

GEOCRONOLOGIA K-Ar DEL YACIMIENTO EL TENIENTE Y AREAS ADYACENTES

PATRICIO CUADRA C.

CODELCO-CHILE, División El Teniente,
Huérfanos 1270, Casilla 150-D
Santiago, Chile.

RESUMEN

El yacimiento El Teniente se formó en cuatro etapas principales de alteración y mineralización hipógenas, relacionadas al emplazamiento de intrusivos de composición intermedia y de brechas hidrotermales, en rocas volcánicas andesíticas de la Formación Farellones (Mioceno). Para consolidar el modelo geológico de la formación del yacimiento, se inició en 1983 un proyecto de dataciones radiométricas, que incluyó no sólo rocas de éste, sino también del área circundante.

Los resultados obtenidos, hasta la fecha, indican que la Diorita Sewell es el intrusivo más antiguo del yacimiento, desarrollando una alteración potásica propia, cuya edad es de aproximadamente 7 Ma. Esta última coincide con la de otros intrusivos dioríticos del área, lo que corresponde con la idea de que forma parte de un grupo de rocas de distribución regional.

El evento principal de mineralización, relacionado al Pórfido Teniente, tiene una edad de 4,7-4,6 Ma, en tanto que la Brecha Marginal y la Brecha Braden se formaron inmediatamente después. El proceso de mineralización cesó antes de los 3,8 Ma, de acuerdo con la edad del dique de lamprófido, estructura claramente postmineral.

En el resto del área estudiada, se determinó la edad de unidades más jóvenes que la Formación Farellones, definiéndose la de un complejo volcánico-intrusivo denominado Unidad Cerro Montura (8,2-9,0 Ma) y la de la Formación Colón-Coya, donde se dató un horizonte de ceniza, intercalada en depósitos laháricos, cuya edad, complementada con la de trabajos anteriores, la sitúan en el Plioceno-Pleistoceno. Además, se determinó la edad de dos zonas de alteración cercanas a El Teniente, siendo la de Olla Blanca más antigua (9,0 Ma) y la de La Huifa (5,0 Ma) contemporánea con aquél.

ABSTRACT

The El Teniente ore deposit was formed in four hypogene alteration-mineralization main stages, related with the emplacement of intermediate composition intrusives and hydrothermal breccias in andesitic volcanic rocks belonging to the Farellones Formation (Miocene). To consolidate the ore body geologic model, a radiometric dating project was started in 1983, including not only rocks from the latter, but also from the adjacent area.

The present results indicate that Sewell Diorite is the oldest intrusive of the orebody, developing its own potassic alteration, whose age is approximately 7 My. The latter is in agreement with the rest of the dioritic intrusives in the area, being in accordance with the idea that it is part of a group of regional distribution.

The main mineralization event, related with the Teniente Porphyry, has an age of 4.7-4.6 My, while Marginal Breccia and Braden Breccia were formed a short time later. The mineralization process ceased before 3.8 My, as pointed out by the age of the lamprophyre dike, a clearly postmineral structure.

In the adjacent area, the ages of rocks younger than Farellones Formation were determined, such as a volcanic-intrusive complex called Cerro Montura Unit (8.2-9.0 My) and the Colón-Coya Formation, where a tuff intercalated in laharc deposits was dated, giving an age that, in completion with preceding data, places this formation in the Pliocene-Pleistocene. Moreover, the ages of two alteration zones were determined, being Olla Blanca (9.0 My) older than El Teniente, and La Huifa (5.0 My) closely similar to it in age.

INTRODUCCION

En 1983, el Departamento de Geología de la División El Teniente inició un proyecto de dataciones radiométricas con el objeto de consolidar el modelo geológico de formación del yacimiento.

El proyecto contempla la determinación de edad de los diferentes eventos intrusivos, volcánicos y/o alteración, que ocurrieron en el área, no sólo aquellos que dieron lugar al yacimiento El Teniente, sino también los que caracterizan el área circundante a éste.

Anteriormente se contaba sólo con información geocronológica K-Ar de la etapa temprana de alteración (Quirt *et al.*, 1971; Clark *et al.*, 1983), con edades que van desde $4,44 \pm 0,17$ Ma hasta $4,77 \pm 0,18$ Ma, para muestras del Pórfido Teniente (biotita) y de andesita biotitizada (roca total), en la zona de contacto con dicho intrusivo.

En este trabajo se presentan, en forma prelimi-

nar, los resultados obtenidos por el proyecto hasta la fecha (20 datos). Todas las edades que se informan han sido determinadas por el método K-Ar, en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Nacional de Geología y Minería. Además, se incluye una edad determinada por Francisco Munizaga en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de California.

El soporte geológico básico está constituido por la información recopilada, en forma continuada, por los geólogos que trabajan o han trabajado en El Teniente, y que ha permitido desarrollar el actual modelo geológico del yacimiento. A este respecto, se ha estimado necesario incluir una descripción geológica más o menos detallada de aquél, la que resume gran parte del conocimiento actual sobre el tema, al mismo tiempo que proporciona un marco apropiado para el análisis geocronológico.

GEOLOGIA DEL YACIMIENTO EL TENIENTE

El yacimiento de cobre y molibdeno de El Teniente es del tipo pórfido cuprífero, en el cual la mineralización está alojada en un enrejado denso de vetillas ("stockwork") y en forma diseminada en la roca. Está asociado al emplazamiento de dos cuerpos intrusivos, denominados Pórfido Teniente y Diorita Sewell, respectivamente, y de una compleja megaestructura brechosa, conocida como Chimenea Braden, en rocas volcánicas, andesíticas, asignadas a la Formación Farellones (Fig. 1).

Los rasgos geológicos principales del yacimiento han sido descritos en trabajos anteriores, especialmente por Howell y Molloy (1960) y Camus (1975). Sin embargo, la información geológica recopilada posteriormente, a través de nuevos sondeos y labores, a medida que la exploración y el desarrollo minero han ido avanzando en profundidad, ha permitido ampliar este conocimiento y elaborar un esquema evolutivo, con mayor detalle. Este último difiere de las ideas presentadas por los autores citados, fundamentalmente en lo que se refiere a los procesos de alteración-mineralización involucrados.

La presente descripción geológica está basada, fundamentalmente, en el trabajo de Ojeda *et al.* (1980), complementado con información de trabajos posteriores y observaciones directas del autor. En ésta se utilizan, por primera vez, nombres propios para todas las unidades mayores presentes en

el yacimiento y que cuentan con un reconocimiento detallado.

Dado que el pórfido de composición dacítica, ubicado en la parte norte del yacimiento, es el principal responsable de la mineralización de éste, ha sido denominado Pórfido Teniente. El intrusivo diorítico (diorita cuarcífera, según Howell y Molloy, 1960; tonalita, según Faúnez, 1981) de la parte sur y central, se denomina Diorita Sewell, en atención a que sus afloramientos se ubican en un área cercana a la localidad de ese nombre. En cuanto a su definición petrográfica, este intrusivo forma parte de un grupo de distribución regional, de composición diorítica predominante, presentando un mayor contenido de cuarzo dentro del yacimiento, probablemente producto de la alteración que lo afecta. Por esta razón y por el hecho de que la denominación de diorita es de uso generalizado en la mina, se ha preferido este término.

En el caso de la chimenea de brecha, localizada en la parte central del yacimiento, se ha conservado la denominación original de Howell y Molloy (1960) para el total de la estructura, la cual, entonces, recibe el nombre de Chimenea Braden ("Braden Pipe"), en tanto, que para las unidades litológicas mayores dentro de ésta, se han utilizado los términos Brecha Marginal, de uso frecuente en la mina, y Brecha Braden, este último más amplio y de formulación más correcta que el de Formación Braden,

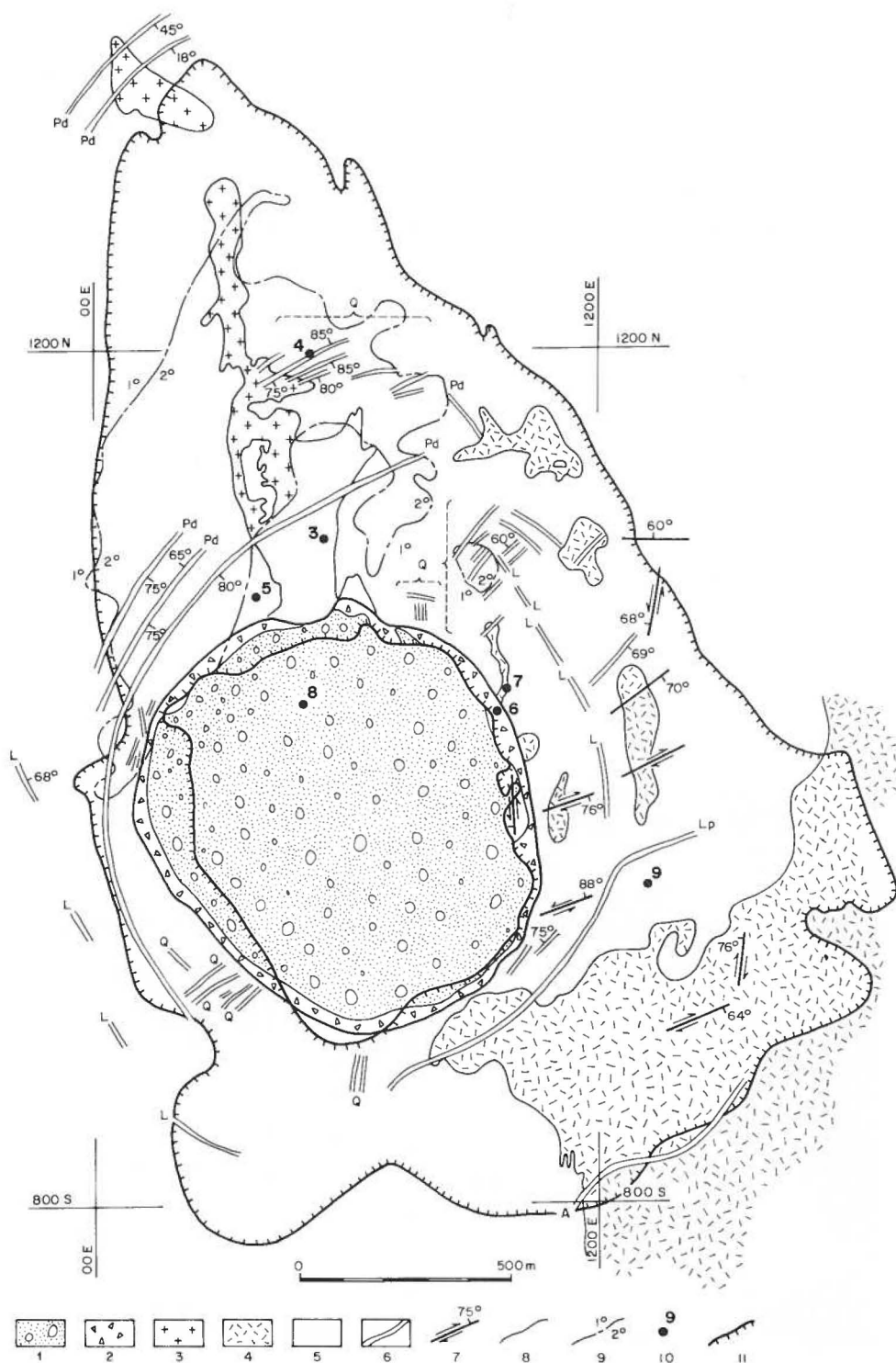


FIG. 1. Plano geológico del yacimiento El Teniente (basado en Ojeda *et al.*, 1980), en el nivel Teniente 5 (2.284 m s.n.m.), indicando la ubicación de las muestras datadas, obtenidas en labores de la mina. 1. Brecha Braden; 2. Brecha Marginal; 3. Pórfido Teniente; Diorita Sewell; 5. Andesitas Formación Farellones; 6. Diques y Vetas (Pd: Pebble dikes; L: Latita; Lp: Lamprófido; A: Andesita; Q: Vetas de cuarzo); 7. Falla indicando manteo y desplazamiento; 8. Contacto geológico; 9. Contacto supérgeno/hipógeno; 10. Muestra datación (Tabla 2); 11. Límite 0,5% de cobre.

acuñado por dichos autores para designar solamente la porción más clásica de la Chimenea Braden.

LITOLOGIA

Cerca del 80% de la mineralización de cobre y molibdeno está contenida en las rocas volcánicas de la Formación Farellones, de edad miocena, la que, en el área del yacimiento, fue subdividida por Howell y Molloy (1960) en tres miembros separados entre sí por discordancias angulares: Miembro Inferior, consistente en coladas andesíticas macizas; Miembro Medio, con coladas andesíticas epidotizadas e intercalaciones sedimentarias lacustres rojizas; y Miembro Superior, con coladas andesíticas y basálticas, intercaladas con aglomerados y piroclastitas. La mineralización se aloja, principalmente, en andesitas del Miembro Inferior, las que, en el yacimiento, han experimentado transformaciones texturales y composicionales, pudiéndose reconocer sus características originales sólo en las zonas marginales. La textura porfídica primaria ha sido reemplazada por texturas granoblásticas y

pórfidoblásticas, con una alteración biotítica que aumenta hacia los cuerpos intrusivos (Foto 1), lo que confiere a la roca un aspecto macizo y una coloración gris oscura.

Los intrusivos corresponden a diorita, pórfido dacítico, pórfido latítico y a diques de andesita y lamprófido. Además, en la parte central del yacimiento, se emplaza una compleja megaestructura denominada Chimenea Braden, cuyas características se discutirán más adelante.

La Diorita Sewell está asociada a parte importante de la mineralización e integra un grupo de cuerpos intrusivos, alineados en dirección norte-sur, emplazados en rocas de la Formación Farellones. Corresponde a un stock situado en la parte sur y a apófisis de menor tamaño, distribuidos en la parte central y norte del yacimiento. El stock tiene forma irregular y su extensión máxima, en superficie, es de 200 m, aumentando progresivamente en profundidad. Tiene contactos transicionales y/o brechosos y presenta una costra externa de textura porfídica, en la que se desarrolla una alteración potásica penetrativa, constituida por fenocristales de plagio-

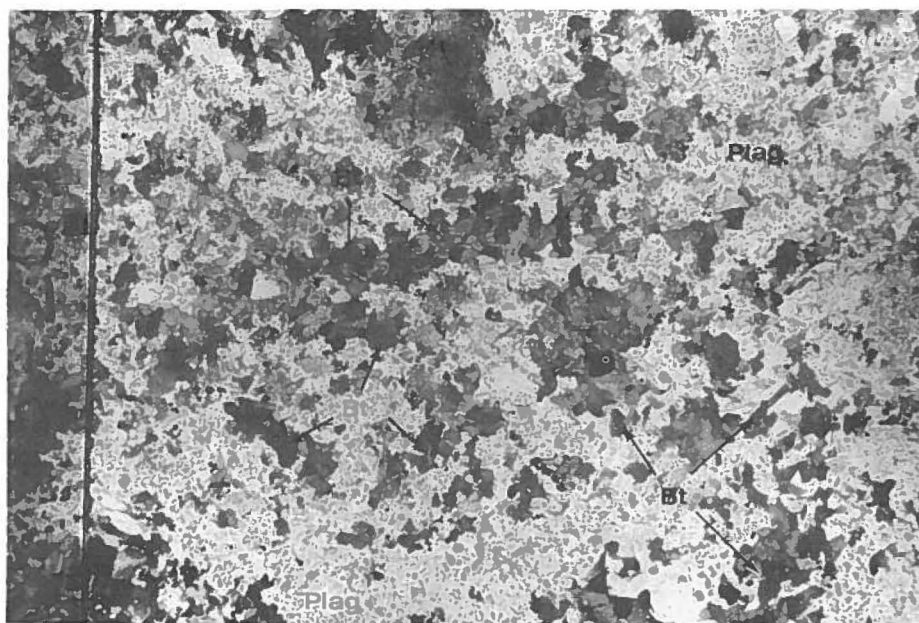


Foto 1. Andesita biotitizada (muestra T5-109). Roca de textura porfídoblástica, constituida por fenocristales de plagioclasa, remanentes en una masa fundamental de biotita, plagioclasa, minerales opacos (principalmente calcopirita), anhidrita y algo de cuarzo. En la fotografía se muestra la abundancia relativa de la biotita de origen secundario, producto de la alteración potásica que caracteriza a este tipo de roca en el yacimiento (Nícoles paralelos; campo 2,3 x 3,5 cm.) Edad obtenida en biotita: $4,7 \pm 0,2$ Ma.



Foto 2. Diorita Sewell (muestra DDH-1091A - 2842'). Textura hipidiomórfica granular, constituida por cristales de 0,5-1 mm de longitud, de plagioclasa y hornblenda, con alteración potásica moderada, que se expresa como biotización de las anfíbolas y pertitización de las plagioclasas. La roca se observa, en general, de aspecto "sucio" por la alteración sericitica débil, que la afecta en forma maciza. En la parte fina de la roca se desarrolla un mosaico de cuarzo y feldespato potásico y aparecen opacos diseminados (calcopirita y pirita). (Nícoles cruzados; campo 2,3 x 3,5 cm.) Edad obtenida en roca total: $7,1 \pm 1,0$ Ma.

clasa, biotita y relictos de anfíbola, en una masa fundamental, que representa un 30-60% en volumen, de cuarzo, microlitos de plagioclasa y feldespato potásico subordinado (Foto 2). La parte central del intrusivo, de textura fanerítica, está compuesta por un agregado hipidiomorfo de plagioclasa, biotita y hornblenda parcialmente cloritizada, con cuarzo y feldespato potásico intersticial (Faunez, 1981). El límite entre estas dos variedades es transicional y ambas presentan una fuerte alteración cuarzo-sericita-clorita, que se desarrolla a partir de halos de vetillas y oblitera la textura y composición original de la roca. Por su parte, los apófisis tienen contactos tajantes o brechosos y están caracterizados por una fuerte silicificación y sericitización, en las partes altas, presentando una textura porfídica, con alteración potásica en profundidad (Villalobos, 1975).

El Pórfido Teniente ha sido reconocido en la parte norte del yacimiento y es el principal responsable de la mineralización. Consiste en un cuerpo tabular, subvertical, de orientación norte-sur, con dimensiones máximas reconocidas de 1.500 m de longitud y 200 m de potencia (Nivel Teniente 6), el que se encuentra cortado en superficie por la quebrada Teniente. Está emplazado en andesitas,

con contactos nítidos, pero de diseño irregular. Hacia el sur, está truncado por la Chimenea Braden, desarrollándose una brecha de turmalina, con clasos angulosos del pórfido, en la zona de contacto. Este intrusivo corresponde a una dacita rica en feldespato alcalino y pobre en sílice (Ossandón, 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, feldespato potásico y biotita (Foto 3). Ossandón (1974) distinguió dos variedades texturales, una correspondiente a un pórfido panidiomórfico, caracterizado por una textura porfídica doble y un color gris-verdoso oscuro, y la segunda, a un pórfido hipidiomórfico de color gris-blancuzco, con micropertita como constituyente principal. La primera ocupa la parte norte del intrusivo y, en general, los bordes del mismo, en tanto que la segunda es más abundante en la parte sur y hacia el centro.

No se han reconocido relaciones de contacto entre los intrusivos descritos, pero las características de alteración-mineralización que presentan, indican que la Diorita Sewell es la más antigua, lo que ha sido comprobado según se verá más adelante.

El rasgo estructural más impresionante del ya-

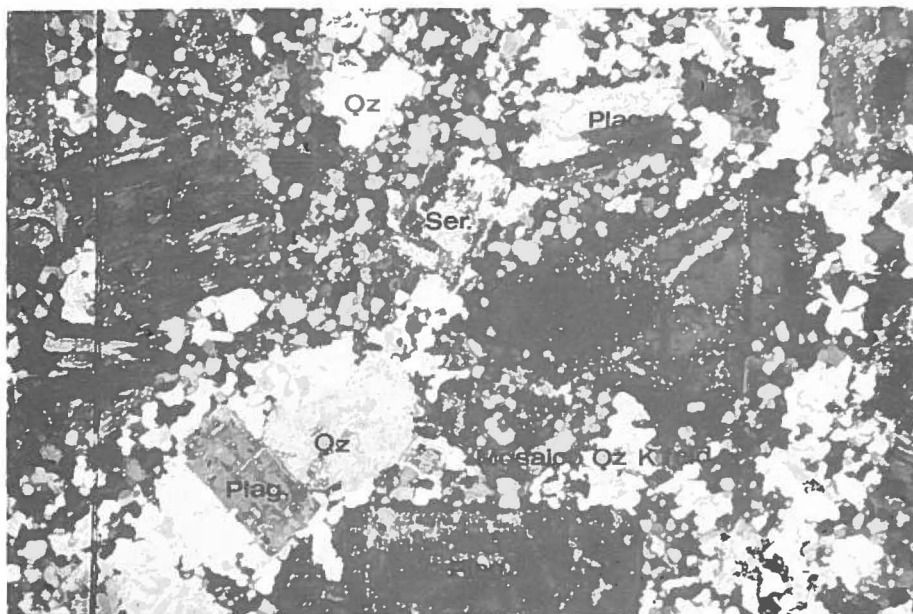


Foto 3. Pórfido Teniente (muestra T6-109). Textura porfídica, con fenocristales de plagioclase, cuarzo y biotita (40%), en una masa fundamental de mosaico fino de cuarzo y feldespato potásico, con anhidrita intersticial y opacos (calcopirita) diseminados. Los feldespatos presentan alteración débil a sericita. La biotita es de color pardo y verde, en cristales de 1-2 mm de diámetro, presentando alteración débil a clorita y calcita. (Nícoles cruzados; campo 2,3 x 3,5 cm.) Edad obtenida en biotita: $4,0 \pm 0,4$ Ma.

cimiento es la presencia de un complejo de brechas, emplazado en la parte central de éste, denominado Chimenea Braden. Tiene la forma de un cono invertido, casi circular en planta, con su flanco este subvertical, en tanto que el resto de su contorno converge hacia el centro con inclinaciones de 60-70°. En superficie, tiene unos 1.200 m de diámetro, con un desarrollo vertical reconocido de 1.800 m.

En casi toda la periferia de esta estructura se desarrolla un anillo de brechas de turmalina, denominado genéricamente Brecha Marginal, con un ancho promedio de 50-60 m, disminuyendo, en profundidad, hasta unos 5-10 m. Está constituida por fragmentos angulosos a subangulosos, con grados variables de alteración cuarzo-sericita-clorita, provenientes de las rocas inmediatamente adyacentes, cementados por turmalina y cuarzo, con cantidades menores de anhidrita, yeso, carbonatos, sulfuros y sulfosales de la serie tennantita-tetraedrita. Debido a que comúnmente presenta homogeneidad litológica de los clastos, se la denomina, localmente, según su constituyente predominante (brecha de andesita, brecha de dacita, brecha de diorita, etc.)

La parte central de la chimenea está constituida

por brechas, con fragmentos redondeados a subangulosos de variada composición y tamaño, provenientes de las rocas preexistentes, con mineralización y alteración hipógenas propias, en una matriz de polvo de roca y un cemento de sericita, con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros, principalmente pirita. Esta unidad se denomina Brecha Braden y está constituida, en realidad, por un conjunto de subunidades definidas por variaciones en el tamaño, selección y abundancia relativa de los clastos, y por el contenido de turmalina en el cemento. La más abundante presenta un aspecto de concreto característico, siendo de color gris claro, con mala selección y clastos subredondeados. En sectores, se observa una seudoestratificación, descrita recientemente como lineaciones de flujo (Ortega, 1981), tanto en niveles altos como en profundidad.

La Brecha Braden limita casi exclusivamente con la Brecha Marginal, con la que presenta contactos gradacionales. Los contactos del anillo de brechas de turmalina con las rocas encajantes varían de abruptos a gradacionales. Al sureste, la chimenea corta una brecha de turmalina con clastos

de diorita, que está en contacto con la parte alta de la Diorita Sewell. Para esta brecha se ha planteado la posibilidad de que se trate de una brecha de cúpula del intrusivo (Camus, 1975).

La Chimenea Braden fue emplazada en una etapa tardía de formación del yacimiento, ya que corta al Pórfido Teniente y, además, contiene clastos de todos los tipos litológicos ya descritos. La existencia de clastos de la Brecha Marginal en la Brecha Braden indica que este anillo periférico se formó antes. Sin embargo, se han encontrado clastos de la Brecha Braden en algunos sectores de la brecha de turmalina, lo cual revela que esta megaestructura constituye un fenómeno más complejo, con etapas sucesivas de brechización, que aún no ha sido estudiado con el detalle suficiente.

El pórfido latítico ocurre como diques anulares, de poca potencia y continuidad, alrededor de la Chimenea Braden, conformando cuerpos de cierta magnitud en profundidad, en la parte sur del yacimiento y, también, en forma de clastos en la Brecha Braden. Estos últimos corresponden a masas autobrechizadas, cuyo tamaño varía desde algunos centímetros hasta algunas decenas de metros, dis-

poniéndose tanto aisladamente como en acumulaciones, ubicadas en la parte central de la estructura (Howell y Molloy, 1960). Presenta textura porfídica, en la que la masa fundamental alcanza al 60%, con fenocristales de feldespato y biotita, generalmente alterados a sericita, clorita y calcita, lo que le da una coloración blanquizca característica.

Alrededor de la chimenea de brechas, se disponen, además, diques de andesita, lamprófidio y diques de guijarros, cuyas potencias varían entre 0,5 y 2 m, generalmente inclinados hacia la chimenea, envolviéndola como planos cónicos (Reyes, 1979). Los diques de andesita y lamprófidio (Foto 4) no contienen mineralización hipógena y este último atraviesa la Brecha Marginal y la Brecha Braden, en la parte sur, constituyendo la última actividad ígnea reconocida en el yacimiento.

ESTRUCTURA

Las rocas de la Formación Farellones presentan, en general, un plegamiento suave, reconociéndose inclinaciones de 20-30° al oeste, en la zona adyacente al depósito. Sin embargo, en el yacimiento

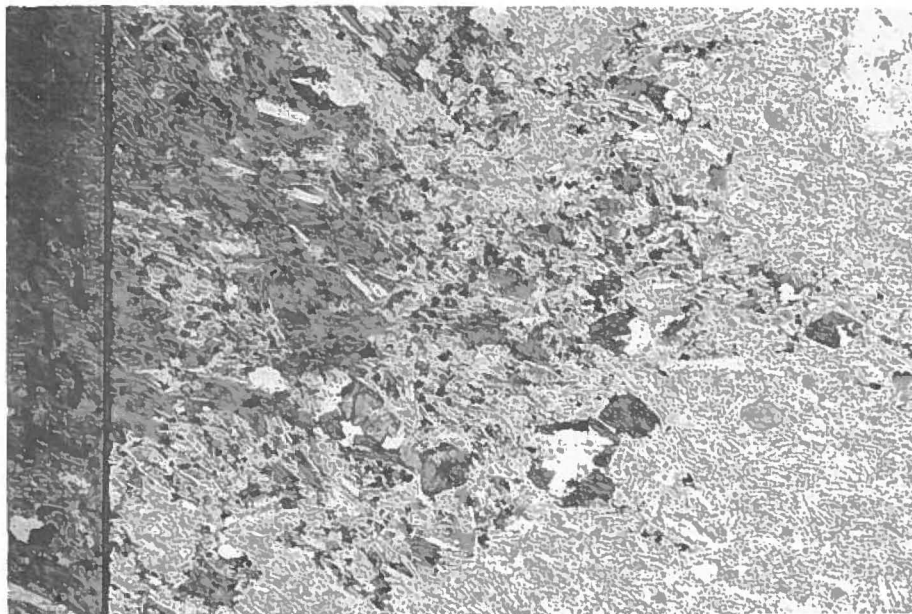


Foto 4. Lamprófidio (muestra T3-22) del tipo de espesarita. Constituido por fenocristales aciculares finos (0,3-0,5 mm) de hornblenda y plagioclasa; en una masa fundamental traquítica de microlitos de plagioclasa, hornblenda y minerales opacos (magnetita). Las anfíbolas muestran una alteración débil a calcita. Se intentó datar la anfíbola en forma separada, pero fue imposible debido al bajo contenido de potasio (0,3%) por lo que debió efectuarse en roca total. (Nícoles paralelos; campo 2,3 x 3,5 cm.) Edad obtenida: $3,8 \pm 0,3$ Ma.

mismo, no es posible distinguir la estratificación de las coladas, debido a la intensa alteración que las afecta.

El fracturamiento regional está representado por un sistema de fallas y vetas tempranas, de dirección predominante noreste e inclinación subvertical, con una corrida promedio de 300 m, en un área elongada en dirección noreste de unos 10 km de longitud centrada en el yacimiento. El desplazamiento reconocido en las fallas es reducido, siendo su efecto acumulativo un alzamiento del lado sureste con respecto al lado noreste (Howell y Molloy, 1960). Las vetas están constituidas por cuarzo, hematita y baritina, con algo de pirita, siendo de escaso valor en el yacimiento, en tanto que, en la zona periférica a éste, contienen galena y blenda, con algo de calcopirita y pirita.

Con el emplazamiento de los cuerpos intrusivos y de la Chimenea Braden se originó un fracturamiento sucesivo, que afecta tanto a aquéllos como a las rocas encajadoras preexistentes. Este fracturamiento es del tipo "stockwork" y aloja gran parte de la mineralización, alcanzando frecuencias máximas de 40 vetillas por metro lineal, en las cercanías de los contactos con los intrusivos (Zúñiga, 1982). Las fracturas permitieron el paso de las soluciones hidrotermales, cuya depositación de minerales no sólo se restringió a ellas, sino que se extendió, en gran medida, hacia la roca misma, donde se encuentra en forma diseminada. Conforman sistemas asociados a las diferentes etapas de alteración-mineralización del depósito. Los más notables corresponden a un sistema principal, de dirección predominante noreste e inclinaciones subverticales, conjugado con un sistema secundario de dirección noreste. Estos sistemas son característicos de la etapa hidrotermal principal, en las andesitas y los intrusivos mayores, mientras que otro, desarrollado en la zona periférica a la chimenea de brecha, está representado por estructuras de tensión de disposición concéntrica y radial a ésta, las cuales caracterizan la etapa hidrotermal tardía. La Brecha Braden presenta vetillas de la etapa póstuma de alteración hidrotermal. La frecuencia de vetillas disminuye, progresivamente, desde la etapa temprana hasta la etapa póstuma de alteración-mineralización.

ALTERACION Y MINERALIZACION

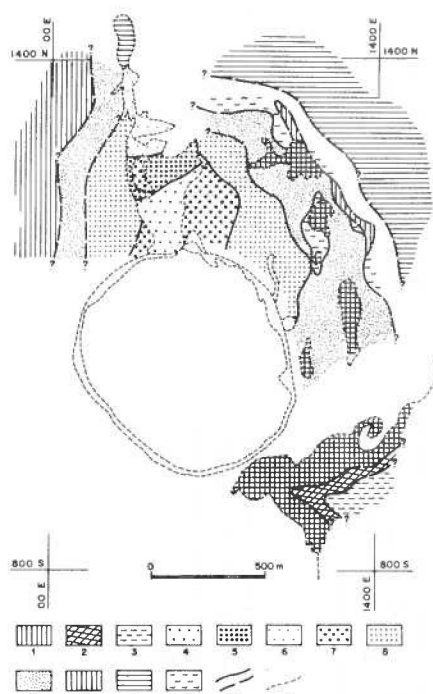
El yacimiento El Teniente se formó en un proceso continuo de alteración y mineralización. En la

actualidad, se han podido diferenciar cuatro etapas hipógenas, llamadas Tardimagmática, Hidrotermal Principal, Hidrotermal Tardía y Póstuma (Tabla 1) y una etapa Supérgena.

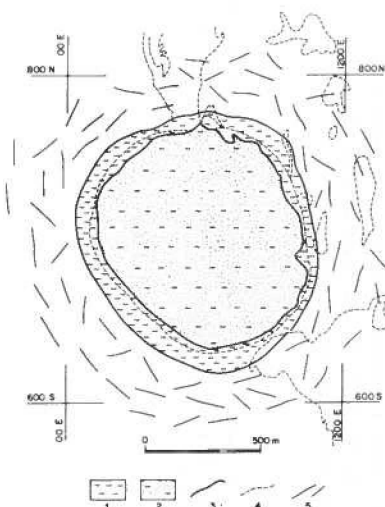
El cuerpo mineralizado presenta una forma aproximadamente triangular en planta, alargada hacia el norte, donde está centrado en el Pórfido Teniente, y se extiende hacia el sureste dentro de la Diorita Sewell. Su parte central corresponde a una zona de baja ley, relacionada con la Chimenea Braden. Su desarrollo vertical incluye una zona de lixiviación-oxidación, de un espesor promedio de 100 m, una zona de enriquecimiento secundario, con espesor máximo de 500 m en la parte norte y una zona de mineralización hipógena o primaria, reconocida hasta unos 1.000 m bajo la superficie.

La etapa Tardimagmática (Figura 2a) está relacionada a las últimas fases de consolidación de la Diorita Sewell y del Pórfido Teniente. Se expresa como una alteración potásica, que afecta a los intrusivos y sus rocas encajantes, caracterizada por feldespato potásico y biotita, con cantidades menores de anhidrita, cuarzo, clorita, albita, turmalina y sericita. En general, se desarrolla a partir de vetillas de cuarzo, feldespato potásico, anhidrita y sulfuros, generando una alteración de carácter macizo, que afecta a toda la roca. En los intrusivos mayores, se caracteriza por una pseudopertitización de las plagioclasas y la formación de cúmulos irregulares de biotita. Su distribución es diferente en ambos intrusivos, siendo de mayor intensidad en la costra porfídica de la diorita, decreciendo hacia su núcleo, en tanto que presenta una zonación centralizada en el pórfido dacítico, con intensidad decreciente a partir de éste. En las andesitas, se expresa principalmente por una biotitización intensa, que les da una coloración negra. En la periferia del yacimiento, la biotita es reemplazada en forma transicional por clorita, conformando una zona circundante de alteración propilítica, junto con minerales como epidota y calcita, pasando gradualmente hacia rocas frescas (Villalobos, 1975). La mineralización asociada a la etapa tardimagmática ocurre en vetillas y en forma diseminada, con una marcada zonación en torno al pórfido dacítico, con un núcleo rico en bornita, una zona intermedia con predominio de calcopirita y una zona periférica con pirita; constituyendo éste último casi el único sulfuro de la zona propilítica. En el sector sur del yacimiento, predomina la calcopirita gradando a pirita hacia los márgenes.

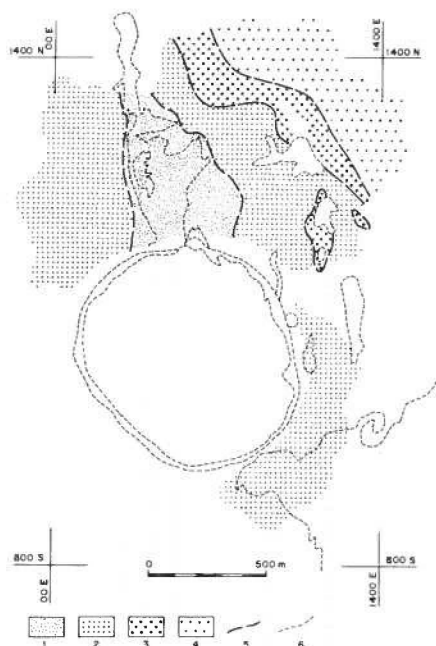
FIG. 2. Plano de alteración al nivel Teniente 5, de las cuatro etapas hipógenas (a, b y c) y del efecto supérgeno (d) (basado en Ojeda *et al.*, 1980).



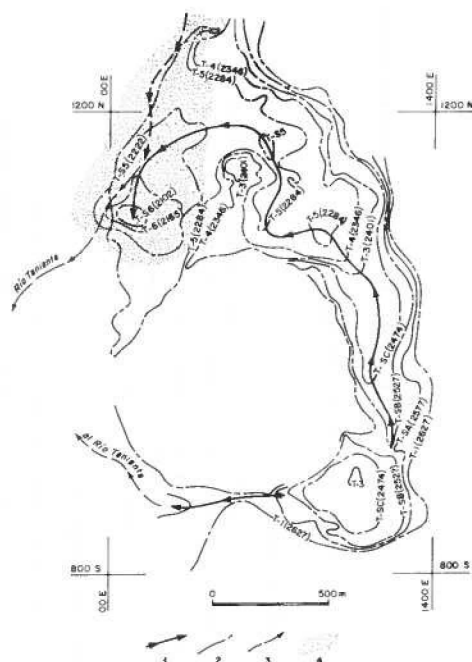
a) Etapa tardimagnética. Diorita Sewell. 1. Zona biotita-JFd; 2. Zona de transición; 3. Zona de clorita. Pórfido Teniente. 4. Alteración potásica intensa; 5. Alteración potásica intermedia; 6. Alteración potásica débil. Andesitas. 7. Alteración potásica avanzada; 8. Alteración biotítica avanzada; 9. Alteración biotítica incipiente; 10. Alteración clorítica; 11. Alteración propilitica; 12. Alteración sericitica "penetrativa"; 13. Límite zonas de alteración. La línea segmentada indica límite inferior; 14. Contacto inferior.



c) Etapas hidrotermales tardía y póstuma. 1. Alteración hidrotermal tardía "penetrativa"; 2. Alteración póstuma; 3. Límite alteración hidrotermal tardía. Hacia el suroeste el límite es aproximado; 4. Contacto litológico; 5. Vetillización tardía.



b) Etapa hidrotermal principal. Mineralogía de la zona de alteración: 1. Cuarzo > muscovita (sericita) (roca alterada < 25%); 2. Cuarzo > sericita > clorita (roca alterada 25-75%); 3. Cuarzo-sericita (roca alterada > 75%); 4. Cuarzo > clorita > sericita (roca alterada < 35%); 5. Límite aproximado de las zonas de alteración hidrotermal principal; 6. Contacto litológico.



d) Cuenca supérgena. Eje de la cuenca supérgena. La flecha indica sentido del escurrimiento; 2. Contacto entre el enriquecimiento secundario y la mineralización hipógena. En cada curva se indica el nivel y la cota s.n.m.; 3. Sentido del escurrimiento superficial; 4. Zonas de mezcla de las aguas infiltradas del río Teniente con las aguas de la mina.

TABLA 1. ETAPAS DE ALTERACION-MINERALIZACION HIPOGENAS PRINCIPALES EN EL YACIMIENTO EL TENIENTE

CARACTERISTICAS GENERALES	MINERALOGIA PRINCIPAL	RELACIONADA A
1. Etapa Tardimagmática Alteración potásica en vetillas (cuarzo-feldespato, potásico-anhidrita) y en forma maciza (pertitización y silicificación en intrusivos; biotitización en andesitas, con clorita hacia la periferia). Conforma zonas de mayor intensidad, en un esquema concéntrico al Pórfido Teniente, en la parte norte y en el borde del intrusivo diorítico.	Cuarzo, anhidrita, feldespato potásico (pertita), biotita, clorita. Calcopirita, bornita, molibdenita, pirita.	Consolidación de los intrusivos Diorita Sewell y Pórfido Teniente.
2. Etapa Hidrotermal Principal Alteración fílica, desarrollada a partir de vetillas de cuarzo y sulfuros, generando halos de alteración cuarzo-sericita-clorita de ancho variable. Las zonas de mayor intensidad conforman franjas dispuestas en forma simétrica al Pórfido Teniente, en las andesitas. También se desarrolla en la Diorita Sewell como vetillas y en forma maciza.	Cuarzo, sericita, clorita, anhidrita. Calcopirita, pirita, molibdenita.	Reacción de los fluidos tardimagmáticos, con aguas meteóricas.
3. Etapa Hidrotermal Tardía Alteración fílica que afecta a los clastos de la Brecha Marginal y en vetillas en forma similar a la anterior, pero de menor intensidad. Se desarrolla a partir de la Brecha Marginal extendiéndose unos 100-150 m en una zona concéntrica a ésta.	Anhidrita, cuarzo, sericita, turmalina, yeso, ankerita, siderita, baritina, clorita, epidota. Calcopirita, bornita, pirita, molibdenita, tennantita.	Fluidos hidrotermales, generados por el emplazamiento de la Brecha Marginal.
4. Etapa Póstuma Principalmente alteración sericita-calcita, restringida a la Brecha Braden, en vetillas de poca frecuencia y afectando a la matriz y a los clastos de la brecha.	Sericita, calcita, yeso, cuarzo, siderita, ankerita, baritina, anhidrita, turmalina. Pirita, calcopirita, molibdenita, blenda, galena, tennantita.	Fluidos hidrotermales, asociados con la formación de la Brecha Braden.

La etapa Hidrotermal Principal (Fig. 2b) se sobreimpone a la anterior y se caracteriza por la asociación de cuarzo, sericita, clorita y anhidrita. Se desarrolla a partir de vetillas de orientación principal noreste y, en menor medida, noroeste, constituyendo el relleno y sus halos de alteración los que comúnmente no afectan a toda la roca. Los sulfuros asociados a este período son calcopirita y pirita, que se encuentran diseminados en los halos y/o formando parte del relleno de las vetillas. El volumen de la roca afectada por esta alteración está en relación directa con la frecuencia de vetillas y el ancho de éstas y sus respectivos halos, produciendo, en ciertos casos, una alteración maciza que oblitera totalmente la mineralogía y textura preexistente. Presenta una zonación de franjas de tendencia norte-sur, con la zona de máxima intensidad en las andesitas al este y al oeste del pórfido dacítico (Zúñiga, 1982). Este último presenta una alteración cuarzo-sericítica moderada a débil, en tanto que la diorita tiene una alteración cuarzo-sericítica moderada a fuerte, que aumenta hacia niveles superiores.

La etapa Hidrotermal Tardía está asociada con la formación de la Brecha Marginal y se expresa como la alteración cuarzo-sericítica de sus clastos (Foto 5) y como vetas y vetillas con relleno de anhidrita, yeso, turmalina, siderita, cuarzo y un halo de alteración cuarzo-sericita-clorita-calcita, que se distribuyen en una franja concéntrica a la chimenea de brechas, de 100-150 m de ancho (Fig. 2c). La mineralización sulfurada de esta etapa consiste en calcopirita, bornita, pirita y tennantita-tetraedrita.

La mineralización de molibdeno ocurre como molibdenita, principalmente en vetillas, durante las tres etapas hipógenas ya descritas, aunque, en mayor proporción, está asociada a la primera de ellas (Mestre, 1982). También se encuentra diseminada en la fracción fina de sectores de la Chimenea Braden, conformando localmente cuerpos de alta ley.

La cuarta y última etapa hipógena, llamada Póstuma (Fig. 2c), está relacionada a la consolidación de la Brecha Braden. Está constituida fundamentalmente por una asociación de sericita, calcita y pirita, en el cemento, y como alteración sericítica

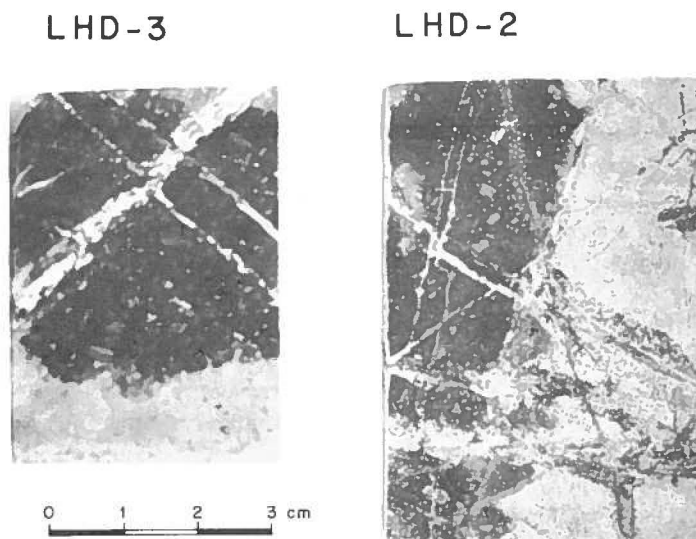


Foto 5. Muestras de clastos de andesita biotitizada, con un borde de alteración sericítica (color más claro). Este borde de alteración se desarrolla en forma concéntrica, en algunos clastos incluidos en las brechas hidrotermales, por lo que sería contemporáneo con la formación de éstas últimas. En este caso se trata de clastos de la Brecha Marginal, cuya datación del borde de alteración dio como resultado $4,7 \pm 0,2$ y $4,7 \pm 0,3$ Ma, respectivamente, en roca total.

de la fracción clástica. También se produce relleno de estructuras planares y de cavidades con minerales de baja temperatura, tales como yeso, ankerita, siderita, baritina, blenda, galena, cuarzo, junto con calcopirita, pirita, tetraedrita, anhidrita y turmalina. Es frecuente el relleno euhedral de cavidades dentro de la Brecha Braden, reconociéndose varias de gran tamaño, entre las cuales se destaca una caverna de unos 300 m³, en el Nivel Teniente 6, con sus paredes tapizadas de cristales de yeso, pirita, cuarzo, blenda, baritina, siderita, calcopirita y apatita.

Finalmente, se generó una cuenca de escurrimiento subterráneo produciendo, de arriba hacia abajo, las zonas de lixiviación, oxidación y enriquecimiento secundario, respectivamente. El escurrimiento de agua fue controlado por la permeabilidad relativa de las rocas presentes y, en este sentido, la Chimenea Braden, a causa de su menor fracturamiento y, en menor medida, el Pórfido Teniente, actuaron como barreras naturales dando como resultado una cuenca, denominada Cuenca Secundaria, de forma curva, que envuelve al cuerpo de brechas y drena hacia la quebrada Teniente, al noreste (Fig. 2d). Los principales efectos de este proceso

son la lixiviación de la anhidrita, tanto en vetillas como diseminada y de los sulfuros primarios como calcopirita, bornita y pirita, principalmente, cuyo contenido de cobre fue solubilizado y, posteriormente, depositado en niveles inferiores, constituyendo el enriquecimiento secundario, que duplica la ley de cobre original, en tanto que el hierro que contienen permanece parcialmente cerca de la superficie bajo la forma de limonitas (goethita y jarosita), constituyendo el extenso recubrimiento lixiviado, con un máximo de 3 km de diámetro. Al mismo tiempo, se produce alteración argílica, caracterizada por alófono y caolinita, con cantidades menores de montmorillonita, alunita y sericita (Camus, 1975).

La Cuenca Secundaria alcanza una profundidad entre 100 y 600 m, con un nivel de enriquecimiento secundario de 100-500 m de espesor, cuyo mineral característico es la calcosina. En menor proporción aparecen covelina, cobre nativo y cuprita. En la parte superior del enriquecimiento, se encuentran, en forma subordinada, minerales oxidados como crisocola, malaquita, brochantita, antlerita, azurita y calcofilita.

GEOLOGIA DEL AREA SEWELL-COYA

Las rocas más antiguas que afloran en el área corresponden a las asignadas a la Formación Coya-Machalí (Oligoceno-Mioceno). Esta formación consta de lavas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas, de piro y epiclastitas de distinta granulometría, y calizas, presentando en este sector pliegues concéntricos, con vergencia occidental (Charrier, 1981). Constituye el límite oeste y sur del área estudiada (Fig. 3) y no han sido incluidas en el proyecto, dado que no presentan relación espacio-temporal directa con el yacimiento El Teniente.

Sobre las rocas de la mencionada formación se disponen las coladas porfídicas, afaníticas y pirocláticas de la Formación Farellones (Mioceno), siendo éstas las rocas predominantes en el área. Están atravesadas por diferentes cuerpos intrusivos y brechas hidrotermales que, en algunos casos, desarrollan zonas de alteración hidrotermal. En dichas zonas, las rocas de esta formación se encuentran alteradas de tal forma que es imposible reconocer su textura y composición original.

Además de las unidades descritas, se han reconocido rocas más jóvenes que la Formación Farellones,

las cuales han sido objeto de estudio de diversos proyectos en fecha reciente. Durante el transcurso de estos trabajos se obtuvo información geológica detallada, permitiendo definir unidades susceptibles de muestreo para datación radiométrica. De esta manera, se determinó la edad de algunos de los eventos intrusivos, volcánicos y de alteración, presentes en el área.

En la parte noreste, se encuentran diversas zonas de alteración hidrotermal, evidenciadas, en superficie, por recubrimientos lixiviados, con presencia de óxidos de hierro en cantidades variables. El más extenso de éstos tiene una orientación noreste, con 12 km de longitud y un ancho promedio de unos 3 km. En su extremo noreste, se ubica el yacimiento El Teniente, en tanto que hacia el suroeste, reconocimientos preliminares han indicado la presencia de una serie de intrusivos dioríticos y brechas hidrotermales de reducida extensión, encajados en rocas volcánicas asignadas a la Formación Farellones. La intensidad de la alteración junto con lo abrupto de la topografía, han obstaculizado, en forma importante, el levantamiento geológico, de

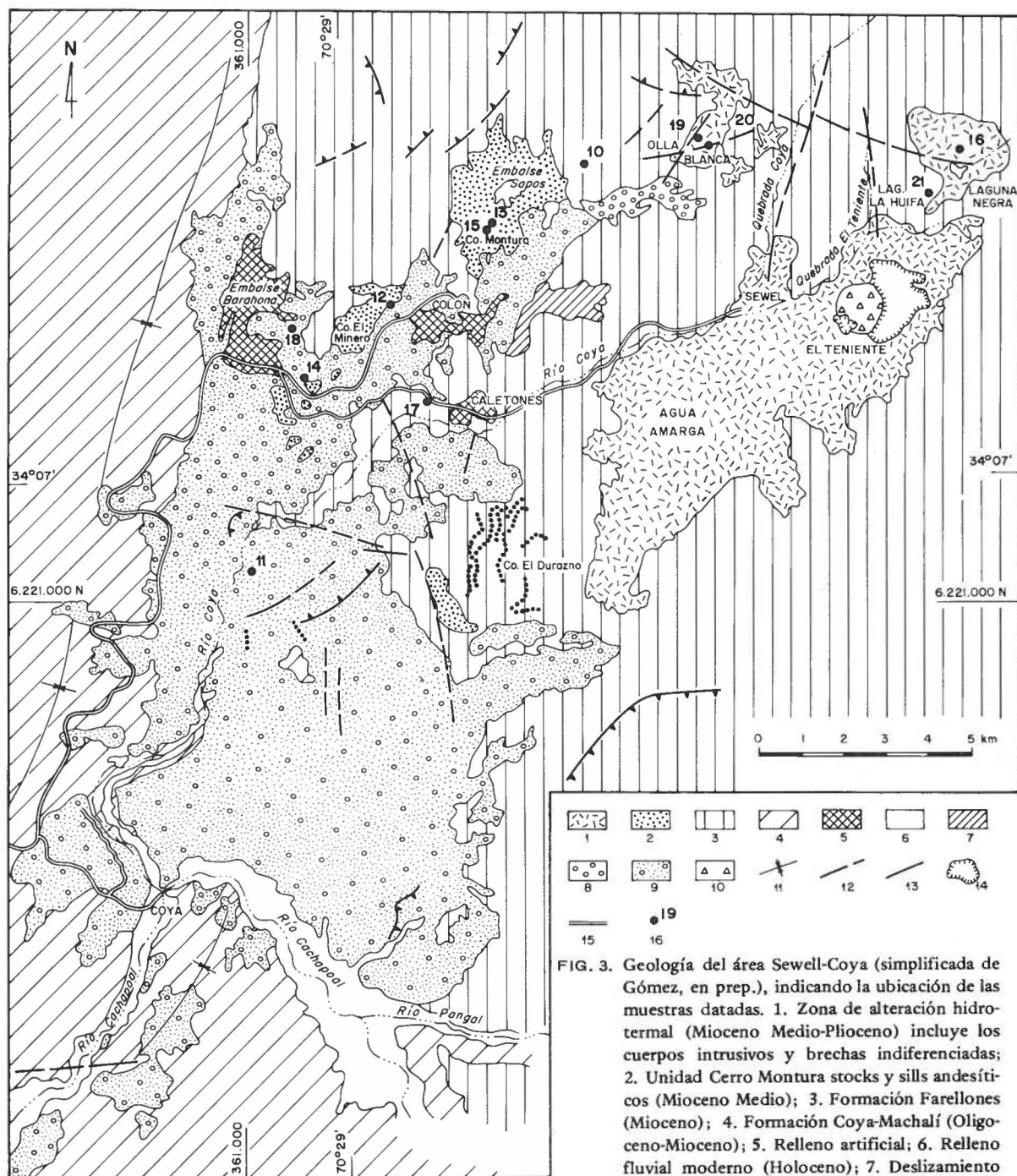


FIG. 3. Geología del área Sewell-Coya (simplificada de Gómez, en prep.), indicando la ubicación de las muestras datadas. 1. Zona de alteración hidrotermal (Mioceno Medio-Plioceno) incluye los cuerpos intrusivos y brechas indiferenciadas; 2. Unidad Cerro Montura stocks y sills andesíticos (Mioceno Medio); 3. Formación Farellones (Mioceno); 4. Formación Coya-Machalí (Oligoceno-Mioceno); 5. Relleno artificial; 6. Relleno fluvial moderno (Holoceno); 7. Deslizamiento Sapos (Holoceno); 8. Morrena (Holoceno); 9. Formación Colón-Coya. Principalmente depósitos laháricos con fluvio-lacustres, coladas y cenizas volcánicas intercaladas (Plioceno-Pleistoceno); 10. Brecha Braden (Plioceno); 11. Eje de pliegue; 12. Falla; 13. Deslizamiento; 14. Caverna de hundimiento Mina; 15. Carretera El Cobre; 16. Muestra de datación radiométrica (número en Tabla 2).

tos laháricos con fluvio-lacustres, coladas y cenizas volcánicas intercaladas (Plioceno-Pleistoceno); 10. Brecha Braden (Plioceno); 11. Eje de pliegue; 12. Falla; 13. Deslizamiento; 14. Caverna de hundimiento Mina; 15. Carretera El Cobre; 16. Muestra de datación radiométrica (número en Tabla 2).

modo que, actualmente, sólo se tiene una idea parcial de las unidades presentes en este último sector.

Hacia el noreste de la anterior se encuentra otra zona de alteración, de menor extensión, que está relacionada a la presencia de intrusivos dioríticos y brechas de turmalina, con mineralización de cobre y molibdeno (Cuadra, 1985). Este sector comprende parte de las hoyas de las lagunas Negra y La Huifa, donde predominan las rocas volcánicas andesíticas, tentativamente asignadas al Miembro Superior de la Formación Farellones. Atravesando a éstas, se han reconocido dos tipos de intrusivos dioríticos, que se diferencian entre sí por su textura y por la alteración que presentan.

El primero de ellos, designado como pórfido diorítico, es de textura gruesa, con un 40% de fenocristales de plagioclasa, hornblenda biotitizada y biotita, en una masa fundamental de cuarzo, plagioclasa y biotita, en un arreglo xenomórfico, típico de la alteración potásica que lo caracteriza, cuya intensidad varía de moderada a fuerte. El segundo, identificado como pórfido diorítico fino, es de grano medio a fino, compuesto por un 20% de fenocristales de plagioclasa y ferromagnesianos alterados, en una masa fundamental de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y clorita. Presenta alteración potásica moderada y una fuerte alteración a sericita-clorita. Ambos intrusivos contienen escasa mineralización de cobre.

Una característica distintiva de este sector es la presencia de numerosos cuerpos de brecha de turmalina, el mayor de los cuales tiene 100 m de diámetro aproximado. De acuerdo a su mineralogía y textura se reconocieron tres tipos de brechas, el más importante de los cuales, denominado Brecha Extravío, presenta mineralización interesante de cobre y molibdeno. Está constituido, en un 40%, por clastos angulosos, de rocas volcánicas andesíticas y pórfidos, con alteración cuarzo-sericita-clorita, de intensidad variable, a partir de sus bordes hacia el centro, cementados por una masa fina de turmalina, con cantidades menores de cuarzo, anhidrita, calcita y sulfuros.

Al norte de la localidad de Sewell, se encuentran otras zonas de alteración de menor extensión aún que las anteriores, relacionadas a la existencia de cuerpos silíceos irregulares, emplazados en rocas de la Formación Farellones. La más notable es la de Olla Blanca, donde la magnitud de los cuerpos silíceos permitió su explotación por cuarzo para la Fundición de Caletones, en el período de marzo a diciembre de 1978. Camus (1977) efectuó un

levantamiento geológico del área, caracterizando los cuerpos de cuarzo y la alteración hidrotermal asociada a ellos. Este autor postuló la hipótesis de un volcanismo central y fisural post Farellones, con el desarrollo prominente de una caldera volcánica de explosión en el sector de Olla Blanca, proponiendo, además, que los depósitos laháricos ubicados al suroeste de aquél engranarían lateralmente con las coladas de dicho centro. Trabajos recientes (Morel, 1984; Gómez, en prep.) han descartado completamente esta posibilidad, ya que el sector de Olla Blanca corresponde, simplemente, a una zona de alteración desarrollada en rocas volcánicas de la Formación Farellones, a partir del emplazamiento de los cuerpos silíceos. La alteración central de las rocas corresponde a una asociación cuarzo-sericita-caolinita con algo de calcita, que ha obliterado casi totalmente la textura original, provocando, además, una descoloración notable de las andesitas. El producto de este proceso es una roca relativamente blanda, de color gris-blanquecino a blanco y de grano muy fino. Su menor dureza facilitó la formación de una depresión en la parte central de la zona por efecto de erosión. En cuanto a los depósitos laháricos, éstos constituyen un evento muy posterior, dadas las relaciones de contacto vistas en terreno, complementadas con la información geocronológica que se expone en el presente trabajo.

Por otra parte, el área que se extiende aproximadamente entre las localidades de Colón y Coya, constituye una zona deprimida, de topografía suave, en la que se encuentran rocas volcánicas y asociadas, que sobreyacen o atraviesan las rocas de la Formación Farellones (Fig. 3). Hacia el oeste, esta zona limita con las rocas de la Formación Coya-Machalí, constituyendo el cordón de cerros más occidental de la cordillera en esta región.

La más extensa de las unidades post Farellones, reconocida por vez primera por Enrione (1972), corresponde a depósitos laháricos de espesor variable entre algunos centímetros y 150 m, compuestos por fragmentos de granulometría heterogénea, en una matriz arcilloso-cinerítica, de colores pardo, rojizo y amarillento (Foto 6), en los cuales se intercalan niveles de ceniza blanquiczas, coladas andesíticas de poco espesor y gravas fluviales, todas estas de extensión local. Esta unidad ha sido reconocida en detalle por Gómez (en prep.), quien la describe como Formación Colón-Coya, incluyendo las rocas descritas como "coladas del valle" por Charrier y Munizaga (1979), en las cercanías de Coya.

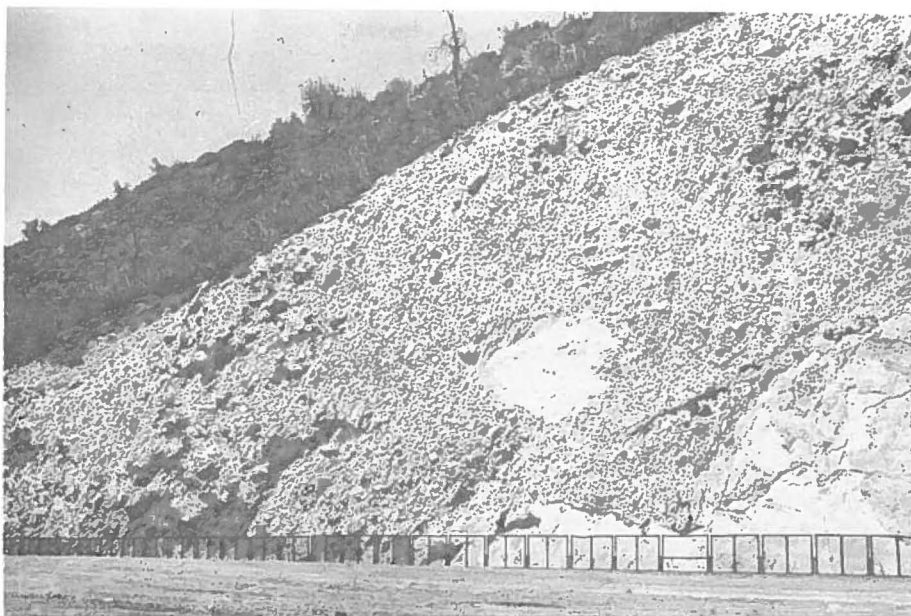


Foto 6. Depósitos laháricos de la Formación Colón-Coya, expuestos en un corte de la Carretera El Cobre (km 32). Se aprecia la heterogeneidad en el tamaño de los clastos y su arreglo desordenado, en una matriz friable, constituida por ceniza y material arcilloso. Los sectores de color más claro corresponden a masas de cenizas color crema y pardo, con una forma y distribución irregulares, frecuentes en esta unidad. Estos depósitos constituyen taludes inestables, donde la erosión provoca frecuentes caídas de piedras, razón por la cual se construyen rejas de protección para la carretera.

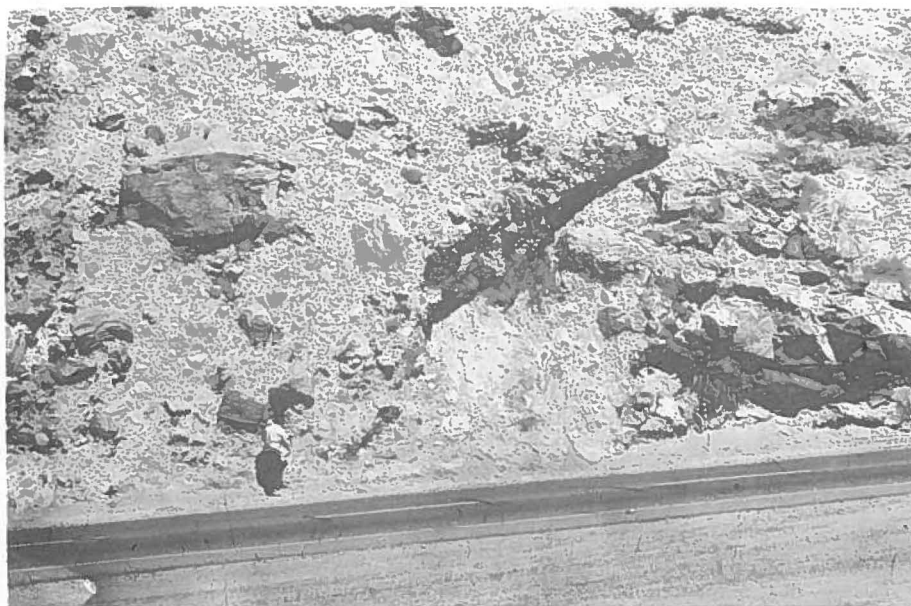


Foto 7. Depósitos laháricos de la Formación Colón-Coya, expuestos en un corte de la Carretera El Cobre (km 31). Se apoyan discordantemente sobre rocas volcánicas andesíticas de la Formación Coya-Machalí (derecha de la foto). En esta fotografía se distinguen clastos de la Unidad Cerro Montura, con su diaclasamiento característico.



Foto 8. Vista general, hacia el norte, de los afloramientos de las rocas volcánicas de Cerro Montura. Corresponden a andesita porfídica color gris medio, de textura porfídica fina a media, intensamente fracturada. En este lugar se define la Unidad Cerro Montura, un complejo intrusivo-volcánico post-Farellones, con edades que fluctúan entre 8,2 y 9,0 Ma.



Foto 9. Detalle de un afloramiento de andesitas porfídicas de Cerro Montura. En éste se observa claramente el diaclasamiento subhorizontal, que es característico de este tipo de roca, siendo frecuente la presencia de clastos de esta unidad en los depósitos laháricos de la Formación Colón-Coya.

Los depósitos laháricos se disponen, discordantemente, sobre todas las unidades anteriores, rellenando una antigua topografía, y están bien expuestos en los taludes de la Carretera El Cobre, entre Coya y Colón (Foto 7). Presentan un grado de coherencia que va desde un tipo con clastos fuertemente alterados, parcialmente soldados a la matriz, hasta un tipo con clastos relativamente frescos, fácilmente separables de la matriz. Esto indicaría diferencias de temperatura durante la deposición, siendo el último formado, probablemente, a partir de corrientes de barro frías. Los dos tipos presentan variaciones intermedias y su distribución es irregular, de manera que no es posible definir unidades mapeables a escala regional.

Interrumpiendo la cubierta de depósitos laháricos, se encuentran rocas de composición andesítica y textura porfídica, media a gruesa, que constituyen puntos resaltantes en la topografía. El afloramiento más importante se encuentra en el cerro Montura, cuyo cuerpo principal conforma un probable cuello volcánico (Foto 8, 9) que, en sectores, presenta aspecto de intrusivo, encajado en rocas de la Formación Farellones y rodeado por

depósitos laháricos. Se trata de andesitas de clinopiroxeno, de textura porfídica media (Foto 10), de color gris claro, con un laminamiento subhorizontal característico. Hacia el sur, afloran rocas de similar composición, constituyendo pequeñas prominencias en relación con los depósitos laháricos. En el sector del cerro El Minero, se encuentran tanto rocas porfídicas de aspecto intrusivo, como tobas de cristales, que indican la complejidad de esta unidad. En el cerro El Durazno, donde se expone una secuencia de lavas y brechas (con inclinación suave hacia el oeste) de la Formación Farellones, aparecen rocas similares a las de Cerro Montura, en forma de sills interestratificados (Gómez, en prep.). En conjunto, los afloramientos descritos han sido agrupados por dicho autor como Unidad Cerro Montura.

Numerosos intrusivos menores cortan a la Formación Farellones en el área estudiada, entre los cuales cabe destacar un dique lamprofídico, que se encuentra atravesando brechas laháricas de dicha formación, cerca de Caletones. Este intrusivo es petrográficamente idéntico al que se emplaza en la parte sur del yacimiento.

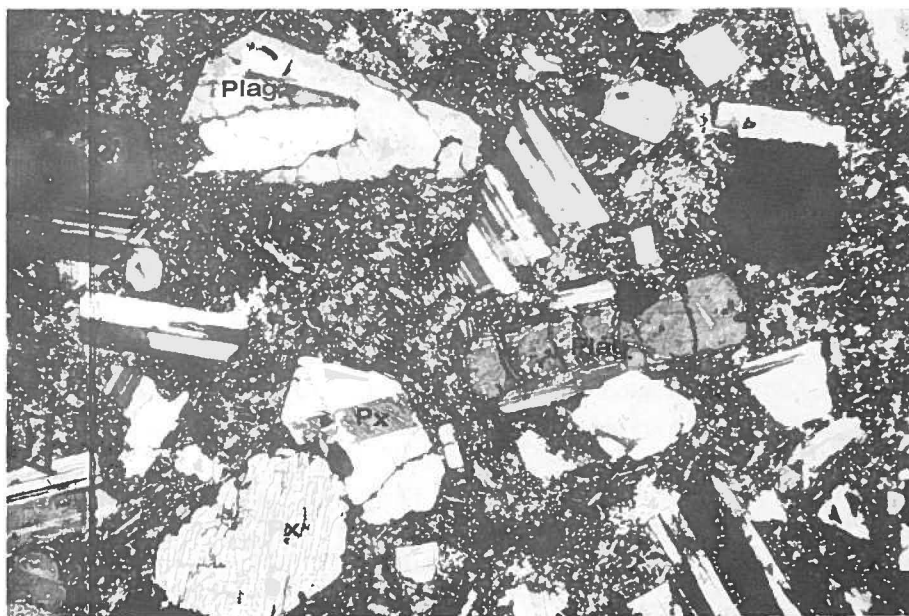


Foto 10. Andesita porfídica (muestra E-1292). Textura porfídica media, con fenocristales frescos de plagioclasa (An: 30-40) y augita, de 1-2 mm, en una masa fundamental microfelsítica con opacos (magnetita) diseminados. De acuerdo a la textura de esta roca, podría corresponder a parte de un cuello volcánico, que se encuentra atravesando la secuencia volcánica de la Formación Farellones. (Nícoles cruzados; campo 2,3 x 3,5 cm.) Edad obtenida en roca total: $8,2 \pm 0,5$ Ma.

GEOCRONOLOGIA

Se elaboró un programa de trabajo destinado a recolectar muestras para determinar la edad de los eventos intrusivos, volcánicos y de alteración, que caracterizan el yacimiento y el área adyacente (Fig. 1, 3), de acuerdo al desarrollo de diferentes proyectos efectuados por el Departamento de Geología de la División El Teniente. De esta manera sería posible determinar la relación temporal, si existe, entre los eventos formadores del yacimiento y los ocurridos en el resto del área.

En el ámbito del yacimiento, tanto las andesitas como los intrusivos mayores están afectados por una alteración potásica penetrativa, de manera que ésta constituye el evento termal más temprano posible de datar. Esto se debe a que esta etapa de alteración ocurrió a una temperatura de $456 \pm 41^\circ\text{C}$, según los resultados obtenidos por Kusakabe *et al.* (1984), tanto en el entorno del Pórfido Teniente, como en el de la Diorita Sewell. Esta información, obtenida en base a isótopos de azufre, es consistente con la informada por A.H. Clark (*in* Clark *et al.*, 1983) en base a temperaturas de homogenización de inclusiones fluidas en vetillas de cuarzo, las que caen en el rango de $430\text{--}482^\circ\text{C}$. Esto indica que la biotita presente en las rocas del yacimiento ha sido calentada por sobre su temperatura de retentividad de argón, durante la etapa temprana. En este contexto, las edades determinadas en las muestras corresponden a la edad mínima de intrusión y/o de la alteración potásica, que afecta a los intrusivos y a las andesitas encajadoras, dentro de la zona mineralizada.

Para complementar la información geocronológica obtenida por Clark *et al.* (1983), se recolectaron muestras del Pórfido Teniente (Foto 3) y de las andesitas biotitizadas (Foto 1), cercanas al contacto con éste. En el caso de la Diorita Sewell, no fue posible encontrar muestras exentas de la alteración cuarzo-sericita-clorita, que la caracteriza en los actuales niveles de la mina, por lo que se recurrió a muestras de sondajes, ubicadas a mayor profundidad (Foto 2). Estas corresponden a diorita, con alteración potásica moderada a fuerte, ubicadas en la costra porfídica del intrusivo, las que presentan una débil alteración a sericita.

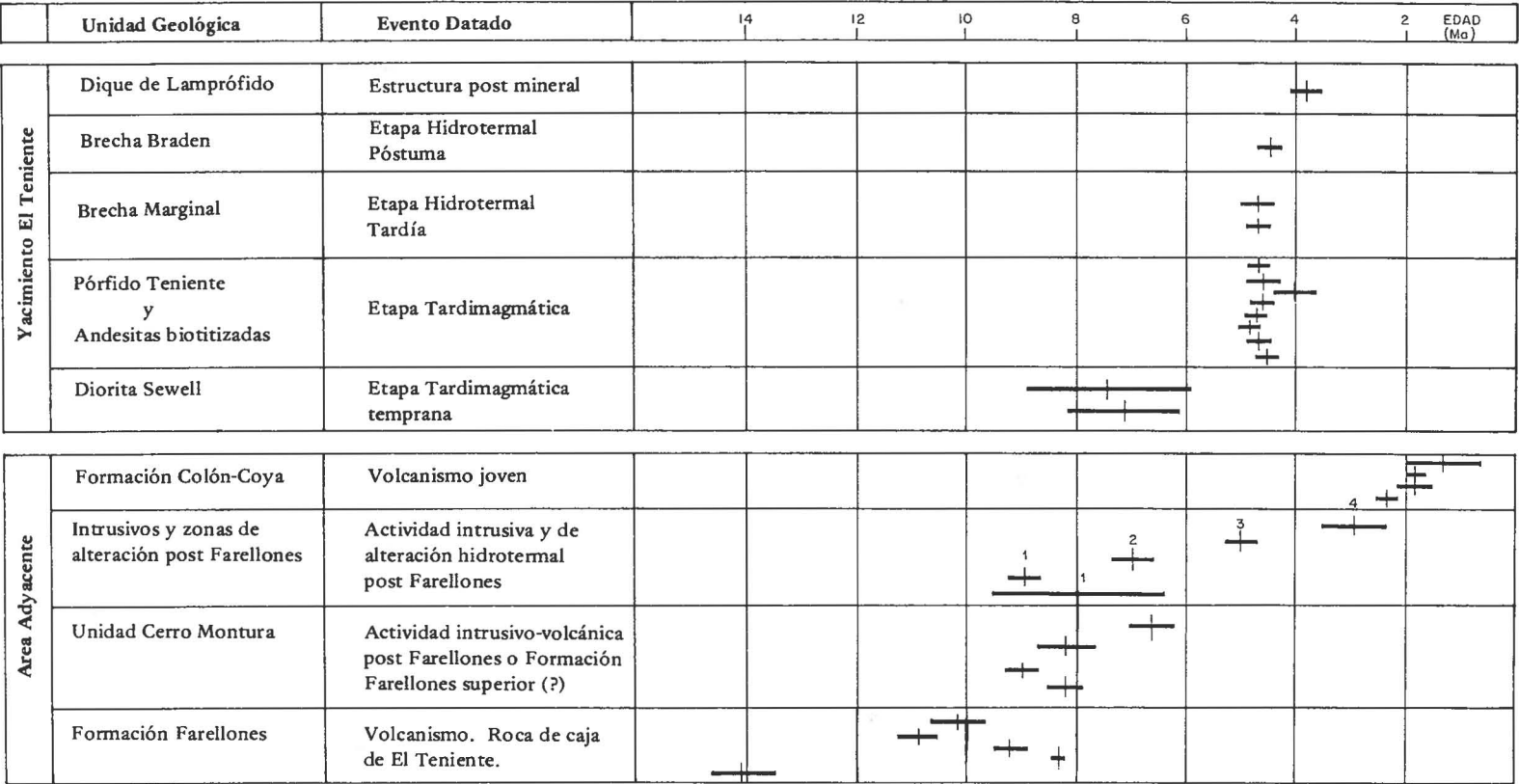
Las siguientes etapas de alteración hidrotermal

se caracterizan por la presencia de sericita en cantidades variables, junto con cuarzo, clorita y calcita, constituyendo los halos de las vetillas, la alteración de los clastos en las brechas y, en algunos casos, zonas de alteración maciza. De esta manera, un muestreo y separación de trozos de muestras con alteración sericitica intensa y cuarzo como único acompañante, permite datar los eventos mencionados.

En primera instancia, se efectuó un muestreo para datar la Brecha Marginal y la Brecha Braden, con lo cual se determina la edad de las etapas de alteración tardía y póstuma, contemporáneas con dichas unidades y, con ello, el rango de edad en que ocurre todo el proceso de mineralización-alteración del yacimiento. Para esto se definió que el método más apropiado es el de analizar los bordes de alteración, que presentan desarrollo concéntrico en los clastos, como también de los halos de alteración de vetillas de dichas etapas. En el primer caso, se muestrearon clastos de andesita con bordes alterados, ya que, dada la diferencia de color entre la parte biotitizada y la parte sericitizada (Foto 5), se puede apreciar fácilmente el desarrollo de la alteración en forma concéntrica, lo cual permite asumir que no se trata de una característica heredada de la roca original, sino de un fenómeno ocurrido junto con la formación de la brecha. En el caso de los halos de vetillas, todas las muestras obtenidas debieron ser desechadas, dado su alto contenido de calcita y/o turmalina, minerales que interfieren en el proceso analítico.

Finalmente, se obtuvieron muestras del Dique de Lamprófido (Foto 4), el cual permite fijar la terminación de los procesos que formaron el yacimiento, ya que se trata de una estructura post-mineral.

Fuera del yacimiento se estudiaron las zonas de alteración de las lagunas Negra y La Huifa, y la de Olla Blanca, durante los trabajos de exploración efectuados en 1984. En la primera de éstas, se muestrearon los intrusivos descritos en el capítulo anterior y la Brecha Extravío, debiendo descartarse el pórfido diorítico fino, dada la alteración sericita-clorita generalizada que presenta. La brecha fue datada en base al borde de alteración sericitico,



- Incluye trabajos anteriores de Charrier y Munizaga, 1979 y Clark *et al.*, 1983.
- Muestras: 1. Olla Blanca; 2. Pórfido Laguna Negra; 3. Brecha Extravío; 4. Lamprófido.

FIG. 4. Edades K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes, mostrando la relación entre las unidades geológicas y los eventos intrusivos, volcánicos o de alteración datados.

TABLA 2. EIDADES K-Ar DETERMINADAS EN EL YACIMIENTO EL TENIENTE Y AREAS ADYACENTES

Unidad Geológica	Refs.	No. Muestra	Coordenadas (1)	Altura (m s.n.m.)	Material Analizado	K (%)	⁴⁰ Ar Rad. (nl/g)	⁴⁰ Ar Atm. (%)	Edad y Error (Ma ± 2 σ)	Tipo de Roca/ Observaciones
Diorita Sewell	1	DDH-1091A a 2.970'	154S - 491E	1.248	Roca total	1,511	0,420	87,1	7,1 ± 1,0	○ Alt. potásica moderada. Sericita y clorita presentes.
	2	DDH-1091A a 2.842'	169S - 472E	1.217	Roca total	1,421	0,408	90,6	7,4 ± 1,5	○ Alt. potásica fuerte. Sericita y clorita presentes.
Pórfido Teniente	3	T6-109	750N - 560E	2.165	Biotita	6,238	0,970	78,1	4,0 ± 0,4	○ Alt. potásica fuerte. Biotita alt. parcialmente a clorita.
	4	T7-10	985N - 530E	2.042	Biotita	6,203	1,112	68,4	4,6 ± 0,3	○ Alt. potásica fuerte. Biotita fresca.
Andesita	5	T5-209	620N - 405E	2.284	Biotita	6,577	1,203	37,6	4,7 ± 0,2	○ Intensa biotitización de grano fino.
Brecha Marginal	6	LHD-2	349N - 959E	2.372	Roca total	5,008	0,916	54,2	4,7 ± 0,2	⊗ Borde sericitizado de clasto de andesita.
	7	LHD-3	404N - 983E	2.372	Roca total	5,239	0,968	58,2	4,7 ± 0,3	⊗ Borde sericitizado de clasto de andesita.
Brecha Braden	8	T5-214	360N-495E	2.284	Roca total	5,338	0,928	52,6	4,5 ± 0,2	○ Borde sericitizado de clasto de andesita.
Dique de Lamprófido	9	T3-22	065S - 1320E	2.401	Roca total	1,205	0,176	67,2	3,8 ± 0,3	○ Roca más o menos fresca. Débil alt. a calcita
Formación Farellones	10	E-1284	6.231.225N- 368.950E	2.360	Roca total	2,099	0,836	45,8	10,2 ± 0,5	□ And. de piroxeno, porfídica fina.
	11	E-1392	6.221.760N - 361.110E	1.130	Roca total	2,065	0,878	33,3	10,9 ± 0,4	☆ And. de piroxeno, porfídica gruesa.
Unidad Cerro Montura	12	E-1233	6.227.900N - 364.600E	1.920	Roca total	1,788	0,463	57,3	6,6 ± 0,4	⊗ And. de piroxeno, porfídica gruesa.
	13	E-1292	6.229.800N - 366.700E	2.284	Roca total	2,171	0,698	69,4	8,2 ± 0,5	◇ And. de piroxeno, porfídica media.
	14	E-1363	6.226.300N - 362.375E	1.710	Biotita	6,471	2,271	46,6	9,0 ± 0,3	◇ Toba de cristales, plagioclasa, biotita, anfíbola.
	15	E-1425	6.229.640N - 366.730E	2.284	Roca total	2,164	0,689	31,3	8,2 ± 0,3	○ And. de piroxeno, porfídica media.
Pórfido Diorítico	16	E-1359	6.231.700N - 377.920E	3.325	Biotita	6,052	1,655	61,5	7,0 ± 0,4	○ Alt. potásica moderada. Biotita fresca.
Dique de Lamprófido	17	BS-588	6.225.750N - 365.170E	1.600	Hornblenda	0,438	0,050	81,6	2,9 ± 0,6	◇ Roca fresca, con impregnación de limonita.
Formación Colón-Coya	18	CC-263b	6.227.300N - 362.100E	1.610	Roca total	3,504	0,176	96,3	1,3 ± 0,7	◇ Ceniza blanca, intercalada en lahares.
Olla Blanca	19	E-1299	6.231.830N - 371.630E	2.910	Roca total	0,893	0,279	90,2	8,0 ± 1,6	△ And. con intensa alt. cuarzo-sericita-caolinita.
	20	E-1300	6.231.690N - 371.850E	2.940	Roca total	3,770	1,322	24,4	9,0 ± 0,3	△ And. con intensa alt. cuarzo-sericita-caolinita.
Brecha Extravío	21	ES12-595,40 m	6.230.662N - 377.060E	3.205 (2)	Roca total	4,908	0,955	67,4	5,0 ± 0,3	○ Borde sericitizado de clastos andesíticos.

Nota: Determinaciones efectuadas por el Laboratorio de Geocronología del Servicio Nacional de Geología y Minería, excepto la No. 5, que fue realizada por Francisco Munizaga en la Universidad de California.

Constantes usadas: $\lambda_{\beta} = 4,962 \times 10^{-10}$ años⁻¹; $\lambda_{\epsilon} = 0,581 \times 10^{-10}$ años⁻¹; $^{40}\text{K}/\text{K}$ total = 0,1167 (Puig, 1982).

Muestras recolectadas por: ○ P. Cuadra; ⊗ P. Cuadra - R. Morel; ◇ P. Cuadra - R. Gómez; △ R. Morel; □ R. Gómez; ☆ R. Charrier - R. Gómez.

(1): En Yacimiento El Teniente, sistema de coordenadas mina; en área adyacente, coordenadas UTM.; (2): Cota empate sondaje vertical ES-12.

TABLA 3. EDADES K-Ar OBTENIDAS POR OTROS AUTORES
PARA ROCAS DEL AREA

Muestra No.	Unidad Geológica	Material Analizado	Edad y Error (Ma $\pm$ 2 σ)
CP-4 $\circ$	Pórfido Teniente	Biotita	4,63 $\pm$ 0,16
CP-5 $\circ$	Pórfido Teniente	Biotita	4,69 $\pm$ 0,18
CP-7 $\circ$	Pórfido Teniente	Biotita	4,77 $\pm$ 0,18
CP-10 $\circ$	Pórfido Teniente	Biotita	4,65 $\pm$ 0,18
117 $\circ$	Andesita biotitizada	Roca total	4,44 $\pm$ 0,17
SPK 3862 $\otimes$	Formación Farellones	Roca total	9,2 $\pm$ 0,3
SPK 3867 $\otimes$	Formación Farellones	Roca total	8,3 $\pm$ 0,1
SPK 3868 $\otimes$	Formación Farellones	Roca total	14,1 $\pm$ 0,6
SPK 3863 $\otimes$	Coladas de valle	Roca total	2,3 $\pm$ 0,2
SPK 3855 $\otimes$	Coladas de valle	Roca total	1,8 $\pm$ 0,2
SPK 3866 $\otimes$	Coladas de valle	Roca total	1,8 $\pm$ 0,4

Referencias: $\circ$ Clark *et al.*, 1983; $\otimes$ Charrier y Munizaga, 1979

que presentan algunos clastos de andesita, descritos en el sondaje vertical ES-12. En el área de Olla Blanca se seleccionaron dos muestras de superficie, de andesita descolorada, que presentan una intensa alteración cuarzo-sericita-caolinita, característica de este sector.

Además de lo anterior, se efectuó un muestreo de las unidades post Farellones, presentes en el área Colón-Coya, como también de las andesitas de la Formación Farellones. En la última, se trató que las muestras correspondieran a rocas sin alteración hidrotermal y que estuvieran ubicadas lo más cerca posible del yacimiento El Teniente, para determinar, con mayor exactitud, la probable edad de sus rocas de caja.

En las figuras 1 y 3 se ha indicado la ubicación de las muestras datadas. Las determinaciones de edad fueron efectuadas mediante el método K-Ar en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Nacional de Geología y Minería, con una sola excepción ya mencionada. La metodología de análisis y determinación de edades es la indicada por Puig (1982). Los resultados que se informan en el presente trabajo se muestran en la tabla 2. Como información complementaria, se han recopilado, en la tabla 3, las edades obtenidas por otros autores para rocas del área, todo lo cual se ha resumido en la figura 4.

Los resultados obtenidos, hasta la fecha, permiten consolidar el esquema evolutivo general del yacimiento El Teniente y determinar su relación, en el tiempo, con algunos de los eventos geológicos presentes en el área.

Las edades obtenidas para la alteración tardi-

magmática de los intrusivos mayores, permite concluir que la Diorita Sewell es el más antiguo del yacimiento, lo que concuerda con las relaciones de alteración y mineralización hasta ahora conocidas, desarrollando una alteración potásica propia. Por otra parte, el pórfido diorítico del sector de Laguna Negra (E-1359) tiene la misma edad que la Diorita Sewell, lo cual corresponde con la idea de que ésta forma parte de una serie de cuerpos dioríticos de distribución regional. Los valores de edad obtenidos en el intrusivo del yacimiento presentan un error considerable, el cual es atribuible a la alteración que presentan las muestras, como también al hecho que fueron medidos en roca total. Esto último se debe a que el volumen disponible de muestra no era suficiente para permitir la separación y análisis de biotita, que es el método más apropiado para rocas de grano grueso.

En cuanto al Pórfido Teniente, la edad de la alteración potásica asociada (incluyendo las andesitas biotitizadas) había sido bien establecida por Clark *et al.* (1983), por lo que las edades que se presentan ahora confirman esa información. En general, se puede hablar de un rango de edad alrededor de los 4,6-4,7 Ma, considerando los errores de las determinaciones. El valor de 4,0 $\pm$ 0,4 Ma, que presenta la muestra T6-109, escapa del rango dado y esto podría deberse a la presencia de clorita como alteración parcial de la biotita, lo cual puede afectar la datación.

La formación de la Chimenea Braden, dada su relación de contacto con las rocas circundantes, constituye un evento claramente posterior a la intrusión de la Diorita Sewell y del Pórfido Teniente.

Los resultados obtenidos en la datación de la alteración sericitica, en el borde de clastos andesíticos (Foto 5), incluidos tanto en la Brecha Marginal como en la Brecha Braden, indican que esta megaestructura se formó en un período muy cercano a la fase tardimagmática del Pórfido Teniente (4,7-4,5 Ma), quedando este lapso perfectamente comprendido dentro del error de las determinaciones.

Este último resultado se ve reafirmado por la edad determinada para el dique de lamprófido, que es de $3,8 \pm 0,3$ Ma, lo cual marca la terminación del proceso de alteración-mineralización en el yacimiento. La edad del dique de igual composición, que aflora en Caletones, es similar al de la mina ($2,9 \pm 0,6$ Ma), por lo que esta información resulta bastante consistente.

El hecho de que el rango de edad determinado para las etapas mencionadas sea tan estrecho, hizo innecesaria la datación de los eventos intermedios, particularmente de la etapa hidrotermal principal, ocurrida entre la etapa temprana y la hidrotermal tardía.

Dentro de las zonas de alteración estudiadas, se determinó que la de Olla Blanca constituye un evento claramente anterior al yacimiento El Teniente, con una edad aproximada de 9 Ma. El error asociado a la determinación de la muestra E-1299 puede atribuirse a que, esta muestra en particular, presenta un contenido muy bajo de sericitita (<10% en volumen) y de distribución irregular, lo cual se refleja en el bajo contenido de potasio. En el sector de las lagunas Negra y La Huifa, la Brecha Extravío tiene una edad comparable con la de El Teniente ($5,0 \pm 0,3$ Ma), por lo que podría

constituir un fenómeno relacionado con este último.

El complejo de rocas andesíticas, descrito como Unidad Cerro Montura, es más antiguo que los intrusivos dioríticos del área (8,2-9,0 Ma). La diferencia de edad, que se verifica entre la muestra E-1233 ($6,6 \pm 0,4$ Ma) y el resto de las rocas incluidas en la misma unidad, podría explicarse en base a que, siendo una roca de grano grueso, con plagioclasa y augita como componentes principales, es factible que la edad medida sea distinta de la real, dada la baja retentividad de argón de las plagioclasas y el bajo contenido de potasio de la muestra. Por el contrario, las muestras E-1292 y E-1425 son de grano más fino y presentan mayor contenido de potasio, en tanto que en la muestra E-1363 fue posible separar y datar biotita más o menos fresca.

Las rocas de la Unidad Cerro Montura son contemporáneas con la alteración hidrotermal desarrollada en Olla Blanca. Sin embargo, aun cuando se ubican relativamente próximos entre sí (4 km), los estudios efectuados en superficie, hasta la fecha, no muestran relación alguna de contacto (Gómez, en prep.).

Finalmente, las rocas que constituyen la Formación Colón-Coya representan la actividad volcánica más reciente del área. Las edades obtenidas por Charrier y Munizaga (1979), en coladas andesíticas intercaladas en depósitos laháricos, y la obtenida en el presente trabajo para un estrato de ceniza, también intercalado en depósitos laháricos, sitúan esta formación en el Plioceno-Pleistoceno (2,3-1,3 Ma).

CONCLUSIONES

La Diorita Sewell es el intrusivo más antiguo del yacimiento, desarrollando una alteración potásica propia, cuya edad se ubica alrededor de los 7 Ma y coincide con la edad de otros intrusivos del área. El período principal de alteración-mineralización, relacionado al Pórfido Teniente, ocurrió hace 4,7-4,6 Ma, en tanto que la Chimenea Braden se formó inmediatamente después, por lo que las cuatro etapas principales de alteración ocurrieron en un lapso relativamente corto (dentro del rango de error del método K-Ar). El proceso de alteración-mineralización cesó antes de los 3,8 Ma, como

lo demuestra la edad del dique de lamprófido, estructura claramente post mineral.

Además, se ha determinado, en forma general, las edades de distintos eventos volcánicos, intrusivos y de alteración hidrotermal, presentes en el área. Se ha reconocido la existencia de un volcanismo post Farellones, descrito como Unidad Cerro Montura, cuya edad es de 8,2-9,0 Ma contrastando con la edad determinada para rocas de la Formación Farellones en el área (10,2-10,9 Ma). Este evento volcánico es sincrónico con el desarrollo de la alteración de Olla Blanca, pero no se ha encon-

trado relaciones de contacto entre ellas. En la zona de alteración de las lagunas Negra y La Huifa, aflora un intrusivo diorítico de igual edad que la Diorita Sewell, por lo que se estima que corresponden a la franja de intrusivos de distribución regional, y una brecha de turmalina, Brecha Extravío, de edad comparable a la de El Teniente ($5,0 \pm 0,3$ Ma).

Los depósitos laháricos con niveles de cenizas y lavas andesíticas intercaladas, descritos como Formación Colón-Coya, constituyen el evento volcánico más reciente del área, con edades que la sitúan en el Plioceno-Pleistoceno. Los estudios de superficie y la información geocronológica han descartado la hipótesis de su proveniencia desde un supuesto centro volcánico ubicado en Olla Blanca, el cual tampoco existiría. Su origen deberá buscarse en sectores fuera del área estudiada.

Sin embargo, no todo está dicho en cuanto a los eventos que ocurren en el área y, desde este punto de vista, el proyecto contempla la obtención de una mayor cantidad de valores en los casos en que se han obtenido errores considerables o se cuenta con pocos análisis. Recientemente, se ha reconocido que la Diorita Sewell constituye un complejo que contiene fases intrusivas y de alteración, hasta hace poco desconocidas, y que podrían cambiar, en cierta medida, el esquema evolutivo que se tiene, hasta ahora, para el yacimiento. La diferencia de edad entre la alteración potásica de este intrusivo y la del Pórfido Teniente indica la existencia de al menos una etapa de alteración, claramente separable de la etapa temprana, descrita hasta ahora en forma global para el yacimiento, cuya importancia deberá ser definida mediante estudios de detalle.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al Proyecto No. 249 del PICG "Magmatismo Andino".

El autor desea expresar su agradecimiento al señor Alfredo Enrione, Jefe del Departamento de Geología de División El Teniente, por la iniciativa y apoyo prestado al desarrollo de este trabajo. Al Sr. Reynaldo Charrier, profesor de la Universidad de Chile, por su constante interés y valiosas sugerencias. El Sr. Charrier, además, coordinó la determinación de edad efectuada por Francisco Munizaga, profesor de la misma Universidad. A los colegas Miguel Hervé y Alvaro Puig, del Servicio Nacional de Geología y Minería, por su participación en la definición del proyecto y por su constante interés en allanar las dificultades surgidas en

el proceso de análisis. A mi colega y amigo, Rodrigo Morel, por su desinteresada y valiosa cooperación en el aporte de antecedentes para el desarrollo del proyecto. A mi amigo, Rodrigo Gómez, con quien compartimos ideas y trabajo de terreno en la recolección de muestras del área Sewell-Coya. Al Sr. Enrique Tidy, Jefe del Departamento de Geología de CODELCO Central, por su interés y cooperación en la ejecución del proyecto. A los Sres. Francisco Camus, Fernando Henríquez y Miguel Hervé, quienes revisaron y criticaron el manuscrito. A la Sra. Vanessa Miranda, por su paciencia en la realización de los diferentes borradores del trabajo, y al Sr. Guillermo Figueroa, por la realización de los dibujos.

REFERENCIAS

- CAMUS, F. 1975.** Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wall-rock alteration. *Econ. Geol.*, Vol. 70, No. 8, p. 1341-1372.
- CAMUS, F. 1977.** Geología del área de emplazamiento de los depósitos de cuarzo Olla Blanca, Provincia de Cachapoal. *Rev. Geol. Chile*, No. 4, p. 43-54.
- CHARRIER, R. 1981.** Geologie der chilenischen Hauptkordillere zwischen 34° und $34^{\circ} 30'$ südlicher Breite und ihre tektonische, magmatische und paläogeographische Entwicklung. *Berliner Geowissenschaft Abhandlung*, (A), No. 36, 270 p.
- CHARRIER, R.; MUNIZAGA, F. 1979.** Edades K-Ar de volcanitas cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal, Chile ($34^{\circ} 15'$ Lat. sur). *Inst. Invest. Geol., Rev. Geol. Chile*, No. 7, p. 41-51.
- CLARK, A.H.; FARRAR, E.; CAMUS, F.; QUIRT, G.S. 1983.** K-Ar age data for the El Teniente porphyry copper deposit, Central Chile. *Econ. Geol.*, Vol. 78, No. 5, p. 1003-1006.
- CUADRA, P. 1985.** Exploración del prospecto La Huifa-La Negra. Informe de etapa. Codelco-Chile, Div. El Teniente (Inédito), 31 p.
- ENRIONE, A. 1972.** Estabilidad de los terrenos del área de Alto Colón. *Soc. Minera El Teniente*, Depto. Geol. (Inédito), 10 p.
- FAUNEZ, A. 1981.** Caracterización de la mineralogía

- metálica y de alteración en un sector del stock tonalítico del yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol., 175 p. Santiago.
- GOMEZ, R. (en prep.)** Geología del área Coya-Colón. Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol.
- HOWELL, F.H.; MOLLOY, J.S. 1960.** Geology of the Braden orebody, Chile, South America. Econ. Geol., Vol. 55, No. 5, p. 863-905.
- KUSAKABE, M.; NAJAGAWA, S.; HORI, M.; MATSUHISA, Y.; OJEDA, J.M.; SERRANO, L. 1984.** Oxygen and sulfur isotopic composition of quartz, anhydrite and sulfide minerals from the El Teniente and Río Blanco porphyry copper deposits, Chile. Geol. Surv. Jap., Bull., Vol. 35, p. 583-614.
- MESTRE, A. 1982.** Distribución y caracterización de la mineralización de molibdeno en el yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol., 127p. Santiago.
- MOREL, R. 1984.** Exploración del prospecto Olla Blanca. Codelco-Chile, Div. El Teniente (Inédito), 16 p.
- OJEDA, J.; HERNANDEZ, E.; OSSANDON, G.; ENRIONE, A.; MESTRE, A. 1980.** El pórfido cuprífero El Teniente. Codelco-Chile, Div. El Teniente (Inédito), 72 p.
- ORTEGA, H. 1981.** Geología de la Chimenea de Brecha Braden y su relación en el yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Univ. del Norte, Depto. Geocienc., 137 p. Antofagasta.
- OSSANDON, G. 1974.** Petrología y alteración del pórfido dacítico, yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol., 116 p. Santiago.
- PUIG, A. 1982.** Instrucciones para obtención de muestras para estudio geocronológico, método K-Ar. Serv. Nac. Geol. Miner., Misc., No. 1, 6 p.
- QUIRT, G.S.; CLARK, A.H.; FARRAR, E. 1971.** potassium-argon ages of porphyry copper deposits in northern and central Chile. [Abstr.] Geol. Soc. Am., Abstr., Vol. 3, No. 7, p. 676-677.
- REYES, J.C. 1979.** Estudio geológico estructural del yacimiento El Teniente. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 96 p. Santiago.
- VILLALOBOS, J. 1975.** Alteración hidrotermal en las andesitas del yacimiento El Teniente, Chile. Tesis de Doctorado. Univ. Chile, Depto. Geol., 125 p. Santiago.
- ZUÑIGA, P. 1982.** Alteración y mineralización hipógenas en el sector oeste del yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol., 104 p. Santiago.

Trabajo recibido: 22-04-86; aceptado: 10-10-86