

GEOLOGIA Y MINERALIZACION DEL YACIMIENTO TIPO PORFIDO CUPRIFERO ZALDIVAR, EN LOS ANDES DEL NORTE DE CHILE

MARCIAL MATURANA
NICOLAS SAFIC

Sociedad Minera Pudahuel, Ltda. y Cía. C.P.A.
Avda. Lyon 527, Santiago, Chile.

RESUMEN

El yacimiento de cobre y molibdeno Zaldivar, en el extremo norte del distrito de la mina La Escondida, corresponde a un pórfido cuprífero en el cual el desarrollo de un horizonte de enriquecimiento secundario permitió la formación de un depósito económicamente explotable. El emplazamiento de los intrusivos oligocenos tempranos, asociados a este yacimiento, fue controlado por fallas regionales del sistema de Falla Oeste de Chuquicamata. Luego de la intrusión del 'stock' félsico principal, posiblemente de composiciones dacíticas a riodacíticas, con su alteración cuarzo-sericitica y la mineralización primaria de más alta ley, se desarrolló un sistema de fracturamiento que controló las intrusiones posteriores: la primera de ellas también félsica, con alteración algo más silíceo y mineralización primaria menos intensa, y la más tardía consistente en filones dioríticos a cuarzo-dioríticos con débil alteración potásica y escasa mineralización primaria. En el desarrollo de proceso de enriquecimiento supérgeno acumulativo, uno de los factores más importantes ha sido la baja reactividad de los intrusivos ácidos cuarzo-sericitizados; ello permitió la reconcentración acumulativa de los contenidos de cobre con los sucesivos descensos del nivel freático, debidos al sollevamiento tectónico eoceno superior-oligoceno y a la desecación climática progresiva que experimentó la región desde el Mioceno medio. La disminución posterior de la tasa de erosión y el aumento de la aridez de la región, permitieron la preservación del enriquecimiento supérgeno formado hacia el Mioceno medio.

Palabras claves: Pórfidos cupríferos, Enriquecimiento supérgeno acumulativo, Sistema de la Falla Oeste, Fases intrusivas, Andes, Chile.

ABSTRACT

The Zaldivar copper-molybdenum deposit, located in the northern part of the district that includes the La Escondida mine, is a porphyry copper deposit where the development of a supergene enrichment blanket produced economic copper concentrations. Faults belonging to the Falla Oeste (at Chuquicamata) system controlled the emplacement of the Early Oligocene intrusions related to the deposit. After intrusion of the main felsic stock, possibly dacitic to rhyodacitic in composition, which is strongly sericitized, silicified, and contains the richest hypogene mineralization, faulting controlled subsequent intrusions: the first one, also felsic in composition, affected by more siliceous alteration and less intensely mineralized, and the last one, comprising diorite to quartz-diorite dykes and only weakly K-silicate altered and mineralized. One of the most important factors in the development of the cumulative supergene copper enrichment was the non-reactive nature of the quartz-sericite-altered felsic intrusions, which allowed progressive concentration of copper during descent of the water table in response to the Upper Eocene-Oligocene uplift and climatic dessication that took place in the region since the Middle Miocene. Subsequent decrease of erosion rates and increase in aridity in the region allowed preservation of the supergene enrichment zone already formed by the mid-Miocene.

Key words: Porphyry copper deposits, Cumulative supergene copper enrichment, Falla Oeste fault system, Intrusive phases, Andes, Chile.

INTRODUCCION

El yacimiento Zaldivar está ubicado en los Andes del norte de Chile, en la provincia de Antofagasta de la Segunda Región. Su altura media es de 3.400 m s.n.m. y sus coordenadas geográficas son: 24°12' 30" S y 69°04'00" W. La mina de cobre La Escondida se ubica 5 km hacia el sur, en el mismo distrito minero (Fig. 1).

Entre 1981 y 1989, el pórfido de cobre y molibdeno de Zaldivar fue estudiado, en una primera etapa, por Minera Utah de Chile Ltda. (Ortiz *et al.*, 1986) y, posteriormente, por la Sociedad Minera La Cascada, Ltda. Hasta fines de 1989, se perforaron 101 sondajes diamantinos y de polvo, con un metraje total acumulado cercano a los 36.000 m. Estos trabajos fueron complementados con mapeos geológicos de superficie, muestreos geoquímicos de roca, muestreos de sulfuros relictos, levantamientos magnéticos terrestres y excavación de trincheras con bulldozer.

Como resultado de estos trabajos se ha podido delinear un depósito de dimensiones mayores, en el que la mineralización hipógena es de baja ley (menor que 0,5% Cu). Los procesos supérgenos han tenido vital importancia en la reconcentración de los contenidos de cobre, en un horizonte de enriquecimiento secundario y en cuerpos de oxidados de cobre.

En Noviembre de 1989, mediante licitación pública, las pertenencias que amparan este yacimiento pasaron a poder de Minera Outokumpu Chile Ltda., quienes han efectuado una cantidad adicional de sondajes y labores subterráneas para acceder al cuerpo mineralizado.

En las páginas siguientes, se resume el conocimiento que se tiene de la historia local de intrusión-alteración-mineralización hipógena, y de la forma en que esta mineralización habría sido reconcentrada por procesos supérgenos, basado en la información obtenida hasta la fecha de licitación del yacimiento, principalmente por Minera Utah de Chile y Sociedad Minera La Cascada Ltda. La mayor parte de esta información se encuentra contenida en informes inéditos, efectuados durante el desarrollo de los

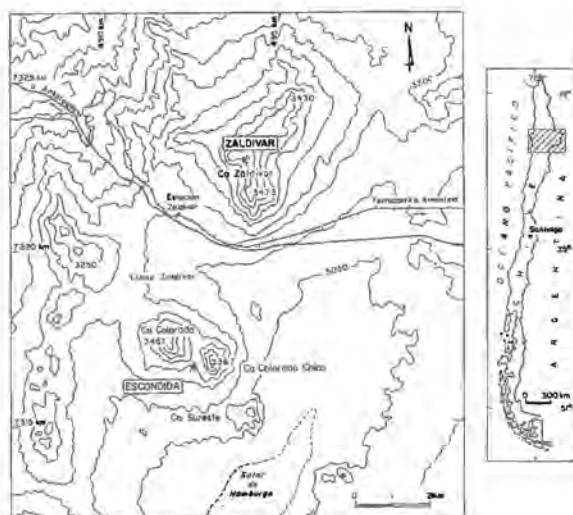


FIG. 1. Mapa de ubicación del área en estudio.

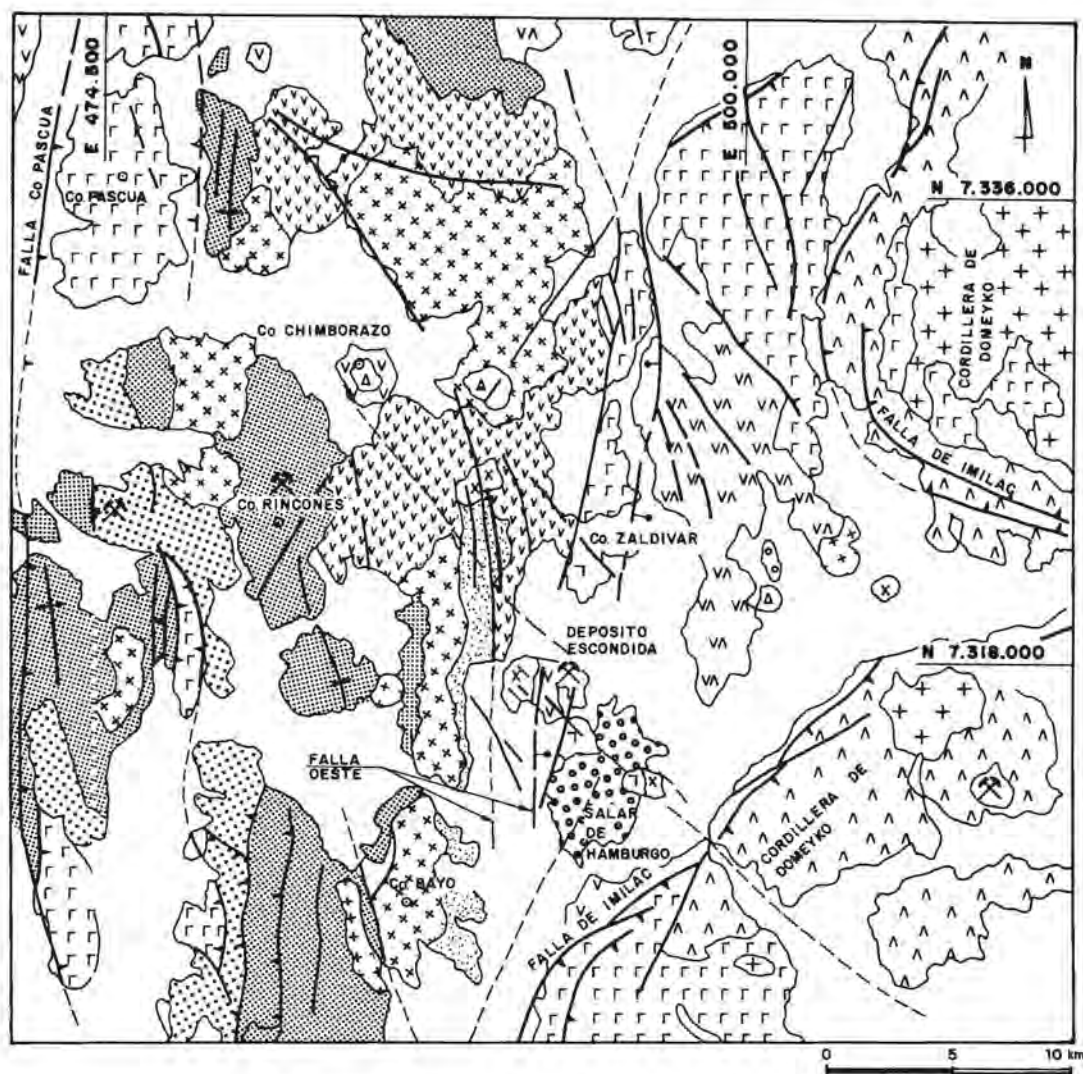
trabajos exploratorios.

Cabe señalar que las últimas informaciones (El Mercurio, 14 de Marzo de 1991) han mencionado una estimación de reservas de 100 millones de toneladas con 1,67% Cu.

MARCO GEOLOGICO REGIONAL

En el área del yacimiento y sus vecindades (Fig. 2), un complejo de pórfidos e intrusivos subvolcánicos terciarios consistentes en riodacitas y monzonitas a dioritas (pórfidos Colorado Grande y Escondida, al

sur del yacimiento) intruyen a rocas andesíticas del Terciario inferior pertenecientes a la Formación Augusta Victoria (Ojeda, 1986). Las dataciones K-Ar de los pórfidos en La Escondida (Alpers, 1986;



LEYENDA

ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCANICAS

- Cuaternario a Terciario superior
- a : Aluvio y depósitos de ceniza volcánica
b : Salares
- Terciario inferior
- Formación Augusta Victoria: continental, volcánica
- Rocas sedimentarias, marinas y continentales
- Formación El Profeta: principalmente calizas
- Rocas sedimentarias clásticas, probablemente triásicas
- Triásico inferior a Paleozoico Superior
- Secuencia Imilac: andesitas y calizas
- Paleozoico Superior
- Formación La Tabla a : riolitas
b : andesitas

ROCAS INTRUSIVAS

- Pórfido riolítico
- Terciario medio
- Brechas (sílicas, de ruptura, etc.)
- Terciario inferior a Cretácico Superior
- Pórfidos monzónicos a gábricos
- Paleozoico Superior
- Granitos a tonalitas

SIMBOLOS

- Falla normal
- Falla inversa
- Zona de falla
- Falla inferida
- Sinclinal
- Anticlinal
- Mina
- Cumbre de cerro

FIG. 2. Mapa geológico de superficie. (Según J. Perelló, in Ojeda, 1990).

Alpers y Brimhall, 1988) indican edades en el intervalo 31,8-34,6 Ma, correspondientes al Oligoceno inferior.

El emplazamiento de los intrusivos está regionalmente controlado por grandes fallas de rumbo, de dirección norte-sur y desplazamiento dextral (Reutter *et al.*, 1991), pertenecientes al sistema de Falla Oeste de Chuquicamata (Ojeda, 1986, 1990).

Hacia el oeste del yacimiento, afloran areniscas y conglomerados, probablemente triásicos, y rocas jurásicas marinas plegadas (pizarras, calizas y calcarenitas) pertenecientes a la Formación El Profeta. Ellas se encuentran cubiertas, en aparente concordancia, por rocas marino-continetales que incluyen areniscas, lutitas, calcarenitas, y conglomera-

dos y pizarras rojas de probable edad cretácica inferior. Ambas unidades infrayacen, con discordancia angular, a las volcanitas del Terciario inferior de la Formación Augusta Victoria y se encuentran intruidas por una monzodiorita posiblemente del Terciario inferior a medio (García, 1967; Ojeda, 1984).

Hacia el este del yacimiento, afloran secuencias volcánicas del Paleozoico Superior (Formación La Tabla, secuencia de Imilac, Fig. 2) y los intrusivos del Paleozoico Superior (granitos, granodioritas, tonalitas) y Terciario (riodacitas) de la Cordillera de Domeyko. Hacia el oeste, estas rocas están en contacto por falla (Falla Panadero) con la Formación Augusta Victoria, estructura a la cual se asocia el yacimiento Zaldívar.

GEOLOGIA DEL YACIMIENTO

EVENTOS INTRUSIVOS Y DE ALTERACION HIPOGENA

El yacimiento Zaldívar está asociado, genéticamente, a un conjunto de intrusivos porfídicos, que incluyen pórfidos riolíticos tempranos (Pórfidos A y B) y una fase más tardía de pórfidos dioríticos. La mineralización y alteración hipógena más intensa se asocian a los pórfidos riolíticos tempranos. Aunque no se cuenta con dataciones radiométricas, en la zona del yacimiento el análisis de sondeos ha permitido establecer el carácter claramente intrusivo del contacto entre el pórfido más temprano (A) y la Formación Augusta Victoria del Terciario inferior (Figs. 2, 4), y de los pórfidos tardíos con el Pórfido A. Las relaciones de terreno, comparaciones petrográficas y la gran proximidad del yacimiento La Escondida, con el cual comparte el mismo marco estructural, permiten inferir una edad terciaria, probablemente oligocena, para el sistema Zaldívar.

PORFIDO A

El primer evento de intrusión reconocido en el yacimiento consistió en el emplazamiento de un pórfido félsico, posiblemente de composición dacítica a riodacítica, al que se ha denominado localmente Pórfido A. Este pórfido se caracteriza por sus contactos rectilíneos subverticales, por su textura porfídica a equigranular, de grano fino a medio, con escasa masa fundamental, y por la presencia de ojos de cuarzo redondeados de 3-5 mm de diámetro. Ge-

neralmente, el Pórfido A contiene 25-30% de masa fundamental consistente en un agregado de grano muy fino de cuarzo, cantidades variables de sericita hidrotermal y, en menor proporción, rutilo, circón y calcita. Los fenocristales consisten en 10-15% de ojos de cuarzo, plagioclasa en cristales euhedrales de 3-5 mm y escasos ferromagnesianos (¿biotita?) completamente alterados a sericita y con presencia de inclusiones de rutilo.

Separado de los pórfidos de La Escondida por rocas volcánicas, el Pórfido A forma un stock con afloramientos que cubren un área de aproximadamente 2 x 4 km (incluido en el 'porfido riolítico' de la figura 2), alargada en sentido norte-sur y limitada en sus costados este y oeste por lineamientos de rumbo norte-sur, los que han sido correlacionados por J. Baker (*in* Ojeda, 1990) con fallas pertenecientes al sistema de Falla Oeste de Chuquicamata. Estas fallas serían anteriores a la intrusión (Ojeda, 1990) y habrían controlado, regionalmente, el emplazamiento de los pórfidos.

En el sector del yacimiento, el Pórfido A se encuentra, en general, sericitizado y silicificado, pero existe un núcleo central en el que la silicificación es débil y la sericitización varía entre débil e intensa (Fig. 3). En partes de este núcleo central en superficie, las celdillas residuales de los sulfuros lixiviados son más abundantes y llegan a constituir el 10% del volumen de la roca. Esta zona tiende a perderse en profundidad pasando a roca intensamente silicificada, lo que puede atribuirse a una zonación propia de la alteración del Pórfido A o a su modificación por

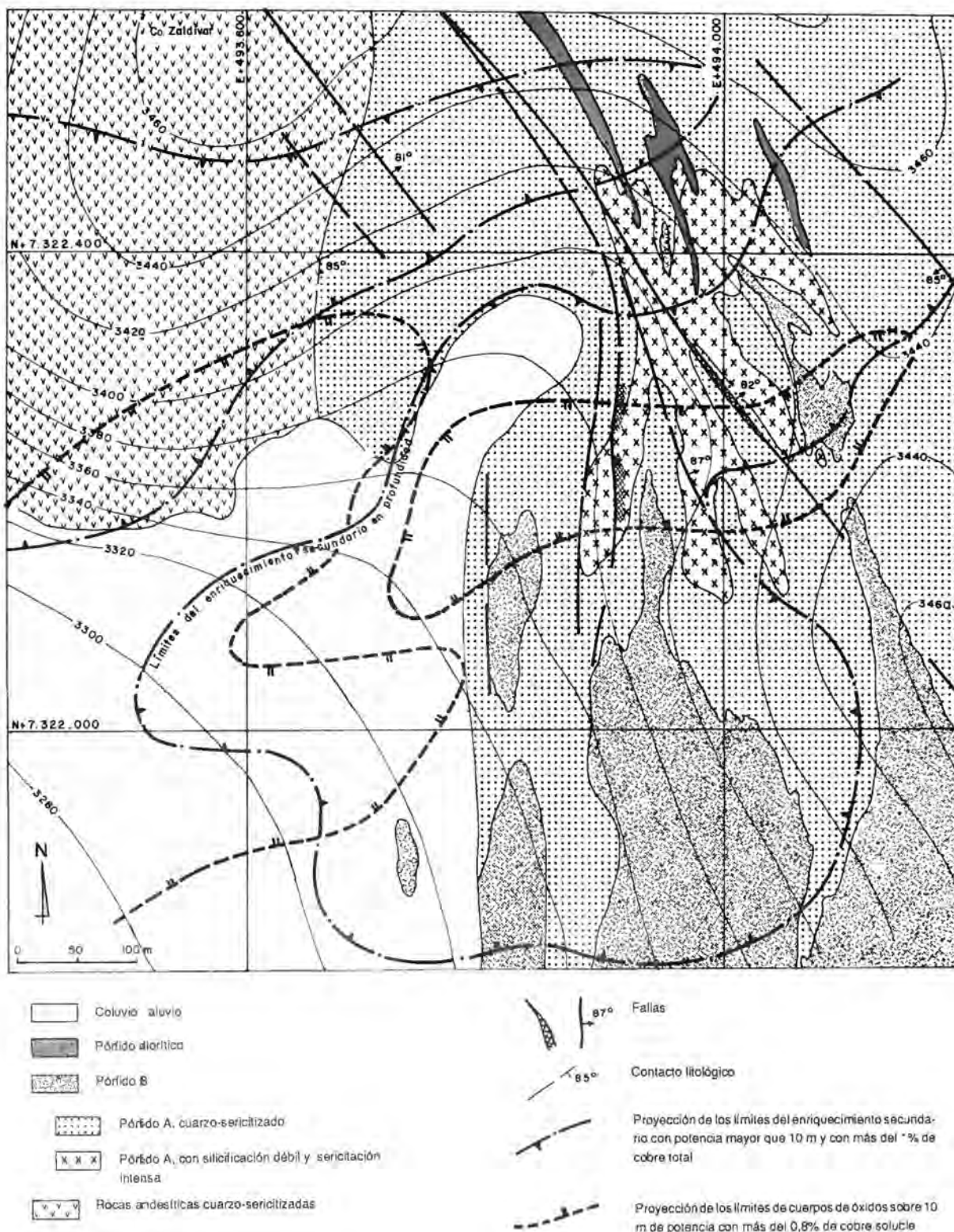


FIG. 3. Mapa geológico de superficie.

sobreimposición de alteraciones asociadas a la intrusión de pórfidos más jóvenes.

La alteración cuarzo-sericitica en rocas del Pórfido A se caracteriza por la sericitización de los fenocristales de plagioclasa y de minerales máficos, y por el desarrollo de un fino entrecrecimiento de cuarzo y sericita como halo a vetillas de cuarzo, que eventualmente destruye las texturas originales. Las vetillas de cuarzo pueden o no contener sulfuros hipógenos. Vetillas finas, que contienen únicamente sulfuros también desarrollan este tipo de halos.

Luego de la intrusión del Pórfido A, se desarrolló o reactivó un sistema de fracturamiento subvertical de rumbo noroeste-sureste que controla, en alguna medida, las intrusiones posteriores. Estas últimas intrusiones tienen un carácter filoniano y parecen emplazarse en fracturas de tensión de rumbo cercano a norte-sur y manto hacia el este, asociadas a las fracturas de cizalla de rumbo noreste-sureste. El fracturamiento afecta, principalmente, a las rocas del Pórfido A.

PORFIDO B

La primera de las intrusiones posteriores está constituida por un pórfido félsico, posiblemente de composición dacítica a riodacítica, al que se ha llamado Pórfido B. Este pórfido se caracteriza por su textura porfídica con abundante (> 40%) masa fundamental, por la presencia de fenocristales de plagioclasa (albita) pequeños (1,0-1,5 mm) y delgados, y por la presencia de abundantes (35-40%) ojos de cuarzo de 0,5-1,0 mm, angulosos a subredondeados los más finos. En partes, también se observa hasta un 10% de ojos de cuarzo grandes, de unos 3 mm de diámetro que, en general, se encuentran quebrados con lo que sus contornos se vuelven más angulosos; algunos de ellos presentan extinción ondulosa y en la mayoría abundan las inclusiones fluidas con gas, líquido con gas y líquido-gas-hijos (halita-hematita). En algunos lugares la textura de la masa fundamental puede ser fluidal y en ella se observan cantidades menores de circón, rutilo y sericita.

A esta intrusión se asocia una silicificación moderada a intensa, la que también se extiende como un halo de hasta algunas decenas de metros en el Pórfido A intruido por ella. En general, la sericitización es menos intensa que en el Pórfido A y el contenido de sulfuros primarios es inferior al 5% del volumen.

En el núcleo central de silicificación débil (sericitización más intensa) del Pórfido A, la silicificación tiende a presentarse como vetillas de bordes poco nítidos, de hasta unos 5 cm de espesor, producidas por reemplazo de la roca a partir de fracturas delgadas (< 1 mm de espesor); localmente, las vetillas pueden coalescer provocando un reemplazo macizo. Las vetillas se concentran junto a las fallas del sistema noroeste-sureste y en los contactos con rocas del Pórfido B, y podrían estar asociadas a la alteración de éste.

Es posible que en profundidad, bajo este núcleo central del Pórfido A, se hubiese formado una zona de alteración potásica, siguiendo un esquema de zonación normal, pero la intrusión del Pórfido B la habría eliminado.

PORFIDO DIORITICO

La última fase intrusiva consiste en filones de pórfido diorítico, de hasta unos 90 m de potencia, con alteración potásica moderada y un contenido de sulfuros primarios de 1-3% del volumen. La textura es porfídica a equigranular de grano fino a grueso (1-6 mm), con fenocristales de plagioclasa (oligoclasa-andesina) con biotita hidrotermal a través de los planos de maclas, con fenocristales de anfíbola totalmente alterados a biotita hidrotermal cloritizada por procesos supérgenos, y con escaso cuarzo, esfeno alterado a leucóxeno y feldespato potásico parcialmente sericitizado.

En algunos lugares, el Pórfido Diorítico contiene hasta un 5% de ojos de cuarzo redondeado de tamaño pequeño (1,0-2,5 mm), aproximándose en composición a una diorita cuarcífera. Probablemente, en esta unidad, se está incluyendo más de una fase de intrusión, algunas de las cuales contienen mineralización hipógena débil y piritosa.

ALTERACION HIPOGENA DE LAS ROCAS DE CAJA

Las andesitas porfídicas, finas a afaníticas (en parte brechosas), que forman la caja oeste de los intrusivos (Fig. 3), presentan, en superficie, una

silicificación moderada a intensa y una sericitización moderada, que se extiende hasta unos 600 m del contacto con los intrusivos. A distancias mayores, la

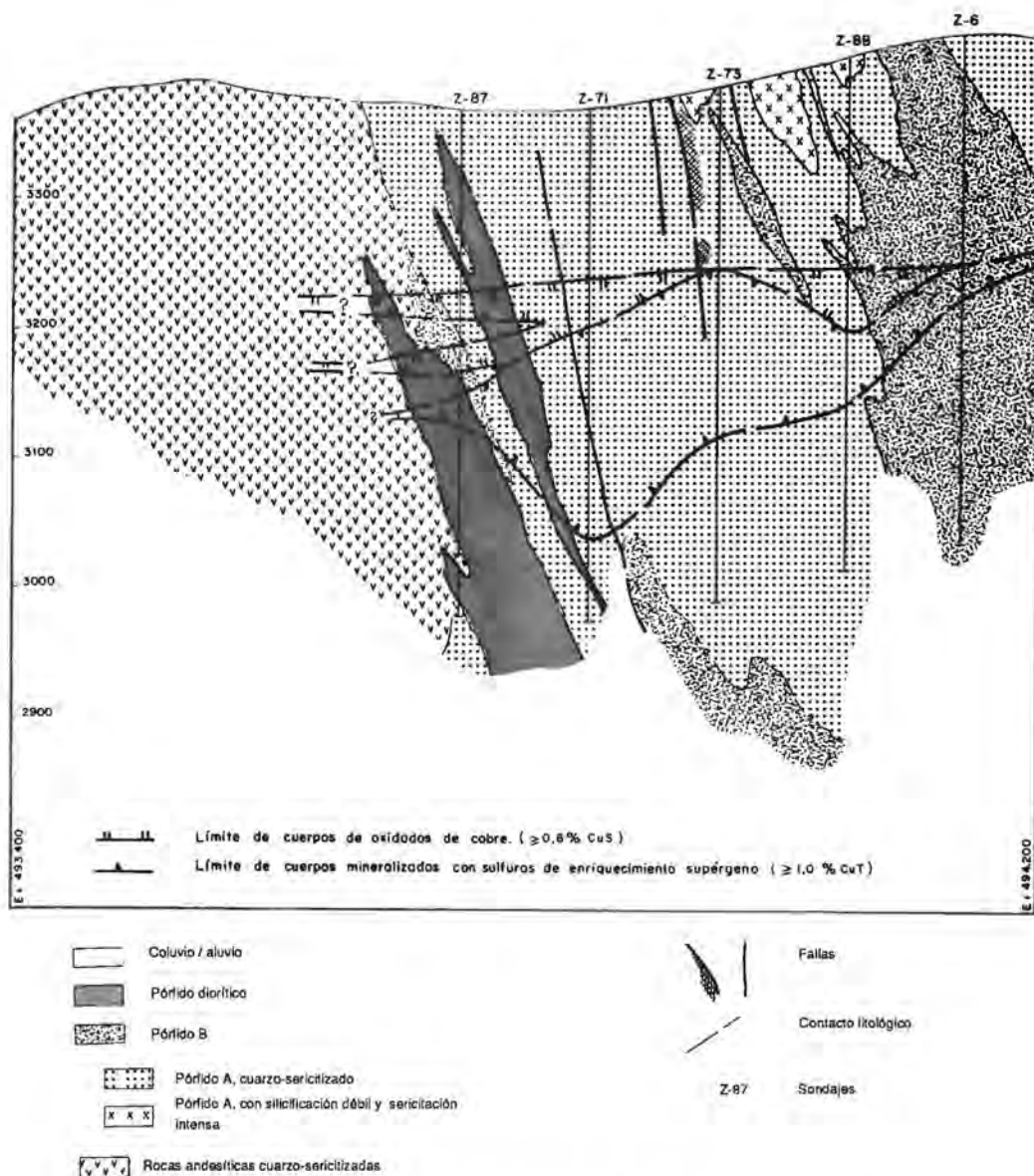


FIG. 4. Sección geológica vertical oeste-este por la coordenada N+7.322.250.

alteración hipógena cambia a una cloritización intensa con escasa epidota.

En la zona silicificada, los escasos fenocristales de plagioclasas están totalmente sericitizados a cuarzo-sericitizados, mientras que la masa funda-

mental presenta una silicificación más intensa y una sericitización más débil. También se observan sulfuros diseminados y delgadas vetillas ($< 0,1 \text{ mm}$) formadas por cuarzo, sericita y sulfuros o solamente por sulfuros.

ESTRUCTURAS

En Zaldívar, se distinguen dos sistemas de fracturamiento subvertical: uno de rumbo norte-sur y un

segundo de rumbo noroeste-sureste.

El sistema norte-sur está representado por los

lineamientos que regionalmente limitan las intrusiones por los costados este y oeste, y que han sido descritos como fallas Panadero y Portezuelo en la mina La Escondida, al sur del distrito (Ojeda, 1986). Estas fallas han sido asociadas al sistema de Falla Oeste de Chuquicamata, y se estima que son anteriores a los pórfidos y controlaron regionalmente su emplazamiento (Baker, 1981, en Torrejón, 1987).

El sistema noroeste-sureste afecta a las rocas del Pórfido A y a las cajas andesíticas, y parece haber controlado el emplazamiento de los pórfidos B y Diorítico en la forma que antes se mencionara. Las fallas mayores del sistema frecuentemente apare-

cen rellenas con vetas de cuarzo macizo de hasta 1 m de espesor. En la parte central del yacimiento, fracturas de tensión de rumbo norte-sur parecen haberse originado como resultado de la cizalla a lo largo de una de las fallas noroeste-sureste principales. El fracturamiento controla, en alguna medida, el emplazamiento de los sulfuros supérgenos, al aumentar la permeabilidad de las rocas.

En algunos lugares de la parte central del yacimiento, preferentemente en rocas pertenecientes al Pórfido A poco silicificado, se observa el desarrollo de brechas hidrotermales con espacios abiertos junto a las fracturas de tensión norte-sur.

MINERALIZACION HIPOGENA

La mineralización hipógena en el núcleo de alteración sericitica más intensa y silicificación débil del Pórfido A parece haber sido la más abundante, aunque en el presente se encuentra completamente lixiviada. En este núcleo y en sus inmediaciones, el examen de sulfuros relictos sugiere que la mineralización hipógena habría consistido en pirita-calcopirita, con cantidades menores de bornita (especialmente en la parte alta) y molibdenita. Hacia su periferia, en profundidad, en rocas de los restantes pórfidos y en las cajas de rocas andesíticas silicificadas, la mineralización primaria es menos intensa y/o más pirítica; en estos lugares la razón pirita/calcopirita es cercana a 5.

En su mayor parte la mineralización se presenta diseminada y no en vetillas, lo que es poco usual en yacimientos del tipo pórfido cuprífero. La minerali-

zación primaria conforma un 'protore' de baja ley en cobre (menor que 0,5% Cu), con indicios de plata y molibdeno, y ausencia de oro.

Como las vetillas no son tan frecuentes, las relaciones entre ellas que se pudieron establecer son sólo preliminares. En el Pórfido A, se observaron dos generaciones de vetillas: una más antigua con cuarzo con o sin sulfuros y con halos cuarzo-sericiticos que, en general, se desarrollan mejor en las más delgadas, y una segunda más joven con sulfuros con o sin cuarzo y débiles halos silíceos. En rocas del Pórfido B, se observaron vetillas del segundo tipo, con halos de silicificación poco evidentes y una generación posterior de vetillas de cuarzo de grano más grueso y que, a menudo, rellenan espacios abiertos.

MINERALIZACION SUPERGENA Y PROCESOS ASOCIADOS

En la región, desde el Mioceno medio se ha producido una marcada disminución de la tasa de erosión (Mortimer *et al.*, 1975; Alpers *et al.*, 1988, 1989).

El sollevamiento producido por la tectónica de bloques del Eoceno superior-Oligoceno (Maksaev, 1990), sumado a la desecación climática, habría contribuido al descenso del nivel freático, proporcionando las condiciones óptimas para el desarrollo de un enriquecimiento supérgeno acumulativo, el cual habría finalizado hacia el Mioceno medio. En La Escondida, Alpers (1986) obtuvo dataciones K-Ar de 18,0-14,7 Ma (correspondientes al Mioceno inferior a

medio) para los procesos supérgenos.

La marcada disminución de la tasa de erosión y la aridez, que ha experimentado el Desierto de Atacama hasta el presente, permite explicar la preservación del enriquecimiento formado.

La mineralización primaria ha sufrido oxidación y lixiviación y, debido al ambiente general ácido y no reactivo de los pórfidos sericitizados y silicificados, las soluciones han migrado hacia abajo y lateralmente hacia el oeste-suroeste, siguiendo el descenso del nivel de aguas subterráneas. En La Escondida, en la parte sur del distrito, las isópacas del enriquecimiento muestran un canalón de rumbo noroeste (Brimhall *et*

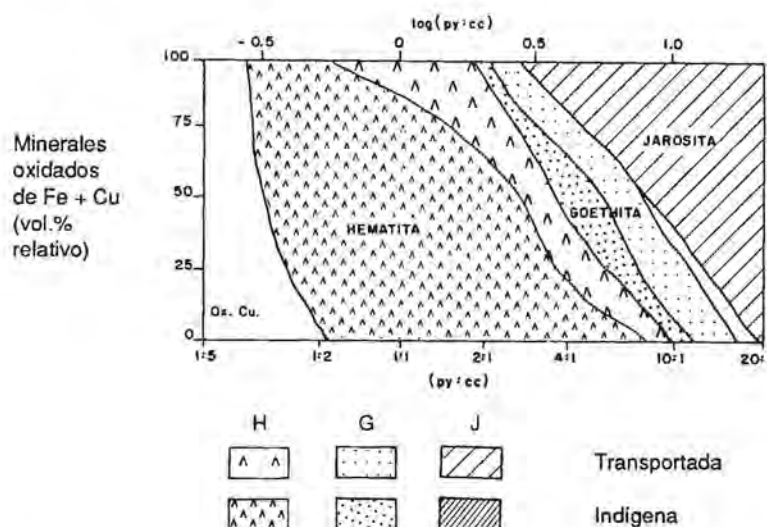


FIG. 5. Razones py/cc en rocas no reactivas antes de la oxidación versus vol.% relativo de las limonitas y minerales oxidados de cobre, mostrando los campos de los diversos productos supergénicos. (Según Alpers y Brimhall, 1989.)

al., 1985) que, junto a la dirección antes señalada para Zaldívar, sugieren una estrecha relación entre el movimiento de las aguas subterráneas y la morfología de la superficie actual.

ZONA LIXIVIADA

Se extiende hasta una profundidad promedio de unos 150 m bajo la superficie actual. En la parte central del yacimiento, se observan pocos oxidados de cobre (trazas de brochantita), algo de hematita indígena, moderadamente abundante hematita transportada y poca jarosita que, en general, es transportada. En esta zona, los pórfidos félsicos afectados por alteración cuarzo-sericitica y silicificación son químicamente inertes, y las soluciones residuales tienden a infiltrarse hasta los nuevos niveles más profundos de aguas subterráneas, con escasa depositación de cobre en la zona de oxidación. La asociación de productos de los procesos supergénicos que antes se mencionó, sugiere para las zonas enriquecidas, formadas con anterioridad en este proceso acumulativo, razones pirita/calcosina cercanas a 1,5-2,0 al observar el gráfico de la figura 5, tomado de Alpers *et al.* (1989); este gráfico fue confeccionado para condiciones similares a las de Zaldívar. En el horizonte de enriquecimiento actual la razón pirita/calcosina es aún menor, confirmando la naturaleza acumulativa del proceso.

Hacia la periferia de los cuerpos mineralizados, la jarosita es la limonita más abundante de la zona lixiviada, probablemente debido a la mayor abun-

dancia de pirita y a las razones pirita/calcosina más altas en la mineralización hipógena.

ZONA DE OXIDACION

Hacia la periferia oeste, donde abundan las rocas químicamente más reactivas del Pórfido Diorítico y de las cajas andesíticas, se ha desarrollado una zona de oxidación como resultado de la neutralización de las soluciones ácidas por los feldespatos y los máficos de las rocas, produciéndose la precipitación de brochantita y la formación simultánea de antlerita a partir de la oxidación *in situ* de calcosina (y algo de turquesa en puntos aislados de los niveles más altos). Estos minerales oxidados de cobre llegan a constituir cuerpos mineralizados de dimensiones mayores, que abarcan un área que excede los 1.200 m en dirección noreste-suroeste y 800 m transversalmente. La figura 3 muestra los límites de dos de estos cuerpos, considerando al menos 10 m de espesor mineralizado con contenidos superiores a 0,8% de cobre soluble.

Morfológicamente, la distribución de los minerales oxidados conforma cuerpos tabulares, en partes separados por roca lixiviada, elongados hacia el suroeste, con inclinaciones cercanas a 10° en igual dirección. La profundidad del techo de estos cuerpos, varía entre 60 y 260 m. Tanto la diferencia en profundidad como la lenticularidad de los horizontes de oxidados, reflejarían la influencia del fallamiento que ha experimentado el área y la eventual oxidación de niveles previamente enriquecidos.

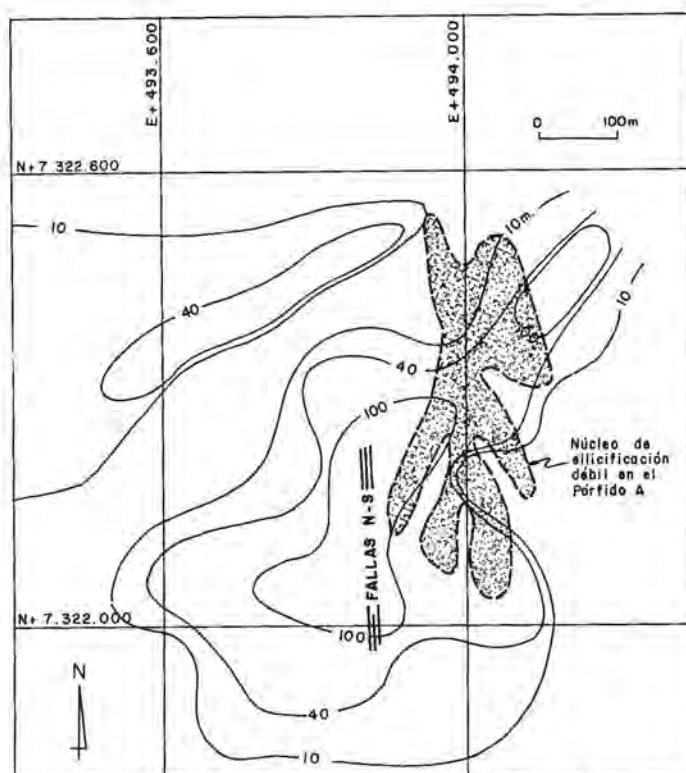


FIG. 6. Isópacas (en metros) del horizonte de enriquecimiento supérgeno.

HORIZONTES DE ENRIQUECIMIENTO SUPERGENO

El horizonte de enriquecimiento supérgeno alcanza su mayor desarrollo en los pórfidos A y B, bajo el sector central donde, en superficie, se observó mayor fracturamiento y desarrollo de un núcleo de alteración sericitica fuerte y silicificación débil en el Pórfido A. En este sector central, el horizonte enriquecido alcanza potencias máximas superiores a 200 m y medias cercanas a los 100 m (Fig. 6), y su techo se encuentra, en promedio, a unos 150 m de profundidad. Hacia su periferia y al entrar en rocas del Pórfido Diorítico y de las cajas andesíticas, el horizonte de enriquecimiento se adelgaza hasta perderse (Fig. 4); el escaso desarrollo del enriquecimiento supérgeno en estas rocas refleja una mineralización primaria más pobre y piritosa, y una mayor reactividad de las rocas, que impidió el desarrollo de un enriquecimiento acumulativo.

El techo del horizonte enriquecido miente hacia el oeste-suroeste, siguiendo aproximadamente la pendiente de la superficie actual (Fig. 4). El mismo

rumbo tiene un canalón en la parte central, el que se ve reflejado en las isópacas del horizonte enriquecido (Fig. 6). En el centro del yacimiento, el canalón se ensancha hacia el sur por efecto de una mayor permeabilidad producida por fracturamiento subvertical de ese rumbo. En el mismo lugar, el techo muestra una depresión y los sulfuros en su cercanía se presentan, en parte, parcialmente oxidados, probablemente reflejando un descenso dinámico del paleonivel freático, debido a la mayor permeabilidad.

En el horizonte de enriquecimiento predomina la asociación pirita-calcosina en proporciones variables. Hacia el techo en la parte central, se observa también algo de bornita y, en profundidad y en la periferia, algo de covelina y calcopirita. Como ocurre normalmente en el horizonte de calcosina, la calcopirita sufrió un reemplazo avanzado o total por calcosina, mientras que la pirita fue sólo recubierta superficialmente.

Cerca de un 80% de los sulfuros en la zona de enriquecimiento se presentan en forma diseminada; el resto en vetillas, con o sin cuarzo.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

El yacimiento de cobre y molibdeno Zaldívar, en el extremo norte del distrito que incluye a la mina La Escondida, corresponde a un pórfido cuprífero, en el que el desarrollo y preservación de un horizonte de enriquecimiento secundario ha sido vital para la formación de un depósito económicamente explotable.

La mineralización hipógena de cobre y molibdeno más intensa se asocia a la fase intrusiva félsica más temprana (Pórfido A) y es más débil en fases más jóvenes. La alteración hidrotermal de la primera fase es más sericitica y menos silíceas que la de la fase intrusiva félsica que la siguió (Pórfido B), mientras que las intrusiones más tardías de carácter más básico sufrieron una moderada alteración potásica.

Es posible que en rocas del Pórfido A, afectadas por el fracturamiento que tuvo lugar entre su intrusión y la de los pórfidos más jóvenes, se sobreimpusiera mineralización primaria asociada a pórfidos más jóvenes debido a su mayor permeabilidad. Este podría ser el caso de las vetillas de sulfuros con o sin cuarzo y con débiles halos silíceos, que se han observado tanto en el pórfido félsico más antiguo como en el más joven.

El desarrollo de un enriquecimiento supérgeno acumulativo se habría visto favorecido por la desecación climática y el sollevamiento que habría experimentado la región luego de la intrusión de los

pórfidos en el Oligoceno inferior. En detalle, el desarrollo del enriquecimiento supérgeno estaría controlado por: la cercanía al núcleo de Pórfido A sericitizado y poco silicificado, el que habría tenido una mineralización hipógena de más alta ley; por la presencia de disseminación primaria de sulfuros en los pórfidos A y B cuarzo-sericitizados; por baja reactividad de estas rocas, que permite la reconcentración acumulativa de los contenidos de cobre con los sucesivos descensos del nivel freático; por las direcciones de migración (hacia abajo y hacia el oeste-suroeste) de las soluciones, parcialmente modificadas por el fracturamiento norte-sur en el sector central del yacimiento.

La gran proximidad del yacimiento Zaldívar a la mina La Escondida y los controles estructurales similares que siguen los emplazamientos de sus intrusivos, sugieren una relación genética entre ambos yacimientos. Zaldívar constituiría un cuerpo satélite, con intrusivos que tal vez sean correlacionables con los domos de pórfido riolítico de las fases tardías de intrusión en La Escondida. El que tales intrusiones, con una mineralización hipógena piritosa y de baja ley de cobre, hayan originado un depósito de magnitud como resultado de la acción de los mecanismos de enriquecimiento supérgeno acumulativo antes mencionados, abre nuevas posibilidades de explotación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al señor Robert M. Haldeman, Gerente General de la Sociedad Minera Pudahuel Ltda. y Cía. C.P.A. y Sociedad Minera La Cascada Ltda., la autorización y facilidades otorgadas para la publicación de este trabajo.

Una parte significativa de la información aquí contenida ha sido obtenida por los geólogos de Minera Utah de Chile S.A., quienes reconocieron el

yacimiento inicialmente. Su aporte al conocimiento del depósito ha sido muy importante.

Los autores desean expresar su reconocimiento a los geólogos R. Sillitoe (Londres), V. Maksaeu y C. Mpodozis (SERNAGEOMIN); F. Camus (CODELCO) y C. Huete (Minera Goldfield) por sus valiosas sugerencias, que contribuyeron a mejorar notablemente el manuscrito.

REFERENCIAS

Alpers, C. 1983. Geochemical and geomorphological dynamics of supergene copper sulfide ore formation and preservation at La Escondida, Antofagasta, Chile. (Unpublished Ph.D. Thesis). *University of California*, 184 p. Berkeley, California.

Alpers, C.N.; Brimhall, G.H. 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 100, p. 1640-1656.

- Alpers, C.N.; Brimhall, G.H. 1989. Paleohydrologic evolution and geochemical dynamics of cumulative supergene metal enrichment at La Escondida, Atacama Desert, Northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 84, p. 229-255.
- Brimhall, G.H.; Alpers, C.N.; Cunnigham, A.B. 1985. Analysis of supergene ore-forming processes and ground-water solute transport using mass balance principles. *Economic Geology*, Vol. 80, p. 1227-1256.
- García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. In *Symposium sobre el Geosinclinal Andino, No. 3, Sociedad Geológica de Chile*, Santiago, Chile, 138 p. Santiago, 1962.
- Maksaev, V. 1990. Metallogeny, geological evolution and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° south, and the origin of major porphyry copper deposits. (Unpublished Ph.D. Thesis) Dalhousie University, 554 p. Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Mortimer, C.; Saric, N. 1975. Cenozoic studies in northern Chile. *Geologische Rundschau*, Vol. 64, p. 395-420.
- Ojeda, J.M. 1986. Escondida porphyry copper deposit, II Region, Chile: exploration, drilling and current interpretation. In *Mining Latin America Conference, Institution of Mining and Metallurgy*, p. 299-318. London.
- Ojeda, J.M. 1990. Geology of the Escondida copper deposit, II Region, Chile. Pacific Rim 90 Congress, Gold Coast (Queensland), *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, p. 473-483. Cambera.
- Ortiz, F.J.; Lowell, J.D.; Bratt, J. A.; Rojas, N.D.; Burns, P.J. 1996. Escondida porphyry copper deposit, II Region, Chile: history of the discovery. In *Mining Latin America Conference, Institution of Mining and Metallurgy, London*, p. 319-331. Santiago, 1986.
- Reutter, F. J.; Scheuber, E.; Helmcke, D. 1991. Structural evidence for orogen-parallel strike slip displacements in the Precordillera of Northern Chile. *Geologische Rundschau*, Vol. 80, No. 1, p. 135-153.
- Torrejón, G. 1987. Estudio de la silicificación y su relación con la mineralización en el pórfido cuprífero Escondida. Memoria de Título (Inédito), *Universidad del Norte*, 90 p. Antofagasta, Chile.