

Estudio geoquímico prospectivo en un distrito de Cu-Au-Hg asociado a zona de cizalla: Punitaqui, Chile

J. Oyarzún⁽¹⁾, R. Oyarzun⁽²⁾, y S. Pavicic⁽³⁾

(1) Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena, Casilla 554, La Serena, Chile.

(2) Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense, 28040 Madrid, España.

(3) SRK Consultores, Matilde Salamanca, 736, 5°, Providencia, Santiago, Chile

RESUMEN

El distrito de Punitaqui se localiza en una zona montañosa semi árida de la Cordillera de la Costa de la región norte de Chile central. El distrito alberga una serie de mineralizaciones filonianas de Cu-Au-Hg, que se emplazan a lo largo del sector occidental de una zona de cizalla NNE de unos 200-400 m de potencia. La zona de cizalla separa a granitoides del Cretácico medio de una secuencia principalmente volcánica (andesitas y andesitas basálticas) de edad Valanginiense. Como base para la búsqueda de nuevas reservas en el distrito se realizaron estudios estructurales y geoquímicos. El estudio estructural indicó la existencia de fenómenos de superposición de una fábrica frágil sobre otra dúctil en la zona de cizalla, así como la existencia de una importante zona de transpresión. Se tomaron más de 160 muestras de suelo para el estudio geoquímico. Estas fueron recolectadas a lo largo del sector oeste de la zona de cizalla y a través de secciones perpendiculares a ésta. El estudio incluyó además 20 muestras de rocas, y 5 de minerales de mena. Las muestras se analizaron por 48 elementos, mediante extracción total. Adicionalmente, se analizaron 59 elementos por el método de extracción enzimática. Au, Cu, Ag, Hg, Sb, y As "totales", así como el Au y el Sb "enzimáticos" probaron ser los mejores trazadores geoquímicos para la detección de cuerpos mineralizados no aflorantes. El estudio geoquímico permitió descartar sectores a lo largo de la zona de cizalla, restringiendo el interés a la parte norte (sector Culebra-Viña Vieja). Sondeos realizados en esta zona mostraron la existencia de recursos minerales (Au-Cu) del orden de los 9 Mt.

Palabras clave: Chile, Cretácico, filones, método enzimático, prospección geoquímica, Punitaqui, zona de cizalla

Exploration geochemistry in a shear-zone related Cu-Au-Hg district: Punitaqui, Chile

ABSTRACT

The Punitaqui district is located within a hilly semiarid region of the Coastal Cordillera of northern central Chile. The district hosts Cu-Au-Hg vein deposits emplaced along the western side of a 200-400 m wide NNE trending shear zone. The shear zone separates a Middle Cretaceous granitoid from a mainly volcanic sequence (andesites and basaltic andesites) of Valanginian age. Exploration for new reserves in the district required detailed structural and geochemical works. The structural study of the shear zone allowed recognition of brittle-on-ductile overprinting (mylonite to breccia) phenomena along the shear zone, and the existence of a major restraining (contractional) bend within the district. Over 160 soil samples were taken for the geochemical study, both along the western side of the shear zone, and along sections cross-cutting the structure. The survey also included 20 samples from rocks and 5 from ores. The samples were analyzed for 48 elements (total extraction). Additionally, 59 elements were analyzed in the soil samples by the enzyme leach extraction technique. Total Au, Cu, Ag, Hg, Sb, and As, as well as 'enzymatic' Au and Sb proved to be the best tracers for hidden orebodies. The geochemical survey allowed definition of a major target in the northern part of the district (Culebra-Viña Vieja zone). A drilling campaign (DDH) showed the existence of gold-copper mineral resources (9 Mt) in that zone.

Key words: Chile, Cretaceous, enzyme leach extraction, exploration geochemistry, Punitaqui, shear zone, vein-type

Introducción

El Distrito de Punitaqui (30°52'30"S, 71°14'30"W) se localiza en la Región de Coquimbo (IV Región), Chile (Fig. 1). El distrito comprende tres yacimientos filonianos de Cu-Au-Hg (Los Mantos, Delirio, Milagro),

emplazados a lo largo de una zona de cizalla de dirección N25°E, inclinada unos 70° al W. Los Mantos, situado en su extremo NE (Fig. 2) fue descubierto en 1785 y explotado por mercurio, y posteriormente por oro y cobre hasta su cierre en 1956. Delirio, en su extremo SW, fue explotado principalmente por cobre,

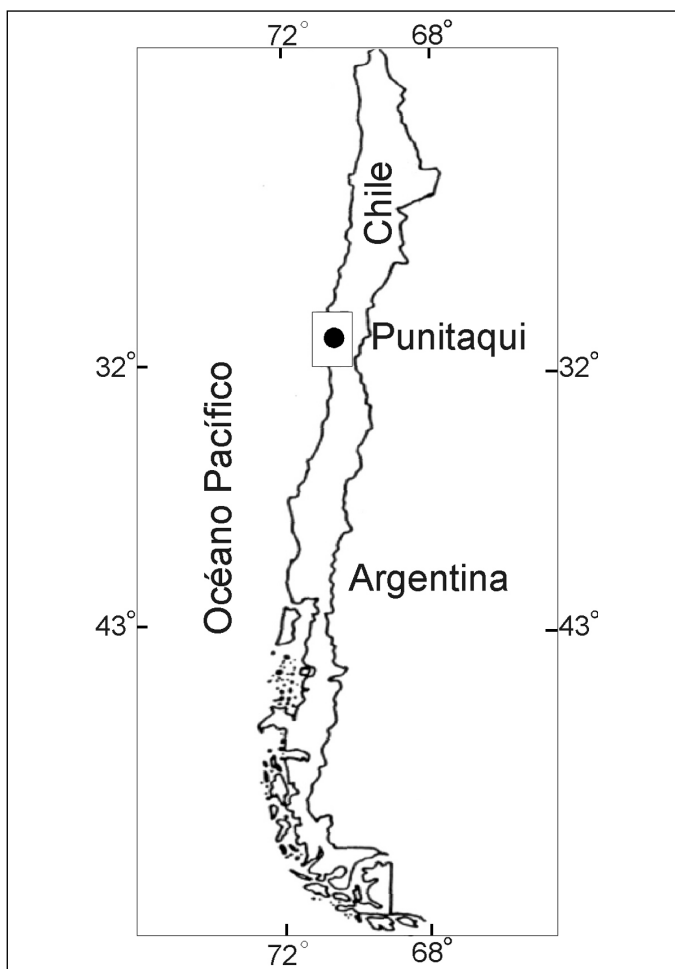


Fig. 1. Localización del distrito minero de Punitaqui
 Fig. 1. Location of the Punitaqui mining district

El distrito de Punitaqui

Marco geológico

El distrito de Punitaqui se localiza en la Cordillera de la Costa de la Región de Coquimbo, en una zona de relieve moderado, donde los cerros alcanzan unos 600-700 m de altura, mientras que la base de las quebradas principales está a unos 200-250 m de altura.

La geología del distrito (Thomas, 1967; Pavicic, 1998) está dominada por una zona de cizalla NNE, de 200-400 m de potencia, que en ese segmento coincide con el contacto entre una formación volcánico-sedimentaria de edad Valanginiense de unos 1.000 m de potencia, y un intrusivo granodiorítico al E datado en 114 ± 3 Ma (Adriazola, 1997) (Fig. 2). Las rocas estratificadas, cuyo dirección general es N-S, presentan buzamientos variables al E y al W. Están constituidas por andesitas y andesitas basálticas, mayoritariamente porfídicas (ocoítas). También se observan intercalaciones menores de areniscas y calizas marinas, en parte granatizadas. Estas rocas se agrupan en la unidad Estratos del Reloj (Thomas, 1967). En su contacto con el intrusivo presentan distintos grados de metamorfismo de contacto y alteración. Especialmente notable es la presencia de andesitas porfídicas cuya masa fundamental está cloritizada y blanqueada, y cuyos fenocristales albitizados de plagioclasa presentan color negro y fuerte magnetismo debido a la presencia de pequeñas inclusiones secundarias de magnetita. Estas rocas son parte de una extensa provincia volcánica de edad Cretácico inferior, con características geoquímicas tipo MORB, y que ha sido interpretada como el resultado de efusiones generadas en una cuenca ensiálica donde se desarrollaron fenómenos de rifting propios de una evolución abortada hacia una cuenca de tipo marginal (Levi *et al.*, 1987).

La zona de cizalla, que en el segmento del distrito se inclina unos 70° al W, está definida por una faja de deformación dúctil, intensamente foliada, de carácter milonítico, que afecta principalmente a las rocas estratificadas. A ésta se sobreimpone una deformación frágil ("brittle-on-ductile"), con desarrollo de brechas de trituración (Pavicic, 1998), que presentan variadas razones clasto/matriz, así como marcadas diferencias en el tamaño (2 cm a 2 m) y redondeamiento de los clastos. Estos últimos están constituidos por materiales calcáreos, andesíticos, miloníticos y fragmentos de filones. A las estructuras extensionales desarrolladas durante la etapa de deformación frágil se atribuyen los espacios que permitieron el emplazamiento de los cuerpos filonianos del distrito.

Hacia el sur del distrito, la zona de cizalla continúa

durante la primera mitad del siglo XX. El tercer yacimiento, Milagro, fue descubierto mediante labores y sondeos, y se explotó por oro y cobre hasta su cierre temporal en 1998, situación inducida por la baja de los precios del oro.

El estudio geoquímico que se expone (Oyarzún *et al.*, 1998) fue realizado como parte de una investigación geológico-estructural del distrito (Doblas, 1997; Oyarzún y Pavicic, 1998; Pavicic, 1998), que incluyó trabajos de cartografía a escalas entre 1:10.000 y 1:500, así como estudios petrográficos, mineralógicos y de inclusiones fluidas. La realización de este estudio tuvo el propósito de determinar la expresión geoquímica superficial de los cuerpos no-aflorantes, a través de una metodología analítica clásica (ataque ácido "total") y otra enzimática. Ello como base para investigar la posible presencia de nuevos cuerpos mineralizados a lo largo de las prolongaciones estructurales del distrito.

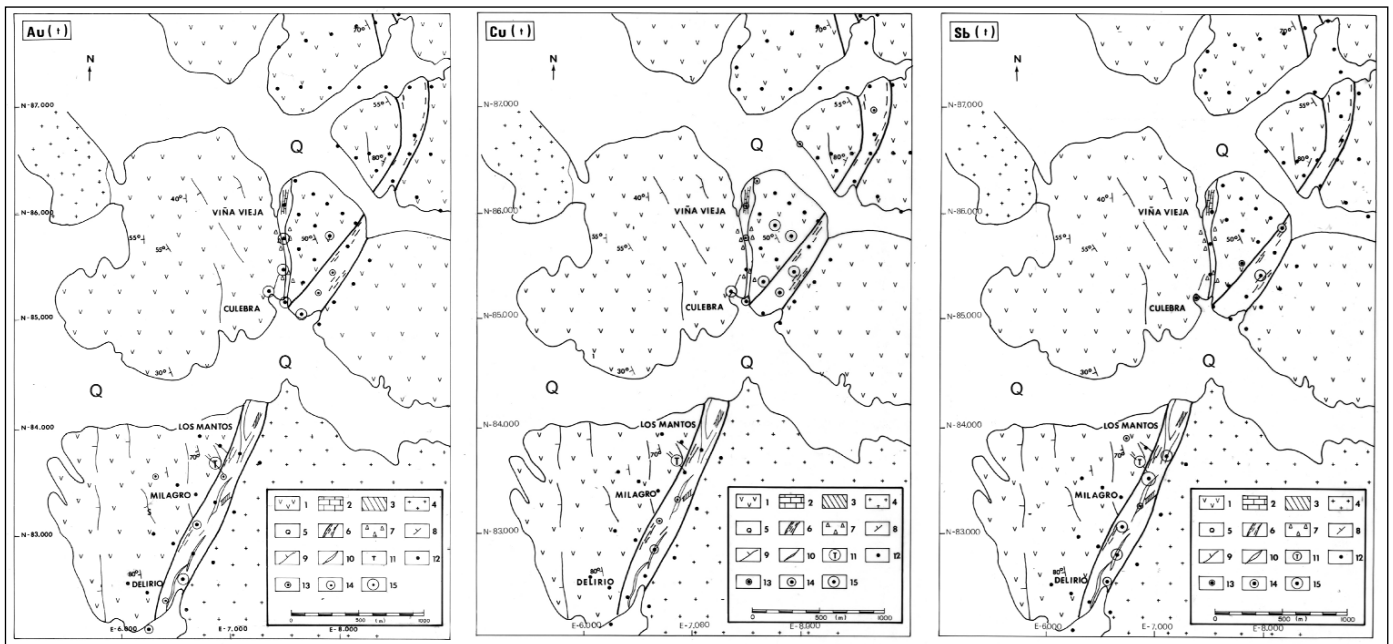


Fig. 2: a (Au): 1- Formación Estratos del Reloj; rocas volcánicas y volcanoclasticas. 2- Idem; rocas carbonatadas. 3- Idem; granititas. 4- Batolito granodiorítico. 5- Sedimentos aluviales cuaternarios. 6- Zona de cizalla; rocas miloníticas foliadas. 7- Brechas tectónicas. 8- Dirección y buzamiento. 9- Vetas periféricas (Au - Cu). 10- Vetas principales del distrito. 11- Vetas "tensionales". 12- Punto de muestreo. Au < 35 ppb ($< \bar{X} + 1 \sigma$). 13- Idem. Au: 36 - 55 ppb ($\bar{X} + 1 \sigma - \bar{X} + 2 \sigma$). 14- Idem. Au: 56 - 75 ppb ($\bar{X} + 2 \sigma - \bar{X} + 3 \sigma$). 15- Idem. Au > 75 ppb ($> \bar{X} + 3 \sigma$). b (Cu): 1 a 11- Idem. 12- Punto de muestreo. Cu < 368 ppm ($< \bar{X} + 1 \sigma$). 13- Idem. Cu: 369-587 ppm ($\bar{X} + 1 \sigma - \bar{X} + 2 \sigma$). 14- Idem. Cu: 588-806 ppm ($\bar{X} + 2 \sigma - \bar{X} + 3 \sigma$). 15- Idem. Cu > 806 ppm ($> \bar{X} + 3 \sigma$). c (Sb): 1 a 11 Idem. 12- Punto de muestreo. Sb < 4.4 ppm ($< \bar{X} + 1 \sigma$). 13- Idem. Sb: 4,5 - 6,9 ppm ($\bar{X} + 1 \sigma - \bar{X} + 2 \sigma$). 14- Idem. Sb: 7.0 - 9.4 ppm ($\bar{X} + 2 \sigma - \bar{X} + 3 \sigma$). 15- Idem. Sb: > 9.4 ppm ($> \bar{X} + 3 \sigma$). Planos en coordenadas UTM.

Fig. 2: a (Au): 1- Estratos del Reloj Formation; volcanic and volcanoclastic rocks. 2- Same; carbonate rocks. 3- Same; garnet bearing rocks ("garnetite"). 4- Granodiorite. 5- Quaternary alluvial sediments. 6- Shear zone; mylonite. 7- Tectonic breccia. 8- Strike and dip. 9- Secondary veins (Au - Cu). 10- Main veins. 11- Extensional veins. 12- Sampling point. Au < 35 ppb ($< \bar{X} + 1 \sigma$). 13- Same; Au: 36 - 55 ppb ($\bar{X} + 1 \sigma - \bar{X} + 2 \sigma$). 14- Same; Au: 56 - 75 ppb ($\bar{X} + 2 \sigma - \bar{X} + 3 \sigma$). 15- Same; Au > 75 ppb ($> \bar{X} + 3 \sigma$). b (Cu): 1 to 11- Same. 12- Sampling point. Cu < 368 ppm ($< \bar{X} + 1 \sigma$). 13- Same. Cu: 369-587 ppm ($\bar{X} + 1 \sigma - \bar{X} + 2 \sigma$). 14- Same. Cu: 588-806 ppm ($\bar{X} + 2 \sigma - \bar{X} + 3 \sigma$). 15- Same. Cu > 806 ppm ($> \bar{X} + 3 \sigma$). c (Sb): 1 to 11 Same. 12- Sampling point. Sb < 4.4 ppm ($< \bar{X} + 1 \sigma$). 13- Same. Sb: 4,5 - 6,9 ppm ($\bar{X} + 1 \sigma - \bar{X} + 2 \sigma$). 14- Same. Sb: 7.0 - 9.4 ppm ($\bar{X} + 2 \sigma - \bar{X} + 3 \sigma$). 15- Same. Sb: > 9.4 ppm ($> \bar{X} + 3 \sigma$). Map in UTM coordinates.

a lo largo del contacto entre las rocas estratificadas y el batolito Cretácico, sin embargo allí se encuentra más erosionada y en parte cubierta por sedimentos aluviales. Hacia el norte, la zona de cizalla continúa por unos 2.500 m en la misma dirección NNE, antes de formar un codo y seguir la dirección N-S (Fig. 2). Sin embargo, la deformación mecánica frágil sigue directamente en dirección norte a lo largo de un horizonte carbonatado de dirección N-S de 40-50 m de potencia, por lo cual ambas estructuras divergen en superficie, aunque por efecto de sus inclinaciones convergen en profundidad. El posterior reconocimiento mediante sondeos demostró la importancia de dicho factor estructural en el control de la mineralización.

Las evidencias cinemáticas a escala de afloramiento son contradictorias respecto al carácter sinestral o dextral de la zona de cizalla. Doblas (1997) esti-

ma que el aplastamiento (cizalla pura) predominó sobre los movimientos de dirección. Sin embargo, la presencia de bloques de calizas granatizadas en la zona de cizalla del distrito, arrastrados desde el horizonte carbonatado aflorante al norte, indican un desplazamiento dextral (cizalla simple). Como sugieren Oyarzun y Pavicic (1998), es probable que la zona de cizalla haya jugado como estructura extensional (movimiento de falla normal) en su etapa inicial, pasando progresivamente a una componente dextral en una etapa más avanzada. A la primera etapa se asociaría el emplazamiento del granitoide y el comienzo de los fenómenos mineralizadores.

Los depósitos minerales

Los yacimientos del distrito son de tipo filoniano, y la

paragenesis (Adriazola, 1997) comprende un primer pulso con magnetita, cuarzo y calcita, que se completa con pirita y tetraedrita. En un segundo pulso se deposita hematites, calcopirita, bornita, oro nativo y cinabrio. Finalmente, asociada a la etapa supergénica, se forma calcosina, covellina, cobre nativo y cuprita. El proceso de mineralización no fue acompañado por fuerte alteración hidrotermal, siendo clorita el principal mineral de alteración. Aunque la arcilla es abundante, ella corresponde a esmectita, que probablemente derivó de sericita a través de procesos posteriores. Los tres yacimientos principales (Los Mantos, Milagro y Delirio) están emplazados en estructuras que cortan cuerpos de brecha de la zona

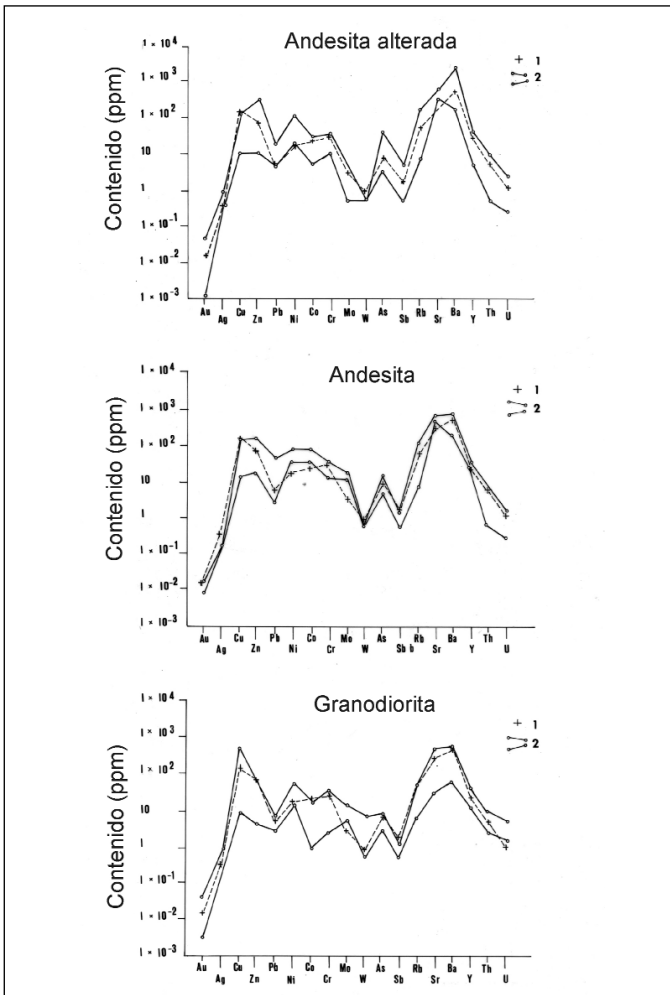


Fig. 3. Contenido, en ppm, de 18 elementos en muestras de andesitas alteradas, andesitas, y granodioritas, del distrito y su entorno. 1- Contenido promedio del elemento en los suelos del distrito. 2- Rango del elemento en el tipo de roca considerado
 Fig. 3: Contents in ppm of 18 elements in samples of altered andesites, andesites, and granodiorites of the district. 1- Mean content in soils. 2- ppm range in the different types of rocks.

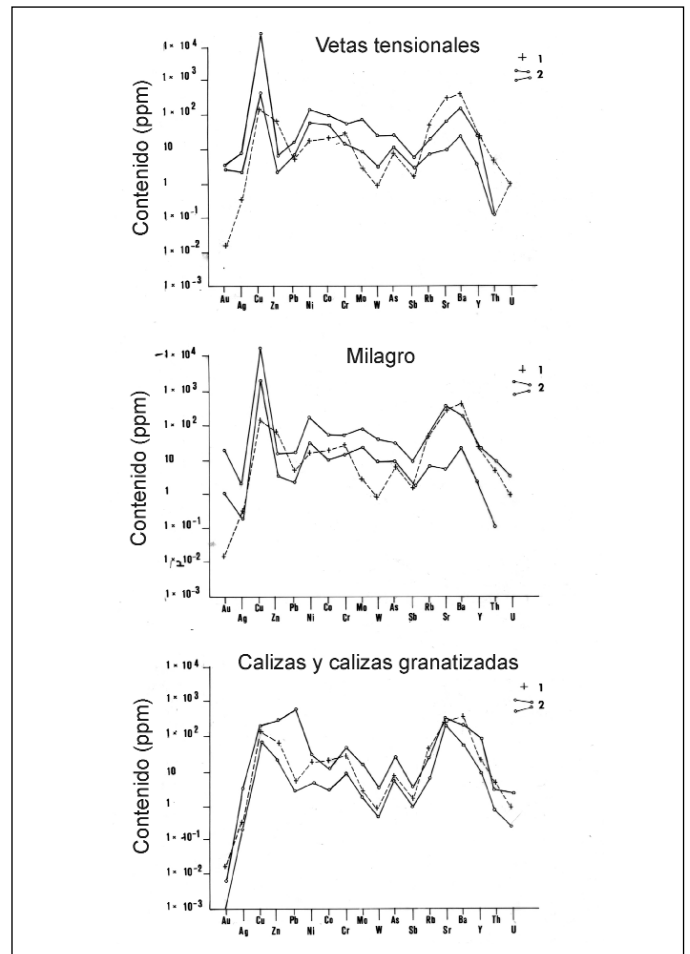


Fig. 4: Contenido, en ppm, de 18 elementos en muestras de vetas tensionales, veta Milagro, y calizas y calizas granatizadas del distrito y su entorno. 1- Contenido promedio del elemento en los suelos del distrito. 2- Rango del elemento en el tipo de roca considerado
 Fig. 4: Contents in ppm in samples from extensional veins, Milagro vein, and limestones and garnet bearing limestones. 1- Mean content in soils. 2- ppm range in the different types of rocks.

de cizalla. La geometría de los filones es compleja, ya que están muy ramificados y sus límites son irregulares. En general, su potencia aumenta en la medida que su dirección se aproxima a N-S, y su buzamiento a la vertical (Caddey y Brockway, 1998). Los filones principales (p.ej., Veta Los Mantos) alcanzan una persistencia del orden de 400 m, tanto en dirección como en profundidad, con un espesor medio de 5-10 m, que sobrepasa los 20 m en las zonas más favorables. Sus contenidos medios de oro son de 3-10 g/t, y los de cobre de 0,5 a 1,5 % en Los Mantos y Milagro, y de 2-3 % en Delirio. El mercurio alcanzó sus mayores leyes (0,4 %) en Los Mantos. El distrito tiene bajos contenidos de plata (inferiores a 10 g/t) y muy bajos de Pb y Zn, incluso en comparación con los conteni-

dos normales de las rocas (Figs. 3 y 4). Los principales minerales de ganga son calcita y cuarzo. Estudios de inclusiones fluidas en ambos minerales (Collao y Ortega, 1998), entregaron un rango de 378° - 123°C, con una media de 222°C, una moda principal de 220°C, y una secundaria de 295°C. En líneas generales, se observa un ligero pero sostenido descenso en las temperaturas desde Delirio a Los Mantos. Aunque la salinidad de los fluidos es muy variable (0,2 a 43,8 % en peso de NaCl equiv.), su moda se sitúa en 3 %. Las estimaciones de presión son del orden de unos 25 bar, lo que implica condiciones de precipitación inferiores a 500 m.

Aparte de los yacimientos mayores, existe un grupo de filones de potencia media (0,5-1 m que se sitúan al W de la zona de cizalla (Fig. 2), con dirección media N45°W y buzamiento de 60° SW. Estos filones reciben el nombre de "tensionales". La mineralogía de estos filones es similar a la de los cuerpos principales ya descritos.

Metodología del estudio geoquímico

Muestreo

El estudio comprendió el análisis de 160 muestras de suelos, 25 muestras de rocas y 5 muestras de menas del distrito (3 de Milagro y 2 de las llamadas "vetas tensionales"). Las muestras de suelos y de rocas fueron tomadas de una faja de 12 km de largo por 1 a 2 de ancho, cuyo eje mayor es paralelo a la dirección a la zona de cizalla. El muestreo de suelos se efectuó según 25 perfiles transversales y 5 perfiles paralelos a la zona de cizalla (Fig. 2a-c). Muestras de 0,5 kg fueron extraídas de suelos residuales poco profundos después de cavar hasta 25-30 cm de profundidad. Los suelos son de tipo pedocales y por sus condiciones de evolución bajo relieve pronunciado, en clima árido a semiárido, su composición es probablemente cercana a la de la roca madre. Las precipitaciones anuales se sitúan en torno a 110 mm, con lluvias distribuidas entre Abril y Agosto. Sin embargo, el muestreo, efectuado entre Septiembre y Octubre de 1998, fue realizado en un año afectado por el fenómeno cíclico de El Niño, de manera que ya habían precipitado unos 200 mm y una abundante vegetación herbácea cubría los cerros. Debido a que las lluvias torrenciales habían removido la cubierta aluvial que cubre las principales quebradas del distrito, se desechó la idea original de muestrear ese material y analizarlo por el método enzimático.

El muestreo de suelos se realizó sobre una base topográfico-geológica escala 1:10.000, con curvas de

nivel cada 25 m, y fue comprobado mediante GPS. Junto con extraer cada muestra, se midió la radiación gamma total, mediante un espectrómetro GIS-5, introduciendo el instrumento en la cavidad y apuntando al norte. En cada punto se efectuaron 10 lecturas, tomando el valor de la mediana como cifra representativa.

Métodos analíticos

Las muestras de suelos fueron preparadas y analizadas en los laboratorios de ACTLABS (Canadá) por las metodologías "Au + 47" y "enzimática" (enzyme leach). La primera, utilizada para la totalidad de las muestras tomadas, comprende la trituración y pulverización de las muestras a menos 150 mallas, seguido de ataque ácido "total" y análisis por ICP. Otra porción de la muestra triturada es analizada por activación neutrónica. Este procedimiento analítico fue utilizado también para las muestras de rocas y menas. Para más detalles consultar: <http://www.actlabs.com/geochemistry/international.htm>.

El ataque suave realizado por la modalidad enzimática se realiza sobre una porción de la muestra tamizada bajo 60 mallas y es seguido por análisis de la solución mediante activación neutrónica. Este método se utilizó solamente para muestras de suelos. Esta técnica mide la fracción más libre del contenido de cada elemento, la cual se encuentra principalmente ligada a fases de MnO₂ presente en la muestra. Tal fracción puede corresponder, al menos en parte, al aporte metálico proveniente de niveles profundos, por efecto de celdas electroquímicas u otros procesos de movilización (Clark, 1992, 1993). Para más detalles consultar: <http://www.actlabs.com/geochemistry/international.htm>.

Tratamiento de la información

Aunque en principio se dispuso de 48 elementos analizados por el método "total" y de 60 elementos analizados conforme a la técnica "enzimática", sólo 19 se exponen en el presente estudio. Estos cumplen con las condiciones de haber sido analizados por los dos métodos, con sensibilidades (límites de detección) adecuados a sus concentraciones en las muestras analizadas, así como con la de presentar un interés metalogénico directo o bien ser indicadores adecuados de tipos litológicos, o procesos de alteración hidrotermal. Los 19 elementos son: Au, Ag, Hg, Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Cr, Mo, W, As, Sb, Rb, Sr, Ba, Y, Th y U.

El tratamiento de la información obtenida median-

te el análisis de suelos por la modalidad "total" comprendió el cálculo de parámetros estadísticos básicos (corregidos mediante la eliminación provisoria de valores extremos), así como de la matriz de correlación y análisis de factores. Además se construyeron diagramas de log-probabilidades para Au, Cu, As y Sb. En cambio, la información analítica obtenida por el método enzimático, cuyo significado estadístico es menos definido, fue solamente separada en 6 intervalos de clase de igual ancho, naturalmente distintos para cada uno de los elementos considerados.

Resultados del estudio

Rocas y menas

Esta parte del estudio se realizó para contar con una base de comparación entre el contenido químico de los suelos y el de sus fuentes naturales de metales: rocas y menas. La otra posible fuente de metales: la contaminación por efecto de las actividades mineras, se evaluó considerando la relación entre el contenido metálico de las muestras de suelos y su posición geográfica y topográfica respecto a las minas y plantas de tratamiento. Como se puede deducir de las figuras 2a-c y 5 su efecto es mínimo, lo que se explica porque casi todas las muestras fueron tomadas a niveles topográficos superiores a los de las minas y plantas, así como por el carácter subterráneo de la mayor parte de las labores.

Otro objetivo del estudio de rocas y menas fue el de analizar la vinculación química de la mineralización respecto a las rocas volcánicas o a los intrusivos presentes en el área. Igualmente interesó investigar posibles diferencias geoquímicas entre las menas de los filones principales (p.ej. Milagro) y "tensionales".

Los resultados del estudio se exponen mediante "spider-diagrams" (Figs. 3 y 4). Entre las observaciones que se desprenden de su consideración está el mayor contenido de Zn, Ni, Co y Sr de las andesitas respecto a las granodioritas, las que en cambio tienen concentraciones mayores de Cu, Th y U. Las calizas están enriquecidas en Pb, pero empobrecidas en la mayoría de los metales.

El contenido promedio de los suelos es similar al de las andesitas y granodioritas en el caso de Au, Cu, Y y Th; es parecido al de las andesitas en el caso del Zn, Cr, As, Rb, Ba y U, y al de las andesitas alteradas en lo referente al Mo y Sb. En cambio se aproxima al de las granodioritas en lo referente a sus contenidos en Ag, Cu, Pb, Ni, W y Sr.

Los filones están enriquecidos en Au, Cu y Hg y hay una moderada concentración de Ag en los de tipo

tensional. En menor grado, tienen mayores contenidos de Ni, Mo, W, As y Sb que las rocas ígneas asociadas. Sin embargo presentan bajas concentraciones de Zn, Pb, Rb, Sr, Ba y Th. Al respecto llama la atención el Zn, cuyo contenido en los filones es muy inferior al de las rocas y suelos del distrito.

Suelos

Análisis por el método total

Los contenidos medios y medios corregidos (mediante el procedimiento de eliminar los valores superiores a $\bar{x} + 2\sigma$, recalculando el valor de \bar{x} y de σ) se exponen en la Tabla 1.

Los contenidos antes señalados no difieren significativamente de los de las rocas ígneas del distrito, y exceptuando los directamente asociados a las menas, son muy similares a los valores promedios calculados para las rocas ígneas chilenas (López *et al.*, 1979, 1995; Oyarzún *et al.*, 1993). Ello se explica por la escasa evolución de los suelos, producto del clima árido y de la topografía montañosa del sector.

La distribución de las concentraciones de Cu, Au, As y Sb en diagramas log-probabilísticos (Fig. 6) muestra una distribución recta simple para el Cu, pese a la amplia dispersión de sus valores, que va de una decena a miles de ppm, como se podría esperar de un proceso que hubiera tomado y redistribuido los contenidos de dicho elemento. En cambio, el oro presenta una distribución compleja e irregular. Respecto al As y Sb llama la atención el paralelismo que presentan sus distribuciones, cada una de las cuales exhibe dos cambios de pendiente, que sugieren la presencia de tres poblaciones.

Los coeficientes de correlación de Pearson son bajos para los elementos de mayor interés metalogénico. El oro sólo se correlaciona débilmente con Cu (0,36), y este último con Ag (0,27), As (0,35) y Co (0,38). En cambio la plata presenta mejores correlaciones con As (0,40), Pb (0,49), Sb (0,51), Zn (0,55) y Ca (0,61). También hay buenas correlaciones entre As y Sb (0,51) y entre Pb y Zn (0,69) al igual que entre elementos sin interés metalogénico directo (p.ej. K-Rb: 0,65; Ni-Cr: 0,69 y U-Th: 0,69). La única correlación negativa significativa es la de Th-Mg (-0,52). Por otra parte, la distribución espacial de los vectores en el diagrama factorial presentado en la Fig. 7, muestra algunas agrupaciones de interés, como las de Cr, Ni, Hg, Sb y Au (que puede sugerir un origen "máfico" para el Au y el Hg, lo cual sería razonable dada la presencia de facies ocoíticas a escala regional y distrital), la de Ag con Cu, Pb, As y Ca, y las naturalmente espe-

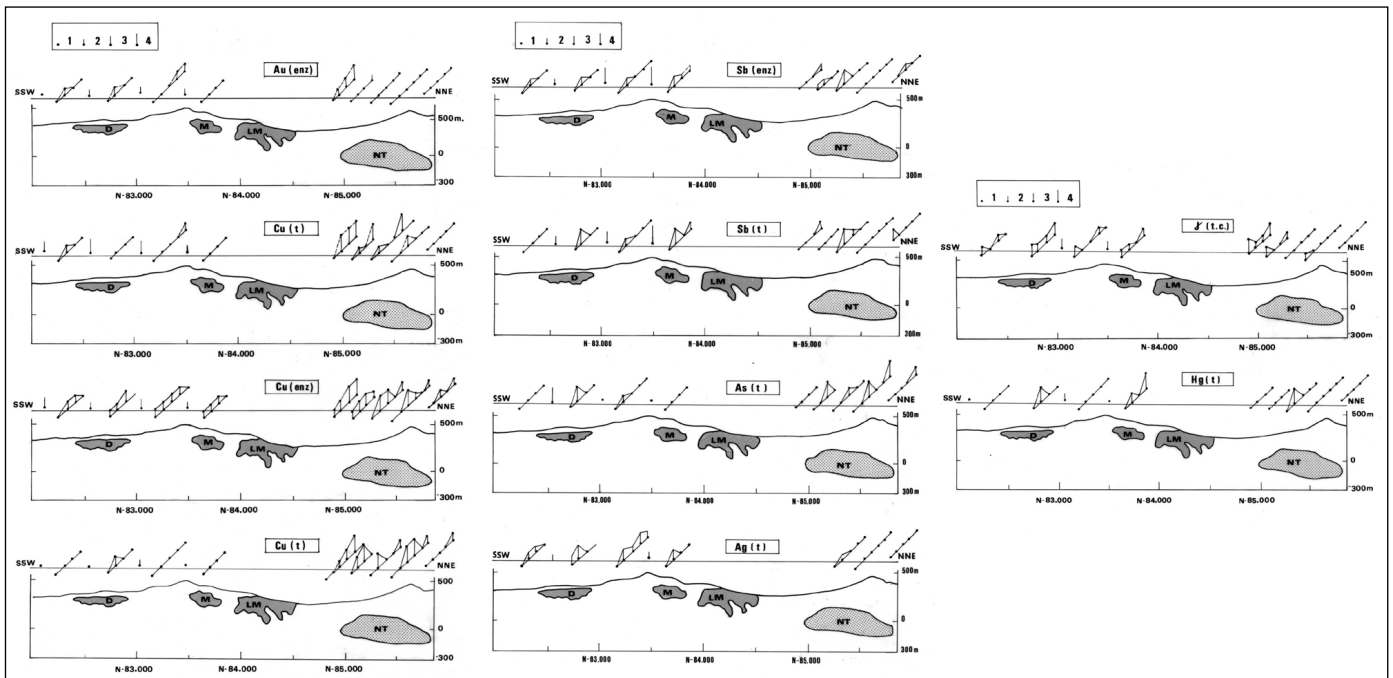


Fig. 5. a: Representación de los contenidos de Au y Cu “totales” (t) y “enzimáticos” (enz) sobre un perfil SSW-NNE del distrito y sus yacimientos principales. D: Delirio. M: Milagro. LM: Los Mantos. NT: nuevo blanco (“target”) de exploration. 1-4: contenidos químicos. Au (enz): 1: < 0.2 ppb; 2: 0.2-0.3 ppb; 3: 0.4 -0.5 ppb; 4: > 0.5 ppb. Au (tot): 1: 35 ppb; 2: 36-55 ppb; 3: 56-75 ppb; 4: > 75 ppb. Cu (enz): 1: < 200 ppb; 2: 200-600 ppb; 3: 601-1000 ppb; 4: > 1000 ppb. Cu (tot): 1: < 368 ppm; 2: 369-587 ppm; 3: 588- 806 ppm; 4: > 806 ppm. b: Idem. 1-4: Contenidos químicos. Sb (enz): 1: < 10 ppb. 2: 10-30 ppb; 3: 31-50 ppb; 4: > 50 ppb. Sb (tot): 1: < 4.4 ppm; 2: 4,5 - 6,9 ppm; 3: 7 - 9,4 ppm. 8: > 9.5 ppm. As (tot): 1 < 13 ppm; 2: 13-18 ppm; 3: 19-23 ppm; 4: > 23 ppm. Ag (tot): 1 < 0.63 ppm; 2: 0.63-0.90 ppm; 3: 0.91-1.17 ppm; 4: > 1.17 ppm. c: Idem. 1-4: Rangos de radiación gamma (cuentas totales: t.c., 10 seg): 1: < 1500; 2: 1500 - 2000; 3: 2001- 2500; 4: > 2500. Contenidos químicos: Hg (tot). 1: < 3.4 ppm; 2: 3.4 - 5.9 ppm; 3: 6.0 - 8.4 ppm; 4: > 8.4 ppm. Perfiles transversales y longitudinales

Fig. 5: a: Total (t) and enzymatic (enz) contents along a SSW-NNE section of the district, indicating the main deposits. D: Delirio. M: Milagro. LM: Los Mantos. NT: New exploration target. 1-4: Chemistry. Au (enz): 1: < 0.2 ppb; 2: 0.2-0.3 ppb; 3: 0.4 -0.5 ppb; 4: > 0.5 ppb. Au (tot): 1: 35 ppb; 2: 36-55 ppb; 3: 56-75 ppb; 4: > 75 ppb. Cu (enz): 1: < 200 ppb; 2: 200-600 ppb; 3: 601-1000 ppb; 4: > 1000 ppb. Cu (tot): 1: < 368 ppm; 2: 369-587 ppm; 3: 588- 806 ppm; 4: > 806 ppm. b: Same. 1-4: Chemistry. Sb (enz): 1: < 10 ppb. 2: 10-30 ppb; 3: 31-50 ppb; 4: > 50 ppb. Sb (tot): 1: < 4.4 ppm; 2: 4,5 - 6,9 ppm; 3: 7 - 9,4 ppm. 8: > 9.5 ppm. As (tot): 1 < 13 ppm; 2: 13-18 ppm; 3: 19-23 ppm; 4: > 23 ppm. Ag (tot): 1 < 0.63 ppm; 2: 0.63-0.90 ppm; 3: 0.91-1.17 ppm; 4: > 1.17 ppm. c: Same. 1-4: Gamma radiation (total count: t.c., 10 sec): 1: < 1500; 2: 1500 - 2000; 3: 2001- 2500; 4: > 2500. Chemistry: Hg (tot). 1: < 3.4 ppm; 2: 3.4 - 5.9 ppm; 3: 6.0 - 8.4 ppm; 4: > 8.4 ppm. Transversal and longitudinal profiles.

	Media	Media Corregida	Mediana		Media	Media Corregida	Mediana
Au (ppb)	22	15	10	W (ppm)	1	1	1
Hg (ppm)	2.2	0.9	0.5	As (ppm)	11	8	7
Ag (ppm)	0.4	0.4	0.2	Sb (ppm)	3	2	1
Cu (ppm)	230	149	95	Rb (ppm)	52	51	55
Zn (ppm)	90	71	53	Sr (ppm)	309	310	296
Pb (ppm)	14	5	4	Ba (ppm)	472	454	450
Ni (ppm)	20	19	18	Y (ppm)	26	26	26
Co (ppm)	23	21	21	Th (ppm)	5	5	5
Cr (ppm)	32	30	26	U (ppm)	1	1	1
Mo (ppm)	2	2	2				

Tabla 1. Contenidos promedio en los suelos analizados
Table 1: Average contents of the soil samples tested

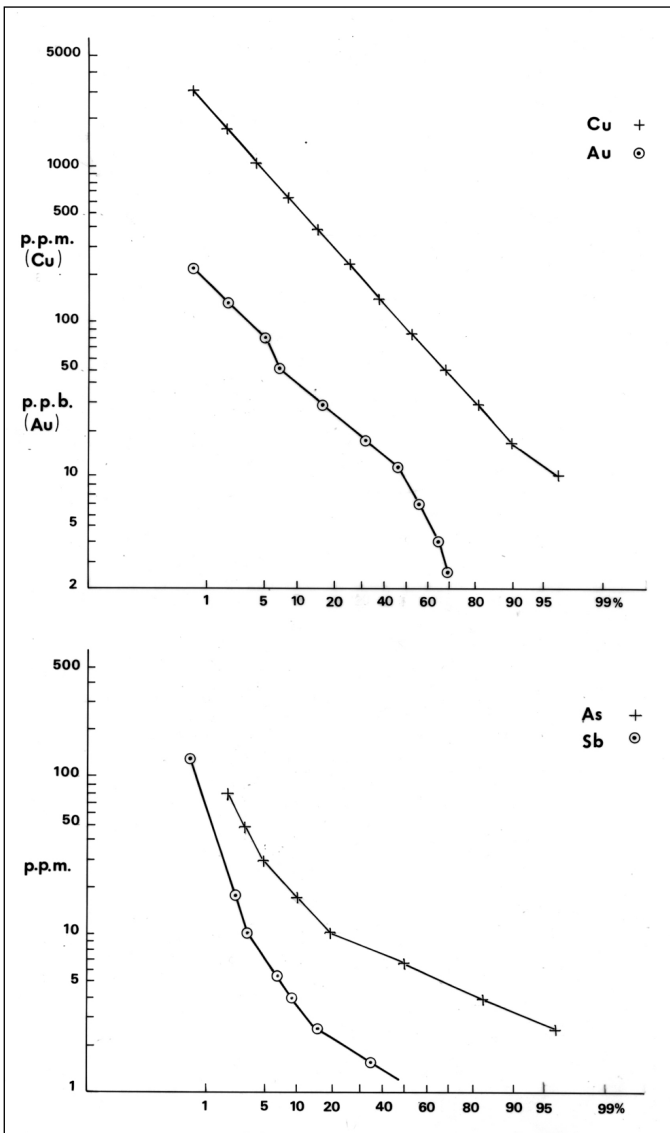


Fig. 6. Distribución de Cu, Au, As y Sb en gráficos log-probabilísticos
 Fig. 6: Log-probability plot for Cu, Au, As, and Sb

rables de K con Rb y Ba y de U, Th, Hf y la radiación gamma total.

En cuanto a la distribución espacial de los valores, las figuras 2a-c muestran los planos correspondientes a los contenidos de Au, Cu y Sb sobre el fondo geológico de la parte central del distrito. De su observación se desprende que los yacimientos conocidos tienen una expresión relativamente pobre en cuanto a la presencia de muestras anómalas en Au y Cu. Ella es en cambio, relativamente buena en el caso del Sb. En contraste, la nueva zona de interés (Culebra - Viña

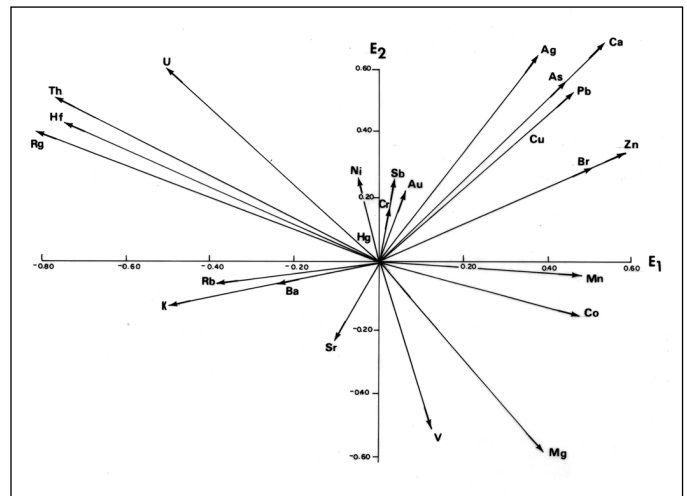


Fig. 7. Representación vectorial de los elementos proyectada sobre el plano de dos factores principales (E1 - E2)
 Fig. 7: Factor-vector analysis of the studied elements

Vieja), situada al norte del distrito entregó importantes valores anómalos de Au y Cu.

En las figuras 5a-c están representados en perspectiva (semi-3D), las mismas líneas de muestreo geoquímico sobre un perfil topográfico. Ellas muestran que la plata es un buen indicador de la presencia de los yacimientos del distrito, pese a que no alcanza leyes de interés en las menas. En cambio, exhibe bajos contenidos en la zona de Culebra - Viña Vieja. El arsénico por el contrario, está más enriquecido en dicha zona de interés. Finalmente, Hg presenta algunos valores anómalos en el distrito y uno en la nueva zona de interés, mientras la radiación gamma total es significativamente mayor en el ámbito del distrito y en la parte sur de la nueva zona.

Análisis por el método enzimático

La metodología enzimática (enzyme - induced leaching; Clark, 1992, 1993) ha sido propuesta como un método efectivo para detectar yacimientos metalíferos ocultos bajo cubiertas sedimentarias o de rocas fracturadas. Su hipótesis de base sostiene que una lixiviación muy suave del contenido metálico de las muestras, conseguida mediante una reacción enzimática, extrae preferentemente aquella fracción recientemente aportada. Tal fracción puede tener origen en el flujo hacia la superficie de iones provenientes del yacimiento no aflorante. El flujo sería el producto de distintos procesos tales como difusión

iónica, gradientes electroquímicos y transporte por aguas subterráneas.

El uso de esta metodología analítica en Punitaqui tuvo tres objetivos: 1) probar la efectividad de la técnica en superficies bajo las cuales existe mineralización conocida, no aflorante; 2) detectar posibles anomalías en la zona de interés Culebra - Viña Vieja así como al sur del distrito; y 3) detectar posibles anomalías en la cubierta aluvial de las quebradas principales. Como ya se indicó anteriormente, los fenómenos aluvionales generados antes del muestreo (El Niño) no hicieron factible este último propósito. En cambio, los dos primeros se cumplieron satisfactoriamente.

Los resultados de mayor interés están representados en las figuras 5a-c, donde los análisis enzimáticos de Au, Cu y Sb pueden ser comparados con los "totales" de los mismos elementos. Así, la respuesta del Au total aparece como similar a la entregada por el análisis enzimático, e indica una zona anómala extensa en el área de Culebra - Viña Vieja. En cambio, las anomalías enzimáticas de Cu son más nítidas que las de Cu total en el área del distrito, aunque ambos métodos dan resultados similares en el área de Culebra - Viña Vieja. Finalmente, el Sb entregó anomalías similares en ambos sectores a través de las dos metodologías.

Sondeos

Si bien los resultados geoquímicos antes expuestos confirmaron el interés de realizar sondeos en el área de Culebra - Viña Vieja, existían otros antecedentes previos que así lo aconsejaban. En primer término, el espaciamiento de los cuerpos mineralizados del distrito (Caddey y Brockway, 1998) hacía suponer la probable existencia de otros cuerpos en su prolongación norte. Ello, considerando también la situación topográfica positiva, que implicaba una baja probabilidad de que la posible masa mineralizada hubiera sido erosionada. Por otra parte, la presencia de una extensa zona de brecha desarrollada en torno al nivel carbonatado (interpretada como diatrema por Caddey y Brockway, 1998 y como brecha tectónica por Doblás, 1997 y Oyarzún y Pavicic, 1998) constituía un elemento estructural favorable, cualquiera fuese su origen.

Los sondeos realizados por Cía. Minera Tamaya en el marco del Proyecto FONDEF - D96 I 1003, con participación de la Universidad de La Serena y de la Empresa Nacional de Minería revelaron la presencia de recursos de oro y cobre distribuidos en tres filones emplazados en la zona de cizalla y en un cuerpo vinculado a la estructura brechosa (Santander, 1998).

Discusión y conclusiones

El estudio geoquímico realizado entregó una interesante información de interés metalogénico, como por ejemplo la relación entre los contenidos de Au, Hg, y Sb de los suelos, con metales de afinidad máfica como Cr y Ni. En cambio, Cu y Ag aparecen asociados a Pb y As. También llama la atención la muy baja concentración de Zn en las menas del distrito, inferior incluso a aquella que presentan las rocas y suelos.

Aunque parte de las estructuras principales del área norte del distrito (Culebra-Viña Vieja) fueron sometidas a condiciones transpresivas en una etapa tardía, la exploración geoquímica mostró la presencia de anomalías importantes de Cu y Au, siendo de especial interés la de Cu "enzimático". También el Sb, buen indicador de mineralización en el sector Delirio - Los Mantos, mostró valores importantes en la prolongación NE de la zona de cizalla.

La realización de sondeos en la zona NE del distrito permitió modelizar tres estructuras mineralizadas que convergen en profundidad. Conforme a los cálculos de Santander (1998), los recursos de Cu y Au contenidos en las estructuras antes señaladas alcanzan unos 9 Mt.

Agradecimientos

Los autores expresan su reconocimiento al Prof. F. Brunner, Director del Proyecto FONDEF D96I - 1003, quien autorizó la publicación del presente estudio, así como al Sr. Humberto Brockway, ex Jefe de Geología de Cía. Minera Tamaya, que dio las facilidades para la realización del trabajo de terreno y facilitó información de base para la planificación del muestreo y su interpretación.

Referencias

- Adriazola, A., 1997. *Relación entre estructura y mineralización en el distrito minero Los Mantos de Punitaqui*. Memoria de título - Depto. Geología Univ. de Chile, Santiago, 149 p y anexos.
- Caddey S. W. y Brockway, H., 1998. *Fracture patterns, tectonic deformation history and formation of Cu - Au - Hg epithermal veins, Punitaqui district, central Chile*. Inf. ined. Proyecto FONDEF, 23 p. y figs.
- Clark, J. R., 1992. Detection of bed rock - related geochemical anomalies at the surface of transported oberburden. Technical note. *Explore - Newsletter of the Assoc. of Expl. Geoch.* N° 76, p. 1, 5, 6 y 8 - 11.
- Clark, J. R., 1993. Enzyme - induced leaching of B - horizon soils for mineral exploration in areas of glacial oberburden. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. B)*. 102, p. B-19 a B-29.

- Collao, S. y Ortega, R., 1998. *Estudio de inclusiones fluidas en muestras del distrito minero de Au - Hg - Cu de Punitaqui, IV Región, Chile*. Inf. ined. Proyecto FONDEF, 27 p. y anexos.
- Doblas, M., 1997. *Estudio geológico-estructural del area de Punitaqui: zona de cizalla dúctil, fases tectonominerilizantes, y neotectónica de bloques y fallas*. Inf. ined. Proyecto FONDEF, 20 p. 5 anexos.
- Levi, B., Nyström, J.O., Thiele, R. y Aberg, G., 1987. Geochemical polarities in Mesozoic-Tertiary volcanic rocks from the Andes in central Chile and tectonic implications. *J. South American Geology*, 1, p. 63-74.
- López, E. L., Frey, F. A. y Oyarzún, J., 1979. Geochemical characteristics of Central Chile (33° - 34° S) granitoids. *Contr. Mineral. Petrol.* 70, p. 439 - 450.
- López, E. L., Cembrano, J. y Moreno, H., 1995. Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes Basaltic Quaternary Volcanism (37° - 46° S). *Revista Geológica de Chile*. 22,2 p. 219 - 234.
- Oyarzún, J., Levi, B. y Nystrom, J.O., 1993. A within-plate geochemical signature and continental margin setting for the Mesozoic - Cenozoic lavas of central Chile. *Proceedings Second ISAG*, Oxford (UK), p. 419 - 422.
- Oyarzún, J., Pavicic, S. y Rojas, J., 1998. *Informe sobre el estudio geoquímico de suelos en el distrito minero Los Mantos de Punitaqui*. Inf. ind. Proy. FONDEF, 23 p. y anexos.
- Oyarzun, R. y Pavicic, S., 1998. Modelo geológico-estructural para el distrito de Punitaqui. Inf. ined. Proy. FONDEF, 24 p. y anexos.
- Pavicic, S., 1998. *Geología distrital escala 1:10.000 del distrito minero Los Mantos de Punitaqui*. Inf. ined. Proy. FONDEF, 60 p., mapas y anexos.
- Santander, E., 1998. *Descripción de procedimientos operativos en la construcción del modelo geológico estructural para el área norte del distrito minero de Punitaqui*. Inf. ind. Proy. FONDEF, 7 p. y anexos.
- Thomas, H., 1967. Geología de la Hoja Ovalle. *Boletín Inst. Invest. Geol.* (Santiago), n.º 23, 58 p. y carta 1:250.000.

Recibido: Octubre 2000

Aceptado: junio 2001