

# Los depósitos de hierro del tipo magnetita-apatita: geoquímica de las rocas volcánicas asociadas y potencialidad de la mena de hierro como fuente de mineralización de oro

**Waldo Vivallo**

Departamento de Geología, Universidad de Chile,  
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile

**Fernando Henríquez**

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

**Sergio Espinoza**

Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte,  
Casilla 1280, Antofagasta, Chile

## RESUMEN

Las menas de hierro de los distritos ferríferos Cerro Negro Norte y Cerro Imán, pertenecientes a la Franja Ferrífera Cretácica de la Cordillera de la Costa de Chile, se encuentran fuertemente enriquecidas en Au con respecto a las rocas volcánicas andesíticas que constituyen sus rocas de caja. El emplazamiento de la mena ferrífera, cuya formación se interpreta a partir de un magma de mena, ocurrió en un ambiente de arco magmático de afinidad calco-alcalina. Este proceso fue acompañado por una intensa actividad hidrotermal, responsable de la generación de mineralización ferrífera tipo 'stockwork' y diseminada en la proximidad de los cuerpos macizos de magnetita, de brechas hidrotermales y de la alteración de la roca de caja. Las rocas alteradas presentan una zonación mineralógica y geoquímica entorno a los cuerpos de mena, con rocas fuertemente actinolitizadas en la parte interna próxima a la mena y albitizadas en el lado opuesto. Un halo externo silicificado y tumalinizado se superpone a las rocas actinolitizadas y albitizadas. De acuerdo con las relaciones de contacto entre las distintas unidades de rocas alteradas y su composición mineralógica, se infieren, a lo menos, dos eventos principales de alteración hidrotermal: el primero, caracterizado por soluciones de alta temperatura, pH neutro a ligeramente alcalino y rico en Mg, Fe, Ca, CO<sub>2</sub>, F, P y Cl, produce la actinolitización y, en parte, albitización de las rocas volcánicas. Un segundo evento, con soluciones de menor temperatura, pH neutro a ligeramente ácido, rico en sílice, B y F, se superpone al anterior. La distribución del oro en los minerales de la mena (magnetita y pirita) y roca de caja (alterada y no alterada) sugiere que la generación de un magma de mena (magnetita-apatita) favoreció la concentración primaria del oro en la magnetita, dando lugar a una importante fuente primaria de este elemento en un nivel superficial de la corteza. Las características de las soluciones hidrotermales que acompañan el emplazamiento de las menas de hierro son las apropiadas para removilizar, y posteriormente, redepositar el oro inicialmente contenido en los cuerpos macizos de magnetita-apatita, pudiendo dar origen a concentraciones de potencial interés económico.

*Palabras claves:* Oro, Hierro, Geoquímica, Franja Ferrífera, Cordillera de la Costa, Cerro Negro Norte, Cerro Imán, Chile.

### ABSTRACT

**Magnetite-apatite type iron ore deposits: geochemistry of the associated volcanic rocks and potential of the iron ore as a source to gold mineralization.** The iron ore in the Cerro Negro Norte and Cerro Imán mining districts is strongly enriched in gold as compared with the altered and unaltered andesitic wallrock. Both districts belong to the about 600 km long Cretaceous Iron Belt of the Chilean Coastal Range. The iron deposits are interpreted as formed by a near surface emplacement of an ore magma, dominated by the magnetite-apatite assemblage, and followed by hydrothermal activity. This activity resulted in wallrock alteration, deposition of hydrothermal iron ore ('stockwork' and disseminated types) around massive magnetite-apatite ores and generation of hydrothermal breccias. The altered wallrock displays a zoned arrangement around the iron deposits, with an internal halo of actinolitized rocks followed outwards by albitized rocks. An external halo of silicified±tourmalinized volcanic rocks is overprinting the actinolitized and albitized haloes. Based on field and textural relationships, two main hydrothermal events are suggested, the first one is characterized by high temperature solutions, neutral to slightly alkaline pH, rich in Mg, Fe, Ca, CO<sub>2</sub>, F, P, Cl, which produced actinolitization and albitization in the wallrocks to the iron ore. A second overprinting stage, is produced by hydrothermal solutions of lower temperature, neutral to slightly acid pH, and rich in silica, F and B, resulting in an external halo of silicified±tourmalinized wallrocks. The distribution pattern of gold in magnetite and pyrite of the iron ores, along with the gold content in altered and unaltered wallrocks, suggest that generation of a magnetite-apatite ore magma may favor a primary gold concentration in magnetite during the magmatic stage. The hydrothermal activity associated with the iron ore emplacement, characterized by neutral to slightly alkaline solutions, rich in volatile, mainly Cl, is capable of remobilizing the gold originally contained in magnetite, and potentially to produce economical gold concentrations.

*Key words: Gold, Iron, Geochemistry, Chilean Iron Belt, Cordillera de la Costa, Cerro Negro Norte, Cerro Imán, Chile.*

### INTRODUCCION

El oro y el hierro son dos elementos de ocurrencia común en las rocas de la corteza terrestre, aunque en concentraciones muy diferentes. El primero de ellos, se presenta como un elemento en trazas (ppb) mientras que el segundo, es un elemento mayor en la casi totalidad de las rocas. Desde un punto de vista geoquímico, en ambientes magmáticos, el oro presenta una correlación positiva con Fe y S (Mironov *et al.*, 1980; Boyle, 1979), acompañando a ambos elementos durante la evolución de las series magmáticas. Estas series se caracterizan por mayores contenidos de oro y hierro en sus componentes máficos que en sus miembros más diferenciados (Boyle, 1979). La afinidad geoquímica entre el hierro y el oro tiene, también, una expresión en términos metalogénicos, manifestada en la tendencia de ambos elementos a ocurrir juntos dentro de un mismo yacimiento, o bien, en yacimientos separados, pero íntimamente relacionados dentro de una misma provincia metalogénica.

La asociación Au-Fe en ambientes magmáticos máficos se encuentra muy bien representada en las provincias metalogénicas asociadas a los cinturones de rocas verdes. Por ejemplo, en el escudo pre-

cámbrico de América del Norte, los metabasaltos de los cinturones de rocas verdes constituyen la roca huésped de numerosos yacimientos de Au y también de hierro del tipo BIF (Formaciones Ferríferas Bandeadas), los cuales representan importantes fuentes de recursos de estos metales a nivel mundial (Meyer, 1985; Hutchinson, 1987 y referencias allí citadas). En numerosos casos los yacimientos de hierro del tipo BIF constituyen la roca huésped de yacimientos epigenéticos de Au (Boyle, 1979; Bernasconi, 1985; Hutchinson, 1987).

En parte de los Andes chilenos, existen algunas localidades con volcanismo basáltico-andesítico reciente, donde se conoce la presencia de cuerpos intrusivos y extrusivos de magnetita-apatita (Park, 1961; Henríquez y Martín, 1978; Grez *et al.*, 1991); en estas áreas las rocas volcánicas han sido alteradas por la actividad hidrotermal que acompañó al magmatismo. De ellas, la más conocida es la zona de El Laco (Park, 1961; Ruiz *et al.*, 1965; Frutos y Oyazún, 1975; Henríquez y Martín, 1978). En ella, las relaciones geológicas de terreno permiten asumir que la mineralización de hierro y zonas de alteración hidrotermal vinculadas, con anomalías

geoquímicas de oro, están relacionadas con la evolución magmática-hidrotermal que generó el estrato-volcán sobre el que se ubica el distrito (Vivallo *et al.*, 1991). Una situación similar se presenta en el yacimiento de Cerro Mercado, en México, donde un magma de mena originó un yacimiento de magnetita-apatita que contiene oro asociado (Lyons, 1988), siendo en este caso, las rocas volcánicas asociadas de composición riolítica.

La Franja Ferrífera Cretácica de Chile (FFC), que se extiende por más de 600 km en dirección norte-sur, a lo largo de la Cordillera de la Costa (Ruiz *et al.*, 1965) (Fig. 1), está formada principalmente por depósitos de hierro del tipo magnetita-apatita espacialmente asociados a rocas ígneas de composición intermedia (Espinoza, 1990). Numerosos antecedentes registrados en informes internos de las compañías mineras y en una tesis no publicada (Lorca, 1990) han indicado la presencia de oro asociado directamente con la mena de hierro o en sus cercanías.

Si bien geoquímicamente, se conoce de la afinidad existente entre el oro y el hierro, y se han sugerido diferentes mecanismos para explicarla (*e.g.*, Keays and Scott, 1976; Marakushev, 1977; Hutchinson, 1987), poco se sabe del comportamiento del oro en el ambiente magmático-hidrotermal rico en hierro, representado por los ejemplos anteriormente mencionados. El presente estudio tiene por objetivo general, determinar el rol o la importancia que los distintos procesos geológicos tienen en el comportamiento del oro durante los eventos magmáticos-hidrotermales que dan origen a yacimientos de hierro del tipo magnetita-apatita, por lo cual se han elegido los distritos Cerro Negro Norte y Cerro Imán de la FFC, de los cuales se presentan y discuten las principales características geoquímicas y petrológicas de las rocas volcánicas (alteradas y no alteradas) que hospedan la mineralización y la distribución del oro, tanto en las rocas como en las menas.

## METODO DE ESTUDIO

Los distritos ferríferos Cerro Negro Norte y Cerro Imán, ambos pertenecientes a la FFC y separados aproximadamente 20 km entre sí (Fig. 1), fueron muestreados sistemáticamente a lo largo de perfir-

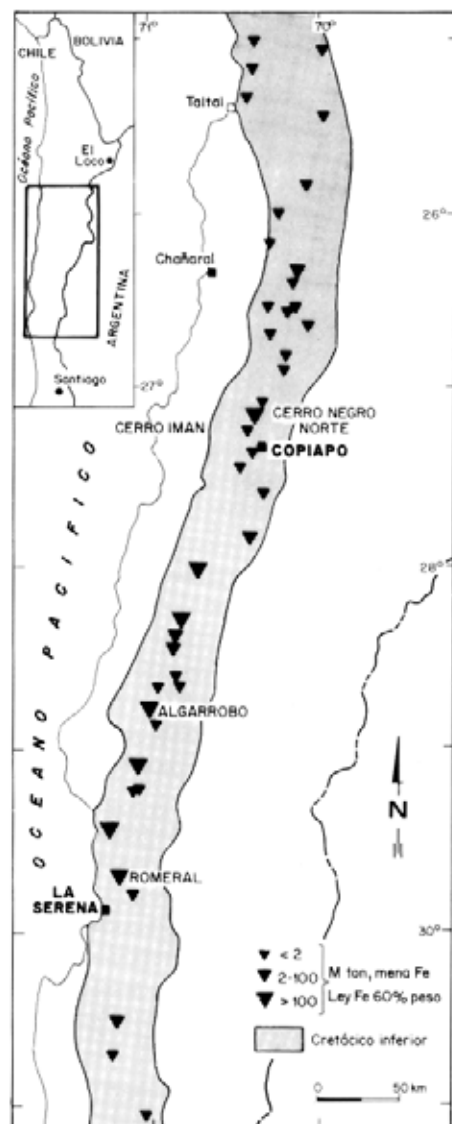


FIG. 1. Ubicación de los distritos ferríferos Cerro Negro Norte y Cerro Imán, en la Franja Ferrífera Cretácica de la Cordillera de la Costa. El recuadro indica la posición del distrito El Laco, que contiene menas de hierro de edad pliocena, similares a las de los distritos estudiados. Modificado de Nyström y Henríquez (1994).

les este-oeste. Noventa y siete muestras representativas de las rocas (alteradas y no alteradas) aflorantes en cada distrito y de los distintos tipos de mena, fueron químicamente analizadas para deter-

minar sus contenidos de elementos mayores y en trazas, incluyendo, además, Cl, S y F. Los contenidos de oro comprendidos entre 1 ppb y 0.1 ppb, Tierras Raras y Hf fueron analizados por medio de activación neutrónica; el resto de los elementos fueron analizados por medio de espectrometría de plasma (ICP, DCP), fluorescencia de rayos X (elementos mayores, Ni, Co, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Cl), ensayo a fuego (Au >1 ppb, Pd), vía húmeda (F) y

volumetría con horno de inducción LECO para S. Todos los análisis fueron efectuados en los laboratorios de XRAL, Ontario, Canadá. A modo de comparación, se incluyeron algunas muestras de andesitas del distrito El Romeral.

Los estudios petrográficos de las rocas y las muestras de mena fueron realizados por medio de técnicas de microscopía estándar y difracción de rayos X.

## ANTECEDENTES GEOLOGICOS

La geología de los distritos ferríferos de Cerro Negro Norte y Cerro Imán ha sido recientemente revisada por Vivallo *et al.* (1994, 1995). Ambos distritos consisten de una serie de cuerpos de magnetita macizos, brechosos y diseminados emplazados en rocas volcánicas alteradas, asignadas a la Formación Bandurrias, de edad cretácica inferior (Seegerstrom, 1968). Las secuencias volcánicas están intruidas por granitoides de composición diorítica a granítica y numerosos diques de composición mayoritariamente intermedia, algunos de los cuales, además, intruyen a la mena de hierro.

Las rocas volcánicas menos alteradas corresponden, mayoritariamente, a andesitas de color gris oscuro, generalmente porfídicas y con fenocristales tabulares de plagioclasa, anfíbola ('hornblenda'), cuarzo y, ocasionalmente, feldespato potásico. La masa fundamental es afanítica de grano fino, dominada por la asociación plagioclasa-cuarzo-anfíbola ('hornblenda'), y cantidades menores de epidota, clorita, calcita, turmalina, titanita y minerales opacos. Localmente, las andesitas presentan amígdalas rellenas con clorita, epidota, cuarzo, actinolita, solos, o bien, en pareja.

En las proximidades de los cuerpos de mena, las rocas volcánicas tienen distintos grados de alteración, reflejado principalmente por un aumento de la cantidad de actinolita y/o cuarzo. Este último mineral puede encontrarse asociado a albita y/o turmalina. Las rocas alteradas muestran una distribución zonada con respecto a los cuerpos macizos de magnetita (Vivallo *et al.*, 1995). En contacto con la mena, se presenta una zona de roca actinolizada, cuya extensión parece ser función del tamaño del cuerpo de mena. La intensidad de la actinolización disminuye con el aumento de la distancia al cuerpo

de mena, gradando hacia una zona externa de roca silicificada con o sin turmalina, o bien, hacia rocas andesíticas débilmente alteradas. En la zona con silicificación±turmalinización es posible observar, en el distrito Cerro Negro Norte, la presencia de relictos de rocas con una fuerte albitización. En otros casos, la silicificación puede estar acompañada por albitización del feldespato.

La roca actinolizada, comúnmente referida en la literatura como meta-andesita (Ruiz *et al.*, 1965), se presenta de color verde oscuro, grano fino a medio y mineralógicamente dominada por actinolita. Al microscopio, se observa como una roca equigranular constituida mayoritariamente por actinolita, cantidades variables de plagioclasa y magnetita y cantidades subordinadas de cuarzo, feldespato potásico, clorita, epidota y titanita. Localmente, la roca de actinolita puede estar epidotizada o silicificada; en el primer caso, la epidota reemplaza a la actinolita. En general, la actinolita presenta distintos grados de reemplazo por la asociación epidota-titanita±clorita. Vetillas de cuarzo±escapolita, actinolita de aspecto pegmatítico y cuarzo-turmalina cortan a la roca de actinolita.

Las rocas con alteración de albita-cuarzo se presentan tanto como rocas de color blanquecino con aspecto aplítico y rocas de grano medio a grueso, de color rosado. En ambos casos, la asociación albita-cuarzo es la predominante en esta litología, pudiendo además presentar diseminación de turmalina. Este tipo de roca es más común en el distrito de Cerro Negro Norte. Las rocas con alteración de turmalina-cuarzo, también muy bien desarrolladas en el mismo distrito, corresponden a rocas andesíticas con diferentes contenidos de cuarzo y turmalina, llegando en los casos más extremos a

estar constituidas exclusivamente de cuarzo y turmalina, presentando ocasionalmente granate.

Brechas hidrotermales desarrolladas tanto en los intrusivos félsicos como en las rocas volcánicas tienen su mejor expresión en el distrito de Cerro Negro Norte, ubicándose en las zonas periféricas con respecto a la mena de hierro. Son cuerpos de forma irregular, generalmente monolitológicos y con fragmentos angulosos y de tamaños muy variados, predominando el intervalo 1-10 cm. Los clastos predominan sobre la matriz, la cual está constituida por turmalina y cuarzo, o bien, turmalina, actinolita y cuarzo. Parte de ellas, especialmente aquéllas de turmalina, pueden presentar mineralización diseminada de sulfuros (mayormente pirita). Estas brechas presentan contactos gradacionales con la roca de caja. Las brechas hidrotermales del distrito Cerro Imán se han desarrollado en rocas de actinolita, y en este caso, la matriz o vetillas que fracturan a la roca está constituida principalmente por magnetita±actinolita±apatita±cuarzo, con o sin diseminación de sulfuros.

En ambos distritos, las secuencias volcánicas

han sido intruidas por granitoides de dimensiones batolíticas y composiciones variables entre diorita y granito. Diques de composición intermedia, de distintas edades relativas representan el último evento magmático. La mena de hierro es cortada por algunos de estos diques y no presenta relaciones de contacto con los granitoides.

El rasgo estructural más destacado, en ambos distritos, lo constituye el fallamiento norte-sur, el que en parte, constituye un límite para la mineralización. Este fallamiento también afecta a la mena de hierro. Asociado a estas zonas de fallas se han desarrollado zonas de rocas miloníticas, las que alcanzan su mayor expresión en el distrito de Cerro Imán, con una faja de rocas milonitizadas de aproximadamente 0,5 km de espesor que limita al distrito por el oeste. En general, la deformación ha afectado sólo a las rocas intrusivas.

Las rocas volcánicas se presentan, generalmente, sin evidencias de estratificación, y en aquellos lugares donde es posible observarla, ésta indica una posición subhorizontal con rumbos NNW y manteos de hasta 40°SW.

## MINERALIZACION

La mineralización, en ambos distritos, incluye menas de hierro y vetas de cuarzo-óxidos de hierro±calcita±turmalina±minerales oxidados de cobre; éstas, comúnmente, son pequeñas (<0,5 m de potencia y pocos metros de corrida), y en algunos casos, pueden contener oro.

La mineralogía de las menas de hierro es simple y está constituida por magnetita con cantidades menores de actinolita, apatita, pirita y calcopirita. Los sulfuros pueden presentarse como vetillas, o bien, diseminados en la mena. Algunos cuerpos de mena presentan un importante reemplazo supérgeno de magnetita por hematita.

De acuerdo a sus características texturales y modo de emplazamiento, las menas de hierro pueden ser agrupadas en cuerpos macizos, brechosos y diseminados. Los cuerpos macizos pueden ser: a- de formas tabulares ('diques o vetas') con disposición vertical a subvertical, de 1-2 m de espesor y varias decenas de metros de longitud; b- cuerpos macizos de forma irregular y tamaños variables, incluyendo algunos de forma aproximadamente cir-

cular o elíptica y contactos verticales; c- cuerpos macizos estratiformes, aparentemente concordantes con la estratificación, en que sus contactos con la roca de caja son nítidos y sus espesores no superan el par de metros. Los cuerpos brechosos y diseminados se ubican, generalmente, en los bordes de los cuerpos de mena maciza y sus contactos son gradacionales; en el primer caso corresponden a cuerpos tipo 'stockwork', donde la roca de actinolita se encuentra fuertemente brechizada por un enrejado de vetillas de magnetita. Con la disminución de las vetillas y un aumento de diseminación de magnetita, se producen los cuerpos con mineralización diseminada.

La presencia de cuerpos bandeados de dolomita-magnetita, rellenando fracturas o como intercalaciones en los cuerpos estratiformes, es un rasgo común a todos los cuerpos de mena maciza. Estos últimos, además, están cortados por vetillas de magnetita, actinolita, magnetita-actinolita o magnetita-turmalina y vetillas con sulfuros. En los cuerpos de mena estratiforme se observan, en algunos sec-

tores restringidos, cavidades similares a las vesículas observadas en lavas, las cuales en algunos casos pueden estar rellenas con sílice opalina o menos frecuentemente, con cristalitas de pirita. En el distrito de Cerro Imán se observan, localmente, relictos de menas de hierro con texturas y estructuras similares a las observadas en lavas, por ejemplo, sectores brechosos y vesiculados (Vivallo *et al.*, 1994). En los cuerpos macizos de forma tabular e irregular es frecuente observar el desarrollo de prismas tabulares de magnetita, de milímetros a centímetros de longitud, los cuales cuando presentan su mejor desarrollo dan origen a una textura bandeada. Este tipo de textura, denominada dendrítica, ha sido descrita para el yacimiento El Laco por Henríquez y Martín (1978) y para los yacimientos de la FFC por Nyström y Henríquez (1994). Localmente, estas menas macizas pueden presentar cavidades milimétricas, en cuyo interior se observan cristalitas octaédricas de magnetita y también pirita. Sílice opalina, magnetita, calcita y turmalina son minerales que comúnmente cubren las paredes de fracturas en los cuerpos de mena.

Basado en la estrecha relación espacial entre los distritos ferríferos y las secuencias de rocas volcánicas andesíticas y granitoides asociados, Ruiz *et al.* (1965) sugirieron un origen pneumatolítico-hidrotermal para las menas de hierro, relacionándolas con la actividad intrusiva. Un origen magmático

para las mismas fue propuesto inicialmente por (Geijer, 1931). Trabajos recientes en los yacimientos de la FFC (Nyström y Henríquez, 1994; Vivallo *et al.*, 1994; Travisany *et al.*, 1995) han entregado importante información que refuerza la hipótesis de Geijer (1931), sugiriendo que los yacimientos de la FFC se formaron a partir del emplazamiento de un magma de mena, dando origen a cuerpos intrusivos y extrusivos de magnetita con características similares a las observadas en las menas de hierro del distrito El Laco, de origen magmático (Henríquez y Martín, 1978). Un origen magmático, generado por el emplazamiento de un magma de mena es, además, compatible con la morfología, estructura y textura de los cuerpos de mena de los distritos Cerro Negro Norte y Cerro Imán, los que presentan características tanto de cuerpos intrusivos (diques y domos) como efusivos. La geoquímica de las menas de magnetita de los distritos Cerro Negro Norte y Cerro Imán es similar al de las menas de hierro de los distritos El Algarrobo, Pleito y Cristales (Espinoza, 1990), donde existen evidencias texturales y geoquímicas que permiten asignarles un origen magmático (González, 1990; Lorca, 1990; Espinoza, 1990; Nyström y Henríquez, 1994; Travisany *et al.*, 1995). La presencia de flujos de mena de hierro y cavidades vesiculares en los cuerpos macizos de hierro, sugieren un emplazamiento del magma de mena en condiciones muy cercanas, o en superficie.

## GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS

En el presente trabajo se consideran, entre las rocas asociadas con la mineralización de hierro, dos grandes grupos. El primero de ellos corresponde al de las rocas, que en base a criterios petrográficos de terreno, son consideradas sin alteración. Estas se caracterizan por presentar texturas originales preservadas y escasos minerales de alteración (*e.g.*, clorita, epidota, sericita). Desde un punto de vista geoquímico presentan un bajo contenido de volátiles, principalmente H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. Las rocas alteradas corresponden mayoritariamente a las rocas de actinolita, rocas de albita-cuarzo y turmalina-cuarzo.

De acuerdo con la relación entre el contenido total de álcali *versus* el porcentaje relativo de K<sub>2</sub>O (Fig. 2), sólo una parte de aquellas rocas considera-

das no alteradas se ubican dentro del campo definido para las rocas sin alteración, coincidiendo con el 'espectro de las rocas ígneas' (Hughes, 1973). En consecuencia, se puede afirmar que la mayor parte de las rocas volcánicas presentes en las áreas estudiadas tienen algún grado de alteración, en este caso, albitización y alteración potásica. De acuerdo con los contenidos de SiO<sub>2</sub> (Fig. 3), la mayor parte de las rocas no alteradas presentan una composición andesítica, mientras que las rocas alteradas presentan una dispersión mucho mayor, entre basaltos y riolacitas. En cambio, si se utiliza la razón Zr/TiO<sub>2</sub> como un índice de diferenciación y la razón Nb/Y como un índice de alcalinidad (Fig. 4), se observa que la mayor parte de las muestras se concentran en el sector de las rocas alcalinas, en

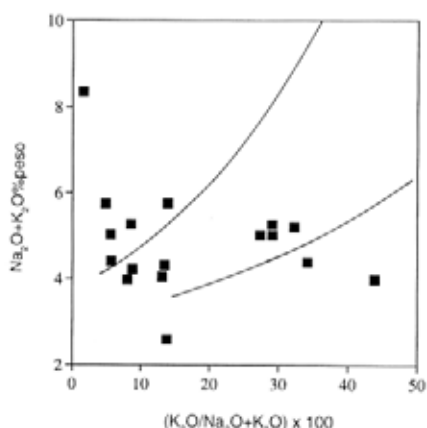


FIG. 2. Diagrama  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  versus  $(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) \times 100$  para rocas volcánicas menos alteradas ('no alteradas') de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral. Sólo aquellas coincidentes con el espectro de las rocas ígneas (Hughes, 1973), comprendido entre ambas líneas, pueden ser consideradas exentas de alteración.

una posición intermedia entre los basaltos alcalinos y el campo asignado a las traquiandesitas. Sólo tres muestras del grupo de las rocas no alteradas presentan una afinidad subalcalina y composiciones basálticas y riódacíticas, respectivamente.

La relación Ti-Zr (Fig. 5) indica que la mayor parte de las rocas no alteradas y alteradas se ubican en el campo de las rocas evolucionadas, coincidiendo con el campo definido para las lavas de arco volcánico; sólo tres muestras no alteradas se ubican en el campo de las rocas máficas. En este diagrama, las rocas afectadas por actinolitización sufren un desplazamiento hacia el punto de origen, disminuyendo sus contenidos relativos de Ti y Zr. Las rocas turmalinizadas se desplazan en un sentido opuesto a las actinolitizadas con un incremento de sus contenidos de Zr y, en menor grado, Ti. Las rocas albitizadas muestran que el proceso de albitización origina en ellas un empobrecimiento en sus contenidos de Ti. Este diagrama, además de mostrar que las rocas volcánicas del área estudiada presentan una composición basáltico-andesítica compatible con un ambiente del tipo arco volcánico, indica que Ti y Zr, comúnmente considerados como elementos refractarios a la alteración, han experimentado un comportamiento relativamente móvil.

El contenido total de álcali ha sido comúnmente utilizado como un índice para determinar el carácter subalcalino o alcalino de las series magmáticas (Irvine y Baragar, 1971; Middlemost, 1991). La correlación del contenido total de álcali con  $\text{SiO}_2$  mues-

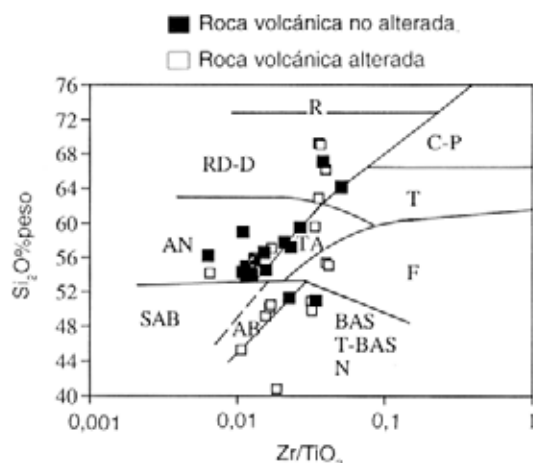


FIG. 3. Diagrama  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  (modificado de Winchester y Floyd, 1977) para rocas volcánicas no alteradas y alteradas de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral, mostrando principalmente una composición andesítica y características coincidentes con rocas de series subalcalinas. R= riolita; RD-D= riódacita; D= dacita; AN= andesita; SAB= basalto subalcalino; AB= basalto alcalino; BAS= basanita; T-BAS= traquibasalto; N= nefelinita; F= fonolita; T= traquita; C= comendita y P= pantellerita; TA= traquiandesita.

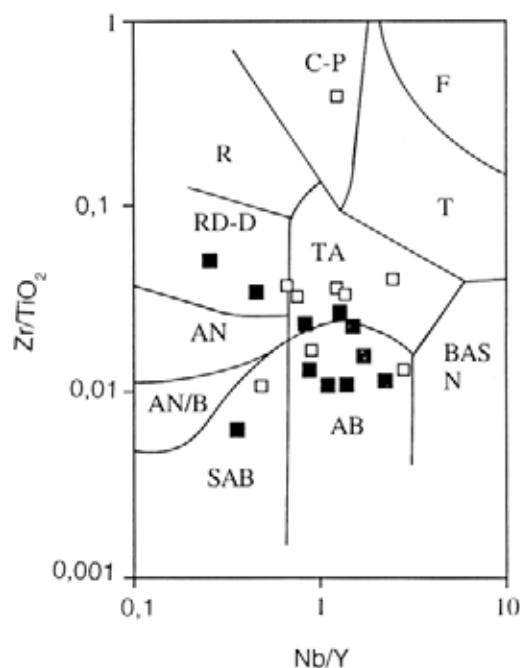


FIG. 4. Diagrama  $\text{Nb}/\text{Y}$ - $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  (modificado de Winchester y Floyd, 1977) para rocas volcánicas no alteradas y alteradas de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral. A diferencia de lo indicado por la figura 3, aquí las rocas volcánicas muestran una afinidad alcalina, con composiciones basálticas a traquiandesíticas. Abreviaturas como en la figura 3.

tra que la mayoría de las rocas (alteradas y no alteradas) son compatibles con las series subalcalinas (Fig. 6). En términos de la relación entre los álcalis, FeO total y MgO (Fig. 7), las rocas no alteradas se ubican mayoritariamente en el campo de las series calco-alcalinas; por efecto de la alteración se observa que las rocas volcánicas afectadas por la actinolitización sufren un fuerte enriquecimiento relativo en Fe y Mg, mientras que aquéllas silicificadas y albitizadas se enriquecen en álcali.

Las rocas volcánicas de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral se caracterizan por patrones normalizados de los elementos de las tierras raras relativamente horizontales (Fig. 8), con

anomalías de Eu poco pronunciadas en Cerro Negro Norte y mejor desarrolladas en el distrito El Romeral y en algunas de las muestras de Cerro Imán. En Cerro Imán, las rocas volcánicas presentan dos tipos de patrones. El primero muy similar al de Cerro Negro Norte, y el segundo caracterizado por una mayor pendiente. La muestra de pendiente más pronunciada, corresponde a una donde el feldespato está moderadamente sericitizado y presenta, además, diseminación de epidota; por otra parte, aquella muestra que presenta una fuerte anomalía negativa de Eu está afectada por un mayor grado de silicificación y turmalinización que el resto de las muestras incluidas en el diagrama.

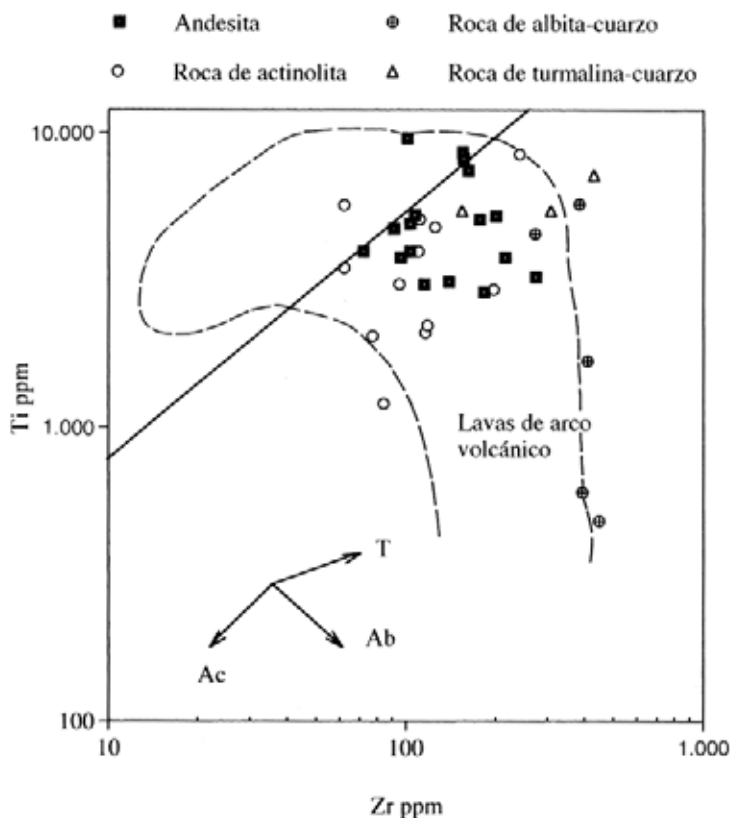


FIG. 5. Diagrama Ti-Zr (modificado de Pearce, 1980) para rocas volcánicas no alteradas y alteradas de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral. La mayor parte de las rocas menos alteradas se ubican en las proximidades de la línea divisoria de las rocas volcánicas basálticas (parte superior) y rocas volcánicas más evolucionadas (parte inferior). Elas coinciden con el campo de las lavas de arcos volcánicos; además, las rocas alteradas muestran que ambos elementos tienen un comportamiento relativamente móvil durante la alteración. Los cambios producidos por los distintos procesos de alteración se indican con las flechas. Ac= actinolitización; Ab= albitización y T= turmalinización.

## GEOQUIMICA DEL ORO

La distribución de los contenidos de oro en rocas volcánicas no alteradas, alteradas y menas de los distritos estudiados se presenta en la figura 9, tablas 1 y 2. La andesita no alterada tiene un contenido

medio de 3,1 ppb y un intervalo de variación entre 0,5 y 10 ppb, con un valor modal en el intervalo 2-3 ppb. La roca de actinolita tiene, en promedio, un contenido de oro y un intervalo de variación muy



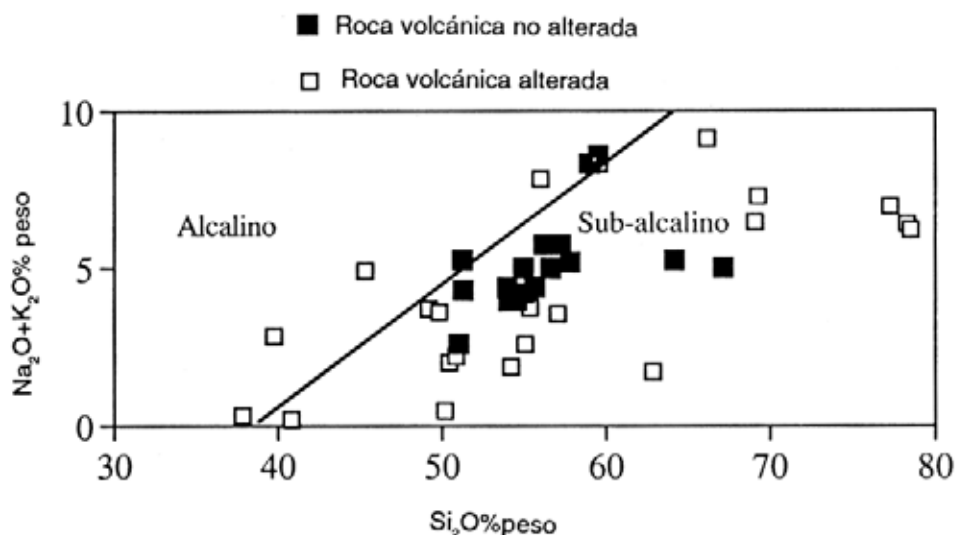


FIG. 6. Diagrama  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  discriminando entre series alcalinas y subalcalinas para las rocas volcánicas no alteradas y alteradas de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral. Aun las muestras que presentan albitización o metasomatismo de K muestran una tendencia mayoritariamente subalcalina. Línea divisoria basada en Irvine y Baragar (1971).

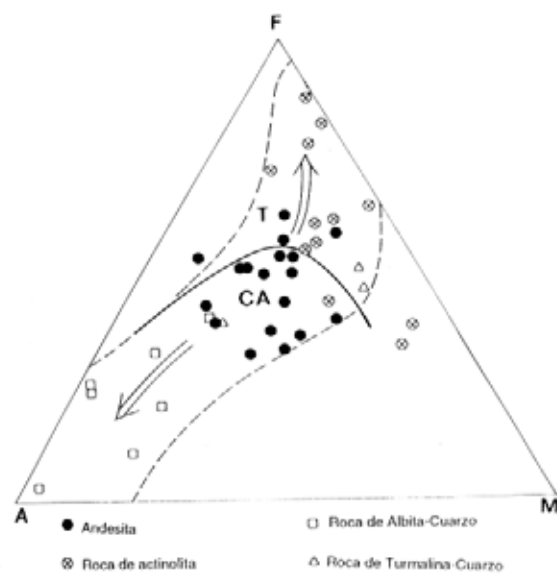


FIG. 7. Diagrama AFM para las rocas volcánicas no alteradas y alteradas de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral. La mayor parte de las rocas menos alteradas se ubican en el campo de las rocas calcoalcalinas (bajo la línea divisoria). Este diagrama muestra, además, los cambios composicionales de las rocas volcánicas originados por la alteración hidrotermal. Línea divisoria basada en Irvine y Baragar (1971). A=  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ; F= FeO total; M= MgO.

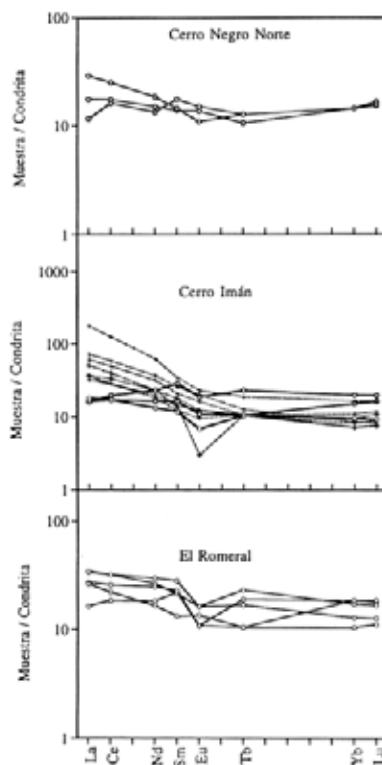


FIG. 8. Patrones normalizados de los Elementos de las Tierras Raras para las rocas andesíticas menos alteradas de los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral.

similar al de la andesita, 3,3 ppb y 0,5-13 ppb, respectivamente, predominando los contenidos menores que 2 ppb. Los contenidos promedio de oro en las menas de hierro son mayores que aquéllos de las rocas volcánicas asociadas. Sus contenidos de oro se caracterizan por presentar un amplio interva-

lo de variación, alcanzando su valor máximo en las menas macizas que contienen pirita. Los mayores contenidos de oro en los distritos estudiados, fueron siempre determinados en muestras de las menas de hierro.

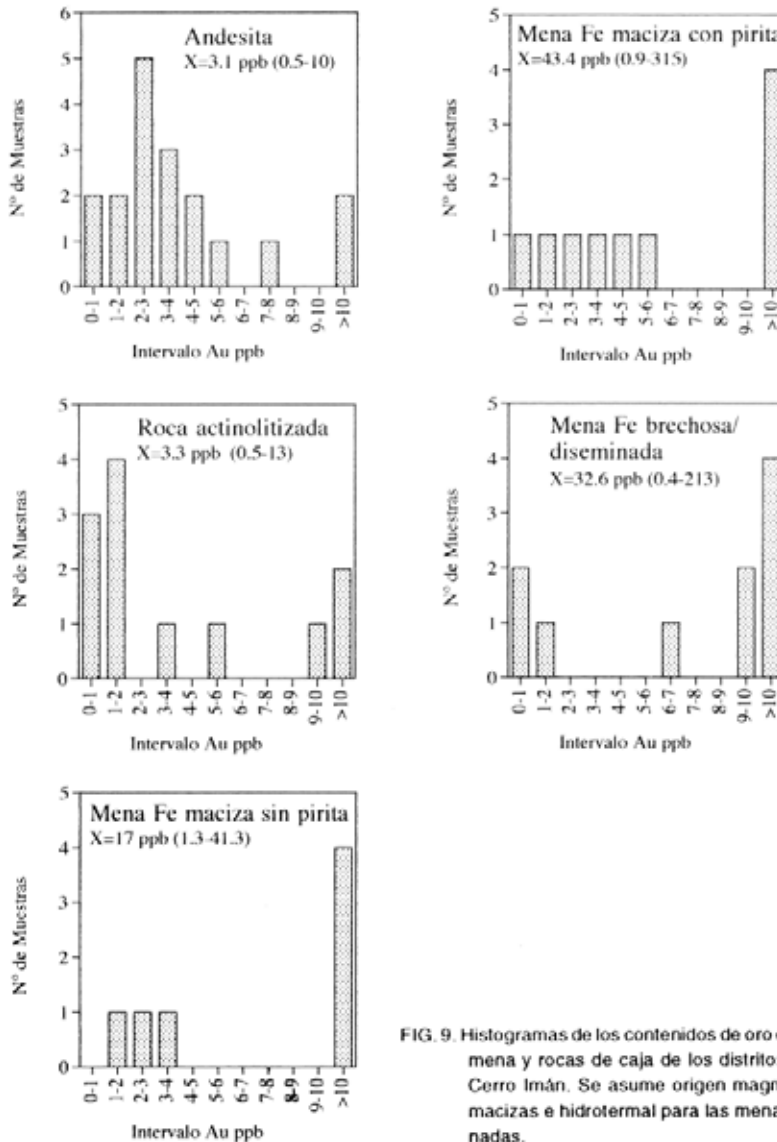


FIG. 9. Histogramas de los contenidos de oro en los distintos tipos de mena y rocas de caja de los distritos Cerro Negro Norte y Cerro Imán. Se asume origen magmático para las menas macizas e hidrotermal para las menas brechosas y diseminadas.

La figura 10 y la tabla 2 muestran la variación de los contenidos de oro en muestras de la mena y concentrados de magnetita y pirita de la misma. En las muestras CN-7A, CN-8B y CN-27B, que corres-

ponden a muestras constituidas mayoritariamente por magnetita y cantidades menores de hematita y actinolita, el contenido de oro en el concentrado de magnetita es casi idéntico a aquél determinado en

TABLA 1. COMPOSICION QUIMICA DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE LA ROCA DE CAJA, ALTERADA Y NO ALTERADA, DE LOS YACIMIENTOS DE HIERRO DE LOS DISTRITOS CERRO NEGRO NORTE, CERRO IMAN Y EL ROMERAL.

Muestra	CN3A	CI 18A	CI 15C	G 5	VM96	CN 5A	CI 24B	CN 5B	CN 14
SiO <sub>2</sub>	56,70	52,50	66,20	57,30	54,70	53,30	48,50	66,10	57,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,40	16,60	15,50	17,50	14,90	8,20	14,40	17,20	17,90
CaO	8,00	8,43	4,18	3,69	11,50	11,20	9,57	1,97	0,96
MgO	5,82	4,92	1,73	2,69	5,50	14,80	7,01	2,35	5,76
Na <sub>2</sub> O	5,42	2,81	4,68	7,99	4,09	1,66	2,37	8,84	1,42
K <sub>2</sub> O	0,28	1,46	0,28	0,13	0,25	0,18	1,30	0,29	0,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,40	9,42	5,47	6,98	5,95	9,89	14,40	1,37	6,62
MnO	0,08	0,14	0,06	0,08	0,14	0,09	0,21	0,02	0,01
TiO <sub>2</sub>	0,86	0,77	0,47	0,64	1,22	0,93	0,79	0,96	1,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,26	0,04	0,15	0,07	0,15	0,06	0,06	0,06
LOI	01,00	1,20	0,50	0,95	0,70	1,82	1,70	1,08	2,47
Total	100,10	98,51	99,11	98,10	99,10	100,00	100,31	100,30	94,10
Rb	26	74	16	12	12	12	48	<10	13
Sr	396	454	454	125	381	64	192	187	157
Y	41	<10	<10	26	48	<10	28	13	22
Zr	201	91	183	72	162	62	125	384	429
Nb	34	13	19	36	42	37	<10	32	27
Ba	81	156	144	57	30	17	137	104	115
B	24	70	27	12	42	15	150	1 580	22 600
F	210	520	<20	<20	<20	970	308	210	560
S	200	200	300	600	100	100	300	200	500
Cl	1 480	908	623	462	1 250	721	3 350	506	183
Sc	28	22	9	19	34	33	25	16	34
V	95	224	66	94	175	354	426	127	370
Cr	29	95	94	24	57	86	65	4	12
Ni	6	32	16	5	18	26	53	9	1
Cu	45	21	16	277	34	61	51	9	35
Zn	18	50	16	18	18	6	70	14	2
As	4	7	4	3	2	<1	6	1	1
La	5,4	22,3	5,7	8,2	5,1	1,9	11,4	1,9	2,7
Ce	14,0	47,0	14,0	18,0	15,0	7,0	27,0	6,0	5,0
Nd	9,0	22,0	8,0	10,0	11,0	5,0	14,0	<5,0	<5,0
Sm	2,7	5,0	2,3	2,8	4,3	2,3	3,5	1,8	0,6
Eu	1,0	1,5	0,5	1,0	0,8	0,6	0,9	0,7	0,4
Tb	<0,5	0,6	0,5	<0,5	0,9	<0,5	0,5	<0,5	<0,5
Yb	3,0	1,8	2,0	2,2	3,9	2,7	1,5	1,5	1,2
Lu	0,5	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5	0,2	0,4	0,2
Hf	4	2	5	1	4	1	3	8	5
Th	9	3	10	2	5	3	4	0	<1
U	1,1	1,3	1,0	<0,5	0,6	1,0	1,4	3,1	0,7
Au	2,4	10,0	2,0	4,0	1,0	9,0	3,0	3,0	52,0

LOI: pérdida por calcinación; Fe total como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Elementos mayores: % peso; elementos en trazas: ppm; oro: ppb.

Muestra: - **Andesita**: CN 3A, CI 18A, CI 15C, G 5, VM 89.

- **Roca de actinolita**: CN 5A, CI 24B.

- **Roca de albita-cuarzo**: CN 5B.

- **Roca de turmalina-cuarzo**: CN 14.

la muestra total. Las muestras CN-8C, CN-26C y CN-26G tienen contenidos de oro en sus concentrados de magnetita menores que aquéllos medidos en el total de la muestra; sin embargo, los tenores de oro en ellos son, en promedio, superiores a los contenidos medios determinados para las rocas de caja. En dos de las tres muestras en que se obtuvieron concentrados de pirita, el contenido de oro en el con-

TABLA 2. CONTENIDOS DE ORO EN DIFERENTES TIPOS DE MENAS DE HIERRO, MINERALES DE LAS MENAS Y MINERALIZACION ASOCIADA A LOS DEPOSITOS DE MAGNETITA-APATITA.

No. Muestra	Tipo de Muestra	Au en mena	Au en magnetita	Au en pirita
CN 8G	Mena de magnetita maciza	31,0	5,1	
CN 10A	Mena de magnetita maciza con aspecto de lava	16,5	80,8	
CN7A	Mena de magnetita maciza con relicto de sulfuros	60,3	50,3	
CN26C	Mena de magnetita maciza con pirita diseminada	17,7	4,6	ND
CN26D	Mena de magnetita maciza con pirita diseminada	315	ND	77
CN26E	Mena de magnetita maciza con vetillas de pirita	1.000	147	>10.000
CI 15A	Mena de magnetita maciza con pirita diseminada	5,5	ND	ND
CI 20H	Mena de magnetita maciza con pirita diseminada y en vetillas	22,5	ND	ND
CN20	Mena de magnetita diseminada en roca de actinolita	13	ND	
CI 21K	Mena de magnetita diseminada en roca de actinolita	0,4	ND	
CN27C	Vetilla de dolomita-magnetita en mena maciza de magnetita	31,4	11,43	
CN25A	Veta de magnetita-cuarzo, en la periferia del distrito	9,9	50,5	
CN26F	Vetilla de pirita-calcita cortando a mena de magnetita maciza			120

- Au: en ppb.

- ND: no determinado.

centrado es muy superior a los valores medidos en la muestra total; en la tercera muestra el concentrado de pirita tiene un contenido de oro más bajo que el observado en la muestra total. Estos resultados demuestran, claramente, que el oro puede concentrarse tanto en la magnetita como en los sulfuros.

El oro contenido en las rocas andesíticas no alteradas muestra una baja correlación con la mayoría de los elementos (mayores, menores, trazas). Las mejores tendencias las presenta con SiO<sub>2</sub>, FeO<sub>3</sub>, MnO y PO<sub>5</sub> entre los elementos mayores, y Zr, Y, F, V, Cr, As, entre los elementos en trazas. En la mayoría de los casos, estas tendencias son compatibles con un proceso de diferenciación magmática, donde los miembros menos diferenciados muestran los valores de Au más altos (Fig. 11). En las rocas alteradas (Fig. 12), afectadas por actinolitización, las mejores tendencias observadas para el oro

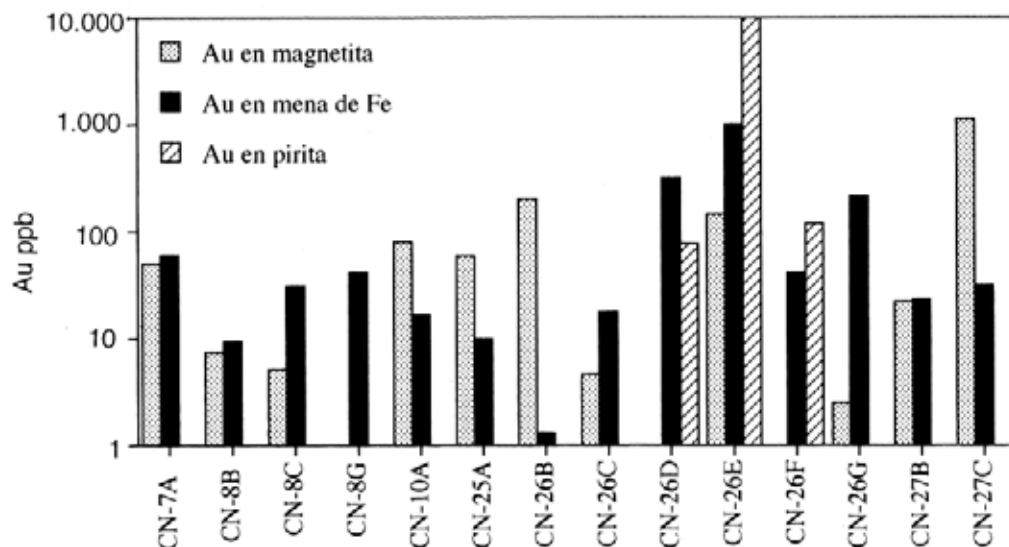
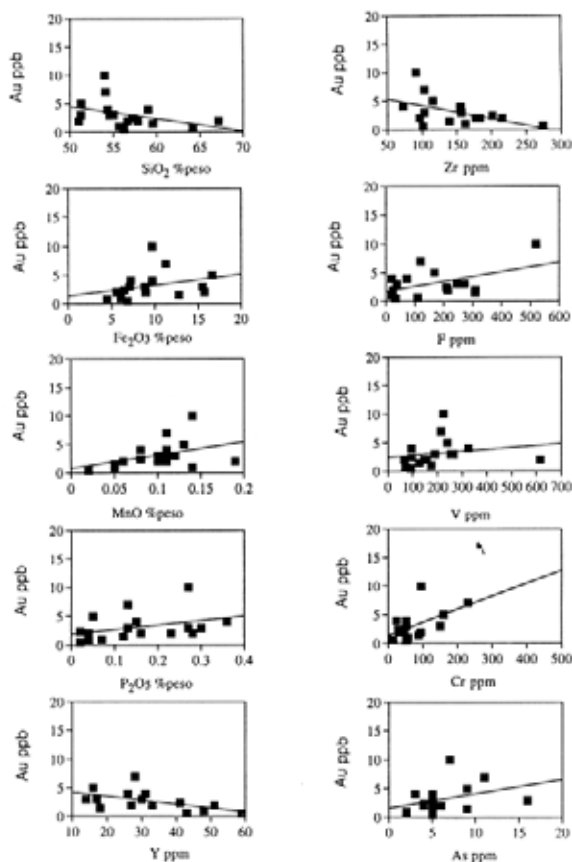


FIG. 10. Distribución de los contenidos de oro en muestras de mena maciza y los respectivos concentrados de magnetita y pirita de cada una de las muestras consideradas. Todas las muestras pertenecen al distrito Cerro Negro Norte (CN).



corresponden a aquellas con  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  volátiles (pérdidas por calcinación), Ba, Zr, Cr, Cu, S y U. Salvo las correlaciones con  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , Zr y Ba?, que parecen corresponder a un patrón magmático, la correlación con el resto de los elementos mencionados, sugiere una influencia hidrotermal en la distribución del oro contenido en estas rocas alteradas.

FIG. 11. Diagramas que muestran las mejores tendencias obtenidas para la correlación del oro con los diferentes componentes de las rocas volcánicas menos alteradas en los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral.

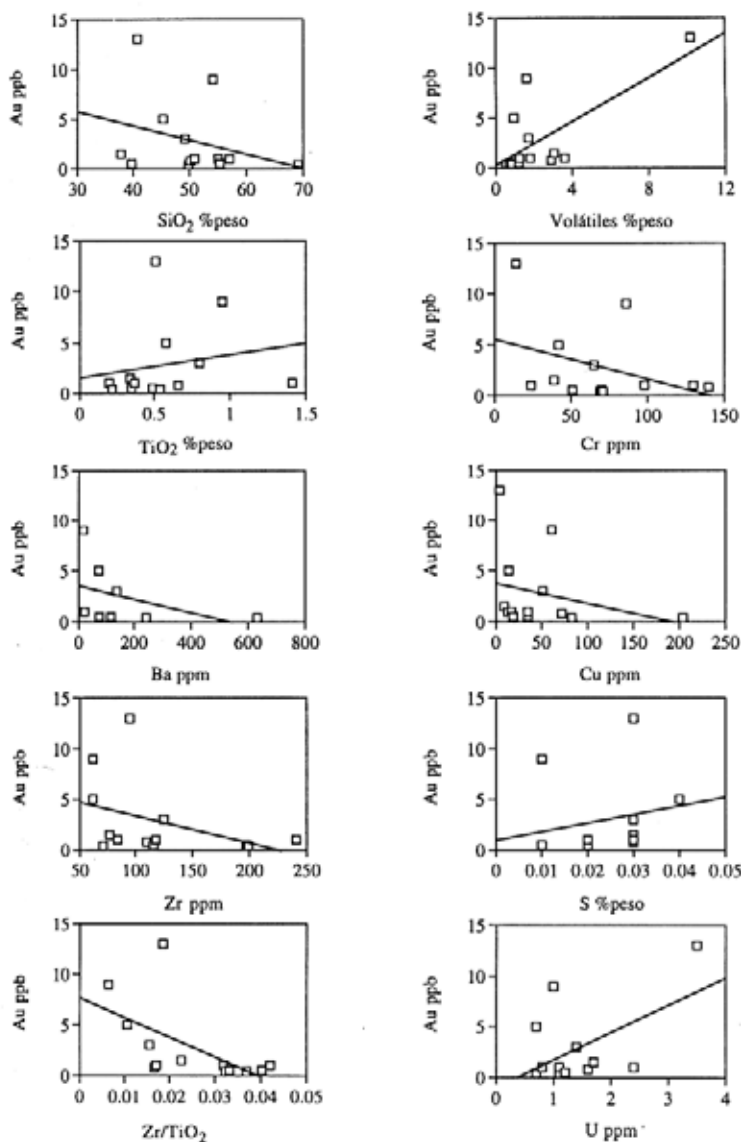


FIG. 12. Diagramas que muestran las mejores tendencias obtenidas para la correlación del oro con los diferentes componentes de las rocas volcánicas alteradas en los distritos Cerro Negro Norte, Cerro Imán y El Romeral.

### DISCUSION

#### AFINIDAD PETROLOGICA DE LAS ROCAS VOLCANICAS Y CARACTER DEL VOLCANISMO

Evidencias de terreno, tales como los cambios graduales entre rocas con distintos tipos e intensidad de alteración y presencia de relictos de roca original dentro de unidades alteradas, demuestran, claramente, que todas ellas tienen un protolito andesítico común (Vivallo *et al.*, 1994, 1995). Al

comparar las composiciones químicas de las rocas alteradas y no alteradas en los distintos diagramas (Figs. 3-7) se observa que la composición original ha sido modificada selectivamente, dependiendo de la intensidad y tipo de alteración que las han afectado. Estos cambios incluyen a elementos considerados tradicionalmente como resistentes a la alteración, *e.g.*, Ti, Zr y Nb. Las modificaciones composicionales experimentadas por las rocas vol-

cánicas, junto al hecho que una parte importante de aquéllas consideradas no alteradas, en base a criterios de terreno, también están alteradas (Fig. 2), dificultan la clasificación y definición de su afinidad petrológica. Si bien la razón  $Zr/TiO_2$  tiende a cambiar, ésta indica, que la mayor parte de las muestras con menor grado de alteración tienen una composición andesítico-basáltica, la que es compatible con sus contenidos de  $SiO_2$ . Las razones  $Nb/Y$  (Fig. 4) indican una clara afinidad alcalina, la cual se contraponen a lo indicado por los contenidos totales de álcali (Fig. 6) y las relaciones entre éstos y los contenidos de  $FeO$  total y  $MgO$ , las cuales indican una pertenencia a las series magmáticas calcoalcalinas para estas andesitas (Fig. 7). A pesar de la alta movilidad con que los elementos mayores responden a los procesos de alteración, se observa claramente que en el caso estudiado las variaciones experimentadas por estos elementos difícilmente permiten inferir una afinidad alcalina de la composición original; por ejemplo, en los diagramas AFM, las rocas de afinidad alcalina tienden a ubicarse sobre la línea divisoria de las series toleíticas y calcoalcalinas (Irvine y Baragar, 1971). La variación de la razón  $Zr/TiO_2$  tiende a confirmar el carácter calcoalcalino de las rocas andesíticas (Fig. 3), puesto que en este caso, las rocas que muestran razones  $Zr/TiO_2$  compatibles con una afinidad alcalina, corresponden mayoritariamente a rocas alteradas. El patrón normalizado de los elementos de las Tierras Raras (Fig. 8), caracterizado por una baja razón  $La/Yb$ , no es compatible con una afinidad alcalina para estas rocas volcánicas. Por lo tanto, parece ser que el carácter alcalino definido por la razón  $Nb/Y$ , más que una característica primaria, sería el resultado de la alteración.

La relación de la mineralización ferrífera con la secuencia de rocas volcánicas andesíticas y granitoides intrusivos observadas en los distritos estudiados, es una constante que se repite para la mayor parte de los distritos de la FFC (Espinoza, 1990). La composición andesítico-basáltica de las rocas volcánicas y su afinidad con un ambiente de arco volcánico, indicada por la relación entre el  $Ti$  y  $Zr$  (Fig. 5), es compatible con la idea que la mayor parte de los yacimientos de hierro de la FFC se emplazaron en el arco magmático del sistema arco-cuenca tras-arco desarrollado en el margen continental durante el Cretácico Inferior (Aguirre, 1985; Espinoza 1990).

El carácter andesítico de la secuencia volcánica y la presencia de distintos intrusivos asociados, junto al predominio de flujos lávicos, sugieren que los yacimientos de hierro se han desarrollado en un ambiente volcánico a subvolcánico. El volcanismo de estas características, generalmente, da origen a grandes estructuras tipo estrato volcán. El amplio predominio de las lavas y la abundancia de diques en los distritos estudiados sugieren que los cuerpos de mena fueron emplazados en una posición proximal con respecto al centro de extrusión, por ejemplo, de una manera similar a lo observado en el distrito El Laco.

#### ALTERACION HIDROTHERMAL ASOCIADA AL EMPLAZAMIENTO DE LAS MENAS DE HIERRO

La presencia de rocas andesíticas alteradas y brechas hidrotermales en torno a las menas de hierro, junto con la presencia de depósitos bandeados de dolomita-magnetita relleno de fracturas en los cuerpos macizos de mena, son testimonios de la presencia de una fuerte actividad hidrotermal. La zonación de las rocas hidrotermalmente alteradas, en torno de los cuerpos de mena, es indicativo de la relación genética entre ambas. Las relaciones texturales de las distintas asociaciones minerales de alteración y de contacto entre la mena y las unidades de rocas alteradas permiten diferenciar un primer evento hidrotermal, responsable de la actinolitización de las rocas de caja en la zona próxima a la mena y albitización hacia la periferia. Desde un punto de vista geoquímico, este evento significó un fuerte metasomatismo de  $Mg$ ,  $Fe$ ,  $Ca$  en las rocas actinolitizadas y una adición de  $Na$  y, probablemente,  $Si$  en las rocas albitizadas (Fig. 7). Además, fue un evento rico en volátiles, principalmente  $P$ ,  $F$ ,  $Cl$ , y  $CO_2$ , (Vivallo *et al.*, 1995). La presencia de un halo externo de alteración, caracterizado por rocas con silíce+turmalina, que contiene relictos de rocas de albita-cuarzo y vetillas de cuarzo-turmalina que cortan a las rocas actinolitizadas y menas de hierro, revelan un segundo evento de alteración rico en silíce,  $B$  y  $F$  que se superpone al primero. Basado en la intensidad y extensión de la alteración y las asociaciones mineralógicas de las rocas alteradas del distrito Cerro Negro Norte, Vivallo *et al.* (1995) sugirieron que este proceso fue desarrollado por un sistema hidrotermal de relativamente alta temperatura, con razón agua/roca alta, inicialmente rico en

Mg, Fe, Ca, F, Cl, P y CO<sub>2</sub> y de pH neutro a ligeramente alcalino, el cual evolucionó posteriormente hacia otro de más baja temperatura, pH ligeramente ácido y rico en sílice, B y F.

#### CONCENTRACION PRIMARIA DE ORO EN LA MENA DE HIERRO

Los contenidos de oro en las rocas de caja y menas de los distritos estudiados (Figs. 9 y 10) demuestran, claramente, que las menas de hierro están fuertemente enriquecidas en oro con respecto a las rocas volcánicas, constituyendo importantes zonas anómalas de hierro y oro. El oro presente en los distintos tipos de menas de ambos distritos se asocia tanto a la magnetita como a la fase sulfurada (principalmente pirita), presentando esta última los contenidos más altos (>10,000 ppb). Estos resultados son consistentes con estudios experimentales (Mironov *et al.*, 1980) indicando que en ambientes magmáticos basálticos, independientemente del grado de cristalización, el oro contenido en el sistema es concentrado predominantemente por el hierro metálico y en menor grado por la troilita. Sin embargo, en ausencia de hierro, todo el oro es concentrado por la fase sulfurada.

En general, las menas de hierro muestran contenidos de S que, localmente, pueden alcanzar valores de hasta 1% en peso, y contenidos de Cl variables entre 200 y 900 ppm. En las rocas no alteradas y las menas de hierro se observa un bajo grado de correlación entre estos elementos y el oro. La falta de correlación de oro con el S parece reflejar una historia compleja para estos elementos dentro del sistema. Las relaciones texturales muestran, claramente, que parte de los sulfuros, especialmente pirita, coexisten con magnetita y otra parte se ubica en vetillas que cortan a la mena de hierro. Estas relaciones indican claramente que los sulfuros se han formado, a lo menos durante dos etapas, la primera probablemente contemporánea con el emplazamiento de los cuerpos macizos de magnetita y

la segunda ligada a procesos hidrotermales posteriores. De esta manera, parte del oro se habría concentrado, inicialmente, en los sulfuros y la magnetita durante el evento que dio origen a los cuerpos macizos de hierro, siendo posteriormente removilizado durante los eventos hidrotermales subsecuentes. Esta removilización del oro durante los eventos hidrotermales que se asocian a la formación de las menas de hierro se ve reflejada, en parte, por las correlaciones que el oro muestra en las rocas alteradas, con los volátiles, Cu y S (Fig. 12).

El enriquecimiento en oro observado en las menas de hierro con respecto a las rocas de caja, sugiere que la generación de un magma de mena formado, por ejemplo, como una fracción inmisible a partir de una fuente común con las rocas volcánicas que constituyen la caja de la mineralización, es un factor que favorece la concentración primaria de oro en la fase de óxidos. El emplazamiento intrusivo/extrusivo de las menas de hierro y la siguiente fase hidrotermal de alta temperatura que le acompaña, caracterizada por un pH neutro a ligeramente alcalino, rico en F, P, Cl, CO<sub>2</sub> y, en menor proporción S, favorecieron la removilización del oro contenido en los óxidos de hierro. Soluciones de estas características tienen una alta capacidad para transportar oro (Boyle, 1979; Seward, 1984; Davidson y Large, 1994), razón por la cual es posible pensar que durante la actividad hidrotermal que siguió al emplazamiento del magma de mena, parte del oro contenido inicialmente en la magnetita fue removilizado. Esta removilización se refleja en los altos contenidos de oro detectados en algunas vetillas de sulfuros que cortan a los cuerpos de magnetita, en sectores con menas de hierro de carácter hidrotermal y por la abundancia de pequeñas vetas de cuarzo-óxidos de hierro±calcita±turmalina, ubicadas en la zona periférica del distrito Cerro Negro Norte (Vivallo *et al.*, 1994), dentro del halo externo silicificado, algunas de las cuales contienen valores de oro de hasta varios ppm.

#### CONCLUSIONES

Los distritos ferríferos Cerro Negro Norte y Cerro Imán, en la FFC, fueron emplazados en un ambiente de arco magmático, caracterizado por magmatismo

de composición predominantemente andesítica y afinidad calco-alcalina.

Las menas de hierro, a las cuales se les asigna

un origen magmático, muestran un fuerte enriquecimiento en oro al ser comparadas con las rocas volcánicas que las contienen.

Asociado al emplazamiento de las menas de hierro se desarrolló una intensa actividad hidrotermal, responsable de la alteración de las rocas de caja, de la formación de vetillas de sulfuros que cortan a la mena de hierro y del desarrollo de brechas hidrotermales. Las rocas hidrotermalmente alteradas muestran una zonación mineralógica y geoquímica en torno a los cuerpos de mena, con una zona interna actinolítica y un halo externo silicificado y en parte turmalinizado. Dentro del halo externo pueden existir relictos de rocas albitizadas. Estas relaciones de contacto permiten diferenciar, a lo menos, dos eventos de actividad hidrotermal. El primero de ellos se caracteriza por soluciones hidro-

termales de pH neutro a ligeramente alcalino, ricas en Ca, Mg, Fe, y volátiles (P, Cl, F, CO<sub>2</sub>), y es responsable de la actinolitización y albitización. El segundo, rico principalmente en sílice, B y F, fue responsable de la silicificación-turmalinización y se sobrepone al primer evento.

La generación del magma de mena favoreció la concentración inicial del oro en la magnetita, transformando los cuerpos de menas en importantes fuentes primarias de oro.

La subsecuente actividad hidrotermal que acompaña al emplazamiento de las menas de hierro, es un factor que potencialmente puede removilizar el oro contenido en los cuerpos de mena y reconcentrarlo para dar origen a yacimientos auríferos de interés económico.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los grants FONDECYT No. 91-1218, SAREC No. 89-101 (Swedish Agency for Research Cooperation with Developing Countries) y DICYT-USACH No. 05-092-15HB. Los autores agradecen las facilidades otorgadas por los Departamentos de Geología de la Universidad de Chile, Ciencias Geológicas de la Universidad Cató-

lica del Norte, Ingeniería de Minas de la Universidad de Santiago de Chile, como así también las facilidades y apoyo brindados por la Compañía Minera del Pacífico (CMP). La cuidadosa revisión realizada por V. Makshev (Cambior Chile S. A.) y R. Sillitoe ayudó a mejorar el presente manuscrito.

#### REFERENCIAS

- Aguirre, L. 1985. The Southern Andes. In *Ocean Basins and Trenches* (Naim, A.E. M.; Stehli, F.G.; Uyeda, S.; editors). *The Pacific Ocean Plenum Press*, Vol. 7, p. 265-376. New York.
- Bernasconi, A. 1985. Archaean gold mineralization in central eastern Brazil: a review. *Mineralium Deposita*, Vol. 20, p. 277-283.
- Boyle, R. W. 1979. The geochemistry of gold and its deposits. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, No. 280, 584 p.
- Davidson, G.J.; Large, R.R. 1994. Gold metallogeny and the copper-gold association of the Australian Proterozoic. *Mineralium Deposita*, Vol. 29, p. 208-223.
- Espinoza, S. 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. In *Stratabound ore deposits in the Andes* (Fonboté, L.; Amstutz, G.C.; Cardoso, M.; Cerdillo, E.; Frutos, J.; editors). *Springer-Verlag*, p. 353-364.
- Frutos, J.; Oyarzún, J. 1975. Tectonic and geochemical evidence concerning the genesis of El Laco magnetite lavaflow deposits, Chile. *Economic Geology*, Vol. 70, p. 988-990.
- 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 de hierro El Algarrobo, III Región, Chile. Memoria de Título (Inédito). *Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica*, 121 p.
- Grez, E.; Aguilar, A.; Henríquez, F.; Nyström, J.O. 1991. Magnetita Pedemales: a new magmatic iron deposit in northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 86, p. 1346-1349.
- 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.



- Hughes, C. J. 1973. Spilites, keratophyres and the igneous spectrum. *Geological Magazine*, Vol. 109, p. 513-527.
- Hutchinson, R. W. 1987. Metallogeny of Precambrian gold deposits: space and time relationships. *Economic Geology*, Vol. 82, p. 1993-2007.
- Irvine, T. N.; Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 8, p. 523-548.
- Keays, R. R.; Scott, R. B. 1976. Precious metals in ocean-ridge basalts: implications for basalts as source rocks for gold mineralization. *Economic Geology*, Vol. 71, p. 705-720.
- Lorca, G. 1990. Caracterización geoquímica y cristalográfica de las piritas de los yacimientos de hierro El Algarrobo y El Romeral. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 138 p.
- Lyons, J. I. 1988. Volcanogenic iron oxide deposits, Cerro Mercado and vicinity, Durango, Mexico. *Economic Geology*, Vol. 83, p. 1886-1906.
- Marakushev, A.A. 1977. Geochemical properties of gold and conditions of its endogenic concentration. *Mineralium Deposita*, Vol. 12, p. 123-141.
- Meyer, C. 1985. Ore metals through geologic history. *Science*, Vol. 227, p. 1421-1428.
- Middlemost, E.A.K. 1991. Towards a comprehensive classification of igneous rocks and magmas. *Earth Science Reviews*, Vol. 31, p. 73-87.
- Mironov, A.G.; Al'mukhamedov, A.I.; Medvedev, A.Ya.; Krendel'ev, F.P. 1980. Geochemistry of gold in melts of basaltic composition (from experimental data). *Geochemistry International*, Vol. 15, No. 6, p. 23-35.
- 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.
- Park, Jr., C.F. 1961. A magnetite 'flow' in northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 56, p. 431-441.
- Pearce, J. A. 1980. Geochemical evidence for the genesis and eruptive setting of lavas from Thetian ophiolites. In *Ophiolites, Ophiolite Symposium, Cyprus 1979, Proceedings*, p. 261-272.
- Ruiz, C.; Aguirre, L.; Corvalán, J.; Klohn, E.; Levi, B. 1965. Geología y yacimientos metalíferos de Chile. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, 305 p.
- Seegerstrom, K. 1968. Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado, Provincia de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 24, 58 p.
- Seward, T.M. 1984. The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In *Gold '82: The geology, geochemistry and genesis of gold deposits. Geological Society of Zimbabwe, Special Publication*, No. 1, p. 165-181. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Travisany, V.; Henríquez, F.; Nyström, J. O. 1995. Magnetite lava flows in the Pleito Melón district of the Chilean Iron Belt. *Economic Geology*, Vol. 90, p. 438-444.
- Vivallo, W.; Henríquez, F.; Espinoza, S. 1991. Alteración hidrotermal en el complejo volcánico El Laco, Norte de Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas*, p. 44-47. Viña del Mar.
- Vivallo, W.; Espinoza, S.; Henríquez, F. 1994. Geología y Mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 21, No. 2, p. 197-212.
- 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. 22, No. 1, p. 75-88.
- Winchester, J.A.; Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, Vol. 20, p. 325-343.