

EL YACIMIENTO COBRE PORFÍDICO "ANDACOLLO" PROVINCIA DE COQUIMBO, CHILE

CARLOS LLAUMETT P. *Geólogo Empresa Nacional de Minería*
LUIS OLCAY V. *Geólogo Empresa Nacional de Minería*
CARLOS MARIN B. *Geólogo Empresa Nacional de Minería*
J. CARLOS MARQUARDT L. *Geólogo Empresa Nacional de Minería*
EDUARDO REYES F. *Geólogo Empresa Nacional de Minería*

RESUMEN

El yacimiento cuprífero Andacollo se ubica en la Cordillera de la Costa de la Provincia de Coquimbo, a 37 km en línea recta al sureste de la ciudad de La Serena y a 30 km al este del Océano Pacífico.

El depósito puede ser clasificado de acuerdo a sus características de mineralización-alteración-estructura como un yacimiento del tipo denominado "cobre porfídico". La mineralización se hospeda en rocas volcánicas e intrusivas de disposición apofisial, ambas muy fracturadas (stockwork). Tanto la metalización como la alteración hipógena se disponen según modelo que aproximadamente coincide con los descritos para otros cobres-porfíricos del mundo. La zona interior corresponde a una alteración con estabilidad en los feldespatos y se caracteriza por el grupo biotita-feldespato potásico; rodeando a éste se ubican alteraciones con destrucción de feldespatos que del interior hacia afuera corresponden a los arreglos: "feldespato potásico-cuarzo-sericita" y grupo "cuarzo-sericita".

La mineralización hipógena consiste esencialmente de pirita-calcopirita con cantidades variables de hematita y subordinadamente molibdenita. La razón pirita-calcopirita es alta y varía de 1/1 a más de 20/1. Se ha podido concluir que el centro de mineralización de más alta ley de cobre-molibdeno presenta una asociación de pirita-calcopirita-hematita y es cercanamente coincidente con el arreglo de alteración "feldespato potásico-cuarzo-sericita" y también con las razones pirita/calcopirita más baja.

Una característica zona de enriquecimiento supergénico se ha distinguido; ésta de disposición más o menos horizontal, está formada por calcosina (djurleita), pirita y calcopirita. La calcosina se presenta como reemplazo de calcopirita y como delgados revestimientos de pirita. Se estima que existen por lo menos dos estados de enriquecimiento supergénico, estando el principal relacionado con la formación del pediplano Andacollo (pre-Mioceno).

Se cree que el pórfido cuprífero Andacollo podría ser de edad Cretácico Superior similar a otros depósitos y desarrollos hidrotermales que se ubican en la Cordillera de la Costa y de distinta edad a los Pórfidos Chilenos más conocidos que se ubican en la precordillera y cordillera de Los Andes (Terciario).

Se han cubicado como reservas de mineral algo más de 300 millones de toneladas, lo que representa un 2,5% de los recursos cupríferos calculados para Chile. La explotación del yacimiento permitiría aumentar en 90% el actual nivel de producción del país.

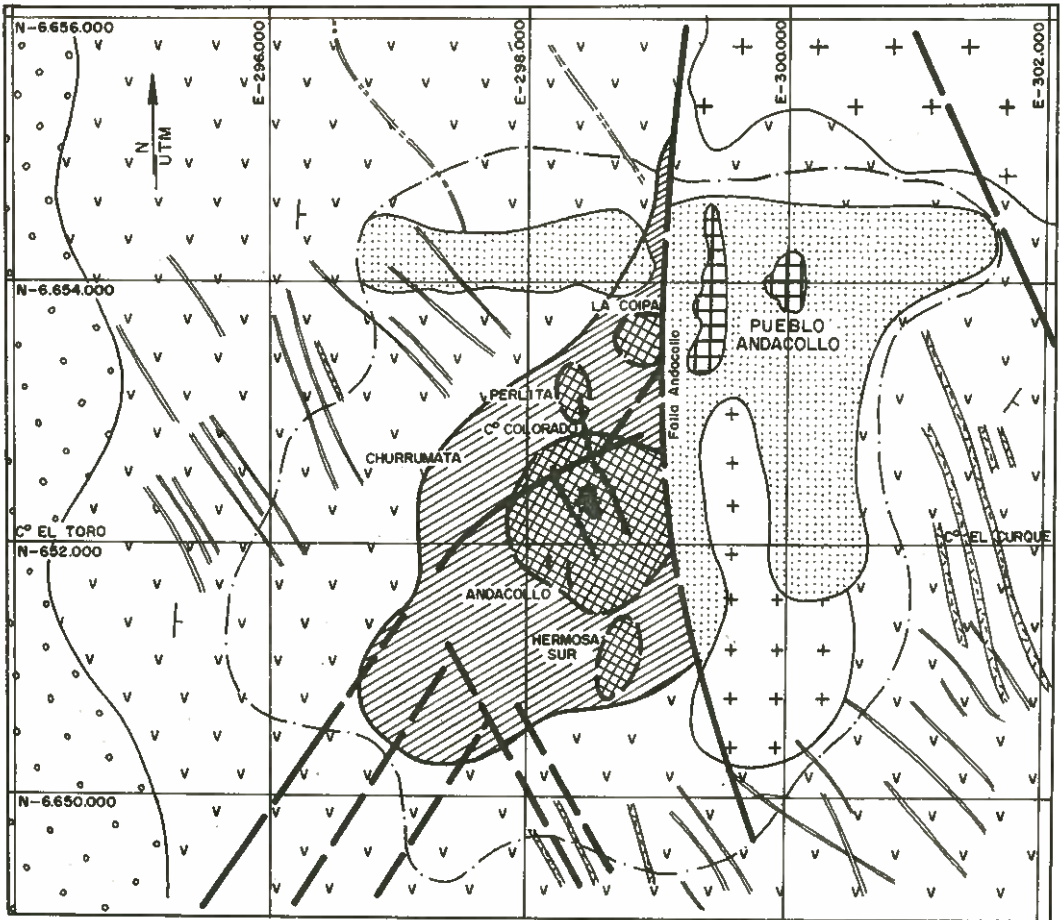
INTRODUCCION

El distrito Minero Andacollo, vecino al pueblo del mismo nombre, se ubica en la Cordillera de la Costa de la Provincia de Coquimbo, Chile, a 37 km en línea recta al sureste de la ciudad de La Serena, y a 30 km al este del Océano Pacífico. El depósito principal está situado dentro de una planicie o cuenca ligeramente circular, que alcanza alturas entre 1.000 y 1.100 m s. n.m. (fig. 1).

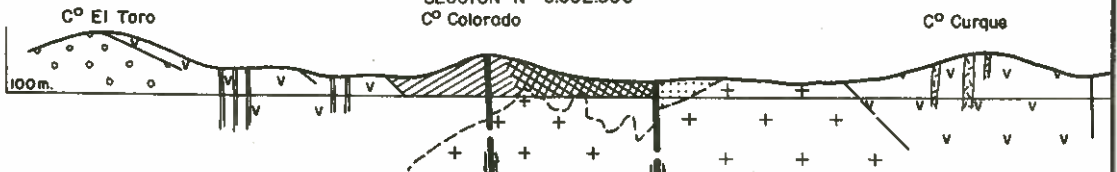
El distrito se conoce desde tiempos prehispánicos, especialmente por la explotación de sus placeres auríferos. Hace unos 20 años, a la actividad de extracción de minerales de oro, se agregó la explotación de los recursos cupríferos. Se dice que de la explotación de las vetas y placeres auríferos se han obtenido unas 100 t de oro; otros antecedentes indican que del depósito cuprífero se han extraído unas 5.000.000 t de mineral que representan aproximadamente 40.000 t de cobre fino y algo así como 600 kg de oro.

El estudio de este yacimiento estaba incluido dentro del plan que ejecutó la Empresa Nacional de Minería con el nombre de Proyecto Andacollo. Durante los años 1972, 1973 y 1974, se han desarrollado diferentes estudios geológicos, se han perforado varios miles de metros de sondajes, se ha realizado un anteproyecto de explotación minera, se han estudiado algunas alternativas de transporte, se ha investigado el comportamiento metalúrgico de la mena; además se ha ejecutado un primer estudio de factibilidad técnico-económico del depósito.

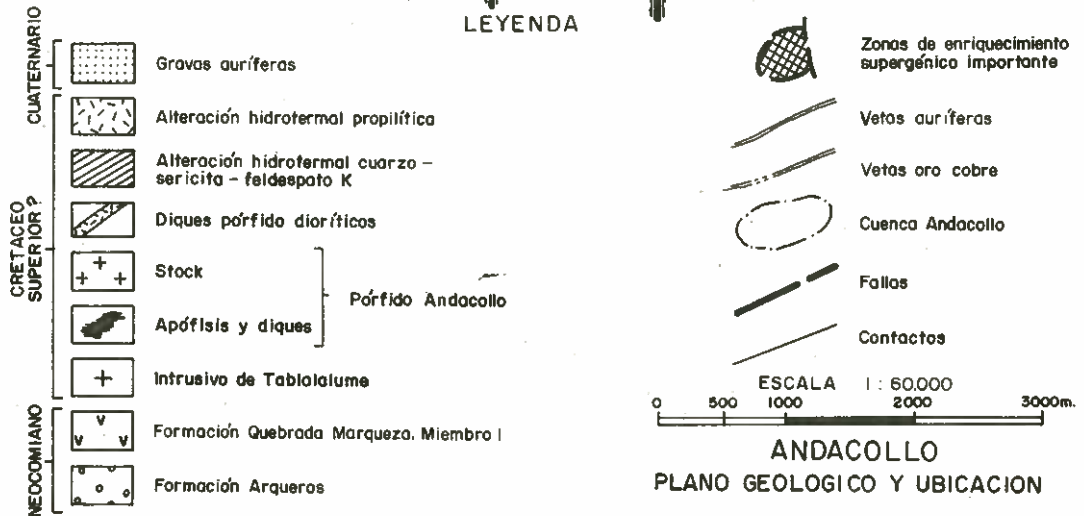
Los estudios geológicos han llevado a definir aproximadamente las principales características sobre estructura-mineralización-alteración del depósito y han permitido además establecer una evaluación geológica del mismo. Por otro lado, se han investigado algunos problemas cuya correcta solución puede ayudar a los planteamientos mineros y metalúrgicos. Específicamente, se ha estudiado la cuantificación y distribución del molibdeno, oro y plata; la distribución y relaciones de los sulfuros (razón pirita-calcopirita); los problemas estructurales que se relacionan con la estabilidad de talud rocoso y el control del agua subterránea en rocas fisuradas.



SECCION N-6.652.300
C° Colorado



LEYENDA



ANDACOLLO
PLANO GEOLOGICO Y UBICACION

Usando una malla rómbica de distancia 144 m, se han perforado algo más de 8.000 m de sondajes de diamante lo que junto a sondajes efectuados anteriormente por otras compañías, acumulan aproximadamente 15.000 m de perforación prospectiva. Se han realizado aproximadamente 20.000 m de mapeo geológico subterráneo y se han ejecutado cerca de 12.000 ensayos químicos.

El análisis y correlación de toda esta información ha permitido establecer una cubicación para el yacimiento algo superior a los 300.000.000 t con una ley de 0,70^o/o Cu y cantidades de interés de molibdeno y oro.

Es evidente que las reservas son atractivas y de acuerdo al planteamiento minero, su explotación significaría un incremento en la producción chilena, en aproximadamente 80.000 t de cobre fino. Si tomamos como base la producción de 1974 esto significaría un aumento del 9^o/o del nivel actual.

El propósito de este trabajo es entregar una síntesis de las principales características geológicas del depósito; especialmente plantear aquellas particularidades que lo definen como un yacimiento del tipo "cobre porfídico".

GEOLOGIA GENERAL

El distrito Minero Andacollo se ubica en la Cordillera de la Costa de la Provincia de Coquimbo. El se emplaza en un relieve que se distingue por la existencia de una planicie semicircular de restringida extensión, rodeadas de cadenas de cerros que sobresalen de la primera con diferencias de cota de 100 a 300 m.

En el área se ubica una potente secuencia de rocas estratificadas cortada por intrusivos de los tipos batolíticos, stocks y filonianos. La serie volcánica-sedimentaria pertenece a la extensa depresión conocida como "geosinclinal andino". Está constituida esencialmente por una secuencia de lavas y brechas volcánicas de edad Aptiano-Albiano que correspondería a la "facies eugeosinclinal" de la cuenca móvil nombrada anteriormente.

Gran parte del área está constituida por el "pediplano Andacollo" paisaje maduro posiblemente de edad pre-Mioceno; algunos sectores del pediplano se encuentran cubiertos por gravas y conglomerados de posible edad Cuaternaria.

La secuencia estratigráfica corresponde en gran parte a andesitas en sus variedades de lavas, lavas brechosas y brechas con intercalaciones menotes de traquitas, ignimbritas y brechas sedimentarias. La serie está formando un monoclinal de rumbo N-S y manteo entre 15^o y 40^oE. De acuerdo a sus características litológicas y estratigráficas la secuencia correspondería al

miembro 1 de la formación Quebrada Marquesa (Thomas, 1967). Sobre el acantilado que limita la cuenca por el oeste, la secuencia anterior está sobreyaciendo a la Formación Arqueros y al este del Portezuelo Pichilingo, esta serie está en contacto con areniscas rojas, andesitas amigdaloidales y areniscas calcáreas amarillas que distinguen el paso del miembro 1 al miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa (Thomas, 1967) (fig. 1).

En la parte noreste del distrito se expone un cuerpo intrusivo de carácter regional que corta la serie estratificada. Este batolito consiste de rocas granodioríticas, tonalíticas y dioríticas y para los efectos locales se le ha denominado "Intrusivo de Tablalalume". Estas rocas intrusivas no se observan, salvo ocasionalmente, alteradas ni mineralizadas y de acuerdo a Thomas, su edad sería Cretácico Superior.

En la parte central del distrito y aflorando en una superficie de 2 km², se expone un cuerpo intrusivo, semejante a un stock, que corresponde a un "porfido tonalítico". Intrusivos petrográficamente muy similares, en forma de filones, sills y cuerpos irregulares (apófisis) se observan en las labores de explotación subterránea del yacimiento. Este intrusivo denominado "Porfido Andacollo" se encuentra en mayor o menor grado mineralizado y alterado y se piensa que está espacialmente y genéticamente relacionado con la metalización del yacimiento.

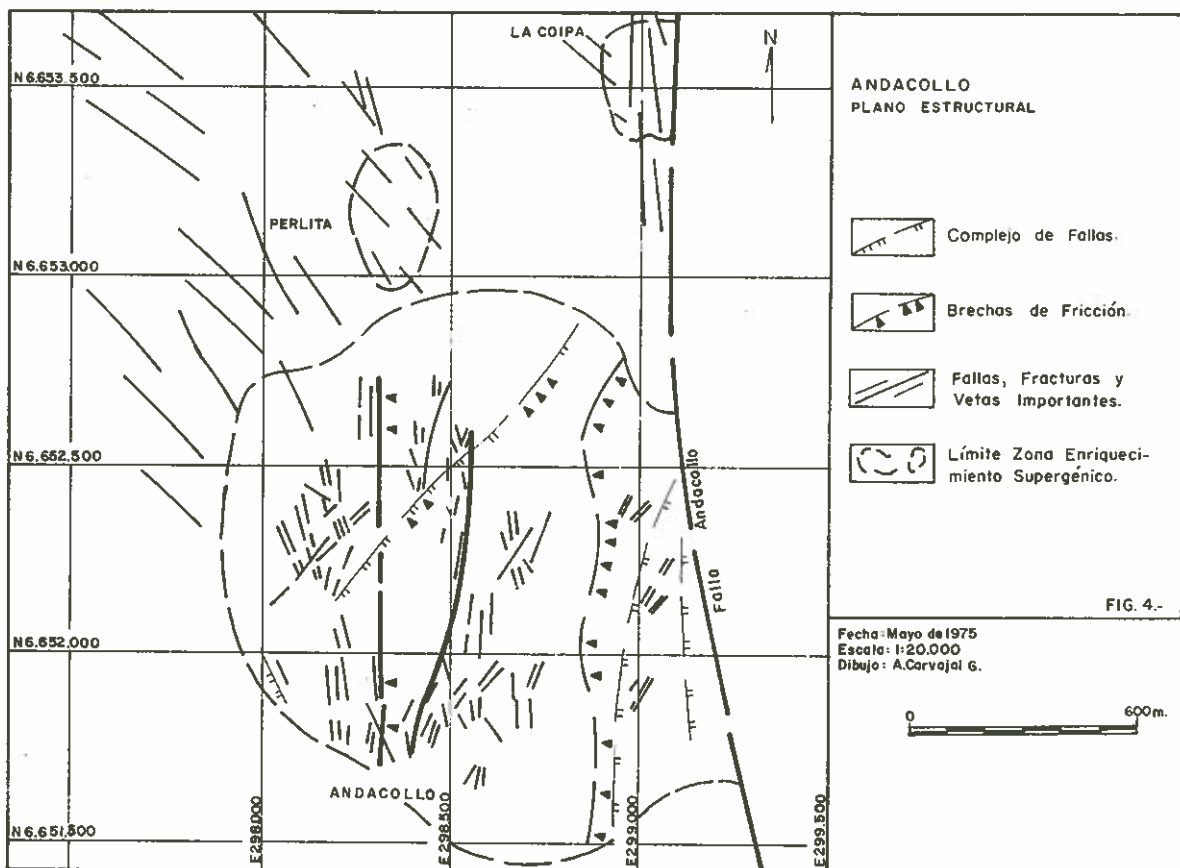
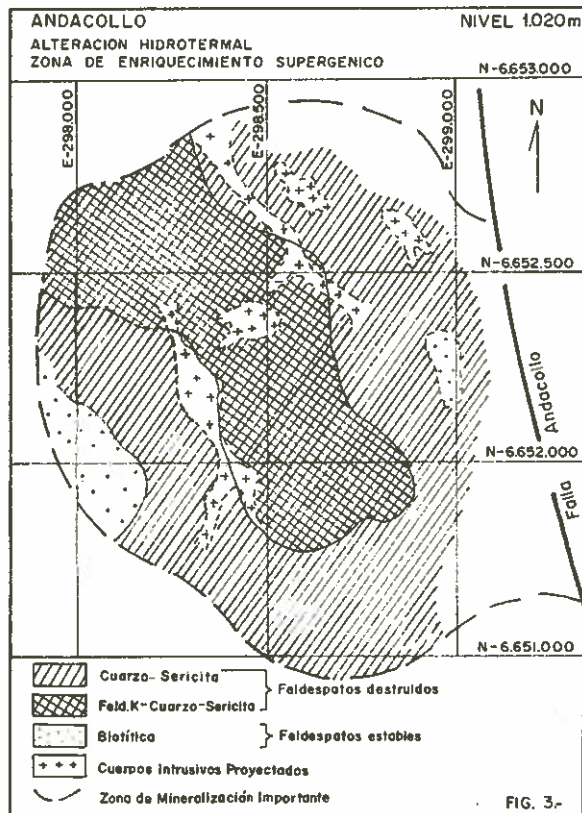
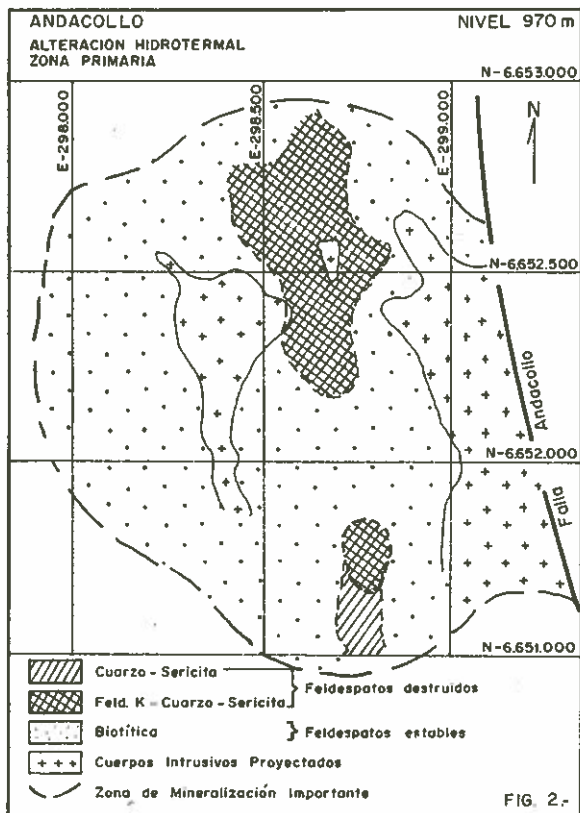
El área de Andacollo se encuentra intensamente fracturada. Fallas, complejos de fallas y fracturas de tendencias estructurales definidas se intersectan y constituyen un modelo geométrico adecuado para los intrusivos apofisiales alargados y su consecuente alteración y mineralización del área central del distrito (figs. 1 y 4).

Existe un definido e importante fallamiento de rumbo N 40^o a 60^o W que controla parte de la mineralización del depósito cuprífero, a las vetas auríferas marginales y a los filones y cuerpos intrusivos apofisiales. Un fracturamiento N-S se intersecta con el primero y forma un reticulado que sirve de importante control de la mineralización. Complejos de fallas y zonas de brechas de fricción y milonitas se observan en el yacimiento.

Existe un claro fallamiento de bloques, post-enriquecimiento supergénico de definido rumbo N-S y que tiene su mayor expresión de las fallas Andacollo y La Hermosa.

GEOLOGIA DEL YACIMIENTO

En el distrito Minero Andacollo hay minas de cobre, minas de cobre-oro-plata, y minas de oro, además depósitos aluviales formados por la destrucción de las



vetas auríferas (fig. 1). Los yacimientos de oro y oro-cobre corresponden generalmente a vetas de gran longitud y se ubican en la periferia de la zona con alteración hidrotermal; generalmente poseen rumbo N 30° a 60°W. El centro del distrito está ocupado por rocas con alteración hidrotermal y dentro de ella se ha desarrollado una mineralización del tipo "cobre porfídico" de lo cual nos referiremos en extenso a continuación.

Se estima que el yacimiento Andacollo puede ser clasificado dentro del tipo de depósitos comúnmente denominados "cobre porfídicos" pues presenta rasgos comunes con las características definidas para este tipo de yacimiento (Lowell-Guilbert, 1970, Creasey, 1968). En efecto, la ubicación de la mineralización en rocas volcánicas y rocas intrusivas porfídicas de composición intermedia y de posición apofisial; la alteración hidrotermal zonificada de las mismas, la asociación mineralógica; la ubicación de la mineralización en forma disseminada y en múltiples venillas polidireccionales (stockwork); el extenso volumen que ocupan las zonas mineralizadas hipógenas y supérgenas; la mineralización marginal a la cuprífera central, etc. son características distintivas para este tipo de depósitos.

A. RELACION MINERALIZACION - INTRUSIVO

En el yacimiento Andacollo aproximadamente un 85% de la metalización ocurre en rocas volcánicas y el resto en rocas intrusivas. Como se dijo antes, estas rocas corresponden a pequeños stocks, apófisis irregulares y cuerpos alargados. En general ellos presentan una textura porfírica y están en mayor o menor grado mineralizados y alterados (sericita-feldespatos potásico-biotita) y pueden ser clasificados como "pórfido tonalítico". Sin embargo, existen entre ellos algunas diferencias en sus características fundamentales (composición-textura) que hace que sea posible reconocer varios tipos de "pórfidos". Dentro de esta variedad es posible diferenciar claramente dos tipos de estos intrusivos. Al oeste de la falla Andacollo el "Pórfido" se presenta como apófisis y cuerpos alargados de dirección preferencial N N W (fig. 4). Este "pórfido" presenta una clara textura porfírica con fenocristales de plagioclasa de tamaño entre 2 y 7 mm y porcentajes que varían entre 30 a 60%. La masa fundamental es fina y está constituida por plagioclasa albitizada, biotita y clorita; presenta ojos de cuarzo en cantidades que varían de 2 a 20%. Al este de la falla Andacollo se ubica un stock de unos 2 km² de superficie, que a pesar de ser "porfírico", presenta una textura gruesa que podría definirse como fanerítica porfírica; posee bastante ojos de cuarzo y feldespato potásico y se le observa mucha molibde-

nita y sulfuros de hierro y cobre. Es posible que los cuerpos del oeste reflejen intrusivos más cercanos a la superficie que el oriental, y que el conjunto de apófisis y diques (cuerpos occidentales) nazcan de un plutón félsico que se ubica bajo el yacimiento en profundidad y de características mineralógicas y texturales parecidas al stock del sector oriental (figs. 1 y 5).

No se ha observado al "pórfido Andacollo" intruyendo al de Tablalalume, más bien en algunos sectores parece que sus contactos fueran transicionales; por otro lado, en ocasiones (sector de Los Negritos) hay similitudes petrográficas. Estos antecedentes nos hacen pensar que el "pórfido Andacollo" puede ser una fase del Batolito de Tablalalume y en consecuencia también podría asignársele una edad Cretácico Superior. Este hecho sería muy significativo ya que estaría mostrando una edad distinta para yacimientos del tipo "cobre porfídico" en el lado occidental de la faja de dichos depósitos.

B. ALTERACION HIDROTERMAL

En el área existe una difundida alteración hidrotermal de las rocas. En superficie, se observa una característica zona blanqueada limonitizada de unos 5 km de largo con un ancho variable de 600 m a 3 km (fig. 1).

En general es posible distinguir alteración supérgena y alteración hipógena.

a. Alteración Hipógena

Del estudio de sondajes, mapeos de superficie y de labores subterráneas ha podido caracterizarse los principales minerales de alteración y su disposición tanto vertical como horizontal dentro del yacimiento. Ellos se presentan zonificados y conforman un modelo que a grandes líneas se corresponde aproximadamente con el esquema dado para desarrollos hidrotermales de otros "cobres porfídicos" de Chile, Méjico y Estados Unidos (Lowell-Guilbert, 1970; Creasey, 1966; Ruiz, 1965).

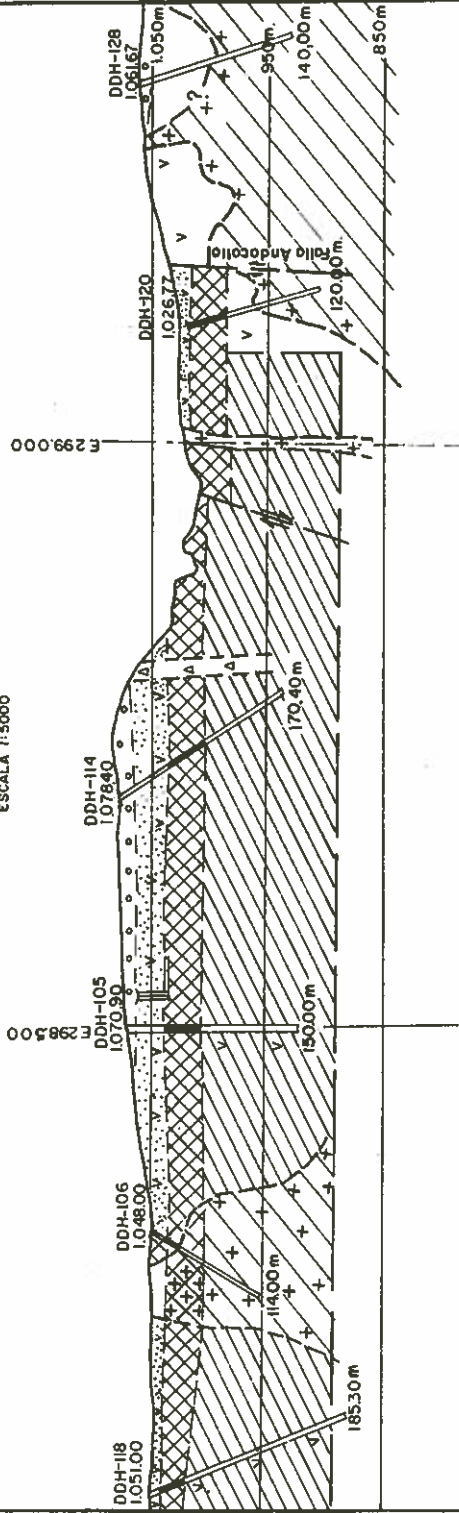
Basados en la presencia, abundancia y distribución de algunos minerales y siguiendo a Creasey (1959) en el sentido de que es posible, y a veces conveniente, clasificar la alteración en base a grupo de minerales, en Andacollo tendríamos, (figs. 2 y 3):

- clorita-epidota-calcita
- cuarzo-sericita
- feldespato potásico-cuarzo-sericita
- biotita-feldespato potásico

Los últimos tres grupos están asociados con la mineralización cuprífera y el primero, ocasionalmente, con la mineralización marginal de oro-cobre (fig. 1). Por otro lado y basados en la idea de la relativa estabilidad de los feldespatos (Meyer y Hemley, 1967

ANDACOLLO

SECCION N 6.652.200
ESCALA 1:5000



LEYENDA

- | | |
|---|--|
| MINERALIZACION | SIMBOLOGIA |
| <ul style="list-style-type: none"> GRAVAS ZONA DE LIXIVIACION 0.08% Cu ZONA DE ENRIQUECIMIENTO SUPERGENICO ≈ 0.90% Cu (a) fuerte (b) débil ZONA DE SULFUROS PRIMARIOS INDICA LEY 0.5% Cu | <ul style="list-style-type: none"> CUERPOS INTRUSIVOS "PORFIDO ANDACOLLO" ROCAS VOLCANICAS PRINCIPALMENTE ANDESITICAS FALLAS BRECHAS DE FRICCION |

FIGURA Nº 5

Nielsen, 1968) la alteración biotita-feldespato potásico correspondería a la "alteración con estabilidad de feldespato" y los grupos "cuarzo-sericita y feldespato potásico-cuarzo-sericita" a la "alteración destructora de feldespatos".

Alteración con estabilidad de feldespatos.

- Grupo biotita-feldespato potásico. Generalmente aparece en profundidad en el yacimiento y ha sido cortada por varios sondajes. En algunas labores mineras cercanas a la superficie se observan pequeños núcleos de este grupo de minerales. Se desarrolla de preferencia en las rocas volcánicas andesíticas. Macroscópicamente corresponde a una andesita de color gris negro a gris verdoso y con una cierta orientación de los minerales ferromagnesianos y cierta pigmentación de su masa fundamental; esporádicamente a la roca la atraviesan venillas de cuarzo-ortoclasa. Microscópicamente la biotita, de color verde parduzco, aparece finamente diseminada en la masa fundamental de las rocas; este mineral ocupa entre un 50 a 90^o/o de la masa fundamental y tiene un tamaño entre 20 a 40 micrones; a veces se la observa entrecruzada con cuarzo intersticial y feldespato potásico, o bien entrecrecido con plagioclasa, en otras se ubica como finas guías junto con cuarzo y feldespato potásico y en muy pocas ocasiones como pequeñas inclusiones en los fenocristales de plagioclasa albitizada. Es frecuente la presencia de rutilo asociado con la biotita y otros minerales ferromagnesianos. Suelen observarse vetillas con cuarzo y clorita al centro y feldespato potásico en los bordes. En general los fenocristales de plagioclasa no han sido reemplazados y sobresalen nítidamente de la masa biotítica.

En la distribución vertical de la asociación de minerales de alteración se puede observar que este grupo ocupa las partes más profundas reconocidas del yacimiento (figs. 2 y 3).

Alteración destructora de feldespatos.

- Grupo feldespato potásico, cuarzo-sericita. Esta asociación de minerales ocupa el sector central de la zona alterada y en profundidad da paso a la alteración "biotita-feldespato potásico". Generalmente las rocas se presentan de color gris blanquizco y se distinguen porque han perdido sus características originales (textura, color, destrucción de feldespatos). Se presenta como un mosaico y entrecrecimiento de granos de feldespatos potásicos, cuarzo y sericita; estos minerales varían en tamaño entre 50 y 200 micrones, siendo un promedio unos 100 micrones; la proporción de los minerales es aproximadamente la siguiente: feldespato potásico: 30-40^o/o; cuarzo, 30-50^o/o; sericita 10-30^o/o. En ocasiones

junto al mosaico hay vetillas de feldespato potásico y sericita.

- Grupo cuarzo-sericita. Se ubica en las partes superiores del yacimiento y aparece rodeando a las alteraciones descritas anteriormente. Se presenta como un reemplazo total de la roca. Consiste en un mosaico de granos de cuarzo entrecrecidos con sericita y de tamaños entre 100 y 200 micrones; los feldespatos generalmente aparecen reemplazados totalmente por un tejido fino a intermedio de sericita y abundante cuarzo; también se observan numerosas guías gruesas y delgadas (0,1 a 2 cm) de cuarzo sericita, con halo sericítico intenso.

b. Alteración Supérgena

Debido a la gran cantidad de pirita que existe en el yacimiento, las soluciones ácidas derivadas de la oxidación de ese mineral han llevado a producir una fuerte zona de lixiviación y una zona de alteración supérgena sobreimpuesta sobre la hipógena; las rocas han sido limonitizadas y se caracterizan por los colores blanco, amarillo, rojo y marrón. Se ha formado a consecuencia de esto, productos de alteración silíceas de tejido fino o bien brechosas (núcleo de sílice con cemento limonítico) e incluso jasperoides, existen además sectores con argilización secundaria. Generalmente la zona con alteración supérgena coincide con la zona de lixiviación y en consecuencia termina algo más arriba del techo del enriquecimiento supérgeno.

C. MINERALIZACION

Dentro de la zona de alteración hidrotermal se encuentra ampliamente difundida la mineralización cuprífera con cantidades subordinadas de molibdeno, oro y plata. Esta metalización, es del orden de 0,15 a 0,40^o/o Cu; sin embargo, es posible distinguir centros de mineralización importante donde el grado de metalización es mayor y que tienen estrecha correspondencia con ciertos arreglos de alteración hidrotermal o con sectores más fuertemente fracturados (figs 1, 6, 7, 8 y 9). Los sectores actualmente conocidos con metalización de importancia son: Andacollo propiamente tal, La Coipa, Perlita y posiblemente Hermosa Sur. En este trabajo nos referimos principalmente al primero de los nombrados.

El área mineralizada en cuestión es cercanamente circular y se encuentra interrumpida en el lado oriental por la falla Andacollo; se extiende de norte a sur en un largo de 1.500 m y de este a oeste en aproximadamente 1.250 m. La mineralización se presenta diseminada y como rellenos de grietas polidireccionales y encajado en un 85^o/o en rocas volcánicas alteradas. Es posible observar la siguiente zonificación en la disposición de la mineralización (fig. 5):

- Zona de lixiviación: comienza desde la superficie o bien subyace a gravas aluviales; tiene un espesor promedio de 30 m. Esta zona está constituida principalmente por limonitas y tiene una ley media de $0,07\%$ Cu. En tres áreas de extensión muy reducida se presentan zonas o bolsones de óxidos de cobre; también ha sido posible observar relictos de una antigua zona de enriquecimiento supergénico pero de restringida extensión.
- Zona con enriquecimiento supergénico: subyace a la anterior y generalmente corresponde a una mena constituida por pirita, calcosina y calcopirita. Posee una disposición muy regular y cercanamente horizontal y su espesor promedio alcanza los 40 m. Sus leyes varían entre $0,6$ a $1,5\%$ Cu.
- Zona con sulfuros primarios: subyace a la zona anterior y consiste esencialmente de pirita y calcopirita; sus leyes varían entre $0,30$ y $0,80\%$ Cu. Ha sido reconocida bastante bien hasta unos 100 m por debajo de la base de la zona de enriquecimiento supergénico, pero existen algunos pocos sondajes hasta 200 m por debajo de la referida zona mostrando mineralización de interés a esas profundidades.

a. Mineralización Hipógena

Consiste esencialmente de pirita y calcopirita. Existen además cantidades variables de hematita y subordinadamente magnetita y rutilo; cantidades menores de molibdenita y bornita, pirrotina y cubanita.

La calcopirita generalmente aparece en dos formas: como inclusiones globulares dentro de pirita y junto con pirrotina o bien como mineral individual, liberada de la pirita o sólo con bordes suaves con ella. Esto aparentemente representa dos etapas en la actividad mineralizadora, siendo la segunda forma posterior y mucho más abundante y en consecuencia más importante como aportadora de cobre.

Generalmente la calcopirita liberada aparece en cristales con forma anhedrales y de tamaño aproximado a 100 micrones; también se presenta como guicillas de espesor entre $0,5$ a $1,5$ mm.

La calcopirita que se presenta dentro de la pirita lo hace en forma de inclusiones gotiformes de 10 a 20 micrones y asociadas con pirrotina y/o cubanita (mezclamiento).

La pirita es lejanamente el sulfuro principal y se encuentra diseminada en forma de cristales de aproximadamente 150 micrones y también como venillas desde $0,2$ mm hasta algunas de 2 a 3 cm. Algunos recuentos mineralógicos indican que, en volumen, un 60 o 70% de la pirita se incluye como guías.

La bornita se presenta escasamente y como exolución de calcopirita.

La hematita junto con la magnetita se presenta diseminada (de tamaño aproximadamente a los 100 micrones) y en forma de pequeñas guías y se hace más o menos abundante en la parte central del yacimiento en una faja de tendencia N N E. Hay ciertas cantidades de hematita que tienen inclusiones de calcopirita.

La molibdenita se ubica como delgadas, cortas y discontinuas vetillas de 1 a 2 mm de ancho y a veces asociada a cuarzo y sericita. Rutilo granular o en cristales prismáticos de 30 a 70 micrones ocurre moderada y comúnmente asociado a biotita secundaria. Así como se vio anteriormente que la alteración hidrotermal se dispone según un modelo de zonación, la mineralización hipógena también ocurre según un esquema bastante claro. En efecto, la parte central, (núcleo) posee los valores más altos en cobre y molibdeno y se distingue por la asociación "pirita-calcopirita-hematita" (y/o magnetita); esta zona tiene los valores más bajos en la razón pirita/calcopirita ($1/1$ a $4/1$) y muestra cierta coincidencia con el emplazamiento del grupo de minerales de alteración "feldespato potásico-cuarzo-sericita". (figs. 8 y 9)

Rodeando a la zona anterior se ubica la asociación "pirita-calcopirita"; los valores en cobre y molibdeno son menores y la razón pirita-calcopirita varía entre $4/1$ a $9/1$.

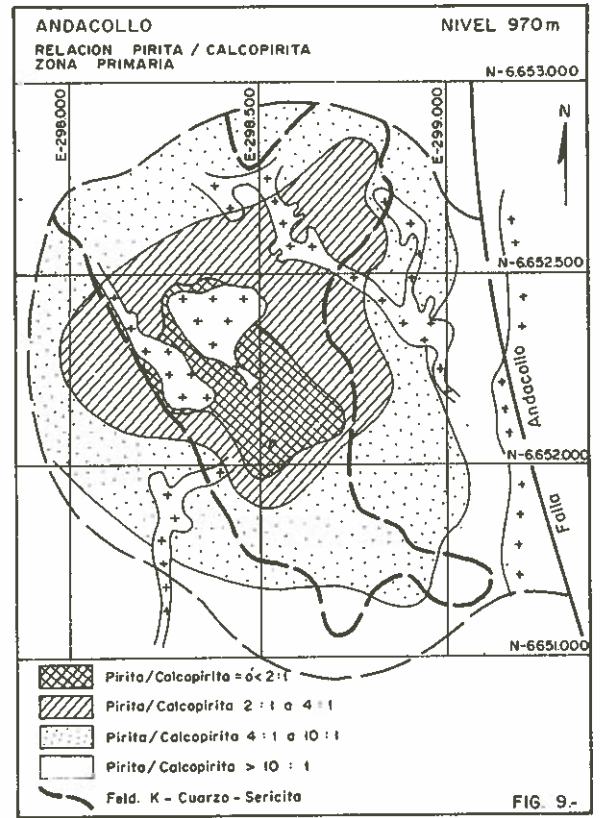
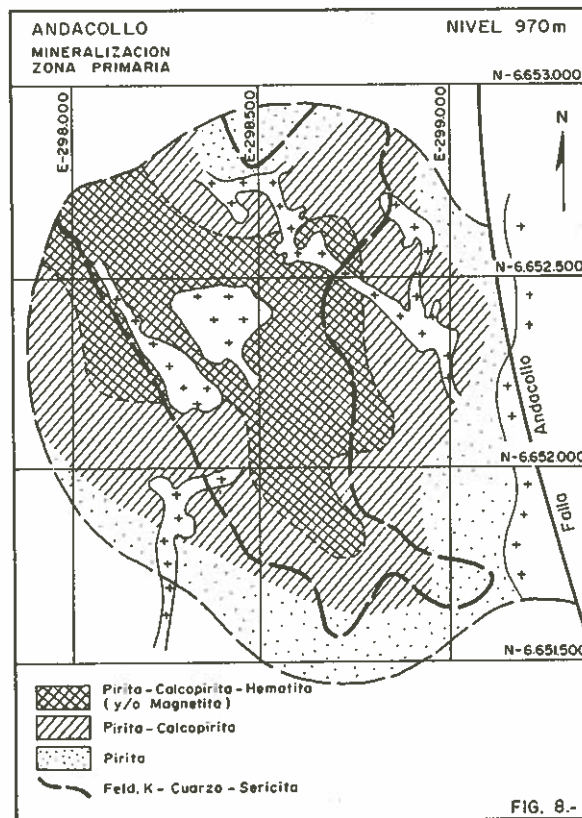
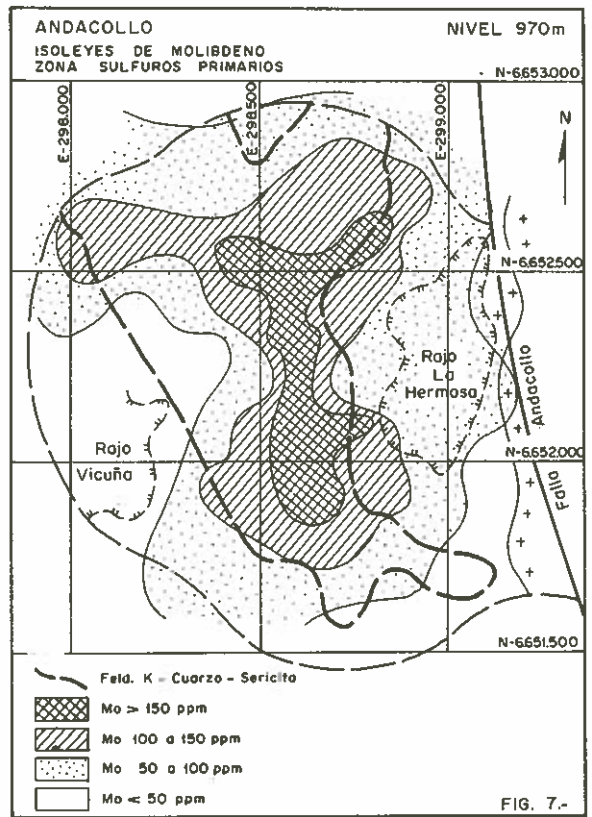
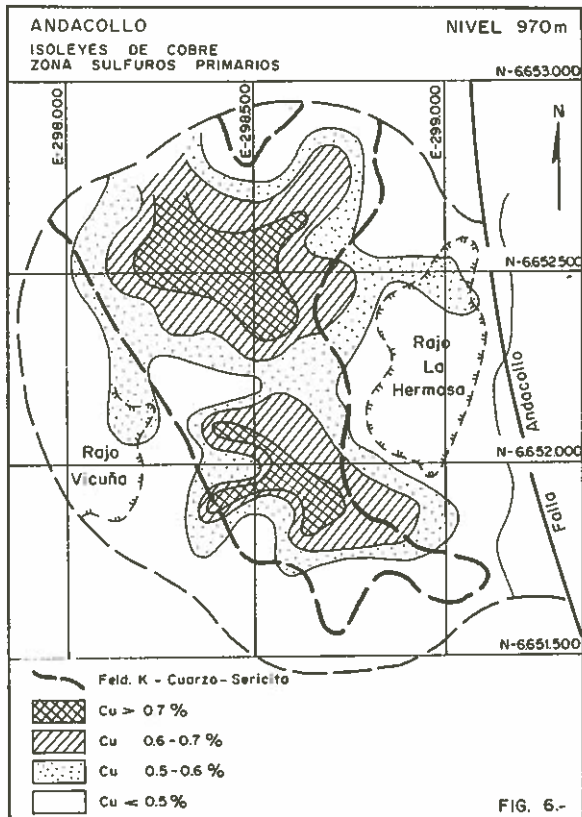
La zona externa se distingue por la abundancia de pirita y escasísima presencia de calcopirita, habiendo una razón entre ellos que va desde $9/1$ a más de $20/1$.

b. Enriquecimiento Supergénico

En Andacollo se presenta una zona de enriquecimiento supergénico de poco espesor (40 m promedio) pero de posición y características muy regulares (fig. 5). La zona de enriquecimiento está directamente relacionado a la existencia de un pediplano o relieve maduro que se formó posiblemente en el Terciario y que actualmente está expresado en la morfología o cuenca de Andacollo. Además de esta característica topográfica, deben haber tenido influencia en el desarrollo de esta zona, el contenido de cobre de la mineralización hipógena del sector, la alta proporción de pirita de la mena, la aridez del paisaje y el fuerte fracturamiento de las rocas (stockwork).

El paso de la zona lixiviada superior a la zona con sulfuros supergénicos, es brusco, siendo este contacto generalmente horizontal; la base del enriquecimiento, en ocasiones también es tajante pero mayormente corresponde a una transición que pasa por un débil enriquecimiento a sulfuros primarios no afectados.

Dentro de la cubierta lixiviada, en algunos sectores, se han encontrado restos de pequeñas zonas con vetillas de "calcosina metálica" rodeadas por minerales oxi-



FECHA : Mayo de 1975
ESCALA 1 : 20.000
DIBUJO : Victor Garrido

0 100 600m

dados; esto posiblemente representaría un primer estado de enriquecimiento, anterior al principal y de cuya destrucción se aportó mineral para el estado de enriquecimiento supergénico más importante del yacimiento.

La zona principal de enriquecimiento secundario generalmente corresponde a una mezcla de calcosina, especialmente pulverulenta, calcopirita y pirita; cantidades variables de hematita-magnetita y rutilo y menores cantidades de molibdenita, covelina, tetrahedrita.

Un promedio de los sulfuros indica la siguiente distribución porcentual: pirita 80^o/o, calcosina 12^o/o, calcopirita 6^o/o y covelina 2^o/o; dentro de los sulfuros de cobre, éstos estarían repartidos así: calcosina 55^o/o, calcopirita 35^o/o, covelina 10^o/o.

La calcosina se presenta en los bordes de los granos de calcopirita (como reemplazo), a partir de las grietas de los mismos o como un delgado recubrimiento sobre los granos y vetillas de pirita. Los reemplazos de calcosina en cristales de calcopirita son de tamaño entre 10 y 40 micrones, siendo los más comunes del orden de 20-25 micrones. Los recubrimientos de calcosina sobre pirita corresponden a películas de 1 a 20 micrones, siendo lo más común 5 micrones. De acuerdo a estudios cualitativos efectuados por Córdova (1973) esta calcosina en su mayor parte consiste de la fase de djurleita (Cu_{1,97}S).

La calcopirita se presenta mayormente como granos liberados de pirita y de tamaños entre 50 y 200 micrones, siendo el promedio aproximadamente de 100 micrones. También se observa como inclusiones globulares de 20 a 50 micrones dentro de pirita.

Generalmente parte de la pirita se encuentra reemplazada por calcosina y covelina. La pirita muchas veces cubierta por calcosina, se ubica como vetillas de poco espesor de 0,2 a 1 mm o como vetillas gruesas de hasta 1 o 2 cm o bien diseminada con cristales de promedio 100 micrones.

Debido a procesos post-enriquecimiento se han generado oxidaciones parciales y de reemplazo de calcosina y calcopirita por covelina, mostrando con esto una sulfuración de la mena (o pérdida de cobre). La covelina se presenta con un promedio de 15 micrones y según Córdova (1973) correspondería a blaubleinbender covelina y a covelina normal. Junto a esos minerales se observa cuprita, calcotriquita (estos minerales generalmente en zonas de fallas o zonas de pórfidos), malaquita, crisocola y copper-pitch; además en la zona de labores subterráneas se ha formado una capa de chalcantita debido a la acción del agua subterránea sobre las paredes de las labores.

Generalmente la zona de enriquecimiento secundario

ocupa un área mayor que la de los núcleos de mayor contenido de cobre, esto podría significar que además de la migración vertical de las soluciones de cobre hubiera existido un movimiento lateral de ellas, procesos que estarían favorecidos por la alta razón de pirita/calcopirita del yacimiento.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los estudios geológicos llevados a cabo en el depósito cuprífero Andacollo han logrado definir sus características principales sobre estructura mineralización-alteración del yacimiento, han permitido evaluar las reservas de mineral y han llevado a plantear algunas consideraciones metalogénicas de los depósitos de cobre porfídico. Algunas conclusiones alcanzadas son las siguientes:

1. Andacollo puede ser considerado un yacimiento del tipo "cobre porfídico" pues posee muchas de las características que definen a estos depósitos: relación con intrusivos de composición intermedia; extensa zona de alteración hidrotermal; asociación mineralógica simple de pirita-calcopirita-molibdenita; metalización diseminada y como relleno de fisuras polidireccionales (stockwork); zonación de la mineralización y alteración hipógena; gran volumen de la mineralización, existencia de una definida zona de enriquecimiento supergénico y mineralización marginal de vetas de oro y cobre.
2. Gran parte de la metalización y alteración hidrotermal se ha desarrollado en rocas volcánicas. Tanto el modelo de alteración como de mineralización hipógena, son en líneas generales, coincidentes con los otros cobres porfídicos del mundo. La zona interior generalmente corresponde a un arreglo de minerales de alteración de biotita-feldespato potásico. Marginal a ella se presenta un arreglo de feldespato potásico - cuarzo-sericita y rodeando a este grupo de minerales de alteración, se encuentra un difundido arreglo de cuarzo-sericita. La mejor mineralización hipógena de cobre y molibdeno presenta la asociación mineralógica "pirita-calcopirita-hematita" y se desarrolla en las alteraciones internas, especialmente en la asociación "feldespato-cuarzo-sericita"; esto a su vez corresponde muy cercanamente con las más bajas razones de pirita/calcopirita (1/1 a 4/1). La metalización de calcopirita presenta dos formas; una como inclusiones gotiformes en pirita y otra, la de más importancia se presenta como granos individuales (100 micrones) liberada de pirita y en consecuencia de importancia mineralúrgica.
3. En Andacollo existe una zona de enriquecimiento

supergénico de poco espesor (de promedio 40 m) pero de forma y ubicación muy regulares. Generalmente corresponde a calcosina (del tipo djurleita) que se ubica como delgados reemplazos de calcopirita (20 a 25 micrones) o como leves revestimientos sobre pirita (5 a 10 micrones). También en esta zona es importante la calcopirita hipógena remanente. Es muy posible que hayan existido dos estados de enriquecimiento supergénico, estando el último y más importante, relacionado con la formación del pediplano de Andacollo. Posterior a este enriquecimiento se han producido nuevos fenómenos de oxidación y reemplazo de calcosina por covelina.

4. Se han podido ubicar reservas de interés. En efecto, hasta el momento se tiene una cifra de algo más de 300.000.000 t de $0,7\%$ Cu; esto solamente representa algo así como un $2,5\%$ de los recursos identificados recuperables de Chile. Sin embargo, y de acuerdo a los planteamientos mineros existentes, la puesta en marcha de su explotación incrementaría en un 9% el nivel actual de producción. Por otro lado es interesante destacar la favorable ubicación geográfica del yacimiento (topografía, clima, centros urbanos y portuarios, etc.), la experiencia minera de los habitantes de la ciudad y la etapa de adelanto en que se encuentran los estudios geológicos, mineros y metalúrgicos.
5. Las relaciones entre el intrusivo de Tablalalume y el "pórfido Andacollo" sugieren que el último es sólo una fase del primero y en consecuencia podría asignársele también una edad Cretácico Superior. Si esto es correcto el "pórfido cuprífero Andacollo" sería de edad distinta a los conocidos Chuquicamata, Salvador, etc., de edad Oligocena o El Téniente, Los Pelambres, Río Blanco, de edad Pliocena (Neumann, 1973) y parecido a "pórfidos" o desarrollos hidrotermales como Los Loros, de definida edad Cretácico Superior, María Soledad, Cachiyuyo, Mantos Blancos, Puntilla, etc. Lo anterior nos estaría sugiriendo que "pórfidos cupríferos" o

desarrollos hidrotermales también se habrían emplazado en zonas que actualmente son parte de la Cordillera de La Costa, en ambientes eugeosinclinal y de edad Cretácico Superior. Esto abriría más posibilidades de prospección para este tipo de yacimientos ya que nos estaría mostrando una amplia faja de ubicación de "pórfidos" y de edades que irían desde el Cretácico Superior al Plioceno.

BIBLIOGRAFIA

- Córdova, C., 1973, Observaciones mineralógicas preliminares de la muestra Andacollo n. 5. Delft University of Technology.
- Creasey, S.C., 1965, Hydrothermal alteration in Geology of the porphyry copper deposits, Southwestern North America, ed. S. R. Titley & C.L.Hicks: Tucson, Univ. Arizona Press, p. 51 - 64.
- Lowell, J.D., Guilbert, J.M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ.Geology*, v. 65, n. 4.
- Llaumett, C., Ulloa, G., 1973, Estado actual del estudio geológico y Evaluación del yacimiento cuprífero Andacollo, Empresa Nacional de Minería. Inédito.
- Marquardt, J.C., 1974, Andacollo; Litología, Alteración y Mineralización. Empresa Nacional de Minería. Inédito.
- Meyer, C. and Hemley, J.J., 1967, Wall rock alteration in Geochemistry of hydrothermal ore deposits. Ed. H.L. Barnes: New York, p. 166 - 235.
- Neumann, J., H., 1974, Mineralización tipo cobre pórfido en Chile. *Rev. Geológica de Chile*. n. 1.
- Nielsen, R.L., 1968, Hypogene texture and mineral zoning in a copper-bearing granodiorite porphyry stock Santa Rita. *Econ. Geology*, v. 63, n. 1.
- Ruiz, C., 1965, Geología y yacimientos metalíferos de Chile. *Inst. Invest. Geol.*, Santiago.
- Thomas, H., 1967, Geología de la Hoja Qvalle. *Bol. 23, Inst. Invest. Geol.*, Santiago.