

## LA RELACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE TIPO IOCG CON INTRUSIONES LAMINARES PROFUNDAS: EL SO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Fernando Tornos & Jorge Carriedo

Instituto Geológico y Minero de España, Azafranal 48, 37002 Salamanca (España). f.tornos@telefonica.net

### INTRODUCCIÓN

Los depósitos de tipo IOCG (Iron Oxide-Copper-Gold) forman uno de los tipos de mineralización que concitan mayor interés en la actualidad. Sus elevados tonelajes, facilidad de exploración y explotación y su poco contenido en sulfuros los hace especialmente atractivos. A pesar de ser un tipo de mineralización ya relativamente bien estudiado desde los años 1990 (e.g., Hitzman et al., 1992; Mark et al., 2001; Marschik y Fontboté, 2001), existen pocos modelos genéticos convincentes. Esto es debido a que muchos de estos depósitos se encuentran en cinturones antiguos deformados y metamorfizados o poco erosionados, lo que impide su estudio en un contexto de carácter regional.

Los depósitos de tipo IOCG tienen una serie de características comunes, aunque no siempre universales, tales como la relación directa con estructuras transcruzales y/o plutonismo intermedio a ácido metalumínico a alcalino, la relación con una alteración sódico-cálcica o potásica, a veces de carácter regional, un enriquecimiento en TR-U y una relación con la circulación de fluidos salinos ricos en volátiles (Hitzman et al., 1992; Pollard, 2001). Estos fluidos parecen ser bien de origen magmático (Pollard, 2001), bien de origen evaporítico (Barton y Johnson, 1996). En una misma provincia suelen coexistir depósitos formados casi exclusivamente por óxidos de hierro(-apatito) con mineralizaciones de magnetita-calcopirita-oro o depósitos solo con Cu-Au.

En el SO de la Península Ibérica se han citado recientemente depósitos de magnetita que reúnen muchas de las características del tipo IOCG. Aunque el distrito es pequeño y su potencial poco conocido, los depósitos se encuentran en una zona relativamente poco deformada que permite reconstruir un sector importante de la corteza. Los datos geofísicos, geológicos y metalogenéticos ayudan a la interpretación genética de los depósitos de IOCG y permiten proponer un nuevo modelo genético, relacionando su formación con intrusiones laminares mediocrustales, equivalentes a los complejos tipo Bushveld.

### GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LOS DEPÓSITOS IOCG

Los depósitos se encuentran el SO de la Península Ibérica, dentro de la Zona de Ossa Morena. La Zona de Ossa Morena es un terreno acrecionado al Autóctono Ibérico durante la orogenia cadomiense (ca. 630-550 Ma) y que sirvió de autóctono relativo durante la orogenia Varisca (ca. 430-300 Ma), cuando fue acrecionada la Zona Sud Portuguesa y se formaron los sulfuros masivos que actualmente ocupan la Faja Pirítica Ibérica. Sincrónicamente con la formación de estos sulfuros masivos tuvo lugar, en la Zona de Ossa Morena, una intensa actividad magmática e hidrotermal que dio lugar a un importante plutonismo máfico-intermedio metalumínico y la formación de abundantes mineralizaciones, incluyendo depósitos de IOCG, skarns, filones de variados tipos y mineralización magmática de Ni-Cu).

Las mineralizaciones de hierro se encuentran en una secuencia formada por esquisto, mármol y rocas volcanoclásticas félsicas de edad Neoproterozoico Inferior-Cámbrico Inferior, generalmente cerca de plutones metalumínicos Variscos y de bandas de cizalla dúctil-frágil. En detalle, los plutones y mineralizaciones se concentran en zonas extensionales dentro de las banda de cizalla, tales como zonas de cambio de dirección o estructuras *pull-apart* (Tornos et al., 2005).

Muchos de los depósitos aparecen relacionados con albitita. La albitita aparece bien como intrusiones kilométricas o diques formada casi exclusivamente por albita con algo de cuarzo y a veces magnetita. La mineralización está englobada en una zona de alteración hidrotermal cuya paragénesis está condicionada por la profundidad (Figura 1). Así, los sistemas más profundos están formados por albita-actinolita-salita-magnetita con proporciones variables de escapolita y feldespato K y que

evoluciona a cuarzo-actinolita-ankerita-clorita-magnetita en los más someros; estas rocas hidrotermales presentan abundantes evidencias de una intensa deformación. En general, la aureola de alteración hidrotermal es mucho más restringida que la que se ha citado en otros distritos.

Los mármoles están remplazados por skarn cálcico y magnésico progradados, con predominio del piroxeno y granate. El skarn retrógrado suele ser bastante restringido, al igual que el endoskarn.

La mineralización se encuentra en las zonas de mayor deformación y/o alteración alcalino-cálcica. Sincrónicas o posteriores a la magnetita hay sulfuros, fundamentalmente pirita, calcopirita, pirrotita, millerita y proporciones muy variables de oro. Es de destacar la abundancia de minerales ricos en volátiles (vonsenita, axinita, fluorita, turmalina), tierra raras (allanita, monacita) y uranio (uraninita), pero con proporciones muy variables de un indicio a otro.

La geoquímica isotópica indica que los fluidos hidrotermales tenían valores muy elevados de  $\delta^{18}\text{O}$  (8-12‰) y que la magnetita precipitó a temperaturas muy variables entre más de 700 y 400°C. La composición isotópica del granate y piroxeno sugiere que también precipitaron a partir de fluidos similares. Al revés que en otros muchos sistemas, el anfíbol también se formó en equilibrio con fluidos isotópicamente pesados, indicando que no ha habido incursión tardía de fluidos superficiales durante las etapas tardías de alteración hidrotermal. Tanto los isótopos de Sm/Nd como de Rb/Sr, Re/Os y Pb indican que la magnetita y minerales hidrotermales asociados precipitaron a partir de fluidos típicamente orogénicos, equilibrados con materiales crustales y juveniles en proporciones variables.

Los isótopos de azufre muestran siempre valores positivos muy variables y coherentes con lavado del azufre de la pizarra encajante.

Los datos preliminares de inclusiones fluidas muestran que los fluidos eran hipersalinos, con salinidades superiores al 35% peso NaCl equiv. y proporciones bajas de  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ .

La edad de la mineralización de magnetita es controvertida y es posible que existan dos eventos mineralizadores. De hecho, las rocas volcanosedimentarias cámbricas encajantes de la mineralización tienen concentraciones estratiformes de magnetita-hematites-barita datadas en aprox. 505 Ma, indicando que al menos parte de la magnetita es de edad Cámbrica. Pero otros varios depósitos tienen edades de 340-330 Ma, que es similar a la de las rocas plutónicas asociadas.

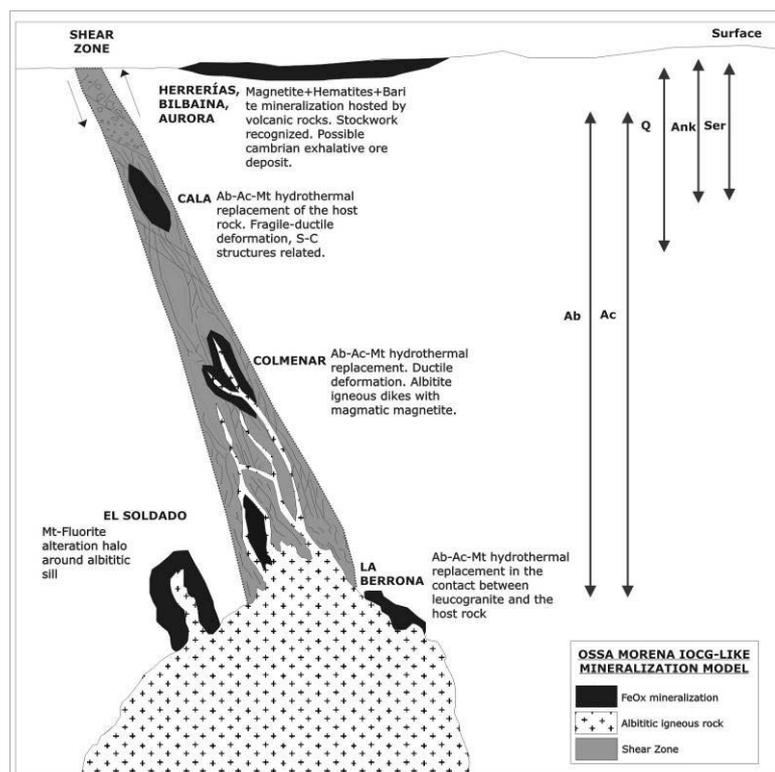
Al igual que en otros muchos distritos de tipo IOCG, en la Zona de Ossa Morena hay mineralizaciones de Cu-Au. Aparecen como filones subhorizontales de cuarzo-ankerita con calcopirita, bismutinina y maldonita. La edad de la mineralización (336 Ma), la presencia de turmalina-albita en la zona de alteración hidrotermal, los valores isotópicamente pesados de  $\delta^{18}\text{O}$  (5-8‰) y la relación de la mineralización con la inmiscibilidad de fluidos hipersalinos ricos en  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$  sugiere que estos filones representan un término extremo del amplio abanico de los depósitos de tipo IOCG.

## MODELO GENÉTICO

Estudios geofísicos recientes han mostrado que bajo la Zona de Ossa Morena y ocupando casi toda su extensión hay, entre los 15 y 20 km de profundidad, un cuerpo conductor y reflectivo que parece corresponder a un gran *sill* básico-ultrabásico discontinuo de entre 1 y 5 km de potencia (Simancas et al., 2003). Este cuerpo parece haber intruido a lo largo de una discontinuidad tectónica mayor donde enraizan los cabalgamientos variscos de la zona. Su presencia queda confirmada por una anomalía magnetométrica y valores regionales de  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  bajos, indicativos de una importante contaminación juvenil en las mineralizaciones del área (Tornos y Chiaradia, 2004).

Un fragmento de este cuerpo profundo aflora en el área sur de la Zona de Ossa Morena, permitiendo su datación ( $336 \pm 2$  Ma) y la reconstrucción vertical parcial del sistema hidrotermal. Las rocas encajantes muestran un metamorfismo de alta temperatura/baja presión que da lugar a la migmatización del encajante. La roca ígnea tiene una intensa contaminación crustal, que se manifiesta en la formación de acumulados de ortopiroxeno, abundancia de enclaves peraluminicos, xenolitos de roca encajante parcialmente asimilados y valores elevados de  $\epsilon\text{Nd}$  y bajos de  $\epsilon\text{Sr}$ .

Esta contaminación crustal por rocas ricas en agua parece clave en el desarrollo de las mineralizaciones. La saturación en fluidos por las rocas ígneas se manifiesta en la presencia de abundante flogopita y clinoanfíbol intercumular, en la generación de fluidos de composición trondhemítica y en la presencia de estructuras orbiculares y diques de pegmatita.



**Fig. 1.** Modelo conceptual de las mineralizaciones de tipo IOCG de la Zona de Ossa Morena mostrando la zonación vertical.

La exsolución de fluidos a partir del propio *sill* o plutones derivados del mismo es probablemente la responsable de la génesis de las mineralizaciones de tipo IOCG, que se encuentran siempre en zonas de cizalla enraizadas en el *sill* y por las que circularon magmas y fluidos. Un fluido exsuelto tardíamente de un magma de estas características tendría valores elevados de  $\delta^{18}\text{O}$  y sería hipersalino, rico en  $\text{CO}_2$  y estaría enriquecido en  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{FeCl}_2$  (Kwak, 1986). A altas temperaturas, puede dar una alteración sódico-cálcica con formación de albita, actinolita y magnetita. A medida que baja la temperatura la disociación de los ácidos daría lugar a paragénesis precipitadas a pH intermedios con sericita, cuarzo y carbonatos. La solubilidad de los metales es demasiado elevada a alta temperatura; cuando ésta baja, los metales transportados como complejos thiosulfurados o ácidos débiles (Cu, Au) precipitarían por enfriamiento simple u oxidación/alcalinización del fluido al reaccionar con la magnetita anteriormente precipitada (Tornos y Casquet, 2005).

## CONCLUSIONES

La geología y geoquímica de los depósitos tipo IOCG de la Zona de Ossa Morena sugiere que hay una relación directa con la intrusión de un dique laminar básico en la corteza media. La exsolución de fluidos a partir de rocas básicas-intermedias ricas en fluidos puede ser la fuente última de los depósitos de tipo IOCG.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se enmarca en el proyecto BTE2003-0290 del Ministerio de Educación y Ciencia de España. Agradecemos a C. Casquet, C. Conde, L. Rodríguez Pevida y F. Velasco su ayuda en la interpretación de estos depósitos.

## REFERENCIAS

- Barton, M. D., Johnson, D. A., 1996, Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide- (REE-Cu-Au-U) mineralization: *Geology*, v. 24, p. 259-262.
- 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*, v. 58, 241-287.
- Kwak, T. A. P., 1986, Fluid inclusions in skarns: *Journal Metamorphic Geology*, v. 4, p. 363-384.
- Mark, G., Oliver, N. H. S., Foster, D. R. W. (eds. ), 2001, Mineralisation, alteration and magmatism in the Eastern Fold Belt, Mount Isa Block, Australia: *Geological Review and Field Guide*, Geological Society Australia, 121 p.
- Marschik, R., Fontbote, L., 2001, The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile: *Economic Geology*, v. 96, p. 1799-1828.
- Pollard, P. J., 2001, Sodic (-calcic) alteration in Fe-oxide-Cu-Au districts: an origin via unmixing of magmatic H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl±CaCl<sub>2</sub>-KCl fluids: *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 93-100.
- Simancas, J. F., Carbonell, R., Gonzalez Lodeiro, F., Perez Estaun, A., Juhlin, C., Ayarza, P., Kashubin, A., Azor, A., Martínez Poyatos, D., Ruiz Almodovar, G., Pascual, E., Saez, R., Expósito, I., 2003, Crustal structure of the transpressional Variscan orogen of SW Iberia: SW Iberia deep seismic reflection profile (IBERSEIS): *Tectonics*, v. 22, p. 1962-1974.
- Tornos, F., Casquet, C., 2005, A new scenario for related IOCG and Ni- (Cu) mineralisation: the relationship with giant mid-crustal mafic intrusion, Variscan Iberian Massif: *Terra Nova*, v. 17, p. 286-290.
- 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*, v. 27, p. 133-163
- Tornos, F., Chiaradia, M., 2004, Plumbotectonic evolution of the Ossa Morena Zone (Iberian Peninsula): Tracing the influence of mantle-crust interaction in ore forming processes: *Economic Geology*, v. 99, p. 965-985.