



# Génesis de los depósitos de magnetita-(apatito). Geología y geoquímica isotópica de los depósitos de la Cordillera Costera de los Andes

Fernando Tornos (1, 3\*), Francisco Velasco (2), John M. Hanchar (3)

(1) Instituto de Geociencias (IGEO, CSIC-UCM), 28040, Madrid (España)

(2)Departamento de Petrología y Mineralogía. Universidad del País Vasco. 48940 Leioa (España)

(3)Departament of EarthSciences. Memorial University of Newfoundland, NL A1B 3X5, Canada.

corresponding author: f.tornos@csic.es

Palabras Clave: magnetita-apatito, Chile, isotopos | Key Words: magnetite-apatite, Chile, isotopes

## INTRODUCCIÓN

Los depósitos de magnetita-apatito (MtAp), y de óxidos de hierro-cobre-(oro) (IOCG) que generalmente se interpretan como parte de un mismo grupo, son quizás de los tipos de mineralización más enigmáticos y controvertidos. La Cordillera de la Costa de los Andes, en Chile y Perú, y a lo largo de más 1200 km, incluye uno de los cinturones más modernos de mineralizaciones de este tipo y es quizás el único lugar del mundo donde ambas mineralizaciones coexisten. Después de más de 25 años de su definición por Hitzman et al. (1992), todavía no hay un modelo genético ampliamente aceptado para estos estilos, encontrándose en la literatura muy diversas interpretaciones que tratan de explicar su origen.

## GEOLOGÍA DE LOS DEPÓSITOS DE MAGNETITA-(APATITO)

Los depósitos de magnetita-(apatito) se localizan en el arco magmático más occidental y antiguo del orógeno andino, en una estrecha franja de unos 30 km de anchura. La mineralización se encuentra siempre en rocas plutónicas y volcánicas calco-alcalinas intermedias y de una geoquímica primitiva de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior, que están relacionados con un importante Large Igneous Province ligada a la extensión y apertura del Atlántico. La andesita forma grandes coladas, dominantemente subaéreas, tabulares con una potencia total de hasta 10 km y enraizadas en el vulcanismo fisural que evoluciona durante la extensión a condiciones marinas someras (Lucassen et al. 2006; Rossel et al. 2013). Casi todos los depósitos se encuentran estrictamente en la traza del Sistema de Fallas de Atacama, una gran estructura transcrustal y paralela al arco y que ha acomodado la mayor parte de la componente de desgarre ligada a la zona de subducción

desde el Mesozoico. En detalle, los depósitos de magnetita-(apatito) siempre rellenan estructuras abiertas en zonas de *pull-apart*, de giro y corte de estructuras, o *splays* tectónicos. Su nivel de emplazamiento es muy variado y va desde cuerpos mesozonales encajados en los plutones de diorita a cuerpos en la superficie encajados en las rocas volcanoclásticas submarinas o subaéreas, que sugiere que se emplazaron en un intervalo vertical de, al menos, 10 km.

En detalle, la mineralización presenta una marcada zonación vertical. Los cuerpos más profundos, encajados en el basamento o en la zona apical de los plutones de diorita, se encuentran como venas de hasta 30 m de potencia y tiene poca alteración hidrotermal asociada. Los encajados en rocas volcánicas están dominados por cuerpos lentejonares de magnetita masiva con poco fluorapatito de hasta 60 m de potencia que tienen en los bordes una roca compuesta por cristales subidiomorfos y hasta decimétricos de actinolita y apatito con texturas pegmatíticas. Estas rocas presentan un contacto neto con la andesita de caja que muestra una intensa alteración hidrotermal a adularia/albita, actinolita, magnetita, escapolita y epidota (alteración alcalinocálcica) y que tiene, en las cercanías de la mineralización masiva, un stockwork de venas de magnetita. Los sulfuros son siempre muy accesorios. Estos cuerpos evolucionan verticalmente a unas muy rocas características formadas por grandes cristales de fluorapatito (hasta 60 cm) y actinolita con crecimiento unidireccional en una matriz de magnetita, también mostrando estructuras típicas de las pegmatitas. Por encima de estas rocas hay lentejones de hematites masiva, venas de apatito-actinolita-(ilmenita) y grandes cuerpos de brecha con fragmentos de andesita de caja soportados por fluorapatito. A diferencia de otras zonas de los Andes, hay pocos cuerpos estratoides de magnetita depositados en la superficie.

#### EVIDENCIAS PARA UN ORIGEN MAGMATICO

Se han propuesto diversos modelos para las mineralizaciones de magnetita-(apatito), que incluyen hipótesis volcanosedimentarias, cristalización a partir de magmas enriquecidos en hierro, cristalización de magnetita fundida, skarns, coalescencia de fenocristales de magnetita de la propia andesita y remplazamientos de la andesita por fluidos magmático-hidrotermales y connatos. Las evidencias geológicas y geoquímicas sugieren que estas rocas son producto de la cristalización de unos magmas oxidados enriquecidos en Fe, Ca, Mg, P, y Ti y empobrecidos en Si, Al, Na y Ca. Estas evidencias incluyen: (a) las relaciones geológicas de la mineralización, que tiene estructuras típicas de rocas volcánicas y/o de pegmatitas formadas en la transición magmático-hidrotermal (Naslund et al. 2002; Tornos et al. 2017); (b) la presencia de inclusiones vítreas en el apatito y en la andesita encajante y que son coherentes con la separación de un magma enriquecido en Fe con uno de composición riolítica (Kamenetsky et al. 2013; Velasco et al. 2016); (c) los datos experimentales que apoyan la existencia de estos magmas (Hou et al. 2018); y (d) la abierta contradicción entre las evidencias geoquímicas y los modelos que involucran fluidos hidrotermales equilibrados con una andesita.

La cristalización de estos magmas comenzaría con la magnetita, siendo las rocas de apatito-actinolita los términos más evolucionados. La cristalización de la magnetita en un sistema progresivamente más somero sería responsable de la saturación del sistema en agua y la exsolución de fluidos por ebullición primaria y secundaria. Estos fluidos, por encima de unos 2 kb lo serían en fases de alta y baja densidad, con el vapor incrementando su proporción hacia la superficie, y donde entre 100 y 800°C sería la única fase fluida acompañada de un magma salino. La presencia de mushketovita temprana y de anhidrita, indican que estos magmas eran muy oxidados, algo que inhibe la desproporcionación del azufre y la formación de cantidades significativas de sulfuros.

Los fluidos hidrotermales exsueltos en ambientes mesoy epizonales reaccionarían con la roca de caja para dar las aureolas de alteración alcalino-cálcica.

# GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

Las relaciones Sr-Nd de la mineralización ( ${}^{87}$ Sr/ ${}^{86}$ Sr<sub>130</sub>, 0.7093-0.7097,  $\epsilon$ Nd<sub>130</sub> +3.9 a +8.6) son marcadamente distintas a la de las rocas ígneas del arco mesozoico (Parada et al. 1999; Lucassen et al. 2006; Rossel et al. 2013). En detalle, reflejan la mezcla de unos magmas más primitivos que el magmatismo intermedio asociado, con Sr-Nd derivados de otra fuente también primitiva rica en  ${}^{87}$ Sr y que no puede ser agua marina contemporánea. Por ello, proponemos que el origen de

estos magmas ricos en hierro es profundo y probablemente motivado por la contaminación de la cuña del manto por fluidos derivados de la deshidratación de la placa subducida.

Este trabajo ha sido financiado por los proyecto CGL2014-55949R y RTI2018-099157-A-I00, y una NERC Discovery Grant (Canadá).

# REFERENCIAS

- 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, **27**, 241-287.
- Hou, T., Charlier, B., Holtz, F., Veksler, I., Zhang, Z., Thomas, R., Namur, O. (2018). Immiscible hydrous Fe–Ca–P melt and the origin of iron oxide-apatite ore deposits. Nature Communications, 9, 1415.
- Kamenetsky, V.S., Charlier, B., Zhitova, L., Sharygin, V., Davidson, P., Feig, S. (2013). Magma chamber–scale liquid immiscibility in the Siberian Traps represented by melt pools in native iron. Geology, **41**, 1091-1094.
- Lucassen, F., Kramer, W., Bartsch, V., Wilke, H., Franz, G., Romer, R.L., Dulski, P. (2006). Nd, Pb, and Sr isotope composition of juvenile magmatism in the Mesozoic large magmatic province of northern Chile (18-27°S): indications for a uniform subarc mantle. Contrib Mineral Petrol, **152**, 571-589.
- Naslund, H.R., Henriquez, F., Vivallo, W., Dobbs, F.M. (2002). Magmatic iron ores and associated mineralisation; examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera In: Porter TM (ed) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, vol. 2. PGC Publishing, Adelaide, pp. 207-226.
- Parada, M.A., Nÿstrom, J.O., Levi, B. (1999). Multiple sources for the Coastal Batholith of central Chile (31–34°): geochemical and Sr–Nd isotopic evidence and tectonic implications. Lithos, **46**, 505-521.
- Rossel, P., Oliveros, V., Ducea, M.N., Charrier, R., Scaillet, S., Retamal, L., Figueroa, O. (2013). The Early Andean subduction system as an analog to island arcs: Evidence from across-arc geochemical variations in northern Chile.Lithos, **179**, 211-230.
- Tornos, F., Velasco, F., Hanchar, J.M. (2017). The magmatic to magmatic-hydrothermal evolution of the El Laco deposit (Chile) and its implications for the genesis of magnetite-apatite deposits. Economic Geology, **112**, 1595-1628.
- Velasco, F., Tornos, F., Hanchar, J.M. (2016).
  Immiscible iron- and silica-rich melts and magnetite geochemistry at the El Laco volcano (northern Chile):
  Evidence for a magmatic origin for the magnetite deposits. Ore Geology Reviews, **79**, 346-366.