

# CAPITULO II

## 2.1 MARCO TEORICO DEPOSITOS EPITERMALES

Este capítulo da inicio con algunos conceptos de los depósitos de esta clase, destaca las características generales, diferencias de los estilos de modelos, mineralización propia de la mena, ganga y alteración mineral, enfatiza las texturas de relleno y de reemplazo y finalmente ejemplos de su distribución en el mundo.

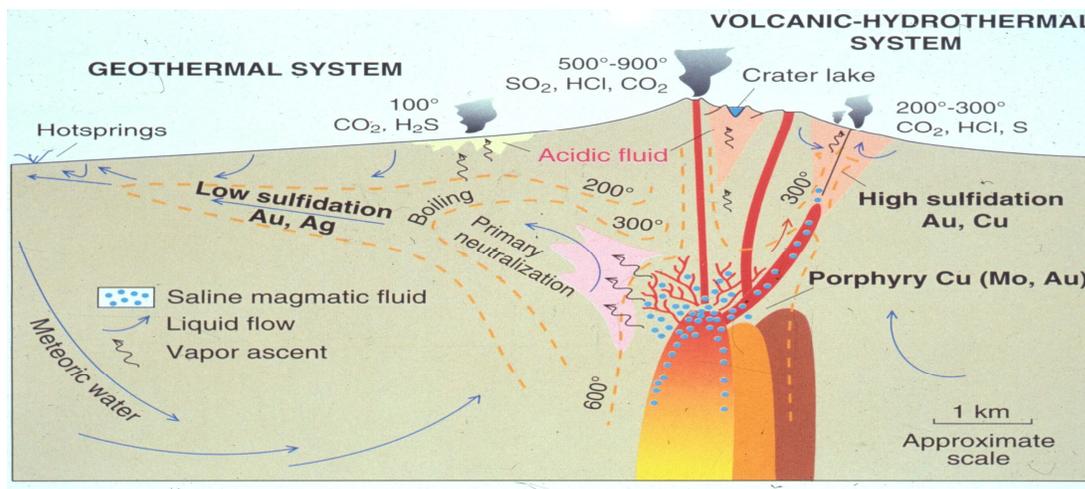


Fig.1 Esquema deposito epitermal.

Lindgren (1922) definió por primera vez el ambiente epitermal, como aquel que se forma a poca profundidad máxima de 1000 m con un límite de presión superior a 100 atmósferas., conteniendo proporciones variables de oro, plata y metales base, con un rango de temperatura de de 50 a 200 °C, de medir el límite de estabilidad de varios minerales de texturas de vetas para depósitos tipo "hot spring" (Hedenquist et al., 2000).

En la actualidad se sabe que los depósitos con texturas y asociaciones minerales características del ambiente epitermal, se formaron a temperaturas máximas de alrededor de 300 °C, (en base a geotermómetros minerales e inclusiones fluidas) aunque la mayoría de estos depósitos se forman entre 160 y 270 °C, este intervalo de temperatura corresponde a un rango de profundidad bajo del paleonivel freático entre 50 y 700 m.. Lindgren (1933) concluyó que el depósito de los yacimientos epitermales ocurre porque en sitios muy localizados, los fluidos ascendentes cambian rápidamente su

composición dentro de un kilómetro o muy cerca de la superficie. Ahora sabemos que estos cambios son causados por la ebullición, es el proceso que más favorece la precipitación de oro a partir de complejos biosulfurados y provocan la precipitación de sílice coliforme, adularia y calcita hojosa (bladed) y la formación de vapor-agua caliente que crea alteración argílica avanzada (Hedenquist et al., 2000).

## 2.1.2. CLASIFICACION DE LOS DEPOSITOS EPITERMALES

Existen una variedad de términos que han sido usados para clasificar a los depósitos epitermales. Giles y Nelson (1982) introdujeron el término “hot-spring” para denominar a este tipo de yacimientos, después de que se descubrió el depósito de McLaughlin, USA, por debajo del “sinter”.

Hayba et al. (1985) y Heald et al. (1987) proponen los términos ácido-sulfato y adularia-sericita en base a la mineralogía y a los tipos de alteración presentes en estos depósitos epitermales.

Berger y Henley (1989) propusieron el término caolinita-alunita en sustitución de ácido-sulfato para destacar los minerales de alteración característicos en esta nomenclatura.

Bonham (1986) propuso los términos de sulfuro alto y sulfuro bajo, para referirse a la cantidad total de sulfuros en el depósito.

Finalmente los términos de alta y baja sulfatación fueron introducidos por Hedenquist (1987) se refiere al estado de oxidación del azufre. En los de alta sulfatación el azufre se presenta como  $S^{4+}$  en forma de  $SO_2$  y en los de baja sulfatación como  $S^{-2}$  en forma de  $H_2S$ .

Se sintetiza que los de “baja sulfatación” son reducidos y un pH cercano a neutro y los fluidos de “alta sulfatación”, son oxidados y ácidos.

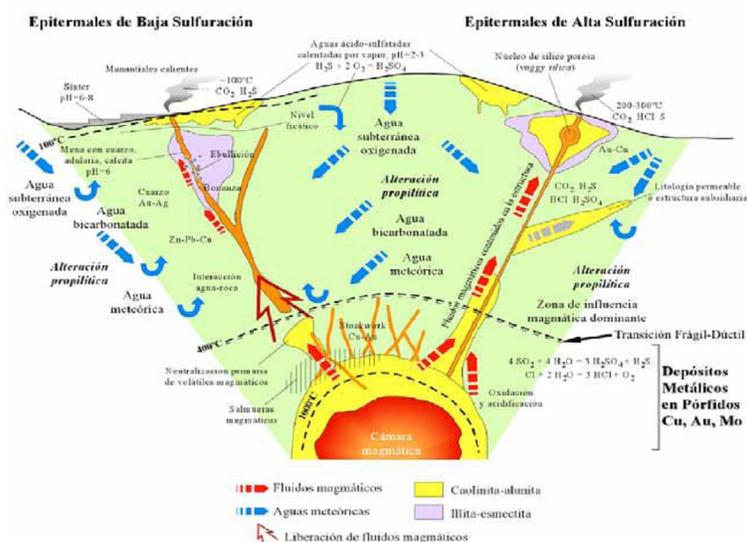
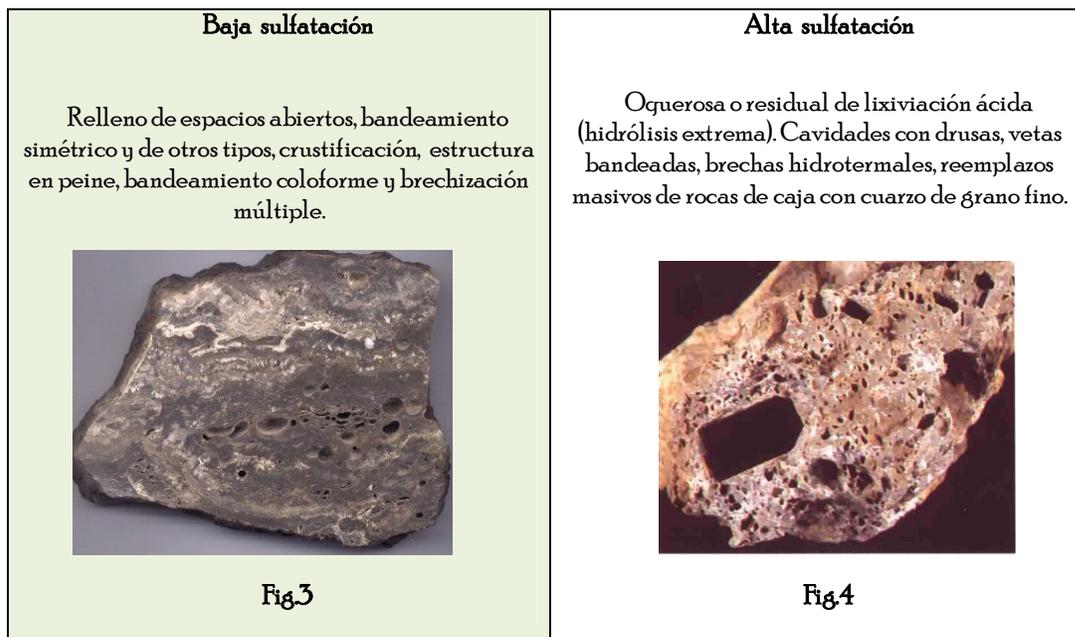


Figura 2  
 mostrando la relación de los tipos de fluidos al zoneamiento de alteración en los dos estilos, la formación de depósitos metálicos relacionados a pórfidos, hasta el ambiente epitermal. (Tomado de Camprubí et al. 2003).

Bosquejo epitermal

La figura 2 detalla el origen de formación de los fluidos de alta sulfatación (AS) principalmente de una fuente magmática y depositan metales preciosos cerca de la superficie cuando el fluido se enfría o se diluye mezclándose con aguas meteóricas. Los metales preciosos en solución derivan directamente del magma o pueden ser lixiviados de las rocas volcánicas huéspedes a medida que los fluidos circulan a través de ella. Los fluidos de baja sulfatación (BS) son una mezcla de aguas-lluvias (aguas meteóricas) que descienden y aguas magmáticas (derivadas de una fuente de roca fundida a mayor profundidad en la tierra) que han ascendido hacia la superficie. Los metales preciosos han sido transportados en solución como iones complejos (en general bi-sulfurados a niveles epitermales; clorurados a niveles más profundos) y para fluidos de baja sulfatación la precipitación de metales ocurre cuando el fluido hierve al acercarse a la superficie (ebullición).

### 2.1.3. TEXTURAS DE MINERALES DE MENA Y GANGA



**Fig. 3. Texturas bandeada, cuarzo bandeado costriforme** multiepisodicas (Verme y Eimon, 1983) refleja episodios múltiples de depositación mineral y fracturamiento hidráulico seguido de presión explosiva liberación que puede estar relacionada con explosiones hidrotermales de superficie (Henley et.al., 1984). El mineral de calcita de textura finamente laminada es común y está formada como resultado de ebullición (Simmons y Christenson, 1994), aunque ella puede ser reemplazada por cuarzo cuando el sistema se enfría, en áreas que han experimentado poca erosión, sinter distintivos se depositaron en la paleosuperficie por aguas de fuentes termales con pH neutro que pueden todavía estar presente (Vikre, 1985; White et.al., 1989). Los sinter pueden estar bandeado rítmicamente con estructuras de crecimiento vertical, usualmente son fáciles de distinguir del reemplazamiento silíceo de los sedimentos estratificados.

**Fig. 4. Texturas de Alteración a sílice ogerosa o residual (argílica avanzada) en sistemas epitermales de alta sulfatación** El cuarzo drusico vuggy es causado por lixiviación ácida a  $\text{pH} < 2$

(Stoffregen, 1987) el cual deja espacios abiertos y sílice residual, este residuo recristaliza a cuarzo con cuarzo adicional depositado desde solución (Hedenquist et al. 1994). Los sinteres silíceos nunca se forman en la superficie en estos ambientes ácidos en razón de que los factores cinéticos inhiben la precipitación de la sílice desde soluciones ácidas, solamente en base de texturas de campo a veces hay mucha dificultad de distinguir los dos estilos.

### 2.1.3.1. Mineralogía de mena

Baja sulfatación	Alta sulfatación
<p>Relación Ag/Au alta                      Cobre Variable y ausente</p> <p>Pirita abundante                      Calcopirita común                      Ausencia de enargita-luzonita                      Presencia de seleniuros                      común minerales de manganeso                      bismutina ausente                      blenda común                      galena común                      arsenopirita común                      electrum común</p>	<p>Relación Ag/Au baja                      Cobre es el principal metal base (covelina)</p> <p>Pirita abundante                      Calcopirita poco común                      Comunes enargita-luzonita                      Ausencia de seleniuros                      Minerales de manganeso raros                      bismutina a veces                      blenda menos común                      galena menos común                      arsenopirita rara                      electrum rara</p>

Tabla 1. Basado en la compilación de minerales de 150 depósitos epitermales en la región sudoeste de pacífico (White et al) y 47 depósitos al norte y centro de sudamérica (Buchanan, 1981)

Aunque hay muchos minerales que se encuentran en ambos tipos de depósitos existen claras diferencias entre la mineralogía de los dos estilos de BS y AS.

Algunas de las cuales reflejan distintas condiciones de reducción-oxidación de los fluidos hidrotermales. Una distinción es la yacencia común de esfalerita y arsenopirita en depósitos de baja sulfatación mientras que la esfalerita es escasa y arsenopirita es rara en los depósitos de alta sulfatación, a diferencia de los ejemplos de baja sulfatación los de alta sulfatación contienen comúnmente minerales de cobre-arsénico especialmente sulfosales de alta sulfatación como enargita y luzonita. Tales sulfuros, incluyendo los minerales de relativamente alta sulfatación tennantita y tetraedrita (Barton y Skinner, 1979): Hedenquist, 1995, son relativamente raros o están ausentes en depósitos de oro de baja sulfatación. La abundancia total de sulfuros pirita principalmente no es significativa tanto que podría ser alta o baja en los dos estilos.

### 2.13.2. Mineralogía de ganga

Baja sulfatación	Alta sulfatación
Carbonatos: presentes, Comúnmente calcita y rodocrosita. Adularia: diseminada y en vetas. Alunita y pirofilita: escasas. Barita y/o fluorita: presentes Localmente; la barita se halla por lo común por encima de la mena. Azufre nativo: ausente, illita	Carbonatos: ausentes. Adularia: ausente. Alunita y pirofilita: pueden ser abundantes. Barita: diseminada con la mena. Azufre nativo: suele estar presente, rellenando cavidades. Caolinita.

Tabla 2. Basado en la compilación de minerales de 150 depósitos epitermale s en la región sudoeste de pacífico (White et al prensa) y 47 depósitos al norte y centro de sudamerica (Buchanan, 1981)

Los Minerales de ganga asociado con los dos estilos de mineralización epidermal muestran una considerable sobreposición, aunque hay claras diferencias que reflejan en la tabla 2, la reactividad (pH) del fluido de alteración, el cuarzo es común en los dos estilos. Adularia y calcita indican pH casi neutro (Reyes, 1990), son minerales comunes en depósitos de baja sulfatación pero ausente en los de alta sulfatación.

Los minerales formados en condiciones relativamente acidas, tales como caolinita y alunita mas pirofilita, diásporo y P, Sr, Pb y minerales de sulfato fosfato conteniendo RREE; Stoffregen y Alpers, 1987, son comunes pero menores en los depósitos de alta sulfatación. En los deposito de baja sulfatación la alunita no ocurre como un mineral hipogénico y la caolinita hipogénica es rara, sin embargo ambos minerales son comunes en áreas afectadas por sobreposición (Vikre, 1985) causada por percolación hacia abajo de aguas sulfato-acidas vaporizadas y calientes (Schoen, 1974)

### 2.13.3 Alteración

La alteración asociada es variable y depende fuertemente del carácter de las soluciones hidrotermales participantes

Baja sulfatación	Alta sulfatación
<p>Extensa silicificación en menas con múltiples generaciones de cuarzo y calcedonia, comúnmente acompañadas de calcita. Vetas y flanqueadas por asociaciones de sericita-illita-caolinita. Alteración argílica intermedia [caolinita-illita-montmorillonita (smectita)]; alteración argílica avanzada (caolinita-alunita) puede formarse en la parte del techo de las zonas mineralizadas. La alteración propilitica domina en profundidad y en la periferia de las vetas, pudiendo ser extensa.</p>	<p>Cuarzo, caolinita/dickita, alunita, baritina, hematita; sericita/illita, arcillas amorfas y sílice, pirofilita, andalucita, diásporo, corindón, turmalina, dumortierita, topacio, zunyita, jarosita, sulfatos de Al-P y azufre nativo. La alteración argílica avanzada es característica y puede ser arealmente extensa y prominente visualmente. El cuarzo se presenta como reemplazos de grano fino y característicamente como sílice oquerosa residual en rocas con lixiviación ácida.</p>

Tabla 3. Basado en la compilación de minerales de 130 depósitos epitermale s en la región sudoeste de pacífico (White et al) y 47 depósitos al norte y centro de sudamerica (Buchanan, 1981)

En general en los estilos epitermale s muestran **mineralogía de alteración** propilitica (incluyendo una asociación variable de albita, clorita, epidota, calcita y piritita) similares, sin embargo la distribución de las zonas de alteración es diferente, los fluidos de química contrastante por ejemplo los minerales de sulfuros del estado de baja sulfatación precipitan desde fluidos de pH reductor a casi neutro (Barton y Skinner, 1979) en contraste los sistemas de alta sulfatación y su roca de caja lixiviada están asociados con fluidos ácidos que son generados en el ambiente hidrotermal magmático adyacentes a los volcanes activos (Ransome, 1907; Hedengquist et al, 1994), la mineralización hidrotermal de estos dos estilos son conocidos tipos adularia-sericita y sulfato ácido respectivamente (Heald et al, 1987).

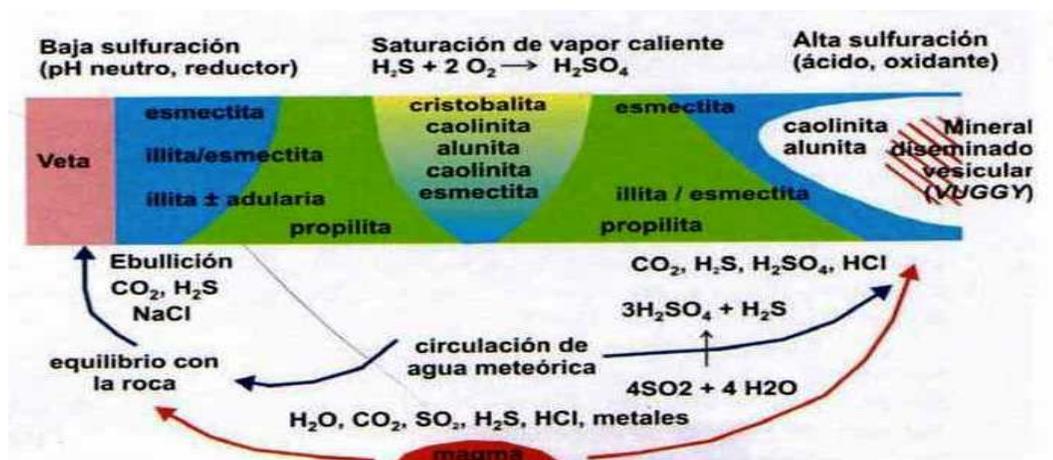


Fig4. La mineralogía de alteración varía tanto vertical como lateralmente. El cuarzo se establece en todas las aéreas la alteración propilitica ocurre en zonas de baja relación agua: roca y su mineralogía es controlada por la composición de la roca. Minerales típicos incluyen albita, calcita, epidoto y pirita. Sobreimpresión de vapor calentado puede ocurrir ya sea en ambiente de baja y de alta sulfatación aunque en los últimos la mineralogía de alteración hipogénica y de vapor caliente son similares. Los efectos de sobreimpresión de vapores calientes son más aparentes en los ambientes de baja sulfatación, tanto que la mineralogía es marcadamente diferente de aquella producida por fluidos hipogénicos. En los ambientes de baja sulfatación los sinteres silíceos pueden formarse donde las aguas de pH neutro descargan en la superficie, en aéreas de alto relieve, sin embargo esta agua caliente puede salir lateralmente a grandes distancias antes de alcanzar la superficie, donde se mezclan con aguas subterráneas y no conllevarían así a la precipitación del sinter silíceo (ej. Hishikari, Japón). En los ambientes de alta sulfatación, la mineralización de la mena (si está presente) ocupa parte del núcleo intensamente ácido alterado del sistema de alteración: Este núcleo es muy irregular en forma, aunque se estrangula hacia arriba y hacia abajo del principal cuerpo de la mena.

El conocimiento de las variables tales como pH y estado de oxidación-reducción junto con la temperatura, salinidad de los fluidos y contenidos de gases son fundamentales para el entendimiento de los controles sobre el transporte de los metales y la deposición. Por ejemplo en fluidos reducidos de baja salinidad (característica de los sistemas de baja sulfatación), el oro parece ser transportado en solución como sulfuros bicomplejos. La ebullición es un proceso común que opera en los conductos a profundidades epitermales, ello causa gases ácidos (predominantemente CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) que pierden desde el líquido, resultado en el incremento en el pH. Esto inicialmente incrementa la solubilidad del oro, aunque eventualmente la pérdida de H<sub>2</sub>S desde el líquido causa así el descenso de la solubilidad del oro, llevándolo así a su precipitación (Henley et al., 1984). Por contraste en soluciones oxidadas y ácidas de salinidad moderada característica de enfriamiento (Giggenbach, 1992; Hedenquist et al., 1994)

## 2.15. Distribución en el mundo de los depósitos epitermales

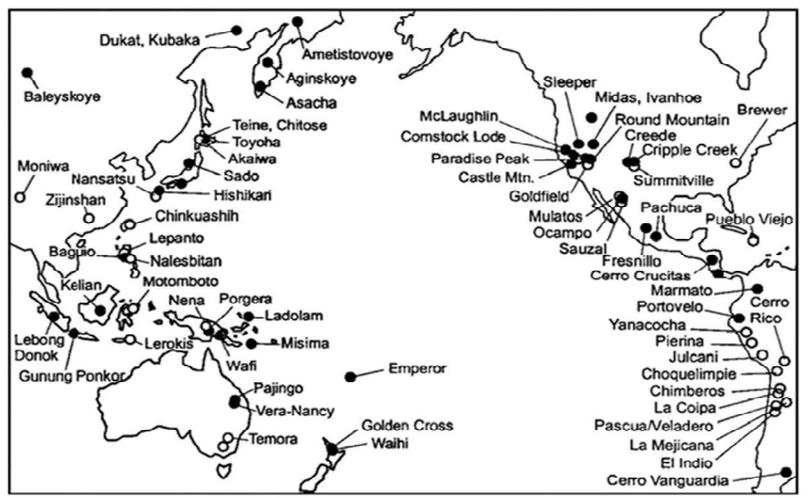


Figura 5. Depósitos epitermales de oro en el Circum-Pacífico (tomado de Hendesquist et al., 1996). Los círculos negros representan yacimientos de baja sulfatación y los blancos a yacimientos de alta sulfatación.

BAJA SULFATACIÓN	ALTA SULFATACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Argentina:</b> Cerro Vanguardia, Esquel, Manantial Espejo.</li> <li>• <b>Australia:</b> Pajingo,</li> <li>• <b>Chile:</b> Inca de Oro.</li> <li>• <b>Fiji:</b> Emperor</li> <li>• <b>USA:</b> Mc Laughlin, California :</li> <li>• <b>Indonesia:</b> Gunung Pongkor, Kelian, Levong Donok</li> <li>• <b>Japón:</b> Hishikari</li> <li>• <b>México:</b> Mulatos, El Sauzal.</li> <li>• <b>Papúa-Nueva Guinea:</b> Ladolam, Porgera.</li> <li>• <b>Perú:</b> Cahuarso, Cerro de Pasco, Julcani, Castrovirreyña.</li> <li>• <b>New Zeland:</b> Waihi</li> <li>• <b>Suecia:</b> Enåsen.</li> <li>• <b>Taiwan:</b> Chinkuashih</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Argentina:</b> Veladero, Pascua-Lama, La Mejicana y Nevados del Famatina.</li> <li>○ <b>Australia:</b> Temora</li> <li>○ <b>Chile:</b> El Indio-La coipa, El Guanaco y Choquelimpie</li> <li>○ <b>China:</b> Zijinshan</li> <li>○ <b>USA, Goldfield,</b> Nevada</li> <li>○ <b>USA</b> Summitville, Colorado,</li> <li>○ <b>España:</b> Rodalquilar.</li> <li>○ <b>Indonesia:</b> Motomboto</li> <li>○ <b>Filipinas:</b> Lepanto, Nalesbitan</li> <li>○ <b>Marruecos:</b> Imiter</li> <li>○ <b>México:</b> Fresnillo, Guanajuato, Tayoltita, Temasca Ltepec, Topia.</li> <li>○ <b>Perú:</b> Arcata, Casapalca, Caylloma, Orcopampa.</li> <li>○ <b>Rusia:</b> Berezjakovskoje, Julietta</li> <li>○ <b>Turquía:</b> Mastra y otros</li> </ul>

### 2.16. Otros rasgos característicos y analogías entre los dos tipos de depósitos epitermales

RASGOS CARACTERÍSTICOS	BAJA SULFATACIÓN	ALTA SULFATACIÓN
Tipo de rocas hospedante	R volcánicas rocas ácidas a intermedias (andesita-riodacita-riolita).	R. Volcánicas rocas ácidas a intermedias (esencialmente andesita-riodacita).
Geometría del cuerpo mineralizado	Tamaño variable y morfología tabular	Relativamente pequeño y equidimensional.
Rango de temperaturas de formación	Generalmente, entre 100–320°C (la mayoría entre 150–250°C (6))	Generalmente, entre 100–320°C (la mayoría entre 170–320°C; en ocasiones, hasta 480°C (5)).
Edad entre las rocas ígneas asociadas y la mineralización	Entre 1 y 10 M.a. (frecuentemente entre 2 y 4 M.a.)	Por lo general, entre 0.3 y 2 M.a.
Metales predominantes	Au, Ag (Zn, Pb, Cu)	Cu, Au, As (Ag, Pb)
Carácter de la mineralización económica	Típico relleno de filones en bandas, comúnmente con brechificaciones	Típicamente diseminada
Abundancia de sulfuros	1–20% del volumen total, pero típicamente menos del 5%, piritita predominante.  Contenido de azufre total típicamente bajo.	10–90% del volumen total, sobre todo de grano fino, piritita con textura parcialmente laminada.  Contenido de azufre total típicamente alto.

