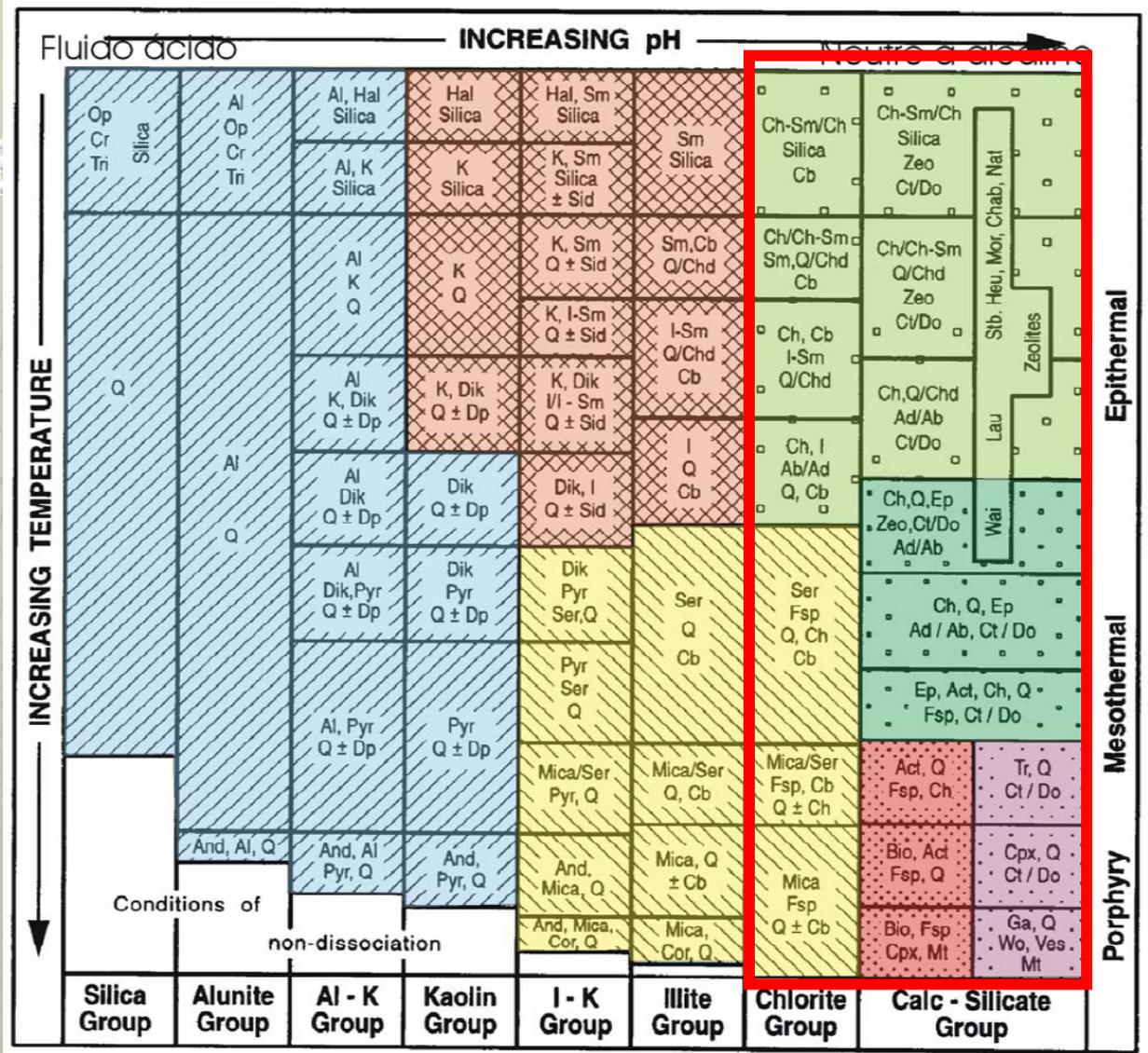
Típicamente como **fibras**, cristales columnares, agregado aciculares y radiales, particularmente en vetas o cavidades. Color: **verde claro a casi negro** H: 5-6, raya blanca. Brillo vítreo o mate. Ocurre en vetas como reemplazo selectivo o pervasivo comúnmente de minerales máficos. Puede ser alterada a clorita.



# Tabla alteraciones



Corbett y Leach,  
1998. SEG Special  
Publication N° 6



## Mineral Abbreviations :

Ab - albite; Act - actinolite; Ad - adularia; Al - alunite; And - andalusite; Bio - biotite; Cb - carbonate (Ca, Mg, Mn, Fe);  
Ch - chlorite; Chab - chabazite; Chd - chalcedony; Ch-Sm - chlorite-smectite; Cor - corundum;  
Cpx - clinopyroxene; Cr - cristobalite; Ct - calcite; Do - dolomite; Dik - dickite; Dp - diaspore; Ep - epidote;  
Fsp - feldspar; Ga - garnet; Hal - halloysite; Heu - heulandite; I - illite; I-Sm - illite-smectite; K - kaolinite;  
Lau - laumontite; Mt - magnetite; Mor - mordenite; Nat - natrolite; Op - opaline silica; Pyr - pyrophyllite;  
Q - quartz; Ser - sericite; Sid - siderite; Sm - smectite; Stb - stilbite; Tr - tremolite; Tri - tridymite;  
Ves - vesuvianite; Wai - wairakite; Wo - wollastonite; Zeo - zeolite

# Referencias

- ◆ [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)
- ◆ ATLAS OF ALTERATIONS, A field and petrographic guide to hidrothermal alteration minerals. A.J.B: Thompson and J.F.H. Thomppson.
- ◆ Apunte de alteraciones (V. Maksaev)
- ◆ Clase de alteración hidrotermal (V. Maksaev)
- ◆ Apunte Hidrotermalismo y yacimientos minerales (B.Townley)