

EL DISTRITO FERRIFERO CERRO NEGRO NORTE, COPIAPO, CHILE

Waldo Vivallo¹, Fernando Henríquez², Sergio Espinoza³

¹ Servicio Nacional de Geología y Minería

² Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Santiago de Chile

³ Departamento de Geociencias, Universidad Católica del Norte

RESUMEN

El distrito ferrífero Cerro Negro Norte se ubica en la Cordillera de la Costa, 42 km al norte de la ciudad de Copiapó, formando parte de la provincia metalogénica conocida como la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa. Cuerpos de magnetita de textura maciza, brechoza y diseminada están hospedados en rocas volcánicas andesíticas, de edad jurásica superior-cretácica inferior. Los depósitos definen una franja mineralizada, de orientación norte-sur y aproximadamente 3 km de largo por 0,5 km de ancho. Antecedentes de terreno, características mineralógicas y geoquímica de la mena, sugieren que los cuerpos macizos de magnetita son el resultado del emplazamiento de un magma de mena (magnetita-apatita). El emplazamiento de los cuerpos de mena fue acompañado por una intensa actividad hidrotermal, responsable de la formación de brechas hidrotermales, cuerpos vetiformes de cuarzo-óxidos de hierro y alteración de las rocas volcánicas. Las rocas hidrotermalmente alteradas presentan una zonación mineralógica y química con respecto a las menas de hierro, con una zona interna de rocas actinolitizadas y un halo externo de rocas silicificadas con o sin turmalina. Relictos de rocas con alteración cuarzo-albita se encuentran incluidos en las rocas silicificadas. La actinolitización de las rocas volcánicas andesíticas implican un metasomatismo de Ca, Mg, Fe y P, mientras que la silicificación-turmalinización requiere de un importante aporte de sílice y volátiles, particularmente B, F y Cl. La distribución y relaciones de contacto entre las distintas unidades de rocas alteradas permiten inferir que contemporáneamente con la formación de los depósitos de hierro se produjo el halo interno de rocas actinolizadas

seguido hacia la periferia por otro de rocas con alteración albíta-cuarzo. El halo externo de rocas con alteración cuarzo-turmalina se sobrepone a las anteriores y representa el último evento de alteración relacionado con la formación de los depósitos de hierro del distrito.

Palabras Claves: Hierro, Alteración hidrotermal, Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa, Cerro Negro Norte, Copiapó.

ABSTRACT

The Cerro Negro Norte iron mining district is located in the Coastal Range, 42 km north of Copiapó city in northern Chile, and it is part of the Coastal Range Iron Belt metallogenic province. Magnetite ore bodies with massive, brecciated and disseminated textures are hosted by upper jurassic-lower cretacic andesites. The ore bodies define a north-south trending, 3 km long and 0.5 km wide mineralized belt. Field, mineralogical and geochemical data suggest that the massive magnetite bodies were originated by an ore magma (magnetite-apatite). The ore bodies emplacement was followed by intensive hydrothermal activity forming hydrothermal breccias, quartz-iron oxide veins and volcanic rock alteration. The hydrothermal altered rocks display a mineralogical and chemical zonation around the iron orebodies, with an internal zone of actinolized rocks and silicified rocks (with or without tourmaline) as an external halo. Some relicts of albite-quartz altered rock are found included in the silicified rocks. The actinolization implies a Ca, Mg, Fe and P metasomatism whereas the silicification-tourmalinization require an important input of silica and volatiles, specially B, F and Cl. The altered rocks units distribution and contact relationships suggest that, contemporaneous with the iron ore deposit formation, an internal halo of actinolized rocks, followed outward by albite-quartz altered rocks, was formed. The external quartz-tourmaline alteration overprints the earlier alterations and represent the last alteration event related to the district iron ore deposits genesis.

INTRODUCCION

El distrito ferrífero Cerro Negro Norte (Fig. 1) se encuentra ubicado en la Cordillera de la Costa, 42 km al norte de la ciudad de Copiapó. El distrito consiste en una serie de cuerpos de magnetita (macizos, brechosos y diseminados) distribuidos en una franja de orientación norte-sur, de aproximadamente 3 km de largo y un ancho varia-

ble entre 250 a 500 m. El cuerpo de mena más importante, y también el de mayor dimensión, se ubica en la parte norte del área y recibe la denominación de Abanderada; la parte de alta ley de este cuerpo se encuentra casi totalmente explotada y fue la principal fuente de recursos de mineral de hierro durante la explotación del distrito, la cual se encuentra, actualmente, paralizada.

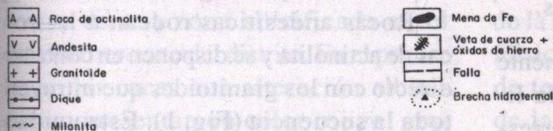
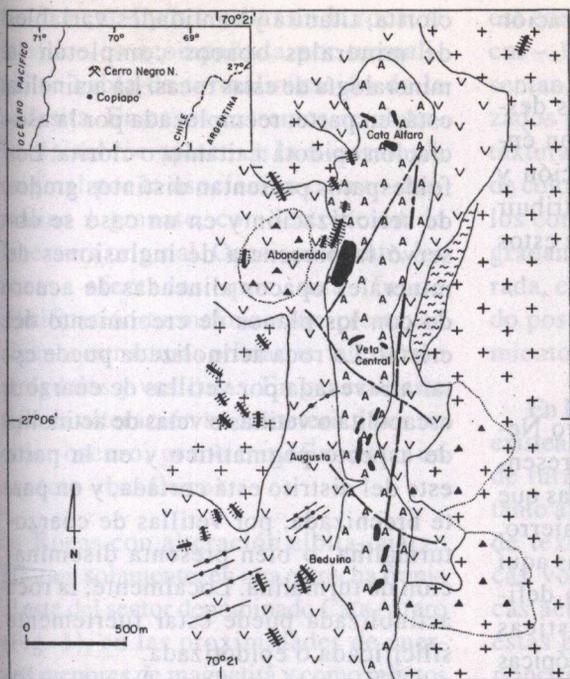


Fig. 1. Esquema geológico simplificado del distrito minero Cerro Negro Norte, modificado de Vicencio y Acosta (1985).

El distrito minero Cerro Negro Norte forma parte de la provincia metalogénica denominada Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa (FFCC) (Ruiz et al., 1965), que se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa constituyendo una franja de orientación nortesur de aproximadamente 600 km de largo ($26^{\circ} - 32^{\circ}$ Lat. S). Los yacimientos de hierro de la FFCC se emplazan principalmente en rocas volcánicas andesíticas de probable edad cretácica inferior (Segerstrom, 1968) y en menor proporción en rocas intrusivas espacialmente asociadas con las rocas volcánicas (Espinoza, 1990). Los yacimientos de hierro son del tipo magnetita-apatita y la mineralogía de la mena es dominada por la asocia-

ción magnetita-apatita-actinolita (Geijer, 1931). La roca de caja de los depósitos ferríferos ha sufrido una fuerte actinolitización.

La distribución de los yacimientos de hierro, a lo largo de la FFCC, es aproximadamente coincidente con el eje del arco magmático del Jurásico-Cretácico Inferior y se encuentran espacialmente asociados a la mega estructura conocida como Falla de Atacama.

Dataciones radiométricas (Zentilli, 1974; Pichon, 1981; Berg y Breitkreuz, 1983; Montecinos, 1983) indican edades comprendidas entre 100 y 130 m.a. como edad mínima para estos depósitos.

La asociación espacial y temporal de los depósitos de hierro con rocas volcánicas e intrusivas influyó decisivamente para que, desde muy temprano, se relacionara la génesis de estos yacimientos con la actividad magmática, sugiriéndose que ellos fueron formados por el emplazamiento de un magma de mena (magnetita-apatita) generado durante la evolución magmática del arco (Geijer, 1931; Brüggén, 1934; Henríquez, 1988; Espinoza, 1990; González, 1990; Lorca, 1990) o bien por la actividad neumatolítica-hidrotermal relacionada al magmatismo (Ruiz, 1943; Ruiz et al., 1965; Bookstrom, 1977; Menard, 1988). Oyarzún y Frutos (1982, 1985) sugieren la hidratación, por aguas meteóricas profundas, de un magma máfico esencialmente anhídrico como

principal mecanismo en la generación de estos depósitos.

El objetivo de este trabajo es describir la geología del distrito con énfasis en los procesos de alteración y mineralización, con el fin de contribuir al conocimiento de la génesis de estos depósitos de hierro.

LITOLOGIA

La geología del distrito Cerro Negro Norte se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas andesíticas que hospedan la mineralización de hierro. Las distintas unidades litológicas aquí diferenciadas (Fig. 1), han sido definidas en base a sus características petrográficas y texturales macroscópicas y en base a estudios petrográficos.

La roca de actinolizada, comunmente referida como meta-andesita en la literatura (e.g. Ruiz et al., 1965), corresponde a una roca color verde oscuro, de grano fino a medio y mineralógicamente dominada por la presencia de actinolita. Esta constituye la roca de caja de los depósitos de hierro y se distribuye como una franja de orientación norte-sur, ocupando la parte central del distrito. Sus contactos con las rocas andesíticas que la rodean son gradacionales, en particular hacia el borde oeste, disminuyendo paulatinamente la cantidad de actinolita. En su contacto con la mena de hierro la roca actinolizada presenta distintos grados de disseminación de magnetita y/o brechización por vetillas de magnetita. Al microscopio se presenta como una roca de textura equigranular, compuesta mayoritariamente por actinolita, cantidades variables de plagioclasa y de manera subordinada cuarzo y feldespato potásico. Epidota,

clorita, titanita y cantidades variables de minerales opacos completan la mineralogía de estas rocas. La actinolita está, en parte, reemplazada por la asociación epidota \pm titanita o clorita. Los feldespatos presentan distintos grados de sericitización y en un caso se observó la presencia de inclusiones de minerales opacos alineadas de acuerdo con los planos de crecimiento del cristal. La roca actinolizada puede estar atravesada por vetillas de cuarzo \pm escapolita o vetillas o vetas de actinolita de aspecto pegmatítico y en la parte este del distrito está cortada, y en parte brechizada, por vetillas de cuarzo-turmalina, o bien presenta disseminación de turmalina. Localmente, la roca actinolizada puede estar fuertemente silicificada o epidotizada.

Rocas andesíticas rodean a las rocas de actinolita y se disponen en contacto directo con los granitoides que intruyen toda la secuencia (Fig. 1). Esta unidad presenta un aspecto muy heterogéneo, variando desde zonas donde la textura porfídica original de la roca se encuentra preservada a zonas de grano muy fino, color blanquecino y textura de aspecto sacaroidal o aplítico, donde la roca ha sido afectada por una fuerte albitización (Vivallo et al., 1995a). La andesita, en sus partes mejor preservadas, es de color gris oscuro, con textura porfídica y fenocristales tabulares de plagioclasa, generalmente maclados, anfíbola, cuarzo y ocasionalmente feldespato potásico. La masa fundamental es de grano muy fino, dominada por la asociación feldespato-cuarzo-anfíbola, y cantidades menores de epidota, clorita y minerales opacos. Las andesitas pueden presentar distintos grados de silicificación, los que se evidencian por un aumento de la cantidad de cuarzo en la masa

fundamental y/o vetillas en la roca; si la sílice es acompañada por turmalina, se habla de turmalinización de la andesita. En casos extremos se observa el total reemplazo de la mineralogía original por la asociación cuarzo-turmalina \pm granate, con destrucción de la textura original. Ocasionalmente, las rocas afectadas por una fuerte silicificación-turmalinización, preservan algunas estructuras primarias, tales como amígdalas y vesículas. En general, este tipo de alteración se caracteriza por un color oscuro, grano muy fino, con un aspecto «basáltico».

Rocas con alteración albita-cuarzo afloran, solamente, en una estrecha franja al este del sector denominado Cata Alfaro (Fig. 1), en las proximidades de cuerpos menores de magnetita y como relictos dentro de una zona silicificada en el extremo noroeste del distrito. En el primer lugar, las rocas con alteración albita-cuarzo presentan un color rojizo, grano medio a fino y en algunos casos aspecto de traquita; los relictos del sector noroeste se presentan como rocas de color blanco, grano fino y aspecto aplítico. Al microscopio se observan constituidas por un entrecrecimiento de cuarzo-albita \pm turmalina como componentes principales. Se aprecia, además, la presencia de una serie de estructuras circulares constituidas por cuarzo, que podrían representar amígdalas de una lava original.

Las brechas hidrotermales son clasto soportadas y constituyen cuerpos de forma irregular, que se ubican a ambos lados de la franja central de rocas actinolizadas. Aquellas ubicadas al oeste de esta franja central corresponden a rocas andesíticas que han sido brechizadas y están constituidas por fragmentos angulosos de

esa composición y tamaño variable (<1 cm – 10 cm). Los fragmentos se presentan, en parte, fuertemente reemplazados por cuarzo y con relictos de la textura porfídica original. La matriz es de color oscuro y rica en anfíbola. Hacia los contactos estos cuerpos de brecha gradan a una zona fuertemente fracturada, con vetillas de actinolita, pasando posteriormente a roca sin fracturamiento.

En la parte sureste del distrito (Fig. 1) existen abundantes brechas hidrotermales de turmalina. La brechización afecta tanto a rocas intrusivas (stocks) félsicas de textura porfídica, como a las rocas volcánicas, incluyendo a las rocas actinolizadas. En todos los casos estas brechas son monolitológicas y, principalmente, clasto soportadas. Cuando la brechización afecta a los intrusivos félsicos, los fragmentos son angulosos, de textura porfídica, de hasta 20 cm de largo en la dirección de su eje de mayor longitud. Su aspecto varía desde una roca con fuerte fracturamiento y abundantes vetillas de turmalina, cuarzo y pirita, hasta brechas en que los clastos aislados se encuentran inmersos en una matriz de turmalina y cuarzo. En general estas brechas presentan fragmentos silicificados y diseminación de sulfuros, principalmente pirita, en la matriz y fragmentos. Algunos fragmentos presentan, además, diseminación de turmalina.

Las milonitas corresponden a un tipo de roca que se observa asociado a casi todos los yacimientos de hierro de la FFCC. En el distrito tienen una distribución muy limitada, encontrándose restringidos a una estrecha faja de dirección aproximada norte-sur (Fig. 1), en el sector este, en el contacto entre

las rocas volcánicas y la unidad de granitoide. Macroscópicamente, se presenta como una roca esquistosa con bandeamiento, de grano fino, que lateralmente grada al intrusivo. Al microscopio, se observa como una roca equigranular, esquistosa, compuesta mayoritariamente por cuarzo y cantidades menores de plagioclasa. La turmalina es subordinada y se presenta entrecrecida con cuarzo.

Los granitoides corresponden a rocas plutónicas equigranulares, de grano medio, de composición granodiorítica, que intruyen a las rocas andesíticas tanto al este como al oeste del distrito. La mineralogía presenta poca variación, siendo dominada por la asociación plagioclasa-cuarzo-anfíbola como minerales principales. La mayor diferencia mineralógica entre ambos sectores radica en la presencia de biotita en el intrusivo del lado oriental, el cual además presenta turmalina como un componente accesorio. En ambos casos clorita, epidota, titanita y minerales opacos corresponden a los minerales accesorios más comunes. La edad de estos intrusivos está pobremente definida y se les puede asignar, en base a determinaciones realizadas fuera del distrito, un rango de edad entre 103 y 112 Ma (Arévalo, 1995).

Numerosos diques de composición andesítica cortan a todas las unidades anteriormente mencionadas. En general, ellos presentan texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasa \pm anfíbola, en una masa fundamental cuarzo-feldespática de grano fino, conteniendo además anfíbola, clorita, titanita, epidota y minerales opacos. Estos diques son especialmente abundantes en la parte suroeste del distrito (Fig. 1), donde presentan un rumbo predominan-

temente noroeste. Diques aplíticos, subhorizontales, de escasa potencia (dm) y considerable extensión, cortan a la mena de hierro y sus rocas de caja en los sectores de Cata Alfaro y Abanderada.

MINERALIZACION

La mineralización presente en el distrito consiste principalmente en cuerpos macizos de magnetita, y en menor grado brechosos y diseminados, que ocupan la parte central, y vetas de cuarzo-óxidos de hierro (hematita > magnetita) con cantidades variables de calcita, turmalina y óxidos de cobre, que se ubican en la periferia del distrito (Fig. 1).

Los cuerpos macizos de mena de hierro se concentran en seis diferentes áreas. De norte a sur ellas son denominadas Cata Alfaro, Abanderada, Veta Central, Augusta, Beduino y Tres Clotos (Fuera de la Fig. 1); con excepción de Abanderada, que constituye el cuerpo de mayores dimensiones, el resto de las áreas anteriormente mencionadas se componen de varios cuerpos menores. La mena está constituida mayoritariamente por magnetita y cantidades menores de hematita (reemplazando a magnetita), actinolita y apatita. Localmente, algunos cuerpos contienen abundante diseminación y vetillas de sulfuros, principalmente pirita. Este mineral se presenta, ocasionalmente, como megacristales de hasta 0,5 cm de largo, diseminados en la magnetita. Además de las vetillas de sulfuros, la mena puede estar atravesada por vetillas más tardías de magnetita, magnetita-turmalina, actinolita, vetillas de cuarzo-escapolita, o cuarzo-feldespato y diques aplíticos y andesíticos.

De acuerdo con la morfología y textura de las menas de hierro, ellas se pueden dividir en tres tipos:

- a) Cuerpos macizos, tabulares, verticales a subverticales, de un par de metros de espesor, comunmente denominados vetas, tienen corridas de hasta algunas centenas de metros y sus contactos con la roca de caja pueden ser abruptos o presentar brechización.
- b) Cuerpos macizos, verticales a subverticales, de forma ovalada a irregular (en planta) y dimensiones variables; bien representados por el cuerpo de mena del sector Abanderada. Gran parte del sector de más alta ley de hierro de este cuerpo ha sido explotado, dejando un rajo de aproximadamente 400m de largo, 200m de ancho y 100m de profundidad. Una sección vertical, observable en la pared oeste del rajo, muestra claramente forma de domo. El contacto con las rocas de caja, en la parte superior del cuerpo, es nítido y estas presentan un sistema de fracturas tanto radiales como paralelas respecto al techo del cuerpo de magnetita. Ocasionalmente, como es el caso del sector Cata Alfaro, los cuerpos macizos pueden contener inclusiones de varios metros de diámetro, constituidas por calcita y cuarzo.
- c) Mineralización brechosa y diseminada se presenta, en general, rodeando a los cuerpos macizos de la mena. Su extensión es variable y la roca de caja se observa brechizada por un enrejado de vetillas de magnetita y en parte reemplazada por el mismo mineral. El aumento del grado de reemplazo de la roca de caja por magnetita y disminución

de la cantidad de vetillas, marca la presencia de mineralización diseminada.

- d) Cuerpos macizos subhorizontales, cuya forma y extensión son irregulares, con espesores que pueden alcanzar a un par de metros y contactos nítidos con la roca de caja. El mejor exponente de este tipo de cuerpo mineralizado se observa en el sector de Veta Central; en este lugar se puede apreciar en la roca de caja, relictos de la estratificación original de las rocas volcánicas, las cuales son atravesadas por numerosos diques andesíticos. Intercalados con las rocas volcánicas se observan cuerpos de magnetita, los que presentan la misma disposición subhorizontal definida por la estratificación de las rocas volcánicas. Entre los cuerpos de magnetita o bien entre estos y la roca de caja, se aprecian intercalaciones centimétricas, de color blanco, constituidas principalmente por dolomita, finamente bandeada, textura colorme y con bandas de magnetita intercaladas. En general, estos depósitos de carbonato rellenan fracturas que cortan a la mena de hierro y roca de caja.

En afloramientos marginales y de dimensiones restringidas, se presentan cuerpos de magnetita maciza, en parte brechizados, conteniendo abundantes amigdalas, de 2-3 mm de diámetro, rellenas con sílice opalina, de aspecto muy similar a lavas amigdaloidales.

Numerosas vetas de cuarzo-óxidos de hierro, ubicadas principalmente en la parte oeste del distrito, se encuentran rodeando a la mineralización de hierro. Estas vetas presentan un rum-

bo preferencial noroeste, y no sobrepasan los 50 cm de espesor y unos 20 – 30 m de largo; algunas de ellas pueden contener mineralización de oro (Vicencio y Acosta, 1985). Su mineralogía es variada, consistente principalmente de cuarzo; cuarzo-hematita \pm turmalina \pm óxidos de cobre; cuarzo-magnetita-hematita-calcita \pm turmalina - óxidos de cobre. Las vetas dominadas por cuarzo presentan a menudo cristales centimétricos de este mineral, los cuales crecen perpendicularmente a las paredes de la veta. En otros casos las vetas presentan abundante sílice opalina de aspecto coloidal, evidenciando un emplazamiento muy próximo a la superficie. En los casos en que estas vetas presentan halos de alteración, ellos se componen de cuarzo, calcita, clorita, epidota y minerales opacos diseminados. Las vetas, en general, cortan a todas las unidades litológicas y aquellas constituidas exclusivamente por cuarzo cortan a sus equivalentes de mineralogía más compleja.

ALTERACION

Las roca de caja de los depósitos de hierro se encuentran afectadas por alteración actinolítica, de albita-cuarzo y cuarzo-turmalina (Vivallo et al., 1995a).

La alteración que afecta a estas rocas presenta una marcada zonación mineralógica en torno a las menas de hierro, la que se caracteriza por una zona central constituida por rocas volcánicas afectadas por una fuerte actinolización, la que es sucedida hacia afuera por una zona consistente en rocas afectadas por distintos grados de silicificación y/o turmalinización. Rocas alteradas a albita-

cuarzo son de ocurrencia muy restringida, presentándose como relictos dentro de la zona afectada por silicificación-turmalinización (Fig. 2).

Comparando las distintas zonas de silicificación-turmalinización, se aprecian algunas diferencias entre aquella ubicada en el lado este y la que limita el distrito por el oeste. La turmalina es

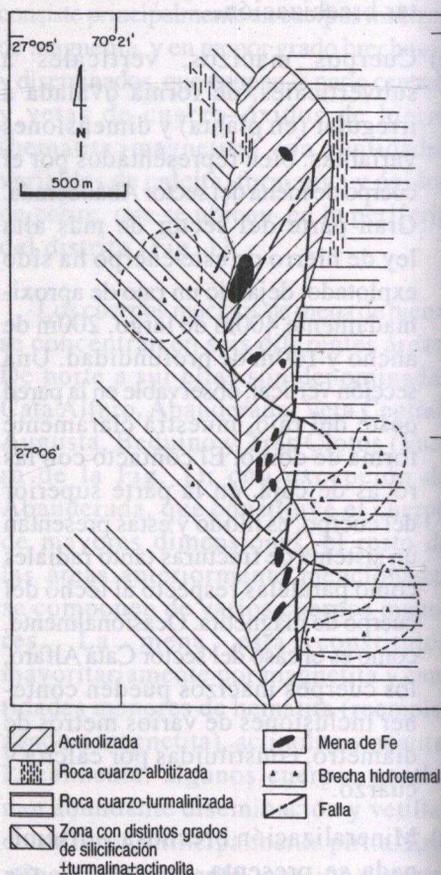


Fig. 2. Esquema de la distribución de los distintos tipos de rocas con alteración hidrotermal en el distrito Cerro Negro Norte. La zona central está afectada por una fuerte actinolización, la zona oriental por turmalinización-silicificación intensa, mientras que las rocas de la zona occidental están afectadas, principalmente, por silicificación de distribución irregular. Las rocas afectadas por albitización están restringidas a pequeñas zonas en la parte norte del distrito.

más abundante en la primera de estas áreas y afecta además a las rocas intrusivas, en este sector el cuarzo y la turmalina pueden reemplazar totalmente la mineralogía original, con destrucción de texturas, sobreviviendo a la alteración solo algunas estructuras primarias tales como vesículas y amígdalas. Por su parte, en el sector occidental se observa un mayor grado de reemplazo de las rocas por actinolita, particularmente, en las zonas de brechas hidrotermales, y predominio del cuarzo sobre la turmalina. La mayor parte de los distintos tipos de vetas de cuarzo se ubican dentro de este sector.

Vetillas de cuarzo-turmalina y magnetita-turmalina cortan a la mena de hierro y rocas de caja actinolitizadas.

Los rasgos estructurales más destacados del distrito corresponden a una falla de dirección norte-sur, que en parte limita a la zona mineralizada por el este, la que a su vez es desplazada por fallas normales de dirección noroeste. La parte este del cuerpo de mena Abanderada está en parte limitado por una falla de rumbo noreste, la que también afecta a la mena. A una escala menor, existen numerosas fallas que cortan y modifican la geometría original de los cuerpos de magnetita.

En aquellos lugares donde se puede observar alguna evidencia de la estratificación, esta indica una posición subhorizontal para la secuencia volcánica.

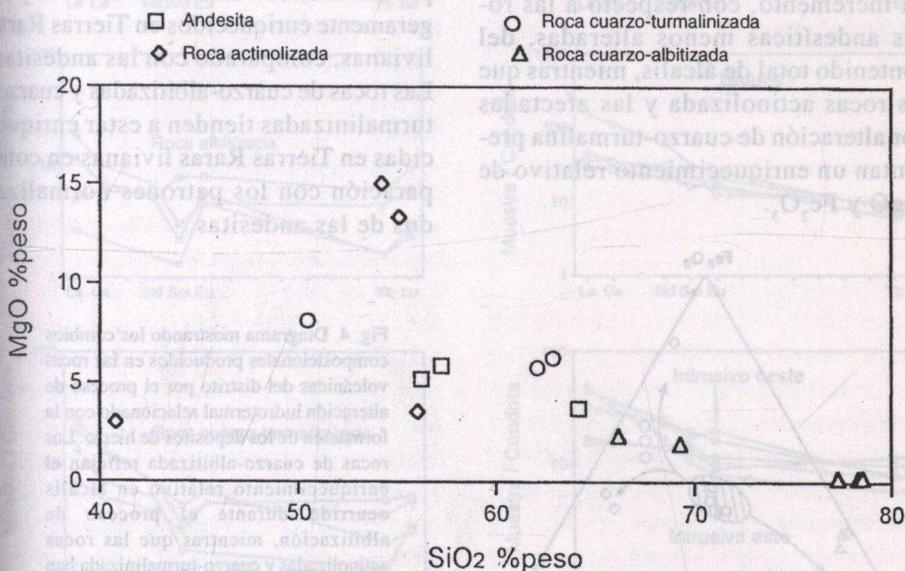
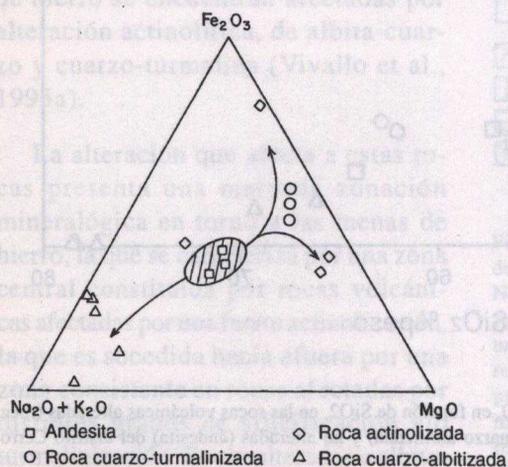


Fig. 3. Variación de los contenidos (% peso) de MgO, en función de SiO₂, en las rocas volcánicas alteradas (roca de actinolitizada, roca cuarzo-turmalinizada, roca de cuarzo-albitizada) y no alteradas (andesita) del distrito Cerro Negro Norte.

GEOQUIMICA

Las rocas que hospedan la mineralización de hierro en el distrito presentan contenidos de SiO_2 variables entre 40 y 80% peso (Fig. 3). Las rocas menos alteradas están comprendidas en el intervalo 55-62%, consistente con el rango composicional de las andesitas. Las rocas actinolizadas tienen los menores contenidos de SiO_2 , mientras que las afectadas por alteración de albita-cuarzo presentan contenidos de hasta 80%. En general, tanto los elementos mayores como los elementos en trazas presentan un amplio rango de variación en sus contenidos (Tabla 1), sugiriendo que estas rocas han sido afectadas por procesos de alteración a nivel distrital, los cuales han modificado significativamente su composición original (Vivallo et al., 1995a). En términos de Fe_2O_3 , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ y MgO (Fig. 4), las rocas de albita-cuarzo se caracterizan por un incremento, con respecto a las rocas andesíticas menos alteradas, del contenido total de álcalis, mientras que las rocas actinolizadas y las afectadas por alteración de cuarzo-turmalina presentan un enriquecimiento relativo de MgO y Fe_2O_3 .



Los intrusivos plutónicos del sector oeste presentan contenidos de SiO_2 entre 55-60% peso (Fig. 5), correspondiendo a una composición mayoritariamente granodiorítica. Los intrusivos del sector este son más diferenciados y presentan contenidos del orden de 70% peso de SiO_2 . Los diques máficos tienen sin excepción una composición andesítica, con contenidos en el rango 50-60% peso de SiO_2 .

Todos los tipos litológicos presentan patrones normalizados de los Elementos de Tierras Raras relativamente horizontales, con razones La/Yb bajas (Fig. 6). Las rocas actinolizadas, con la sola excepción de una muestra con abundante contenido de epidota, tienen patrones normalizados de baja pendiente o ligeramente empobrecidos en tierras raras livianas, similares a los de las andesitas. Los patrones de las rocas intrusivas (diques e intrusivos plutónicos) son similares entre sí y ligeramente enriquecidos en Tierras Raras livianas, comparado con las andesitas. Las rocas de cuarzo-albitizadas y cuarzo-turmalinizadas tienden a estar enriquecidas en Tierras Raras livianas en comparación con los patrones normalizados de las andesitas.

Fig. 4. Diagrama mostrando los cambios composicionales producidos en las rocas volcánicas del distrito por el proceso de alteración hidrotermal relacionado con la formación de los depósitos de hierro. Las rocas de cuarzo-albitizada reflejan el enriquecimiento relativo en álcalis ocurrido durante el proceso de albitización, mientras que las rocas actinolizadas y cuarzo-turmalinizadas han sido afectadas por un metasomatismo de magnesio y hierro originados por procesos de actinolitización y silicificación / turmalinización respectivamente. Contenidos en % peso.

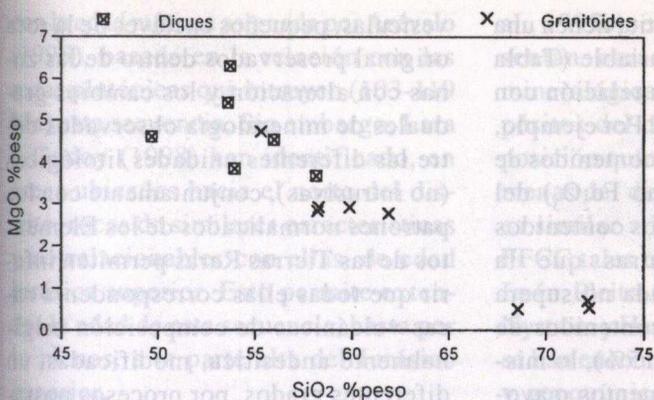


Fig. 5. Variación de los contenidos (% peso) de MgO, en función de SiO₂, en los granitoides y diques del distrito Cerro Negro Norte.

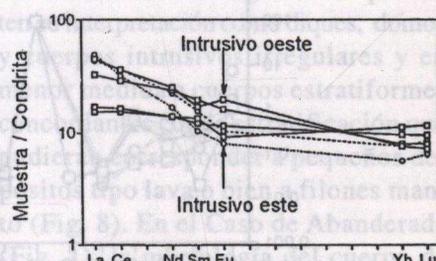
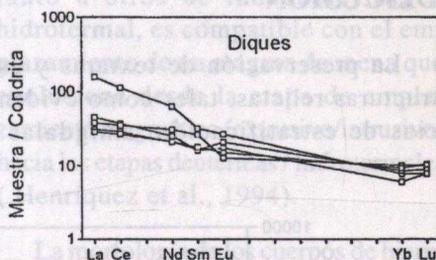
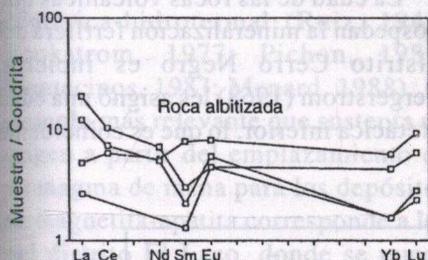
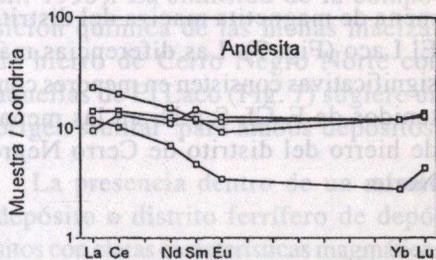
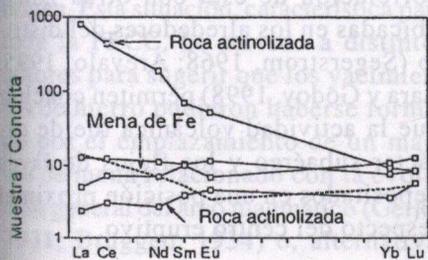


Fig. 6. Patrones normalizados de los Elementos de las Tierras Raras para las distintas unidades litológicas alteradas (roca actinolizada, cuarzo-albitizada, cuarzo-turmalinizada) y no alteradas (andesita, diques, intrusivo este y oeste) del distrito Cerro Negro Norte.

Los cuerpos de magnetita tienen una composición química variable (Tabla 1) la cual está en directa relación con el tipo de mineralización. Por ejemplo, la mena maciza presenta contenidos de Fe total (expresado como Fe_2O_3) del orden de 90% peso y bajos contenidos de SiO_2 (<5%), mientras que la mineralización diseminada no supera el 50% de Fe_2O_3 y los contenidos de SiO_2 son más altos (e.g. 15%), lo mismo ocurre con otros elementos mayores, los cuales reflejan la composición y cantidad de minerales de ganga.

Los cuerpos macizos de magnetita presentan una composición similar a mena de magnetita maciza del distrito El Laco (Fig. 7). Las diferencias más significativas consisten en menores contenidos de F, Cl, S y Ni en las menas de hierro del distrito de Cerro Negro Norte.

DISCUSION

La preservación de texturas y estructuras relictas, tales como evidencias de estratificación, amígdalas /

vesículas, pequeños enclaves de la roca original preservados dentro de las zonas con alteración y los cambios graduales de mineralogía observados entre las diferentes unidades litológicas (no intrusivas), conjuntamente con los patrones normalizados de los Elementos de las Tierras Raras permiten inferir que todas ellas corresponden a rocas volcánicas de composición originalmente andesítica, modificadas, en diferentes grados, por procesos posteriores de alteración. La ausencia de rocas sedimentarias intercaladas, predominio de flujos de lava, la abundante presencia en el área de diques andesíticos y la correlación de ésta con otras zonas ubicadas en los alrededores del distrito (Segerstrom, 1968; Arévalo, 1995; Lara y Godoy, 1998) permiten concluir que la actividad volcánica fue de carácter subaéreo y los flujos de lavas depositados en una posición proximal respecto del centro eruptivo.

La edad de las rocas volcánicas que hospedan la mineralización ferrífera del distrito Cerro Negro es incierta. Sergerstrom (1968) les asignó una edad cretácica inferior, lo que es coincidente

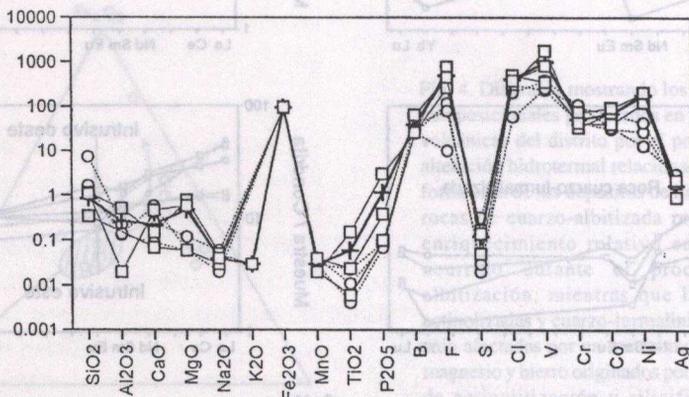


Fig. 7. Comparación de la composición química de las menas de Fe macizas (>90% Fe_2O_3) de los distritos Cerro Negro Norte y El Laco. Elementos mayores en % peso, trazas en ppm.

con la edad mínima asignada por Arévalo (1995), basado en la relación con las rocas plutónicas que intruyen (103-119 Ma) esta secuencia. Sin embargo, Lara y Godoy (1998) han identificado, en áreas ubicadas hacia el norte del distrito, rocas de similares características y correlacionables con ellas, de edad jurásica superior. Esto permite extender la edad de esta secuencia, hasta por lo menos, a la parte alta del Jurásico superior.

El carácter predominantemente volcánico-intrusivo del ambiente en el cual se ubica la mineralización de hierro del distrito, conduce a relacionarlo con su origen. Esta situación, característica para toda la FFCC, ha servido a distintos autores para sugerir que los yacimientos de hierro pudieron haberse formado por el emplazamiento de un magma de mena relacionado con la evolución general del arco magmático (Geijer, 1931; Brügggen, 1934) o, alternativamente, como resultado de la actividad deutérica-hidrotermal (Ruiz, 1943; Bookstrom, 1977; Pichon, 1981; Montecinos, 1983; Menard, 1988). El ejemplo más relevante que sustenta un origen a partir del emplazamiento de un magma de mena para los depósitos de magnetita-apatita corresponde a los del distrito El Laco, donde se puede observar depósitos estratiformes de magnetita con texturas y estructuras similares a la de las lavas (Park, 1961; Henríquez y Martin, 1978) y cuerpos intrusivos, de la misma composición, con texturas dendríticas que reflejan condiciones de un enfriamiento rápido del magma (Henríquez y Martin, 1978). Lavas y depósitos piroclásticos de magnetita han sido identificados en los distritos de Pleito-Melón (Travissany et al., 1995) y Cerro Imán (Vivallo et

al., 1995b), en la FFCC, los cuales presentan características texturales y mineralógicas similares a la de los depósitos del distrito El Laco. La composición química de la magnetita de las menas del distrito Cerro Negro Norte, es similar a la de otros distritos de la FFCC tales como El Algarrobo, Cerro Imán, Pleito, Cristales (Espinoza, 1990, Nyström y Henríquez, 1994), en los cuales se han encontrado evidencias texturales y geoquímicas de las menas que permiten asignarles un origen magmático (González, 1990; Lorca, 1990; Espinoza, 1990; Nyström y Henríquez, 1994; Henríquez et al., 1994; Travissany et al., 1995). La similitud de la composición química de las menas macizas de hierro de Cerro Negro Norte con aquellas de El Laco (Fig. 7) sugiere un origen similar para ambos depósitos.

La presencia dentro de un mismo depósito o distrito ferrífero de depósitos con claras características magmáticas junto a otros de indudable origen hidrotermal, es compatible con el emplazamiento de un magma de mena que evoluciona desde la etapa de emplazamiento magmático (extrusivo/intrusivo) hacia las etapas deutéricas / hidrotermales (Henríquez et al., 1994).

La morfología de los cuerpos de hierro del distrito Cerro Negro Norte permiten su interpretación como diques, domos y cuerpos intrusivos irregulares y en menor medida a cuerpos estratiformes concordantes con la estratificación que pudieran corresponder a pequeños depósitos tipo lava o bien a filones mantos (Fig. 8). En el Caso de Abanderada (Fig. 1), la morfología del cuerpo de mena corresponde a la de un pequeño domo que aparentemente no alcanzó la superficie, rodeado, en la zona del te

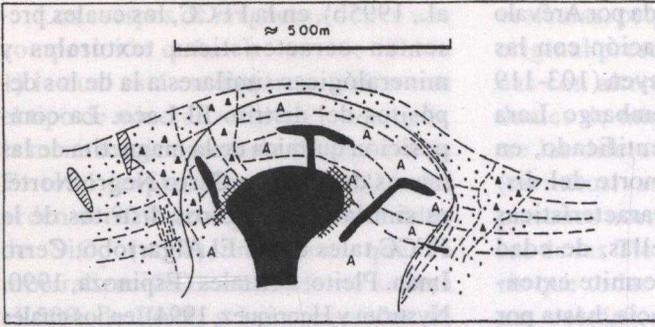
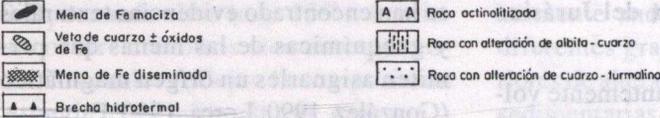


Fig. 8. Esquema conceptual mostrando los distintos tipos de depósitos de hierro presentes en el distrito y su relación con las rocas de caja y zonas de alteración hidrotermal.



cho, por un fracturamiento radial y paralelo a los contornos del cuerpo, que afecta a las rocas de caja, sugiriendo un emplazamiento forzado en las rocas andesíticas.

La presencia de abundantes brechas hidrotermales con matriz de turmalina y/o actinolita, la silicificación, albitización y actinolización de las rocas andesíticas originales junto con la presencia de depósitos bandeados de dolomita asociados a los depósitos de hierro e inclusiones de calcita-sílice dentro de los cuerpos macizos de magnetita, sugieren la presencia de una fuerte actividad hidrotermal relacionada con el emplazamiento de la mineralización de hierro. La distribución espacial de las rocas hidrotermalmente alteradas sugiere que el proceso de alteración hidrotermal tuvo su centro en los cuerpos de mena, originando un intenso halo de rocas actinolizadas en la parte más interna y una fuerte silicificación-turmalinización en las partes más externas del distrito (Fig. 4).

Considerando una composición original andesítica, para las rocas volcánicas hidrotermalmente alteradas del distrito, el proceso de actinolización

implica un importante metasomatismo de Ca, Fe, Mg y P, mientras que la silicificación-turmalinización requiere de un fuerte aporte de sílice y volátiles, particularmente B, F, Cl (Vivallo et al. 1995a). Además, las inclusiones o bolsones de calcita-sílice contenidas en algunos cuerpos de mena y la presencia de depósitos bandeados ricos en dolomita asociados a las depósitos macizos de magnetita, son también indicadores del carácter rico en Mg, Ca y CO_2 de las soluciones hidrotermales asociadas con el emplazamiento de la mena de hierro. La asociación plagioclasa-actinolita, típica de las rocas actinolizadas, sugiere temperaturas >450 oC para este proceso (Liou et al. 1974). Por otra parte, la coexistencia de calcita y sílice indica condiciones de temperatura relativamente más baja (e.g. <450 oC) que, por ejemplo, impidieron la formación de wollastonita (Winkler, 1976), representando probablemente una etapa tardía del evento de alteración que produjo la actinolización de la roca de caja. Esto es consistente con los resultados de estudios preliminares de inclusiones fluidas (Skewes, 1991) que indican la presencia de dos tipos de inclusiones en el distrito. El primero

representado por inclusiones fluidas de alta temperatura (>450 °C) y alta salinidad, y un segundo tipo de más baja temperatura, salinidad moderada y rico en la fase gaseosa.

Las relaciones de contacto entre las distintas zonas de alteración y la mena indican una evolución compleja, donde varios eventos de alteración se sobrepone. La asociación paragenética de la mena, magnetita-apatita-actinolita junto con la presencia de vetillas pegmatíticas de actinolita que la cortan, sugiere que buena parte de la actinolización de la roca de caja es el resultado directo de la actividad pneumatolítica-hidrotermal que acompañó al emplazamiento de los cuerpos de magnetita maciza. Esta actividad hidrotermal sería, además, responsable de la generación del halo brechizado y con mineralización de hierro diseminada, frecuentemente asociado a los cuerpos macizos de magnetita. La presencia de vetillas de magnetita, magnetita-turmalina y vetillas de sulfuro que cortan a la mineralización maciza, sugieren la presencia de un segundo evento de mineralización-alteración hidrotermal. Al primer período de mineralización-actinolización se pueden relacionar las brechas hidrotermales, con matriz de actinolita, del sector oeste del distrito.

La presencia de vetillas de cuarzo-turmalina que cortan a las rocas actinolizadas y menas de hierro, sugiere que el proceso de silicificación-turmalinización representa una etapa más tardía en la evolución del sistema mineralizador. Esta relación temporal se encuentra especialmente bien expuesta en la parte este del distrito (Fig. 3), donde las brechas de turmalina y silicificación-

turmalinización de las rocas volcánicas presentan su mejor desarrollo, afectando tanto a las rocas intrusivas y a las rocas actinolizadas. Con esta etapa de turmalinización-silicificación pueden estar relacionadas la mayor parte de las vetas de cuarzo conocidas en el distrito, todas las cuales presentan evidencias mineralógicas y texturales de un emplazamiento muy próximo a la superficie, cortando tanto a las rocas volcánicas e intrusivos.

La presencia de sectores con rocas con alteración cuarzo- albita, incluidas dentro la zona afectada por turmalinización-silicificación, sugiere la posibilidad de un evento de alteración hidrotermal (albitización), previo a la silicificación- turmalinización de las rocas volcánicas y probablemente contemporáneo con la actinolización.

Si bien, las relaciones de contacto permiten establecer que la alteración cuarzo-turmalina postdata a las rocas afectadas por la actinolización y albitización, su edad no puede ser establecida con precisión. Considerando que la alteración cuarzo-turmalínica afecta tanto a las rocas volcánicas como a las intrusivas, su edad debería ser a lo menos similar a la de los intrusivos (103-119 Ma) o bien posterior. Esto último sugiere la posibilidad que éste evento tardío de alteración no esté relacionado con el evento formador de las menas de hierro. Sin embargo, la existencia de extensas zonas afectadas por silicificación y argilización es un rasgo común a la casi totalidad de los distritos ferríferos de la FFCC y está, también, presente en el distrito El Laco, todo lo cual constituye un fuerte argumento a favor de la relación genética entre la alteración cuarzo-turmalínica y los yacimientos de hierro.

La edad de los depósitos de hierro quedaría limitada entre la edad de las rocas de caja y la de los intrusivos que las afectan, es decir entre el Jurásico Superior y Cretácico Inferior (e.g. Aptiano), lo cual constituye un período de tiempo del orden de 40-50 Ma. Considerando la similitud existente entre los depósitos de Cerro Negro Norte y los del distrito de Cerro Imán (Vivallo et al., 1995b), donde la mena de hierro está afectada por la milonitización (130-103 Ma, Brown et al., 1993; Arévalo, 1995), es posible restringir la edad de la mineralización a lo menos al Cretácico Inferior temprano.

CONCLUSIONES

Los depósitos de hierro del distrito minero Cerro Negro Norte se encuentran emplazados en rocas volcánicas andesíticas de probable edad jurásica superior-cretácica inferior. La mineralización es del tipo magnetita-apatita y se presenta en forma de depósitos de textura maciza, brechosa y diseminada que se distribuyen a lo largo de una franja, de dirección norte-sur, de aproximadamente 3 km de largo y 0,5 km de ancho. Evidencias de terreno, morfología y geoquímica de los cuerpos mineralizados sugieren que la mineralización ferrífera del distrito se originó a partir del emplazamiento de un magma de magnetita-apatita rico en volátiles. En consecuencia, los cuerpos macizos de mena se habrían emplazados en forma de diques, domos o cuerpos intrusivos de formas irregulares. Asociado al emplazamiento de los depósitos de hierro se produjo una intensa actividad hidrotermal que alteró la roca de caja de los yacimientos y dio origen a brechas hidrotermales. Las rocas de caja alteradas presentan una marcada zonación mineralógica y

geoquímica en torno a los cuerpos de mena, caracterizada por una zona interna de rocas con alteración actinolítica y un halo externo de rocas silicificadas y con distintos grados de turmalinización. Relictos de rocas alteradas a albita y cuarzo se encuentran incluidos en las rocas silicificadas. La actinolitización de las rocas volcánicas andesíticas implican un metasomatismo de Ca, Mg, Fe y P, mientras que la silicificación-turmalinización requiere de un importante aporte de sílice y volátiles, particularmente B, F y Cl. La distribución y relaciones de contacto entre las distintas unidades de rocas alteradas permiten inferir que contemporáneamente con la formación de los depósitos de hierro se produjo el halo interno de rocas de actinolita, seguido hacia la parte externa por otro de rocas con alteración albita-cuarzo. El halo externo de rocas de cuarzo-turmalina se sobreimpone a los anteriores y representa el último evento de alteración relacionado con la formación de los depósitos de hierro del distrito.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por los grants Fondecyt N° 91-1218, SWE-SAREC 89-101 y DICYT (USACH) N° 05-92-15HB. Los autores agradecen las facilidades otorgadas por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Departamento de Geociencias de la Universidad Católica del Norte y Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Santiago de Chile, como así también las facilidades y apoyo otorgados por la Compañía Minera del Pacífico (CMP). El manuscrito se benefició con los acertados comentarios de Víctor Maksaev, Brian Twonley y Marcos Zentilli.

REFERENCIAS

- Arévalo, C. 1995. Mapa Geológico de la Hoja Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documento de Trabajo No. 8, 1 mapa 1:100.000. Santiago.
- Berg, K.; Breitzkreuz, C. 1983. Mesozoische Plutone in der nordchilenischen Küstenkordillere; Petrogenese, Geochronologie, Geochemie und Geodynamik mantelbetoner magmatite. Geotekt. Forsch. 66I-11, 1-107.
- Bookstrom, A. 1977. The magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology*, Vol. 72, p. 1101-1130.
- Brown, M.; Díaz, F.; Grocott, J. 1993. Displacement history of the Atacama fault system 25° 00' S - 27° 00' S, northern Chile. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 105, p. 1165-1174.
- Brüggen, J. 1934. Grundzüge der Geologie und Lagerstättenkunde Chiles. Tübingen Math. Nat. Kl. Heidelberg Akad. Wiss., 362 p.
- Espinoza, S. 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. In *Stratabound ore deposits in the Andes* (Fonboté, L.; Amstutz, G. C.; Cardoso, M.; Cedillo, E.; Frutos, J., eds) Springer-Verlag, p. 353-364. Berlin Heidelberg.
- Geijer, P. 1931. The iron ores of the Kiruna type. Geographical distribution, geological character, and origin. *Sveriges Geologiska Undersökning*, Ser. C 367, 39 p.
- González, S. 1990. Geoquímica de las rocas de caja y de los cuerpos mineralizados del yacimiento Algarrobo, III Región. Memoria de Título (Inédito), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 121 p.
- Henríquez, F. 1988. Origen de los yacimientos de la Franja Ferrífera Cretácica: revisión de hipótesis. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 5, Resúmenes, *Revista Comunicaciones* No. 39, p. 195.
- 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.
- Henríquez, F.; Dobbs, F.; Espinoza, S.; Nyström, J.; Travisany, V.; Vivallo, W. 1994. Origin of Chilean magnetite-apatite ore deposits. In *Congreso Geológico Chileno No 7*, *Actas*, Vol. II, p. 822-824. Concepción.
- Lara, L.; Godoy, E. 1998. Hoja Quebrada Salitrosa, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos No. 4, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Liou, J.B.; Kuniyoshi, S.; Ito, K. 1974. Experimental studies of the phase relations between greenschist and amphibolite in a basaltic system. *American Journal of Science*, Vol. 274, p. 613-632.
- Lorca, G. 1990. Caracterización geoquímica y cristalográfica de las piritas de los yacimientos de hierro El Algarrobo y El Romeral. Memoria de Título (Inédito), Departamento de Geología, Universidad de Chile, 138 p.
- Menard, J.J. 1988. Las relaciones entre los plutones dioríticos y la mineralización de hierro a la latitud de Vallenar, III Región, Chile.

- In Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas, Vol. 3, p. G83-G98. Santiago.
- Montecinos, P. 1983. Petrologie des roches intrusives associées au gisement de fer El Algarrobo (Chili). Doctor Thesis, Univ. Paris-sud, 191 p.
- Nyström, J.; Henríquez, F. 1994. Magmatic Features of the iron ores of Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magmatic geochemistry. *Economic Geology*, Vol. 89, p. 820-839.
- Oyarzún, J. y Frutos, J. 1982. Proposición de un modelo genético para los depósitos cretácicos de magnetita del Norte de Chile. In Congreso Geológico Latinoamericano, No. 5, Actas, Vol. 3, p. 25-39.
- Oyarzún, J. y Frutos, J. 1985. Tectonic and petrological frame of the Cretaceous iron deposits of north Chile. *Mining Geology*, Vol. 34, p. 21-31.
- Park, Jr. C.F. 1961. A magnetite 'flow' in northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 56, p. 431-441.
- Pichon, R. 1981. Contribution a l'étude de la Ceinture du Fer du Chili. Les gisements de Bandurrias (Prov. d'Atacama) et de Los Colorados Norte (Prov. de Huasco). These de Docteur, Université de Paris-Sud, Centre de d'Orsay, 326 p. Paris, France.
- Ruiz, C. 1943. Los yacimientos de hierro de la región nor-occidental de Copiapó, un tipo no descrito de yacimientos de contacto metamórfico. *Boletín Minero Sociedad Nacional de Minería*, No. 552, p. 820-857.
- Ruiz, C.; Aguirre, L.; Corvalán, J.; Klohn, E.; Levi, B. 1965. Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, 305 p., Santiago.
- Segerstrom, K. 1968. Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín No. 24, 58 p. Santiago.
- Skewes, A. 1991. Análisis de inclusiones fluidas en cuarzo de cuerpos silíceos asociados a yacimientos de hierro (Inédito), Compañía Minera del Pacífico, 22 p.
- Travisany, V.; Henríquez, F.; Nyström, J.O. 1995. Magnetite lava flows in the Pleito-Melon district of the Chilean Iron Belt. *Economic Geology*, Vol. 90, p. 438-444.
- Vicencio, S. y Acosta, H. 1985. Evaluación geológica del potencial aurífero en el distrito de Fierro Cerro Negro Norte (Inédito), Compañía Minera del Pacífico, 27p.
- Vivallo, W.; Espinoza, S.; Henríquez, F. 1995a. Metasomatismo y alteración hidrotermal en el distrito ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 22, No. 1, p. 75-88.
- Vivallo, W.; Espinoza, S.; Henríquez, F. 1995b. Geología y Mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 21, No. 2, p. 197-212.
- Winkler, H. 1976. Petrogenesis of metamorphic rocks. IV Edición, Springer Verlag, Berlin, 334 p.
- Zentilli, M. 1974. Geological evolution and metallogenetic relationship in the Andes of northern Chile between 26° and 29° lat. south. Ph. D. Thesis (Unpublished). Queen's University, 446 p., Kingston, Canada.

