

Origen y contexto sedimentario de depósitos de cobre exótico Cenozoicos del Desierto de Atacama, norte de Chile

Origin and sedimentary context of Cenozoic exotic copper deposits from the Atacama Desert, northern Chile

A. Fernández-Mort^{1,2}, A.M. Alonso-Zarza^{2,3}, R. Riquelme¹ y E. Campos¹

1 Dpto. Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile. afdezmort@alumnos.ucn.cl; rriquelme@ucn.cl; edcampos@ucn.cl

2 Dpto. Petrología y Geoquímica, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/José Antonio Novais, 2, 28040 Madrid, España.

3 Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC, UCM), C/José Antonio Novais, 2, 28040 Madrid, España. alonsoza@ucm.es

Resumen: Este trabajo pretende describir los depósitos de cobre exótico presentes en la mina El Tesoro (norte de Chile) y determinar los procesos y el contexto sedimentario implicados en su formación. El Tesoro consta de dos depósitos de cobre exótico concordantes a la estratificación y separados entre sí por ~130 m de facies detríticas estériles. En el nivel mineralizado inferior, hospedado en conglomerados fluviales intercalados con calizas arenosas lacustres, el cobre se presenta como una masa entre los clastos de tonos verde azulados, constituida principalmente por crisocola, y de tonos negros, formada por "copper wad". En el nivel superior, alojado en brechas de abanico aluvial, la mineralización está presente como una masa homogénea de color verde entre los clastos y también como clastos angulosos retrabajados de crisocola. Ocasionalmente, en este depósito se observan envueltas irregulares de cobre alrededor de clastos no mineralizados. Este estudio permite confirmar que se trata de dos cuerpos exóticos sinsedimentarios formados por eventos y mecanismos diferentes. En el cuerpo inferior, el cobre fue transportado en solución y precipitó en facies gruesas de relleno de canal en zonas distales a la fuente de cobre. En el caso del depósito superior, los clastos mineralizados retrabajados indican que la erosión y el transporte físico también contribuyeron a su formación. Este cuerpo se habría originado más cerca de la fuente de cobre en comparación con el depósito inferior y, además, también podría haber sido formado parcialmente por procesos de pedogénesis.

Palabras clave: depósito de cobre exótico, Desierto de Atacama, crisocola, pedogénesis.

Abstract: This work aims to describe the exotic copper deposits from the El Tesoro copper mine (northern Chile) and to determine the processes and the sedimentary context involved in their formation. El Tesoro consists of two exotic-Cu bodies concordant with stratification and separated by ~130 m of barren detritic deposits. The lower exotic-Cu deposit is hosted in fluvio-alluvial conglomerates interbedded with lacustrine sandy limestones. Copper occurs as a homogeneous green (chrysocolla) and black (copper wad) paste between the clasts. The upper deposit is hosted in alluvial fan breccias. In this case, the mineralization consists of a homogeneous green paste and also reworked angular clasts of chrysocolla. Occasionally, it also occurs as coatings surrounding non-mineralized clasts. This work confirms that these deposits were syndimentary and formed during separate events and by different mechanisms. In the lower ore deposit, copper was transported in solution and precipitated within coarse-grained facies of channel-fill deposits in distal parts related to the copper source. However, the presence of mineralized reworked clasts in the upper ore deposit reveals that erosion and physical transport also played a role in its formation. This ore deposit was originated closer to the copper source and could have been partially formed by pedogenic processes.

Key words: exotic copper deposit, Atacama Desert, chrysocolla, pedogenesis.

INTRODUCCIÓN

El Desierto de Atacama es globalmente conocido por la comunidad geológica, entre otros aspectos, por sus numerosos yacimientos de cobre de clase mundial. Además de los clásicos depósitos de tipo pórfido cuprífero, esta zona alberga otro tipo de yacimientos menos conocidos: los depósitos de cobre exótico.

Los depósitos de cobre exótico son cuerpos mineralizados hospedados en facies continentales

detríticas gruesas y compuestos principalmente por óxidos, silicatos, cloruros y carbonatos de cobre. Se originan por el lixiviado de sulfuros de cobre hipógenos contenidos en pórfidos cupríferos, produciéndose soluciones acuosas ricas en cobre que pueden enriquecer el pórfido pre-existente (enriquecimiento supérgeno *in situ*) o removilizar el metal lateralmente (e.g. Münchmeyer, 1996). En este último caso, como ocurre en el Desierto de Atacama, las soluciones percolan a través de conglomerados cenozoicos o impregnan fracturas del substrato donde

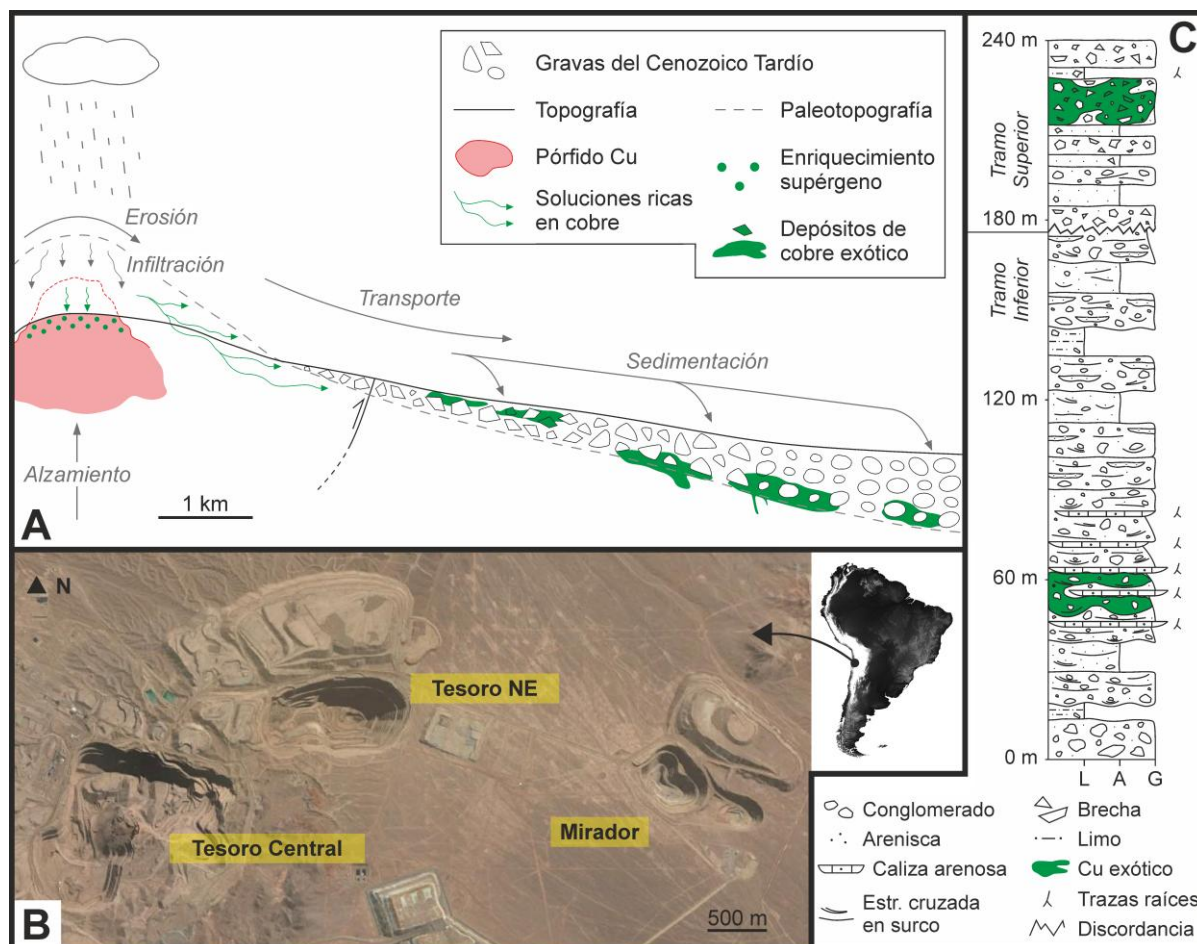


FIGURA 1. A. Representación esquemática del contexto de formación de los depósitos de cobre exótico y su relación lateral con un sistema de pórfido cuprífero (modificado de Münchmeyer, 1996). B. Imagen aérea de la mina de cobre El Tesoro mostrando sus tres cortas (Imagen: Google). C. Columna estratigráfica de El Tesoro Central mostrando la posición en la vertical de los dos cuerpos de cobre exótico.

precipitan minerales de cobre (e.g. Münchmeyer, 1996), formando así los yacimientos de cobre exótico (Fig. 1A).

Estos depósitos han sido tradicionalmente descritos tan solo desde el punto de vista de la geología económica, con fines de exploración y/o explotación. Existen muy pocos trabajos que describan e interpreten el contexto sedimentario de los depósitos que hospedan a estos cuerpos mineralizados (e.g. Mora et al., 2004).

El presente trabajo tiene como objetivo describir los depósitos de cobre exótico de la mina El Tesoro (norte de Chile) y determinar los procesos y el contexto sedimentario implicados en su formación.

CONTEXTO GEOLÓGICO Y SEDIMENTARIO

La mina de cobre El Tesoro (22°57' S, 69°5' O) está situada en el norte de Chile, aproximadamente a 160 km al NE de la ciudad de Antofagasta y a una altura de 2.995 m.s.n.m. El complejo minero está conformado por tres cortas (Fig. 1B): Mirador, Tesoro NE y Tesoro Central. Este trabajo se restringe a la última de las cortas nombradas, que denominaremos El Tesoro.

Geológicamente, el yacimiento El Tesoro se sitúa en la Cuenca Centinela. Se trata de una cuenca continental cenozoica de antearco, sometida a un importante control tectónico y emplazada en el límite occidental de la Cordillera de Domeyko o Precordillera Andina (Tapia et al., 2012; Riquelme et al., 2015). Consta de un relleno de hasta ~800 m de depósitos continentales cenozoicos (Mora et al., 2004; Tapia et al., 2012), que incluyen conglomerados y brechas de origen aluvial, entre los que se intercalan areniscas, lutitas y niveles de paleosuelos.

La corta El Tesoro expone una secuencia sedimentaria continental de ~240 m (Fig. 1C), de edad Eoceno Superior – Mioceno Inferior (Tapia et al., 2012). A grandes rasgos, la sucesión se compone de potentes paquetes de conglomerados y brechas que alternan con niveles arenosos y limosos y con calizas arenosas (Fernández-Mort et al., 2015). La secuencia puede dividirse en dos tramos, inferior y superior, separados por una discordancia angular y erosiva (Fig. 1C).

Siguiendo los criterios propuestos por Miall (1996) y dada la geometría y estructura interna de las facies

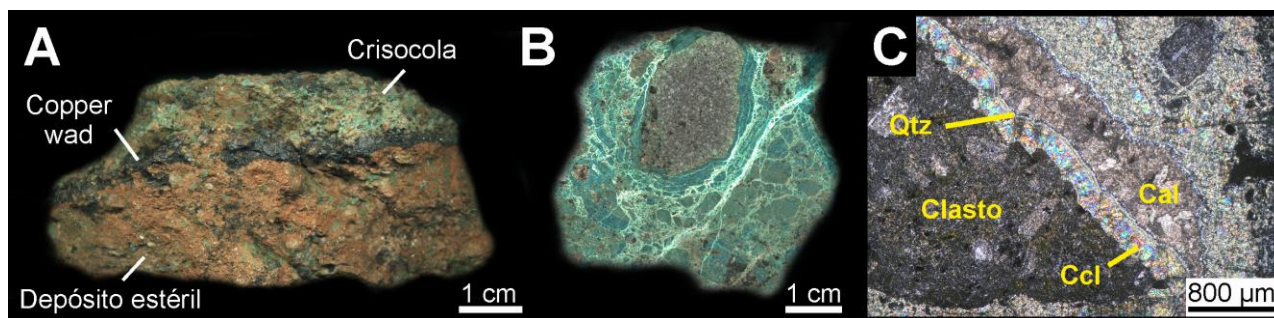


FIGURA 2. A. Muestra de mano del depósito de cobre exótico inferior. B. Envuelta irregular de cobre y venas de carbonato en muestra de mano del depósito de cobre exótico. C. Muestra del manto superior bajo microscopio óptico con nicole cruzados en el que se observa una cubierta alrededor de un clasto detrítico. La parte más interna de la envuelta está formada por crisocola (Ccl), mientras que la parte más externa se compone de cuarzo microcristalino (Qtz). El borde del clasto parece ser irregular. Calcita (Cal) ocupa el espacio restante.

detríticas descritas (Fernández-Mort et. al, 2015), el tramo inferior de la sucesión se interpreta como un sistema fluvial de alta energía con canales efímeros someros y depósitos de llanura de inundación. Las calizas arenosas indican la presencia de pequeños lagos muy someros con constantes aportes de materiales terrígenos (Fernández-Mort et., 2015). Por su parte, el tramo superior se interpreta como la parte media-proximal de un sistema de abanico aluvial. Los clastos angulosos revelan un corto transporte generado por flujos en masa de alta energía que depositaban paquetes de brechas con bases planas. Existen trazas de raíces y envueltas de arcilla alrededor de clastos que podrían indicar una pedogénesis incipiente.

MINERALIZACIÓN EXÓTICA

En la corta El Tesoro se explotan dos cuerpos o “mantos” mineralizados de cobre exótico: depósito inferior (hospedado en el tramo inferior) y depósito superior (hospedado en el tramo superior). Su potencia, de escala métrica, es irregular lateralmente, son concordantes con la estratificación y están alojados principalmente en facies de grano grueso. Les separan ~130 m de depósitos estériles y presentan claras diferencias en textura, petrología y mineralogía.

Depósito de cobre exótico inferior

El cobre está hospedado en las facies conglomeráticas intercaladas con las calizas arenosas. A escala de afloramiento, se presenta como masas homogéneas negras y verdes azuladas dispuestas entre los clastos. Los niveles mineralizados están en ocasiones truncados por erosión. Por lo general, las masas de tonos negros están a muro (en ocasiones son bases erosivas) de estos niveles y pasan gradualmente a tonos verde azulados hacia techo. La mineralización de tonos negros está compuesta por óxidos negros ricos en Mn, Fe y Cu, conocidos en el argot minero como “copper wad”. Las masas verde azuladas corresponden a crisocola ($[\text{Cu}_{2-x}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_x\text{H}_{2-x}[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_{4+n}\text{H}_2\text{O}]$), un silicato de cobre amorfo, masivo y vítreo (Gaines et al., 1997). También están formadas, en menor medida, por paratacamita $[(\text{Cu}, \text{Zn})_2\text{Cl}(\text{OH})_3]$ y atacamita $[\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3]$. En muestra de mano, la crisocola se

presenta como una pasta masiva verde entre los clastos (Fig. 2A), mientras que en el SEM presenta un bandeo muy definido marcado por las variaciones de Si y Cu.

Depósito de cobre exótico superior

En este caso el cobre está hospedado en facies brechoides. Presenta la misma mineralogía de cobre que el depósito inferior, aunque la paratacamita y la atacamita son más abundantes. En este caso, el cobre está presente como clastos angulosos retrabajados de crisocola y como una masa homogénea masiva, de color verde y que aparece entre los clastos. Ocasionalmente, el cobre también aparece formando envueltas alrededor de clastos estériles (Fig. 2B). Estas envueltas presentan morfología irregular y espesores muy variables (desde escala de μm hasta de 1 cm). Al microscopio óptico, se observa que la parte interna de estas envueltas está formada por crisocola, mientras que la parte más externa se compone de cuarzo microcristalino (Fig. 2C). Los bordes de los clastos están ligeramente corroídos por la crisocola (Fig. 2C). Por su morfología, estas envueltas se podrían asemejar a los pisolitos descritos en trabajos de calcretas (e.g. Alonso-Zarza y Wright, 2010). También se observan cementos de calcita, con cristales euhedrales y subhedrales, generalmente en mosaico y en ocasiones de tipo drusa. Estos cementos aparecen rellenando espacios vacíos y cortando todas las fases anteriores.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presencia de ~130 m de depósitos estériles intercalados entre los dos cuerpos de cobre exótico indica que estos se formaron en dos etapas de mineralización distintas. Se originaron asociados a depósitos sedimentarios con porosidades y permeabilidades relativamente altas (Mora et al., 2004), sin embargo, ambos niveles mineralizados presentan diferencias texturales que implicarían mecanismos de mineralización diferentes.

El cuerpo inferior se compone de minerales de cobre que precipitaron en la matriz y porosidad de las facies gruesas hospedantes (Mora et al., 2004; Nelson

et al., 2007). Esto indica que la totalidad del cobre fue transportado en solución. El hecho de que la mineralización tenga lugar entre los clastos de conglomerados correspondientes a depósitos de relleno de canal y que estos niveles mineralizados estén en ocasiones truncados por erosión revela el carácter sinsedimentario de la mineralización. Además, la intercalación de estos niveles con facies lacustres sugiere que se formó en una posición distal con respecto a la fuente de cobre (Mora et al., 2004).

En el caso del depósito superior, la masa homogénea masiva de color verde también se formó tras un transporte en solución y posterior precipitación en la matriz de las brechas hospedantes. Sin embargo, este cuerpo también incluye clastos mineralizados retrabajados, lo que implica una erosión y transporte físico de la zona supérgena ya consolidada del pórfido y/o de otro depósito exótico más cercano a la fuente. La angulosidad de estos clastos y el tipo de facies de las brechas hospedantes sugieren una posición más proximal a la fuente de cobre que en el caso del depósito inferior. Además, las similitudes morfológicas entre los posibles pisolitos de cobre de este cuerpo y aquellos descritos en calcretas, podrían sugerir un origen pedogénico para estas envueltas de cobre. Otros rasgos pedogénicos como posibles trazas de raíces observadas en muestra de mano (Fig. 2B) y, sobre todo, la presencia de paleosuelos cálcicos en niveles situados inmediatamente a techo de este depósito (Oerter et al., 2016), apoyan dicha actividad pedogénica en el cuerpo mineralizado superior.

Si bien es necesario realizar más estudios con mayor profundidad, *a priori* parece que existe una notable influencia de contexto sedimentario en la formación de los depósitos de cobre exótico. Por lo tanto, consideramos que una detallada interpretación sedimentológica podría ser una herramienta muy útil en exploración, ya que permitiría generar modelos de distribución para este tipo de yacimientos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la beca CONICYT-PCHA/Doctorado Nacional/2016-21160193 (Chile) y por los proyectos de investigación FONDECYT N°1121041 y Proyecto Anillos ACT-1203 (Chile), LMI-COPEDIM (Chile-Francia) y CGL2014-54828P (España). También agradecemos al personal de Antofagasta Minerals S.A. su colaboración.

REFERENCIAS

Alonso-Zarza, A.M. y Wright, V.P., (2010). Chapter 5. Calcretes. En: *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments, and Processes*. (Alonso-

Zarza, A.M. y Tanner, L.H., eds.). *Developments in Sedimentology*, Elsevier, Amsterdam, pp. 226–267.

Fernández-Mort, A., Riquelme, R., Alonso-Zarza, A.M., Campos, E., Tapia, M. y Sola, S. (2015). Sedimentary controls on the formation of gravel-hosted exotic-Cu deposits. Examples from El Tesoro Basin, northern Chile. En: *XIV Congreso Geológico Chileno*.

Gaines, R. V., Skinner, H. C. W., Foord, E. E., Manson, B. y Rosenzweig, A., (1997). *Dana's New Mineralogy*, Eighth Edition. John Wiley & Sons, Inc.

Miall, A., (2013). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer-Verlag Inc., Heidelberg, 582 p.

Mora, R., Artal, J., Brockway, H., Martínez, E. y Muhr, R., (2004). El Tesoro Exotic Copper Deposit, Antofagasta region, northern Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication 11*, p. 187-197.

Münchmeyer, C. (1996). Exotic deposits: products of lateral migration of supergene solutions from porphyry copper deposits. En: *Camus, F., Sillitoe, R.H. & Petersen, R. (eds.), Andean copper deposits: New discoveries, mineralization, styles and metallogeny. Soc. Eco. Geol., Spec. Publ. No. 5*, 43-58.

Nelson, M., Kyser, K., Clark, A., y Oates, C. (2007). Carbon isotope evidence for microbial involvement in exotic copper silicate mineralization, Huiniquintipa and Mina Sur, northern Chile. *Economic Geology*, 102(7), 1311-1320.

Oerter, E., Amundson, R., Heimsath, A., Jungers, M., Chong, G., y Renne, P. (2016). Early to Middle Miocene climate in the Atacama Desert of Northern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441, 890-900.

Riquelme, R., Campos, E., Gonzalez, R., Fernandez-Mort, A., Tapia, M. y Carretier, S. (2015). Eocene-Miocene Centinela basin evolution, records of palaeo-environmental/palaeo-climate conditions for supergene copper mineralization in the Precordillera, Atacama Desert. En: *13th SGA Biennial Meeting*.

Tapia, M., Riquelme, R., Marquardt, C., Mpodozis, C., y Mora, R. (2012). Estratigrafía y sedimentología de la Cuenca El Tesoro, Distrito Centinela (región de Antofagasta) y su relación con la mineralización exótica de cobre. En: *XII Congreso Geológico Chileno*.