

Estudio a nanoescala del reemplazamiento de siegenita y cobaltita-gersdorfitita por tennantita en el depósito de Co-Cu-(Ni-Ag) de Cerro Minado (Almería, España)

Amira Rosa Ferreira (1*), Isabel Boullosa (2), José María González-Jiménez (1), Lola Yesares (3), Rubén Piña (3), Idael F. Blanco-Quintero (4), Lorena Ortega (3), Carlos Pinilla (1), Isabel Fanlo (5), Dolores García (6), David Rodríguez (6), Raquel Vega (7), Fernando Gervilla (1,8)

(1) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, Avda. de las Palmeras 4, 18100, Armilla, Granada (España)

(2) Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Universidad Complutense, C/ Severo Ochoa 7, 28040, Madrid (España)

(3) Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis 2, 28040, Madrid (España)

(4) Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690, Alicante (España)

(5) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, Calle Pedro Cerbuna 12, 10009, Zaragoza (España)

(6) Atalaya Ossa Morena SL. Polígono Industrial Los Caños, Calle Caya, nave 207E, 06300 Zafra, Badajoz (España)

(7) Atalaya Mining, Minas de Riotinto, 21660, Huelva (España)

(8) Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18002, Granada (España)

*Corresponding author: amirarosa.ferreira.g@csic.es

Palabras Clave: Metales críticos, nanomineralogía, sistemas hidrotermales, alteración supergénica. **Key Words:** Critical metals, nanomineralogy, hydrothermal systems, supergene alteration.

INTRODUCCIÓN

Cerro Minado es un depósito de Co-Cu-Ni ubicado en Huércal-Overa, Almería, España. Geológicamente, se sitúa en la Sierra de Almagro, dentro del Complejo Alpujarride, en las Zonas Internas de la Cordillera Bética. En la base del Complejo Alpujarride se encuentra la Unidad Partalaoa compuesta, de base a techo, por: (1) filitas, micaesquistos y cuarcitas con yeso y metabasitas de edad Pérmico-Triásica (Fm. Filítico-cuarcítica) y (2) calizas y dolomías de edad Triásico medio a superior (Fm. Carbonatada) (Bertrán-Oller et al., 2012; Delgado-Raack et al., 2014). El depósito se encuentra en el contacto entre estas dos formaciones (Bertrán-Oller et al., 2012; Favreau et al., 2013), formando una mineralización estratoligada y, localmente, una densa red de vetas de tamaño milimétrico. Bertrán-Oller et al. (2012) propusieron que Cerro Minado es un depósito estratoligado y epigenético del tipo *Mississippi Valley Type* (MVT), mientras que Horn et al. (2021) lo clasificaron como un depósito estratiforme de Cu-Co (*Stratiform Sediment Hosted Copper*; SSHC). La mineralogía hipogénica predominante incluye cobaltita (CoAsS)-gersdorfitita (NiAsS), pirita (FeS₂), siegenita (CoNi₂S₄), carrollita [Cu(Co,Ni)₂S₄] y tennantita [Cu₆(Cu₄(Fe,Zn)₂)As₄S₁₃] (Bertrán-Oller et al., 2012). La posterior alteración supergénica formó minerales como eritrina [(Co,Ni)₃(AsO₄)₂·8(H₂O)], clinoclasa [Cu₃AsO₄(OH)₃], azurita [Cu₃(CO₃)₂(OH)₂], malaquita [Cu₂CO₃(OH)₂], auriacusita [FeCu(AsO₄)O] y reevesita [(Ni₆Fe₂(OH)₁₆(CO₃)₄·4(H₂O))]. Este trabajo se centra en el estudio a escala nanométrica de los intercrecimientos entre cobaltita, gersdorfitita y siegenita, reemplazados por tennantita.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por analogía con los depósitos tipo SSHC, la asociación de minerales hipogénicos que constituyen el depósito de Cerro Minado podría haber precipitado a partir de fluidos hidrotermales de temperatura entre los 250-385°C (El Desouky et al., 2009), sin embargo, son claramente epigenéticos encajados en dolomías como los yacimientos de tipo MVT. En este sentido, los nuevos datos de campo y laboratorio de Cerro Minado, así como en depósitos correlacionables de la región, sugieren que estos podrían definirse como un híbrido entre un depósito MVT y uno

SSHC (Yesares et al., 2024). La asociación mineral del depósito incluye dos eventos principales: en la primera etapa, precipitaron sulfoarseniuros de la serie cobaltita-gersdorfitita, acompañados por carrollita y siegenita, y, posteriormente, tennantita y calcopirita, formando agregados en cristales euhedrales y subhedrales (25-100 μm) diseminados en la dolomía (Fig. 1). Los análisis de la microsonda electrónica muestran que los sulfoarseniuros contienen hasta 43,10 wt.% de As, 22,27 wt.% de S, 23,01 wt.% de Co y 19,59 wt.% de Ni. La carrollita presenta hasta 38,30 wt.% de Cu, 33,21 wt.% de S, 16,71 wt.% de Co y 13,37 wt.% de Ni, mientras que la siegenita y la tennantita muestran una composición cercana a la estequiométrica (42,45 wt.% de S, 30,40 wt.% de Ni y 24,92 wt.% de Co, y 41,10-44,4 wt.% de Cu, 27,77-29,40 wt.% de S, 17,48-21,21 wt.% de As, respectivamente). En la segunda etapa, estos minerales primarios fueron reemplazados por minerales supergénicos (e.g., eritrina y clinoclasa). Observaciones a nanoescala, obtenidas con el microscopio electrónico de transmisión (TEM) en lamelas preparadas con haz iónico focalizado (FIB), revelan que los cristales de cobaltita-gersdorfitita contienen cristales nanométricos de pirita. El análisis detallado de estos contactos mediante imágenes *High-Angle Annular Bright-Field* (HAABF) y *Selected-Area Electron Diffraction* (SAED), así como imágenes de alta resolución (HRTEM) y sus correspondientes transformadas de Fourier (FFT) muestran que, a nanoescala, hay un desacople entre las estructuras de la cobaltita (ortorrómbica, $Pca2_1$)-gersdorfitita (cúbica, $P2_13$), de la pirita (cúbica, $Pa3$), de la siegenita (cúbica, $Fd\bar{3}m$) y de la tennantita (cúbica, $I\bar{4}3m$).

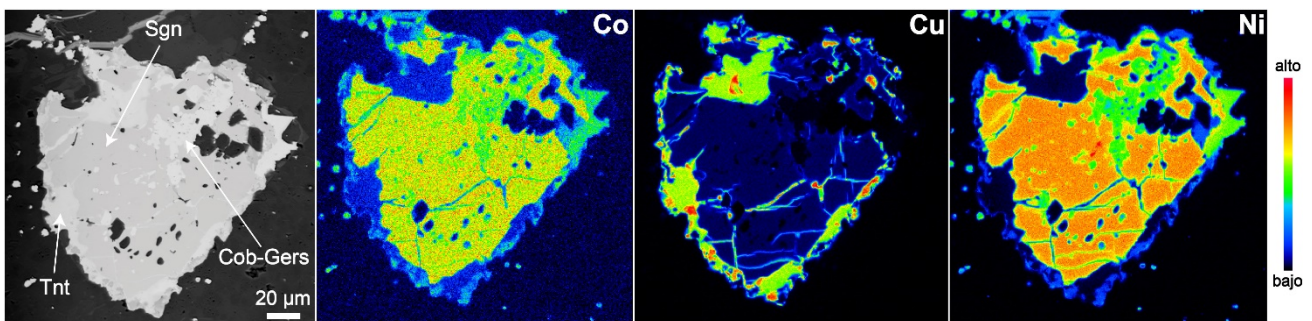


Fig 1. Cristal subhedral de siegenita (Sgn) y cobaltita-gersdorffita (Cob-Gers) con bordes de tennantita (Tnt).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio y el contrato predoctoral de AMRFG está soportado económicamente por el proyecto PROYEXCEL_00705 "Metallogeny of Cobalt in the Betic Cordillera (Ref.P21-00705)", financiado por la Junta de Andalucía-Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades y "FEDER una manera de hacer Europa". Adicionalmente, parte de los análisis fueron financiados por EXCITE Network.

REFERENCIAS

- Bertrán-Oller, O., Buireu-Cabello, F., Febrer-Morlá, M., Enrique-Gisbert, P. & Melgarejo, J.C. (2012): Mineralogía del Depósito de Cuesta Alta, Cerro Minado, Huércal-Overa, Almería. *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, **16**, 246-247.
- Delgado-Raack, S., Escanilla, N. & Risch, R. (2014): Mazas ocultas. Rastros de minería prehistórica en el Cerro Minado de Huércal-Overa (Almería). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología*, **24**, 13-44.
- El Desouky, H., Muchez, P. & Cailteux, J.L.H. (2009): Two Cu-Co sulfide phases and contrasting fluid systems in the Katanga Copperbelt, Democratic Republic of Congo. *Ore Geology Reviews*, **36**(4), 315-332.
- Favreau, G., Eytier, C., Eytier, J.R. & Escanilla, N. (2013): Cerro Minado, Huércal-Overa (Almería). *AFM - Le Cahier des Micromonteurs*, **121**, 246-247.
- Horn, S., Gunn, A.G., Petavratzi, E., Shaw, R.A., Eilu, P., Törmänen, T., Bjerkgård, T., Sandstad, J.S., Jonsson, E., Kountourelis, S. & Wall, F. (2021): Cobalt resources in Europe and the potential for new discoveries. *Ore Geology Reviews*, **130**, 103915.
- Yesares, L., González-Jiménez, J.M., Blanco-Quintero, I.F., Marín-Troya, P., Ferreira, A.R., Piña, R., Ortega, L., & Gervilla, F. (2024): El depósito de Cu-(Co) sedimentario Cabezo de La Mina (Santomera, Murcia). *Geotemas*, **20**, 759-762. ISSN: 1576-5172.