

PROSPECCION GEOQUIMICA APLICADA A YACIMIENTOS DE ORO

ALFREDO CRUZAT O.

Rosal 354, Departamento C, Santiago, Chile.

RESUMEN

Los métodos geoquímicos son ampliamente utilizados en la prospección de yacimientos de oro. Las técnicas empleadas son variadas, incluyendo geoquímica de rocas, sedimentos de drenaje, suelos, precipitados, rodados silíceos, gases, hidrogeoquímica, biogeoquímica y otros métodos de uso restringido.

Se revisan aquí las diferentes técnicas disponibles, con énfasis en su aplicación en diversos casos y en sus aspectos prácticos, incluyendo una síntesis del quimismo y abundancia del oro, atinentes al método.

Se analiza el empleo de estos métodos en Chile, donde últimamente se han utilizado, con variado éxito, en la identificación de zonas con potencial aurífero y de yacimientos de oro en áreas restringidas.

ABSTRACT

Geochemical methods are widely used in mineral exploration for gold deposits. Different techniques can be employed, including geochemistry of rocks, stream sediments, soils, coatings on stream pebbles, jasperoid float, gases, hydrogeochemistry, biogeochemistry, and other methods of restricted application.

The available techniques are reviewed, emphasizing their usage in various cases and their practical aspects, including a synthesis of the chemistry and abundance of gold, momentous to the method.

The usage of these methods in Chile is discussed, having been lately employed, with varying success, in the identification of zones with gold potencial and of gold deposits in restricted areas.

INTRODUCCION

Los métodos geoquímicos, basados en la medición sistemática de características químicas de materiales naturales, constituyen un complemento en la búsqueda de recursos minerales. Su campo de acción comprende desde la escala regional a la escala local o de yacimiento, formando parte de los numerosos medios con que se cuenta en la actualidad, para desarrollar actividades de prospección minera.

En el caso de los yacimientos de oro, su uso se ha incrementado, paulatinamente, desde los inicios de la geoquímica de prospección, habiéndose producido, en las últimas décadas, un acelerado desarrollo y un constante incremento en su empleo, de-

bido a la creciente necesidad de ubicar yacimientos no aflorantes y de investigar el potencial minero de vastas áreas, en forma rápida y con bajos costos relativos.

Este trabajo tiene por objeto presentar una revisión de los métodos geoquímicos empleados en la prospección de yacimientos de oro, con especial referencia al caso chileno, dado que estos yacimientos constituyen, actualmente, los principales objetivos de exploración en el país.

La fuente de gran parte de la información se encuentra en trabajos publicados, incrementada, parcialmente, por observaciones del autor. Esta revisión presenta una limitante, relacionada con el

hecho que, en la literatura geoquímica disponible —al igual que en la mayor parte de los campos— se exponen habitualmente sólo éxitos en la aplicación de diversos métodos, situación que dificulta la evaluación objetiva de algunas técnicas y la consiguiente extrapolación de los resultados a los casos de ocurrencia más frecuente. Por lo tanto, la aplicación a áreas particulares de las generalizaciones que se hagan, serán válidas en la medida en que se presenten rasgos geológicos comunes entre estas

áreas y aquéllas donde los métodos han demostrado su utilidad.

Las numerosas investigaciones, realizadas en geoquímica isotópica, no son incluidas en este trabajo, pues corresponden a investigaciones puntuales, que son de gran utilidad en la comprensión de la génesis de yacimientos, aunque de escasa aplicación, hasta hoy, como técnicas de prospección minera.

GENERALIDADES DEL QUIMISMO DEL ORO

La prospección geoquímica de yacimientos auríferos debe considerar algunos aspectos básicos del quimismo de este metal, a fin de visualizar las asociaciones en que se presenta y poder así maximizar el uso de ellas durante los trabajos prospectivos.

El oro se encuentra en la naturaleza en los estados de oxidación 0 (nativo), + 1 (auroso) y + 3 (áurico). En estado de oxidación (0), constituye oro nativo y diversos minerales, pudiendo movilizarse mecánicamente o, parcialmente —en forma coloidal, cuando por acción mecánica se generan partículas de esta naturaleza. En los restantes estados de oxidación, el metal no constituye compuestos naturales, estables, formando complejos solubles, orgánicos e inorgánicos, especialmente haluros y tiosulfatos. Estos aspectos son tratados extensamente por Kolotov *et al.* (1980).

La transferencia, desde el estado nativo a uno soluble, se realiza sólo en un medio oxidante, en presencia de agentes que tengan capacidad de formar complejos con él, y de compuestos que afecten el pH y Eh, especialmente polisulfuros de arsénico y antimonio. El proceso inverso tiene lugar por reducción química o bioquímica, en presencia de iones metálicos, de compuestos orgánicos y de materiales carbonosos. La transferencia, de un estado soluble a uno insoluble y viceversa, está básicamente controlada por el Eh y pH del medio, resultando así que algunos compuestos, como MnO_2 , en ciertos casos, producen su solubilización y en otros, su precipitación.

Desde el punto de vista de su afinidad, factor de especial importancia en prospección, el metal muestra una gran afinidad con Te y Bi, formando complejos con éstos y otros elementos relacionados, cuya estabilidad disminuye al aumentar la elec-

tronegatividad del elemento asociado. Así, por ejemplo, se puede indicar dos series de afinidad decreciente: $\text{Bi} > \text{Sb} > \text{As} > \text{P}$ y $\text{Te} > \text{Se} > \text{S} > \text{O}$. En este sentido, el oro es un metal prácticamente desafián con azufre y totalmente afín con telurio, siendo —al respecto— un metal de características completamente opuestas a las del cobre y del plomo.

Los componentes minerales que contienen oro son variados. El metal se encuentra, en general, en estado nativo, incluyendo proporciones variables de diversos elementos, entre los que destacan Ag, Cu, Hg, Bi, Pd, Pt, Ir y Rh. En menor proporción, se encuentra formando telururos (silvanita, rickardita, bilibinskita, calaverita, etc.), especialmente en depósitos de filiación volcánica; antimoniuros (uytenbogaardita y auroestibina); seleniuros (fischesserita); sulfuros (nagyagita); y, aparentemente, teluratos.

La presencia de oro en otros minerales, como elemento traza, es frecuente, posiblemente incluido en las redes cristalinas —situación que ha sido asumida en numerosos casos, pero nunca comprobada— o en forma de partículas de oro nativo o de minerales auríferos. En elementos nativos, el oro se concentra en arsénico y antimonio y, en menor proporción, en plata, cobre y telurio; el azufre presente en los niveles superiores de depósitos epitermales y en zonas de oxidación de yacimientos muy piritosos, también suele contener altas concentraciones del metal.

En sulfuros y sulfosales, minerales frecuentes en los yacimientos chilenos, el oro es un constituyente común, especialmente en aquéllos que contienen cobre y plata; los sulfuros de plomo y zinc no contienen el metal, excepto en forma de partículas. Entre las sulfosales, la serie tetraedrita-

tennantita es la que normalmente presenta un mayor contenido. Como es conocido desde antiguo, arsenopirita y pirita muy frecuentemente contienen oro, conjuntamente con plata y antimonio, en una relación aún no del todo aclarada. Aparentemente, los contenidos de oro en piritas varían, de acuerdo con sus propiedades termoeléctricas y en relación proporcional a sus contenidos de arsénico. En algunos yacimientos, el metal se presenta contenido en magnetita, situación que es frecuente en los minerales accesorios de rocas intrusivas.

En minerales supérgenos, el oro se encuentra, en general, en proporciones mínimas. Excepción a ésto son: limonitas y óxidos hidratados de manga-

neso, cuyos iones ferrosos o manganosos —dependiendo del pH— reducen los complejos solubles del metal, precipitándolo; arseniatos y antimoniatos supérgenos, especialmente escorodita y beudantita, minerales presentes en los yacimientos epitermales chilenos; y sulfatos férricos básicos (jarositas).

Las relaciones generales, indicadas, sugieren que, previo a la ejecución de un programa de prospección geoquímica, debe, necesariamente, conocerse el modelo de mineralización buscado, a fin de hacer un uso óptimo del método, empleando los elementos indicadores o guías, adecuados para cada caso.

ABUNDANCIA

Un aspecto importante de considerar, al emplear métodos geoquímicos, se relaciona con la abundancia de un elemento en materiales de ocurrencia natural, permitiendo visualizar las razones de concentración necesarias para originar anomalías y comprender los alcances del método, en términos cuantitativos.

Existe, en general, consenso para estimar que la abundancia del oro en la corteza es del orden de 3,5 ppb, valor que puede considerarse como "clarke". Los contenidos promedios en diferentes tipos de ambientes y materiales se indican en la Tabla 1.

Si se compara ese "clarke" y los de otros elementos comunes, como cobre y plata, con los límites de detección geoquímicos que se obtienen normalmente, se concluye que el cobre es, a lo menos, 55 veces más abundante en promedio, que su límite de detección y la plata es casi tan abundante como dicho límite (Tabla 2). Sin embargo, el oro debe concentrarse al menos 5 veces el "clarke", para ser detectado por métodos analíticos geoquímicos normales. Este hecho sugiere que la definición de valores de interés de oro es muy grosera, en la actualidad, pudiendo compararse su límite de detección a que se obtuviera un límite de 315 ppm Cu. Esta alta razón de concentración necesaria para detectar el metal, indica que su simple presencia cuantitativa constituye una anomalía geoquímica.

Similarmente, puede calcularse el "clarke" de concentración con respecto a valores de umbral arbitrarios, aceptados en términos generales. Se

TABLA 1. ABUNDANCIAS DE ORO EN DIVERSOS AMBIENTES Y MATERIALES GEOLOGICOS
(Valores en ppb)

Ambientes		
	Regiones oceánicas	4,0
	Regiones suboceánicas	2,9
	Regiones de escudo	3,4
	Regiones orogénicas	3,8
	Corteza	3,5
Rocas Igneas		
	Promedio	4,4
	Ultrabásicas	4,5
	Básicas	7,2
	Intermedias	4,7
	Acidas	2,7
Rocas Sedimentarias		
	Promedio	12,2
	Psammitas	26,3
	Pelitas	3,9
	Calcáreas	3,4
	Evaporitas	17,5
	Sedimentos inconsolidados	3,5
Rocas Metamórficas		
	Promedio	3,1
	Pizarras	1,6
	Esquistos	3,7
	Neises	2,7
	Anfibolitas y rocas verdes	4,1
	Cuarcitas	4,7

observa que el oro, para ser considerado una anomalía, requiere concentrarse del orden del 20-30 veces el "clarke", la plata 13-14 veces y el cobre 2-4 veces (Tabla 3). Estas cifras indican que, para el caso del oro, se requiere una gran razón de con-

TABLA 2. "CLARKE" DE CONCENTRACION DE DIFERENTES ELEMENTOS REFERIDO A SUS LIMITES DE DETECCION

Elemento	"Clarke" de Concentración
Zn	0,007
Cu	0,018
Co	0,020
Pb	0,077
Ag	1,33
As	2,77
Au	5,71
Sb	20,00
Bi	25,00

centración para alcanzar el umbral, equivalente a que se considerara anomalías a valores mínimos de 1.570 ppm Cu ó 2,15 ppm Ag. Este hecho confirma que los indicios de oro que se obtengan, por pequeños que ellos sean, son de interés y merecen cuidadoso análisis geológico, pues en términos absolutos de concentración, 20 ppb Au son tan anómalos como 315 ppm Cu.

Por otra parte, para analizar el carácter excepcional o normal de los objetivos de exploración, es conveniente visualizar lo que dichos objetivos significan en términos de concentración natural. En la figura 1 se ha graficado el "clarke" de concentración, expresando el número de veces que debe concentrarse un elemento para producir una ley determinada. Así, por ejemplo, una ley de 1 g/t Au tiene un "clarke" de concentración de 286 y una ley de 5 g/t Au uno de 1.428. Si se comparan esos valores con las concentraciones requeridas en el caso del cobre, se observa que una ley de 1% Cu representan un "clarke" de concentración de 182 y una ley de 5% Cu uno de 909. En forma similar 100 g/t Ag requieren una concentración 1.333 veces la normal.

Estos valores significan que, en términos absolutos, el que se produzca una concentración de 1 g/t Au es equivalente a que se obtenga una ley de 1,57% Cu ó 21,4 g/t Ag, equivaliendo, en este sentido, 5 g/t Au a 7,85% Cu ó 107 g/t Ag.

Las cifras anteriores indican que el oro es un elemento con una gran capacidad de concentración en la naturaleza, y que, además, debe existir un estricto control por parte de un ambiente geológico determinado, para que las concentraciones que se consideran leyes se produzcan. Al respecto, puede indicarse que, si la concentración se realizara al azar y no tuviera un estricto control geológico, las reservas del yacimiento El Indio a Octubre

TABLA 3. "CLARKE" DE CONCENTRACION DE DIFERENTES ELEMENTOS, REFERIDO A UMBRALES DE ANOMALIA ARBITRARIOS

	Au	Ag	Cu
Corteza	28,57	13,33	3,64
Rocas ígneas	22,72	14,28	2,86

Umbral arbitrarios: Au: 100 ppb; Ag: 1 ppm; Cu: 200 ppm.

de 1981 (Araneda, 1982), que alcanzaban a 3.360.000 toneladas de minerales con una ley media de 17,82 g/t Au, equivaldrían, en términos absolutos, a las de un yacimiento de ese tonelaje con 27,1% Cu ó 382 g/t Ag, y los minerales de exportación directa equivaldrían a 70.000 toneladas con una ley de 435% Cu ó 5.935 g/t Ag. Estos antecedentes sugieren que el yacimiento El Indio es un fenómeno localizado, extraordinario.

En síntesis, los valores analíticos de oro que se obtengan durante una prospección, por pequeños que ellos sean, constituyen anomalías que deben interpretarse en términos geológicos, requiriéndose, además, un afinamiento de las técnicas analíticas geoquímicas normales, para poder hacer un máximo uso del método, ya que, en la actualidad, numerosas anomalías naturales no son detectadas.

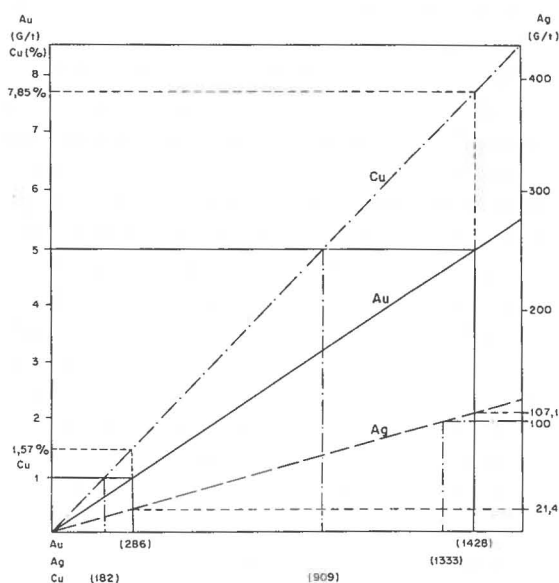


FIG. 1. "Clarke" de concentración de oro, cobre y plata.

METODOS DE PROSPECCION GEOQUIMICA

Los métodos de prospección geoquímica son empleados, desde la década de 1930, en la búsqueda de yacimientos de oro, habiéndose producido un incremento en su uso en los últimos 15 años, debido, principalmente, a la aparición de técnicas analíticas de bajo límite de detección, precisión adecuada y bajo costo; como resultado del alto valor del metal y su consecuente transformación en un objetivo de exploración de primera prioridad.

Estos métodos, en general, son de uso reciente en el país, ya que los primeros trabajos se realizaron a fines de la década del 50, utilizándose hidrogeoquímica, como complemento, en la búsqueda de yacimientos de uranio (Bowes *et al.*, 1958; Knowles *et al.*, 1958). El empleo generalizado se produce a contar de 1969, al realizarse los primeros trabajos regionales de envergadura (Cruzat *et al.*, 1970; Stewart *et al.*, 1971). En la prospección de yacimientos auríferos, el uso habitual de geoquímica data, en el país, desde mediados de la década pasada, cuando la Empresa Nacional de Minería y St. Joe Minerals Corporation basaron gran parte de su actividad exploratoria en la utilización masiva de estas técnicas. En la actualidad, geoquímica es uno de los métodos más empleados en Chile, al respecto, especialmente en las etapas iniciales de la exploración de áreas o prospectos.

Desde el punto de vista de la prospección geoquímica, el oro se caracteriza por su gran estabilidad en ambientes supérgenos y por su frecuente dispersión en forma mecánica, resultando, normalmente, en patrones de distribución complejos, difíciles de interpretar.

Si se agrega a esto, el hecho que los límites de detección de los métodos analíticos, geoquímicos, comunes, son aún altos (20-40 ppb), se concluye que en la prospección de yacimientos auríferos, debe ponerse especial énfasis tanto en las técnicas de muestreo como en los métodos analíticos y de interpretación, y en el uso de elementos guías adecuados.

TECNICAS DE MUESTREO

En la prospección geoquímica de yacimientos auríferos, se han empleado prácticamente todas las técnicas de muestreo geoquímico conocidas,

con resultados variados.

Debido a la presencia frecuente del metal en estado nativo, en concentraciones de dispersión irregular, se hace fundamental que los muestreos se realicen de acuerdo con una metodología constante, que optimice la operación en cuanto a rendimiento y disminuya, en lo posible, los errores que ellos conllevan intrínsecamente. Si se considera necesario, estos errores, y los introducidos en la reducción de la muestra de terreno a su equivalente analítico, pueden ser calculados (Clifton *et al.*, 1969; Brown y Hilchey, 1974).

No existen normas que se puedan aplicar en los distintos tipos de muestreo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, ellos deben cumplir con requisitos mínimos, de manera que la interpretación se facilite, aumentando las posibilidades de obtener patrones de distribución homogéneos, con sólo un mínimo de valores erráticos.

En los casos de prospección en rocas, los muestreos que se realizan en superficie son, en general, de astillas, representativos de un área del orden de 30 m². Las muestras individuales deben corresponder a un solo tipo litológico, siendo los fragmentos homogéneos en cuanto a meteorización, lixiviación y alteración hidrotermal. El peso total a recolectar varía entre 0,5 y 5 kg, en general, dependiendo de la homogeneidad de los componentes minerales, y de la textura o tamaño medio de dichos componentes (Wager y Brown, 1960). Las muestras de testigos deben cumplir con similares requisitos, aunque, en este caso, el volumen a analizar es naturalmente menor.

En la prospección mediante sedimentos de drenaje, es habitual, en la actualidad, recolectar muestras de sedimentos activos de mayor volumen que en el pasado, a fin de optimizar el costo de muestreo. Un tamizaje en terreno a -10 mallas es usual, tomándose una muestra de finos de 1-2 kg de peso, lo que asegura obtener material suficiente para cualquier fracción que se desee analizar. Debe observarse que si el tamizaje se realiza mediante la ayuda de agua, se produce una pérdida de finos apreciable.

En prospecciones en suelos, las técnicas a emplear dependerán del método usado (horizonte constante o profundidad constante), realizándose, en lo posible, mediante catas que permitan obtener el máximo de muestra (0,5-1 kg). Normalmente,

estas muestras no se tamizan en terreno, excepto en el caso de regolitos coluviales, que son habitualmente tratados en forma similar a los sedimentos de drenaje.

El uso de concentrados de minerales pesados es frecuente en la prospección de yacimientos auríferos. En este caso debe emplearse una técnica de volumen constante, sin tamizar o separar gravas y otros materiales gruesos, concentrándose muestras de 3-5 lt. Los concentrados varían entre sí en cuanto a su grado de limpieza, dependiendo éste de la productividad que se desee. Este aspecto es obviado, en la interpretación, mediante cuidadoso pesaje del total del concentrado y recálculo de los resultados analíticos al volumen original.

Otras formas de prospección geoquímica de yacimientos auríferos (hidrogeoquímica, atmogeoquímica, biogeoquímica, etc.) tienen técnicas de muestreo propias, que varían en cada circunstancia. Sólo puede indicarse al respecto, que, en estos casos, las muestras son, en general, de gran volumen, debido al bajo contenido del metal en los materiales a muestrear.

TECNICAS ANALITICAS

Las técnicas empleadas para el análisis de oro en muestras geoquímicas, son variadas. Numerosas publicaciones se han hecho al respecto, pudiendo citarse, entre otras, las de Rowe y Simon (1968), Hildon y Sully (1971), Haffty *et al.* (1977), y Meier (1980).

Las técnicas de mejor precisión y exactitud son: análisis a fuego y activación neutrónica. Ambas se encuentran disponibles en el país, aunque las instalaciones no son adecuadas para prospecciones de envergadura, en cuanto a rendimiento se refiere.

El método analítico más empleado en Chile es el de espectrofotometría de absorción atómica, precedida por una extracción con solventes (MIBK, HBr-Br₂ u otro). Esta técnica, de gran productividad y adecuada precisión, también es combinada con análisis a fuego, con buenos resultados preliminares (Villalobos y Maggio, 1983). Ultimamente, se ha señalado que este método, al ser aplicado en frío, presentaría algunas complicaciones en presencia de óxidos de manganeso contenidos en la muestra (Campbell, 1981), situación que debe ser aclarada, ya que si así fuera los valores obtenidos requerirían, en algunos casos, de correcciones posteriores, probablemente por métodos de regresión.

Aspectos de interés a considerar son la precisión y la fracción de la muestra a analizar. El primer aspecto ha sido tratado, entre otros, por Gottfried *et al.* (1972), y por Thompson y Howarth (1978), bastando indicar que la precisión debe variar, normalmente, entre 10 y 20%, en un nivel de confianza del 95%. Dicha precisión debe analizarse por separado, por métodos estadísticos o gráficos, para diversos rangos de concentración.

En relación a la fracción de la muestra a analizar, en la actualidad, existe la tendencia a emplear toda la muestra, previa molienda no contaminante. Debido a que este método es inadecuado para el análisis de otros elementos, la muestra original debe ser de un volumen suficiente como para obtener una fracción destinada al análisis por oro y otra fracción, a tamizar, destinada a otros análisis.

ELEMENTOS GUIAS

Para facilitar la comprensión de los valores obtenidos durante la exploración y poder relacionarlos con procesos geológicos, es frecuente hacer uso de la existencia del metal mismo y también de otros elementos que, normalmente, se asocian a él, cuya detección es más fácil, de mejor precisión y menor costo, y cuya movilidad es mayor, permitiendo detectar indicios de la existencia de oro a distancia de su fuente de origen. Estos elementos guías tienen en común, en general, una alta solubilidad, alta presión de vapor y bajo punto de fusión.

Los elementos que se han utilizado como guías en la búsqueda de oro son variados, habiéndose indicado en la literatura un gran número de ellos (Ag, As, B, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, F, Ga, Ge, Hg, In, Li, Mo, Ni, Pb, Rb, Re, Sb, Se, Sn, Te, Tl, U, W, Zn, etc.).

En términos generales, los elementos de uso más frecuente pueden clasificarse en cuatro grupos:

1. **Guías Universales:** Comprende los elementos químicos más frecuentemente asociados a yacimientos de oro. En orden decreciente, en cuanto a su efectividad, son Ag, As, Sb y S, este último en el caso que el metal se asocie a piritas.
2. **Guías Universales No Específicos:** Corresponden a elementos que, normal pero no necesariamente, se asocian a yacimientos de oro. Este grupo incluye, entre otros, Ba, Cu, F, Pb, W y Zn.
3. **Guías Ubícuos:** En esta categoría se incluyen

elementos de gran distribución en diferentes materiales que, en ciertas ocasiones, pueden ser utilizados como guías de la existencia de yacimientos de oro. Tal es el caso de Mn, que se presenta en importantes concentraciones, en la zona superior de depósitos jóvenes, y Al, que se encuentra enriquecido en los placeres auríferos.

4. **Guías Locales:** Son elementos que demuestran su uso en casos particulares, debido a su presencia en altas concentraciones, en los minerales que contienen el metal o en el metal mismo. Destacan entre éstos los siguientes:
 - B, Bi y Hg son frecuentes acompañantes del metal, los dos primeros, principalmente en depósitos antiguos, y el último, en depósitos terciarios. Debe considerarse, al respecto, que la utilidad de Hg como guía, depende de la presencia, en la mena, de sulfuros y sulfosales, especialmente blenda y tetraedrita.
 - Cs, Rb y Tl aparecen enriquecidos en aureolas primarias de ciertos depósitos, especialmente de yacimientos meso-cenozoicos.
 - Te y Se se encuentran como guías principalmente en yacimientos terciarios.
 - U, Th y tierras raras, en zonas con enriquecimientos primarios de estos elementos, que localmente se asocian a depósitos de oro, en especial, en yacimientos profundos o de tipo "skarn".

El empleo exitoso de estos elementos guías de uso frecuente y de otros, de uso más restringido, está condicionado, básicamente, por la asociación mineralógica en que se encuentra el oro en los yacimientos buscados. En forma subsidiaria, la utilización de uno u otro guía dependerá del método geoquímico que se emplee en la prospección.

Los principales elementos empleados como guías de oro se indican en la Tabla 4, diferenciados de acuerdo a los diversos métodos geoquímicos disponibles.

LITOGEOQUIMICA

La litogeoquímica comprende métodos que intentan determinar la existencia, en rocas, de patrones de distribución de elementos mayores o trazas, que se encuentren relacionados con la existencia de depósitos minerales. Estos patrones de distribución se habrían originado, conjuntamente, y por los mismos procesos, que los yacimientos, constituyendo patrones de dispersión primaria.

Una síntesis de estas técnicas se encuentra en Beus y Grigoryan (1977) y Govett y Nichol (1979).

El empleo de estos métodos es antiguo, constituyendo gran parte de lo que, en la literatura soviética, se denomina metalometría; importantes éxitos se registran en numerosas situaciones desde la década de 1930. En occidente, el uso de la litogeoquímica ha aumentado considerablemente en los últimos 15 años, dejando el ámbito académico a que estaba prácticamente confinada. Las causas de este más amplio uso se encuentran en la creciente necesidad de detectar yacimientos no aflorantes y en el desarrollo de técnicas analíticas de gran sensibilidad. Sin embargo, para prospecciones masivas, subsisten aún problemas relacionados con los altos costos de muestreo, de preparación de las muestras y de análisis, además del bajo rendimiento de las técnicas analíticas de mejor resolución.

En relación a la prospección de yacimientos de oro, los métodos litogeoquímicos han sido ampliamente usados a contar de 1960, con resultados, en general, de aplicación local. El éxito del método se encuentra directamente relacionado con la existencia de un adecuado modelo de ubicación del oro, en cuanto a roca huésped, alteración hidrotermal y asociaciones mineralógicas, requiriendo, en consecuencia, de un trabajo previo de tipo conceptual.

Los métodos litogeoquímicos a escala regional, que intentan determinar la existencia de provincias geoquímicas auríferas, en general, no han tenido resultados concretos (Seeland, 1973; Boyle, 1979; Saager *et al.*, 1982). Sin embargo, algunos autores sostienen que los distritos auríferos se ubican en zonas en que es factible determinar la presencia de halos regionales, normalmente controlados estructuralmente, donde se observan aumentos sistemáticos en el contenido de oro en rocas, con valores de al menos el doble del "background" (Goloubinoff, 1937; Bolgarsky, 1950; Roslyakov *et al.*, 1971).

En gran medida, las dificultades en el uso regional de métodos litogeoquímicos en la prospección de oro, se relacionan con el hecho que los contenidos singenéticos del metal en rocas, raramente constituyen anomalías, excepto en litologías particulares, como rocas sedimentarias y metamórficas piritosas, formaciones ferríferas y algunos cuerpos graníticos menores, de carácter ácido.

Aparentemente, el mejor método a emplear, a

TABLA 4. ELEMENTOS GUIAS HABITUALES EN LA PROSPECCION GEOQUIMICA DE YACIMIENTOS DE ORO

Generales	
1. Universales	Ag, As, Sb, S
2. Universales no específicos	Cu, Pb, Zn, Ba, F, W
3. Ubícuos	Mn, Al
4. Locales	B, Bi, Hg, Tl, Cs, Rb, Se, Te, U, Th, tierras raras
Prospección en Rocas	
1. Universales	Ag, As, Au, Sb, S
2. Universales no específicos	Ba, Cu, Pb, Zn
3. Ubícuos	CO ₂ , K ₂ O, Mn
4. Locales	Bi, Cs, Hg, Na ₂ O, Rb, Se, SiO ₂ , Te, Tl
5. En concentrados minerales	Ag, As, Ba, Bi, Sb, Te, W
Prospección de Sedimentos de Drenaje	
1. Universales	Ag, As, Au, Sb
2. Universales no específicos	B, Ba, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, U, Zn
3. Locales	Bi, Hg, Tl
4. En concentrados minerales	Ag, As, Ba, Bi, Cr, Cu, Pb, Sb, Sn, Zn
Prospección de Suelos	
1. Universales	Ag, As, Au, Hg, Sb
2. Locales	B, Cd, Cu, Mo, Pb, U, W, Zn
3. Restringsidos	Ba, Bi, Co, Ni, Se, Sn, Te
4. En concentrados minerales	Ag, As, Cu, Mo, Sb, Sn, W
Prospección Hidrogeoquímica	
1. Universales	Ag, Cu, Mo, Sb, Zn
2. Locales	As, Co, Hg, Ni, Se, SO ₄ , Tl, U
Prospección de Precipitados	
1. En óxidos de manganeso	Ag, Ba, Cd, Co, Cu, Ni, Tl, Zn
2. En óxidos de hierro	As, Sn
Prospección Atmogequímica	
	As, Cl, F, Hg, H ₂ S, Sb
Prospección Biogeoquímica	
	As, Au, Cu, Se, Sb, Te
Prospección en Rodados Silíceos	
	Ag, Au, Ba, Mo, Ti, U

escala regional, es el análisis de oro en concentrados de minerales contenidos en rocas, en especial pirita. Además, diversos autores sugieren que es más diagnóstica, en este sentido, la distribución de frecuencias del elemento, que su valor promedio, ya que los sesgos positivos marcados, indicarían una superposición de patrones epigenéticos, eventualmente relacionados con mineralización, sobre patrones singenéticos (Beus, 1969; Tauson y Kozlov, 1973).

A escala distrital o local, los métodos litogeoquímicos encuentran, en la exploración de yacimientos auríferos, una excelente aplicación. Así, por ejemplo, se observa que las intrusiones graní-

ticas relacionadas con el emplazamiento de yacimientos auríferos, presentan valores de Au superiores a las intrusiones estériles, aun cuando este enriquecimiento no sea sistemático. En forma similar, dichas intrusiones presentan, frecuentemente, altos contenidos de Hg y los concentrados de minerales pesados (pirita y arsenopirita, especialmente) muestran un mayor contenido de Au (Vakhrushev y Tsimbalist, 1967; Cornwall *et al.*, 1967; Garrett, 1974).

La máxima utilización de la litogeoquímica, en este contexto, se encuentra en la detección de halos primarios, relacionados con depósitos auríferos. Estos halos o aureolas se caracterizan por

incrementos o disminuciones en los contenidos de elementos mayores y trazas, en dirección a un depósito. La naturaleza y extensión de estos halos es variada, aunque, en general, puede esperarse que los incrementos y disminuciones sean de tipo logarítmico, como resultados de procesos de difusión a través de un medio estático; sin embargo, fracturamientos y micro-fracturamientos diferenciales, en las rocas encajadoras, y la naturaleza de éstas en cuanto a su capacidad de reacción, determinan que los halos tengan características propias y distintivas, aun entre depósitos de un mismo distrito.

En lo que se refiere a los elementos mayores, sus características en un halo dependerán, fundamentalmente, del tipo de alteración hidrotermal asociada. Puede, sin embargo, establecerse modelos generales, que presentarán variaciones (Fig. 2a). Sílice, en general, disminuye hacia el depósito, excepto cuando la roca encajadora es carbonatada o cuando se presentan efectos de "skarn", ocasiones en que se produce su enriquecimiento. Este efecto es, normalmente, difícil de reconocer en rocas ígneas ácidas y grauvacas, así como en sus equivalentes metamórficos. Por otra parte, K aumenta en la dirección de un depósito y Na disminuye, excepto en los casos en que se ha producido albitización o turmalinización, en que Na también aumenta en la dirección del depósito. Estas características se observan mejor al analizar ambos elementos como razón K_2O/Na_2O , que en los comportamientos individuales (Boyle, 1974, 1982).

Azufre normalmente aumenta en la dirección de un yacimiento, en especial si éste se encuentra acompañado de propilitización, piritización o alunitización. La presencia de carbonatos (medidos como CO_2) en halos primarios, es frecuentemente un buen indicador de la existencia de un yacimiento, incrementando en su dirección; excepción a esto se encuentra en rocas carbonatadas, que han sufrido efectos de "skarn" o silicificación, donde CO_2 disminuye a medida que los depósitos son aproximados. En general, es útil expresar los contenidos de carbonatos como razón SiO_2/CO_2 , la que disminuye hacia un depósito. Similarmente, la razón $SiO_2/volátiles$ decrece en la dirección de un yacimiento, excepto en zonas de "skarn" o turmalinizadas, al igual que los contenidos de Fe.

En relación a los elementos trazas que pueden ser empleados como indicadores litogeoquímicos de la presencia de oro, éstos son variados (Tabla 4).

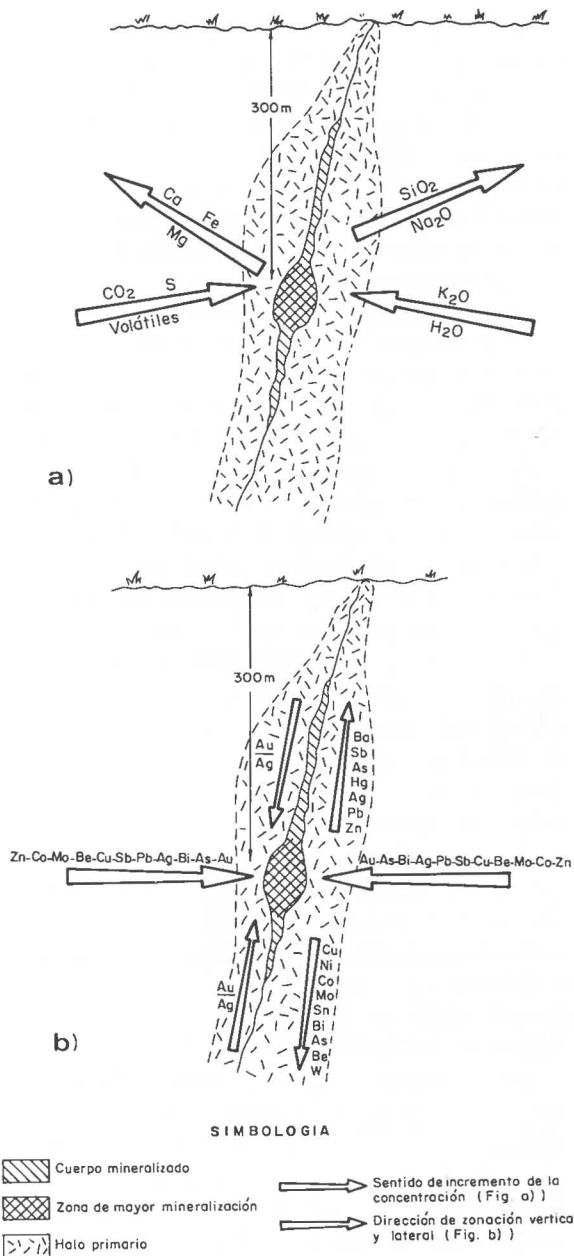


FIG. 2. a) Comportamiento generalizado de elementos mayores en yacimientos vetiformes de oro. b) Zonaciones generalizadas en yacimientos de oro.

El grupo más importante lo constituyen Ag, As y Sb, teniendo otros elementos (Ba, Bi, Cs, Hg, Pb, Rb, Se, Te, Tl, Zn, etc.) aplicaciones locales.

El tamaño y forma de las aureolas o halos primarios, indicativos de la presencia de yacimientos de oro, son variables, dependiendo, en gran medida,

de las características físicas originales de la roca encajadora; así, en un mismo distrito, pueden encontrarse aureolas de 10-60 m de ancho (James, 1957). En general, los halos primarios varían en ancho entre algunos centímetros y 300 m, y su extensión vertical alcanza a 650 m en algunos casos (Mazzucchelli, 1965); una extensión vertical de 300 m sobre una zona de mineralización máxima puede esperarse, en general.

Otra característica de los halos primarios auríferos, se relaciona con una zonación vertical de elementos trazas, que coincide con zonaciones longitudinales, a lo largo del rumbo. Pueden distinguirse elementos que se ubican por sobre los yacimientos y otros que se concentran bajo ellos, según la secuencia general indicada en la Tabla 5, compilada sobre la base de trabajos de Polikarpochkin *et al.* (1965, 1971), Ovchinnikov y Baranov (1972), y Grigoryan (1974). Debe considerarse que algunos elementos pueden presentarse desplazados, como es el caso de Cu, que se puede ubicar sobre Au o bajo Mo; además, la presencia de arsénico en dos niveles sería un hecho frecuente, formando parte de sulfosales, galena y blenda, en los niveles superiores, y principalmente de arsenopirita, en los niveles inferiores.

Existen, además, indicios de la existencia de una zonación geoquímica lateral, en halos primarios de yacimientos de oro, generándose aureolas más amplias de diferentes elementos, a medida que la distancia a un yacimiento aumenta. La secuencia general, desde un cuerpo mineralizado a su periferia sería: Au-As-Bi-Ag-Pb-Sb-Cu-Be-Mo-Co-Zn.

Estos criterios de zonación vertical y lateral, en general, se cumplen, pudiendo emplearse como medios para definir la ubicación espacial, relativa, con respecto de una zona mineralizada, tanto en sondajes como en superficie, en zonas con adecuados desniveles geológicos (Fig. 2b).

Existe una tendencia a interpretar los resultados de prospecciones litogeoquímicas, en halos primarios, tanto en forma de valores de elementos individuales, como en forma de razones, sumatorias y productos entre elementos estandarizados a su "background". Además, en numerosos casos, se emplea el cálculo de la productividad lineal o areal (producto entre el valor medio de un elemento en un halo y su ancho o área), para discriminar entre anomalías (Grigoryan, 1974; Beus y Grigoryan, 1977); un ejemplo de este tipo se indica en la figura 3.

Debe mencionarse, además, que los halos pri-

TABLA 5. ZONACION VERTICAL DE ELEMENTOS EN HALOS PRIMARIOS DE YACIMIENTOS DE ORO (VALORES EN PARENTESIS INDICAN PROBABILIDAD DE OCURRENCIA EN LA POSICION INDICADA)

Ba (93) — Sb (100) — As ₁ (87) — Hg (100) — Ag (80) —
Pb (84) — Zn (87) — Au (84) — Cu (86) — Ni (50) —
Co (55) — Mo (48) — Sn (66) — Bi (?) — As ₂ (?) —
Be (60) — W (72)

marios de dispersión de elementos trazas, no se encuentran únicamente en los cuerpos mineralizados mismos, sino que también se presentan en estructuras subsidiarias, que no constituyen yacimientos pero que pueden ser consideradas indicios de la presencia de yacimientos económicos en las vecindades. Estos halos de filtración ("leakage") deben, necesariamente, investigarse en la exploración de yacimientos no aflorantes.

Entre esas estructuras subsidiarias se cuentan zonas de cizalle silicificadas; zonas de jasperoides; vetas y vetillas de pirita, calcita y cuarzo; zonas milonitizadas; fracturas menores con salbanda; y, en general, todas las evidencias de procesos hidrotermales, que pueden haber conducido a la formación de un yacimiento. El análisis de estas estructuras y rocas debe hacerse por Au y otros elementos guías como Ag, As, Bi, Hg, Sb, Te y Tl.

En diversas ocasiones, se ha demostrado que la detección de estos halos es de gran utilidad, habiendo dado lugar, en algunos casos, a descubrimientos significativos, entre ellos diversos depósitos tipo Carlin (Erickson *et al.*, 1964 y 1966; Cornwall *et al.*, 1967; Wells *et al.*, 1969; Wells, 1971).

El empleo de geoquímica de rocas en la prospección de yacimientos auríferos, es, en la actualidad, en Chile, una herramienta de frecuente uso. Las técnicas de interpretación empleadas al respecto son, sin embargo, bastante básicas en términos generales, sin que se haga una máxima utilización del método.

Los resultados de estos trabajos no se encuentran disponibles, en general, pudiendo indicarse, a modo de ejemplo, la geoquímica de vetas realizada en los distritos de Sierra Las Norias y Ligas Negras por Oliveras (1975), los trabajos realizados en el Distrito El Guanaco (Llaumet, 1979a), y el

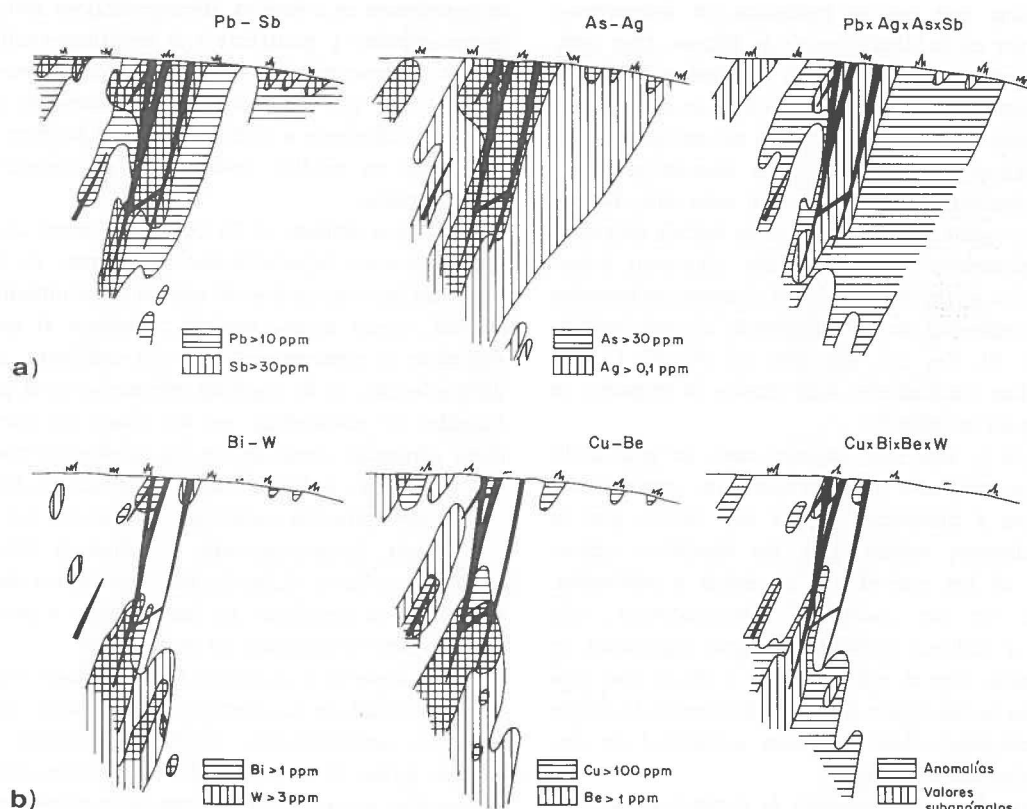


FIG. 3. Anomalías individuales y productos de elementos seleccionados en yacimientos de oro (Modificado de Beus y Grigoryan, 1977).

estudio distrital realizado por la Empresa Nacional de Minería en el Distrito El Indio (Llaumet, 1976). Este último permitió identificar diez áreas con expectativas, entre los ríos Vacas Heladas y Sancarrón, dos de las cuales fueron posteriormente estudiadas, en detalle, con la misma metodología (Llaumet, 1979b).

GEOQUIMICA DE SEDIMENTOS DE DRENAJE

Los sedimentos de drenaje son materiales que, en diversas ocasiones, han sido empleados para definir la potencialidad aurífera de áreas extensas. Su empleo data desde muy antiguo, en el uso de concentrados minerales en los que se detecta la presencia de oro metálico. Como técnica de prospección geoquímica establecida, data desde comienzos de la década de 1930, cuando fue empleada para la detección de depósitos de estaño; posteriormente se utilizó en la prospección de metales básicos, esencialmente cobre y zinc, y

desde 1960 es ampliamente usada en la prospección de yacimientos de oro.

Este método geoquímico encuentra su aplicación básica en la prospección regional, partiendo de un modelo generalizado de la ocurrencia del oro, especialmente en lo que se refiere a la asociación mineralógica en que se encuentra y a la forma en que se produce su movilización desde la fuente. Ambos aspectos son de relevante importancia, demostrando la experiencia que el método es válido siempre que se realice una buena selección de elementos que, combinados con el oro, son indicadores de la presencia del metal y se considere, además, la distancia máxima a la fuente desde la que se puede obtener resultados significativos.

Se cumple, en general, que, en zonas con potencial aurífero, los sedimentos de drenaje presentan contenidos de oro, aunque, en la mayor parte de los casos, los valores máximos son bajos. La forma en que el oro se encuentra en los sedimentos es, en su mayoría, nativa, hecho que

determina que no se produzca un incremento constante en la dirección de la fuente, sino que, frecuentemente, se obtengan resultados erráticos, con anomalías puntuales, difíciles de interpretar.

Debido a lo anterior, el uso de oro debe complementarse con el empleo de elementos guías, cuyos patrones de distribución sean más homogéneos y suavizados, permitiendo definir objetivos de exploración más reducidos. Destacan como elementos guías Ag, As y Sb, aunque numerosos otros elementos se han empleado en este sentido (B, Ba, Bi, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Tl, U, Zn, etc.). Los indicadores más usados al respecto se señalan en la Tabla 4.

Cobre y zinc son, en este caso, de gran utilidad, permitiendo la detección de yacimientos auríferos a distancias de 2-3 km, hecho que es especialmente válido para los depósitos epitermales, en los que el oro se asocia a sulfosales, muchas de las cuales, al descomponerse, dan origen a sulfatos metálicos de gran capacidad de dispersión. Por el contrario, Pb y Sb se usan con éxito en la detección puntual de fuentes de origen de anomalías, dada su escasa movilidad en ambientes acuosos normales.

El empleo de sedimentos de drenaje, en la prospección de yacimientos de oro, puede combinarse con el análisis de concentrados minerales de los sedimentos, especialmente en áreas de drenajes cortos o de relieves maduros. En este caso, además del estudio mineralógico de los resistatos (oro nativo, arsenopirita, casiterita, baritina, etc.), debe procederse al análisis químico de los concentrados por oro y/u otro elemento guía, como Ag, As, Bi, Cr, Cu, Pb, Sb, Sn, Zn, etc. Se observa, en general, una buena correlación entre los contenidos de oro en los concentrados y algunos elementos guías, especialmente Cu y Zn, en los sedimentos sin concentrar. En forma similar, se presenta una buena correlación general, en los concentrados, entre los contenidos de oro y los contenidos de Sn y Cr.

Es de interés considerar algunos aspectos al interpretar los resultados de este tipo de prospección. Los contenidos promedios y umbrales de anomalía de los diferentes elementos no requieren ser necesariamente altos, dependiendo, en gran medida, del pH del medio acuoso en relación al pH de hidrólisis de cada elemento. Este factor es de especial importancia en ambientes silíceos y de lixiviación intensa de sulfuros, ya que, en ellos, los componentes metálicos, en especial cobre y zinc,

se mantienen en solución, incorporándose sólo en forma mínima y paulatina a la fase limo-arcillosa de los sedimentos, que es la que normalmente se analiza; así, por ejemplo, se ha observado que umbrales inferiores a 100 ppm Cu y 120 ppm Zn, obtenidos en medios ácidos, son de interés en muchos casos.

En forma similar, el Eh del medio tiene un rol preponderante, especialmente importante en relación con los contenidos de oro en los sedimentos, el cual, como norma general, aumenta al incrementarse el carácter reductor del ambiente. Este último hecho es de especial relevancia en la priorización de anomalías, en los casos en que se deba comparar altos valores en medios normales, con anomalías hidromórficas detectadas en barreras de precipitación reductoras, como son las que se generan, frecuentemente, en zonas de drenaje impedido a lento, al producirse una brusca disminución en la pendiente de los drenajes y pasar a formar parte de planicies de inundación.

Otro aspecto a considerar se relaciona con la homogeneidad de los drenajes muestreados, consideración especialmente válida al emplear elementos guías. Se ha observado, al respecto, que los contenidos promedios y valores de concentración, expresados en percentiles, parámetros que, en último término, determinan el umbral de anomalías, varían de acuerdo al orden de magnitud de los drenajes muestreados. Así, en drenajes de magnitud intermedia es donde se obtienen las máximas concentraciones, debido a que las condiciones de dilución y pH son óptimas en ellos, en relación con las condiciones existentes en drenajes mayores o menores. Este hecho, que es de especial importancia al planificar el muestreo, es tratado extensamente por Bolviken y Sinding-Larsen (1972), y por Sharp y Jones (1974).

Por otra parte, es de interés anotar que, en la prospección de yacimientos de oro mediante sedimentos de drenaje, es de fundamental importancia la sistematización del método. Así, por ejemplo, el muestreo indiferenciado de sedimentos activos y bancos, determina la presencia de anomalías erráticas, que hacen innecesariamente compleja la interpretación, ya que, a igual volumen de muestra, cabe esperar que los bancos posean una mayor proporción de sedimentos finos que los sectores activos del cauce, con la consiguiente mayor posibilidad de concentración de elementos trazas, no relacionados con mineralización. En el caso de los

análisis por oro, la situación se hace más compleja, debido a la estratificación natural del metal, que se produce en los bancos.

Debe, además, mencionarse, en relación a este método de prospección, la incertidumbre habitual que se produce al obtener anomalías de oro contenidas en patrones no homogéneos de distribución. Este hecho se relaciona con el transporte mecánico del metal, que determina la presencia de altas concentraciones locales, relacionadas, frecuentemente, con características físicas de los drenajes o con la presencia, en la hoya, de vastos volúmenes de roca, que contienen el metal disperso en cantidades no comerciales.

En general, no existen medios para discriminar entre las anomalías anteriores y anomalías relacionadas con yacimientos auríferos. Naturalmente, el examen de los sedimentos es de utilidad, al respecto, ya que la presencia de oro grueso es sugestiva de la existencia de yacimientos en las vecindades de las anomalías. En caso contrario, sólo cabe considerar de interés aquellas anomalías que se encuentran complementadas por anomalías de otros elementos guías.

Los métodos de interpretación de los resultados de las prospecciones, mediante sedimentos de drenaje, son variados. Pueden emplearse tanto el análisis interpretativo de elementos individuales, como de razones. El empleo de técnicas sofisticadas de interpretación es frecuente, entre las que destacan el uso de promedios móviles y ajuste de superficies, para elementos individuales, y análisis de correlación, factores y discriminantes, para multi-elementos. Una síntesis del empleo de estas técnicas se encuentra en Nichol (1973) y Davis (1973).

En Chile, la geoquímica de sedimentos de drenaje es raramente empleada en la prospección de yacimientos auríferos. Sin embargo, los antecedentes disponibles indican que éste es un excelente método para evaluar, en forma rápida, el potencial de áreas extensas.

En estos casos, se ha demostrado también de gran utilidad, el empleo, en terreno, de técnicas analíticas de extracción en frío, permitiendo descartar vastos terrenos en breve tiempo y centralizar los esfuerzos en áreas restringidas más promisorias. Este último aspecto es de especial aplicación en la prospección de yacimientos epitermales andinos, los cuales incluyen en sus menas componentes que, alixiviarse, dan origen a compuestos de gran movilidad en el medio acuoso.

Entre los principales trabajos realizados en el país mediante este método, destaca una prospección regional efectuada en la Alta Cordillera de las Regiones III y IV, la que definió diversas áreas de interés, que posteriormente derivaron en prospectos de magnitud (Cruzat, 1977). Trabajos de menor magnitud se han realizado en la zona central del país, en búsqueda de placeres auríferos (por ejemplo en Lonquimay) y en el Distrito El Chivato (Camus y Drummond, 1979)). Todos estos estudios, en general, han identificado áreas auríferas potenciales, obteniéndose buenos resultados al emplear tanto los sedimentos mismos como concentrados minerales de ellos.

A modo de ejemplo, se muestran mapas resúmenes de prospecciones, que permitieron ubicar yacimientos epitermales, mediante sedimentos de drenaje, y yacimientos primarios con lavaderos asociados, mediante concentrados minerales (Figs. 4 y 5).

GEOQUIMICA DE SUELOS

Las técnicas de prospección geoquímica de suelos han sido empleadas, con frecuencia, para la identificación de yacimientos auríferos, especialmente a contar de la década del 70. El metal se encuentra en los suelos en estado nativo o como constituyente de diversos componentes (resistatos, minerales supérgeños, pátinas de sesquióxidos, materia orgánica, arcillas).

Los materiales muestreados son de naturaleza muy variada, pudiendo consistir en suelos propiamente tales, con buen desarrollo de horizontes; regolitos coluviales, especialmente importantes en zonas de pobre desarrollo de suelos; materiales glaciales; sinters de distinta naturaleza; y aun costras salinas.

La forma de llevar a cabo estos muestreos son las usuales (perfiles, redes, cuchillas y lomas, base de coluvio), existiendo una preferencia general por realizar perfiles sistemáticos, con espaciamiento máximo de 80 m e intervalo de muestreo variable entre 10 y 40 m. Este tipo de perfiles implica que existe una absoluta probabilidad de ubicar yacimientos, que se expresan en superficie en anomalías de una longitud mínima de 56 m, y que la dispersión lateral de los elementos, a partir del yacimiento, varía entre mínimos de 3,5 y 14 m, dependiendo del intervalo elegido. Este aspecto del método es tratado detalladamente por Hodgson

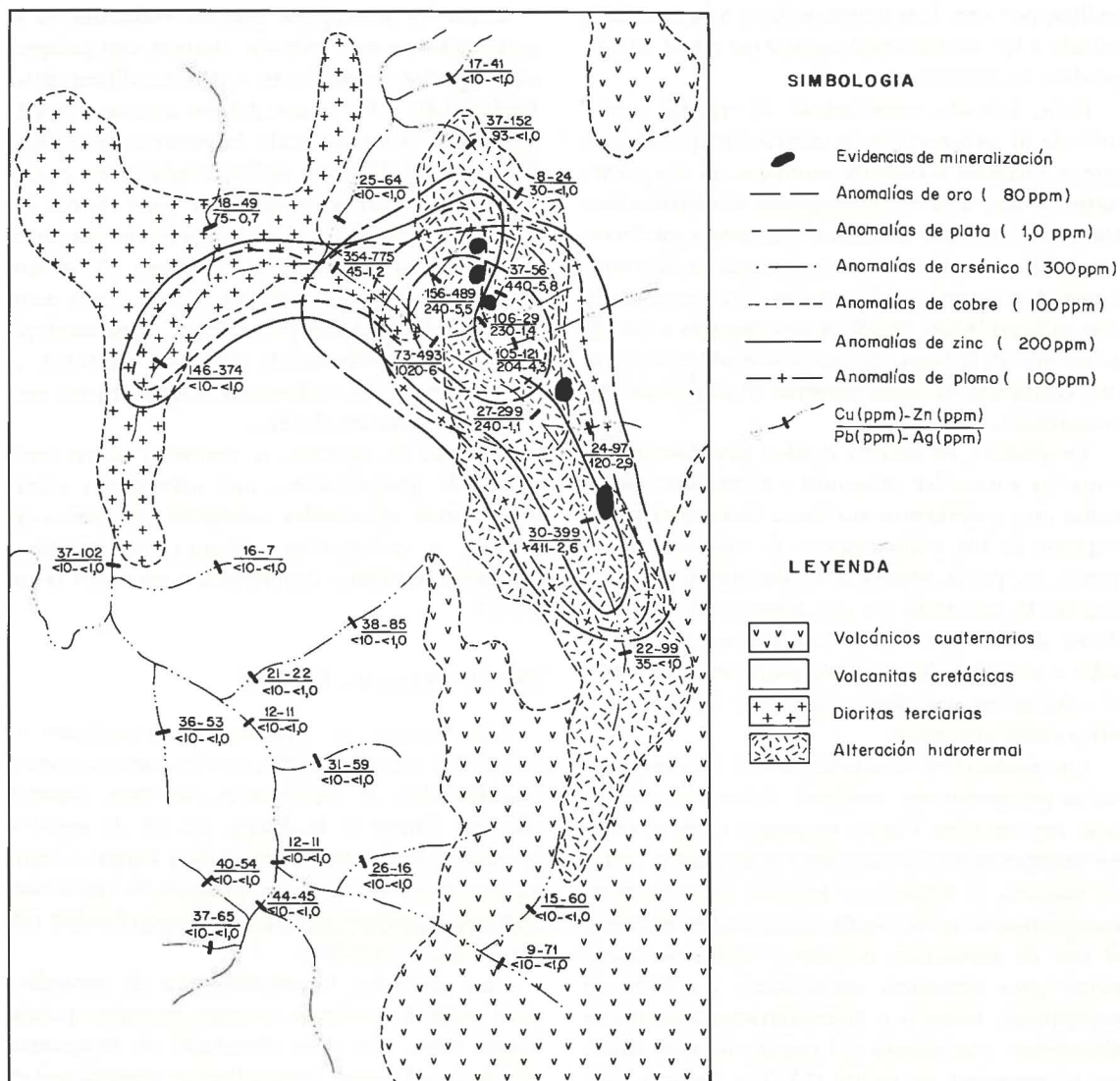


FIG. 4. Resultados de prospección geoquímica en sedimentos de drenaje, en zona de alteración hidrotermal del Norte de Chile.

(1972) y Sinclair (1974).

La selección del punto de muestreo, en relación a la profundidad y desarrollo del suelo, es un factor de importancia en el éxito de esta técnica de prospección. En general, en suelos bien desarrollados, debe muestrearse el horizonte iluvial B, donde se encuentran las principales concentraciones de elementos trazas. Sin embargo, localmente, se observa que se presentan mejores resultados, en cuanto a contraste de las anomalías, en el horizonte eluvial A y en el horizonte orgánico A₀, los cuales, frecuentemente, muestran enriquecimientos en Au, Ag, As y otros elementos trazas,

como resultado de la presencia de complejos organometálicos (Curtin *et al.*, 1968; Lakin *et al.*, 1974). En áreas en que el suelo tiene un pobre desarrollo o en los casos en que se muestree coluvios, la recolección de la muestra deberá hacerse, en lo posible, en el horizonte C, o lo más próximo a la roca fundamental.

Los suelos que presentan horizontes enriquecidos en hierro, también muestran, en dichos niveles, enriquecimientos en Au, As y Sb, debiendo, en estos casos, en consecuencia, preferirse el muestreo de ellos. En relación a este aspecto de la técnica, en general, se requiere de estudios orienta-

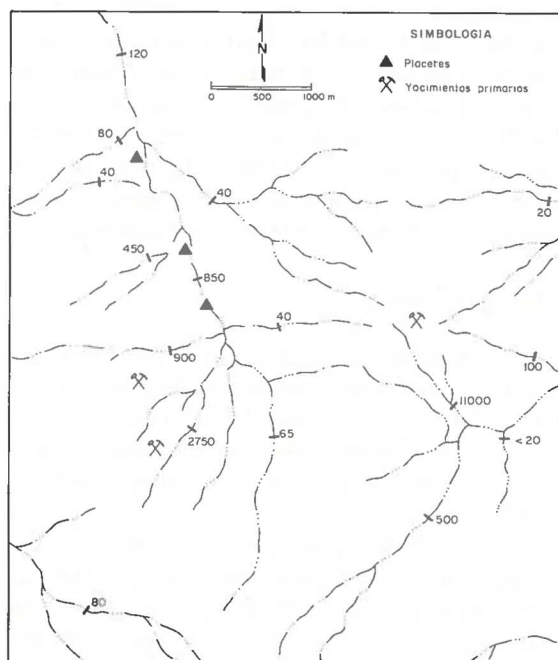


FIG. 5. Resultados de prospección geoquímica en concentrados minerales de sedimentos de drenaje en Chile Central. Valores de oro en ppb.

tivos, sobre áreas mineralizadas conocidas, para definir el horizonte o profundidad óptimos de muestreo.

La fracción del suelo a analizar es otro factor que debe ser considerado, debiendo definirse sobre la base del tamaño esperado de las partículas de oro, ya que debe tenerse en cuenta que las anomalías del metal son, en general, combinadas, producidas tanto por efectos químicos o hidromórficos, como por efectos puramente mecánicos. Es de importancia visualizar, también, la influencia que los procesos de transporte mecánico tienen sobre la génesis de eventuales anomalías, ya que si dicha influencia es preponderante, debe esperarse una migración de las anomalías con respecto a su fuente de origen, por efectos gravitacionales.

El carácter autóctono a alóctono de cada anomalía debe comprobarse con antelación a la realización de trabajos de mayor envergadura y costo, mediante los métodos habituales. Entre éstos destaca el muestreo de un mismo perfil a diferentes profundidades, ya que, en anomalías autóctonas, como es de esperar, los contenidos metálicos de los suelos tenderán a aumentar con la profundidad. También puede emplearse, en este sentido, técnicas analíticas diferenciales, para determinar la

forma en que el metal anómalo se encuentra en el suelo.

El uso de muestreos de suelos mediante perforaciones profundas, se ha popularizado desde la década del 70, en áreas con cubierta de gran espesor (Gleeson y Cormier, 1971; Wennervirta *et al.*, 1971). En estos casos, debe preferirse el muestreo del horizonte C y, si es posible, complementarlo con muestreos litogeoquímicos de la parte superficial de la roca fundamental.

En este tipo de muestreo, el oro es, en general, el mejor indicador que se puede emplear. Sin embargo, debido a que el metal se encuentra en concentraciones pequeñas y frecuentemente erráticas, en el caso que exista una gran componente mecánica, es normalmente necesario hacer uso de elementos guías o indicadores, que presenten patrones de distribución más homogéneos, permitiendo una mejor definición de las anomalías y facilitando la interpretación.

Los elementos guías o indicadores que se han empleado son muy variados, incluyendo As, Ag, Ba, Bi, Cu, Hg, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, U, Zn y otros (Tabla 4). Los más utilizados son As, Hg, Cu, Pb y Zn. El uso normal de As data desde la década del 50, cuando James (1957) demostró una buena correlación entre ambos elementos; con posterioridad As ha sido empleado en una gran variedad de ambientes con señalado éxito. El uso de Hg data de comienzos de la década del 60 (Dvornikov *et al.*, 1963), especialmente en la prospección de yacimientos epitermales, terciarios. Los restantes indicadores han sido empleados profusamente con variados resultados.

Como se anotara al generalizar lo que se relaciona a los contenidos de oro en materiales de ocurrencia natural, se estima que cualquier indicio de oro en suelos, por pequeño que él sea, merece atención y debe considerarse anomalía, ya que los contenidos promedios del elemento en estos materiales son inferiores a 5 ppb.

Los métodos tradicionales de prospección geoquímica de suelos pueden ser combinados con el análisis de concentrados minerales, obtenidos del mismo suelo. Este método opera en forma similar al de los concentrados minerales en sedimentos de drenaje, pudiendo hacerse recuentos de oro y otros resistatos, o análisis de los concentrados por Au, Ag, As y otros elementos trazas que se encuentran relacionados con la mineralización.

Las técnicas de interpretación de este tipo de prospección son similares a las indicadas para los

métodos litogeoquímicos y de muestreo de sedimentos de drenaje, pudiendo emplearse elementos individuales, razones, sumatorias, productos, productividades lineales y areales, y técnicas estadísticas más complejas.

En Chile, la prospección geoquímica de suelos es uno de los métodos más empleados para complementar la evaluación geológica de áreas restringidas, usándose normalmente desde hace unos seis años. La información obtenida es, en todos los casos, privada y, en consecuencia, sólo se puede hacer alcances de tipo general al respecto.

Los materiales muestreados son variables, habiéndose empleado exitosamente coluvios, regolitos y horizontes tipo A y B. Los trabajos de carácter distrital se han realizado, fundamentalmente, por el método de base de coluvios, los que son muestreados en forma sistemática, cada 50-200 m. Los estudios en detalle se realizan mediante redes de perfiles, espaciados entre 40 y 100 m, con intervalos de muestreo variables entre 10 y 50 m; las redes más frecuentes son de 40 x 20 y 80 x 40 m.

El análisis de los suelos se ha basado, fundamentalmente, en su contenido de oro, con buenos resultados. Las anomalías obtenidas son homogéneas y consistentes, con valores absolutos variables. Algunos prospectos muestran extensas anomalías con valores superiores a 1 ppm Au y, localmente, se detectan anomalías restringidas de hasta 17 ppm Au.

Los elementos guías utilizados corresponden, en general, a los indicadores universales. Destacan entre los elementos empleados con este fin: As, Cu, Hg, Sb y Zn. Debe indicarse que As —principal elemento guía empleado— ha arrojado excelentes resultados en terrenos precordilleranos y en la Cordillera de la Costa. Sin embargo, su empleo en la Alta Cordillera Andina no ha dado resultados exitosos, debido a que, en dicha zona, existen extensas anomalías del elemento, procedentes de procesos volcánicos estériles, lo que determina un "background" regional muy alto, en un efecto que se puede considerar como contaminación natural.

A modo de ejemplo, se muestran los resultados obtenidos en un muestreo de semi-detalle de suelos, en una zona de alteración de la III Región (Fig. 6).

MÉTODOS GEOQUÍMICOS NO CONVENCIONALES

Se incluyen en este grupo, diversos métodos de prospección geoquímica, que son empleados oca-

sionalmente, en parte, como complementos de los métodos más habituales. Algunas de estas técnicas han sido exitosas en la detección de yacimientos auríferos, aunque, en general, tienen aplicaciones locales y sus resultados son difícilmente extrapolables o posibles de generalizar. Un recuento del empleo de estos métodos, en la prospección geoquímica de yacimientos de oro, es el siguiente:

Hidroggeoquímica

Los métodos geoquímicos de prospección empleando aguas como materiales de muestreo son utilizados desde la década del 30, a contar de los trabajos de Sergeyev (1946). Una revisión actualizada de ellos se encuentra en Hoag y Webber (1976).

En el caso de la prospección de yacimientos auríferos, estos métodos han demostrado, en general, ser de poca aplicación, principalmente debido a los bajos contenidos en que se encuentran los metales en las aguas naturales. Es así como en las prospecciones usando el metal mismo, aun cuando se empleen técnicas sofisticadas de preconcentración, se obtienen escasos resultados, debido, básicamente, a que el metal se encuentra, en las aguas, en contenidos promedios inferiores a 0,03 ppb, lo cual indica que se requieren eficientes y repetidos procesos de concentración y muestras de gran volumen, para poder obtener valores confiables y significativos. Sin embargo, algunos autores indican que este método es adecuado, ya que, en general, las aguas de zonas auríferas presentarían contenidos de oro superiores al doble del "background" (Kropachev, 1935; Razin y Rozhkov, 1966).

El empleo, en este contexto, de elementos trazas que se encuentran asociados al oro y en proporciones mayores en las aguas naturales, es más frecuente. Así, se ha mencionado, entre estos indicadores, el uso de Ag, As, Cu, Hg, Sb, Tl, Y, Zn y otros (Tabla 4). Los contenidos de estos elementos en aguas dependen, en gran medida, del pH y, en consecuencia, este parámetro debe medirse al proceder al muestreo.

El uso de los diversos indicadores tiene, en general, aplicaciones locales, variando su utilidad de un distrito a otro. En general, se observa que As y Tl serían útiles en la definición puntual de fuentes de anomalías, y que Zn, Cu y Sb serían elementos que permiten detectar mineralización a distancia (Sal'e, 1965; Borovitskii *et al.*, 1966; Goleva,

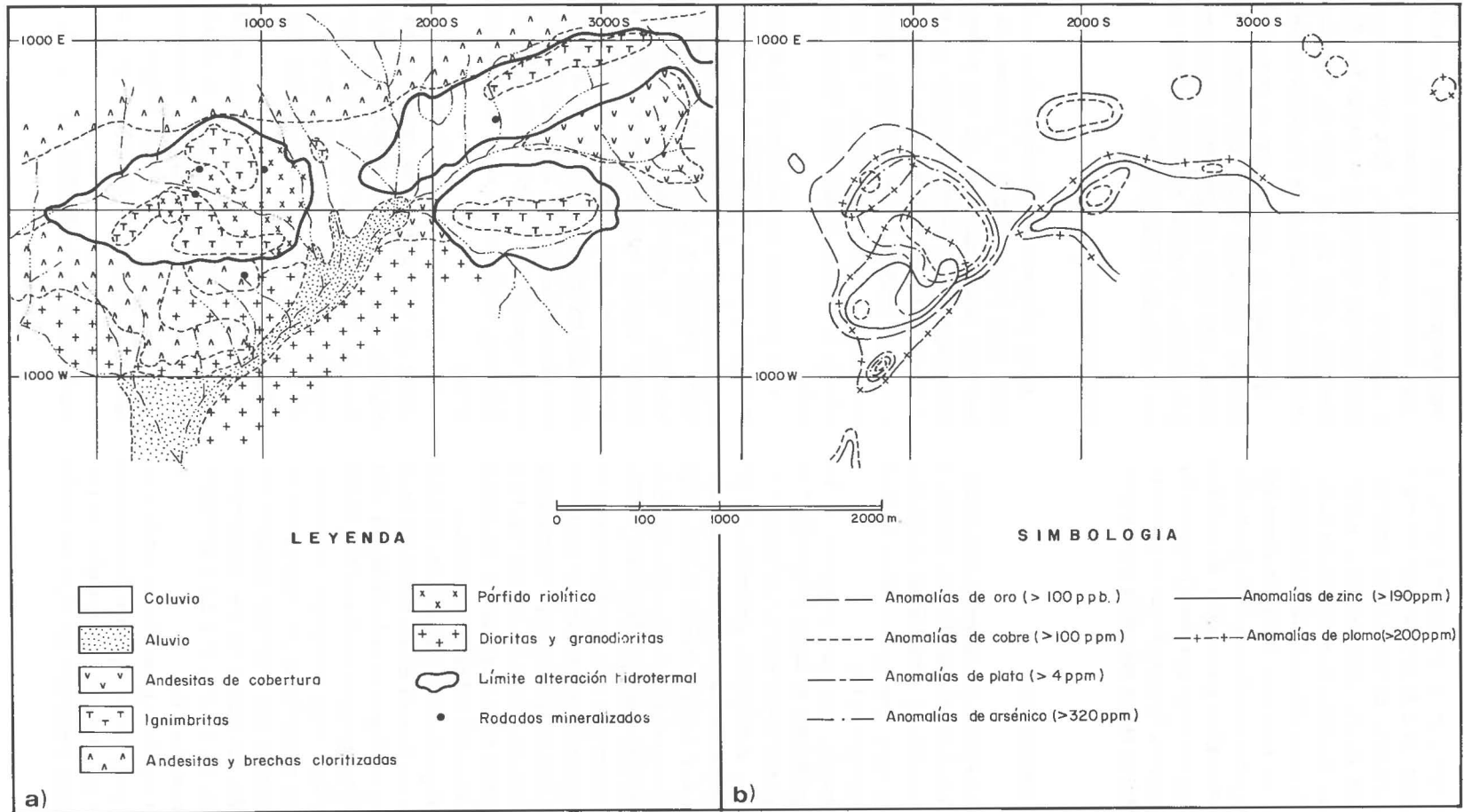


FIG. 6. Resultados de prospección geoquímica en suelos en zona de alteración hidrotermal en el Norte de Chile. a) Marco geológico y de alteración hidrotermal. b) Anomalías geoquímicas en suelos.

1970).

En algunos casos, se ha intentado emplear el anión sulfato como guía de prospección, sin resultados positivos, excepto en forma local. Aparentemente, este anión podría tener interés, conjuntamente con el uso de calcio, en zonas donde se asocian cubiertas de yeso a los yacimientos auríferos. Los resultados, en este caso, deben interpretarse cuidadosamente, pues, con frecuencia, se producen, en las aguas, anomalías procedentes de cuerpos piritosos estériles, de rocas con diseminaciones de piritita y de evaporitas. Es posible que el uso de la razón SO_4/Cl sea de mejor aplicación en este contexto.

Geoquímica de precipitados

Es sabido que algunos precipitados que se producen, frecuentemente, en los drenajes, tienden a adsorber iones metálicos, generándose anomalías que, en ciertos casos, pueden constituir buenos indicios de la presencia de oro.

Así, por ejemplo, con este propósito, se ha muestreado sesquióxidos de hierro ("limonitas") y manganeso ("psilomelano o wad"), habiéndose observado que estos precipitados presentan, en algunos casos, importantes contenidos de oro, superiores localmente a 1 ppm, valores 50-100 veces mayores que los contenidos en precipitados similares en zonas estériles (Warren y Delavault, 1959). También se ha observado que, en dichos casos, se producen enriquecimientos en plata y otros elementos, que se han empleado como indicadores, entre los que destacan As, Ba, Bi, Co, Cu, Hg, Sb y Zn. Los principales guías empleados y sus aplicaciones más frecuentes se indican en la Tabla 4.

El empleo en prospección geoquímica, de estos materiales que se forman en las interfases entre medios acuosos oxidantes y reductores, ha sido revisado específicamente por Nowlan (1976, 1982) y Robinson (1982). Cabe mencionar, solamente, que existiría una especificidad con respecto de los elementos adsorbidos por diferentes precipitados; así, por ejemplo, los óxidos de Mn adsorberían, preferentemente, Ba, Co, Ni, Tl y Zn; y los óxidos de Fe lo harían con As e In.

En este caso, no puede generalizarse respecto de los contenidos promedios a esperar o de los valores que alcanzarán los umbrales de anomalías. Al respecto, es necesario considerar que el pH del medio

acuoso tiene un rol preponderante y que, en muchos casos, se detectan falsas anomalías, debidas exclusivamente a procesos relacionados con el ambiente secundario. Este último aspecto es especialmente notorio en el empleo de algunos indicadores como Zn, As, Cu y Co, requiriendo las anomalías obtenidas de un cuidadoso análisis.

El empleo de este método es restringido y de utilidad puramente local, utilizándose, normalmente, sólo como complemento de otros métodos geoquímicos de mayor aplicación, como sedimentos de drenajes o hidrogeoquímica.

BIOGEOQUIMICA

Estos métodos han sido empleados, en algunos casos, para la prospección de yacimientos de oro, con éxito puramente local. Su uso habitual se ve dificultado por los bajos contenidos que presenta el metal en las plantas, el que en promedio es de 5 ppb en cenizas, y por problemas normales de muestreo al emplear este método. Una buena revisión de la técnica se encuentra en Brooks (1972, 1982).

Otra dificultad de este método se relaciona con la mayor o menor credibilidad que se puede asignar a numerosos antecedentes, respecto del valor como indicadores de oro que tendrían algunos vegetales. Así, por ejemplo, se consideró durante mucho tiempo que las especies de *Equisetum* concentraban oro, indicándose valores de hasta 600 ppm en cenizas; sin embargo, estudios acuciosos demuestran que los contenidos promedios en estos vegetales no alcanzan a 0,4 ppm (Warren y Delavault, 1950; Cannon *et al.*, 1968; Brooks *et al.*, 1981).

Por otra parte, Dorn (1937) mencionó la existencia de seis indicadores vegetales, sin confirmación, entre los que se destacan los del género *Crecoxia*. Similarmente, el género *Festuca* ha sido sugerido como indicador de oro (Dvornikov *et al.*, 1973), al igual que algunas plantas cianógenas (Girling *et al.*, 1979).

Aparentemente, existe una concentración anormal de oro en vegetales que crecen en distritos auríferos, produciéndose incrementos cercanos al doble del "background". En forma similar, el uso de elementos guías, conjuntamente con oro, se ha demostrado exitoso en casos particulares, destacando entre estos indicadores As, Cu, Sb, Se y Te.

Los materiales vegetales con mejor respuesta serían hojas de arbustos bajos y pastos, debiendo realizarse las prospecciones durante la primavera.

Al respecto, y de interés en el caso chileno, debe anotarse que la vegetación en sectores auríferos de áreas desérticas, concentra este metal y otros indicadores —como Ag, As y Sb— en proporciones mucho mayores que las que se encuentran en los suelos. Varios autores han concluido que, en dichas zonas, el empleo de esta técnica debe preferirse a métodos litogeoquímicos o a muestreos de suelos (Talipov, 1968; Talipov *et al.*, 1976).

En Chile, esta técnica ha sido empleada sólo en una oportunidad, en el yacimiento El Chivato, con

muestras foliares de *Proustia baccharoedes* (huañil) y *Acacia caven* (espino). Los resultados de ese trabajo indican que los contenidos de Pb y Zn, en cenizas de huañil, y de Cd, en cenizas de espino, evidencian con nitidez las zonas mineralizadas (Botto *et al.*, 1979). Se presenta una muy buena correlación entre dichos contenidos y los valores de oro en suelos, observándose coeficientes de enriquecimiento de zinc en plantas, con respecto a suelos, de hasta 160 (Fig. 7).

Geoquímica de Gases

La geoquímica de gases o vapores se basa, en términos generales, en el eventual desarrollo de

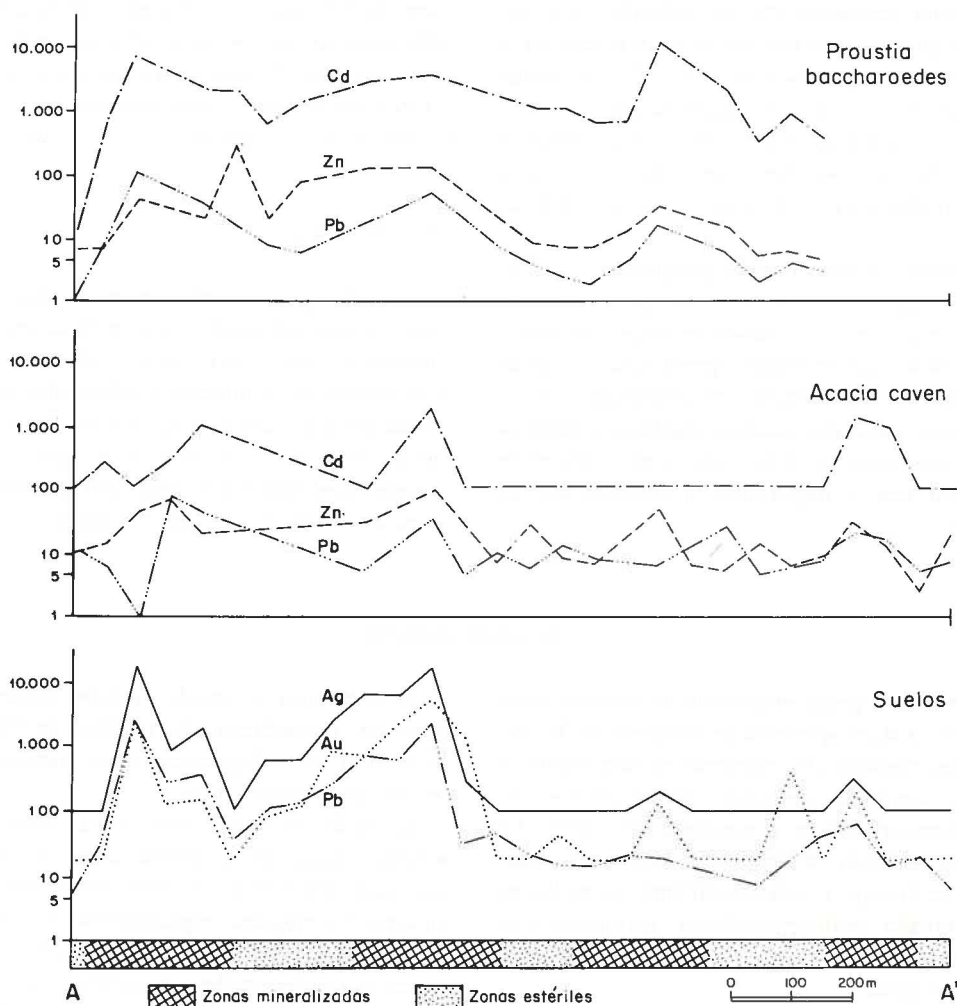


FIG. 7. Comportamiento de elementos traza seleccionados en suelos y vegetales, en el yacimiento El Chivato (Según Botto *et al.*, 1979). Valores en ppb, excepto Zn y Pb en ppm.

fases gaseosas, relacionadas con mineralización, susceptibles de ser detectadas en superficie. El origen de estas fases es múltiple, generándose, especialmente, por efectos radiactivos; por oxidación de constituyentes de las menas; y por efectos geotermiales, de vertientes termales y fumarolas. Entre los gases que se pueden detectar en superficie destacan He, Rn, Ar, H₂S, CO₂, N₂, CH₄, SO₂ y Hg. Revisiones del método pueden encontrarse en McCarthy (1972), y Shipulin *et al.* (1973).

El empleo de esta técnica, en la prospección de yacimientos auríferos, es en general limitado y, de hecho, se ha usado raramente con este propósito. Aparentemente, los gases que tendrían una mejor aplicación al respecto serían Hg, H₂S, F, Cl y compuestos volátiles de As y Sb.

La escasa aplicación de este método puede ser explicada por dificultades que se encuentran en la interpretación y por haberse obtenido resultados contradictorios, ya que, en algunos casos, el método ha demostrado tener una buena respuesta sobre depósitos conocidos y una respuesta incierta en extrapolaciones realizadas a áreas vírgenes vecinas.

El empleo de este método geoquímico ha sido muy restringido en Chile, en la búsqueda de yacimientos auríferos. Los escasos antecedentes disponibles indican que se empleó geoquímica de gases de mercurio en el Distrito de Punitaqui (Arias, 1976), con naturales buenos resultados dada la relación existente, en dicha área, entre la mineralización aurífera e importante mineralización de mercurio.

Geoquímica de Rodados Silíceos

Un método geoquímico, empleado localmente, se relaciona con el análisis de fragmentos de rocas silicificadas, que se asocian a yacimientos de oro y que son arrastrados como rodados en drenajes.

Estos métodos han sido combinados con la observación macroscópica de los rodados, existiendo antecedentes que sugieren que estos jaspeoides pueden constituirse en adecuados indicios de la existencia de yacimientos de oro (Lovering *et al.*, 1968; Lovering, 1972, 1981).

El empleo de esta técnica es sólo incipiente y se ve limitado por la necesaria presencia de jaspeoides relacionados con la mineralización. Los resultados disponibles indican que los contenidos de elementos trazas, en los rodados silíceos, permiten diferenciar el tipo de mineralización eventual, asociada. Así, en el caso de yacimientos de oro, los jaspeoides presentan altos contenidos de Au y Ag, y anomalías menores de Ti, Ba, V, Mo y tierras raras.

Otros Métodos

Numerosos otros métodos geoquímicos, de uso local, se han empleado en la prospección de yacimientos de oro. Entre éstos pueden mencionarse el muestreo de bitúmenes o hidrocarburos sólidos; de horizontes carbonosos, contenidos en formaciones favorables; de nieve; y de aguas en lagos o lagunas. Los resultados obtenidos son inciertos y, aparentemente, de uso muy restringido.

CONCLUSIONES

Los métodos geoquímicos son un efectivo complemento en la prospección de yacimientos de oro. Diferentes técnicas de muestreo se han usado al respecto, siendo las de mayor aplicación los métodos litogeoquímicos y muestreo de suelos. En menor proporción se emplea muestreo de sedimentos de drenaje y, ocasionalmente, métodos no convencionales (hidrogeoquímica; geoquímica de gases, de precipitados, de rodados silíceos; biogeoquímica; y otros).

El éxito en la aplicación de estas técnicas se relaciona con una adecuada selección del medio de muestreo y con la óptima utilización de las asociaciones de elementos, que permitan identificar la eventual mineralización. Además de oro, nume-

rosos elementos se pueden utilizar como guías al respecto, dependiendo la utilidad de éstos de la asociación mineralógica en que se encuentra el oro en los yacimientos buscados.

En Chile, estos métodos se han empleado con señalado éxito en la identificación de zonas con potencial aurífero y de estructuras mineralizadas en áreas restringidas, especialmente en sectores de la Alta Cordillera Andina. Los mejores resultados se han obtenido empleando sedimentos de drenaje, en prospecciones regionales; litogeoquímica, en estudios distritales; y suelos, en trabajos de detalle. Experimentalmente, la biogeoquímica también ha demostrado su utilidad.

REFERENCIAS

- ARANEDA, R. 1982. El Indio, yacimiento de oro, plata y cobre, Coquimbo, Chile. *Rev. Minerale*, Vol. 37, No. 160, p. 5-13.
- ARIAS, J. 1976. Aplicación de las características geoquímicas del mercurio a la exploración minera. *Inst. Invest. Geol. Chile* (inédito), 90 p. Santiago.
- BEUS, A. 1969. Geochemical criteria for the assessment of the mineral potential of the igneous rock series during reconnaissance exploration. *Col. School Mines, Quart.*, Vol. 64, No. 1, p. 67-74.
- BEUS, A.; GRIGORYAN, S. 1977. Geochemical exploration methods for mineral deposits. *Applied Publishing Ltd.*, 287 p., Wilmette.
- BOLGARSKY, M. 1950. Geology and petrography of the southwestern part of the Ivory Coast. *Government Gen. Afrique Occidentale Franc.*, Bull., Div. Mines, No. 9, p. 1-170.
- BOLVIKEN, B.; SINDING-LARSEN, R. 1972. Total error and other criteria in the interpretation of stream-sediment data. *In Geochemical Exploration*, 1972. *Inst. Min. Metall.*, p. 285-296. London.
- BOROVITSKII, U.; MILLER, A.; SHEMYAKIN, V. 1966. Determination of minute amounts of gold in natural waters of the Alden region. *Geochem. Int.*, Vol. 3, No. 2, p. 371-377.
- BOTTO, E.; ESPEJO, C.; TRAVISANY, V. 1979. Estudio del comportamiento de elementos metálicos en suelos y plantas de un yacimiento aurífero de la zona sur. *In Congr. Geol. Chileno*, No. 2, *Actas*, Vol. 4, p. J93-J107.
- BOYLE, R. 1974. The use of major elemental ratios in detailed geochemical prospecting utilizing primary haloes. *J. Geochem. Expl.*, Vol. 3, p. 345-369.
- BOYLE, R. 1979. The geochemistry of gold and its deposits. *Can. Geol. Surv., Bull.*, No. 280, 584 p.
- BOYLE, R. 1982. Geochemical methods for the discovery of blind mineral deposits. *C. I. M., Bull.*, Vol. 75, No. 844, p. 113-142.
- BOWES, W.; KNOWLES, P.; SERRANO, M.; *et al.* 1958. Reconnaissance for uranium in the Elqui-Vicuña area, Province of Coquimbo, Chile. *U. S. A. E. C.-Inst. Invest. Geol. Chile* (unpubl.) 21 p.
- BROOKS, R. 1972. *Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration*. Harper and Rowe, 290 p. New York.
- BROOKS, R. 1982. Biological methods of prospecting for gold. *J. Geochem. Expl.*, Vol. 17, p. 109-122.
- BROOKS, R.; HOLZBECHER, J.; RYAN, D. 1981. Horsetails (*Equisetum*) as direct indicators of gold mineralization. *J. Geochem. Expl.*, Vol. 16, p. 21-26.
- BROWN, B.; HILCHEY, G. 1974. Sampling and analysis of geochemical material for gold. *In Geochemical exploration 1974*. (Eliot, I. L.; Fletcher, W. K.; eds.). *Assoc. Expl. Geoch., Spec. Publ.*, No. 2, p. 683-690.
- CAMUS, F.; DRUMMOND, A. D. 1979. The El Chivato gold prospect, VII Region, Chile. *Private unpublished report*, 17 p.
- CAMPBELL, W. 1981. Manganese dioxide causes spurious gold values in flame atomic-absorption readings from HBr-Pr₂ digestion. *J. Geochem. Expl.*, Vol. 15, p. 613-616.
- CANNON, H.; SHACKLETTE, T.; BASTRON, H. 1968. Metal absorption by *Equisetum* (horsetail). *U. S. Geol. Surv., Bull.*, No. 1278A, p. 1-21.
- CLIFTON, H.; HUNTER, R.; SWANSON, F.; *et al.* 1969. Sample size and meaningful gold analysis. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, No. 625C, p. 1-17.
- CORNWALL, H.; LAKIN, H.; NAKAWA, H.; *et al.* 1967. Silver and mercury geochemical anomalies in the Comstock, Tonopah, and Silver Reef districts, Nevada, Utah. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, No. 575B, p. 10-20.
- CRUZAT, A. 1977. Geochemical soil survey at the El Indio property, Elqui Province, IV Region, Chile. *Private unpubl. report*, 30 p.
- CRUZAT, A.; FUENZALIDA, R.; PAGE, B.; *et al.* 1970. Estudio geológico-económico de la Comuna de Navarino. *Inst. Invest. Geol. Chile* (inédito), 108 p. Santiago.
- CURTIN, G.; LAKIN, H.; NEVERBURG, G.; *et al.* 1968. Utilization of humus-rich forest soil (mull) in geochemical exploration for gold. *U. S. Geol. Surv., Circ.*, No. 562, 11 p.
- DAVIS, J. 1973. *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley and Sons, 550 p. New York.
- DORN, P. 1937. Pflanzen als Anzeichen für Erzlagerstätten. *Der Biologe*, Vol. 6, p. 11-13.
- DVORNIKOV, A.; VASILEVSKAYA, A.; SHCHERBAKOV, V. 1963. Mercury dispersion aureoles in the soils of the Nagol Uyi Range. *Geochemistry*, No. 5, p. 501-509.
- DVORNIKOV, A.; OVSYANNIKOV, L.; SIDENKO, O. 1973. Biogeochemical dispersion haloes of calcophile elements in gold ore deposits of the Nagol'ngi Ridge (Donets Basin). *Chem. Abstr.*, Vol. 79, 145290 K.
- ERICKSON, R.; MARRANZINO, A.; ODA, U.; *et al.* 1973. Geochemical exploration near the Getchell mine, Humboldt County, Nevada. *U. S. Geol. Surv., Bull.*, No. 1198-A, 26 p.
- ERICKSON, R.; VAN SICKLE, G.; NAKAGAWA, H.; *et al.* 1966. Gold geochemical anomaly in the Cortez district, Nevada. *U. S. Geol. Surv., Circ.*, No. 534, 9 p.
- GARRET, R. 1974. Mercury in granitoid rocks of the Yukon and its relation to gold-tungsten mineralization. *J. Geochem. Expl.*, Vol. 3, p. 277-289.
- GIRLING, C.; PETERSON, P.; WARREN, H. 1979. Plants as indicators of gold mineralization at Watson Bar, British Columbia, Canada. *Econ. Geol.*, Vol. 74, p. 902-907.
- GLEESON, C.; COURMIER, R. 1971. Evaluation by geochemistry of geophysical anomalies and geological targets using overburden sampling at depth. *In Geochemical Exploration* (Boyle, R. W.; Mejerrielle, J. I.; eds.) *C. I. M. M., Spec. Vol.* 11, p. 159-165.

- GOLEVA, G. 1970.** Hydrogeochemistry of the gold deposits of the Balei district. *Int. Geol. Rev.*, Vol. 12, No. 2, p. 195-203.
- GOLOUBINOFF, V. 1937.** Sur la prospection géochimique différentielle des gites minéraux. *Compt Rend., Acad. Sci. Paris*, Vol. 204, p. 1075-1077.
- GOTTFRIED, D.; ROWE, J.; TILLING, R. 1968.** Distribution of gold in igneous rocks. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, No. 727, 42 p.
- GOVETT, G.; NICHOL, I. 1979.** Lithochemisrty in mineral exploration. *In* *Geophysics and Geochemistry in the search of metallic ores* (Hood, P. J.: ed.). *Can Geol. Surv., Econ. Geol., Rep. No.* 31, p. 339-362.
- GRIGORYAN, S. 1974.** Primary geochemical haloes in prospecting and exploration of hydrothermal deposits. *Int. Geol. Rev.*, Vol. 16, No. 1, p. 12-25.
- HAFFTY, J.; RILEY, L.; GOSS, W. 1977.** A manual on the fire assaying and determination of the noble metals in geological materials. *U. S. Geol. Surv., Bull.*, No. 1445, 58 p.
- HILDON, M.; SULLY, G. 1971.** The determination of gold in the ppb and ppm ranges by atomic absorption spectrometry. *Ann. Chim. Acta.*, Vol. 54, p. 245-251.
- HOAG, R.; WEBBER, G. 1976.** Hydrogeochemical exploration and sources of anomalous waters. *J. Geoch. Expl.*, Vol. 5, p. 39-57.
- HODGSON, W. 1972.** Optimum spacing for soil sample traverses. *In* *APCOM Symposium*, No. 10 (South African Inst. Min. Met.; ed.). p. 75-78. Johannesburg.
- JAMES, C. 1957.** Applied geochemical studies in southern Rhodesia and Great Britain. *Imp. Coll., Sci. Tech. Geoch. Prosp. Res. Centre, Commun.*, No. 12, p. 1-237.
- KNOWLES, P.; BOWES, W.; KLOHN, E.; et al. 1958.** Reconnaissance for uranium in the Elqui-Vicuña area, Province of Coquimbo. *U. S. A. E. C. - Inst. Invest. Geol. Chile* (unpubl.) 16 p. Santiago.
- KOLOTOV, B.; SPASSKAYA, T.; VAGUER, B.; et al. 1980.** The relationship between colloidal and other forms of migration of gold in water in the supergene zones of ore deposits. *Geoch. Int.*, Vol. 17, p. 80-82.
- KROPOCHEV, V. 1935.** The distribution of gold in nature. *Chem. Abstr.*, Vol. 32, 6980 f.
- LAKIN, H.; CURTIN, G.; HUBERT, A.; et al. 1974.** Geochemistry of gold in the weathering cycle. *U. S. Geol. Surv., Bull.*, No. 1130, 80 p.
- LOVERING, T. 1972.** Jasperoid in the United States - its characteristics, origin and economic significance. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, No. 710, 164 p.
- LOVERING, T. 1981.** Jasperoid float and stream cobbles as tools in geochemical exploration for hydrothermal ore deposits. *J. Geochem. Expl.*, Vol. 14, p. 69-81.
- LOVERING, T.; LAKIN, H.; HUBERT, A. 1968.** Concentration and minor element association of gold in ore-related jasperoid samples. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, No. 600-B, p. B112-B114.
- LLAUMET, C. 1976.** Estudio geológico del proyecto El Indio. *Empr. Nac. Minería (ENAMI-Chile)* (inédito), 57 p. Santiago.
- LLAUMET, C. 1979a.** Estudio geológico del distrito minero El Guanaco, II Región. *Empr. Nac. Minería (ENAMI-Chile)* (inédito), 46 p. Santiago.
- LLAUMET, C. 1979b.** Estudio geológico del distrito minero El Indio, con énfasis en los sectores Libra y Sancarrón, III y IV Región. *Empre. Nac. Minería (ENAMI-Chile)* (inédito), 92 p. Santiago.
- MAZZUCCHELLI, R. 1965.** Geochemical dispersion related to gold mineralization, Western Australia. *Ph. D. Thesis, Imp. College, Univ. London* (unpubl.), 185 p.
- MCCARTHY, I. 1972.** Mercury vapor and other volatile components in the air as guides to ore deposits. *J. Geochim. Expl.*, Vol. 1, p. 143-162.
- MEIER, A. 1980.** Flameless atomic-absorption determination of gold in geological materials. *J. Geochim. Expl.*, Vol. 13, p. 77-85.
- NICHOL, I. 1973.** The role of computerized systems in geochemical exploration. *C. I. M. M., Tans.*, Vol. 76, p. 15-24.
- NOWLAN, G. 1976.** Concretionary manganese-iron oxides in streams, and their usefulness as a sample medium for geochemical prospecting. *J. Geochim. Expl.*, Vol. 6, p. 193-210.
- NOWLAN, G. 1982.** Guidelines for finding concretionary Mn-Fe oxides in streams. *J. Geochim. Expl.*, Vol. 17, p. 77-79.
- OLIVERAS, I. 1975.** Geología económica, geoquímica y marco regional ampliado de los distritos auríferos Sierra de Las Norias y Ligas Negras, Provincia de Atacama. *Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol.*, 165 p. Santiago.
- OVCHINNIKOV, L.; BARANOV, E. 1972.** Endogenic geochemical haloes of pyritic ore deposits. *Int. Geol. Rev.*, Vol. 14, No. 5, p. 419-429.
- POLIKARPOCHKIN, V.; KITAIEV, N.; SARAPULOVA, V. 1965.** Structure and vertical zonation of the primary dispersion aureoles at the Balei gold deposits. *Geoch. Int.*, Vol. 2, No. 4, p. 741-753.
- POLIKARPOCHKIN, V.; KITAIEV, N. 1971.** Endogenic haloes of epithermal gold-bearing deposits. *In* *Geochemical Exploration. C. I. M. M., Spec. Vol.* 11, p. 381-383.
- RAZIN, L.; ROZHKOV, I. 1966.** Geochemistry of gold in the crust of weathering and the biosphere of gold-ore deposits of the Kuranakh type. *Econ. Geol.*, Vol. 62, p. 437-438.
- ROBINSON, G. 1982.** Trace metal absorption potential of phases comprising black coatings on stream pebbles. *J. Geoch. Expl.*, Vol. 17, p. 205-219.
- ROSLYAKOV, N.; PESHEVITSKY, B.; NEPEYNA, L.; et al. 1971.** Geochemistry of gold in the process of weathering crust formation. *In* *Int. Geoch. Congr., Abstr. of Rep.*, Vol. 2, p. 719-720. Moscú.
- ROWE, J.; SIMON, F. 1968.** The determination of gold in geologic materials by neutron-activation analysis using fire assay for the radiochemical separations. *U. S. Geol. Surv., Circ.*, No. 599, 4 p.

- SAAGER, R.; MEYER, M.; MUFF, R. 1982. Gold distribution in supracrustal rocks from Archean greenstone belts of southern Africa and from Paleozoic ultramafic complexes of the European Alps: Metallogenetic and geochemical implications. *Econ. Geol.*, Vol. 77, p. 1-24.
- SAL'E, O. 1965. Hydrochemical method in prospecting for gold in the Aldan area. *Chem. Abstr.*, Vol. 63, p. 12868 g.
- SEELAND, D. 1973. Geochemical reconnaissance for gold in the sedimentary rocks of the Great Lakes Region, Minnesota to New York. *U. S. Geol. Surv., Bull.*, No. 1305, 16 p.
- SERGEYEV, Y. 1946. Water analysis as a means of prospecting for metallic ore deposits. *In* Selected Russian papers on geochemical prospecting for ore. *U. S. Geol. Surv.*, (Ed. 1950), 103 p.
- SHARP, W.; JONES, T. 1974. A topologically optimum prospecting plan for streams. *In* Geochemical Exploration 1974 (Elliot, J.; Fletcher, W.; eds.) *Assoc. Expl. Geoch., Spec. Publ.*, No. 2, p. 227-235.
- SHIPULIN, F.; GENKIN, V.; DISTLER, P.; *et al.* 1973. Some aspects of the problem of geochemical methods of prospecting for concealed mineralization. *J. Geoch. Expl.*, Vol. 2, p. 193-236.
- SINCLAIR, A. 1974. Some considerations regarding grid orientation and sample spacing. *In* Geochemical Exploration 1974 (Elliot, J.; Fletcher, W.; eds.) *Assoc. Expl., Geoch., Spec. Publ.*, No. 2, p. 133-138.
- STEWART, J.; CRUZAT, A.; PAGE, B.; *et al.* 1971. Estudio geológico-económico de la Cordillera Patagónica, entre los paralelos 51° 00' y 53° 30' S., Provincia de Magallanes. *Inst. Invest. Geol. Chile* (inédito), 174 p. Santiago.
- TALIPOV, R. 1968. Biochemical prerequisites in prospecting for gold mineralization under desert conditions. *Chem. Abstr.*, Vol. 73, p. 47379 c.
- TALIPOV, R.; GLUSHCHENKO, U.; NISHANOV, P.; *et al.* 1976. Some principles of gold distribution and trace elements accompanying it in plants of the Almalyk ore region. *Chem. Abstr.*, Vol. 85, p. 35551 n.
- TAUSON, L.; KOZLOV, V. 1973. Distribution functions and ratios of trace-element concentrations as estimators of the ore-bearing potential of granites. *In* Geochemical Exploration 1972 (Jones, M. J.; ed.) *Inst. Min. Met.*, p. 37-44. London.
- THOMPSON, M.; HOWARTH, R. 1978. A new approach to the estimation of analytical precision. *J. Geoch. Expl.*, Vol. 9, p. 23-30.
- VAKHRUSHEV, V.; TSIMBALIST, V. 1967. Distribution of gold in the sulfides of the Altai-Sagan skarn deposits. *Geoch. Int.*, Vol. 4, No. 5, p. 972-977.
- VILLALOBOS, J.; MAGGIO, V. 1983. Análisis de oro y plata. Estudio de precisión y exactitud. *Rev. Minerales*, Vol. 38, No. 161, p. 49-51.
- WAGER, L.; BROWN, G. 1960. Collection and preparation of materials for analysis. *In* Methods in Geochemistry (Smales, A.; Wager, L.; eds.) *Interscience*, p. 4-43. New York.
- WARREN, H.; DELAVAUULT, R. 1950. Gold and silver contents of some trees and horsetails in British Columbia. *Geol. Soc. Am., Bull.*, Vol. 61, Part 1, p. 123-128.
- WARREN, H.; DELAVAUULT, R. 1959. Pathfinding elements in geochemical prospecting. *In* Symp. Expl. Geoquím., Congr. Geol. Int., Vol. 2, p. 255-260. México.
- WELLS, I. 1971. Association of gold and arsenic with pyrite, Cortez and Carlin mines, Nevada. *Econ. Geol.*, Vol. 66, p. 1270-1271.
- WELLS, I.; STOISER, L.; ELLIOT, J. 1969. Geology and geochemistry of the Cortez gold district, Nevada. *Econ. Geol.*, Vol. 64, p. 526-537.
- WINNERVIRTA, H.; BOLVIKEN, B.; NILSSON, C. 1971. Summary of research and development in geochemical exploration in Scandinavian Countries. *In* Geochemical Exploration (Boyle, R. W.; Megerrigle, J. I.; eds.) *C. I. M. M., Spec. Vol.* 11, p. 11-14.

* Trabajo presentado en el Coloquio sobre Geología y Prospección del Oro, organizado por el Departamento de Minas de la Universidad de La Serena, 15 al 18 de Junio de 1983.