

## Aspectos de la interacción agua/roca en yacimientos geotérmicos (Los Azufres y Los Humeros) y su relación con el epitermalismo fósil (Taxco y Guanajuato)

**E. González Partida, L.E. González Ruiz, D. Yáñez Dávila, E. Díaz Carreño, M.C. Romero Roja y W. Romero Rojas**

Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Apartado postal 1-742, C.P. 7600, Querétaro, Qro., México. Correos: [edgpa@gmail.com](mailto:edgpa@gmail.com)  
[egp@geociencias.unam.mx](mailto:egp@geociencias.unam.mx)

### Resumen

El campo de Los Azufres, Mich., es el segundo campo geotérmico más grande en operación en México y se caracteriza por una actividad volcánica del Neógeno dominada por lavas basálticas y andesíticas con inyección de domos riolíticos relacionados con una supuesta caldera-graben del sistema de fallas Acambay. Por su parte, el campo de Los Humeros se ubica en la parte oriental del Cinturón Volcánico Mexicano, con una litología compleja que incluye rocas sedimentarias, metamórficas, volcánicas e intrusivas provenientes del periodo Paleozoico al Cuaternario. El sistema volcánico tiene diversas estructuras geológicas siendo la principal la caldera de Los Humeros, con un diámetro de 16 km y con otra caldera menor en su interior (caldera de Los Potreros). Las rocas características del campo son, del basamento a la superficie: caliza, caliza metamórfica y rocas intrusivas, basaltos, andesitas, tobas vítreas, andesitas e ignimbritas, pómez, basaltos y andesitas.

En un sistema geotérmico la reacción de las rocas con el fluido ascendente origina un proceso de alteración hidrotermal que puede ser potásica, argílica, fílica, argilitización avanzada y propilítica. Los factores que determinan la identidad, abundancia y estabilidad de los minerales autigénicos, producto de la acción recíproca entre el fluido geotérmico y la roca, actúan íntimamente y por lo general uno o dos dominan sobre los demás. Estos factores son: temperatura, permeabilidad, mineralogía de la roca primaria, composición del fluido geotérmico, ebullición, presión total y tiempo (duración de la actividad), principalmente. La temperatura es uno de los factores de mayor importancia en la formación de los minerales autigénicos en sistemas geotérmicos activos. En Los Humeros la abundancia de calcosilicatos observados en los niveles superiores del yacimiento concuerda con un pH neutro, pero las zonas productoras profundas presentan un comportamiento típico de fases de vapor sobrecalefactado, conteniendo aguas sulfatadas o ligeramente carbonatadas. En Los Azufres la alteración es preponderantemente propilítica pasando a argílica y argílica avanzada en las descargas, algo que es igualmente característico de los sistemas hidrotermales fósiles (yacimientos epitermales), como los que se encuentran en Taxco, Gro., y en Guanajuato. En este trabajo, que es parte del proyecto 8 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), se discuten igualmente las características de sistemas hidrotermales de sulfuración baja, intermedia y alta.

*Palabras clave:* Alteración hidrotermal, alteración propilítica, argílica, geoquímica, mineralogía, litología.

### Generalidades de la interacción agua-roca

Los sistemas hidrotermales (recientes o fósiles) relacionados a la actividad magmática somera son los principales responsables del gran movimiento de fluidos en la corteza superior y de grandes convecciones de calor hacia la superficie terrestre, llámense campos geotérmicos actuales o sistemas hidrotermales fósiles (Figura 1; todas las figuras al final del texto).

Existe acuerdo general de que la energía térmica que pone en operación a numerosos sistemas hidrotermales proviene de intrusiones someras que pueden alcanzar múltiples estadios, a efecto de sostener la actividad hidrotermal por cientos o hasta miles de años. Así en un sistema geotérmico (al igual que en uno fósil) la reacción de las rocas del yacimiento con el fluido ascendente (interacción agua-roca: IAR) origina un proceso de alteración hidrotermal que puede ser potásica, cárquica-sódica, argílica, fílica, argilitización avanzada y propilítica entre las más importantes.

La alteración hidrotermal consiste en un reemplazamiento químico de los minerales originales de una roca por nuevos minerales, provocado por fluidos hidrotermales que aportan los reactantes químicos y al mismo tiempo remueven los productos en la solución acuosa. Los factores que determinan la identidad, abundancia y estabilidad de los minerales neoformados, producto de la acción recíproca entre el fluido geotérmico y la roca, actúan íntimamente y, por lo general, uno o dos dominan sobre los demás. Estos factores son: temperatura, permeabilidad, mineralogía de la roca primaria, composición del fluido geotérmico, ebullición, presión total y tiempo (duración de la actividad), principalmente.

La temperatura es uno de los factores de mayor importancia en la formación de los minerales neoformados en sistemas geotérmicos activos, y desde el punto de vista práctico las paragénesis encontradas normalmente en los reservorios geotérmicos han sido utilizadas para entender en el subsuelo la distribución de las temperaturas. Se dice así que la aparición de la epidota puede indicar la entrada a la zona productora de un campo, porque al menos asegura una temperatura de unos 220°C, pero se ha prestado poca atención a las descargas hidrotermales, los sínters y su relación con la evolución tiempo-espacio de las sucesiones paragenéticas y sobretodo la conexión con otros factores fisicoquímicos que gobiernan los zoneamientos paragenéticos.

Quienes han estudiado la IAR tanto en sistemas hidrotermales activos como fósiles (Camprubí et al., 1999a,b, 2001a,b,c, 2003a,b,c,d, y 2006; González-Partida, 1981, 1985, 1988a,b, 1989a,b,c, 1990, 1992) han concluido que (ver Figura 1):

- La alteración hidrotermal es producto de una interacción agua/roca, donde los minerales de alteración son el resultado de cambios químicos y mineralógicos en la roca afectada.
- Se implican cambios químicos y termodinámicos del fluido hidrotermal que atraviesa una roca hasta llegar a una “trampa de mena”.
- Una “trampa de mena” es un sitio donde la combinación de condiciones estructurales, de permeabilidad, químicas y físicas son ideales para provocar la precipitación de la carga a partir de un fluido.
- El fluido que llega a la “trampa de mena” no es el mismo que salió de su fuente de origen primario, como por ejemplo una salmuera magmática.
- La interacción fluido/roca en el camino cambia la composición del fluido.
- La roca huésped a lo largo del camino de transporte será un condicionador de los fluidos hidrotermales.
- La interacción agua-roca, si bien depende en gran medida de la composición de roca y del fluido, de la temperatura y de la presión, también depende de la superficie o volumen de roca expuesto al fluido, es decir, la permeabilidad de una roca será un factor determinante.
- La permeabilidad de una roca puede ser visualizada en términos de la razón agua/roca involucrada en una alteración específica.

Este concepto se puede ejemplificar con el paso de un fluido por una veta, fractura, espacio o cualquier

nano-conectividad que genera un halo de alteración desde la veta, fractura o espacio vacío hacia la roca encajonante, con razones de agua/roca progresivamente menores. El mismo efecto se observará en la dirección de avance del fluido a través de la veta.

Es muy importante comprender el proceso de alteración hidrotermal, porque a partir de este conocimiento es posible contar con suficientes evidencias acerca de las características químicas y los orígenes de los fluidos mineralizantes (Figura 1), así como de las condiciones físico-químicas de formación de la mena en yacimientos epitermales. Ciertos datos, como las asociaciones mineralógicas y el comportamiento de las soluciones sólidas, permiten conocer no solamente las condiciones de presión y temperatura de las alteraciones, sino las condiciones de pH y de óxido-reducción del fluido hidrotermal.

Bajo esos antecedentes, y a fin de presentar un consenso sobre la clasificación de alteraciones hidrotermales en sistemas actuales y fósiles, en este trabajo se hace una revisión bibliográfica de lo más reciente que se ha publicado al respecto y que se plasma en la tabla de la Figura 2.

### **Una nueva clasificación de la alteración hidrotermal**

En la Figura 2 se presenta una tabla sintética que resume la clasificación de las alteraciones hidrotermales y que puede marcar una pauta en la unificación de criterios al referirnos a un determinado tipo de alteración y su significado en términos de evolución térmica y acidez de fluidos. Las alteraciones hidrotermales pueden clasificarse de una manera general y en sentido cualitativo, como una función de la relación agua-roca (Giggenbach, 1997, 1984, 1992, 1995 y 1997). En términos rigurosos, esta variable se define exclusivamente para sistemas cerrados y en la generalidad de la dinámica de los ambientes geológicos esta relación fluido/roca pierde precisión, pero se puede usar en un sentido estrictamente cualitativo para discutir los efectos relativos del fluido y la roca en algún proceso hidrotermal.

A continuación se discuten las principales alteraciones hidrotermales propuestas en la tabla mencionada.

#### *Argilitización avanzada*

Paragénesis: Pirofilita, cuarzo, sericita, andalucita, diáspero, corundo, alunita, topacio, turmalina, dumortierita, pirita, hematita ± azufre nativo (cuando es descarga superficial). Ambiente de formación: Alteración intensa que frecuentemente ocurre en la parte superior de los sistemas porfídicos y epitermales. También se presenta alrededor de vetas ricas en pirita que cortan otros tipos de alteración. Un fluido con un pH ligeramente arriba de 2 puede formar alunita junto con minerales del grupo de la sílice en un amplio rango de temperaturas.

Rye et al. (1992), con base en datos isotópicos de azufre y oxígeno, reconocen cuatro ambientes de formación de la alunita. Cabe hacer notar que se pueden inferir las condiciones de formación de la alunita en esos ambientes a partir de la forma cristalina, del ambiente geológico y de la paragénesis.

1) Alunita depositada a partir de aguas de bajo pH calentadas por vapor. Su depósito ocurre en un ambiente superficial por la oxidación de fluidos sulfatados-ácidos (a partir de H<sub>2</sub>S gaseoso) que evolucionan de un sistema hidrotermal que manifiesta ebullición a profundidad. Este tipo de alunita frecuentemente ocurre como cristales seudo-cúbicos de tamaño muy pequeño, a profundidades de 0 m a 1.5 kilómetros, cuando los fluidos sulfatados-ácidos descienden dentro de un sistema hidrotermal en

proceso de extinción, típico de los campos geotérmicos actuales.

2) Alunita supergénica. Se forma como consecuencia de la actividad del ácido sulfúrico que se genera a partir de la lixiviación de sulfuros. Este tipo de alunita presenta pobre cristalinidad y ocurre en cristales muy pequeños de formas seudo-aciculares.

3) Alunita magmática. Formada a partir de fluidos de origen magmático. Ocurre en cristales bien desarrollados de formas tabulares y listonadas que rellenan fracturas, cementan brechas y en fenocristales seudomórficos en drusas. La alunita que se forma a alta temperatura se presenta intercrescida con muscovita bien cristalizada y/o andalucita y puede existir en largos cristales irregulares que definen texturas poikiliticas que incluyen cuarzo y otras fases; también puede ocurrir en cristales euhedrales seudo-rómnicos.

4) Alunita magmática en filones o brechas. Se ha inferido que este tipo de alunita se forma directamente a partir de fluidos ricos en volátiles que ascienden desde una fusión en proceso de cristalización (Rye et al., 1992). En estas condiciones la alunita puede presentarse en cristales prismáticos que se disponen en formas radiales.

#### *Alteración potásica rica en biotita, o de silicato de K, o alteración biotítica*

Paragénesis: Biotita (flogopita)-feldespato potásico (ortoclasa)-magnetita, cuarzo, anhidrita, albata, actinolita, rutilo, apatita, sericitia, clorita, epidota. Ambiente de formación: Generalmente se encuentra en el núcleo de depósitos porfídicos, particularmente aquellos hospedados en intrusiones más máficas como dioritas, monzonitas o granodioritas, o bien, por rocas volcánicas y/o vulcanoclásticas de naturaleza máfica a intermedia. Puede formar una gran zona de alteración periférica en las rocas encajonantes (sin feldespato potásico), más grande que las zonas externas de alteración propíltica.

#### *Alteración sódica o sódico-cálcica*

Paragénesis: Albata, actinolita, clinopiroxeno (diópsida), cuarzo, magnetita, titanita, clorita, epidota, escapolita. Ambiente de formación: Ocurre con poca mineralización en las partes profundas y en algunos casos de manera periférica, de algunos sistemas porfídicos, y hospeda mineralización en depósitos porfídicos asociados con intrusiones alcalinas.

#### *Alteración fílica, filítica o sericítica*

Paragénesis: Sericitia (muscovita-illita), cuarzo, pirita, clorita, hematita, anhidrita. Ambiente de formación: Forma con mucha frecuencia un halo que bordea al núcleo de los depósitos porfídicos; hospeda mineralización importante y puede estar sobrepuerta a la alteración potásica temprana.

#### *Alteración argílica (o argilítica) intermedia o alteración de sericitia-clorita-minerales arcillosos o simplemente alteración argílica*

Paragénesis: Sericitia (illita-esmectita), clorita, caolinita (dickita), montmorillonita, calcita, epidota, pirita. Ambiente de formación: Su distribución por lo general manifiesta un fuerte control estructural y está ampliamente sobrepuerta a otros tipos de alteración (potásica) en numerosos sistemas porfídicos; sin embargo, comúnmente se preservan las texturas originales. El término argílica es frecuentemente utilizado para describir un tipo de alteración destructiva que presenta una mineralogía similar rica en arcillas y que ocurre en y alrededor de estructuras, en las partes superiores de los sistemas porfídicos.

### *Alteración propilítica*

Paragénesis: Clorita, epidota, albita, calcita, actinolita, sericita, minerales arcillosos, pirita. Ambiente de formación: Por lo general forma la zona de alteración más externa, en los niveles intermedios y profundos de los sistemas tipo pórfito. En algunos sistemas esta alteración muestra zoneamiento mineralógico: rica en actinolita en la zona interna que es bordeada por una zona externa rica en epidota. Es muy común en los sistemas geotérmicos actuales y fósiles.

### Agradecimientos

Actividad de análisis bibliográfico de los fenómenos de interacción agua/roca realizada dentro del marco del proyecto 08, CeMIE-Geo 207032 SENER-CONACyT.

### Bibliografía

Camprubí, A., 1999a. Los depósitos epitermales Ag-Au de Temascaltepec (Estado de México), México. Barcelona, España, Universitat de Barcelona, Collecció de Tesis Doctorals Microfitxades, 3528, 252 p.

Camprubí, A., Prol-Ledesma, R.M., Tritlla, J., 1999b. Comments on ‘Metallogenic evolution of convergent margins: selected ore deposit models’ by S.E. Kesler. *Ore Geology Reviews*, 14, pp. 71-76.

Camprubí, A., Canals, À., Cardellach, E., Prol-Ledesma, R.M., Rivera, R., 2001a. The La Guitarra Ag-Au low sulfidation epithermal deposit, Temascaltepec district, Mexico: vein structure, mineralogy, and sulfide-sulfosalt chemistry. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 8, pp. 133-158.

Camprubí, A., Cardellach, E., Canals, À., Lucchini, R., 2001b. The La Guitarra Ag-Au low sulfidation epithermal deposit, Temascaltepec district, Mexico: fluid inclusion and stable isotope data. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 8, pp. 159-185.

Camprubí, A., Tritlla, J., Corona-Esquivel, R., Centeno, E., Terrazas, A., 2001c. The hydrothermal sinter and kaolinite-Au-Ag deposits of Ixtacamaxtitlán (Puebla, Mexico): preliminary research. En Pietrzynski, A. et al. (eds.), *Mineral deposits at the beginning of the 21st century*, Lisse, Holanda, Swets & Zeitlinger Publishers, pp. 711-714.

Camprubí, A., 2003a. Geoquímica de fluidos de los depósitos epitermales del sureste del Distrito de Temascaltepec, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, pp. 107-123.

Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., Carrillo-Chávez, A., 2003b. Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56, pp. 10-18.

Camprubí, A., Ferrari, L., Cosca, M.A., Cardellach, E., Canals, À., 2003c. Ages of epithermal deposits in Mexico: regional significance and links with the evolution of Tertiary volcanism. *Economic Geology*, 98, pp. 1029-1037.

Camprubí, A., Norman, D.I., Chomiak, B.A., 2003d. Evidence for fluid sources by quadrupole mass spectrometry in the La Guitarra Ag-Au epithermal deposit, Temascaltepec district, Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 78-79, pp. 593-599.

Camprubí, A., González-Partida, E., Iriondo, A., Levresse, G., 2006. Mineralogy, fluid characteristics and depositional environment of the Paleocene low-sulfidation epithermal Au-Ag deposits of the El Barqueño district, Jalisco, Mexico. *Economic Geology*, 101.

Corbett, G.J., and Leach, T.M., 1998. Southwest Pacific rim gold–copper systems; structure, alteration and mineralization. *Society of Economic Geologists, Special Publication Series*, 6, 238 p.

Fournier, R.O., 1991. The transition from hydrostatic to greater than hydrostatic fluid pressure in presently active continental hydrothermal systems in crystalline rock. *Geophysical Research Letters*, 18, pp. 955-958.

Gammons, C.H., and Williams-Jones, A.E., 1997. Chemical mobility of gold in the porphyry–epithermal environment. *Economic Geology*, 92, pp. 45-59.

Giggenbach, W.F., 1984. Mass transfer in hydrothermal alteration systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, pp. 2693-2711.

Giggenbach, W.F., 1992. Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. *Economic Geology*, 87, p. 1927.

Giggenbach, W.F., 1995. Composition of magmatic components in hydrothermal fluids. In: *Magmas, Fluids, and Ore Deposits*. J.F.H. Thompson, ed., Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 23, pp. 247-261.

Giggenbach, W.F., 1997. The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. In: Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Wiley, New York, pp. 737-796.

González-Partida, E., 1981. La Province filonienne Au-Ag de Taxco- Guanajuato (Mexique): Thése de Docteur-Ingenieur, CRPG- ENSG, Institute National Polytechnique de Lorraine, 234 p. (Inédita)

González-Partida, E., 1985. Estudio metalogenético de la parte centro-occidental de México. Tesis de Doctorado de Estado. INPL-Escuela de Geología, Nancy, Francia, 370 p. (Inédita)

González-Partida, E., Barragán-Reyes, R.M. y Nieva-Gómez, D., 1988a. Las inclusiones fluidas en Geotermia: una herramienta de la petrología experimental aplicada al pozo Az-44. *Geotermia*, 4-3, pp. 1-14.

González-Partida, E., Barragán-Reyes, R.M., y Nieva-Gómez., D., 1988b. Estudio de los Minerales Opacos en una Sección N-S del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, 4-3, pp. 107-122.

González-Partida, E., Barragán-Reyes, R.M., y Nieva-Gómez, D., 1989a. Estudio detallado de las inclusiones fluidas en el sistema hidrotermal activo del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, 5-1, pp. 126-152.

González-Partida, E., Barragán-Reyes, R.M., y Nieva-Gómez, D., 1989b. El Sistema Cu-Fe-S en el Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, 5-1, p. 107-125.

González-Partida, E., Torres-R., V., y Nieva-G., D., 1989c. Caracterización mineralógica en 10 pozos del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, 6-1, pp. 347-374.

González-Partida, E., Torres-R., V., y Nieva-G., D., 1990. Petrografía y metamorfismo hidrotermal del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. – Comportamiento en función del metamorfismo. *Geotermia*, 6-1, pp. 43-92.

González-Partida, E., Torres-R., V., Nieva-G., D., y Quijano, L., 1992. Comportamiento de las especies sulfuroosas de 4 pozos del Campo Geotérmico de Los Humeros, Pue. *Geotermia*, 8-1, pp. 67-80.

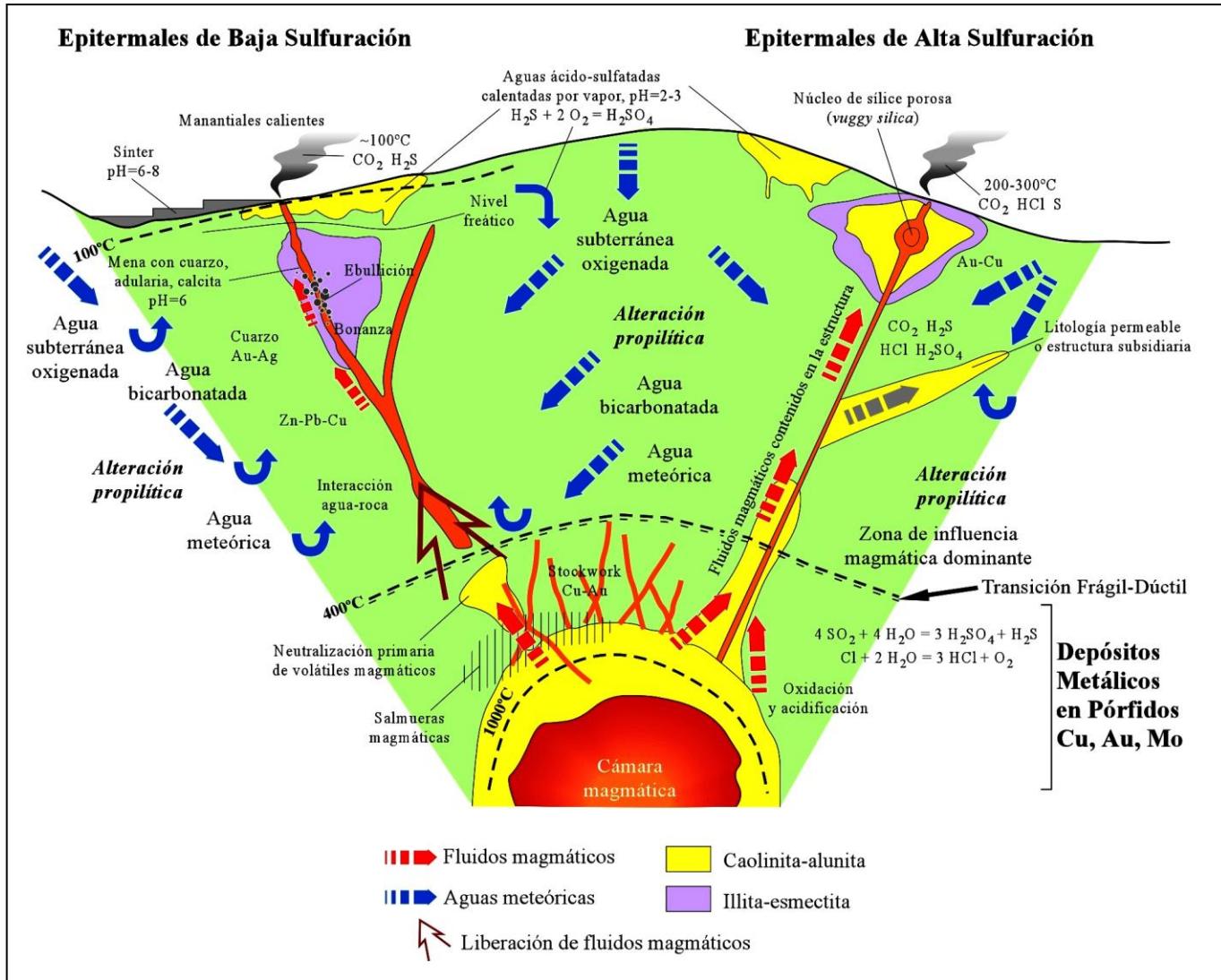
Hedenquist, J.W., and Lowenstern, J.B., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, pp. 519-527.

Nielson, D.L., Moore, J.N., and Heizler, M.T., 1999. Lower limits of hydrothermal circulation in the Tiwi geothermal fluid, Luzon. *Proceeding of the 24<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Standford, California, 7 p.

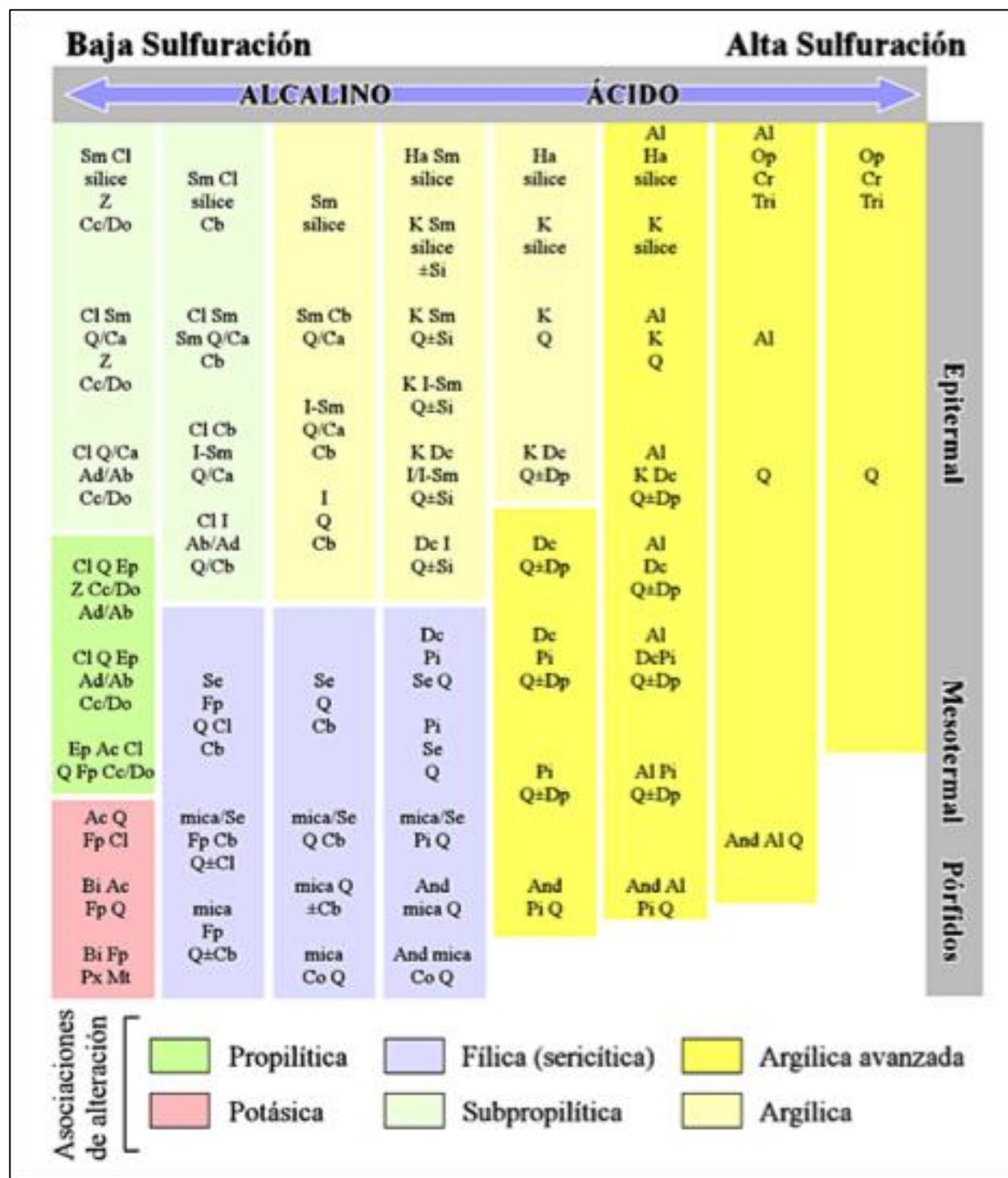
Rye, R.O., Bethke, J.W., and Wasserman, M.D., 1992. The stable isotope geochemistry of acid sulfate alteration. *Economic Geology*, 88, pp. 733-753.

Sillitoe, R.H., 1995. The influence of magmatic–hydrothermal models on exploration strategies for volcano-plutonic arcs. In Thompson, J.F.H. (ed.), *Magmas, Fluids and Ore Deposits*, Ontario, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 23, pp. 511- 525.

(Figuras en páginas siguientes)



**Figura 1.** Esquema comparativo (no a escala) de la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperaturas, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración. Igualmente se muestra su relación con las rocas magmáticas como fuente de calor, fluidos y componentes químicos para estos depósitos, comprendiendo desde una cámara magmática en proceso de enfriamiento, la formación de depósitos metálicos relacionados a pórfidos (cupríferos, auríferos, o molibdeníferos), hasta el ambiente epitermal (modificado de Sillitoe, 1995; con base en los datos de Hedenquist y Lowenstern, 1994; Gammons y Williams-Jones, 1997; Corbett y Leach, 1998). La posición de la transición frágil-dúctil se ha ubicado en temperaturas de ~400°C, y a 5–7 km de profundidad (p.e. Fournier, 1991; Nielson et al., 1999).



**Figura 2.** Mineralogía común de las alteraciones en sistemas hidrotermales según el pH de las soluciones mineralizantes (modificado y simplificado de Corbett y Leach, 1998). Abreviaciones: Ab = albita, Ac = actinolita, Ad = adularia, Al = alunita, And = andalucita, Bi = biotita, Ca = calcedonia, Cb = carbonatos (de Ca, Mg, Mn y/o Fe), Cc = calcita, Cl = clorita, Co = corindón, Cr = cristobalita, Dc = dickita, Di = diáspora, Do = dolomita, Ep = epidota, Fp = feldespatos potásicos, Ha = halloysita, I = illita o illita-esmectita, K = caolinita, Mt = magnetita, Op = ópalo o sílice opalina, Pi = pirofilita, Px = clinopiroxenos, Q = cuarzo, Se = sericita, Si = siderita, Sm = esmectita o esmectita-illita, Tri = tridimita, Z = zeolitas (de menor a mayor temperatura: natrolita, chabazita, mordenita, heulandita, laumontita, wairakita).