

El Depósito de Magnetita de El Laco (Chile): Evidencias de una Evolución Magmático- Hidrotermal

/ FERNANDO TORNOS (1,*), FRANCISCO VELASCO (2)

(1) Instituto Geológico y Minero de España. c/Azafranal 48, 37001 Salamanca (España).

(2) Departamento de Petrología y Mineralogía. Universidad del País Vasco. Leioa (España).

INTRODUCCIÓN.

El depósito de magnetita de El Laco, con más de 500 Mt de magnetita masiva se localiza en el actual eje magmático de los Andes a una altura entre 4800 y 5200 msnm. Está relacionado espacial y cronológicamente con un volcán de andesita datado en 2.0 ± 0.3 Ma (Gardeweg & Ramírez, 1985). La importancia de este depósito estriba en que debido a su carácter sub-actual es el lugar idóneo para discutir la génesis de los depósitos de magnetita-apatito tipo Kiruna y de las mineralizaciones de tipo IOCG, de las que se interpreta que forma un término extremo (Hitzman *et al.*, 1992). Aunque situado a más de 200 km del cinturón de depósitos magnetita-apatito y de tipo IOCG de edad cretácica y situado en la costa del Pacífico (Sillitoe, 2003), los mecanismos genéticos han de ser similares. Actualmente, hay dos modelos para explicar su génesis. La hipótesis hidrotermal defiende que la mineralización es fruto del remplazamiento hidrotermal de la andesita encajante y para ello se apoya en la existencia de una extensa alteración hidrotermal alrededor del cuerpo de magnetita, la existencia de fragmentos de andesita alterada hidrotermalmente dentro de la mineralización, el bajo contenido de Ti en la magnetita y la alta densidad de los magmas de óxidos de hierro, que imposibilitaría su ascenso a la corteza (Rhodes & Oreskes, 1999; Rhodes *et al.*, 1999; Sillitoe & Burrows, 2002). El modelo magmático (Henriquez & Martin, 1978; Naslund *et al.*, 2002; Nyström & Henriquez, 1994) se basa en la existencia de abundantes estructuras y texturas indicativas de que la magnetita cristalizó a partir de un magma. Además, la estructura de la magnetita es muy distinta a la de la andesita encajante y parece poco probable que se haya remplazado la totalidad de una

colada sin dejar restos.

En este resumen se muestran evidencias de que la mineralización de El Laco es compatible con un origen magmático para la magnetita y que la propia cristalización de ese magma es responsable de la intensa alteración hidrotermal existente.

ASPECTOS GEOLÓGICOS GENERALES.

La mineralización de El Laco está formada por magnetita masiva en cuerpos estratoides y discordantes. Los cuerpos estratoides se localizan en el contacto entre dos de las coladas y están formados por magnetita con muy variadas texturas entre las que domina la magnetita masiva con abundantes vesículas y una potencia de hasta unos 10 m. En superficie hay estructuras de tipo *aa* y *pahoehoe* e incluso en corteza de pan. La base incluye brechas caóticas con fragmentos de andesita alterada hidrotermalmente que aquí se interpretan como brechas basales de coladas. En conjunto, estos cuerpos de magnetita guardan grande similitudes morfológicas con la lava de volcanes de tipo hawaiano. Lo que es muy significativo en estas rocas es la presencia de abundantes tubos que cortan a todo el cuerpo desde la base. Estos tubos están parcialmente rellenos de magnetita idiomorfa y clinopiroxeno, a veces con estructura esquelética. En detalle, la magnetita está cubierta por abundante fluorita y rockbridgeita. Tanto en los tubos como en las vesículas hay abundantes minerales tales como tridimita, sanidina, natroalunita, hematites, apatito, rockbridgeita, thorita y fluorita. Lateralmente, estos cuerpos masivos pasan a rocas clásticas en las que se distingue un bandeado grosero y abundantes fragmentos de magnetita y diadochita que se interpretan como bombas volcánicas (Henriquez & Naslund 2004).

La mineralización discordante es texturalmente muy distinta y está formada por magnetita en grandes cristales que se interpretan como debidos a disyunción columnar. El apatito es mucho más abundante que en el otro estilo de mineralización. Aunque forma afloramientos independientes, hay una relación directa entre estos cuerpos y los estratoides.

La alteración hidrotermal ha afectado a grandes zonas alrededor de El Laco y todavía hay una cierta alteración fumarólica. La andesita, principalmente la de la base, muestra una alteración con clinopiroxeno, escapolita, cuarzo y feldespato K residual remplazada por otra dominante con smectita, pirofilita, caolinita, natroalunita, jarosita, cuarzo, yeso, florencita y azufre nativo. Ésta es muy similar a la alteración argilítica avanzada que se observa en los depósitos de oro de alta sulfidación formados sub-actualmente a altitudes equivalentes.

La geoquímica existente muestra que la magnetita de la zona mineralizada tiene valores de $\delta^{18}O$ entre 3.5 y 5.4‰. Los estudios de inclusiones fluidas (Broman *et al.*, 1999) indican que el piroxeno en la base de la magnetita estratoide tiene inclusiones muy hipersalinas que homogeneizan entre 710 y 840°C mientras que en el apatito éstas son acuosas y con salinidades (0-59 %NaCl eq.) y temperaturas de homogeneización (250-350°C) muy variables.

LA ANDESITA ENCAJANTE.

La andesita encajante de la mineralización incluye fenocristales de plagioclasa (an₃₉₋₈₀), augita y enstatita en una matriz microcristalina de vidrio y microlitos de plagioclasa. Esporádicamente hay fenocristales de magnesiohastingsita blindada dentro de

palabras clave: Magnetita-apatito, Tipo Kiruna, Chile, Inclusiones vítreas, Geoquímica, Vulcanismo, Sistema magmático-hidrotermal

key words: Magnetite-apatite, Kiruna type, Chile, Melt inclusions, Geochemistry, Volcanism, Magmatic-hydrothermal system

magnetita. La magnetita rica en Ti es un mineral muy abundante en estas rocas.

No hay diferencias petrográficas geoquímicas apreciables entre las rocas de techo y muro. Los fenocristales tienen abundantes inclusiones vítreas. En el ortopiroxeno están formadas por vidrio, una burbuja de retracción y proporciones variables de magnetita rica en Ti. Son frecuentes los cristales de anhidrita y apatito. En la plagioclasa estas inclusiones coexisten con otras de vidrio pardo con texturas de devitrificación sin magnetita. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de la andesita varían entre 7.2 y 8.3‰.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

La presencia de inclusiones vítreas con diversas proporciones de magnetita dentro de los fenocristales de ortopiroxeno sugiere que estos minerales cristalizaron en presencia de una fase inmiscible de óxido de hierro y que ésta se separó durante la cristalización de los fenocristales de plagioclasa. La discrepancia entre los contenidos en Ti de la magnetita en la andesita (9-11 % TiO_2) y en la mineralización (<800 $\mu\text{g/g}$), uno de los argumentos clave para la hipótesis hidrotermal, es interpretada como debida al diferente comportamiento del Ti en los sistemas Fe-O-silicato y Fe-S-O-silicato. Tal como ha sido discutido (Laroque et al., 2000; Naldrett, 1969) en ausencia de S el Ti se enriquece en el magma oxidado inmiscible mientras que en presencia de S el Ti se fracciona en la fase silicatada. La presencia de anhidrita en las inclusiones vítreas sugiere que el sistema estaba saturado en azufre oxidado, tal como ocurre en el adyacente volcán Láscar, donde la anhidrita es estable (Gardeweg et al., 1998). La magnetita tiene pequeñas inclusiones de pirita y pirrotita, indicando que quizás el hierro se exsolvió como un magma sulfurado y que posteriormente se oxidó durante la degasificación del sistema (Laroque et al., 2000). Otro argumento a favor de un origen magmático es la composición isotópica del oxígeno. La comparación entre los valores de la magnetita y la andesita sugiere temperaturas medias del orden de 1180°C, compatibles con un origen magmático.

Con los datos existentes, se propone un modelo en el que la intrusión de un

magma de óxido de hierro inmiscible de la andesita adyacente en una cámara magmática profunda produce una intensa alteración hidrotermal. La presencia de minerales saturados en agua y de magnetita vesicular sugiere que el sistema estaba saturado en fluido. Este magma debía de ser extremadamente poco viscoso y la elevada proporción de fundentes tales como el P y el F facilitó su ascenso con la andesita, probablemente en una pequeña zona extensional durante una deformación fundamentalmente transpresiva. Si su comportamiento era similar al de los magmas silicatados, el descenso de la presión facilitó la "ebullición primaria" en el sentido de (Burnham, 1979) y exsolución gradual de fluidos acuosos fraccionados en el fundido enriquecido en óxidos de hierro. La inmiscibilidad por debajo de la solvus del sistema $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ a bajas presiones, probablemente ampliado por la presencia de P y F, sería en forma de una muy pequeña proporción de un fluido hipersalino - del que quedan pocos restos - y una elevada proporción de vapor atrapado en el apatito. Este vapor, en el que se fraccionan los volátiles, se separaría rápidamente del magma y al ascender reaccionaría con el agua nival dando lugar a un fluido extremadamente ácido y la alteración argilítica avanzada que se observa relacionada con la mineralización.

En resumen, parece que las características geológicas y geoquímicas del depósito de El Laco son compatibles con un origen magmático y que la alteración hidrotermal observada es debida simplemente a la exsolución de un fluido hidrotermal del magma durante su ascenso.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se enmarca en el proyecto MICINN-FEDER BTE2006-0378. Nos gustaría agradecer a la Compañía Minera del Pacífico, especialmente a Mario Rojo y Vasco Larrazábal por facilitar el trabajo y a T. Bissig, T. Alva, C.M. Tomé, H. Lledó y E. Campos por su ayuda en el campo.

REFERENCIAS.

Broman, C., Nyström, J.O., Henriquez, F., Elfman, M. (1999): Fluid inclusions in magnetite-apatite ore from a cooling magmatic system at El Laco, Chile. *GFF*, **121**, 253-267.

- Burnham, C.W. (1979): *Magmas and hydrothermal systems*. En: Barnes H.L. (ed) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley, New York, pp 71-132.
- Gardeweg, M. & Ramírez, C.F. (1985): Upper Cenozoic Volcanism of Northern Chile: characteristics, age and distribution. *Final Symposium of Project IGCP 120 "Magmatic Evolution of the Andes"*. Santiago, Chile, pp 93-96.
- , Sparks, R.S.J., Matthews, S.J. (1998). *Evolution of the Lascar Volcano, Northern Chile*. *Journal Geological Society*, **155**, 89-104.
- Henriquez, F. & Martin, R.F. (1978). *Crystal growth textures in magnetite flows and feeder dykes, El Laco, Chile*. *Canadian Mineralogist*, **16**, 581-589.
- & Naslund, H.R. (2004) *El Laco. Field Trip. IAVCEI General Assembly*.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T. (1992): Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, **58**, 241-287.
- Laroque, A.C.L., Stimac, J.A., Keith, J.D., Humnicki, M.A.E. (2000): Evidence for open-system behavior in immiscible Fe-S-O liquids in silicate magmas: Implications for contributions of metals and sulfur to ore-forming fluids. *Canadian Mineralogist*, **38**, 1233-1249.
- Naldrett, A.J. (1969). A portion of the system Fe-S-O between 900 and 1080°C and its application to sulfide ore magmas. *Journal Petrology*, **10**, 171-201.
- Naslund, H.R., Henriquez, F., Vivillo, W., Dobbs, F.M. (2002): Magmatic iron ores and associated mineralisation; examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera. En: Porter T.M. (ed) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, vol. 2. PGC Publishing, Adelaide.
- Nyström, J.O. & Henriquez, F. (1994): Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology*, **89**, 820-839.
- Rhodes, A.L. & Oreskes, N. (1999): Oxygen isotope composition of magnetite deposits at El Laco, Chile: Evidence of formation from isotopically heavy fluids. En: Skinner B.J. (ed) *Economic Geology Special Publication*, **7**, 333-351.
- , -, Sheets, S. (1999): *Geology and REE geochemistry of the magnetite deposits at El Laco, Chile*. En: Skinner B.J. (ed) *Economic Geology Special Publication*, **7**, 299-332.
- Sillitoe, R.H. (2003): Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, **38**, 787-812.
- & Burrows, D.R. (2002): New field evidence on the origin on the El Laco magnetite deposit, Northern Chile. *Economic Geology*, **97**, 1101-1109.