



RELACION GENETICA ENTRE LOS YACIMIENTOS ESTRATOLIGADOS DE Cu ("TIPO MANTO"), DE Cu-Fe±Au Y DE HIERRO DEL TIPO KIRUNA

WALDO VIVALLO* Y FERNANDO HENRÍQUEZ*

INTRODUCCION

Las rocas volcánicas del Jurásico y del Cretácico Inferior (Neocomiano), en particular aquellas del ámbito de la Cordillera de la Costa, representan un ambiente especialmente favorable para la ocurrencia de yacimientos de Fe del tipo Kiruna (magnetita-apatita), de Cu-Fe±Au y depósitos estratoligados de Cu, comúnmente denominados del tipo manto en la literatura. Los yacimientos de Fe presentan una amplia distribución de Taltal al sur, a lo largo de la Cordillera de la Costa, dando origen a la provincia metalogénica conocida como la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa (FFCC), la cual se extiende por alrededor de 600 km de largo y 50 km de ancho¹. Coincidiendo con la FFCC se presentan depósitos de Cu y Cu-Fe±Au, los cuales son especialmente abundantes en su parte norte, donde destacan los yacimiento Manto Verde y La Candelaria. Los yacimientos estratoligados de Cu de afinidad volcánica, son comunes en las rocas volcánicas jurásicas de la Cordillera de la Costa en la región de Antofagasta y en las unidades volcánicas del Cretácico Inferior en la zona central².

El objetivo del presente trabajo, basado en las relaciones espaciales y temporales entre estos tipos de mineralización, es proponer una génesis común, relacionada con el proceso de emplazamiento, en niveles altos de la corteza, de magmas ricos en Fe-P (magma de mena).

LOS YACIMIENTOS DE Fe

Yacimientos de magnetita-apatita o tipo Kiruna, son de ocurrencia común en la FFCC¹, ellos se presentan como cuerpos de mena maciza y diseminada en rocas volcánicas e intrusivas de edad jurásica a cretácica inferior, y en menor medida se conocen ocurrencias de cuerpos estratiformes de magnetita hospedados en rocas sedimentarias. La forma de los depósitos incluye cuerpos irregulares, tabulares de disposición vertical (vetas y diques) y tabulares concordantes con la estratificación. La mena consiste de magnetita, la que en parte, por efecto de procesos supérgenos, está reemplazada por hematita. Pirita y en menor cantidad calcopirita ocurren como diseminación y vetillas en los cuerpos de magnetita. Apatita y actinolita y en menor proporción cuarzo y calcita son los minerales de ganga más comunes. En general las rocas de caja están alteradas hidrotermalmente a rocas de actinolita, rocas albitizadas y rocas silicificadas y/o turmalinizadas; las que presentan una disposición zonal en torno a los cuerpos de mena³.

El mejor ejemplo de este tipo de yacimientos corresponde a las menas presentes en el distrito El Laco⁴, ubicado en la región andina de Antofagasta. En este distrito la mena de magnetita-apatita se emplaza en los flancos de un estrato-volcán de 2 Ma, originando cuerpos intrusivos de magnetita correspondientes a diques, un domo, y cuerpos tabulares en parte intercalados con flujos de lavas andesíticas, correspondientes a depósitos extrusivos (lavas y depósitos piroclásticos). Los cuerpos intrusivos se caracterizan por la presencia de texturas dendríticas y esferulíticas, interpretadas como resultado del brusco enfriamiento del magma de mena. Los flujos lávicos de magnetita presentan texturas y estructuras típicas, e.g. presencia de vesículas, zonas de techo escoriáceas, estructuras de flujos, mientras que los depósitos piroclásticos se caracterizan por una laminación fina. Rodeando las menas existen extensas áreas

* Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 1347 Santiago

* Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Santiago de Chile, Casilla 10233 Santiago

con rocas alteradas hidrotermalmente, las cuales en parte también contienen mineralización subordinada de hierro de origen hidrotermal⁵.

Basado en la comparación de los depósitos de la FFCC con los del distrito EL Laco (morfología de los cuerpos, relaciones de contacto con la roca de caja, estructura y características texturales, y geoquímica de la magnetita), se ha sugerido que la mayor parte de los cuerpos de mena de magnetita maciza de la FFCC fueron formados a partir del emplazamiento de un magma de mena¹, que desarrolló a su alrededor un halo de rocas alteradas hidrotermalmente.

LOS YACIMIENTOS DE Cu-Fe-Au

Con el descubrimiento y puesta en marcha de los yacimientos de Cu-Fe-Au La Candelaria⁶ y Manto Verde⁷, este tipo de depósito ha adquirido una creciente importancia y ha atraído la atención de las compañías de exploración. La mayor parte de estos depósitos se encuentran ubicados en el ámbito de la Cordillera de la Costa y en parte coinciden con la FFCC. En general, los depósitos más importantes están hospedados en rocas intrusivas o volcánicas de edad jurásica y cretácica inferior. Desde el punto de vista de su morfología, ellos corresponden a vetas, cuerpos de brecha (hidrotermales y tectónicas) y cuerpos estratiformes. Su mineralogía primaria se caracteriza por la presencia de abundante magnetita y/o hematita, y cantidades variables de pirita y calcopirita, mientras que molibdenita y arsenopirita ocurren en forma de trazas. Los minerales comunes en la ganga corresponden a actinolita, calcita y apatita. La roca de caja se presenta, en general, silicificada o con alteración del tipo cuarzo sericítica, actinolitizada y en algunos casos con una importante alteración potásica. Los cuerpos de mena presentan, en algunos depósitos, una zonación vertical, con un incremento de la razón Fe/Cu en profundidad⁸. Desde un punto de vista mineralógico, se observa un cambio desde magnetita en las partes más profundas a especularita en las zonas más superficiales de los depósitos⁸. Ejemplos de este tipo de mineralización lo constituyen los yacimientos del distrito de Monte Cristo (Jurásico Superior), La Candelaria y en gran medida los depósitos del distrito Punta del Cobre, y Manto Verde (Cretácico Inferior). En general, a todos estos depósitos se les atribuye un origen hidrotermal.

YACIMIENTOS ESTRATOLIGADOS DE CU

Los yacimientos estratoligados de cobre se distribuyen a lo largo de la Cordillera de la Costa. Aquellos asociados a rocas volcánicas, comúnmente denominados "tipo manto" y que se consideran en este trabajo, se presentan en la parte norte de la Cordillera de la Costa asociados a rocas jurásicas y en Chile central asociados a rocas volcánicas del Cretácico Inferior². Estos depósitos contienen mineralización diseminada de cobre, la que se distribuye en las partes más permeables de las coladas de lavas, dando lugar a cuerpos tabulares aproximadamente concordantes con la estratificación. Además, son frecuentes la presencia de brechas hidrotermales y vetas que dan origen a cuerpos mineralizados discordantes con la estratificación⁹. Los minerales de mena más comunes corresponden a calcopirita, bornita y calcosina, los cuales están acompañados por cantidades variables de pirita y especularita, calcita y cuarzo. Albitización, silicificación y carbonatización son los procesos de alteración más importantes relacionados con la formación de este tipo de depósitos. La albitización es particularmente importante en el depósito Mantos Blancos. Dataciones de los minerales de alteración y rocas alteradas en Mantos Blancos¹⁰ y en la mina Carolina de Michilla indican una edad de c.a. 150 Ma¹⁰. En el caso de los yacimientos de la zona más próximos a la costa, como por ejemplo Mantos de la Luna y Mantos del Pacífico, ellos están espacialmente asociados con depósitos vetiformes constituidos por la asociación magnetita-apatita-actinolita-calcopirita⁹ y se ubican en una posición estratigráfica más alta con respecto a estas vetas. En este caso las vetas tienen una edad similar a la del intrusivo que las contiene (142-165 Ma)⁹.

Si bien existe un consenso respecto del origen hidrotermal de estos depósitos, su génesis ha sido objeto de una prolongada discusión^{2,9}, sugiriéndose diversas ideas las cuales incluyen (a) un origen singenético relacionado a la actividad volcánica, (b) un origen epigenético relacionado con el metamorfismo regional que afectó a las rocas volcánicas y (c) un origen epigenético relacionado con intrusivos subvolcánicos.

RELACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL ENTRE LOS DEPÓSITOS DE Fe, Cu Y Cu-Fe ± Au

Los yacimientos estratoligados de Cu alojados en las rocas volcánicas jurásicas (186 ± 14 Ma) de la parte norte de la Cordillera de la Costa presentan una estrecha relación espacial y temporal con yacimientos vetiformes de Cu-Fe±Au alojados en las rocas plutónicas que intruyen a las lavas jurásicas⁹. En general, a lo largo del sector costero de la Región de Antofagasta los depósitos tipo manto están restringidos a las rocas volcánicas de la Formación La Negra, mientras que los depósitos vetiformes de Cu-Fe-Au que contienen apatita y actinolita están restringidos a los plutones que intruyen la secuencia volcánica. De acuerdo con los datos disponibles⁹, la edad de las rocas volcánicas no alteradas (186 ± 14 Ma), intrusivos que las cortan (165-133 Ma) y el contenido faunístico de sus intercalaciones calcáreas, son consistentes con una edad comprendida entre el Sinemuriano y el Kimmeridgiano. Los depósitos estratoligados de cobre contenidos en esta secuencia están cortados por diques e intrusivos subvolcánicos, estériles, con edades K-Ar comprendidas entre 133 y 154 Ma, sugiriendo una edad mínima jurásica superior para este tipo de depósito, lo cual es consistente con la edad obtenida para rocas alteradas en el yacimiento Mantos Blancos¹⁰ (c.a. 150 Ma, edad Rb-Sr roca total), edades Ar-Ar en plagioclasas de Mantos Blanco (c.a. 146 Ma) y edades Ar-Ar en albitas hidrotermales en la mina Susana del distrito Carolina de Michilla¹⁰. Los depósitos vetiformes de Cu-Fe±Au de los distritos Tocopilla, Guanillos, Naguayán y, Montecristo tienen edades de mineralización similares a la de los plutones que los hospedan (142 - 165 Ma)⁹. Al sur del distrito Montecristo se ubica el depósito estratoligado de Cu Santo Domingo, de forma irregular, subhorizontal, hospedado en rocas volcánicas andesíticas de la Formación la Negra. En este lugar la rocas volcánicas están intruidas por filones con edades K-Ar de 139-133 Ma y un plutón diorítico-granodiorítico de 165-159 Ma (K-Ar). Dataciones K-Ar para filones alterados (139 ± 5 Ma, 133 ± 4 Ma) y una andesita mineralizada (129 ± 4 Ma), estarían señalando una edad mínima para la mineralización⁵.

La congruencia entre las edades del plutonismo, vetas de Cu-Fe±Au alojadas en los plutones y las edades conocidas para las rocas alteradas relacionadas con la mineralización estratoligada, sugieren la existencia de un episodio regional de actividad hidrotermal y mineralización relacionado con el evento intrusivo del Jurásico Medio a Superior. Este episodio sería responsable de la formación de ambos tipos de yacimientos indicando además una relación genética, la cual es consistente con la distribución espacial y estratigráfica de ambos tipos de mineralización.

En general, las asociaciones de minerales de mena y de alteración de las rocas de caja en algunas vetas de Cu-Fe±Au, sugieren temperaturas de formación superiores a los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁹, mientras que datos de inclusiones fluidas en algunos yacimientos tipo manto sugieren temperaturas más bajas⁹. Esto es compatible con la generación de ambos tipos de depósitos durante un mismo evento y sus diferencias en la temperatura de formación reflejan sus distintos niveles de emplazamiento.

En el distrito Montecristo y sus alrededores es posible observar la zonación vertical de depósitos formados durante el Jurásico Medio a Superior⁸. Aquí se observa que los niveles más profundos (Mina Abundancia) corresponden a cuerpos macizos de magnetita, con textura gruesa y disseminación de calcopirita como mineral de mena y actinolita y apatita como minerales de ganga, alojados en un granitoide del Jurásico Medio, mientras que aquellos emplazados en niveles más superficiales (Minas Monte Cristo, San Rafael) corresponden a cuerpos macizos de magnetita fina, calcopirita, bornita, piritita disseminados y en vetillas y mayor cantidad de actinolita, tanto en la mena como en la roca de caja. En mina Julia, ubicada 15 km al NE de Monte Cristo, se observa un depósito vetiforme alojado en un granitoide, cuya parte más profunda consiste de magnetita con disseminación de calcopirita-piritita ± actinolita, gradando en la parte más superficial a una brecha hidrotermal formada por fragmentos de la roca de caja en una matriz de especularita con minerales oxidados de Cu. La mina Manto Verde, de similares características a la parte más superficial de mina Julia, se presenta asociada a una anomalía magnética que sugiere la presencia, en profundidad, de un cuerpo macizo de magnetita¹¹. Los ejemplos aquí mencionados sugieren una relación genética entre menas de magnetita-apatita y los depósitos de Cu-Fe±Au.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presencia de depósitos de magnetita-apatita, de edad reciente, no afectados por deformación y con un alto grado de preservación, como son los del distrito El Laco, constituye la principal evidencia de la existencia de un tipo especial de magma compuesto, principalmente, por Fe y P; capaz de dar origen a yacimientos de magnetita-apatita, comúnmente denominados tipo Kiruna. Dada sus características, las menas de EL Laco han servido como punto de comparación para la interpretación de la génesis de otros yacimientos de magnetita-apatita más antiguos y deformados, donde sus rasgos originales se conservan de manera fragmentaria¹. Las características texturales, estructuras y composición geoquímica e isotópica de las menas de hierro de la FFCC, similares a las descritas para los depósitos de El Laco, permiten suponer que estos magmas de menas fueron un rasgo relativamente común en la evolución de la corteza durante el Jurásico y el Cretácico inferior. El emplazamiento de este tipo de magma en niveles relativamente superficiales de la corteza origina cuerpos de mena de magnetita-apatita tanto de carácter intrusivo (diques, domos) como extrusivos (lavas, depósitos piroclásticos). Su emplazamiento está acompañado por una intensa actividad hidrotermal que produce rocas de actinolita ± magnetita, rocas albitizadas y silicificadas³. Las relaciones espaciales y temporales, descritas anteriormente en este trabajo, para los depósitos de Cu "tipo manto", vetas de Cu-Fe±Au, yacimientos de magnetita-apatita y de Cu-Fe±Au pueden ser explicadas a partir del emplazamiento y evolución de magmas de Fe-P en ambientes subvolcánicos donde ellos pueden dar origen a cuerpos intrusivos de magnetita-apatita, y a depósitos de Cu-Fe±Au o Cu en zonas más superficiales o laterales afectadas por la actividad hidrotermal (Fig. 1). La morfología de este grupo de depósitos (mantos, brechas hidrotermales, vetas, bolsones irregulares) está principalmente controlada por el nivel de emplazamiento del magma de mena y tipo de roca de caja. Por ejemplo, un emplazamiento superficial del magma de mena favorecerá la formación de depósitos extrusivos de magnetita-apatita, mientras que un emplazamiento profundo permite generar cuerpos intrusivos y, además, en zonas adyacentes depósitos hidrotermales asociados. Rocas de cajas intrusivas favorecerán la formación de cuerpos vetiformes, mientras que depósitos lávicos harán posible un desplazamiento de los fluidos por las zonas más permeables de las coladas favoreciendo la formación de depósitos tipo manto. La zonación vertical de los óxidos de Fe, con magnetita en profundidad y especularita en zonas superficiales, es el reflejo de un incremento en la fugacidad de oxígeno del ambiente, revelando una depositación en espacios abiertos conectados con la superficie. En consecuencia, aquellas épocas metalogénicas especialmente ricas en depósitos de hierro del tipo Kiruna son también potencialmente productivas para la generación de depósitos de Cu y Cu-Fe±Au.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el grant FONDECYT N° 1950571. Los autores agradecen las facilidades otorgadas por los Departamentos de Ciencias Geológicas de la Universidad Católica del Norte e Ingeniería de Minas de la Universidad de Santiago, las compañías mineras Mantos Blancos, Carolina de Michilla y Minera Logroño, y el Servicio Nacional de Geología y Minería.

REFERENCIAS

- 1.- Nyström, J.O.; Henríquez, F., 1994. Magmatic features of the iron ores of Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry, *Economic Geology*, Vol. 89, p.820-839.
- 2.- Camus, F., 1985. Los yacimientos estratoligados de Cu, Pb-Zn y Ag de Chile. In *Geología y recurso minerales de Chile*. Frutos, J. Oyarzún, R., Pincheira, M., editores. Vol. II, p. 549-635. Ed. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- 3.- Vivallo, W., Henríquez, F. Espinoza, S. 1995. Metasomatismo y alteración hidrotermal en el distrito ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 21, N°1, p. 75-88.
- 4.- Henríquez, F., Martín, R.F., 1978. Crystal-growth textures in magnetite flows and feeder dykes, El Laco, Chile. *Canadian Mineralogist*, Vol. 16, p. 581-589.

- 5.- Vivallo, W., Henríquez, F. Espinoza, S. 1991. Alteración hidrotermal en el complejo volcánico El Iaco, Norte de Chile. In Congreso Geológico Chileno, N° 6, Actas, p. 44-47, Viña del Mar.
- 6.- Ryan, P.J., Lawrence, A.L., Jenkins, R.A., Matthews, J.P., Zamora, J.C., Marino, E., Urqueta, I., 1995. La Candelaria copper-gold deposit, Chile. In Porphyry copper deposits of the American Cordillera, Arizona Geological Society Digest, 20, p.625-645.
- 7.- Vila, T., Lindsay, N., Zamora, R., 1996. Geology of the Manto Verde Copper Deposit, Northern Chile: a specularite-rich, hydrothermal-tectonic breccia related to the Atacama fault Zone. In Andean Copper Deposits: New discoveries mineralization styles and metalogeny. Special Publication N° 5, Soc. Econ. Geologist, p. 157-170.
- 8.- Espinoza, S., Véliz, H., Esquivel, J., Arias, J., Moraga, A., 1996. The cupriferous province of the coastal range, northern Chile. In Andean Copper Deposits: New discoveries mineralization styles and metalogeny. Special Publication N° 5, Soc. Econ. Geologist, p. 19-32.
- 9.- Boric, R., Díaz, F., Makshev, V., 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Boletín N° 40, Servicio Nacional de Geología y Minería, 246 p.
- 10.- Tassinari, C., Munizaga, F., Ramírez, R., 1993. Edad y Geoquímica isotópica Rb-Sr del yacimiento de cobre Mantos Blancos: relación temporal con el magmatismo jurásico. Revista geológica de Chile, Vol. 20-2, p. 193-205.
- 11.- Gelcich, S., Ugalde, H., 1997. Anomalia magnética dipolar en el distrito minero Los Pozos, Provincia de Chañaral: su relación con los yacimientos de Fe y Cu-Fe-Au. In Congreso Geológico Chileno, N° 8. Antofagasta.

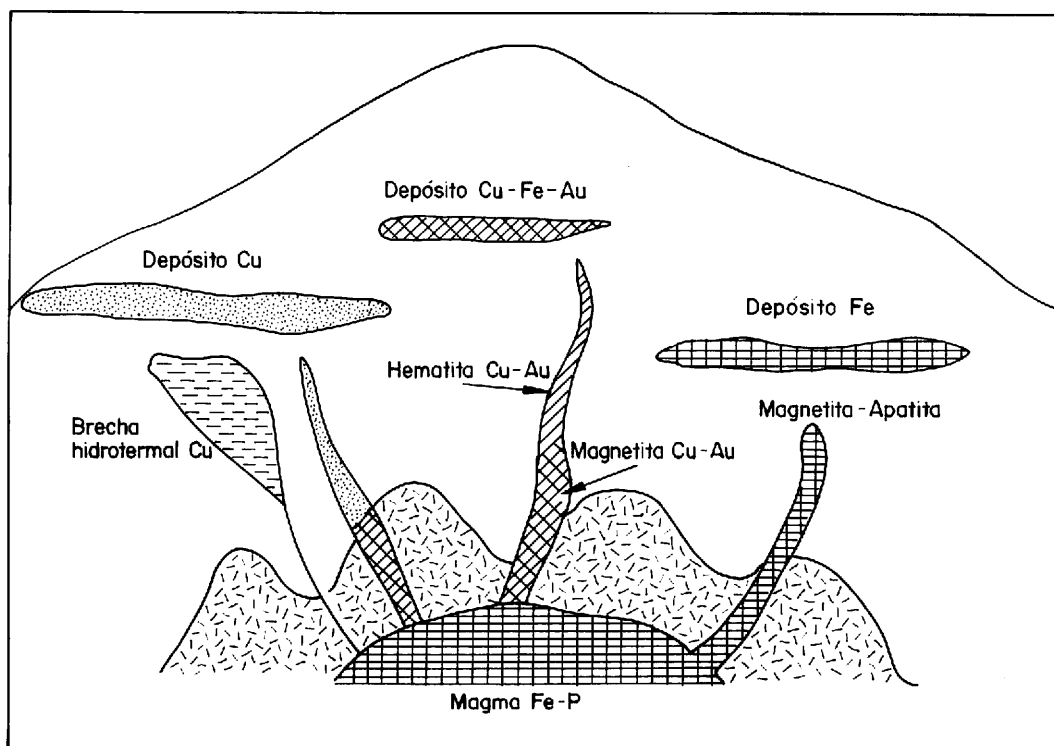


Fig. 1. Corte esquemático mostrando la relación espacio-temporal y genética de los depósitos estratoligados de Cu, Cu-Fe-Au y yacimientos de Fe tipo Kiruna (magnetita-apatita).