

# LA GÉNESIS DE LOS DEPÓSITOS DE TIPO IOCG: GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE MINERALIZACIONES EN LOS ANDES E IBERIA

Fernando Tornos <sup>1</sup>  
Jorge Carriedo <sup>1</sup>  
Francisco Velasco <sup>2</sup>  
Cristina M. Tomé <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Azafranal 48. 37001 Salamanca, España

<sup>2</sup> Universidad del País Vasco. Leioa, España

## INTRODUCCIÓN

Uno de los estilos de mineralización más desconocidos y controvertidos es el denominado IOCG (Hitzman, 1992; Williams et al., 2005). A pesar de que la asociación de óxidos de hierro (magnetita/hematites) con sulfuros de cobre y oro se encuentra en muchos estilos de mineralización, se incluyen dentro de este estilo depósitos que reúnen otras características tales como (a) la asociación con una alteración alcalino-cálcica que incluye proporciones muy variables de clinoanfíboles férricos y/o hedenbergita, albita, feldespato K o biotita, (b) la relación con zonas de cizalla transcruzales o rocas magmáticas de composición diversa, (c) la presencia de una suite de elementos característica que incluye U, tierras raras, Co, Ni o Mo, (d) la presencia de cantidades significativas de minerales ricos en elementos volátiles tales como P, F o B, (e) la relación con fluidos hipersalinos de alta temperatura (a veces con CO<sub>2</sub>) equilibrados con rocas profundas, y, (f) la asociación en mismo distrito de depósitos de magnetita-apatito (tipo Kiruna), depósitos de óxidos de hierro (cobre-oro) y depósitos de cobre-oro pobres en óxidos de Fe.

Las mineralizaciones de tipo IOCG se encuentran en varios distritos bien delimitados del mundo. La mayor parte de ellos (e.g., Cloncurry, Skelletfe, Carajas, Great Bear) se localizan en cinturones antiguos con intensa deformación, magmatismo y metamorfismo de alto grado y polifásicos, lo que muchas veces hace difícil establecer las relaciones precisas entre mineralización y eventos geológicos. Sin embargo, tanto en los Andes (Perú, Chile) como en el SO de España hay mineralizaciones que reúnen muchas de las características de los sistemas IOCG y que están poco deformadas y metamorfozadas.

Actualmente existen dos hipótesis generales para la génesis de estas mineralizaciones. La hipótesis magmática, defendida por Frietsch (1978), Mark & Foster (2000), Pollard (2000), Sillitoe (2003) y Tornos et al. (2005), entre otros, sostiene que los fluidos mineralizadores son producto de la exsolución magmática y que dan lugar a una zonación similar a la de los pórfidos cupríferos. La segunda hipótesis plantea que los fluidos son derivados de cuencas ricas en evaporitas y que las rocas ígneas solo actúan como fuentes de calor (Barton & Johnson, 2000).

## MINERALIZACIONES EN EL SO DE IBERIA

Los depósitos de magnetita-(cobre-oro) estudiados se encuentran en la Zona de Ossa Morena, un terreno acrecionado al Terreno Autóctono Hespérico durante la orogenia Cadomiense. La zona incluye tres eventos tectonomagmáticos asociados a la colisión de tipo andino de edad Cadomiense, una etapa de *rifting* subsecuente de edad Cámbrico-Ordovícico y un magmatismo de edad Varisca (Carbonífero Inferior) probablemente ligado a la intrusión de un complejo básico laminar en la corteza media.

Las mineralizaciones de hierro-(cobre-oro) se encuentran como (a) niveles volcanosedimentarios de magnetita-hematites, (b) skarns y remplazamientos en relación espacial directa con albita (Domo de Valuengo), y (c) skarns cálcicos y remplazamientos de magnetita-calcopirita-(oro) (Cala) o venas de cuarzo con calcopirita-bismutinita-oro (Sultana) en relación con diorita y tonalita que también engloban mineralizaciones magmáticas de Ni-Cu (Aguablanca). La mayor parte de los skarns y remplazamientos se desarrollan sobre una compleja serie del Cámbrico Inferior con rocas volcánicas

félsicas y máficas, esquisto, mármol y rocas de silicatos cálcicos que son también el encajante de las mineralizaciones volcanosedimentarias. Muchas de estas mineralizaciones volcanosedimentarias tienen un enriquecimiento en cobre-oro cerca de las zonas de cizalla de edad Varisca.

Las mineralizaciones del Domo de Valuego están asociadas a una estructura de tipo *core complex* con metamorfismo de alta temperatura-baja presión con migmatización generalizada y abundantes intrusiones y diques de albitita. Los cuerpos mineralizados se disponen como lentejones estratoides con alteración de tipo albita-actinolita-magnetita en bandas de cizalla o como remplazamientos con la misma mineralogía adyacentes a la albitita. La proporción de skarn es muy minoritaria y las leyes de cobre-oro relativamente bajas.

Los depósitos de la zona de Cala-Sultana muestran características de formación en ambientes más someros. En Cala, la mineralización se dispone en una estructura de *pull-apart* en la que han intruído diversos cuerpos ígneos de composición granodiorítica-tonalítica. Las relaciones estructura-magmatismo-tectónica son difíciles de establecer pero parece haber una etapa temprana de skarn cálcico al que se superpone un skarn retrógrado con clinofibrol-magnetita-epidota y un remplazamiento complejo controlado estructuralmente con magnetita-cuarzo-ankerita-actinolita-biotita verde. La mineralización de cobre-oro se concentra en el skarn anfibólico y en los remplazamientos tardíos. Tipológica y cronológicamente similares son los filones de cuarzo-ankerita ricos en calcopirita-bismutinita-oro de la zona de mina Sultana, también relacionados con diorita.

## MINERALIZACIONES EN LOS ANDES

Las mineralizaciones de tipo IOCG de los Andes están estudiadas con mucho detalle (Marschik & Fontbote, 2001; Sillitoe, 2003; Haller et al., 2006). Hay varios centenares de indicios con marcado control estructural encajados en la andesita del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, y que solo localmente aparecen relacionados con pequeñas intrusiones subvolcánicas de tonalita (Taltal, Raúl Condestable). Las rocas encajantes muestran una alteración potásica (microclina ± biotita) y cálcico-férrica (clinoanfíbol) dominantes; generalmente, la primera predomina cerca de los intrusivos mientras que la segunda está ligada a fracturas, gradando a zonas ricas en clorita-sericita. En las zonas más proximales se reconocen brechas con turmalina-feldespato K-cuarzo. La mineralización es muy monótona y consiste en magnetita con calcopirita, pirita y oro. Superpuesta o posterior a esta etapa hay una de hematites-calcopirita-bornita con un fuerte control estructural y que ha dado lugar a los depósitos de Mantoverde y Carmen. La alteración es de tipo sericita-ankerita-cuarzo y es equivalente a la alteración sericitica somera de Sillitoe (2003).

En relación espacial con estos depósitos hay abundantes yacimientos de magnetita-(apatito) de origen controvertido (e.g. Carmen de Fierro, Fresia, Marcona, Romeral, Cerro Imán) que gradan a mineralizaciones similares a las anteriores pero ricas en clinoanfíbol-apatito. La geología, estructura y textura y geoquímica indican que muchos de estos depósitos son de origen magmático y producto de la inmiscibilidad de un magma rico en óxidos de hierro y volátiles, tal como ha sido apuntado por Lledó (2005). De edad mucho más reciente (ca. 2 Ma) pero de origen probablemente similar es el depósito de El Laco (Frutos et al., 1990; Nyström & Henriquez, 1994).

## DISCUSIÓN

Aunque muy diferentes, las mineralizaciones de tipo IOCG de los Andes y el SO de Iberia permiten reconstruir, aunque de forma fragmentaria, los procesos que dieron lugar a estas mineralizaciones. Básicamente, todas las mineralizaciones tienen una etapa de alta temperatura rica en magnetita y asociada a una alteración alcalino-cálcica que es sobrepuesta por una tardía que es mucho más variable y que incluye (a) una alteración similar a la anterior pero rica en sulfuros, (b) una asociación que incluye cuarzo, clorita y ankerita, o (c) hematites con sulfuros.

## RELACIÓN CON ROCAS MAGMÁTICAS

Mientras que en distritos tales como Cloncurry o Skelletfe hay confusión sobre el significado de las abundantes rocas ígneas asociadas, en Iberia y en los Andes muchas de las mineralizaciones tienen una relación espacial y temporal directa con rocas ígneas. Las mineralizaciones están enraizadas en las rocas plutónicas y a veces tienen una zonación perimagmática clásica. Las dataciones realizadas

muestran una coincidencia, dentro de los márgenes de error, entre procesos hidrotermales y magmáticos. Sin embargo, parece que los depósitos no guardan una relación directa con un tipo específico de roca ígnea. Así, en los Andes y en la zona de Cala (SO de España) siempre parecen estar relacionados con intrusivos subvolcánicos de composición calcoalcalina intermedia (tonalita a diorita) (e.g., Cala-Sultana, Taltal), en otras zonas (Valuengo) están directamente relacionados con albitita sinorogénica de emplazamiento mesozonal y que es producto de la fusión parcial de metasedimentos ricos en magnetita. Esta diversidad litológica parece también observarse en otros distritos donde los depósitos IOCG se asocian a granito potásico, tonalita o albitita (Williams et al., 2005).

En ambas zonas, el basamento es rico en mineralizaciones estratoides previas de óxidos de hierro y evaporitas (Frutos et al., 1990; Tornos et al., 2005), tal como ocurre en los cinturones más antiguos. En la Zona de Ossa Morena hay evidencias claras de fusión parcial y/o asimilación de estas rocas por las rocas ígneas.

### **LA RELACIÓN CON DEPÓSITOS DE TIPO KIRUNA E INTRUSIONES RICAS EN MAGNETITA**

Hay una relación espacial directa entre depósitos de tipo IOCG y mineralizaciones masivas de magnetita (-apatito) (tipo Kiruna). Esto se observa en distritos tan distintos como Skelletfe, Cloncurry, el SO de España, la zona de Carmen-Mantoverde, Punta del Cobre, Romeral-Tofo o el sur de Perú. Aunque la génesis de los depósitos tipo Kiruna-Laco es controvertida, las evidencias geológicas y geoquímicas indican que son fundidos ricos en óxidos de hierro inmiscibles de magmas silicatados. Las evidencias más consistentes para este origen incluyen las texturas magmáticas, la mineralogía, la presencia de inclusiones vítreas y las texturas de tipo magmático-pegmatítico. Sin embargo, estos magmas estaban muchas veces (super)- saturados en volátiles y han dado lugar a una intensa alteración hidrotermal.

Localmente (Valuengo) se observa que las rocas ígneas muestran texturas de inmiscibilidad magmática entre magmas ricos en magnetita-albita, otros ricos en apatito y unos dominantes cuarzofeldespáticos. Además, la albitita tiene abundantes inclusiones fluidas y vítreas coetáneas e indicativas de la exsolución de fluidos ricos en hierro a partir de un magma albitico.

### **COMPOSICIÓN Y ORIGEN DE LOS FLUIDOS Y METALES**

Quizás una de las características más significativas de los depósitos estudiados es la relación de la mineralización con distintos tipos de fluidos hipersalinos, enriquecidos en Na, Ca y Fe. Localmente, hay contenidos elevados de CO<sub>2</sub> y evidencias de complejos procesos de miscibilidad-inmiscibilidad de fluidos. En todos los casos estudiados hemos encontrado evidencias de existencia de fluidos inmiscibles, bien pertenecientes al sistema H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl-(CaCl<sub>2</sub>) o al sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub> y tanto en la etapa de alta como de baja temperatura. Estos fluidos estaban enriquecidos en <sup>18</sup>O, con valores de δ<sup>18</sup>O superiores muchas veces a 10‰ y valores de δD muy variables; sólo en algunas mineralizaciones (hematites+sulfuros) hay entrada de fluidos superficiales. Los valores de εNd, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb y <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os iniciales son propios de fluidos derivados de una fuente crustal o que ha tenido una significativa contaminación crustal. Por lo tanto, los fluidos no eran de origen juvenil o magmático no contaminado, sino que los magmas han debido de interactuar con rocas enriquecidas en δ<sup>18</sup>O o los fluidos son derivados de una fuente amagmática, posiblemente sedimentaria. Los valores de δ<sup>34</sup>S son muy variables y engloban desde valores típicamente magmáticos a valores derivados de la reducción abiogénica o biogénica en sistema abierto de sulfato marino (>10‰).

### **ALTERACIÓN HIDROTHERMAL Y PRECIPITACIÓN DE LOS METALES**

La presencia de una amplia zona de alteración hidrotermal con feldespato-clinoanfíbol dominante con poca alteración sericitica superimpuesta sugiere que los sistemas IOCG eran relativamente isoterms, tamponados por rocas cuarzofeldespáticas y sin una entrada significativa de fluidos superficiales, una característica que los hace muy distintos de los sistemas tipo pórfido.

La presencia de zonas con alteración albita-magnetita o biotita-feldespato K-magnetita podría estar controlada por la composición del fluido, que en un espacio aNa<sup>+</sup>/aK<sup>+</sup> estabilizaría unos minerales frente a otros. Los datos de Manning & Pichavant (1985) muestran que procesos de inmiscibilidad de CO<sub>2</sub> estabilizan la albita frente al feldespato K. La existencia de minerales ricos en B (axinita,

turmalina, vonsenita) en sistemas dominados por alteración potásica y de apatito o fluorita en los dominados por albita sugiere que la presencia de unos volátiles u otros es el control de la alteración alcalino-cálcica.

Aunque no hay datos geocronológicos absolutos, las mineralizaciones con hematites dominante parecen ser bastante más jóvenes y relacionados con la circulación de fluidos superficiales a menores temperaturas.

La solubilidad relativa entre la magnetita y la calcopirita es lo que explica la distinta cronología de ambos en estos sistemas, pero los datos existentes indican que ambos eran transportados por el mismo fluido. La magnetita puede precipitar a cualquier temperatura, hecho motivado por su concentración y la alta solubilidad a cualquier temperatura. La solubilidad de los complejos clorurados de cobre muestra que estos son muy solubles a temperaturas en exceso de 350°C y solo por debajo de ésta pueden formarse los sulfuros. Al oro, posiblemente transportado como  $\text{AuCl}_4^-$  en estos sistemas, precipitaría siguiendo las pautas del cobre.

En estas condiciones, tanto la inmiscibilidad como el enfriamiento simple no parecen ser mecanismos suficientes para la precipitación del Cu-Au. Más bien, la mezcla con fluidos menos salinos (y oxidados?) o la reacción con la magnetita precipitada anteriormente parecen ser los controles de la precipitación de la paragénesis de Cu-Au.

## CONCLUSIONES

Los sistemas estudiados muestran una relación directa entre magmatismo meso- y epizonal, mineralizaciones magmáticas de magnetita y sistemas de tipo IOCG. La relación sistemática entre estos sistemas ricos en hierro y concentraciones anteriores ricas en magnetita/hematites y niveles marinos someros así como la evidencia de contaminación crustal indican que la posible fuente del hierro es la asimilación de cantidades significativas de concentraciones de hierro anteriores. Dependiendo del grado de contaminación, pueden generarse distintos tipos de mineralizaciones, desde magmas exseltos a pegmatitas o remplazamientos. Este modelo explicaría por qué los depósitos de tipo IOCG y Kiruna se encuentran en distritos muy localizados y solo algunos sistemas magmáticos dan lugar a este tipo de mineralizaciones. La mineralización de cobre-oro estaría ligada a la cristalización fraccionada de estos magmas calcoalcalinos, sirviendo los depósitos de hierro como trampa geoquímica.

Sin embargo, este modelo no parece ser único y alteraciones-mineralizaciones similares pueden darse por procesos totalmente distintos, tal como ha sido propuesto por Barton & Johnson (1996). De hecho, sistemas tipo IOCG también se pueden generar por fusión parcial de sedimentos ricos en hierro.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda y las discusiones con Mario Arrieta, Massimo Chiaradia, Chris Heinrich, Verónica Herrera, Haroldo Lledó, Diego Morata, Luis Rodríguez Pevida y Mario Rojo. Ha sido financiado por el proyecto español CGL2006-0378.

## REFERENCIAS

- Barton, M.D. & Johnson, D.A. 2000 Alternative brine sources for Fe oxide-(Cu-Au) systems: implications for hydrothermal alteration and metals En: Porter T.M. (ed) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & related deposits: A Global Perspective, 43-60. Australian Mineral Foundation, Adelaide, p. 43-60.
- Barton, M.D. & Johnson, D.A. 1996. Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, 24, p. 259-262.
- Frietsch, R. 1978. On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type. *Economic Geology*, 73, p. 478-485.
- Frutos, J., Oyarzun, J.M., Shiga, Y. & Alfaro, G. 1990. The El Laco magnetite lava flow deposits, northern Chile; an up-to-date review and new data. *Special Publication of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits*, 8, p. 681-690.
- Haller, A.d., Corfu, F., Fontbote, L., Schaltegger, U., Barra, F., Chiaradia, M., Frank, M. & Alvarado, J.Z. 2006. Geology, geochronology, and Hf and Pb isotope data of the Raul-Condestable iron oxide-copper-gold deposit, central coast of Peru. *Economic Geology*, 101, p. 281-310.

- 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, p. 241-287.
- Lledó, H. 2005. Experimental studies on the origin of iron deposits; and mineralization of Sierra La Bandera, Chile. Tesis Doctoral. Binghampton, New York, p. 282.
- Manning, D.A.C. & Pichavant, M. 1985 Volatiles and their bearing on the behaviour of metals in granitic systems En: Taylor R.P.& Strong D.F. (eds) *Granite-Related Mineral Deposits. Geology, paragenesis and tectonic setting*. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Montreal, p. 184-187.
- Mark, G. & Foster, D.R.W. 2000. Magmatic-hydrothermal albite-actinolite-apatite-rich rocks from the Cloncurry district, NW Queensland, Australia. *Lithos*, 51, p. 223-245.
- Marschik, R. & Fontbote, L. 2001. The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology*, 96, 1799-1828.
- 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*, 89-4, p. 820-839.
- Pollard, P.J. 2000. Evidence for magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization En: Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & related deposits: A Global Perspective*, Australian Mineral Foundation, Adelaide, p. 27-41.
- Sillitoe, R.H. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38, p. 787-812.
- Tornos, F., Casquet, C. & Relvas, J. 2005. Transpressional tectonics, lower crust decoupling and intrusion of deep mafic sills: A model for the unusual metallogenesis of SW Iberia. *Ore Geology Reviews*, 27, p. 133-163.
- Williams, P., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., Haller, A.d., Mark, G., Oliver, N.H.S. & Marschik, R. 2005 Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin En: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J. & Richards J.P. (eds) *Economic Geology - One hundredth anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, p. 371-406.