

EN LAS CRUCES (SEVILLA)

Los organismos extremófilos forman una mineralización única

FERNANDO TORNOS¹
FRANCISCO VELASCO²
ANTONIO DELGADO³
CESAR MENOR-SALVÁN¹
JUAN MANUEL ESCOBAR⁴
CARMELO GÓMEZ⁴

¹ Centro de Astrobiología (CSIC-INTA).
Ctra Ajalvir km 4.5, 28850 Torrejón de
Ardoz. f.tornos@csic.es

² Departamento de Mineralogía y
Petrología. Universidad del País Vasco

³ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra
(CSIC-UG).

⁴ Cobre Las Cruces SA.

Uno de los campos científicos que tiene más interés mediático es el de los organismos que viven en condiciones extremas de temperatura, acidez, salinidad, abundancia de metales pesados o en ambientes carentes de oxígeno (extremófilos). De hecho, los extremófilos son los seres vivos que soportan mayores temperaturas (hasta 140°C) o am-

bientes hipersalinos. Estos organismos, fundamentalmente bacterias y arqueas (procariotas) viven en ambientes hostiles al resto de los seres vivos pero quizás son los herederos más directos de los primeros organismos que poblaron la Tierra. Por lo tanto, su estudio es crítico para comprender el origen de la vida y la búsqueda de vida en otros planetas.

Fig. 1. Aspecto de la corta de Las Cruces en Mayo 2011. El ecosistema subterráneo se encuentra en la zona discordante entre el basamento paleozoico y la marga de la Cuenca del Guadalquivir, en una zona marcada por el contacto entre la arenisca miocena basal – que hospeda el acuífero Niebla-Posadas – y la parte superior de los sulfuros masivos, marcada por los colores rojos y negros. La zona de cementación es la que está enriquecida en cobre y objeto de la explotación minera.





Fig. 2. Rocas biogénicas de Las Cruces. La roca roja está formada por siderita con cantidades accesorias de sulfatos y carbonatos de plomo y está reemplazada por galena, calcita y sulfuros de hierro que forman la roca negra.

Los depósitos minerales son enclaves geoquímicos donde dominan asociaciones minerales anómalas formadas en relación con ambientes con grandes variaciones de potencial redox y con la circulación de agua caliente; son, por ello, uno de los ambientes más favorables para el desarrollo de los procariotas extremófilos. Durante el estudio llevado a cabo en la mina de Las Cruces (Gerena, Sevilla), se han encontrado evidencias de una gran colonia de procariotas que vivía aislada de la superficie a unos 150 m de profundidad. Estos organismos obtenían la energía necesaria para sobrevivir reaccionando solutos en el agua subterránea con rocas – lo que ha producido una asociación mineral nunca descrita en ambientes superficiales.

El depósito de Las Cruces, a solo unos 15 km de Sevilla, es una de las minas más ricas en cobre del mundo. Se trata de una mina moderna, que fue descubierta en 1994 y puesta en explotación en 2009. En muchos aspectos, este depósito es único dentro de lo que es ya una provincia minera singular, como es la Faja Pirítica del SO de la península ibérica. La Faja Pirítica incluye la mayor concentración de sulfuros

de la corteza terrestre, fundamentalmente en grandes cuerpos de sulfuros masivos formados durante el Carbonífero por la exhalación de fluidos hidrotermales en el fondo marino, de una manera similar a los *black smokers* que se encuentran actualmente en zonas de extensión en todos los océanos. Estos sulfuros masivos sufrieron los mismos procesos geológicos que las rocas encajantes y parte de ellos han aflorado en superficie a partir del Mioceno. La exposición subaérea ha producido la oxidación de la parte superior de estos cuerpos dando lugar a los denominados *gossan*, grandes masas de goethita con pequeñas cantidades de plomo, oro y plata que ya fueron explotados desde la época tartésica, hace más de 4000 años.

La explotación minera actual está orientada a una zona de enriquecimiento secundario que se encuentra bajo la zona de oxidación y concentra la mayor parte del cobre (Fig. 1). Pero lo más interesante de este yacimiento es que sobre el mismo no se encuentra la típica zona de oxidación de color pardo y formada mayoritariamente por goethita, sino unos 3-15 metros de rocas de color negro y rojo formadas mayoritaria-

mente por siderita, galena, barita, y sulfuros metaestables de hierro (greigita, smythita) con pequeñas cantidades de otros muchos sulfuros de mercurio, antimonio, arsénico y plata junto con oro y amalgamas. En su conjunto, esta roca está caracterizada por una asociación reductora rica en Fe^{2+} y azufre reducido que no es estable en condiciones superficiales oxidadas. Solo se han encontrado rocas similares en una pequeña mina localizada en los Urales (Zapadno-Ozernoe).

Las Cruces es el único depósito de la Faja Pirítica Ibérica en el que la zona de oxidación se ha preservado intacta ya que fue cubierto por los sedimentos terciarios de la Cuenca del Guadalquivir hace unos 7.2-5.3 Ma. Actualmente, el importante acuífero Niebla-Posadas circula a través del contacto entre el basamento y los sedimentos impermeables terciarios (margas), esto es, donde se encuentran las rocas de color rojo y negro de origen biogénico (Fig. 2).

La formación de estas rocas solo puede ser explicada por la actividad microbiana en un ambiente sellado al oxígeno ambiental por la marga que cubre el depósito. Los microbios catalizan reacciones que son cinéticamente inviables en los ambientes superficiales y obtienen su energía cambiando el estado redox de los minerales y solutos. Aunque los microbios viven en ecosistemas en los que diversos organismos se complementan, hay tres procesos básicos que explican la formación de las rocas biogénicas en Las Cruces:

1. La presencia de procariotas reductores de hierro, que reducen el Fe^{3+} de los *gossan* a Fe^{2+} .
2. Los organismos sulfato-reductores, que reducen el sulfato contenido en el agua infiltrada.
3. Los procariotas metanótrofos, que oxidan el metano a CO_2 .

La combinación de estos mecanismos cambia radicalmente las condiciones del medio y permite la sustitución de la goethita por siderita y sulfuros de hierro y la formación de otros sulfuros como galena a costa

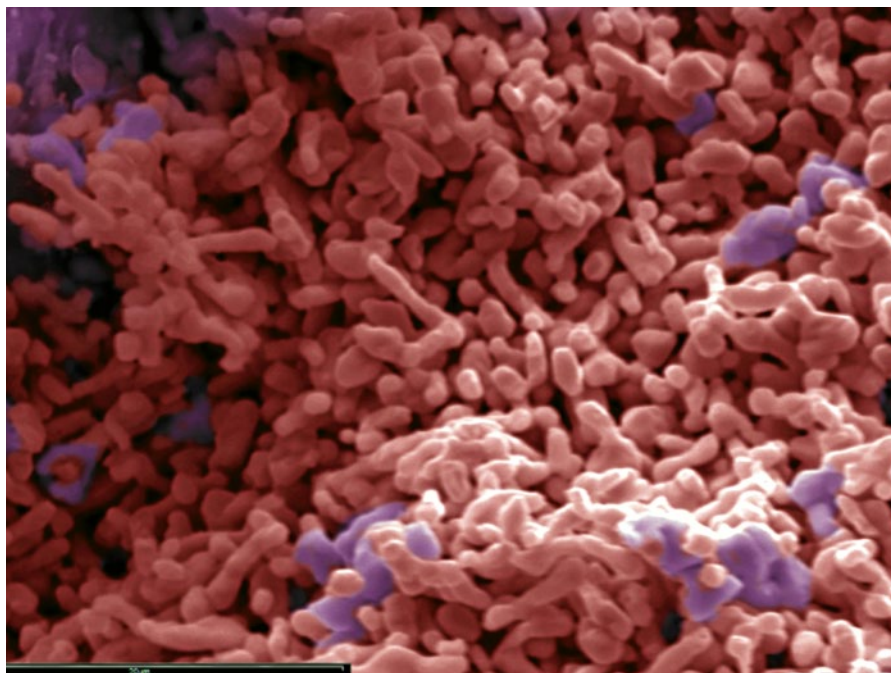


Fig. 3. Foto de microscopio electrónico mostrando bacteriomorfos de galena intercrecidos con calcita.

de los minerales oxidados de plomo y otros metales del *gossan*.

Hay abundantes evidencias biogeoquímicas de esta actividad microbiana que se manifiestan en la formación de estos sulfuros de hierro –que casi solo se pueden formar por actividad biológica– como son la composición isotópica de los carbonatos y sulfuros y, sobre todo, la presencia de abundantes microfósiles de bacteria formados por galena. Estos últimos se interpretan como formados cuando los procariotas sulfato-reductores saturan el ambiente inmediato en H_2S , algo que en un ambiente rico en plomo hace saturar la galena, la cual va cubriendo gradualmente el organismo hasta su muerte.

El volumen de rocas transformadas es muy importante – una estimación aproximada sugiere que los microbios han sido capaces de producir unos 1.19 Mt de carbonatos, 114000 t de galena, 638 t de sulfuros de plata y 6.5 t de oro, posiblemente en los últimos 7.2-5.3 millones de años. Estos números hacen de Las Cruces quizás la mayor mineralización reciente de origen biogénico del mundo. Las condiciones geoquímicas son similares hoy en día bajo los sedimentos de la Cuenca del Guadalquivir y, por ello, es muy probable que continúe habiendo

actividad biológica ahí abajo. Sin embargo, la detección y estudio de los micro-organismos pertenece ya al campo de los microbiólogos espe-

cializados ya que estos procariotas mueren en contacto con el aire. Para su estudio, se está colaborando con el equipo del Centro de Astrobiología que tiene una amplia experiencia en el proyecto IPBSL (*Iberian Pyrite Belt Subsurface Life Detection*) que precisamente se dedica al estudio de la vida microbiana subterránea.

Finalmente, habría que resaltar que el estudio de esta vida subterránea es básico para comprender muchos de los sistemas geobiológicos que sólo se dan en ambientes extremos. Hay estimaciones que sugieren que la cantidad de biomasa bajo la superficie es equivalente a la que hay encima de ella y esos organismos viven a costa de modificar la mineralogía de las rocas encajantes. El reciente descubrimiento de emisiones de metano en el suelo marciano podría tener un origen inorgánico, pero también podría estar relacionado con reductos de vida bajo el suelo de Marte que, como el caso de Las Cruces, tendrían un sistema de vida quimiolitotrófico. ●

Agradecimientos.

El estudio del depósito de Las Cruces se realiza en el marco del proyecto SEDI CGL2011-23207. Agradecemos a Cobre Las Cruces, especialmente a Iván Carrasco, Juan Carlos Baquero y Antonio Francos, su apoyo en la realización de este estudio. También agradecemos a Ricardo Amils, Nuria Rodríguez y Monika Oggerin su ayuda en el campo de la geomicrobiología.

Más información en:

Amils, R., Fernández-Remolar, D., Parro, V., Rodríguez-Manfredi, J.A., Oggerin, M., Sánchez-Román, M., López, F.J., Fernández-Rodríguez, J.P., Puente-Sánchez, F., Briones, C., Prieto-Ballesteros, O., Tornos, F., Gómez, F., García-Villadangos, M., Rodríguez, N., Omeregíe, E., Timmis, K., Arce, A., Sanz, J.L. y Gómez-Ortiz, D. (2014). Río Tinto: A Geochemical and Mineralogical Terrestrial Analogue of Mars. *Life*, 4, 511-534.

Tornos, F., Velasco, F., Menor, C., Delgado, A., Slack, J.F. y Escobar, J.M. (2014). Formation of Recent Pb-Ag-Au Mineralisation by Potential Subsurface Microbial Activity. *Nature Communications*, 5, p. 4600.

Tornos, F., Velasco, F., Miguelez, N.G. y Escobar, J.M. (2013). Polyphase secondary alteration and the formation of complex Cu and Pb-Ag-Au-rich assemblages, Las Cruces copper deposit, SW Spain. *Mineral deposit research for a high Tech World -12 th SGA Biennial Meeting 2013*, Vol. 2, Uppsala, SGA, 587-589.

Tornos, F., Velasco, F., Menor, C., Delgado, A. y Escobar, J.M. (2014). El Control Microbiológico de las Paragénesis Secundarias del Depósito de Las Cruces. *Macla*, 19.

Yesares, L., Sáez, R., Nieto, J.M., de Almodóvar, G.R. y Cooper, S. (2014). Supergene enrichment of precious metals by natural amalgamation in the Las Cruces weathering profile (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). *Ore Geology Reviews*, 58, 14-26.