

## **V - GENERALIDADES**

### **V.1 - Depósitos epitermales**

El término epitermal se deriva de la clasificación propuesta en 1911 por Lindgren en un intento de sistematizar los depósitos minerales hidrotermales (Lindgren, 1911; Henley, 1985). En su clasificación genética, Lindgren definió los depósitos como “depósitos metalíferos formados cerca de la superficie por aguas termales en ascenso y conectados genéticamente con rocas ígneas”. El estimó un rango de temperatura de 50 a 200 °C y una profundidad máxima de 1000 m para éstos depósitos. Sus deducciones se basaron en los límites de estabilidad de ciertos minerales, tal como adularia, similares con las texturas de vetas de los depósitos “hot spring” (ambientes geotermales) y reconstrucciones geológicas. Descripciones más detalladas de los ambientes epitermales en la literatura geológica moderna incluyen también a Buchanan (1981), Berger y Eimon (1983), Henley (1985, 1991), Berger y otros. (1985), White y Hedenquist (1990), Sillitoe (1977, 1993a, 1995c), Corbett y Leach (1998), Hedenquist y otros. (2000), Cooke y Simmons (2000), Corbett (2002), Simmons y otros (2005), entre muchos otros.

En un amplio sentido, los depósitos epitermales son definidos como productos relacionados a volcanismo con actividad hidrotermal a poca profundidad y bajas temperaturas, (Guilbert y Park, 1986). Simmons y otros. (2005), especificaron que aquellos depósitos epitermales de baja profundidad, en sistemas hidrotermales de altas temperaturas se desarrollaron en arcos volcánicos; por otro lado, Sillitoe (1977) asegura que en su totalidad, los depósitos epitermales están asociados directamente a márgenes de subducción activos, en

diferentes épocas geológicas. Hedenquist, (2005) establece que la precipitación de oro normalmente toma lugar extendiéndose a temperaturas de 150 a 250 °C y profundidades de 50 a 650 m debajo del nivel freático (Figura 4). En la mayoría de los casos, éstos depósitos están relacionados en forma espacial y temporal con volcanismo subaéreo, de carácter ácido a intermedio y subvolcanismo asociado, pudiendo el basamento ser de cualquier tipo, el encajonante volcánico suele ser del tipo central proximal, muy típicamente con rocas efusivas o piroclásticas (Sillitoe y Bonham, 1984), aunque excepcionalmente puede ser del tipo distal (Wark y otros, 1990).

Un gran número de depósitos epitermales están asociados a estructuras de origen volcánico, en especial calderas y complejos andesíticos. Así mismo, existe un importante control de éste tipo de depósitos por parte de fallas de escala regional, en zonas de intenso fracturamiento dentro de un régimen extensional (Nieto-Samaniego y otros, 2005). Dichas fallas determinan la localización de los depósitos y actúan como guía para el emplazamiento de la fuente de calor magmática necesaria para la subsecuente actividad hidrotermal (Hedenquist, 1986; Fournier, 1987), que controla la duración de dicha actividad. Pero, aunque las fallas de orden mayor ejercen un control directo sobre el emplazamiento de la mineralización, ésta suele disponerse de forma preferencial en fallas subsidiarias (White y Hedenquist, 1990).

Los principales factores que influyen las condiciones físicas del ambiente epitermal y que, en último término, determinan el carácter y la localización de la mineralización son:

1) La geología regional de la zona en la que se halla el depósito en cuestión, como su estructura, la estratigrafía, las intrusiones a las que se asocia la mineralización y la naturaleza de dichas rocas ígneas, factores que controlan directamente el tipo y el grado de permeabilidad, así como la reactividad de la roca o rocas encajonantes.

2) Las características hidrológicas de la zona, es decir, la relación existente entre la permeabilidad y la topografía que controla el movimiento de los fluidos, y las características de los fenómenos de recarga/descarga de fluidos, así como el acceso de aguas calentadas por vapor (“steam-heated waters”)

3) Las condiciones de presión y temperatura de los fluidos mineralizantes, en lo que es el ambiente epitermal, que se hallan estrechamente ligadas a la ebullición (cambios de presión litostática a hidrodinámica produciendo “boiling”), determinado a su vez por la composición de los fluidos.

4) Las características químicas y el contenido total en gas de los fluidos mineralizantes, que son los factores determinantes en su reactividad, en su capacidad para el transporte de metales y en la paragénesis mineral, tanto por lo que respecta a la alteración del encajonante como la mineralización entre sí.

5) El posible desarrollo de permeabilidad contemporáneamente al hidrotermalismo y/o cambios en el gradiente hidráulico de la zona. (White y Hedenquist, 1990).

Una primera división de los depósitos epitermales en alta sulfuración (AS) y baja sulfuración (BS), basada en alteración y mineralogía, se ha aceptado

ampliamente (Hedenquist, 1987; Bonham, 1986; Helad y otros, 1987; Sillitoe, 1993; Corbett y leach, 1998). Otros nombres dados a estos sistemas son alto azufre/ácido sulfato y bajo azufre/adularia-sericita, respectivamente (Bonham, 1986, 1988; Hayba y otros, 1985; Heald y otros, 1987). Estas categorías son definidas en base al criterio mineralógico, que procede de dos diferentes fluidos, uno ácido y otro con pH cercano a neutro, respectivamente.

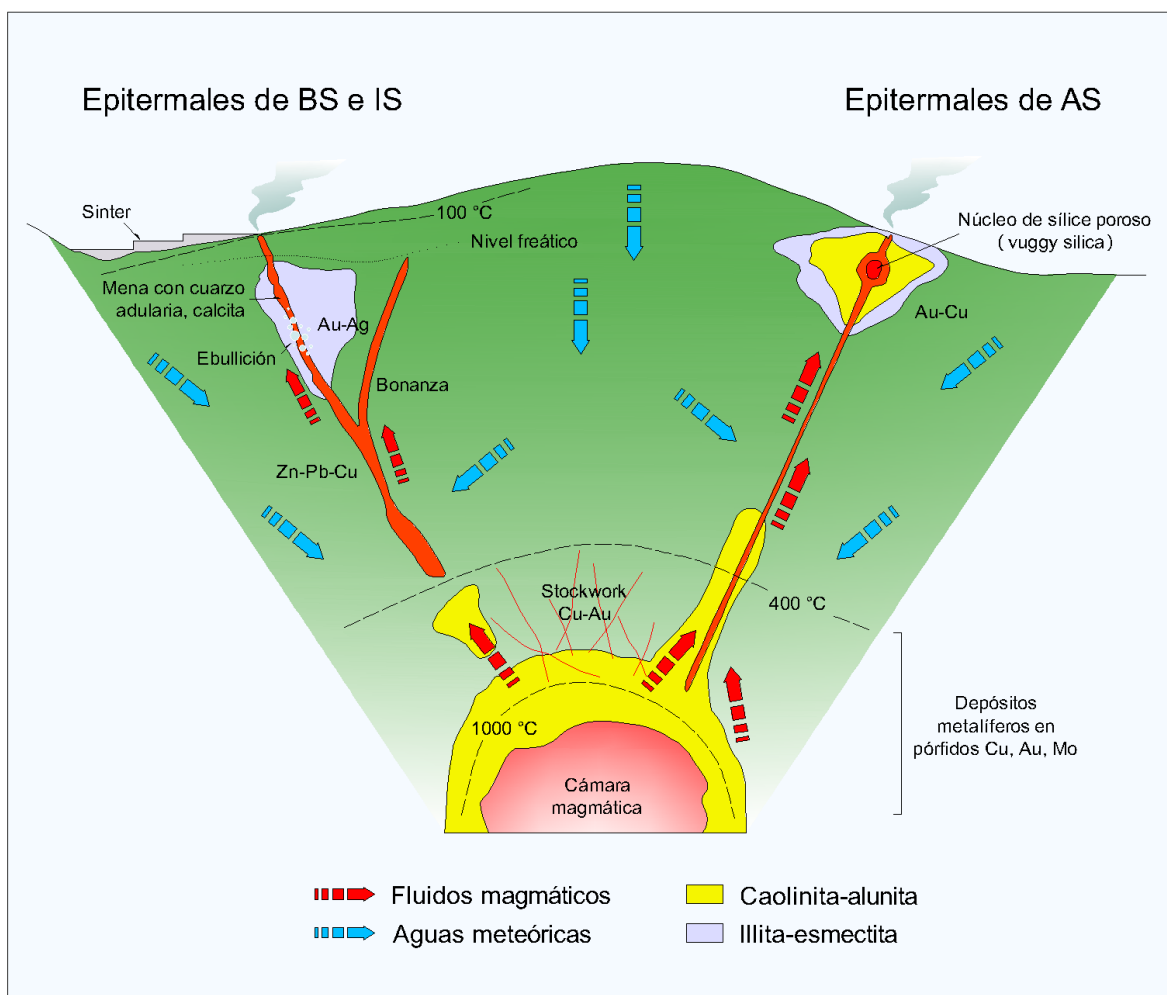


Figura 4- Modelo conceptual simplificado de los depósitos epitermales de baja (BS), intermedia (IS) y alta sulfuración (AS) (modificado de Sillitoe, 1995).

Los depósitos epitermales de baja sulfuración son desarrollados en un ambiente geotermal, dominado por aguas cloruradas donde hay un fuerte flujo de circulación de aguas a profundidad (principalmente de origen meteórico), conteniendo  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . Los depósitos epitermales de alta sulfuración son desarrollados en un ambiente magmático-hidrotermal, dominado por fluidos hidrotermales ácidos, donde hay un fuerte flujo de líquido magmático y vapor, conteniendo  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{SO}_2$ ; con aporte variable de aguas meteóricas (Sillitoe, 1977; Henley y Ellis, 1983; Hayba y otros, 1985; Heald y otros, 1987; Bonham 1986, 1988; Hedenquist 1987; Berger y Henley 1989; Hedenquist y Lowenster 1994; Hedenquist y otros 2000; Simmons y otros 2005). En ambos tipos de depósitos los fluidos circulan hacia la superficie a través de fracturas en las rocas y la mineralización a menudo se presenta en esos conductos (mineralización estructuralmente controlada), pero también pueden circular por niveles de rocas permeables y eventualmente mineralizar ciertos estratos. Los fluidos de BS, generalmente forman vetas de relleno con metales preciosos o series de vetas/vetillas más finas, denominadas “stockwork” o “sheeted-veins”. Los fluidos de AS más calientes y ácidos penetran más en las rocas encajonantes originando cuerpos mineralizados vetiformes, pero también diseminación en las rocas (Figura 5). Los típicos sistemas geotermales ocurren a cierta distancia de un edificio volcánico, algunas veces pueden ocurrir en áreas sin actividad volcánica contemporánea, generalmente, son derivados de intrusiones localizadas a 5-6 km debajo de la superficie (Hedenquist y otros, 2000).

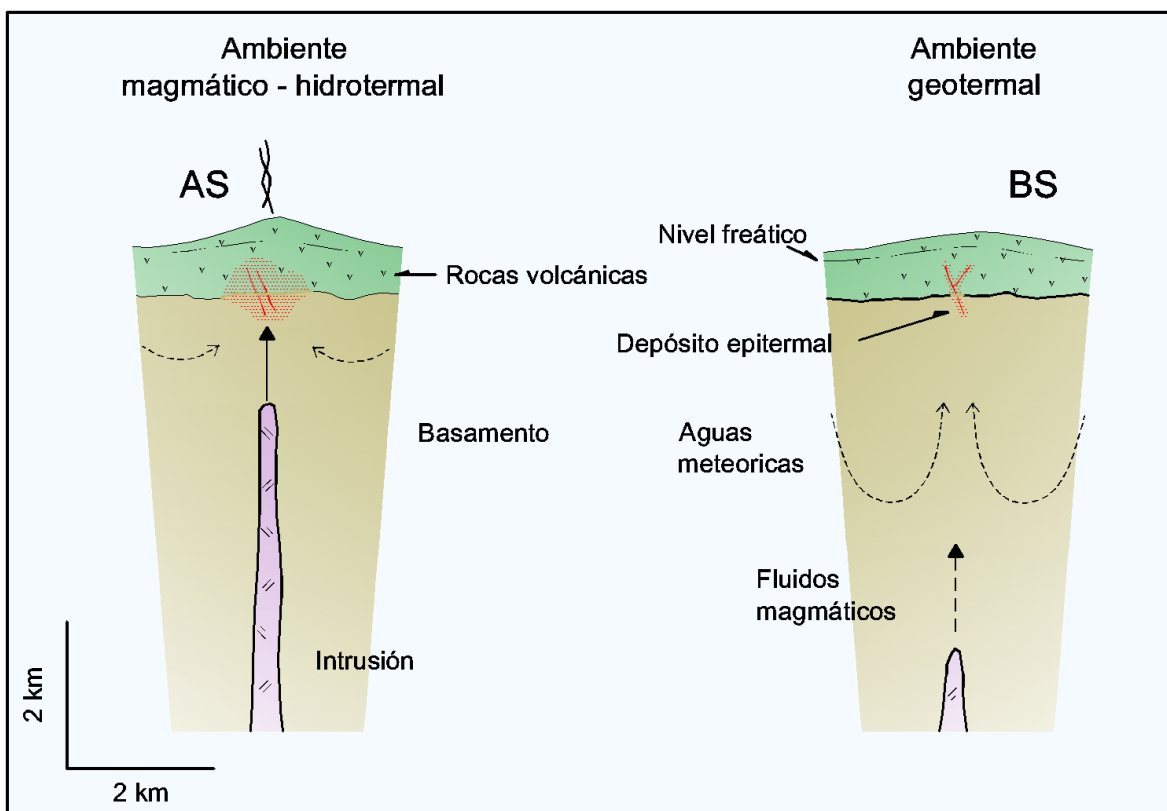


Figura 5 - Modelo conceptual simplificado de ambientes hidrotermales y la relación entre depósitos epitermales, intrusiones magmáticas, circulación de fluidos, rocas volcánicas y basamento (modificado de Simmons y otros, 2005).

Debido a la baja presión y las condiciones hidrostáticas bajo las cuales se forman, los depósitos epitermales muestran una gran variedad de formas y estilos de mineralización (Figura 6), que incluyen vetas, cuerpos de brechas hidrotermales, “stockworks” y diseminaciones o reemplazamientos (Arribas, 1995; Sillitoe, 1999). En los depósitos de BS son dominantes las vetas con stockworks asociados; en los depósitos de AS son dominantes los diseminados con vetas asociadas (Arribas y Hedenquist, 2000). La diversidad de formas refleja la influencia de los controles de mineralización, los cuales representan zonas de

permeabilidad dentro de las partes bajas de los sistemas hidrotermales activos anteriormente (Simon y otros, 2005). La permeabilidad de las rocas determina el flujo de los fluidos y los mecanismos de precipitación del mineral (“boiling” o “mixing”). La roca permeable en los depósitos epitermales puede ser provista estructural, hidrotermal, y/o litológicamente (Sillitoe, 1993a).

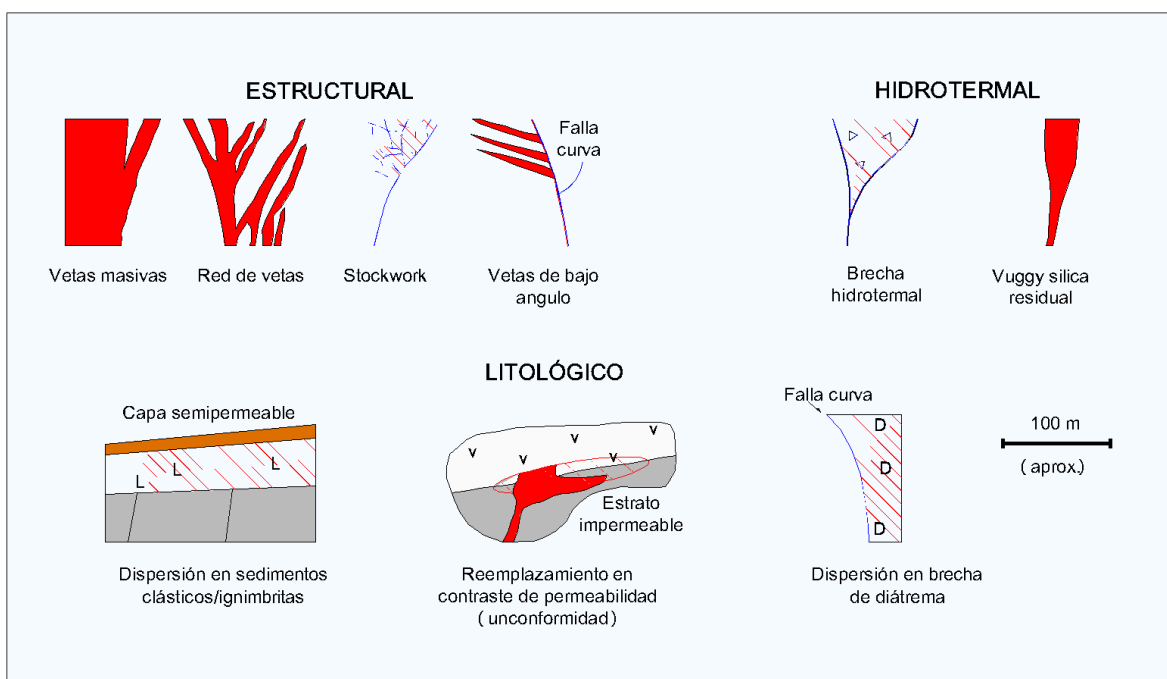


Figura 6 - Estilos y geometría de los depósitos epitermales, ilustran la influencia estructural, hidrotermal y permeabilidad litológica (modificado de Sillitoe, 1993a; y Hedenquist y otros, 1996).

Los depósitos auríferos de BS pueden contener cantidades económicas de Ag y cantidades menores de Pb, Zn y Cu, mientras los de sistemas auríferos de AS a menudo producen cantidades económicas de Cu y algo de Ag.

Las características claves que distinguen a un depósito epitermal son particularmente mineralógicas, con los minerales de ganga y las alteraciones hidrotermales. Los minerales de ganga característicos del estado de AS son: alto contenido de pirita, enargita, luzonita, digenita, calcosita, famatinita, covelita; y una alteración argílica avanzada caracterizada por cuarzo, cuarzo residual (“vuggy”), alunita, pirofilita y caolinita/dickita. (Arribas, 1995; Sillitoe, 1999). Los minerales de ganga característicos del estado de BS son: cuarzo (incluyendo calcedonia), pirita, esfalerita, arsenopirita, pirrotita y loellingita; y una alteración argílica-sericítica caracterizada por cuarzo, adularia, illita y calcita (Tabla 1).

<p><b>PH ácido</b> Alunita, caolinita ( dickita ) pirofilita, sílice residual, cuarzo vuggy</p>	<p><b>Sulfuración intermedia</b> Tennantita, tetrahedrita, hematita-pirita-magnetita, pirita, calcopirita, esfalerita-pirita pobre en Fe</p>	<p><b>PH neutro</b> Cuarzo-adularia±illita, calcita</p>
<p><b>Alta sulfuración</b> Pirita-enargita±luzonita, covelita-digenita, famatinita, oropimente</p>		<p><b>Baja sulfuración</b> Arsenopirita-loellingita-pirrotita, pirrotita, esfalerita-pirita rica en Fe</p>
<p><b>Oxidado</b> Alunita, hematita-magnetita</p>		<p><b>Reducido</b> Magnetita-pirita-pirrotita, clorita-pirita</p>

Tabla 1 - Minerales de diagnóstico de varios estados de pH, estados de sulfuración y oxidación, usados para distinguir ambientes epitermales formadores de mineral (modificado de Einaudi y otros, 2003).

El estado inicial de formación de los depósitos de AS es caracterizado por una extensa lixiviación de las rocas encajonantes por fluidos ácidos con  $\text{pH} < 2$ . La



lixiviación produce sílice residual poroso (>95% SiO<sub>2</sub>) o cuarzo “vuggy” (Stoffregen, 1987). El carácter de los fluidos en los depósitos de AS son en su mayor parte de baja salinidad (1-24% en peso de NaCl eq.); aunque algunos pueden tener alta salinidad hasta casi 50% en peso de NaCl eq. en condiciones oxidadas. En el caso de los de BS son de baja salinidad (1-15% en peso de NaCl eq.), en condiciones reducidas.

Actualmente, los términos alta y baja sulfuración son ampliamente usados para distinguir los dos extremos del estado de sulfuración. Estos términos modernos introducidos por Hedenquist (1987) son resultado de una evolución de la nomenclatura aplicada a sistemas epitermales (Tabla 2) donde estudios más recientes en las variaciones de éstos estilos dirigen a la introducción del término sulfuración intermedia (SI), (Hedenquist y otros, 2000).

NOMENCLATURA			AUTOR
Epitermal			Lindgren, 1911; Buchanan, 1971
Ácido	Alcalino		Sillitoe, 1977
Oro - enargita			Ashley, 1982
		Tipo hot-spring	Giles y Nelson, 1982
Alto azufre	Bajo azufre		Bonham, 1986, 1988
Ácido Sulfato	Adularia - sericita		Hayba y otros 1985; Heald, 1987
Alta sulfuración	Baja sulfuración		Hedenquist, 1987
Alunita - caolinita	Adularia - sericita		Berger y Henley, 1989
	Tipo 1 adularia - sericita	Tipo 2 adularia - sericita	Albino y Margolis, 1991
Alta sulfuración	Alto sulfuro + metal base, baja sulfuración	Bajo sulfuro + metal base, baja sulfuración	Sillitoe, 1989, 1993a
Alta sulfuración	Baja sulfuración		Corbett y Leach, 1998
Alta sulfuración	Sulfuración intermedia	Baja sulfuración	Hedenquist y otros, 2000

Tabla 2 - Nomenclatura moderna aplicada a los depósitos epitermales (modificado de Sillitoe y Hedenquist, 2003).

Los depósitos del subtipo de sulfuración intermedia son estructuralmente muy similares a los de baja sulfuración, ambos conforman el conjunto de epitermales alcalinos según Sillitoe (1977), aunque las características geoquímicas de los fluidos mineralizantes asociados y de las mineralizaciones metálicas en sulfuración intermedia suele guardar una mayor afinidad con los depósitos de alta sulfuración (Einaudi y otros, 2003; Sillitoe y Hedenquist, 2003).

En general, el zoneamiento de la alteración característica de los depósitos de alta sulfuración parte desde un núcleo silíceo constituido de cuarzo poroso, que alberga la parte más importante de la mineralización económica, seguido de alteración argílica avanzada constituida de cuarzo-alunita, caolinita e illita, para terminar en alteración propilítica que incluye la montmorillonita y clorita (Figura 7).

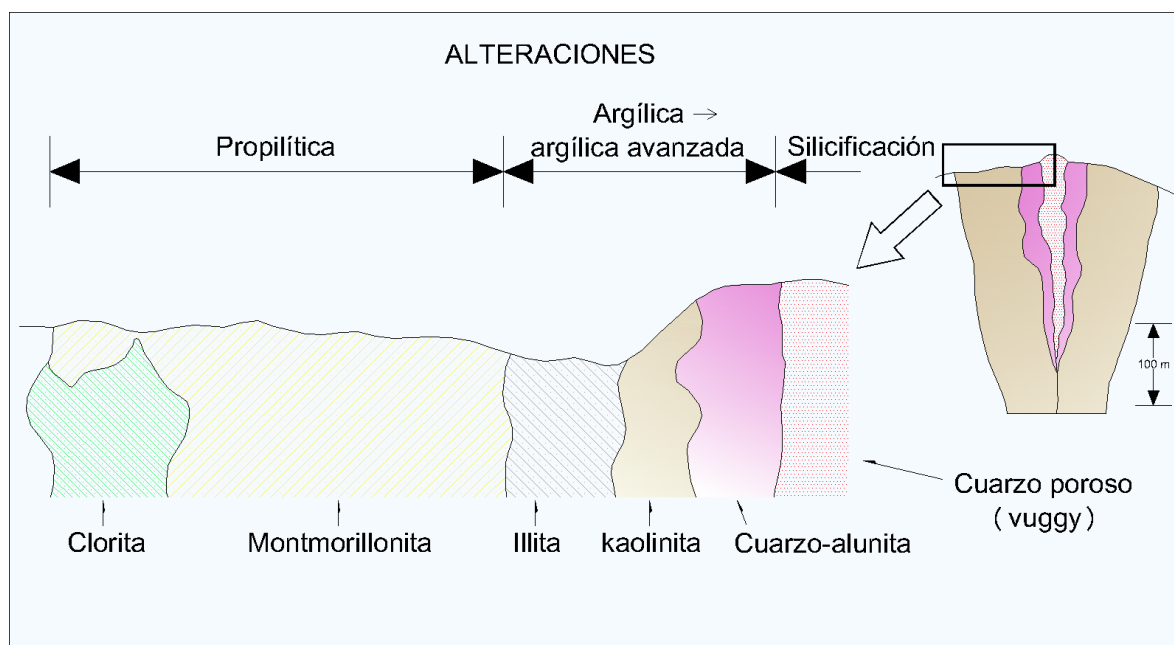


Figura 7 - Zoneamiento típico de alteración para un depósito de alta sulfuración (modificado de Stoffregen, 1987).

Por otro lado, el zoneamiento en los depósitos de baja e intermedia sulfuración, se inicia a partir de una estructura de cuarzo-sericita que contienen las menas metálicas, con el desarrollo de un halo de alteración argílica a sericítica, seguida de alteración argílica avanzada, para terminar con alteración propilítica (Figura 8).

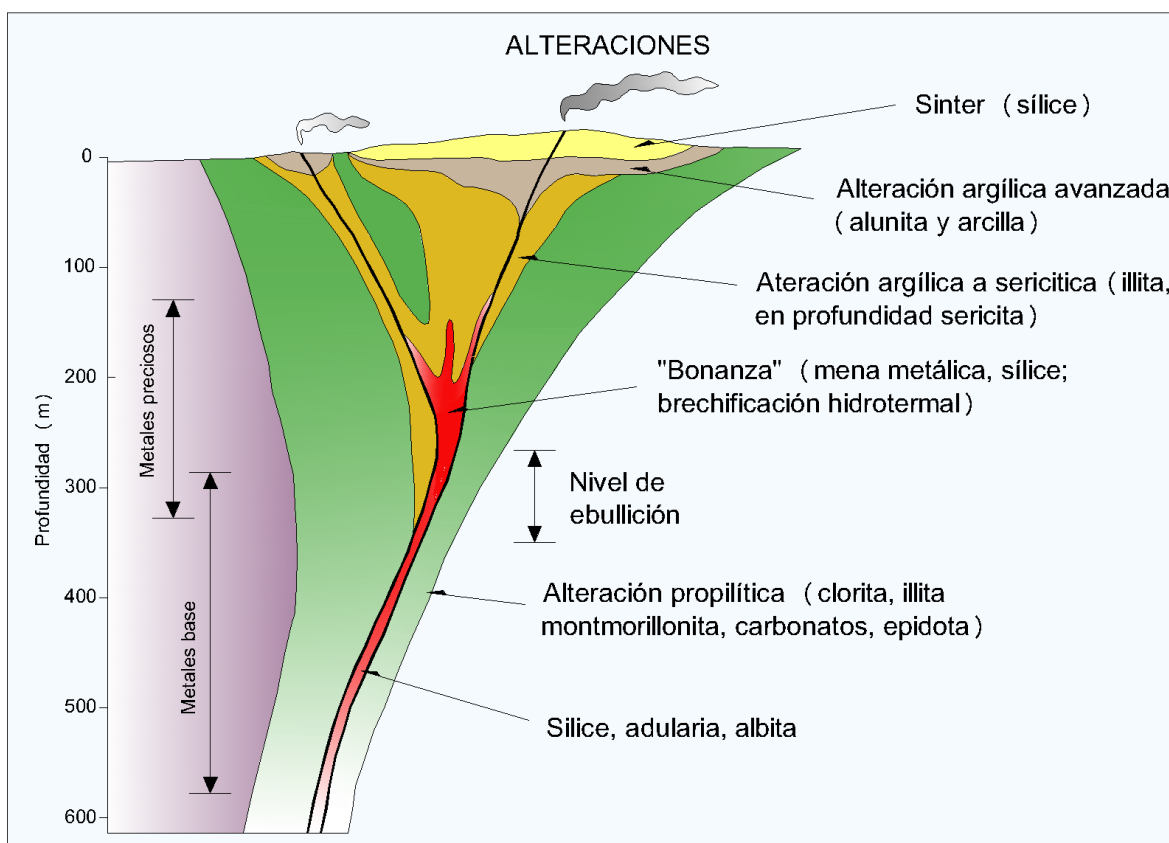


Figura 8 - Zoneamiento típico de alteración para los depósitos de baja e intermedia sulfuración (modificado de Buchanan, 1981).