

ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS EN VETILLAS TEMPRANAS DEL SECTOR NOROESTE DEL YACIMIENTO "EL TENIENTE"

FLUID INCLUSIONS IN EARLY VEINLETS FROM THE NORTH-WEST AREA OF "EL TENIENTE" OREBODY, CHILE

LAN-YEN IP ZAGAL

Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21. Santiago, Chile.

RESUMEN

En el sector noroeste del yacimiento "El Teniente", cada una de las diferentes etapas de alteración y mineralización se encuentran ligadas a determinados tipos de vetillas que le son características. Las vetillas de la etapa más temprana se caracterizan por la ausencia de halos de alteración.

Análisis macroscópicos y microscópicos han permitido distinguir 5 tipos de vetillas tempranas. Estas vetillas contienen inclusiones fluidas de alta salinidad (34 - 37% de NaCl) con cristales hijos de halita e inclusiones fluidas de baja salinidad (1 - 15% de NaCl) sin cristales hijos.

Se reconoció la coexistencia de inclusiones fluidas ricas en vapor, de inclusiones fluidas ricas en líquido y de inclusiones fluidas con cristales hijos de halita, lo que indicaría la presencia de fluidos en ebullición subsaturados en sales.

La presencia de fluidos de baja salinidad, y las bajas temperaturas obtenidas (330 - 410°C) en las inclusiones fluidas contenidas en vetillas de la etapa temprana, estarían evidenciando la incorporación de aguas meteóricas al sistema.

ABSTRACT

In the North-West area of "El Teniente" Mine, each mineralization and alteration stage is related to characteristic types of veinlets. The earliest stage veinlets are characterized by the lack of alteration halos.

Five types of early veinlets have been determined based in macroscopic and microscopic analysis. These veinlets contain both high salinity fluid inclusions (34 - 37% NaCl) with halite daughter crystals and low salinity fluid inclusions (1 - 15% NaCl) without daughter crystals.

The coexistence of high-vapour fluid inclusions, high-liquid fluid inclusions and fluid inclusions with halite daughter crystals would indicate that the boiling fluids

were subsaturated in salts.

The low salinity fluids, and the low homogenization temperature (330 - 410 °C) measured in fluid inclusions of the early stage veinlets would indicate the involvement of the meteoric waters in the system.

INTRODUCCION

El yacimiento "El Teniente", se ubica en la Alta Cordillera de los Andes, de la VI región, en la provincia del Cachapoal, a 68 km al noreste de la ciudad de Rancagua (Fig. 1).

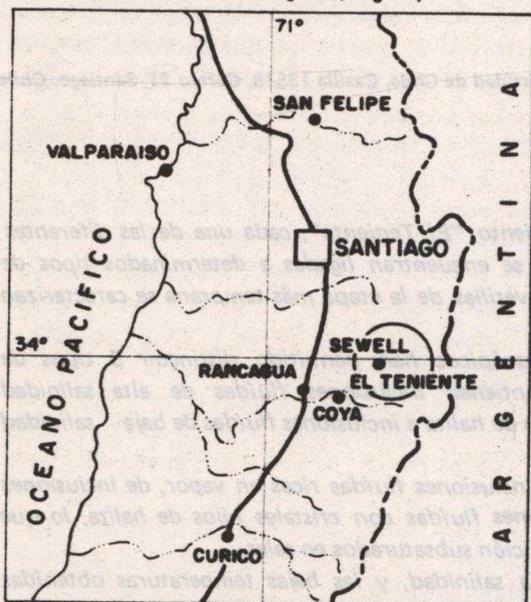


Fig. 1. Mapa de ubicación del yacimiento "El Teniente".

Fig. 1. Location map of El Teniente ore deposit.

Este yacimiento es uno de los mayores depósitos de cobre conocidos en el mundo y corresponde a un pórfido cuprífero desarrollado por cuerpos intrusivos que intruyen a rocas volcánicas de edad miocena. Los cuerpos intrusivos corresponden a diorita cuarcífera, pórfido dacítico y pórfido latítico las rocas volcánicas son andesitas. Los diques presentes son de andesita y de lamprófito. En la parte central del yacimiento se emplaza una compleja megaestructura subvolcánica denominada chimenea Braden (Fig. 2).

En el yacimiento "El Teniente", Ojeda et al., (1980) definieron cuatro etapas sucesivas de alteración y mineralización de origen hipógeno denominada por ellos, respectivamente: tardimagmática, hidrotermal principal, hidrotermal tardía y póstuma. Además reconocen una etapa de origen supergeno que caracteriza a la parte superior del yacimiento. Los estudios más importantes que se han referido a la etapa denominada tardimagmática en el yacimiento son los siguientes: Faunes (1981), estudió un sector del stock tonalítico y en el reconoció la etapa de alteración y mineralización tardimagmática coincidente con aquella ya descrita para el yacimiento. En base a elementos texturales y mineralógicos estableció consideraciones paragenéticas para esta etapa; Zuñiga (1982), estudió la etapa tardimagmática en el sector oeste, distinguió 4 zonas de alteración basado en asociaciones de minerales de alteración, de-

terminó que la mineralización consistía en bornita, calcopirita, pirita y molibdenita con cantidades menores de magnetita y realizó una clasificación de vetillas tardimagmáticas en andesitas; González (1982), estudió la alteración tardimagmática en el sector este, determinó una zonación de la mineralogía tardimagmática y confirma la simetría de la alteración tardimagmática con respecto a una dirección Norte-Sur coincidente con la dirección del pórfido dacítico; Kusakabe, (1984) mediante estudios isotópicos de oxígeno y azufre en cuarzo, anhidrita y minerales sulfurados estima que la etapa tardimagmática se habría formado a una temperatura de 460°C.

El objetivo del presente estudio es determinar las condiciones fisicoquímicas (temperatura, presión, salinidad) de los fluidos que actuaron durante la etapa denominada tardimagmática en los estudios anteriores, del sector Nor-Oeste del yacimiento, mediante un estudio de inclusiones fluidas en vetillas que se considera pertenecen a dicha etapa. No obstante en el presente estudio, el término *tardimagmático* es reemplazado por el de *temprano*, con el fin de no darle una connotación genética pero si cronológica a este tipo de vetilla. Con este propósito se estudió la sección 87 del yacimiento (Fig. 2), de la cual se seleccionaron aproximadamente 200 muestras para cortes transparentes y pulidos, obtenidos de los sondeos DDH-1046, DDH-1064, DDH-939, DDH-914. El estudio petrográfico de ellas permitió identificar los tipos de vetillas más característicos del sector y elegir 10 cortes para analizar sus inclusiones fluidas, (Fig. 3).

El estudio microtermométrico de inclusiones fluidas se llevó a cabo en una platina LINKHAM TH-600 (calentadora - congeladora), la cual tiene un rango de temperatura variable entre -180° y 600°C.

El presente estudio fue presentado como Taller de Título II en el Departamento de Geología y Geofísica de la Universidad de Chile.

GEOLOGIA DEL YACIMIENTO

El yacimiento "El Teniente" corresponde a un pórfido cuprífero desarrollado por la intrusión de cuerpos plutónicos e hipabisales, de 7 - 4 Ma (Cuadra, 1986), en rocas volcánicas estratificadas de edad miocena (Charrier y Munizaga, 1979).

Las rocas volcánicas estratificadas están constituidas por andesitas pertenecientes al miembro inferior de la Formación Farellones (Klohn, 1960), las cuales han experimentado transformaciones texturales y composicionales en el área del yacimiento (Howell y Molloy, 1960).

Los cuerpos intrusivos en el yacimiento corresponden litológicamente a pórfido dacítico, diorita cuarcífera y a un pórfido latítico; además se

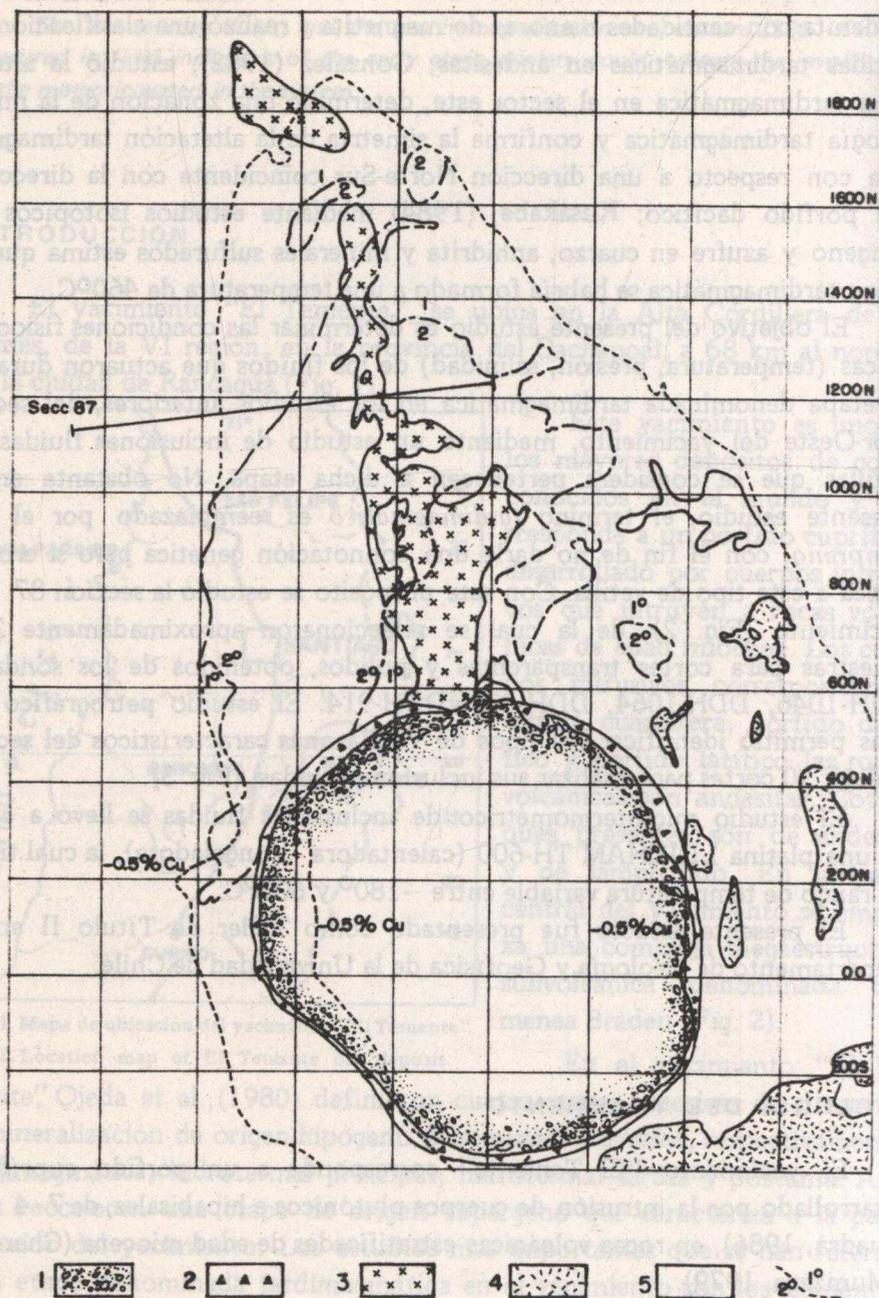


Fig. 2. Geología del nivel T-5 del depósito. Ubicación de la sección 87. 1. Chimenes Braden; 2. Brecha marginal; 3. Dacita; 4. Tonalita; 5. Andesita; 6. Enriquecimiento secundario.

Fig. 2. Geology of level T-5, indicating the location of section 87. 1. Braden Breccia; 2. Marginal Breccia; 3. Dacite; 4. Tonalite; 5. Andesite; 6. Secondary enrichment.

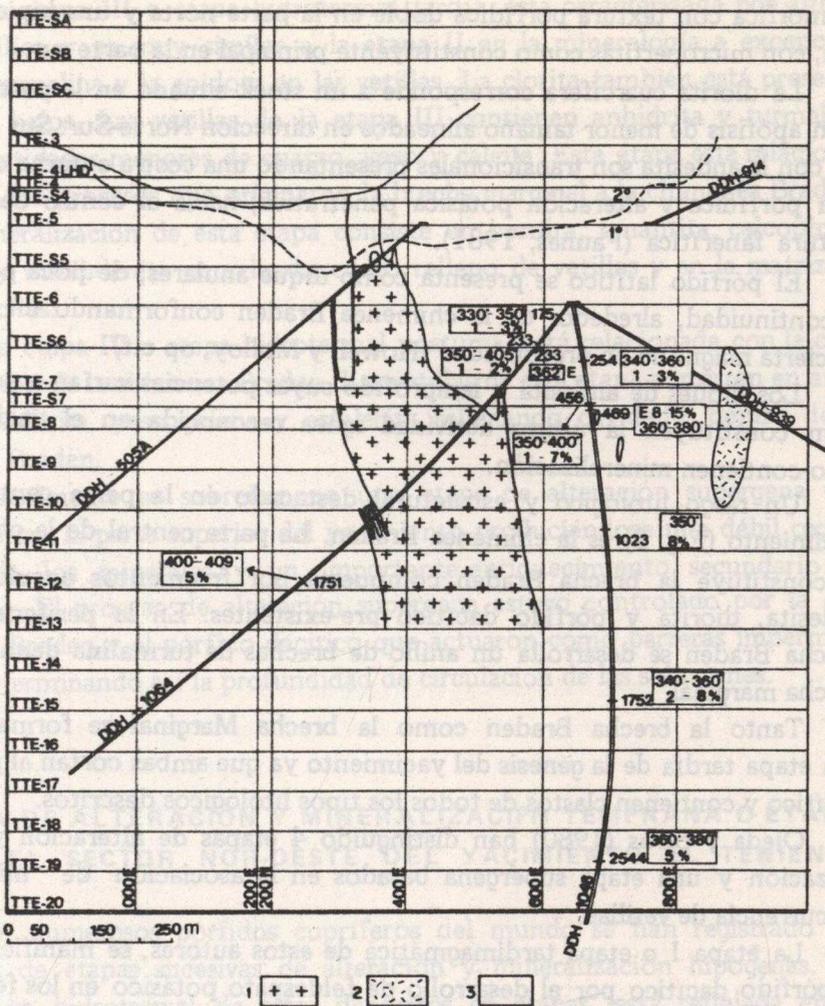


Fig. 3. Sección 87. Localización de muestras analizadas con indicación de rangos de Temperatura y salinidad indicados por sus inclusiones fluidas. 1. Dacita; 2. Tonalita; 3. Andesita.

Fig. 3. Section 87 with the location of the analyzed samples, indicating temperature and salinity, as by their fluid inclusions. 1. Dacite; 2. Tonalite; 3. Andesite.

reconocen diques de andesita lampróvido.

El pórfido dacítico es el principal causante de la alteración y mineralización en el yacimiento. Se trata de un cuerpo tabular, subvertical de orientación Norte-Sur y truncado hacia el sur por la chimenea Braden. Este intrusivo corresponde una dacita rica en feldespatos alcalinos y pobre en sílice (Ossandon, 1974). Está constituido por fenocristales de oligoclasa (30 - 50%), biotita (1 - 3%), cuarzo (1 - 3%) y escasa hornblenda en una masa fundamental de textura aplítica, compuesta por cuarzo, feldespatos potásicos y biotita. Ossandon (1974) distinguió dos variedades texturales: una pani-

diomórfica con textura porfídica doble en la parte norte y una hipidiomórfica, con micropertitas como constituyente principal en la parte sur.

La diorita cuarcífera corresponde a un stock situado en la parte sur y a un apófisis de menor tamaño alineados en dirección Norte-Sur. Sus contactos con la andesita son transicionales presentando una costra externa con textura porfídica y alteración potásica penetrativa; hacia el centro desarrolla textura fanerítica (Faunes, 1981).

El pórfido latítico se presenta como dique anulares, de poca potencia y continuidad, alrededor de la chimenea Braden conformando un cuerpo de cierta magnitud en profundidad (Howell y Molloy, op cit).

Los diques de andesita y lamprófido cuyas potencias varían entre 0.5 y 2 m constituyen la última actividad ígnea reconocida en el yacimiento y no contienen mineralización.

Un rasgo litológico y estructural destacado en la parte central del yacimiento (Fig. 2) es la chimenea Braden. La parte central de la chimenea la constituye la brecha Braden compuesta por fragmentos angulosos de andesita, diorita y pórfido dacítico pre-existentes. En la periferia de la brecha Braden se desarrolla un anillo de brechas de turmalina denominada brecha marginal.

Tanto la brecha Braden como la brecha Marginal se formaron en una etapa tardía de la génesis del yacimiento ya que ambas cortan al pórfido dacítico y contienen clastos de todos los tipos litológicos descritos.

Ojeda y otros (1980) han distinguido 4 etapas de alteración y mineralización y una etapa supérgena basados en la asociación de minerales y ocurrencia de vetillas.

La etapa I o etapa tardimagmática de estos autores, se manifiestan en el pórfido dacítico por el desarrollo de feldespato potásico en los fenocristales de plagioclasa y en la masa fundamental. En las andesitas esta alteración se manifiesta por un reemplazo total o parcial a biotita, cuarzo anhídrita. La mineralización consiste en bornita, calcopirita, pirita y molibdenita con cantidades menores de magnetita.

Las vetillas de esta etapa contenida en andesitas, no presentan halo de alteración. Los minerales sulfurados ocurren tanto en las vetillas como diseminados en la roca de caja.

La etapa II o etapa hidrotermal principal es de alteración filíca. Las vetillas de esta etapa contienen cuarzo y anhídrita y poseen halo cuarzo-sericitico que se extiende hacia la roca de caja y cortan a las vetillas de la etapa I. La mineralización que acompaña a este episodio es de calcopirita, pirita y molibdenita con menores cantidades de digenita, las que se encuentran en forma diseminada en los halos y o formando parte del relleno en las vetillas.

La etapa III o etapa hidrotermal tardía, está caracterizada por alteración filica y es muy similar a la etapa II en la mineralogía a excepción de la turmalina y la epidota en las vetillas. La clorita también está presente en los halos. Las vetillas de la etapa III contienen anhidrita y turmalina con cantidades menores de cuarzo, yeso y calcita. Esta etapa esta relacionada con los procesos que originaron la brecha marginal a la chimenea Braden. La mineralización de esta etapa consiste en bornita, tenantita, calcopirita, piritita y molibdenita ocurriendo como relleno de vetillas y en la matriz de las brechas.

La etapa IV o etapa hidrotermal póstuma, está relacionada con la consolidación de la chimenea Braden. Las vetillas de esta etapa consisten en anhidrita, siderita, yeso, galena y esfalerita relleno de cavidades dentro de la brecha Braden.

Finalmente se sobreimpone una etapa de alteración supérgena que caracteriza la parte superior del yacimiento produciéndose una débil oxidación de los minerales y un importante enriquecimiento secundario de sulfuros. El proceso de alteración supérgena estuvo controlado por la chimenea Braden y el pórfido dacítico que actuaron como barreras impermeables determinando así la profundidad de circulación de las soluciones.

ETAPA DE ALTERACION Y MINERALIZACION TEMPRANA O ETAPA I EN EL SECTOR NOR-OESTE DEL YACIMIENTO EL TENIENTE

En numerosos pórfidos cupríferos del mundo se han registrado los efectos de etapas sucesivas de alteración y mineralización hipogénas. La evolución hidrotermal de estos depósitos en etapas, está reflejada en la mineralogía de mena y alteración, en las relaciones de temporalidad de las vetillas y en las características de las inclusiones fluidas, (Titley, 1984). En estos pórfidos la etapa más temprana está muy documentada y ella frecuentemente ha sido considerada tardimagmática. Esta etapa se caracteriza por una intensa alteración potásica consistente en biotita y/o feldespato potásico afectando penetrativamente a la roca de caja. Estos minerales también se reconocen junto a cuarzo, anhidrita, calcopirita y bornita en vetillas irregulares de bordes nítidos, discontinuas y con ausencia de un halo de cuarzo-sericita o clorita en torno a las vetillas.

En el yacimiento "El Teniente", las vetillas más tempranas sin halo de alteración han sido definidas como tardimagmáticas. Ojeda y otros (1980), consideran que estas vetillas están en equilibrio con la roca de caja y han inferido que ellas habrían sido formadas a partir de soluciones magmáticas en los últimos estadios de enfriamiento de los intrusivos.

En el presente estudio, se utiliza sólo un término descriptivo y no genético para la etapa de alteración y mineralización *tardimagmática*, denominándola etapa de alteración y mineralización temprana o etapa I.

En base a un análisis macroscópico y microscópico se distinguen 5 tipos de vetillas tempranas, las que aparecen esquematizadas en la Fig. 4

VETILLAS TEMPRANAS

Vetillas VA. Estas vetillas presentan bordes sinuosos a rectos bien definidos y un ancho comprendido entre 1 y 2 mm. Sus constituyentes principales son cuarzo y/o anhidrita. El cuarzo (0.09 - 0.6 mm) presenta textura de mosaico fina y formas anhedrales. La anhidrita (0.6 - 1.2 mm) anhedral se presenta asociada al cuarzo. Ocasionalmente, se observa la presencia de agregados de clorita y yeso rellenando intersticios. Los minerales opacos son escasos y si aparecen están diseminados. Ellos corresponden a calcopirita, molibdenita y bornita.

Vetilla VB. Estas vetillas presentan bordes bien definidos y rectos y un ancho varía entre 2 y 10 mm. Su constituyente principal es cuarzo aunque ocasionalmente aparece anhidrita. El cuarzo (0.2 - 0.9 mm) presenta formas anhedrales a subhedrales, textura de peineta en los bordes y de mosaico al centro.

La presencia de feldespatos potásicos es escasa. Yeso y agregados de clorita del tipo turingita y penninita se observan en los bordes y rellenando intersticios. La calcita aparece como reemplazo del feldespato potásico al igual que la sericita y rellenando intersticios. Es posible observar agregados de epidota y clinozoicita en trazas. Los sulfuros se presentan diseminados y corresponden a piritita, calcopirita, molibdenita y bornita.

Vetilla VC. Estas vetillas también presentan sus bordes rectos y bien definidos, corresponden a estructuras planares angostas de 2 - 5 mm. Sus constituyentes principales son cuarzo y/o anhidrita. El cuarzo (0.5 - 1.5 mm) presenta formas anhedrales a subhedrales y texturas tipo mosaico y/o peineta. La anhidrita (0.2 - 1.5 mm) se asocia al cuarzo, tiene formas anhedrales a subhedrales. Se pueden observar ocasionalmente agregados de clorita y epidota como también de rutilo y biotita. La clorita se ubica en cúmulos discontinuos en el centro y en el borde de las vetillas. Los sulfuros se disponen en bandas discontinuas al centro y son calcopirita, piritita y/o bornita.

Vetilla VD. Son vetillas con bordes nítidos y rectos. El constituyente principal es cuarzo y/o anhidrita. Su ancho varía entre 2 - 10 mm. El cuarzo

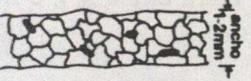
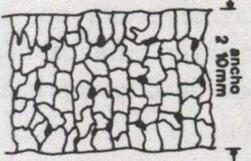
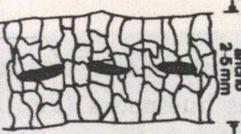
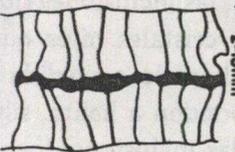
TEXTURA	NOMBRE	PARAGENESIS
	VETILLA VA	CUARZO Y/O ANHIDRITA CLORITA YESO CALCOPIRITA Y/O MOLIBDENITA Y/O BORNITA
	VETILLA VB	CUARZO Y/O ANHIDRITA CLORITA YESO FELDSPATO POTASICO PIRITA CALCOPIRITA MOLIBDENITA - BORNITA
	VETILLA VC	CUARZO Y/O ANHIDRITA CLORITA EPIDOTA CALCOPIRITA PIRITA Y/O BORNITA
	VETILLA VD	CUARZO ANHIDRITA CLORITA YESO CALCITA MUSCOVITA CALCOPIRITA - PIRITA
	VETILLA VE	CALCOPIRITA PIRITA CUARZO CLORITA

Fig. 4. Representación esquemática de las texturas y paragénesis de las vetillas de la etapa Temprana.
 Fig. 4. Schematic representation of texture and paragenesis of the early veinlets.

(0.45 - 0.9 mm) presenta formas anhedrales a subhedrales y crece a partir de los bordes de la vetilla con textura de peineta dejando una sutura central donde se dispone una banda más o menos regular de sulfuros. Asociados al cuarzo, se encuentra anhidrita (0.45 - 0.9 mm) con formas anhedrales a subhedrales. Ocasionalmente se observan agregados de clorita, yeso, calcita y muscovita relleno intersticios. Los sulfuros se disponen preferentemente en el centro y corresponden a calcopirita y piritita formando cúmulos alineados.

Vetilla VE. Estas vetillas están constituidas principalmente por calcopirita y/o piritas masivas; algunas son de molibdenita. Los minerales de ganga son escasos y son principalmente cuarzo y clorita. Comúnmente estas vetillas presentan bordes rectos y nítidos y su ancho varía entre 1 y 3 mm.

INCLUSIONES FLUIDAS

En las vetillas tempranas contenidas en andesitas del sector noroeste del yacimiento "El Teniente" las inclusiones fluidas ocurren principalmente en cuarzo y subordinadamente en anhidrita. Ellas son de origen primario y secundario y se tratan separadamente a continuación.

INCLUSIONES FLUIDAS DE ORIGEN PRIMARIO

Estas inclusiones ocurren en forma aislada, con distribución errática y paralelas a las zonas de crecimiento de los cristales huéspedes (Fig. 5a).

Las formas que presentan son variables y su tamaño está comprendido entre 2 - 34 μm . Ellas se caracterizan por presentar 2 fases (líquido - vapor) o 3 fases (líquido - vapor - sólido), (Fig. 5a y 6c). En las inclusiones fluidas de 3 fases, los sólidos comúnmente corresponden a cristales hijos que se han originado a partir de la solución atrapada cristalizando a medida que descienden la presión y la temperatura. Ellos corresponden a halita, silvita, anhidrita, calcopirita, hematita, piritita. En algunas de las inclusiones los sólidos no corresponden a cristales hijos, sino que son sólidos atrapados que ya existían en el momento de formarse la inclusión fluida (Fig. 5e). Están

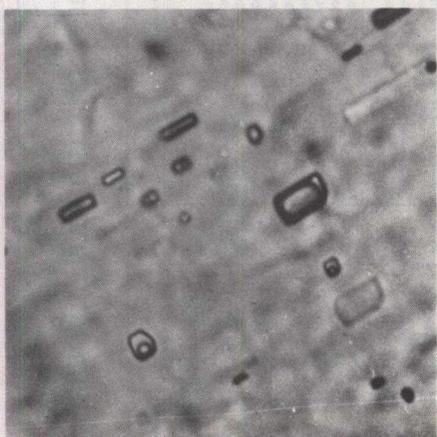
- Fig. 5. a) Inclusión fluida de origen primario con bordes irregulares y 2 fases (líquido + vapor).
b) Inclusión fluida de origen secundario con 2 fases (líquido + vapor). Estas inclusiones se encuentran alineadas en planos de fracturas que atraviesan el cristal de cuarzo (importante hacer notar lo pequeñas que son).
c) Inclusiones fluidas en anhidrita (probablemente secundarias, ebullición).
d) Esta asociación de inclusiones fluidas sugiere ebullición (Se verificó además con su comportamiento termométrico). Se observan 2 tipos de inclusiones fluidas, unas ricas en vapor y otras ricas en líquido.
e) Sólidos que corresponden a minerales opacos que han sido atrapados en el momento de formarse la inclusión fluida.
f) Inclusión fluida con 3 fases (líquido + vapor + hematita).
- Fig. 5. a) Two phase (liquid + vapour) primary fluid inclusion with irregular selvages.
b) Two phase (liquid + vapour) secondary fluid inclusion along fracture planes in quartz.
c) Fluid inclusions in anhydrite.
d) Coexistence of high - vapour and high - liquid fluid inclusions suggesting boiling.
e) Opaque mineral trapped in a fluid inclusion
f) Three phase (liquid + vapour + hematite) fluid inclusion.



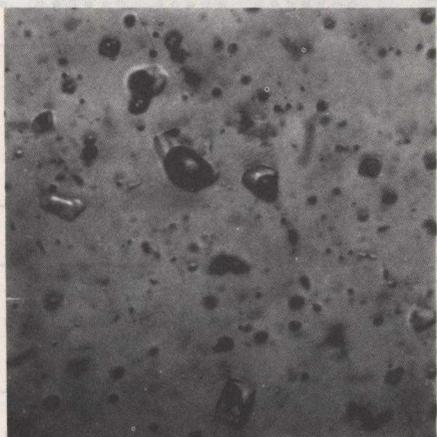
a.



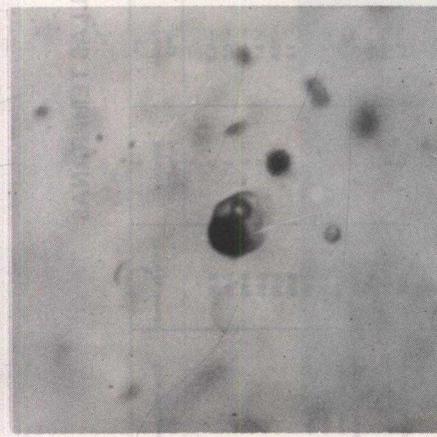
b.



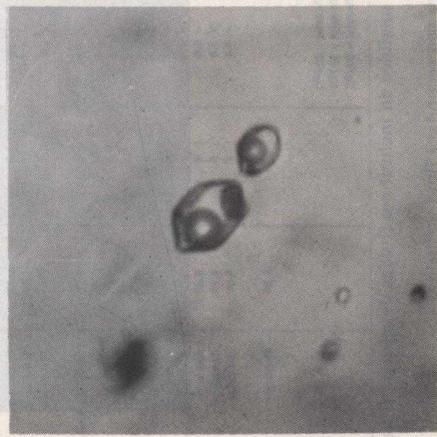
c.



d.



e.



f.

TABLA 1
VALORES OBTENIDOS EN INCLUSIONES FLUIDAS DE LAS VETILLAS TEMPRANAS

Paes	T ₀ Homogenización (°C)	T ₀ Fusión (°C)	Salinidad (% NaCl)	Grado de llenado	Observaciones
Muestra 1762 (VC)					
L + V	339	- 3.1	5	0.70	
L + V	337	- 3.7	6	0.90	
L + V	338	- 3.8	6	0.90	
L + V	362	- 4.0	6	0.90	
L + V + (E7)	334	- 3.5	6	0.70	
L + V	347	- 5.3	8	0.70	
L + V	360	- 1.5	3	0.90	
L + V	337	- 1.0	2	0.70	
L + V	346	- 1.1	2	0.90	
L + V	358	- 1.2	2	0.70	
Muestra 233 (VB)					
L + V	374	- 1.1	2	0.90	
L + V + (E7)	375	- 0.4	1	0.70	
L + V	162	- 0.3	1	0.90	
L + V	334	- 0.2	1	0.95	
L + V	376	- 1.3	2	0.90	
L + V	404	- 1.0	2	0.90	
L + V	400	- 0.1	1	0.70	
L + V	374	-	-	0.90	
L + V	375	-	-	0.90	
L + V	404	-	-	0.90	
L + V	487	-	-	0.70	
Muestra 254 (VD)					
L + V	-	- 0.4	1	0.90	
L + V	344	- 0.8	1	0.90	
L + V	344	- 1.8	3	0.90	
L + V + (E7)	355	- 0.8	1	0.70	
L + V	398	- 1.1	2	0.70	
L + V	344	- 0.0	0	0.90	
Muestra 409 (VA)					
L + V	322	- 10.8	15	0.90	
L + V	373	- 7.3	11	0.70	
L + V	364	- 8.9	13	0.70	
L + V	371	- 5.2	8	0.70	
L + V	382	- 4.8	7	0.70	
Muestra 1751 (VA)					
L + V	408	- 3.0	5	0.90	
L + V + (E7)	398	- 3.2	5	0.70	
L + V	398	- 3.2	5	0.70	
L + V	-	- 2.9	5	0.90	
L + V	407	- 3.3	5	0.90	
L + V	407	- 3.2	5	0.70	
L + V	404	- 3.0	5	0.90	
Muestra 1751 (VA)					
L + V + Heleis					
TH Heleis - 246°C					
TH total - 262°C					
Muestra 1751 (VA)					
L + V + Heleis					
TH Heleis - 286°C					
TH total - 297°C					
Muestra 1023 (VA)					
L + V	215	- 5.5	9	0.90	
L + V	347	- 4.2	7	0.70	
L + V	-	- 2.5	4	0.70	
L + V	-	- 6.0	8	0.90	
L + V	-	- 3.5	6	0.70	
L + V + Heleis	-	- 4.4	7	0.90	
Muestra 233 (VB)					
L + V + Heleis					
TH Heleis - 246°C					
TH total - 262°C					
Muestra 254 (VA)					
L + V	340	- 1.8	3	0.70	
L + V	385	- 2.1	4	0.70	
L + V	385	- 2.4	4	0.70	
L + V	384	- 2.1	4	0.50	
L + V	334	- 1.5	3	0.90	
L + V	397	- 0.8	1	0.70	
L + V	382	- 3.2	6	0.70	
L + V	397	- 3.9	6	0.90	
L + V	375	- 4.3	7	0.90	
L + V	359	- 3.9	6	0.90	
Muestra 254 (VA)					
L + V	374	- 3.2	5	0.70	
L + V + (E7)	370	- 3.1	5	0.90	
L + V	382	- 2.8	5	0.90	
Muestra 1023 (VA)					
L + V	215	- 5.5	9	0.90	
L + V	347	- 4.2	7	0.70	
L + V	-	- 2.5	4	0.70	
L + V	-	- 6.0	8	0.90	
L + V	-	- 3.5	6	0.70	
L + V + Heleis	-	- 4.4	7	0.90	
Muestra 233 (VB)					
L + V + Heleis					
TH Heleis - 246°C					
TH total - 262°C					

Tabla 1. Valores de temperaturas de homogenización, de temperaturas de fusión, de salinidad y grado de llenado medidos en inclusiones fluidas de origen primario y secundario.

Table 1. Homogenization temperatures, melting temperatures, salinity and degree of filling measured in primary and secondary fluid inclusions.



a.



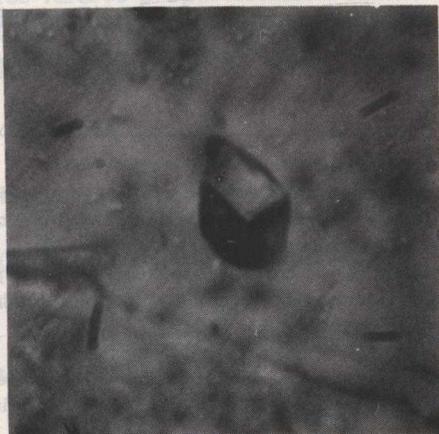
b.



c.



d.



e.

Fig. 6. a) Inclusion bodies
 b) Inclusion bodies
 c) Inclusion bodies
 d) Inclusion bodies
 e) Inclusion bodies

en equilibrio con el fluido atrapado, pero no han precipitado a partir de él. Estos sólidos comúnmente corresponden a opacos.

INCLUSIONES FLUIDAS DE ORIGEN SECUNDARIO

Las inclusiones fluidas de origen secundario, se distinguen por ocurrir en grupos planares a través de fracturas. Presentan formas irregulares, son de tamaño comprendido entre 2 - 10 μm y comúnmente son de menor tamaño que las inclusiones fluidas primarias (Figs. 5b y 5c). Excepcionalmente se pueden encontrar tamaños aproximados a 26 μm . Estas inclusiones normalmente poseen 2 fases, (líquido y vapor) y en ellas el porcentaje de la fase vapor es siempre menor que el de la fase líquida. Excepcionalmente se pueden encontrar inclusiones fluidas secundarias con tres fases. En ellas los cristales hijos por su tamaño pequeño, son difíciles de reconocer.

IDENTIFICACION DE LOS CRISTALES HIJOS

Los cristales hijos fueron identificados bajo el microscopio con luz transmitida, por sus características ópticas (color, birrefringencia, pleocroismo etc.).

Entre los cristales hijos más comunes en las inclusiones fluidas de las vetillas tempranas se encuentra la halita (NaCl). Usualmente presenta forma cúbica aunque en algunos casos es redondeada. Es isotropa e incolora (Fig. 6c).

La silvita (KCl), también es isotropa e incolora pero usualmente redondeada. Se diferencia de la halita por tener un índice de refracción más bajo y ser más soluble.

Si se tuviera el caso de una inclusión fluida con dos cristales hijos con las mismas características y uno de ellos es identificado como halita el

-
- Fig. 6. a) Inclusión fluida con 3 fases (líquido + vapor + calcopirita).
b) Inclusión fluida con forma de cristal negativo y 3 fases (líquido + vapor + sal).
c) Inclusión fluida multifásica con forma de cristal negativo (líquido + vapor + halita + opaco).
d) Inclusión fluida con 3 fases (líquido + vapor + anhidrita).
e) En esta inclusión fluida nótese como la fase sólida (halita) supera a la fase líquida y a la fase vapor. Esto indica que la salinidad de la inclusión fluida es mucho mayor que un 23% de NaCl en peso equivalente.
- Fig. 6. a) Three phase (liquid + vapour + chalcopirite) fluid inclusion.
b) Three phase (liquid + vapour + salt) fluid inclusion with negative crystal shape.
c) Multiphase (liquid + vapour + halite + opaque) fluid inclusion in a negative crystal.
d) Three phase (liquid + vapour + anhydrite) fluid inclusion
e) In this fluid inclusion the solid phase is more abundant than the liquid and vapour phases.

otro será identificado como silvita. Es muy raro que ocurra una segunda nucleación de un mismo mineral. La silvita normalmente es escasa.

La anhidrita (Fig. 6d) se presenta como prisma rectangulares, elongados, con extinción paralela y moderada birrefringencia.

Los minerales opacos son difíciles de identificar. La hematita (Fig. 5f), se reconoce por su color rojo bajo el microscopio de luz transmitida y a veces su hábito hexagonal.

La calcopirita (Fig. 6a) presenta formas tetrahédricas y la pirita es cúbica.

Es importante destacar que algunas inclusiones contienen opacos anhedrales en que su volumen supera la fase líquida y no existe fase vapor. Lo más probable es que se trate de sólidos atrapados (Fig. 5e).

No fue posible identificar con precisión algunas fases opacas muy pequeñas.

TEMPERATURAS DE HOMOGENIZACION Y DE FUSION

Aquellas inclusiones que eran más adecuadas ópticamente fueron examinadas en la platina calentadora - congeladora y en ella se determinaron las temperaturas de homogenización y de fusión.

Se realizaron mediciones en 80 inclusiones fluidas y sus resultados se presentan en la Tabla 1.

No se tomaron en cuenta las temperaturas de fusión en inclusiones con fases múltiples, debido a que los cambios de fases en los fluidos muy salinos son generalmente complejos. La fusión de estas inclusiones es útil solo para distinguir los cristales hijos de halita de los de silvita.

Se excluyeron también las inclusiones fluidas que presentaban hielo metaestable, porque estos valores proporcionaban salinidades erróneas. Este tipo de inclusiones fluidas contenía burbujas de vapor muy grandes y debido a ello es muy difícil congelarlas.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

En el sector Nor-Oeste del yacimiento "El Teniente" se reconocieron 5 tipos de vetillas tempranas en andesitas, caracterizadas por la ausencia de halo de alteración (Fig. 4), comparables a las obtenidas por Zuñiga (1982) en el mismo sector.

En estas vetillas se han distinguido inclusiones fluidas primarias contenidas en cuarzo y anhidrita las que corresponden a inclusiones fluidas multifásicas (L + V + S), e inclusiones fluidas bifásicas (L + V).

Se han reconocido además inclusiones fluidas secundarias bifásicas (L + V) en cuarzo.

Las inclusiones fluidas multifásicas que contienen halita, dieron valores de salinidad comprendidos entre 34 - 37% de NaCl y en las inclusiones fluidas bifásicas se obtuvieron valores de salinidad variable entre 1 - 15% de NaCl. La salinidad de estas últimas (Fig. 3) indica un decrecimiento de ellas hacia la parte más superficial del yacimiento.

En las inclusiones fluidas multifásicas con halita, la halita homogeniza en el rango 245 - 296°C y la burbuja de vapor posteriormente desaparece entre 362 - 397°C, lo que sugiere que las soluciones estaban subsaturadas durante la formación de las vetillas de la etapa de alteración y mineralización temprana.

En cuanto a las temperaturas de homogenización medidas en las inclusiones fluidas, éstas están en su mayoría comprendidas en el rango 330 - 410°C. Se puede indicar además que las vetillas más tempranas, sin mineralización (VA) presentan inclusiones fluidas con temperaturas de homogenización mayores que las vetillas tempranas que se supone son más tardías VB y VC (Fig. 7).

La coexistencia de inclusiones fluidas bifásicas ricas en vapor con otras ricas en líquido, en las vetillas tempranas del sector estudiado, son indicativas de ebullición. Ambos tipos de inclusiones fluidas presentaron temperaturas de homogenización cercanas a los 350°C y salinidad del orden de 3 - 5% de NaCl. El valor de las temperaturas medidas en este caso es bajo e implica un valor bajo de presión para la ebullición de un sistema salino (160 bar). A partir de estos datos se puede estimar que el fluido habría comenzado a hervir cuando estuvo a una profundidad de 1.6 km bajo el nivel freático (Shepherd, 1985).

Cabe hacer presente que los valores de temperatura para la etapa temprana del yacimiento "El Teniente" obtenidas a partir del estudio de inclusiones fluidas en vetillas contenidas en andesitas son más bajas que las estimadas por otros autores y ello se debería al uso de métodos, cada vez más especializados que han permitido acotar con mayor precisión dicho rangos.

Faunes (1981), basado en evidencias texturales y asociaciones mineralógicas de sulfuros definió un rango de temperaturas menor que 557°C para la depositación de sulfuros de cobre en la etapa tardimagmática. Matsuhisa (1982), mediante el estudio del fraccionamiento isotópico del azufre es la anhidrita y la calcopirita calculó una temperatura de 545 ± 40 °C para la misma etapa. Kusakabe y otros (1984) realizaron estudios de isótopos de S y O en cuarzo, anhidrita y minerales sulfurados, estimando que la temperatura de mineralización para la etapa tardimagmática es de

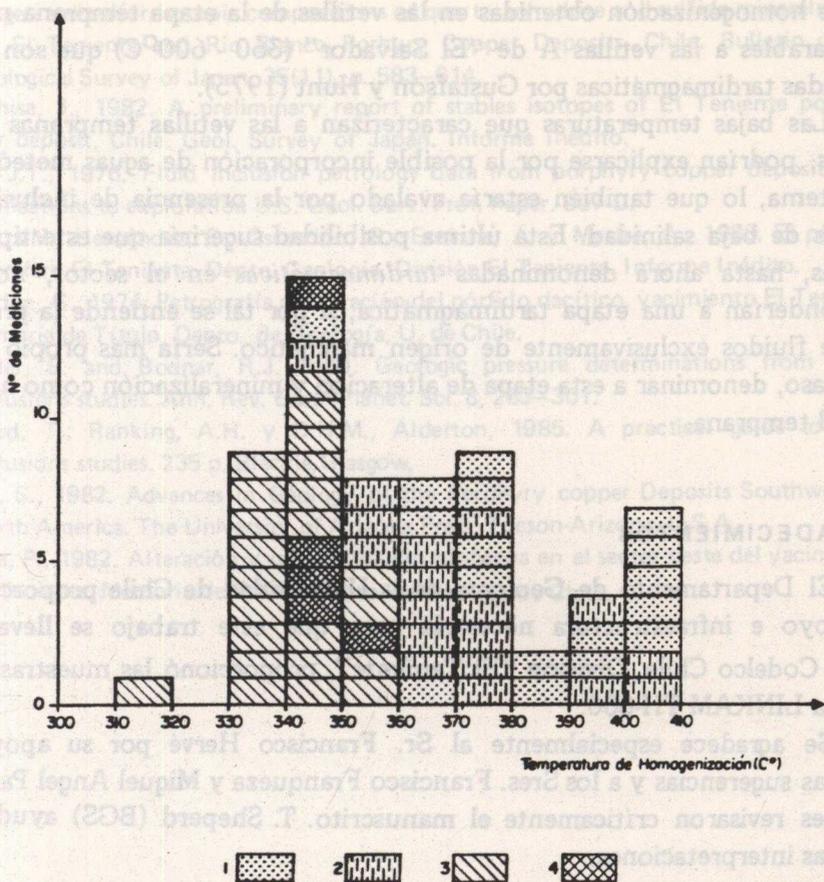


Fig. 7. Histograma de las temperaturas de homogenización al estado líquido de inclusiones fluidas primarias en cuarzo de vetillas tempranas (62 mediciones). 1. Vetillas VA; 2. Vetilla VB; 3. Vetillas VC; 4. Vetillas VD.

Fig. 7. Homogenization temperatures to a liquid phase of primary fluid inclusions in early veinlets (62 measurements). 1 VA veinlets; 2. VB veinlets; 3. VC veinlets; 4. VD veinlets.

460°C. En el presente estudio se registró un rango comprendido entre 330° y 410° C.

De la comparación con otros yacimientos del tipo pórfidos cupríferos tales como El Salvador, Los Pelambres y Butte, Montana, se infiere que la etapa temprana del yacimiento El Teniente se habría generado a temperaturas relativamente más bajas. Los valores de salinidad obtenidos en el yacimientos El Teniente son similares a las salinidades medidas en inclusiones fluidas del yacimiento El Salvador (Gustafson y Hunt, 1975). En este último yacimiento se determinaron salinidades del orden de 35 - 40% de NaCl en inclusiones fluidas conteniendo halita y silvita y valores bajos de salinidad en las inclusiones fluidas bifásicas. Sin embargo, las temperatu-

ras de homogenización obtenidas en las vetillas de la etapa temprana no son comparables a las vetillas A de "El Salvador" (360 - 600°C) que son consideradas tardimagmáticas por Gustafson y Hunt (1975).

Las bajas temperaturas que caracterizan a las vetillas tempranas estudiadas, podrían explicarse por la posible incorporación de aguas meteóricas al sistema, lo que también estaría avalado por la presencia de inclusiones fluidas de baja salinidad. Esta última posibilidad sugeriría que este tipo de vetillas, hasta ahora denominadas *tardimagmáticas* en el sector, no corresponderían a una etapa tardimagmática, si por tal se entiende la presencia de fluidos exclusivamente de origen magmático. Sería más propio para este caso, denominar a esta etapa de alteración y mineralización como hidrotermal temprana.

AGRADECIMIENTOS

El Departamento de Geología de la Universidad de Chile proporcionó el apoyo e infraestructura necesaria para que este trabajo se llevara a cabo. Codelco Chile, División "El Teniente", proporcionó las muestras y la platina LINKAM TH-600.

Se agradece especialmente al Sr. Francisco Hervé por su apoyo y valiosas sugerencias y a los Sres. Francisco Franqueza y Miguel Angel Parada, quienes revisaron críticamente el manuscrito. T. Sheperd (BGS) ayudó en algunas interpretaciones.

REFERENCIAS

- Cuadra, P., 1986. Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. *Revista de Geología de Chile*, 27, 3-26.
- Charrier, R. y Munizaga, F., 1979. Edades K-Ar de volcanitas cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal, Chile (34° 15' lat. Sur). *Revista Geológica de Chile*, 7, 41- 51 Santiago.
- Faunes, A., 1981. Caracterización de la mineralogía metálica de alteración en un sector del stock tonalítico del yacimiento El Teniente. Memoria de Título, Depto. de Geología, U. de Chile.
- Gustafson, L.B.; Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geology*, 70, 5, 857-912.
- González, A., 1982. Estudio de la alteración tardimagmática en el sector E del yacimiento El Teniente. Informe Inédito. Taller de Título I, GL 697. Depto. de Geología, Universidad de Chile.
- Howell y Molloy, 1960. Geology of the Braden Ore Body. Chile South America. *Econ. Geol.*, 55, 863-905.
- Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central provincia de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Inst. Invest. Geol. (Chile). Bol. N° 8, 95 p.
- Kusakabe, M.; Makagawa, S.; Hori, M.; Matsuhisa, Y.; Ojeda, J.M.; y Serrano, L.. 1984.

- Oxygen and sulfur isotopic compositions of quartz, anhydrite and sulfide minerals from the El Teniente and Rio Blanco Porphyry Copper Deposits, Chile. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 35(11), p. 583-614.
- Matsuhisa, J., 1982. A preliminary report of stable isotopes of El Teniente porphyry copper deposit, Chile. Geol. Survey of Japan. Informe Inédito.
- Nash, J.T., 1976. Fluid inclusion petrology data from porphyry copper deposits and applications to exploration U.S. Geol. Surv. Prof. Paper. 907-D.
- Ojeda, J.M.; Hernández, E.; Ossandón, G.; Enrione, A. y Mestre, A., 1980. El pórfido cuprífero El Teniente. Depto. Geología, División El Teniente. Informe Inédito.
- Ossandón, G., 1974. Petrografía y alteración del pórfido dacítico, yacimiento El Teniente Memoria de Título, Depto. de Geología, U. de Chile.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J. 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies. Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 8, 263-301.
- Sheperd, T.; Ranking, A.H. y D.H.M., Alderton, 1985. A practical guide to fluid inclusions studies. 235 p. Blackie, Glasgow.
- Titley, S., 1982. Advances in Geology of the Porphyry copper Deposits Southwestern North-America. The University of Arizona Press. Tucson-Arizona, U.S.A.
- Zuñiga, P., 1982. Alteración y mineralización hipógena en el sector oeste del yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Depto. de Geol. U. de Chile.

RESUMEN

En el sector costero comprendido entre Algarrobo y Rocas de Santo Domingo afloran rocas graníticas, diagenésicas y ortocambolitas. Las rocas graníticas son de edad paleozoica superior y comprenden principalmente tonalitas con inclusiones ígneas máficas y granitoides más félicas con frecuentes megacristales de microclina. Todas ellas presentan una moderada foliación que es el resultado de una deformación sinclinal; en cambio la gneissosidad que caracteriza a las rocas metamórficas es producto de una deformación posterior.

Las tonalitas con inclusiones máficas son interpretadas como el resultado de una hibridación incompleta entre magmas básicos, representados por las inclusiones, y magmas silíceos relacionados con los granitoides más félicos. En estos últimos, los megacristales de microclina se desarrollaron a través de un reemplazo tardíamente diagenético de oligoclasi preexistente.

ABSTRACT

Granitoids, diagenésics and orthocambolites crop out in the coast between Algarrobo and Rocas de Santo Domingo. The granitic rocks are of Late Paleozoic age and correspond either to tonalites with mafic igneous inclusions or to more felsic granitoids with frequent microcline megacrysts. All of them show a weak foliation, resulted from a synclinal deformation, whereas gneissosity in the metamorphic rocks is related to a later deformation.

The tonalites with mafic inclusions are interpreted as the result of an incomplete hybridization among basic magmas, represented by the inclusions, and silicic magmas related to the more felsic granitoids. The microcline megacrysts in the later are viewed as tardy diagenetic replacement of preexistent oligoclase.

AGRADECIMIENTOS

El Departamento de Geología de la Universidad de Chile, a través de su apoyo a la infraestructura necesaria para que este trabajo se llevara a cabo. Codeco Chile, División "El Teniente", proporcionó las muestras y la platina LINKAM TH-600.

Se agradece especialmente al Sr. Francisco Hervé por su apoyo y valiosas sugerencias y a los Sres. Francisco Franqueza y Miguel Ángel Parada, quienes revisaron críticamente el manuscrito. T. Shepard (BCS) ayudó en algunas interpretaciones.

REFERENCIAS

Cuadra, P., 1986: Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. *Revista de Geología de Chile*, 27, 3-26.

Charrier, B. y Munizaga, F., 1979. Edades K-Ar de volcánitas cenozoicas del sector curruñerano del río Cachapoal, Chile (34° 15' lat. Sur). *Revista Geológica de Chile*, 7, 41- 51. Santiago.

Faunes, A., 1981. Caracterización de la mineralogía metálica de alteración en un sector de stock tonalítico del yacimiento El Teniente. Memoria de Título, Depto. de Geología U. de Chile.

Gustafson, L.B.; Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geology*, 70, 5, 857-912.

González, A., 1982. Estudio de la alteración tardíamagnética en el sector E del yacimiento El Teniente, informe inédito. Taller de Título I, CL 887. Depto. de Geología, Universidad de Chile.

Howell y Mofley, 1960. Geology of the Braden Ore Body. *Chile South America. Econ. Geol.* 55, 883-905.

Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central provincia de Santiago, O'Higgins, Coquimbo y Curicó. *Inst. Invest. Geol. (Chile). Bol. N° 8*, 95 p.

Kusakabe, M.; Makiyama, S.; Hori, M.; Matsuhisa, Y.; Ojeda, J.M. y Sarrano, L., 1984.