



Tectónica regional y metalogénesis asociada al emplazamiento de la franja de pórfidos cupríferos cretácicos del norte de Chile (28°-30° S)

Christian Creixell^{1*}, Javier Fuentes², Hessel Bierma³, Esteban Salazar¹

1. Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile.

2. Anglo American Chile, Av. Pedro de Valdivia 291, Piso 4, Providencia, Santiago, Chile.

javier.fuentes@angloamerican.com

3. Exploraciones Mineras Andinas S.A., Av. Apoquindo 4775 – of 602, Las Condes, Santiago, Chile

Mail: christian.creixell@sernageomin.cl; esteban.salazar@sernageomin.cl; hbier001@em.codelco.cl

Resumen. Pórfidos cupríferos de edad cretácica en el norte de Chile, entre las latitudes de Vallenar y La Serena (28°-30° S) se encuentran estrechamente asociados a las unidades volcánicas de la misma edad, que en esta área corresponden a las formaciones Punta del Cobre, Cerrillos y Viñita. Estos pórfidos se distribuyen a lo largo de dos franjas discontinuas, una occidental, con edades principales entre 112 y 108 Ma, y una franja oriental, con edades entre 92 y 87 Ma. En ambos casos, los rasgos geológicos permiten definir dos metalotectos estructurales. El más antiguo de ellos corresponde a la rama oriental del Sistema de Fallas de Atacama, reactivado de manera transpresiva durante el Cretácico inferior alto. El más joven de los metalotectos corresponde al sistema de fallas inversas Agua de los Burros-Las Cañas-El Torito, que presenta actividad compresiva durante la fase compresiva peruana, en el Cretácico superior.

Palabras Claves: pórfidos, Cretácico, metalogénesis, Fase Peruana.

1 Introducción

Los yacimientos de tipo pórfido cuprífero han representado históricamente una de las mayores fuentes de mena de Cu en la minería de los Andes centrales del Sur. Gran parte de la exploración y explotación, y por ende, de la información geológica ha estado concentrada en yacimientos de gran volumen, especialmente de edades Eoceno y Mioceno. En esta contribución, se presentan nuevos antecedentes geológicos acerca de la edad, contexto tectónico y estratigráfico y génesis de yacimientos de pórfidos cupríferos de edad cretácica inferior y superior, que se distribuyen de manera importante entre las latitudes de Copiapó y La Serena.

A lo largo del norte de Chile, diferentes autores han descrito la presencia de cuerpos intrusivos epizonales mineralizados del Cretácico Inferior alto y Superior, con mineralización de cobre; ejemplos de ellos son los yacimientos Inca de Oro (Cornejo *et al.*, 2006), Dos Amigos (Maksaev *et al.*, 2010) y Andacollo (Munizaga *et al.*, 1985; Reyes, 1991). Por otra parte, cuerpos intrusivos del mismo tipo, con edades del Cretácico Inferior alto, han sido descritos recientemente en la literatura (Creixell *et*

al., 2012; Morelli, 2008). En esta contribución se presentan nuevos antecedentes de edad de pórfidos cupríferos cretácicos entre los 28° y 30° S, además de nuevos antecedentes acerca de la evolución tectónica regional asociada al emplazamiento de estos cuerpos intrusivos.

2 Geología de la franja cretácica entre los 28°00' y 30°00' S

La geología del cordón costero y la precordillera entre estas latitudes, está largamente dominada por un importante volumen de rocas volcánicas y plutónicas de edades desde el Cretácico Inferior al Paleoceno (Arévalo *et al.*, 2010; Creixell *et al.*, 2012, 2013, Emparán y Pineda, 2000). En general, las unidades geológicas se distribuyen en franjas N-S progresivamente más jóvenes de oeste a este (Figura 1). La vertiente oriental del cordón costero está constituida principalmente por rocas volcánicas de edad neocomiana (formaciones Punta del Cobre y Arqueros), intercaladas con calizas marinas. Estas unidades son en parte contemporáneas con una sucesión de rocas calcáreas de ambiente de plataforma (Grupo Chañarillo). Hacia los 29°30' S, una sucesión de rocas clásticas de ambiente continental (Formación Bandurrias), engrana lateralmente con facies volcánicas explosivas del techo de la Formación Punta del Cobre. Estas unidades están intruidas por abundantes plutones de composición máfica a intermedia, de edad cretácica inferior, emplazados en episodios discretos (143-138; 132-127, 121-116 Ma) a modo de complejos plutónicos estratificados, en parte controlados geoméricamente por trazas del Sistema de Fallas de Atacama. Un pulso más tardío de este plutonismo ocurrió a manera de cuerpos intrusivos de menor tamaño, alrededor de los 112-110 Ma, dentro de los cuales se han reconocido algunos cuerpos de pórfido con mineralización de Cu, asociados a zonas de alteración filica y argílica. Gran parte de la deformación exhibida por las unidades geológicas pre-albianas, está relacionada a un evento de transpresión sinistral a lo largo del Sistema de Fallas de

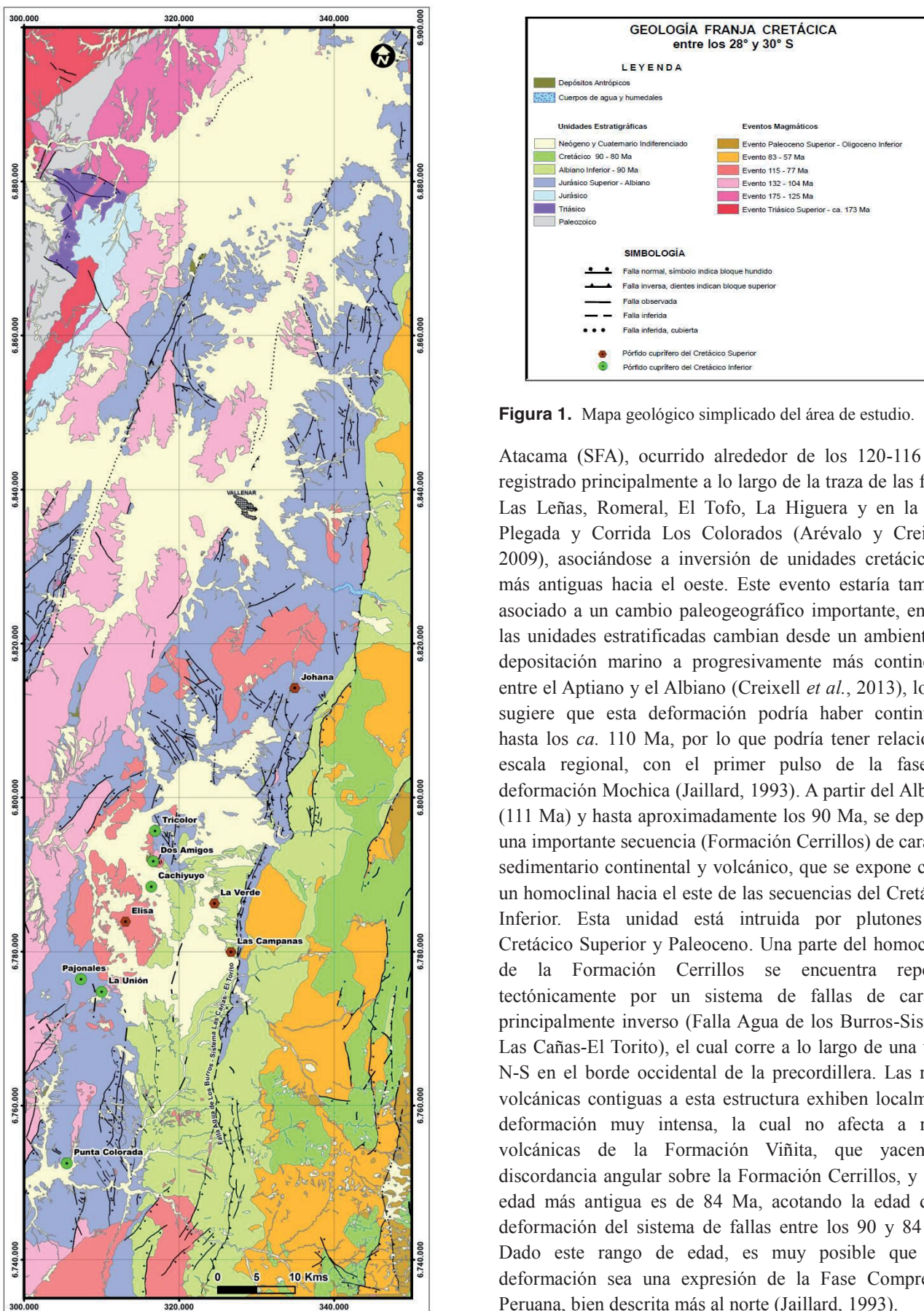


Figura 1. Mapa geológico simplificado del área de estudio.

Atacama (SFA), ocurrido alrededor de los 120-116 Ma, registrado principalmente a lo largo de la traza de las fallas Las Leñas, Romeral, El Tofo, La Higuera y en la Faja Plegada y Corrida Los Colorados (Arévalo y Creixell, 2009), asociándose a inversión de unidades cretácicas y más antiguas hacia el oeste. Este evento estaría también asociado a un cambio paleogeográfico importante, en que las unidades estratificadas cambian desde un ambiente de depositación marino a progresivamente más continental entre el Aptiano y el Albiano (Creixell *et al.*, 2013), lo que sugiere que esta deformación podría haber continuado hasta los *ca.* 110 Ma, por lo que podría tener relación, a escala regional, con el primer pulso de la fase de deformación Mochica (Jaillard, 1993). A partir del Albiano (111 Ma) y hasta aproximadamente los 90 Ma, se depositó una importante secuencia (Formación Cerrillos) de carácter sedimentario continental y volcánico, que se expone como un homoclinal hacia el este de las secuencias del Cretácico Inferior. Esta unidad está intruida por plutones del Cretácico Superior y Paleoceno. Una parte del homoclinal de la Formación Cerrillos se encuentra repetido tectónicamente por un sistema de fallas de carácter principalmente inverso (Falla Agua de los Burros-Sistema Las Cañas-El Torito), el cual corre a lo largo de una traza N-S en el borde occidental de la precordillera. Las rocas volcánicas contiguas a esta estructura exhiben localmente deformación muy intensa, la cual no afecta a rocas volcánicas de la Formación Viñita, que yacen en discordancia angular sobre la Formación Cerrillos, y cuya edad más antigua es de 84 Ma, acotando la edad de la deformación del sistema de fallas entre los 90 y 84 Ma. Dado este rango de edad, es muy posible que esta deformación sea una expresión de la Fase Compresiva Peruana, bien descrita más al norte (Jaillard, 1993).

2.1 Pórfidos dacíticos del Cretácico

A partir de los resultados recientes de cartografía geológica y nuevas edades U-Pb en circón, es posible reconocer al menos dos episodios mayores de emplazamiento de cuerpos tipo pórfido con mineralización de Cu, durante el Cretácico en la zona de estudio.

En primer lugar, se reconoce un grupo de intrusivos con edades del Cretácico Inferior, que se distribuyen en la vertiente oriental del cordón montañoso costero y que muestran estrecha relación espacial con las estructuras más orientales del SFA. Las edades U-Pb en circón de estos pórfidos varían entre 112 y 108 Ma principalmente (e.g. Punta Colorada, $109,7 \pm 0,9$ Ma; Cachiyuyo, $111,0 \pm 1,9$ Ma; La Unión, $112,0 \pm 2,1$ Ma, Tricolor, $108,5 \pm 3,4$ Ma). Datos recientes también permiten reconocer algunos pulsos intrusivos mineralizados, con edades levemente más antiguas (Pajonales, $116,6 \pm 4,0$ Ma) asociados a alteración filica y argílica más tardía (Morelli, 2008) y también pulsos más jóvenes en los alrededores de la localidad de Domeyko (Dos Amigos, $106,1 \pm 3,5$ Ma; $104,0 \pm 3,5$ Ma).

Un segundo episodio mayor de emplazamiento de pórfidos cupríferos ocurrió durante el Cretácico Superior, y corresponde a un grupo de intrusivos de composición dacítica que están emplazados en el miembro superior volcánico de la Formación Cerrillos. Alrededor de estas intrusiones se reconocen halos de alteración filica, silícea y argílica localizada. La distribución de esta franja de intrusivos es en general muy cercana y paralela al sistema de fallas inversas conformado por las fallas Agua de Los Burros, Las Cañas y El Torito. Las edades U-Pb en circón de estos pórfidos fluctúan entre 92 y 87 Ma (e.g. La Verde, $88,4 \pm 1,2$ Ma; Elisa, $92,4 \pm 1,1$ Ma; Johana o Cortadera, $87,4 \pm 1,2$ Ma; Las Campanas, $90,1 \pm 0,9$ Ma).

3 Relación metalotecto estructural – pórfidos cretácicos

3.1 Cretácico Inferior (120-110 Ma)

En base a las características geológicas regionales, se propone un metalotecto estructural, definido por las trazas más orientales del SFA. Estas estructuras presentan un desplazamiento dominante sinistral e inverso (transpresión sinistral), con una edad entre los 120 y 110 Ma (Arévalo y Creixell 2009). Los pórfidos del Cretácico Inferior se distribuyen alrededor de estas estructuras, aunque no se ha reconocido en ellos evidencias de deformación asociada a su emplazamiento.

3.2 Cretácico Superior (92-84 Ma)

El metalotecto estructural para este periodo corresponde al sistema estructural constituido por las fallas Agua de Los Burros, Las Cañas y El Torito (Fuentes, en prep.). Estas estructuras coinciden en gran parte con la distribución de rocas marinas del grupo Chañarillo y facies clásticas de la Formación Cerrillos, aunque no se reconocen evidencias directas de control estructural de depocentros por estas estructuras. Sin embargo, deformación compresiva con vergencia al oeste y geometría de rampa, con despegue de rocas calcáreas sobre rocas volcánicas de la Formación Cerrillos (90 Ma) ha sido bien reconocida en estas estructuras (Creixell *et al.*, 2013). La edad de esta compresión se encuentra bien acotada entre los 90 y 84 Ma, dado que rocas más jóvenes de la Formación Viñita (84 Ma), no se encuentran afectadas por esta deformación. La edad de esta deformación se traslapa con la edad de los pórfidos del Cretácico Superior (92-87 Ma), los cuales además se distribuyen estrechamente asociados a estas estructuras compresivas, lo cual sugiere que éstas habrían jugado un rol importante en el emplazamiento y ocurrencia de estos sistemas mineralizados, permitiendo definir a estas fallas como un metalotecto de interés exploratorio.

4 Discusión: Marco tectónico en la generación de pórfidos de Cu del Cretácico.

El magmatismo del Cretácico Inferior a Superior, muestra una evolución muy marcada hacia composiciones más diferenciadas con la edad. En el Cretácico Inferior, las composiciones andesíticas a basálticas son dominantes en las lavas, consistente además con los importantes volúmenes de dioritas y gabros de piroxeno (localmente con relictos de olivino) que son coetáneos con este volcanismo (Creixell *et al.*, 2012). Hacia alrededor de los 120-110 Ma, es posible reconocer un aumento del volcanismo explosivo, de composiciones más ácidas que sus predecesores. Esta tendencia hacia magmas más diferenciados se ve acentuada en las rocas volcánicas de las formaciones Cerrillos y Viñita. En forma paralela, las razones La/Yb (Figura 2) y Ta/Yb del volcanismo muestran un aumento entre los 120 y 110 Ma y posterior a los 90 Ma. Esto sugiere un mayor componente cortical en el magmatismo en esos períodos, los cuales coinciden con las etapas de deformación señaladas para los metalotectos estructurales relacionados a los pórfidos cretácicos. Sin embargo, las razones Sm/Yb para las rocas de composición más básicas a lo largo del Cretácico no muestran señales de aumento importante (<5), lo que podría implicar que a pesar del aumento de la signatura cortical de los magmas

con el tiempo, no se reconoce una impronta de engrosamiento cortical relevante asociado a la etapa transpresiva del Cretácico Inferior ni a la compresión del Cretácico Superior (90-84 Ma), a diferencia de lo observado, por ejemplo, en franjas de pórfidos eocenos, donde hay un evidente aumento en razones Sm/Yb, asociadas a engrosamiento cortical durante la Fase Incaica (Matthews y Cornejo, 2003). Trabajos recientes sugieren que en la latitud de la zona de estudio, la compresión del Cretácico Superior habría tenido un mayor desarrollo hacia el antepaís, con alzamiento y exhumación de bloques de basamento paleozoico (Merino *et al.*, 2013).

5 Conclusiones

La integración de estudios de geología regional y de metalogénesis y exploración, han permitido establecer dos metalotectos de interés exploratorio entre los 28° y 30° S, relacionados a pórfidos de Cu. Por una parte, para el Cretácico Inferior, se reconoce un metalotecto estructural definido por las estructuras más orientales del SFA, alrededor de los cuales se reconocen pórfidos de Cu con edades entre 116 y 104 Ma. Para el Cretácico Superior, el metalotecto estructural corresponde a el sistema estructural de las fallas Agua de Los Burros-Las Cañas-El Torito, que evidencia un evento compresivo alrededor de los 90 Ma, y al que se asocian espacialmente cuerpos de pórfidos cupríferos de edad similar (92-87 Ma). Estas asociaciones permiten establecer un avance para futuros conceptos geológicos aplicables a la exploración minera entre los 28° y 30° S, para un objetivo relativamente poco estudiado en la zona.

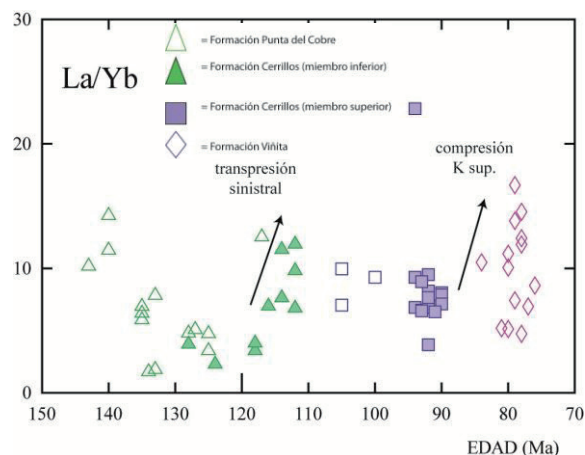


Figura 2. Variaciones de la razón La/Yb en función de la edad de las rocas en el Cretácico

Agradecimientos

Una porción importante de la información presentada en este trabajo es parte de la tesis de magister (en preparación) del segundo autor. El financiamiento de este estudio ha sido cubierto por fondos del Plan Nacional de Geología (PNG) de SERNAGEOMIN, durante el desarrollo de la cartografía del área Estación Chañar-Junta de Chingoles.

Referencias

- Arévalo, C.; Creixell, C. 2009. The Atacama Fault System and its role on the migration and deposition of Iron Oxide Copper Gold and Magnetite-Apatite ores: an evaluation from the Los Choros and Huasco valleys. 21th Colloquium on Latin American Geosciences. Alemania, p. 23-25.
- Arévalo, C.; Chavez, R.; Mourgues, A. 2010. Geología del área Vallenar-Domeyko, región de Atacama. Carta Geológica de Chile, n°43, 64 pp, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Cornejo, P.; Matthews, S.; Riquelme, R. 2006. Geología del área Inca de Oro, región de Atacama. Carta Geológica de Chile, n°102, 79 pp, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Creixell, C.; Ortiz, M.; Arévalo, C. 2012. Geología del área Carrizalillo-El Tofo, regiones de Atacama y Coquimbo. Carta Geológica de Chile, n°133-134, 82 pp, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Creixell, C.; Labbé, M.; Arévalo, C.; Salazar, E. 2013. Geología del área Estación Chañar-Junta de Chingoles, regiones de Atacama y Coquimbo. Carta Geológica de Chile, n°150, 91 pp, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Emparán, C.; Pineda, G. 2000. Hoja La Serena-La Higuera, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 18, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Jaillard, E. 1993. L'évolution tectonique de la marge péruvienne au Sénonien et Paléocène et ses relations avec la géodynamique. *Bull. Soc. géol. France*, Vol. 164 (6): 819 – 830.
- Maksaev, V.; Almonacid, T.; Munizaga, F.; Valencia, V.; McWilliams, M. & Barra, F. 2010. Geochronological and thermochronological constraints on porphyry copper mineralization in the Domeyko alteration zone, northern Chile. *Andean Geology* Vol. 37 (1): 144 – 176.
- Matthews, S.; Cornejo, P. 2003. First- and second-order tectonic segmentation and the timing of porphyry copper magmatism in northern Chile. *Congreso Geológico Chileno*, n°10, Actas en CD-Rom.
- Merino, R.; Salazar, E.; Mora-Franco, C.; Creixell, C.; Coloma, F.; Oliveros, V. 2013. Fluvial deposition and retro-arc volcanism in a Late Cretaceous foreland basin and the unroofing of the Early Cretaceous arc in the Chilean Frontal Cordillera at 28°30'S, Atacama Region. In *International Geological Congress on the Southern Hemisphere*. In press.
- Morelli, P. 2008. Estudio geológico del sistema de alteración hidrotermal de Pajonales, Provincia de Vallenar, Región de Atacama. Memoria para optar al título de geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 44 pp.
- Munizaga, F.; Huete, C. & Hervé, F. 1985. Geocronología K-Ar y razones iniciales ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de la "Faja Pacífica" de Desarrollos Hidrotermales". 4° Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, 4-357 – 4-379.
- Reyes, M. 1991. The Andacollo strata-bound gold deposit, Chile, and its position in a porphyry-gold system. *Economic Geology*, Vol. 86: 1301 –1316.