

Origen de las Pegmatitas de Magnetita-Apatito de la Mina Carmen del Fierro (Atacama, Chile)

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

(1) Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad del País Vasco. Barrio Sarriena s/n. 48940 Lejona (Vizcaya)
(2) Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid, España

INTRODUCCION.

El "Cinturón Ferrífero" de los Andes, con más de 600 km largo y 25 km ancho, se extiende paralelamente a la costa del Pacífico siguiendo el Sistema de Fallas de Atacama (SFA). Lo forman importantes yacimientos de tipo IOCG (Manto Verde, Candelaria, Punta del Cobre, etc) y abundantes yacimientos de magnetita/apatito de tipo Kiruna, muchos de ellos con reservas superiores a 100 Mt (Romeral, Algarrobo, Cerro Imán, Carmen, etc). El origen de estos yacimientos ha dado lugar a una importante controversia. Unos autores abogan por teorías hidrotermales o de tipo skarn (Sillitoe, 2003) mientras otros han propuesto un origen magmático (Nystrom and Henriquez, 1994; Naslund et al., 2004). En este último caso, la magnetita-apatito procedería de la cristalización de un fundido inmisible separado de un magma parental silicatado.

En este estudio se presenta información geológica y geoquímica que apoya un origen magmático. Sin embargo, esta interpretación no excluye la existencia de actividad hidrotermal, subsecuente al evento magmático que estaría relacionada con el origen de los yacimientos de hematites-magnetita IOCG.

GEOLOGIA Y METALOGENIA.

Los yacimientos de magnetita-apatito con actinolita se encuentran siempre en la proximidad de intrusiones dioríticas con morfologías muy variadas (masas irregulares, venas, venillas y disseminaciones). Su emplazamiento se considera contemporáneo con el de las rocas andesíticas de edad Jurásica o Cretácico inferior, ya que se muestran afectadas, por la alteración hidrotermal que dió lugar a la anfibolitización y a la alteración argílica y silicificación. El

yacimiento de Carmen del Fierro, explotado para hierro y fosfatos entre 1960 y 1980 (Henriquez et al., 1991) consiste en una masa irregular de 50x500m de dirección este-oeste. Su orientación y morfología son compatibles con un emplazamiento en una estructura pull-apart, formada en relación al movimiento sinistral de desgarre durante las primeras etapas de actividad del SFA (Cembrano et al., 2005). El yacimiento encaja en rocas andesíticas de la Formación Negra, que incluye lavas masivas cortadas por diques microdioríticos y andesíticos. Las relaciones entre las rocas y la mineralización sugieren una evolución compleja, asociada a la actividad intrusiva subvolcánica. Las rocas encajantes se encuentran afectadas por el metamorfismo inducido por una intrusión diorítica perteneciente al plutón de Sierra Aspera (131.3±0.4 Ma, Gelsch et al., 2005). Las dataciones de las venas de magnetita-apatito (Gelsch et al., 2005) han demostrado que la mineralización es contemporánea, dentro del margen de error, con la edad de la diorita y la aparición de actividad en la Falla de Atacama (SFA).

La textura y distribución de los minerales y su localización en el margen de la intrusión sugieren un origen pegmatítico. Se observan grandes cristales de apatito creciendo perpendicularmente a los contactos, con los intersticios rellenos de magnetita y cristales dms de actinolita arborescente. Estas morfologías de tipo stockscheider (Fig. 1) son muy frecuentes en los campos pegmatíticos y han sido descritas para magmas muy evolucionados. La mineralización localmente desarrolla texturas bandeadas iguales a las descritas en Kiruna por Frietsch (1978), interpretadas como de origen magmático-hidrotermal, formadas por procesos de exsolución rítmica durante

la cristalización de magmas saturados en agua.

En Carmen del Fierro se distinguen dos generaciones de apatito (Treloar and Colley, 1996): (i) La primera, compuesta por fluor-apatito con abundantes inclusiones de "vidrio" y fluidos de composición compleja, es contemporánea con la formación de la magnetita más temprana (magnetita pobre en Ti y rica en V) y actinolita. (ii) En una segunda se formó cloro-apatito, y en menor medida carbonato-apatito, en un ambiente con predominio hidrotermal (lavado de F, REE y aporte de Cl, SO₄ y CO₃). En esta segunda etapa se desarrolló la monacita (abundantes microinclusiones automorfas) como resultado de la exsolución del exceso del contenido en REE del fluor-apatito. Esta etapa va acompañada de magnetita de grano fino, localmente reemplazada por hematites de alta temperatura. La presencia de pequeños granos de ilmenita (ilmenita/pirofanita s.s.) son consistentes con condiciones dominadas por una fO₂ relativamente alta (Sasaki et al., 2003) que excluye la presencia de sulfuros (en la mineralización están ausentes o son muy escasos los granos de piritita y/o calcopiritita). En algunas cavidades localizadas a núcleo de los cuerpos pegmatíticos (miarolíticas?) aparece carbonato-apatito y calcita muy tardía, variablemente transformada a yeso.

INCLUSIONES FLUIDAS Y VITREAS EN APATITO.

Los análisis petrográficos del fluor-apatito revelan una primera asociación de inclusiones que interpretamos como vítreas; en la actualidad se encuentran parcialmente recrystalizadas. Incluyen 2 ó 3 cristales de silicatos, magnetita, vidrio, y una fase líquido/gaseosa subordinada. Su morfología es muy variada (tubular a capilar, ovoide o

palabras clave: Magnetita-apatito, Tipo Kiruna, Inclusiones vítreas y fluidas, Mineralogía, Sistema magmático-hidrotermal, Chile

key words: Magnetita-apatito, Kiruna type, Melt and fluid inclusions, Mineralogy, Magmatic-hydrothermal system, Chile



fig 1. Cristales decimétricos de fluor-apatito y agregados arborescentes de actinolita en una matriz de magnetita con crecimiento unidireccional (stockscheider) respecto a los contactos (mina Carmen del Fierro, Atacama, norte de Chile).

irregular, mostrando típicas formas necking-down o hour-glass. Su contenido en volátiles es muy variable. Los mapas de rayos-X, espectros Raman, SEM-EDX y análisis microsonda muestran la existencia de tres composiciones extremas: sílice casi pura (vidrio con formas redondeadas), fases silicatadas con formas tabulares (anfíboles, mica-K, silicatos no identificados, vidrio recristalizado) y magnetita (diminutos cristales ovoides). Los silicatos (Si-Al-Mg-Na-K) ocupan un volumen muy variable en cada inclusión (entre 10 y 70%). Su composición química sugiere la coexistencia de un magma silicatado ácido, inmiscible con un fundido de magnetita-apatito. Es, por tanto, poco probable que estos silicatos representen un precipitado a partir de un fluido acuoso capaz de formarse a temperaturas magmáticas. Lo más probable es que representen restos de un fundido silicatado atrapado sincrónicamente con un fluido acuoso inmiscible. Por otro lado, las inclusiones redondeadas de magnetita podrían interpretarse como restos de un fundido inmiscible rico en óxidos de hierro y fósforo (iron-rich melt inclusions).

Respecto a las escasas inclusiones fluidas que aparecen en el fluor-apatito, hemos encontrado una familia de "primarias" hipersalinas con burbuja de gas y minúsculos cristales-hijo de magnetita (casi siempre transformados a hematites). Las medidas microtermométricas realizadas por Bonson (1998) señalaron la presencia de fluidos con salinidades de 15 a >30%wt NaCl eq. y temperaturas de homogenización entre 150 y 350°C. Sin embargo, el estudio de las inclusiones primarias ricas en gas, muestra el predominio de

una salmuera rica en $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ con temperaturas de homogenización superiores a 360°C. Estas inclusiones caracterizan probablemente a los fluidos hidrotermales responsables de la removilización y alteración de los minerales primarios.

GEOQUIMICA ISOTÓPICA.

Los análisis de Sr y Nd del fluor-apatito ofrecen valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ entre 0.7037 y 0.7038 y de ϵNd_i entre +6.6 y +7.1, calculados para 130Ma (la edad de formación del yacimiento según Gelcich et al., 2005). Estos valores son similares a los de la diorita encajante y consistentes con una derivación juvenil con poca o ninguna influencia cortical. La geoquímica de isótopos estables, basada en el $\delta^{18}\text{O}$ (actinolita) con 6.0-7.2‰ y $\delta^{18}\text{O}$ (magnetita) con 0.4-3.7‰, sugieren temperaturas de equilibrio isotópico de alrededor de 600°C, en equilibrio con fluidos de $\delta^{18}\text{O}$ de ca. +10‰. Estos resultados son compatibles con las condiciones magmático-hidrotermales propuestas para la mineralización más temprana de magnetita-apatito y sugieren un origen profundo y magmático, al menos durante la primera etapa del depósito.

DISCUSION Y CONCLUSIONES.

La presencia de diferentes tipos de inclusiones y las texturas indican que las menas cristalizaron directamente a partir de fundidos ricos en fluidos, Fe y P, exsuetos en un magma parental silicatado. Esta conclusión es consistente con la interpretación de las estructuras observadas en el campo e indican que la mineralización se formó en un amplio espectro de condiciones que se extienden desde un ambiente pegmatítico-hidrotermal a otro hidrotermal de más baja temperatura. Esta variación presumiblemente señala la evolución que han seguido los fluidos durante los procesos de cristalización. Por tanto, el cambio en la composición de las inclusiones se puede tomar como evidencia de la existencia de magmas inmiscibles de composición heterogénea. Por el contrario, la presencia de inclusiones acuosas relativamente homogéneas, puede ser interpretada como el mejor registro de los aportes tardíos de fluidos a temperaturas por encima de 360°C. El resto de inclusiones acuosas, con bajas temperaturas de

homogenización y relativamente altas salinidades, confirma la circulación tardía de fluidos acuosos mucho más fríos. Es muy probable que estos últimos estén relacionados con la formación de los yacimientos de hematites IOCG ricos en cobre tan abundantes en la región (mina Carmen del Cobre).

AGRADECIMIENTOS.

Este estudio se enmarca dentro del proyecto MICINN-FEDER BTE2006-0378. Agradecemos a V. Herrera y D. Morata su ayuda en los trabajos de campo.

REFERENCIAS.

- Bonson, CG. (1998): *Fracturing, fluid processes and mineralization in the Cretaceous continental magmatic arc of Northern Chile*. Unpub PhD thesis, Kingston, 401p.
- Cembrano, J., González, G., Arancibia, G., Ahumada, I., Olivares, V., Herrera, V. (2005): *Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: a case study for the Atacama fault system, Northern Chile*. *Tectonoph.* 400: 105-125.
- Frietsch, R. (1978): *On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type*. *Econ. Geol.* 73:478-485.
- Gelcich, S., Davis, DW., Spooner, ETC. (2005): *Testing the apatite-magnetite geochronometer: U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of plutonic rocks, massive magnetite-apatite tabular bodies and IOCG mineralization in Northern Chile*. *Geoch. Cosmoch. Acta* 69:3367-3384.
- Henríquez, F., Dobbs, M., Nystrom, J. (1991): *Caracterización geoquímica de magnetita, apatita, y anfíbolita del yacimiento de hierro de Carmen, Región de Atacama, Chile*. *Congr. Geol Chileno*, 6:159-161.
- Naslund, HR., Aguirre, R., Lledó, H. (2004): *Evidence for the formation of massive magnetite ores by liquid immiscibility*, IAVCEly 2004, Pucon (Chile), Abstract volume [CD-ROM].
- Nystrom, J., Henríquez, F. (1994): *Magmatic features of iron ores of Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures, and magnetite geochemistry*. *Econ. Geol.* 89: 820-839.
- Sasaki, K., Nakashima, K., Kanisawa, S. (2003): *Pyrophanite and high ilmenite discovered in the Cretaceous Tono pluton, NE Japon*. *N. Jahrb. Miner. Mon.*, 7: 302-320
- Treloar, PJ., Colley, H. (1996): *Variation in F and Cl content in apatites from magnetite-apatite ores in northern Chile, and their ore-genetic implications*. *Min Mag.* 60: 285-301.
- Sillitoe, RH. (2003) *Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view*. *Min. Dep.* 38: 787-812.