

La influencia biogénica en la formación de los yacimientos de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica

The biogenic influence in the formation of massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt

F. Tornos ⁽¹⁾ y C. Conde ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geológico y Minero de España. C/Azafranal, 48-50. 37002 Salamanca. E-mail: f.tornos@igme.es

ABSTRACT

The Tharsis supergiant massive sulphide deposits shows evidence of being formed by exhalative processes on the seafloor. The carbonate-siderite ore is interpreted as a bacterial mound while the bulk of the orebody seems to be formed in a brine pool by mixing of sulphur-depleted deep brines with H₂S generated by hyperthermophile (archeo-)bacteria in the chemoclyne. This mechanism is significantly slower but geochemically much more effective than mound accretion on the seafloor and is interpreted as being the reason of the presence of supergiant massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt.

Key words: Massive sulphides, Iberian Pyrite Belt, thermophile bacteria

Geogaceta, 32 (2002), 235-238
ISSN:0213683X

Introducción

Uno de los aspectos más relevantes en los sistemas hidrotermales submarinos actuales es la presencia de una cadena trófica relacionada con el calor y presencia de H₂S (Rona, 1988; Herzig y Hannington, 1995). Las chimeneas y montículos hidrotermales asociados son rápidamente colonizados por (arqueo-) bacterias y otras especies más evolucionadas que basan su existencia en procesos de oxidación/reducción de H₂S/SO₄ y CH₄/CO₂. A pesar de ser fenómenos ampliamente descritos en sistemas submarinos actuales, pocos son los sulfuros masivos fósiles que muestran evidencias claras de actividad biológica (Russell, 1996; Little *et al.*, 1997; Little *et al.*, 1999). Esto es posiblemente debido a que la mayor parte de los sulfuros masivos que se forman actualmente no son propiamente exhalativos, sino que forman estructuras de remplazamiento infrayacentes a los montículos hidrotermales, que sólo ocupan una pequeña proporción del sistema (e.g., Herzig y Hannington, 1995). Salvo en condiciones de preservación excepcionales, los montículos son oxidados y erosionados en pocas decenas de años.

La Faja Pirítica Ibérica es una de las provincias metalogénicas más importantes del mundo, con más de 1800 Mt de sulfuros masivos y stockworks infrayacentes

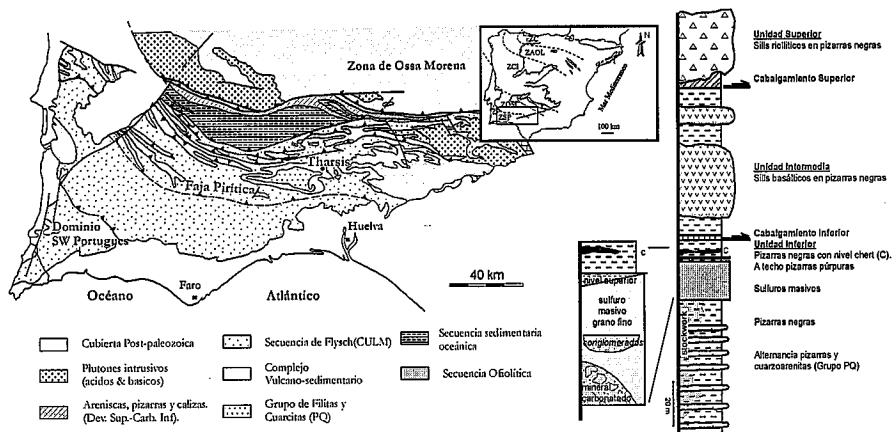


Fig. 1.- Mapa geológico de situación y columna litológica del yacimiento de Filón Norte (Tharsis).

Fig. 1.- Geological map and lithologic column of the Filón Norte (Tharsis) orebody.

(e.g., Leistel *et al.*, 1998). Tiene una serie de características que hacen de ella un distrito único, tales como la elevada proporción de pizarras, la poca potencia de rocas volcánicas y su situación en una zona de extensión intracontinental (Quesada, 1998). A diferencia de en otras provincias equivalentes, muchos de los depósitos se han formado sobre el fondo marino (Tornos, 2000). Esto es especialmente evidente en los yacimientos gigantes de la zona sur, en la que las mineralizaciones están encajadas en pizarras y tienen abundantes estructuras sedimentarias, pueden ser ricas en sideri-

ta y tienen valores de δ³⁴S significativamente bajos.

El depósito de Filón Norte (Tharsis)

El depósito de Filón Norte se encuentra situado en el borde este de la estructura de Puebla de Guzmán (Fig. 1). Los sulfuros masivos se localizan en los primeros metros de pizarras oscuras del Complejo Volcánico Sedimentario (Fig. 1) directamente sobre la alternancia de pizarras y cuarcitas del Grupo PQ. Si se exceptúan esporádicos niveles epiclásticos, no hay rocas volcánicas ligadas a los sul-



Fig. 2.- Estructuras sedimentarias del nivel superior de los sulfuros masivos. Ancho de la fotografía: 6 mm.

Fig. 2.- Sedimentary structures in the uppermost massive sulphides. Width of photo: 6 mm

furos masivos. Sobre éstos se disponen unos m de pizarras negras ricas en pirita con un nivel característico de chert gris. Esta unidad (Unidad Inferior de Tornos et al., 1998) está cabalgada por pizarras con sills máficos intensamente ankeritizados y por pizarras con sills riódacíticos.

Bajo los sulfuros masivos se dispone una potente zona de stockwork de más de 400 m de potencia que se desarrolla sobre la parte más inferior del Complejo Volcano Sedimentario y en el Grupo PQ. Este stockwork no parece estar directamente ligado a una falla, sino que forma masas estratoides irregulares. En las zonas más superiores hay pequeños cuerpos irregulares de sulfuros semimasivos remplazando a las pizarras pero siempre cortando al stockwork. El contacto del stockwork con los sulfuros masivos exhalativos es neto, sugiriendo que la exhalación hidrotermal fue difusa a través de los sedimentos alterados y no canalizada a través de chimeneas.

Los sulfuros masivos propiamente dichos forman un lentejón de unos 1500 m de longitud, 400-600 m de anchura y 80 m de potencia media, que probablemente sea fruto del apilamiento tectónico de una lámina poco potente con una extensión original aproximada de 2-4 km² (Tornos et al., 1998). En general, son rocas monótonas formadas mayoritariamente por pirita de grano muy fino (<30 µm) en la que se suelen reconocer estructuras framboidales residuales. Esta piritita tiene frecuentes intercalaciones de conglomerados formados por corrientes de turbidez.

Son niveles métricos con base no erosiva y sin granoselección con fragmentos heterométricos de pirita y pizarra soportados por pirita de grano más fino. En la zona inferior (S) del yacimiento hay una facies característica con fragmentos cm consistentes en una alternancia submm de sulfuros y siderita de grano muy fino que están soportados por pirita y siderita de grano más grueso (mineral carbonatado). Esta facies forma una estructura lenticular de dimensiones hectométricas y unos

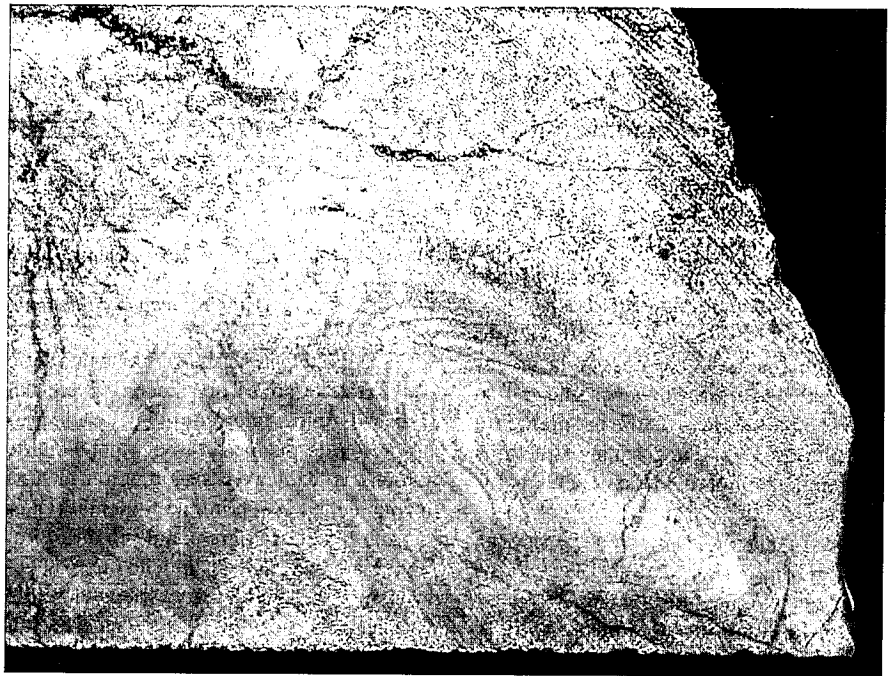


Fig. 3.- Estructura de escape biogénica en el contacto basal de los sulfuros masivos. Ancho de la fotografía: 8 cm.

Fig. 3.- Escape biogenic structure in the footwall of the massive sulphides. Width of photo: 8 cm

40 m de potencia (Strauss y Beck, 1990). En su zona más interna se han reconocido estructuras métricas formadas por pirita con estructura botroidal que podrían corresponder a las zonas más proximales.

Finalmente, y definiendo el contacto de los sulfuros masivos con las pizarras negras suprayacentes hay un nivel de potencia métrica con abundantes estructuras sedimentarias. En él alternan niveles cm de brechas con pirita y siderita (equivalentes al mineral carbonatado) con niveles de pizarras y capas de pirita con granoselección negativa y estructuras de tipo slump o scour and fill en la que abundan los cantos blandos de pizarra (Figura 2) y que se interpretan como producto de la erosión de los sulfuros en relación con fallas sinsedimentarias.

Los niveles más inferiores de los sulfuros masivos muestran abundantes evidencias de que el sistema estaba oxidado cuando se depositaron los primeros sulfuros. Hay restos de marcasita, abundantes fantasmas de hematites remplazada por magnetita y de sulfatos remplazados por pirita. Igualmente, las relaciones Ni-Mn-V de las pizarras suprayacentes indica que las condiciones sub-(óxicas) se restauraron muy pronto tras la finalización de la actividad hidrotermal (Tornos y Spiro, 1999). Sólo las pizarras con pirita que se superponen directamente a los sulfuros masivos muestran evidencias de formación en condiciones anóxicas.

La temperatura de precipitación de

los sulfuros masivos fue relativamente baja, del orden de 70-120°C (Tornos *et al.*, 1998), muy inferior a la citada en sistemas actuales (>250°C; Herzig y Hannington, 1995) o en otros depósitos de la Faja Pirítica (Sáez *et al.*, 1996; Leistel *et al.*, 1998). En el stockwork esta era algo superior, del orden de 120-240°C. Otra característica significativa es que en el stockwork la paragénesis metálica está caracterizada por la presencia de minerales que indican una precipitación en condiciones claramente empobrecidas en H₂S (Marcoux *et al.*, 1996; Tornos *et al.*, 1998). Sin embargo, los sulfuros masivos tienen una paragénesis más rica en azufre indicando que el sistema estaba (sobre)-saturado en azufre reducido.

Evidencias de actividad biológica

El ataque selectivo del mineral carbonatado muestra que las estructuras laminadas son equivalentes a las láminas biológicas y mallas filamentosas que se forman en sistemas hidrotermales actuales (e.g., Binns y Parr, 1995). Esporádicamente hay niveles en los que la pirita pseudomorfiza a antiguos sulfatos y otros fragmentos que muestran una estructura concéntrica indicativa de posibles conductos hidrotermales y similares a los citados por Tesalina *et al.* (2001) en Aleksandrinka (Urales). La distribución y evidencias de deformación plástica en los fragmentos indica que la brechificación tuvo lugar en condiciones semi-rígidas, probablemente durante el crecimiento y colapso del montículo. Estas características y la propia morfología del mineral carbonatado sugieren que éste puede corresponder a un montículo de mallas (arqueo-) y bacterianas desarrollado sobre el fondo marino.

El tamaño de grano fino de la mayor parte de los sulfuros masivos indica que éstos precipitaron como un gel, probablemente producto de la supersaturación rápida de sulfuros de hierro. En la parte basal del cuerpo mineralizado se han encontrado estructuras de escape de posibles gusanos (Fig.3) que representan la primera evidencia positiva de la presencia de mesofauna en la Faja Pirítica Ibérica. En los niveles de pizarras intercalados y a techo de los sulfuros masivos hay estructuras típicas de pirita remplazando a estructuras bacterianas (Fig. 4).

Los sulfuros masivos de Tharsis se caracterizan por valores de $\delta^{34}\text{S}$ marcadamente negativos, entre -26.5 y 2.2‰ en los sulfuros masivos y entre -4.5 y 2.9‰ en el stockwork (Kase *et al.*, 1990; Tornos *et al.*, 1998; Velasco *et al.*, 1998) y que son inferiores a los de la mayor parte de

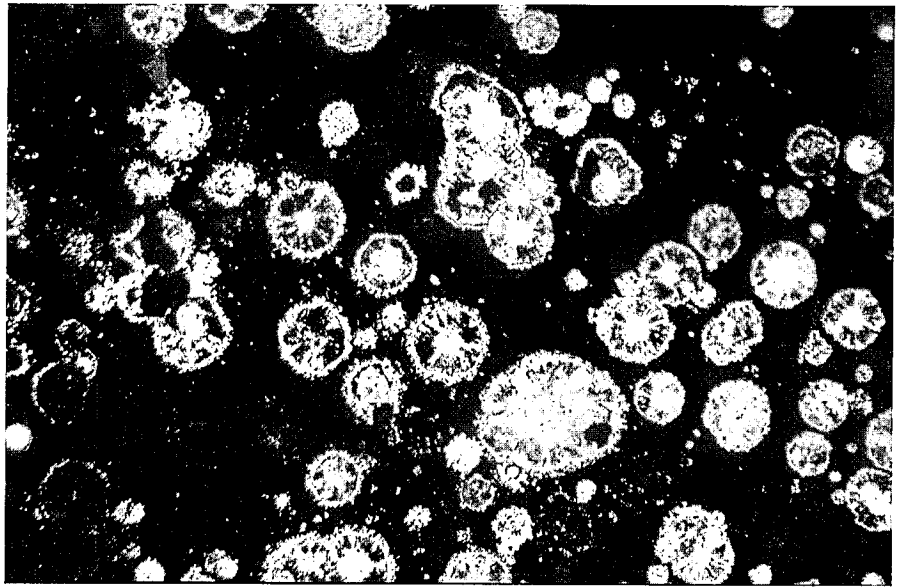


Fig. 4.- Posibles estructuras bacterianas en las pizarras suprayacentes a los sulfuros masivos. Ancho de la fotografía: 1.2 mm.

Fig. 4.- Possible Bacterial structures in the shales located in the hanging wall of the massive sulphides. Width of photo: 1.2 mm

los sulfuros masivos de la Faja Pirítica y de otros yacimientos equivalentes a escala global. Indican que el azufre proviene de dos fuentes distintas. Un azufre de origen profundo es probablemente derivado de la reducción abiogénica del sulfato marino durante su interacción con el basamento siliciclástico. El azufre con valores más enriquecidos en ³²S y detectable en los sulfuros masivos solo puede ser derivado de la reducción anaerobia del sulfato marino por (arqueo-)bacterias de tipo *Pyrolobus* o *Archeoglobus*. El rango de temperaturas estimadas para la precipitación de los sulfuros masivos coincide con el de máxima productividad bacteriogenética. En los sistemas actuales, las (arqueo-)bacterias sulfato-reductoras son organismos hipertermófilos con una actividad máxima entre los 80 y 113°C (Stetter, en prensa).

Un problema es el origen de la siderita del mineral carbonatado. Debido a la solubilidad retrógrada de los carbonatos es difícil plantear que estos precipitaron por exhalación simple de fluidos hidrotermales en el fondo marino. Tampoco parece probable que provenga de la mezcla del fluido hidrotermal profundo con el agua marina. La comparación con sistemas actuales, donde los sulfatos son muy abundantes, y las frecuentes texturas de remplazamiento de los carbonatos sugiere que la siderita es producto del remplazamiento diagenético temprano de sulfatos. En este aspecto, el remplazamiento de sulfatos por siderita estaría relacionado con el incremento local de la pCO₂ por oxidación del CH₄ durante el proceso de

reducción del sulfato (McCollom y Shock, 1997). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de los carbonatos (-9.7 a -6.4‰) son consistentes con un origen predominantemente orgánico para el carbono.

Discusión y conclusiones

La presencia de estructuras sedimentarias en sulfuros masivos de Filón Norte (Tharsis) y la ausencia de alteración hidrotermal en las pizarras suprayacentes indican que la mineralización es predominantemente exhalativa sobre el fondo marino. La ausencia de estructuras de tipo chimenea sugiere que la exhalación hidrotermal fue de tipo difuso, tal como ocurre en la mayor parte de los sistemas actuales, donde sólo una pequeña parte (<10%) de los fluidos profundos es expulsada a partir de estructuras bien definidas (Herzig y Hannington, 1995). Las relaciones entre los distintos tipos de sulfuros masivos sugieren que en Tharsis éstos se formaron por dos procesos distintos. El primero consistiría en el crecimiento de montículos de (arqueo-) y bacterias alrededor de los focos exhalativos. El segundo proceso correspondería a la precipitación del conjunto de los sulfuros masivos de grano fino. La relación con pizarras negras, la textura de los sulfuros y los valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfuros}}$ de Tharsis, así como las elevadas salinidades de las inclusiones fluidas en distintos stockworks de la Faja Pirítica (>5-8% peso NaCl eq.), han llevado a Solomon *et al.* (2002) a proponer que estos sulfuros masivos se formaron en un *brine pool* por la exhalación y pos-

terior acumulación de fluidos hidrotermales densos en una subcuenca de tercer orden. Estos fluidos profundos se interpretan como subsaturados en azufre pero ricos en hierro y metales base durante su equilibrio químico con el basamento. La mezcla con azufre biogénico produciría la rápida supersaturación y precipitación de los sulfuros. Las relativamente bajas temperaturas, las condiciones anóxicas y los pH intermedios fueron probablemente críticos para el desarrollo de una importante actividad bacteriogénica concentrada fundamentalmente en la quimioclina entre el *brine pool* y el agua marina. La gran cantidad de azufre biogénico (estimada 23 Mt) sugiere que el sistema fue muy productivo y capaz de reducir cantidades ingentes de sulfato marino a partir de al menos 4500 km³ de agua marina.

Este modelo propuesto para el yacimiento de Tharsis es probablemente válido para otros sulfuros masivos gigantes de la parte sur de la Faja Pírfica, tales como Sotiel-Migollas, Masa Valverde y Aznalcóllar-Los Frailes. Todos ellos están encajados en pizarras y en el primer caso tienen una facies de sulfuros con siderita (mineral bréchico, Migollas) que puede tener el mismo origen. Sin embargo, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de la siderita de Migollas sugieren que ésta se formó a mayor temperatura que la siderita de Tharsis (Tornos y Spiro, 1999).

Rasgos distintivos del mecanismo propuesto son la duración del sistema hidrotermal y su gradiente térmico. En sistemas de tipo chimenea/montículo los gradientes son muy elevados mientras que el *brine pool* han de ser necesariamente muy bajos. En éstos, el proceso de acumulación de fluidos y reducción bacteriana ha de ser necesariamente muy lento (>1 Ma?) frente a las elevadas velocidades de crecimiento en los montículos actuales (<0.1 Ma). Sin embargo, si se dan las condiciones necesarias el sistema puede ser muy efectivo. Esto explicaría el

gran tamaño de los sulfuros masivos en una zona muy restringida. De ser cierto, 5 de los 8 yacimientos supergigantes (si no todos) de la Faja Pírfica Ibérica se habrían formado por este mecanismo.

Este mecanismo sería equivalente al que tiene actualmente lugar en sistemas hidrotermales submarinos actuales con salmueras, como es el caso de las Guayamas o Atlantis II Deep (Mar Rojo) pero en unas condiciones subanóxicas similares a las que se encuentran en el Mar Negro o los fiordos nórdicos. De hecho, el mayor depósito de metales formado en fondos marinos actuales es Atlantis II Deep con 94 Mt con 2%Zn y 0.5%Cu (Miller *et al.*, 1996), con unos tonelajes y leyes similares a los de Tharsis.

Agradecimientos

Este estudio se enmarca en el proyecto BTE2000-0161-CO2 financiado por la Dirección General de Investigación y es una contribución al proyecto GEODE de la European Science Foundation. Agradecemos a J.C. Gutierrez Marco, B.Spiro, M.Solomon, F.Velasco y M.Joubert sus comentarios y sugerencias sobre el origen de los sulfuros masivos en la Faja Pírfica.

Referencias

- Binns, R.A., Parr, J.M. (1995): *PACRIM'95*, 49-54.
- Herzig, P.M., Hannington, M.D. (1995): *Ore Geology Reviews* 10, 95-115.
- Kase, K., Yamamoto, M., Nakamura, T., Mitsuno, C. (1990): *Mineralium Deposita* 25, 289-296.
- Leistel, J.M., Marcoux, E., Thieblemont, D., Quesada, C., Sánchez, A., Almodóvar, G.R., Pascual, E., Sáez, R. (1996): *Mineralium Deposita* 33, 1-2, 2-30.
- Little, C.T.S., Herrington, R.J., Maslennikov, V.V., Morris, N.J., Zaykov, V.V. (1997): *Nature*, 385, 146-148.
- Little, C.T.S., Cann, J.R., Herrington, R.J., Morisseau, M. (1999): *Geology* 27-11, 1027-1030.
- Maroux, E., Moelo, Y., Leistel, J.M. (1996): *Mineralium Deposita* 31, 1-26
- McCollom, T.M., Shock, E.L. (1997): *Geochimica Cosmochimica Acta* 61-20, 4375-4391.
- Miller, A.R., Densmore, C.D., Degens, E., Hathaway, J., Manheim, F., McFarlin, P., Pocklington, R., Jokela, A. (1966): *Geochimica Cosmochimica Acta* 30, 341-359.
- Quesada, C. (1998): *Mineralium Deposita* 33, 1-2, 31-44.
- Stetter, K.O. (1999): En J. Marti y G.J. Ernst (eds.). *Volcanoes and environment* Cambridge University Press.
- Rona, P.A. (1988) *Canadian Mineralogist*, 26, 431-465
- Russell, M.J. (1996): *Ore Geology Reviews* 10, 199-214
- Sáez, R., Almodóvar, G.R., Pascual, E. (1996): *Ore Geology Reviews* 11, 429-451
- Solomon, M., Tornos, F., Gaspar, O.F. (2002): *Geology* 30-1, 87-90
- Strauss, G.K., Beck, J.S. (1990): *Mineralium Deposita*, 25, 237-245
- Tesalina, S.G., Maslennikov, V.V., Zaykov, V.V., Orgeval, J.J., Bailly, L., Herrington, R.J., Spiro, B. (2001): En Tornos, F., Pascual, E., Sáez, R., Hidalgo, R. (eds.) *GEODE Workshop Massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt: New advances and comparison with equivalent systems*, 63-66
- Tornos, F., González Clavijo, E., Spiro, B.F. (1998): *Mineralium Deposita* 33, 1-2, 150-169
- Tornos, F., Spiro, B. (1999): En Stanley *et al.* (eds.), *Mineral deposits: Processes to Processing*, Balkema, 605-608
- Tornos, F. (2000): En Gemmel, J.B., Pongratz, J. (eds.). *Volcanic environments and massive sulfide deposits*, Program and Abstracts, CODES, 211-213
- Velasco, F., Sánchez España, J., Boyce, A., Fallick, A.E., Sáez, R., Almodóvar, G.R. (1998): *Mineralium Deposita*, 34-1, 1-18