

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOLOGÍA DEL SECTOR DUMBO, MINA GUANACO (CHILE) MEDIANTE MODELADO TRIDIMENSIONAL CON LEAPFROG GEO 3D

López Luciano; Galina Matías; Páez Gerardo N.; Jovic Sebastián; Permuy Vidal Conrado; Guido Diego M.

INREMI, CONICET, FCNyM-UNLP, Calle 64 Nro 3, La Plata (1900), Argentina.

Resumen. El yacimiento de oro de la mina Guanaco ubicado en la Segunda Región de Chile es un depósito epitermal de alta sulfuración, caracterizado por la presencia de un sistema de "ledges" sub-paralelos que se disponen en trenes estructurales ENE-OSO. La mineralización está contenida en rocas volcánicas y volcanoclásticas de edad Paleocena. El objetivo del trabajo consistió en generar una reconstrucción de la litología y de las mineralizaciones en un modelo tridimensional del sector Dumbo, donde se incluye la geología previa a la explotación del yacimiento mediante un open-pit de aproximadamente 500 m de diámetro. El modelado se construyó sobre la base de la información contenida en los logueos de la empresa y se controló con revisión de los testigos de las perforaciones a partir de secciones transversales a las estructuras separadas 50 m. El modelado geológico permitió obtener sólidos de cada una de las litologías, las alteraciones y las estructuras mineralizadas presentes en el sector Dumbo. Asimismo se elaboraron superficies de isoconcentraciones de oro del momento previo a la explotación. El modelado tridimensional puede constituirse como una poderosa herramienta para evaluar la geología y mineralizaciones no solo en proyectos de exploración avanzados sino en minas que están productivas o que ya han dejado de serlo.

Palabras clave. Epitermal, alta sulfuración, Modelado 3D.

Abstract. "Reconstructing the geology of Dumbo Sector, Guanaco Mine, (Chile) with a geological model in Leapfrog Geo 3D". The Guanaco mine is a gold ore located in the Chilean second region. Guanaco is a high sulfidation epithermal deposit, with sub-parallel ledges arranged in an ENE-OSO structural trend. The mineralization is hosted in volcanic and volcanoclastic Paleocene rocks. The aim of this contribution was to reconstruct the Dumbo sector lithology and mineralization with a three dimensional model. This model includes the geology of the deposit, previous to the mining operations. The Dumbo sector was mined by a 500 m diameter open-pit. The model was constructed using the log records provided by the actual owner company, and it was controlled by re-logging of

cutting in transversal cross-sections to the mineralized structures with 50 m spacing. Geological modeling allowed obtaining solids for each lithology, alteration and ledges in the Dumbo sector. Additionally, iso-surfaces of gold were interpolated, reconstructing the Au concentrations before mining operations took place. Geological modelling proves to be a very powerful tool to evaluate the geology and mineralization of an ore deposit, not only in advanced exploration projects but also in productive or in inactive mines.

Keywords. Epithermal, high sulfidation, 3D modelling.

Introducción. Para el estudio de la distribución espacial de los depósitos minerales, tradicionalmente se contaba con mapas (vista en planta) y una serie de secciones transversales (perfiles) para visualizar e interpretar el comportamiento de parámetros relevantes en profundidad (morfología y extensión de la mineralización, litología, alteración, anomalías geoquímicas, anomalías geofísicas, etc.). Sin embargo, en los últimos años, el advenimiento de programas ("software") específicos para la visualización y edición en tres dimensiones ha modificado sustancialmente la comprensión de los procesos y productos geológicos permitiendo la generación de modelos más complejos, dando lugar a un acercamiento más realista del comportamiento geológico de los depósitos minerales.

La empresa Austral Gold adquirió la propiedad de la mina Guanaco en el año 2007. Por entonces, el rajo Dumbo, el sector con mayores concentraciones de oro de la mina, ya había sido explotado mediante un "open-pit" de 500 m de diámetro. En el presente trabajo se aborda la metodología que permitió reconstruir tridimensionalmente la geología y mineralización del rajo Dumbo.

El yacimiento Guanaco es un depósito epitermal de alta sulfuración (Puig *et al.* 1988; Guido *et al.*, 2014) que se ubica en la Segunda Región de Chile, entre los 25°- 25°19' S y 69°23'- 69°42'O, a unos 2.700 m de altura (figura 1). El depósito fue descubierto en 1878 y ha tenido una producción total mínima documentada de 1,26 millones de onzas de oro hasta la fecha, pero se estima que en el depósito han sido extraídas aproximadamente un total de 2,59 millones de onzas de oro (Galina *et al.* 2014). La geología del distrito puede resumirse en tres importantes ciclos volcánicos separados por discordancias de carácter regional (figura 1): 1) la Formación Augusta Victoria (Cretácico Superior; García, 1967), 2) la Formación Chile-Alemania (Paleoceno Inferior - Eoceno Inferior; Chong, 1973), y 3) los Basaltos de Catalina (Eoceno Superior; Espinoza *et al.*, 2011). Los principales cuerpos mineralizados de la mina Guanaco se encuentran alojados en las unidades correspondientes a la Formación Chile-Alemania, constituida por productos volcáni-

cos representados por campos de lavas, sucesiones de rocas piroclásticas y complejos de domos y coladas dómicas, originados a partir de diversos aparatos volcánicos, y superpuestos en el tiempo y espacio (Permuy Vidal *et al.*, 2015; Páez *et al.*, 2015).

Actualmente Guanaco representa un depósito de 5 g/t Au de ley promedio, cuya metalurgia se ve favorecida por la oxidación de la mena. La mineralización está caracterizada por la presencia de un sistema de *ledges* sub-parallel, formados por *vuggy silica* y en menor medida vetas de cuarzo y enargita, ubicados en trenes estructurales con orientación general ENE-OSO (Jovic *et al.*, 2015).

Metodología. El distrito minero Guanaco cuenta con un total de 1966 perforaciones, de las cuales 320 corresponden al rajo Dumbo. La gran mayoría de las perforaciones fueron realizadas con aire re-

verso (RC) y el resto con diamantina. La información de estas perforaciones se encontraba originalmente almacenada en formato papel. Por lo tanto, la primera tarea fue el escaneo de la totalidad de los logueos de los pozos del distrito a fin de contar con un respaldo digital de la información.

En una segunda etapa se digitalizó el registro de las planillas de logueo, volcándolo en una base de datos digital. Sin embargo, estas descripciones fueron realizadas por diferentes geólogos, en diferentes fases y campañas de perforación realizadas por diferentes empresas y/o con distintos criterios, lo cual dificultó la homogeneización de la información. Al concluir esta etapa se comprobó que resultaba imposible unificar las litologías de las distintas fases de logueo, ya que se habían utilizado diferentes criterios para la clasificación de las unidades principales, o incluso algunas unidades no fueron identificadas en los logueos originales.

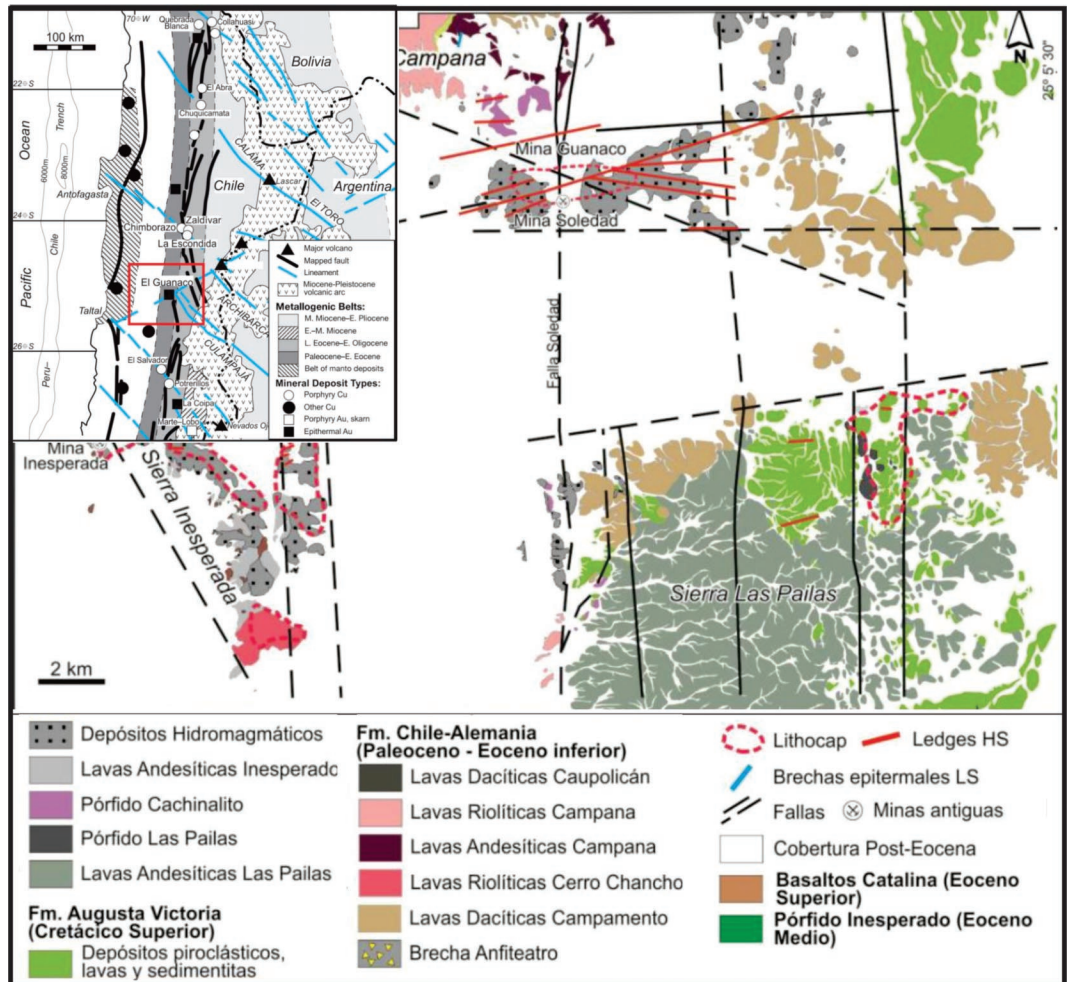


Fig. 1. Mapa de ubicación de la mina Guanaco y mapa geológico del distrito minero. (Modificado de Permuy Vidal *et al.*, 2015).

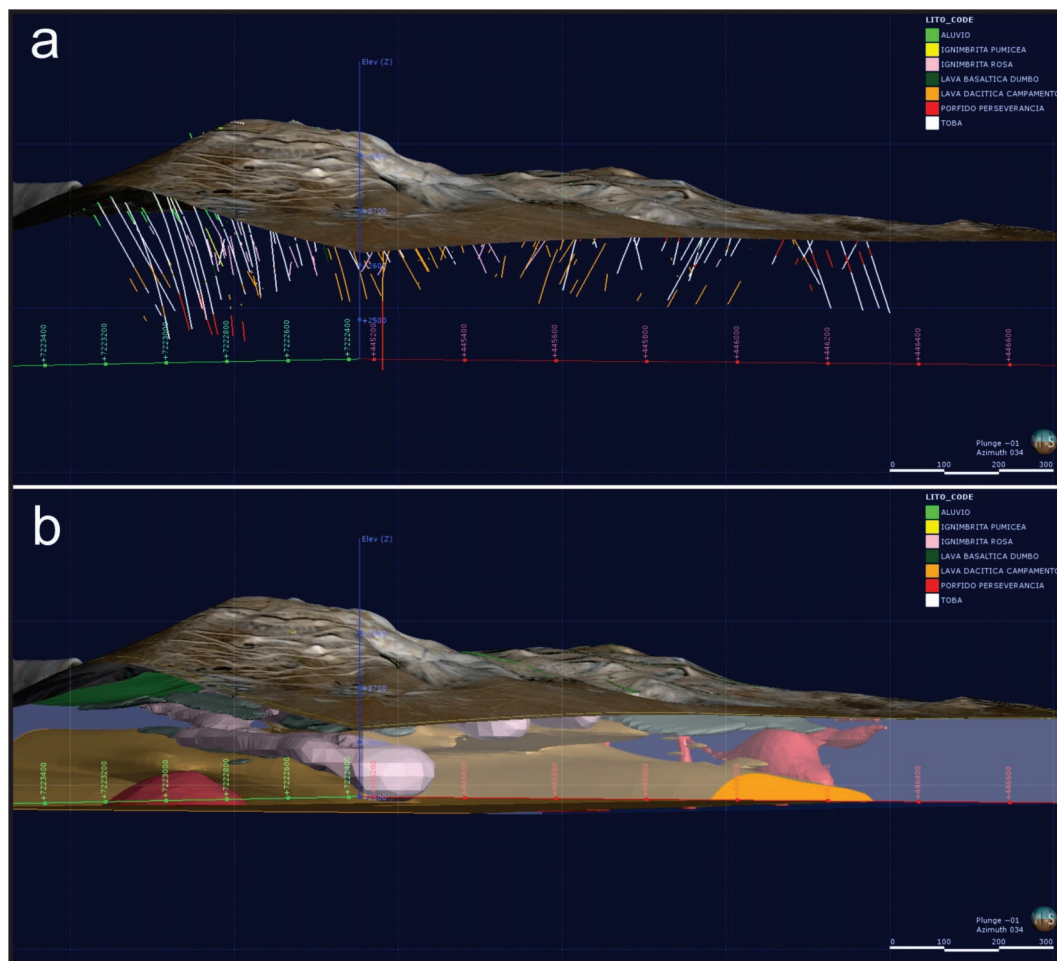


Fig. 2. A. Litología simplificada en las perforaciones correspondientes al Rajo Dumbo generadas a partir de la nueva descripción de los testigos de perforación. B. Modelado geológico de las principales litologías del rajo Dumbo.

Para subsanar este problema, se seleccionaron 13 perfiles espaciados cada 50 m, y con una orientación perpendicular a las estructuras mineralizadas, y se describieron nuevamente las litologías y mineralizaciones en cada uno de los pozos a partir de los recortes de perforación ("cutting") almacenados como testigos de las perforaciones. En sucesivas campañas se logró describir aproximadamente un 50% de los pozos del sector Dumbo. Estas secciones fueron interpretadas en el campo y posteriormente se georreferenciaron utilizando el software Leapfrog 3D.

Por medio del software se generó el modelado tridimensional de la litología y mineralizaciones. Para obtener la litología se digitalizaron los contactos en cada una de las secciones interpretadas, es decir que se dibujaron las líneas limitantes de cada litología. Estas líneas fueron integradas en 3D para generar las superficies que marcan los límites litológi-

cos de cada unidad. Finalmente, teniendo en cuenta la cronología de las unidades, se generaron los sólidos correspondientes a cada una de las litologías presentes en el distrito. La cronología es importante ya el mismo espacio no puede estar ocupado por dos litologías diferentes, por lo tanto es relevante identificar con claridad las relaciones temporales entre las distintas unidades, fundamentalmente cuando se modelan cuerpos intrusivos.

El modelo está contenido en una caja prismática, y se generaron dos sub-modelos, con dos límites superiores distintos, uno con la topografía actual del rajo y otro con la topografía original del yacimiento, previo a la apertura del open-pit y la explotación de la mineralización. La primera fue brindada por la empresa y es un modelo de elevación digital (DEM) del estado actual del relieve. La topografía original se desconoce ya que no hay registros de DEM previos a la explotación. Sin em-

bargo esta superficie fue reconstruida a partir de la interpolación de las cotas de las perforaciones realizadas previamente a la explotación del yacimiento. La gran cantidad de pozos localizados dentro de la zona a modelar, permitió estimar con un cierto grado de confianza la paleosuperficie del depósito.

Además de la información litológica, se pudo contar con los resultados de los análisis geoquímicos ICP (Au, Ag y Cu) de todas las perforaciones utilizadas en el modelo. En la mayoría de los casos las muestras fueron tomadas a lo largo de toda la longitud de las perforaciones, con longitudes de 1,5 o 2 m, dependiendo de la fase de perforación. Las muestras fueron analizadas por el laboratorio de la planta de la mina Guanaco. Estos datos fueron representados en tres dimensiones utilizando el mismo software, y superpuesto al modelo geológico.

Resultados. A partir la base de datos generada del análisis de los registros de los logueos y de las nuevas descripciones realizadas se generó un modelo litológico del depósito. Las litologías identificadas fueron agrupadas en siete unidades para su modelado (figura 2). La unidad basal son ignimbritas de la Formación Augusta Victoria, sobre ellas se depositaron lavas dacíticas Campamento, sobre yace la secuencia hidromagmática Dumbo, caracterizada por ignimbritas y surges (Ignimbritas). En esta unidad es intruida por un conjunto de filones capa de composición máfica (Lavas Dumbo), coronando esta secuencia se depositaron facies de ignimbrita pumíceas (Ignimbrita Pumícea). Intruye a la secuencia un pórfido andesítico (Pórfido Perseverancia). Finalmente, durante el Terciario y el Cuaternario, se depositaron depósitos aluviales (depósitos modernos). A fin de completar el modelado geológico se incluyó una unidad producto de alte-

ración hidrotermal, que corresponde a un nivel concordante dentro de la secuencia piroclástica, y está conformado por una ignimbrita con argilización avanzada con abundante presencia de alunita (Ignimbrita Rosa).

El modelado geológico permitió obtener sólidos de cada una de las litologías y alteraciones registradas, que pueden ser analizados independientemente, obtener sus espesores, volúmenes, distribución espacial, y además ser utilizados en su conjunto para evaluar relaciones entre las litologías, o bien establecer potenciales controles litológicos sobre la distribución de la mineralización, y de esta forma establecer modelos predictivos que ayuden a entender la génesis del depósito epitermal.

Asimismo para el sector estudiado, a partir de la geoquímica de todas las perforaciones se ha podido generar superficies de isotenes de oro asignando a la interpolación la tendencia estructural de los *ledges* y asumiendo que las estructuras son verticales. Los rangos utilizados fueron valores menores a 0,5, entre 0,5-1, entre 1-2, entre 2-5 y mayores a 5 g/t de Au (figura 3).

En los últimos años surgió la modelización dinámica donde las superficies y volúmenes no son explícitamente definidas sino definidas matemáticamente como isovalores en un campo escalar determinado como funciones de interpolación global (Calcagno *et al.*, 2008; Jessell *et al.*, 2014). El modelamiento implícito puede utilizarse para interpolar valores numéricos (ej. análisis químicos) e información no-numérica (litologías, estructuras). La vinculación directa entre los datos y la interpretación tridimensional es una de las mayores ventajas del modelamiento implícito, asimismo es un modelado dinámico donde nueva información es fácil y rápidamente anexada al modelo para lograr su actualización (Mortimer, 2010). Además permite el modela-

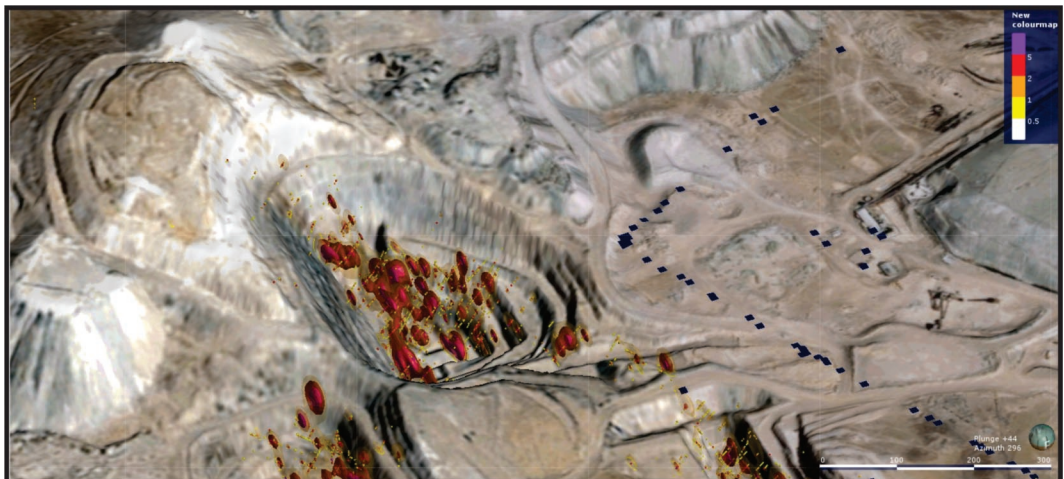


Fig. 3. Isosuperficies correspondientes a los valores de Au del rajo Dumbo previos a la explotación de la mina.

do con múltiples hipótesis de trabajo modificando algunos parámetros como el peso de las tendencias estructurales, o interpolaciones isotropas o anisotropas (Vollger, 2015). Otra ventaja de los modelados implícitos es su reproducibilidad, requerida para la cuantificación de la imprecisión de los modelados 3D.

Con el fin de establecer un modelo geológico del depósito mineral estudiado se elaboró un modelo geológico 3D combinando modelamiento explícito e implícito. Para la litología se usó modelamiento explícito, mientras que para los análisis químicos se utilizó modelamiento implícito. Esta decisión fue tomada debido a que las litologías fueron logueadas a partir de *cutting*, donde las rocas se encontraban con un variable grado de alteración hidrotermal que cuando era intenso impedía la identificación de la roca original. Es por ello que la interpretación de las litologías fue realizada directamente en secciones al momento del logueo, lo que permitió establecer relaciones laterales. Para los análisis geoquímicos se utilizó modelamiento implícito lo que permitió evaluar el comportamiento de las interpolaciones con un comportamiento isotropo y contrastarlo con interpolaciones que son afectadas por las direcciones de los trenes estructurales y las orientaciones de los "ledges".

Conclusiones. La herramienta de modelado tridimensional permitió reconstruir la información geológica de un sector donde hoy tanto las rocas como la mineralización han sido removidas. Esta herramienta puede constituirse como una fuente de información muy valiosa para minas que están productivas o que ya han dejado de serlo. Esta información, reestablecida a partir de la información de los logueos y de la reinterpretación de los testigos puede ser utilizada para mejorar los esfuerzos de exploración, identificar los patrones que caracterizaron las zonas de las mejores leyes del depósito para lograr un entendimiento de los controles que determinaron la concentración mineral.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado en el marco del trabajo de Tesis Doctoral que el Lic. Matías Galina está realizando en La Universidad Nacional de La Plata con apoyo de CONICET y la Empresa Austral Gold. Se quiere dejar expreso agradecimiento a la empresa Austral Gold por permitir el acceso a los datos utilizados en la presente contribución. Además se agradece profundamente a Aranz Geo por brindar una licencia académica para la utilización del software Leapfrog GEO 3D.

BIBLIOGRAFÍA

Calcagno, P., Chilès, J. P., Courrioux, G. and Guillen, A., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge: part I. Modelling method coupling 3D potential- field interpola-

tion and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 171: 147–157.

- Chong, G. 1973. Reconocimiento Geológico del área Catalina-Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta, provincia de Antofagasta. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 1-284. Santiago de Chile.
- Espinoza, F.; Matthews, S.; Cornejo, P. y Venegas, C. 2011. Carta Catalina, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 129: 63 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Galina, M., Guido, D., Jovic, S., Peralta C. y Kasaneva, S. 2014. Historia Productiva del Yacimiento aurífero El Guanaco, Desierto de Atacama, Chile. XIX Congreso Geológico Argentino. Córdoba, Actas CD.
- García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. En Symposium sobre el Geosinclinal Andino, Sociedad Geológica de Chile 3: 138.
- Guido, D.M., Jovic, S.M., Galina, M., Peralta, C., Mendiz, C., Sastre, L. y Kasaneva, S. 2014. Caracterización del depósito epitermal de alta sulfuración El Guanaco, Antofagasta, Chile. XIX Congreso Geológico Argentino, Actas CD.
- Jessell, M., Aillères, L., Kemp, E. De, Lindsay, M., Wellmann, F., Hillier, M., Laurent, G., Carmichael, T. y Martin, R., 2014. Next generation three-dimensional geologic modeling and inversion. SEG Special Publication 18: 261-272.
- Jovic, S. M., Guido, D. M., Páez, G. N. y Galina, M. 2015. Marco tectónico y estructural del depósito epitermal de alta sulfuración El Guanaco, Antofagasta, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno, Actas CD. La Serena.
- Mortimer, S., 2010. Implicit modeling—a new era in geological evaluation? En: Castro, R., Emery, X. y Kuyvenhoven, R. (Eds.), Proceedings of the 4th International Conference on Mining Innovation. Santiago, Chile.
- Páez, G., Permuy Vidal, C., Jovic, S., Guido, D., Osorio, J., y Kasaneva, S. 2015. Depósitos hidromagmáticos en la Faja Paleocena de la Región de Antofagasta: Ejemplos del Distrito Minero El Guanaco. XIV Congreso Geológico Chileno, Actas CD. La Serena.
- Permuy Vidal, C., Páez, G., Guido, D., Jovic, S., Galina, M., y Osorio, J. (2015). Geología y mineralizaciones asociadas en el Distrito Minero El Guanaco. In XIV Congreso Geológico Chileno, Actas CD. La Serena.
- Puig, A., Díaz, S. y Cuitiño, L. 1988. Sistemas hidrotermales asociados a las calderas en el Arco Volcánico Paleógeno de la Región de Antofagasta, Chile: Distritos El Guanaco, Cachinal de la Sierra y El Soldado. *Revista Geológica de Chile*, 15 (1): 57-82.

Vollgger, S. A., Cruden, A. R., Ailleres, L., and Cowan, E. J. (2015). Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia. *Ore Geology Reviews*, 69, 268-284.