

## EMPLAZAMIENTO DEL YACIMIENTO EXÓTICA, CHILE \*

CEDRIC MORTIMER B.      Institute of Geological Sciences, Overseas Division, London  
CARLOS MUNCHMEYER F.    Cía. Exploradora Doña Inés Ltda., Iquique, Chile  
IGOR URQUETA D.        Empresas Mineras BHC, Santiago, Chile

### RESUMEN

El yacimiento Exótica es un cuerpo lenticular subhorizontal de minerales secundarios de cobre que impregnan gravas terciarias y rocas metamórficas Paleozoicas. Yace inmediatamente pendiente abajo del depósito de cobre porfírico de Chuquicamata, y se considera que ha sido originado por la depositación de minerales de cobre, provenientes de soluciones que migraron durante el proceso de enriquecimiento secundario de Chuquicamata. La alteración supérgena en Chuquicamata tuvo lugar entre el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano, y toda actividad supérgena importante habría cesado en el Mioceno Medio, tiempo en el cual ambos yacimientos quedaron establecidos.

### ABSTRACT

The Exótica orebody is a sub-horizontal lenticular body of secondary copper minerals that impregnate Tertiary gravels and Palaeozoic metamorphic rocks. It lies immediately downslope of the Chuquicamata porphyry copper deposit, and is considered to have originated with the deposition of copper minerals from solutions that overflowed during the Chuquicamata secondary enrichment process. Supergene alteration took place in Chuquicamata between the late Oligocene and early Miocene, and all important supergene activity had ceased in the Middle Miocene, by which time both orebodies were established.

### INTRODUCCION

La mina Exótica que se encuentra a la latitud de 22° 20'S, está situada entre 2.480 y 2.640 m s.n.m., dos km al sur del yacimiento de cobre porfírico de Chuquicamata y alrededor de 236 km al noreste del puerto de Antofagasta (Fig. 1). El depósito fue descubierto después de intentar recuperar soluciones ricas en cobre, derivadas de la lixiviación del botadero de rípios de Chuquicamata: Las soluciones no emergieron al pie del botadero sino que penetraron en las gravas infrayacentes. Se colocaron sondajes para tratar de localizar la posible canalización subaluvial de estas soluciones, y en uno de estos sondajes, en Octubre de 1957, se descubrieron minerales oxidados de cobre. La

exploración con "churn" y "diamond drills", y con geofísica, continuó hasta 1968. La remoción de la sobrecarga se inició en Septiembre de 1967, y el primer mineral se extrajo en Julio de 1969.

La Compañía Minera Exótica S.A. se constituyó el 31 de Enero de 1967, con la participación de la Corporación del Cobre (CODELCO) en un 25% de las acciones y la Chile Exploration Company (Anaconda Company) en un 75%. Consecuentemente la exploración y explotación inicial fue llevada a cabo por los geólogos de la Anaconda Company. El 16 de Julio de 1971, la Compañía pasó a depender íntegramente de CODELCO.

La producción programada fue de 7.800 tone-

\* Este trabajo corresponde a una traducción del artículo publicado en Agosto de 1977 por The Institution of Mining and Metallurgy, Londres.

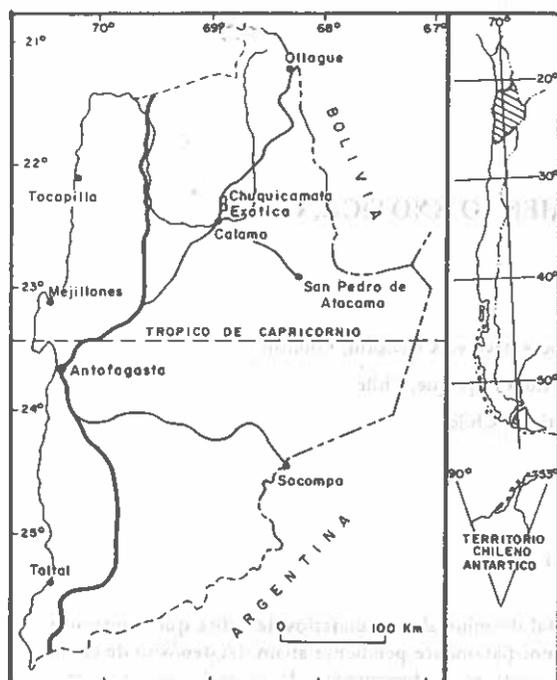


Fig. 1. Mapa de ubicación

ladas de cobre fino mensuales, pero esta cifra aún no se ha alcanzado, la producción mensual más alta que se ha obtenido es de 4.480 toneladas en Octubre de 1973, (Sutulov, 1974). Las reservas de mineral con una ley media de 1.86% Cu, alcanzan aproximadamente, los 160 millones de toneladas.

La producción de la mina cesó desde el 1° de Diciembre de 1974; como consecuencia de la decisión del CIPEC de reducir la producción de cobre en un 10%, Chile cerró la mina Exótica.

## GEOLOGIA

Aspectos detallados de la geología se han discutido anteriormente, (Munchmeyer y Urqueta, 1974). La roca fundamental de la región de la mina consiste en un complejo intrusivo metamórfico, en el cual se han diferenciado macroscópicamente dioritas, anfibolitas y granitos, atravesados por diques andesíticos, todos aparentemente de edad Paleozoica. Este complejo está fallado contra una secuencia de rocas estratificadas mesozoicas intruídas por cuerpos de granito Cretácicos a Terciarios, (Thomas, 1967; Renzetti, 1957). Una falla mayor, la Falla Oeste, corre aproximadamente norte-sur a través de la región, inmediatamente al oeste de los rajes de Exótica y Chuquicamata (Figs. 2 y 3), y la exploración geofísica mostró que se extiende hasta más al sur de la mina Exótica. El fracturamiento de la roca fundamental Paleozoica es intenso.

Cubriendo mucho del terreno de la roca fundamental en la región, y originalmente ocultando completamente la roca fundamental del área de la mina, se encuentra un paquete grueso de gravas de piedemonte. La superficie depositacional de estas gravas, al norte de la mina de Chuquicamata,

ha sido desplazada localmente a lo largo de la Falla Oeste, pero cerca de la mina Exótica la superficie de la grava no está disturbada. El nivel freático en las gravas, sin embargo, disminuye 10-15 m desde oeste a este a través de la falla.

En el área de la mina Exótica se pueden diferenciar en la cubierta sedimentaria la grava Fortuna, la cual cubre la mayor parte de la región de la mina, y la grava Exótica, la cual ocurre solamente en la parte norte de la mina. La grava Fortuna cubre parcialmente a la grava Exótica, y está intercalada con ella a lo largo de un rumbo aproximado de N55° W en una extensión de 100-150 m. La grava Fortuna tiene un espesor de hasta 150 m en el área de la mina. Ella rellena canales dentro de la grava Exótica, y es el relleno predominante de la depresión de la roca fundamental que empieza bajo la torta de rípios de Chuquicamata y se extiende a través de toda la mina Exótica. La principal característica de la grava Fortuna es que el 90% de los clastos, hasta de 2 m de diámetro en especímenes excepcionales, provienen de la granodiorita Fortuna, que aflora en gran extensión al oeste de la Falla Oeste. La grava Fortuna,

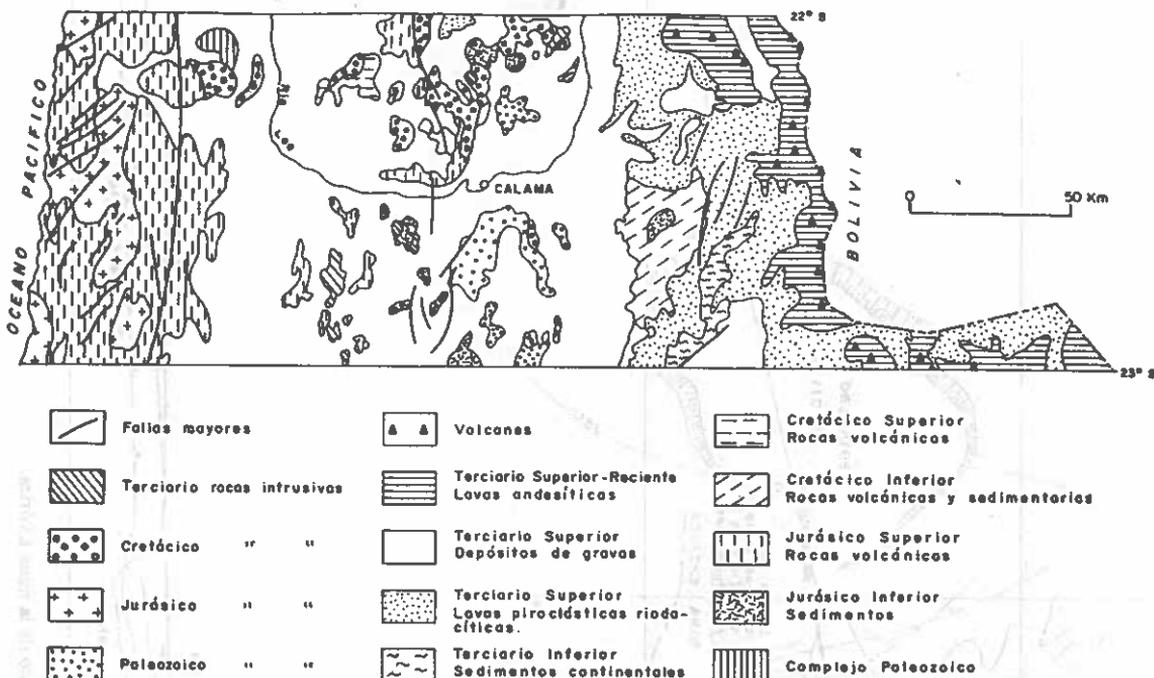


Fig. 2. Mapa geológico simplificado de la región Chuquicamata-Exótica. Modificado del Mapa Geológico de Chile 1968.

que inclina alrededor de 3° al sur o sureste, contiene también trozos del complejo de roca fundamental Paleozoica y es común observar clastos de pórfido cuarcífero meteorizados que provienen de la zona de lixiviación del depósito de Chuquicamata. Los bolones de mayor tamaño tienden a ocurrir hacia la base de la secuencia, y fracturas en la roca fundamental están rellenas con material fino de las gravas. La cementación con yeso y óxidos de hierro es suave e irregular en las partes altas del aluvio, pero cerca de la superficie de la roca fundamental un cemento de yeso y minerales oxidados de cobre han convertido la grava en un conglomerado duro y compacto.

La grava Exótica alcanza un espesor de cerca de 100 m y se acuña hacia el sur bajo la grava Fortuna; tiende a rellenar fracturas y depresiones de la roca fundamental en el sector norte de la mina. La grava Exótica consiste en fajas de arena gruesa y bandas de fragmentos angulares con estratificación bien marcada. Los clastos raramente exceden los 5 cm de diámetro y el manto es alrededor de 3° sur.

Dentro de la grava Fortuna, a 5 y 10 m de la

superficie depositacional en la parte norte y sur este del área de la mina, existe un nivel lenticular de cenizas, del cual se ha obtenido una edad K-Ar de  $8.4 \pm 0.4 \times 10^6$  años, (Hunt, com. escrita).

#### MINERALIZACION Y ALTERACION

El cuerpo mineralizado es un lente subhorizontal inclinado cerca de 5° hacia el sur (Fig. 3), con un eje noroeste-sureste de 2.2 km de largo, y un eje corto con un largo máximo de 1.2 km. El espesor máximo del cuerpo es 110 m, pero el promedio es 53 m. Los minerales de mena son "óxidos" de cobre, los cuales impregnan tanto a las gravas como a la roca fundamental infrayacente; cerca de dos tercios del cuerpo mineralizado está dentro de la roca fundamental y el resto yace dentro de la cubierta sedimentaria suprayacente. El cuerpo se adelgaza y se acuña hacia el norte y el sur, pero los límites superior e inferior son bien definidos. Fragmentos de vetas de crisocola y trozos de grava cementada mineralizada, sin embargo, ocurren en la parte estéril de la grava Fortuna.

Los principales minerales encontrados en el área de la mina son, en orden de abundancia, crisocola,

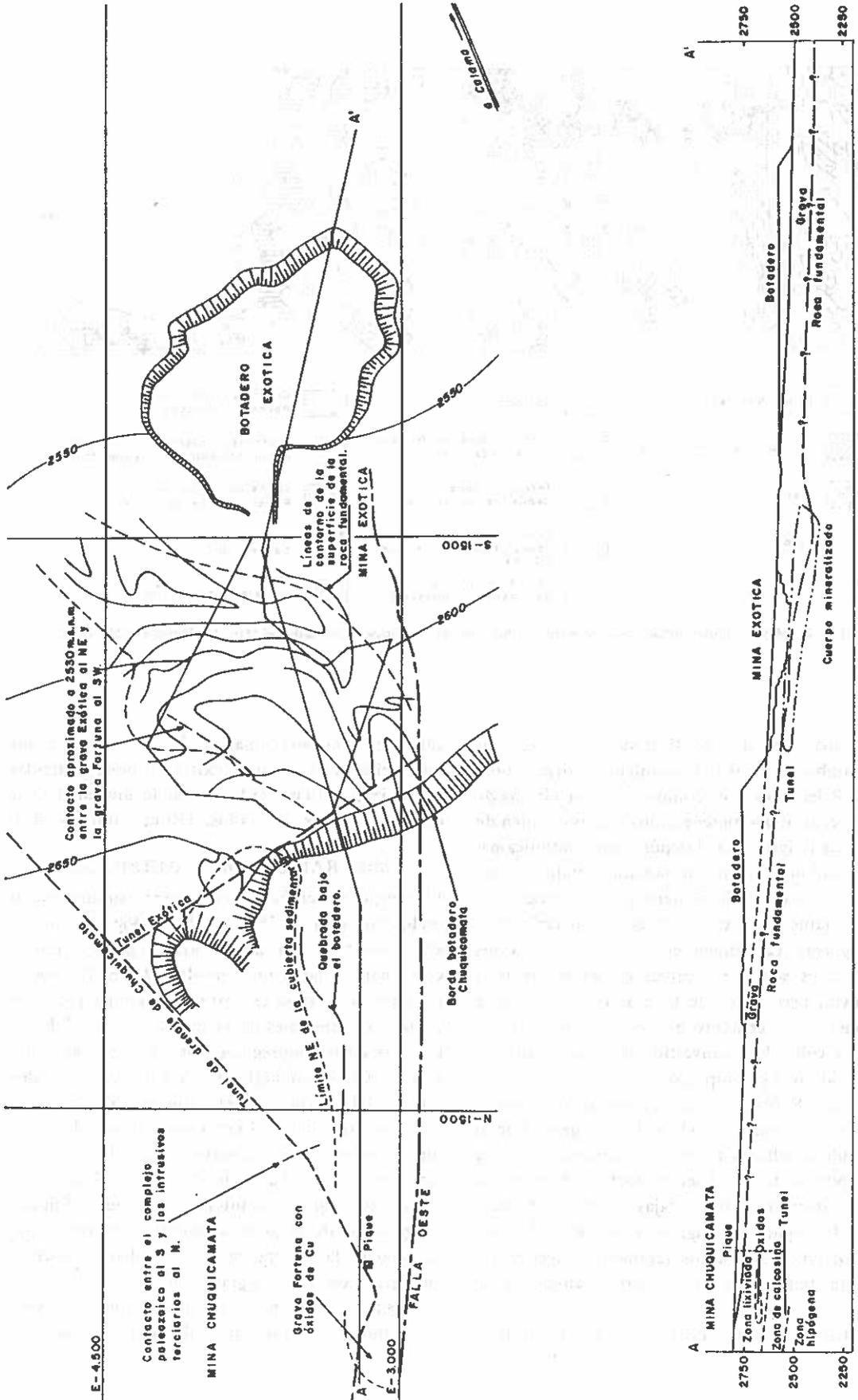


Fig. 3. Planta y Sección del cuerpo mineralizado de la mina Exótica.

“copper wad” y atacamita. La crisocola puede ser considerada como una mezcla mecánica de un mineral de cobre cristalino indeterminado, dispersa en un gel amorfo (Newberg, 1967). También está presente “copper pitch”, el cual tiene característi-

cas físicas semejantes a las de la crisocola, pero con porcentajes variables de hierro y manganeso que oscurecen el color. Otros minerales de cobre presentes en pequeñas cantidades están listados en la Tabla 1.

TABLA 1. Minerales de cobre menores presentes en el depósito Exótica.

Minerales de cobre menores	Modo de ocurrencia
Libetinita, $\text{Cu}_2(\text{OH})\text{PO}_4$	Con atacamita diseminado en las gravas, y ocasionalmente en fracturas de la roca fundamental.
Devilita, $\text{Cu}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Distribución errática en la grava Fortuna mineralizada como relleno de grietas o película envolvente.
Leytonita, $\text{CuO}_2\text{CaOK}_2\text{O}_4\text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Distribución errática en la grava Fortuna.
Brochantita, $4\text{CuOSO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	En la grava Fortuna junto a atacamita.
Malaquita, $2\text{CuOCO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Raro, en la roca fundamental y hacia partes superiores del cuerpo mineralizado.
Antlerita, $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	En clastos de pórfido Chuquicamata, en las gravas 8.
Sampleita, $\text{NaCaCu}_5(\text{PO}_4)_4\text{Cl}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Esporádico, en gravas mineralizadas.
Conichalcita, $\text{CaCuAsO}_4(\text{OH})$	Mineral post yacimiento.
Marshita, $\text{CuI}$	Mineral post yacimiento.
Chalcantita, $\text{CuOSO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mineral post yacimiento.
Plancheita, $3\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Mineral post yacimiento.
Silicato de cobre hidratado azul no identificado.	Relativamente abundante en la grava Fortuna cerca del contacto con la roca fundamental.

Alteración propolítica, calcita - clorita - epidota - pirita, y argílica, caolín - clorita - montmorillonita - sericita, pueden ser reconocidas en el área de la mina. La asociación propolítica está presente en la roca fundamental debajo del cuerpo mineralizado, donde calcita y clorita son abundantes. Epidota es menos común y pirita es rara. Clorita y epidota ocurren dentro de cerca del 50% de la roca fundamental mineralizada. La alteración argílica afecta a alrededor de un cuarto del cuerpo mineralizado; 70% en las gravas y el resto en la roca fundamental. La faja mayor de alteración argílica ocurre en la parte central del cuerpo mineralizado, donde la roca fundamental está, en forma especial, intensamente alterada. La alteración argílica disminuye rápidamente alejándose del cuerpo mineralizado.

La distribución de los minerales de cobre y la alteración de la roca huésped están íntimamente relacionados. Rocas que macroscópicamente carecen de alteración propolítica están asociadas con una predominancia de crisocola y “copper pitch” con respecto a atacamita y “copper wad”.

En rocas que han sufrido fuerte caolinización no se ha observado crisocola, y la asociación mineral común es “copper wad” y atacamita. La atacamita es generalmente abundante en el contacto de la roca fundamental relativamente fresca con la sucesión sedimentaria, y también ocurre en zonas de fractura dentro de la roca fundamental levemente alterada. Atacamita es también el mineral de cobre predominante en la grava cementada, pero inalterada, junto con escaso “copper wad” y crisocola local. Localmente, sin embargo, en el túnel Exótica, al norte del cuerpo mineralizado (Fig. 3), el mineral más abundante que se ha encontrado ha sido crisocola.

La mineralización de cobre ocurre de cinco modos diferentes.

1. La más importante manera de ocurrencia es como venillas de crisocola, “copper pitch”, atacamita y “copper wad” en pequeñas fracturas sin orientación preferencial en la roca fundamental fresca o levemente alterada (aproximadamente, 50% del depósito). “Copper wad” y atacamita también rellenan venillas, pero sólo en aque-

- llas rocas que han sido afectadas por una intensa argilización.
- Alrededor del 25% de la mena consiste de gravas cementadas inalteradas, las cuales tienen una matriz que contiene atacamita y/o crisocola con yeso, "copper wad" y óxidos de hierro.
  - En las rocas con intensa argilización el cobre ocurre como una diseminación general de "copper wad" y atacamita.
  - El cobre se presenta impregnando feldespatos en las anfibolitas del complejo basal, los feldespatos tienen una marcada coloración verde, aunque la naturaleza del reemplazo es desconocida, (Newberg, 1967, 1965).
  - Menos importante económicamente, son vetas mayores de "copper pitch" y crisocola; éstas fueron vistas por primera vez en el túnel Exótica, (Hunt, com. escrita) buzando subhorizontalmente con menos de 15° al norte y variando de 3 a 45 cm en espesor. Las vetas son más gruesas en la horizontal, y están a menudo brechizadas. Hay evidencia de por lo menos dos generaciones de crisocola, y el yeso se presen-

ta como matriz de la brecha. Vetas similares se han descubierto durante los trabajos de explotación de la mina.

Durante la exploración se estableció que las más altas leyes de cobre de la roca fundamental, cerca del 1.9% Cu total, provenían de la roca fundamental intensamente caolinizada. La anfibolita de grano grueso muestra los valores de cobre más altos de toda la roca fundamental, feldespatos impregnados contienen hasta 3.5% Cu, y existen numerosas venillas y relleno de fracturas. Los porcentajes de cobre dentro de las gravas tienden a variar inversamente con el tamaño de los clastos, las más altas leyes del mineral, sobre 2.7%, provienen del aluvio de grano fino.

Hacia la base del cuerpo mineralizado la proporción de calcita a mineral de cobre aumenta y el límite inferior de los óxidos de cobre coincide con la aparición de abundantes venillas de calcita, lo que no es habitual para el límite superior del cuerpo.

#### PROCEDENCIA DEL COBRE

Existen numerosas razones para suponer que las soluciones mineralizadoras de Exótica vinieron de Chuquicamata, principalmente porque es la única gran fuente de cobre localmente disponible, Exótica yace a sólo 2 km pendiente abajo del pórfido. Por otra parte, en el extremo sur del rajo de Chuquicamata, la grava Fortuna contiene óxidos de cobre (Fig. 3). La zona de enriquecimiento secundario en Chuquicamata es más potente hacia el sur del cuerpo mineralizado, lo que se ha interpretado por lo menos en parte, como una migración hacia el sur, pendiente abajo, de soluciones ricas en cobre que participaron en el proceso de enriquecimiento secundario (Tobey, com. escrita). Agua subterránea rica en cobre que probablemente se origina desde los rípios de Chuquicamata, ha

sido descubierta percolando hacia la mina Exótica en la parte oeste del área mineralizada, y localmente ha precipitado sulfatos. Depositación similar postmina ha sido observada también en el túnel Exótica.

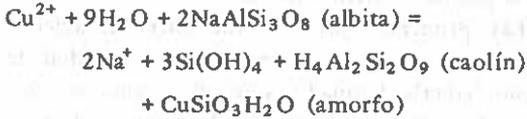
Hay por esto, muy pocas posibilidades de que las soluciones mineralizadoras pudiesen haber venido de cualquier otra fuente que no sea Chuquicamata, aunque, devilita y leytonita, los cuales están espaciada y erráticamente distribuidos en la grava Fortuna, se muestran en algunos clastos con signos de haber sido erosionados en el transporte, y pueden haber provenido de una manifestación de cobre de algún lugar del área de proveniencia de la grava Fortuna.

#### CONSIDERACIONES QUÍMICAS

El transporte y la depositación del cobre en solución han sido investigados por Newberg, (1965, 1967). El dedujo que las condiciones favorables de una reacción sílice-cobre para precipitar silicatos hidratados de cobre insolubles fueron baja concentración de cobre y sílice, baja concentración de aniones, tales como  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SiO}_4^{4-}$ , y un

pH moderado a alto. Newberg, concluye que las aguas superficiales que drenan depósitos de cobre obtienen fácilmente, cobre y sílice a través de la oxidación e hidrólisis de feldespatos y sulfuros primarios de la zona superior del cuerpo mineralizado. El cobre y la sílice derivada podrían viajar en solución hasta que un incremento en el pH

de su solvente cause la precipitación de un silicato amorfo de cobre. Newberg, también sugirió, sin embargo, un mecanismo alternativo mediante el cual soluciones ácidas de sulfato de cobre reaccionan directamente sobre los silicatos presentes en las gravas y en la roca fundamental del área mineralizada. El derivó la siguiente reacción global a pH constante:



y sugirió que la impregnación verde de los feldspatos fué un soporte para esta última hipótesis.

La reacción entre el cobre y la sílice de cualquiera de las dos maneras mencionadas puede explicar el origen de la crisocola y el "copper pitch" en el depósito de Exótica. El gran volumen de rocas alteradas argílicamente en el depósito provee evidencia para la segunda hipótesis e indica relaciones complementarias entre la mineralización de crisocola y la argilización en la parte principal del yacimiento. No obstante, la preponderancia de crisocola en las gravas inalteradas muy cerca de la mina Chuquicamata en el túnel Exótica, podría tender a favorecer la idea de un área de fuente primaria simple para ambos, sílice y cobre, en esta zona restringida. Hay, por esto, evidencia limitada que el cobre y sílice derivados del cuerpo madre han reaccionado juntos localmente y han sido depositados cerca de su origen. De acuerdo con esta hipótesis, el cobre pudo haber sido generado en exceso y haber pasado pendiente abajo para reaccionar con los silicatos de la formación huésped.

La hipótesis anterior explicaría bien la formación de crisocola y "copper pitch" dentro del yacimiento; el porqué de la ocurrencia de los minerales no silicatados de cobre mas bien que la de los silicatos en las rocas fuertemente argilizadas, es, sin embargo, menos aparente. La manera de depositación de la atacamita sugiere que ha sido depositada por soluciones ácidas en fracturas y huecos en rocas alteradas e inalteradas. Newberg, (1967), observó que las condiciones ácidas inhiben la polimerización de  $\text{Cu-O-Si}(\text{OH})_3^+$ , causando la inhibición de la precipitación del silicato de cobre amorfo insoluble. Si las soluciones que entraron al área de Exótica fueron muy ácidas durante la reacción inicial entre las soluciones con sulfato de cobre y las rocas huéspedes, estas últimas podrían bien haber sido desilicificadas sin la formación inmediata de un floculado sílice-cobre. Esto podría ocurrir

solamente cuando las soluciones fueran transportadas más allá de la primera zona de reacción a un área de más alto pH. Las soluciones estarían muy saturadas en sílice y podrían por esto depositar en gel, fundamentalmente crisocola, en la roca fundamental inalterada. El área de la remoción inicial de sílice podría pasar a ser inactiva para próximas soluciones, y si ocurre desecación periódica, como lo es en áreas de recarga infrecuente del agua subterránea, podrían desarrollarse grietas en la roca alterada. Estas grietas podrían haber sido más tarde llenadas por ácido, soluciones salinas ricas en cobre desde las cuales serían depositados atacamita y "copper wad". Esta combinación mineral pudo también haber sido depositada en rocas inalteradas durante subidas del nivel freático.

La concentración anión, probablemente en forma particular  $\text{Cl}^-$  en este medio desértico, pudo haber inhibido la reacción de las soluciones de cobre con la sílice. La lista de minerales encontrados en el depósito indica que hubo muchos componentes en la reacción total. El contenido  $\text{Cl}^-$  pudo haber variado en las sucesivas avenidas de soluciones, dependiendo de las variaciones climáticas. Un aumento de la aridez hacia las cercanías del período de oxidación puede haber asegurado que el contenido de  $\text{Cl}^-$  y otros aniones en las soluciones originales fué progresivamente aumentando en relación con el contenido de Cu y Si.

La mineralización, posiblemente tuvo lugar como sigue.

La mayor permeabilidad de las gravas en comparación con la de la roca fundamental, les permitió llevar el mayor flujo de las soluciones iniciales, aunque tuvo lugar percolación hacia la roca fundamental infrayacente. Las soluciones con cobre produjeron una argilización general, la cual tuvo su principal efecto en aquellas gravas que rellenan los paleocanales y la roca fundamental adyacente. La sílice extraída durante la argilización fue incorporada a la solución para ser depositada como crisocola en las rocas propilitizadas. Las rocas inicialmente sujetas a lixiviación podrían volverse fundamentalmente no reactivas a través de su completa argilización. El agua subterránea portadora de cobre podría pasar alrededor de las rocas argilizadas, y crisocola y "copper pitch" serían depositados en un medio ambiente más bajo donde el pH fuese más alto, en una región de rocas relativamente inalteradas.

Sucesivas avenidas de soluciones con cobre de acidez variable podrían haber percolado la porción

desilicificada argilizada del yacimiento después de un fracturamiento general de este sector, precipitando atacamita y "copper wad" en las fisuras. Áreas previamente impregnadas con crisocola no

estarían sujetas a una gran pérdida de volumen debido a desecamiento periódico, por esto no se fracturarían y podrían consecuentemente, contener menos atacamita o "copper wad".

#### HISTORIA COMPUESTA DEL DEPOSITO (Fig. 4).

Algún tiempo antes del Terciario temprano tuvo lugar el microfracturamiento de la roca fundamental Paleozoica. Los rasgos estructurales regionales mayores, tal como la Falla Oeste, se iniciaron probablemente en el Mesozoico. La alteración propilítica de la roca fundamental del yacimiento Exótica puede haber ocurrido antes del Terciario. A fines del Cretácico y durante el Terciario medio-temprano, sin embargo, tuvo lugar la intrusión de cuerpos graníticos, la alteración hidrotermal y el emplazamiento de yacimientos metalíferos bajo centros estratovolcánicos situados al oeste del eje volcánico Andino actual. Por lo menos uno de estos centros estuvo situado en la región de Chuquicamata cuando se produjo el emplazamiento del depósito de cobre porfírico junto con la alteración hidrotermal asociada. Es, por lo tanto, lo más probable que la alteración propilítica de Chuquicamata sea de la misma edad y origen que la del depósito Exótica, el cual se encuentra sólo 2 km al sur.

Durante el Paleógeno y Neógeno temprano, el foco de la actividad volcánica se desplazó generalmente hacia el este, (Mortimer y Saric, 1975). La erosión creó entonces las actuales superficies y expuso el depósito de Chuquicamata. Posteriormente, se desarrolló un valle poco profundo con laderas suaves como parte de un pedimento complejo labrado en la roca fundamental Paleozoica. Como el pedimento creció hacia el norte por el retroceso del frente montañoso, comenzó a ser cubierto por la grava Exótica. La interdigitación de la grava Fortuna en la grava Exótica muestra una contemporaneidad de origen, pero la carencia general de estratificación indica un transporte por, y una depositación desde, una serie de corrientes de deyecciones. La estratificación local y la canalización son indicaciones de algún retrabajo, (Newberg, 1965). La preponderancia de clastos de granodiorita Fortuna en la grava Fortuna indica proveniencia del oeste y del noroeste, mientras que los escasos clastos del pórfido Chuquicamata indican un aporte menor de grava desde el norte. El rumbo aproximado N55° W de la interdigitación de las gravas indica la dirección to-

mada por las corrientes de barro.

Las primeras corrientes de barro estuvieron confinadas al valle poco profundo, y pueden de hecho haberlo formado; que ellas causaron erosión está testimoniado por los fragmentos de roca fundamental en la base de la grava Fortuna. Las grietas en la superficie de la roca fundamental fueron también rellenas por la grava.

Poco antes que la depositación de las gravas cesara, cenizas volcánicas fueron llevadas por el viento a través de la región. La edad que ellas dieron,  $8.4 \times 10^6$  años, Mioceno Superior, ha establecido un tiempo para el cese local de la agradación de la grava. Las capas mayores de agradación regional y las superficies de erosión a través del área cesaron de desarrollarse en el Mioceno, (Mortimer y Saric, 1975; Clark y otros, 1967; Mortimer, 1973; Mortimer y otros, 1974).

La mineralización tuvo lugar después del comienzo del emplazamiento de la grava, puesto que, los límites del área mineralizada atraviesan el contacto roca fundamental-grava independientemente, del cambio litológico (Fig. 3). Los clastos de minerales de cobre en la grava Fortuna indican, sin embargo, que la mineralización terminó antes de completarse la depositación de las gravas.

Durante la depositación de la grava Fortuna el flujo principal fué desde el noreste, pero las soluciones mineralizadoras desde Chuquicamata deben haber migrado hacia el sur. Si, durante la depositación de las gravas, la Falla Oeste sufrió un sollevamiento oeste, las soluciones mineralizadoras podrían haber sido protegidas de dilución y remoción hacia el sureste mediante el amparo proporcionado por el escarpe subaluvial.

Por lo menos parte de la lixiviación, oxidación y enriquecimiento supérgeno del depósito de cobre porfírico debe haber tenido lugar contemporáneamente con el emplazamiento del yacimiento Exótica. La granodiorita Fortuna ha dado distintamente, una edad Pb/ $\alpha$  de  $43 \times 10^6$  años, (Ilunt, com. escrita), y una edad K-Ar de  $36.0 \pm 0.5 \times 10^6$  años, (Quirt y otros, 1971). El depósito hipógeno de Chuquicamata fué emplazado en ésta alrededor de  $29.2 \pm 0.5 \times 10^6$  años

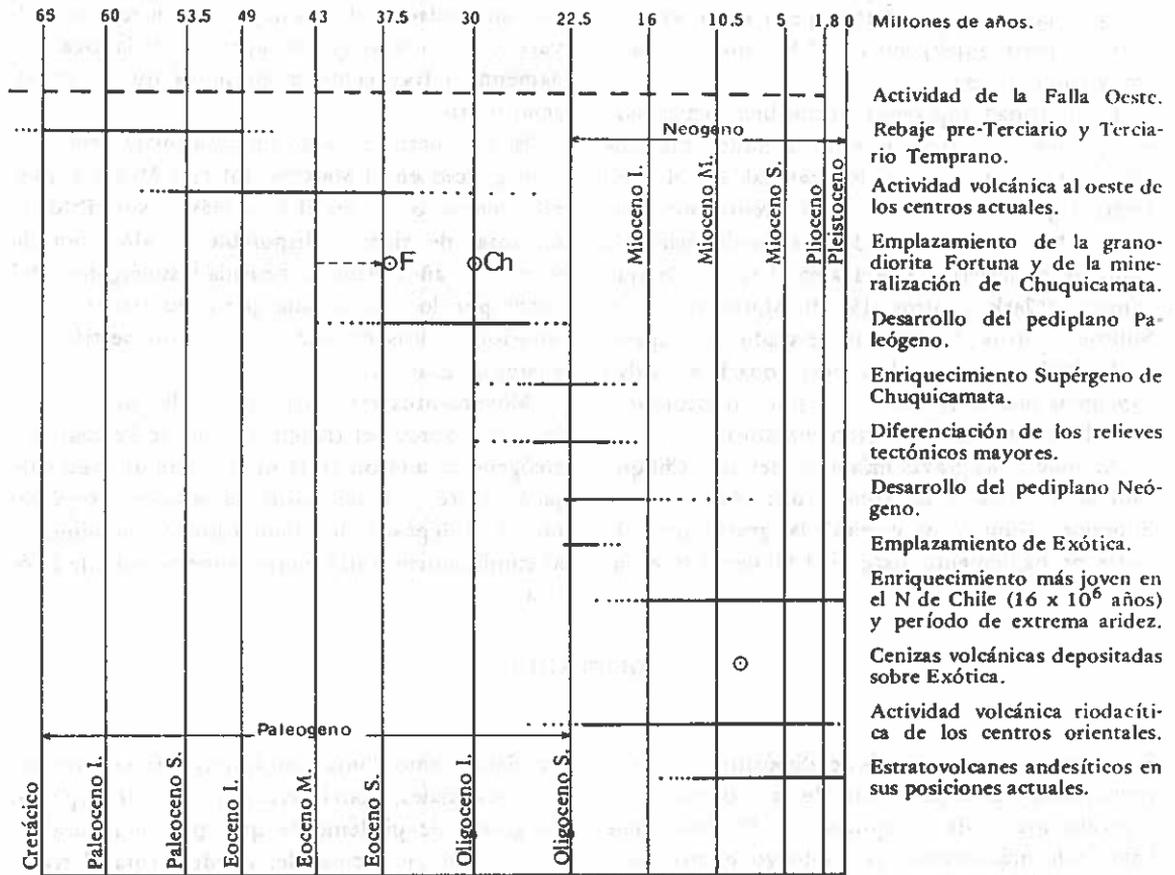


Fig. 4. Cronología del emplazamiento del depósito Exótica.

atrás, (Quirt y otros, 1971). La profundidad de emplazamiento fué probablemente superficial, no más de 1-2 km, (Gustafson y Hunt, 1975), y el afloramiento y la exposición a los procesos supérgenos probablemente tuvo lugar relativamente rápido. Gustafson y Hunt (1975), obtuvieron una estimación de sólo  $5 \times 10^6$  años para el tiempo entre la mineralización primaria y el enriquecimiento supérgeno en el depósito de cobre porfírico de El Salvador, el cual se ubica unos 400 km al sur de Chuquicamata en una posición geomorfológica aproximadamente similar. El enriquecimiento supérgeno temprano del yacimiento de Chuquicamata probablemente, comenzó en el Oligoceno tardío, sin embargo, los procesos supérgenos después de la depositación de la parte basal de los depósitos de gravas, estuvieron aún operando en Chuquicamata.

La más vieja superficie de erosión que forma parte del paisaje actual es Paleoceno a Eoceno Inferior en edad. Esta superficie que precede el emplazamiento de la mayoría de los depósitos de cobre porfíricos chilenos, (Quirt y otros (1971);

Gustafson y Hunt, (1975), ha sido reconocida en una faja de 500 km de largo en la región central del país, al sur del depósito de Chuquicamata. Se sabe que el enriquecimiento supérgeno temprano tuvo lugar localmente bajo este paisaje antes del desarrollo de los últimos pediplanos regionales.

El siguiente paisaje identificable se formó en el Paleógeno tardío. Es más fácilmente reconocible en el área costera, a lo largo de 1.550 km, al norte y al sur de Chuquicamata, (Mortimer y Saric, 1975), aunque es, probablemente, de mayor extensión. La erosión parcial o completa de los perfiles supérgenos ocurrió durante la génesis de este paisaje. Una segunda fase de enriquecimiento supérgeno tuvo lugar en relación con un nivel freático más bajo, (Clark y otros, 1967), y se considera que bajo esta superficie ocurrieron los procesos de oxidación de Chuquicamata.

Ambos niveles de sulfuros supérgenos fueron afectados por la erosión durante el desarrollo de un último pediplano regional en el Mioceno Medio-Superior, el cual es íntegramente posterior a alguna actividad supérgena significativa. Se ha observa-

do, por ejemplo, que esta superficie de erosión corta el perfil supérgeno en El Salvador, (Gustafson y Hunt, 1975).

La actividad supérgena puede bien haber sido un proceso continuo o semicontinuo, marcada solamente, por un cambio regional en el nivel freático generado a través de un evento tectónico mayor. No obstante, estudios de los depósitos de cobre en el desierto de Atacama al sur de Chuquicamata, (Clark y otros, 1967b; Mortimer, 1973; Sillitoe y otros, 1968), han revelado que, aparte de limitada removilización local, toda la actividad supérgena habría cesado en el Mioceno Medio después de la extrema desecación climática.

Aunque a las gravas más altas del área Chuquicamata-Exótica se les conoce una edad Mioceno Superior, (Hunt, com. escrita), las gravas mineralizadas probablemente, daten del Mioceno Inferior,

por interpolación de los depósitos en regiones adyacentes, mientras que la superficie de la roca fundamental infrayacente se considera que es Paleógeno tardío.

El enriquecimiento en Chuquicamata probablemente, cesó en el Mioceno Inferior Medio al mismo tiempo como en el área más al sur. Esto da un total de tiempo disponible de alrededor de  $9 \times 10^6$  años para la actividad supérgena. Durante por lo menos una parte de este tiempo, soluciones ricas en cobre estuvieron vertiéndose al área de Exótica.

Movimientos tectónicos regionales mayores en los alrededores del tiempo del límite Paleógeno-Neógeno resultaron en la producción de gravas de piedemonte, removilizaron los procesos supérgenos en el depósito de Chuquicamata y condujeron al emplazamiento del cuerpo mineralizado de Exótica.

## DISCUSION

Se considera que la génesis del depósito Exótica es principalmente, dependiente de la existencia del depósito madre de Chuquicamata. El clima debe haber sido más lluvioso, sin embargo, el nivel freático podría haber estado mucho más cerca de la superficie, la zona de lixiviación, oxidación y de enriquecimiento en el depósito porfirico podría no haber tenido gran extensión vertical y los volúmenes de solución generados podrían probablemente, haber sido menores. Por otra parte, el cobre que fué disuelto podría haberlo sido en una solución tan débil como para ser un reactivo efectivo. Si, en cambio, el clima fuese extremadamente árido, un estado de virtual inactividad química podría prevalecer y detener el proceso de meteorización como a través de la mayor parte del norte de Chile, hoy día. Un clima medianamente árido es, por lo tanto, necesario para favorecer la derivación de una suficiencia de solución con la concentración adecuada para la actividad supérge-

na. Este mismo clima, con lluvias infrecuentes pero torrenciales, podría crear la clase de depósito de gravas de piedemonte que, por su naturaleza desordenada y permeable, es ideal para el transporte de soluciones, mientras que, al mismo tiempo, provee un ambiente de reacción para la deposición de los minerales de cobre en una situación en la cual las gravas podrían estar sujetas a humedecimientos y secados periódicos por soluciones cargadas de reactivo. Las necesidades climáticas para la lixiviación y el transporte de los minerales de cobre parecen haber sido propias del norte de Chile durante gran parte del Cenozoico, antes del presente régimen de no-lixivación en una situación extremadamente árida, ya que, además del depósito Exótica, se conocen varias otras gravas con crisocola, una de las cuales, Sagasca (Lat.  $20^{\circ} 15'S$ ), está siendo trabajada desde mediados de 1973.

## AGRADECIMIENTOS

Las observaciones geológicas iniciales y el descubrimiento de Exótica lo hicieron los geólogos de la Anaconda Company, obteniéndose mucha información de su excelente trabajo. El Sr. N. Saric

prestó valiosa ayuda en la preparación del artículo, y el Dr. A.H.G. Mitchell amablemente revisó el manuscrito.

## REFERENCIAS

- BERGGREN, W.A.** 1977. A Cenozoic time-scale some implications for regional geology and paleobiogeography. *Lethaia*, 5, 195 - 215.
- CLARK, A.H.** 1967. Implications of the isotopic age of ignimbrites flows, southern Atacama Desert, Chile. *Nature, Lond.*, 215, 723 - 4.
- CLARK, A.H.** 1967b. Relationships between supergene mineral alteration and geomorphology, southern Atacama Desert, Chilean interim report. *Trans Inst. Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth sci.)* 76, B89 - 96.
- GUSTAFSON, L.B. and HUNT, J.P.** 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geol.* 70, 857 - 912.
- MORTIMER, C.; FARRAR, E. and SARIC, N.** 1974. K/Ar ages from Tertiary lavas of the northernmost Chilean Andes. *Geol. Rundschau*, 63, 484 - 90.
- MORTIMER, C. and SARIC, N.** 1975. Cenozoic studies in northernmost Chile. *Geol. Rundschau*, 64, 395 - 420.
- MORTIMER, C.** 1973. The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile. II *Geol. Soc. Lond.* 129, 505 - 26.
- MUNCHMEYER, C. y URQUETA, I.** 1974. Geología del yacimiento Exótica. En coloquio sobre fenómenos de la alteración y metamorfismo en rocas volcánicas e intrusivas Santiago: Departamento de Geología, Universidad de Chile. 213 - 253.
- NEWBERG, D.W.** 1965. Geology and mineralogy of chrysocolla bearing gravels. Ph. D. thesis, Harvard University.
- NEWBERG, D.W.** 1967. Geochemical implications of chrysocolla-bearing alluvial gravels. *Econ. Geol.*, 62, 932 - 956.
- QUIRT, S. et. al.** 1971. Potassium-argon ages of porphyry copper deposits in northern and central Chile. *Abstract Program geol. Soc. Am. Ann. Mtg.* 676 - 674.
- SUTULOV, A.** 1974. Copper pophyries. Salt Lake City: The University of Utah; San Francisco: Miller and Freeman Publications, 200 p.
- RENZETTI, B.L.** 1957. Geology and petrogenesis at Chuquicamata, Chile. Ph. D. thesis, Harvard University.
- SILLITOE, R.H.; MORTIMER, C. and CLARK, A.H.** 1968. A chronology of landform evolution and supergene mineral alteration, southern Atacama Desert, Chile. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth sci.)*, 77, B166 - 9.
- THOMAS, A.** 1967. Geología de las hojas Chuquicamata y Soledad. (Santiago: Inst. Invest. Geológicas). Inf. Inédito.