

PROSPECCION BIOGEOQUIMICA DEL ORO EN EL YACIMIENTO DE PAU-A-PIQUE, ESTADO DE MATO GROSSO, BRASIL

M. C. Lima e Cunha *, G. M. Pulz *, C. J. Fernandes *, F. E. Pinho **,
A. Pizzato Quadros ** y M. Sobral ***

ABSTRACT

During the dry season (July-August 1997) eleven samples of soil-plant pairs were collected in the Pau-a-Pique gold deposit, southwestern of Amazonic Craton, about 440 km NW of Cuiabá city. The area contains rocks of Aguapeí Group, Rondonian Belt and recent cover. The area has a steep relief covered by thin soils. The vegetation is sparse and predominantly composed of xerophitic shrubs. Two kinds of plant species were sampled, one belonging to the Annonaceae family and the other one to the Piperaceae family. The ashes of these plants and the soils were analysed by INAA and ICP. The highest gold contents are found in the ashes of plants collected in the colluvium soil (white mica, clay minerals and Fe-oxyhydroxides) covering the hydrothermal halo of the deposit. In the soil, the highest gold values are those from eluvium related to the quartz veins. The higher gold values in plants respect to the soils suggest that the plants could be useful to establish hydrothermal targets.

Key words: *Gold, biogeochemistry, soil geochemistry, tropical environment.*

RESUMEN

Se recogieron once muestras de pares suelo-planta durante la estación seca (julio-agosto 1997) en el yacimiento de oro de Pau-a-Pique al suroeste del cratón Amazónico, unos 440 km al NO de la ciudad de Cuiabá. La geología de esta zona presenta rocas pertenecientes al Grupo Aguapeí y al Cinturón Rondonico, así como sedimentos recientes de cobertera. La topografía presenta relieves abruptos y los suelos forman una delgada lámina. La vegetación es escasa y predominan los arbustos xerófitos. Se muestrearon dos especies de plantas, una de ellas perteneciente a la familia Annonaceae, y la otra a la familia Piperaceae. Las cenizas de estas plantas y de sus suelos fueron analizadas mediante las técnicas de INAA y ICP. Los más altos contenidos en oro se encontraron en las cenizas de las plantas recogidas en los coluviones (mica blanca, arcillas y oxihidróxidos de Fe) que recubren el halo hidrotermal de los depósitos. En el suelo, los valores más altos del oro corresponden a los productos relacionados con la meteorización de las vetas de cuarzo. El mayor contenido en oro en las plantas con respecto a los suelos sugiere que éstas pueden ser utilizadas para localizar posibles yacimientos hidrotermales.

Palabras clave: *Oro, biogeoquímica, suelo, geoquímica, medioambiental tropical.*

Introducción

La prospección biogeoquímica puede ser una alternativa en situaciones donde otras técnicas de prospección son menos efectivas y/o más caras,

como por ejemplo, en el ártico canadiense (Reading *et al.*, 1987), en el oeste australiano (Smith y Keele, 1984), y en el oeste estadounidense (Smith y Kretschmer, 1992), entre otros. Pruebas bioquímicas en áreas auríferas de fajas tropicales (Dunn,

* Centro de Estudios em Petrologia e Geoquímica-CPGq. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Caixa Postal 15001. CEP 91509-900. Porto Alegre, RS, Brasil.

** Instituto de Ciências Exatas e da Terra. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Mato Grosso. CEP 78060-900. Cuiabá, MT.

*** Faculdade de Farmácia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Ipiranga. 2752. CEP 90610-000. Porto Alegre, RS, Brasil.

1992; Andrade *et al.*, 1991), también han tenido éxito. Los resultados positivos de la biogeoquímica en otras regiones del globo estimularon el uso de esta técnica en el yacimiento aurífero Pau-a-Pique, al oeste del estado de Mato Grosso. Este yacimiento se encuentra en la provincia aurífera de Alto Guaporé, la cual contiene innumerables remociones hidrotermales. El oro en la región es explotado tanto en vetas de cuarzo como en eluvios, depósitos de ladera y aluviones (Menezes *et al.*, 1993).

Un breve resumen sobre las aplicaciones de la biogeoquímica, en especial en áreas de densa cubierta vegetal, es presentado a continuación, para mostrar que la vegetación puede ser un medio de muestreo, así como lo son las rocas, los suelos, y los sedimentos de corriente de agua, entre otros.

Los vegetales difieren en su composición química, ya que cada uno tiene sus propias necesidades y grados de tolerancia a una amplia gama de elementos químicos. Las plantas absorben los elementos del medio de un modo selectivo, utilizándolos para su nutrición o únicamente acumulándolos en sus tejidos sin interferencias en sus funciones vitales.

Uno de los principios que rige la prospección se basa en la capacidad del sistema radicular (raíz principal, raíces secundarias y pelos radiculares) de abarcar un volumen considerable de la subsuperficie del terreno (Bidwell, 1979). De esta manera, las raíces se mantienen en constantes intercambios biogeoquímicos con decenas de metros cúbicos de suelo, roca y agua intersticial. Aun siendo capaces de absorber selectivamente los elementos contenidos en el suelo, las plantas no pueden excluirlos totalmente, ya que la permeabilidad de la membrana celular es finita. Así, la composición mineral de sus cenizas tiende a reflejar las peculiaridades químicas de su hábitat.

Es importante señalar que no siempre los elementos que se muestran altamente enriquecidos en la planta (con relación a la concentración media en esta) son abundantes en el suelo. Por ejemplo, el Zn puede estar concentrado en la planta sin que el suelo lo contenga en proporciones significativas. A veces estas variaciones pueden estar relacionadas a factores ambientales independientes de la existencia de anomalías en el medio. La absorción de elementos tóxicos como el uranio, y por eso concentrados en las plantas en pequeñas cantidades, en algunas situaciones retratan con más efectividad la composición del suelo que los elementos nutritivos o neutros, aunque su cantidad en la planta sea baja. Es la proporcionalidad entre la química de la planta y la del suelo la que puede dar una mejor respuesta biogeoquímica, y no el valor absoluto de los elementos. El factor determinante en la acumulación de un elemento por las plantas es su mayor disponibilidad

en el suelo y/o en el agua subterránea, independientemente de su concentración en estos medios.

La fitogeoquímica puede contribuir como un método complementario en programas de exploración, en especial en situaciones en las cuales la geoquímica de suelos y otros materiales superficiales se muestran poco efectivos en la búsqueda de yacimientos minerales.

Este trabajo fue desarrollado con el objetivo de verificar si las especies vegetales seleccionadas para el estudio concentran oro de modo que puedan ser utilizadas como medio de muestreo en la prospección de este metal en la región del yacimiento de Pau-a-Pique. Los resultados obtenidos por la biogeoquímica fueron confrontados con los datos del suelo, con la intención de comparar la efectividad de ambos métodos en el área estudiada, donde el relieve accidentado y la presencia de coberturas transportadas y superficiales recomienda el uso de técnicas alternativas de prospección mineral.

Contexto geológico del yacimiento de Pau-a-Pique

El yacimiento de Pau-a-Pique está situado en el sudoeste del Cratón Amazónico, a unos 440 km de Cuiabá, por la BR-070 y después, la BR 174. Desde el punto de vista tectónico, más del 90 % de las rocas aflorantes en el área están representadas por metasedimentos del Grupo Aguapeí, mientras que el resto está constituido por los granitos-gneises de Santa Helena del cinturón Rondoniano y coberturas recientes (fig. 1). El evento Sunsás-Aguapeí propició el cabalgamiento de los metasedimentos del Grupo Aguapeí sobre los granitogneises, produciendo fajas anastomosadas de cizallamiento. En el interior del cinturón milonítico la foliación se dispone según N20-30° W, con inclinaciones variables del orden de 50 a 85° para el sudoeste.

El Grupo Aguapeí se compone de tres formaciones de secuencias sedimentarias transgresivas-regresivas proterozoicas. En la base estratigráfica aflora la formación Fortuna constituida por metaconglomerados y metapsamitas, depositados en ambiente marino progradante (Alvarenga y Saes, 1992). Sobre esta unidad se encuentra la formación Vale da Promissão, que se compone de metapelitas, pizarras y metapsamitas depositadas por abanicos submarinos y barras de plataformas (Alvarenga y Saes, 1992). En la parte superior del Grupo Aguapeí se encuentra un paquete de metapsamitas con intercalaciones de metaconglomerados y metapelitas agrupados en la formación Morro Cristalina, los cuales fueron depositados a partir de un sistema fluvio-continental (Alvarenga y Saes, 1992).

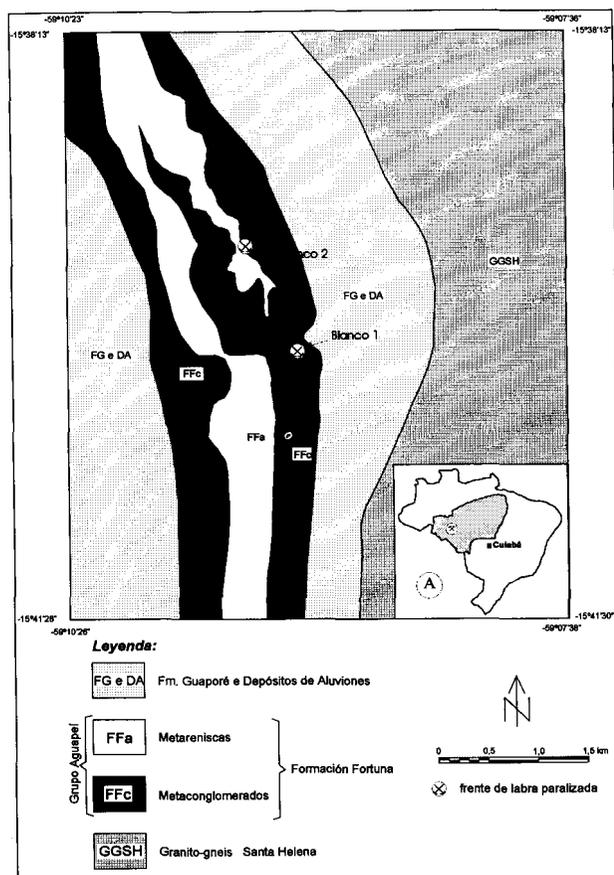


Fig. 1.—Mapa de localización y esquema geológico del área del depósito Pau-a-Pique, Mato Grosso.

Únicamente la formación Fortuna, con cerca de 200 m de espesor, aflora en el área estudiada. En el interior de la zona de cizallamiento Corredor, los metaconglomerados se transformaron en milonitas, constituidas por bloques de cuarzo envueltos por una matriz de cuarzo y mica blanca, conteniendo titanita, leucoxeno, magnetita, ilmenita, hematita y circón. La variación en la intensidad del cizallamiento también transformó las metareniscas de la formación Fortuna en milonitas y ultramilonitas, las cuales sustentan el flanco occidental y la cima de la Sierra de Pau-a-Pique. Son litotipos de granulometría fina a media, constituidos por cuarzo y mica blanca, acompañados por titanita, leucoxeno, magnetita, ilmenita y circón. En la capa mineralizada y, en algunos puntos en la Sierra de Pau-a-Pique, tanto los conglomerados miloníticos como las metareniscas, interactuaron con los fluidos hidrotermales, originando proporciones variables de turmalina, epidota y pirita.

En el contacto tectónico con los metaconglomerados mineralizados hay un pequeño cuerpo de anfi-

bol-clorita-biotita milonítico. Este litotipo está constituido por albita, cuarzo, clorita, biotita, actinolita, epidota, turmalina, pirita, titanita y mica blanca. En la base estructural de la zona mineralizada prevalecen los granito-gneises de Santa Helena, los que contienen proporciones variables de cuarzo, albita, microclina, ortoclasa, biotita, mica blanca, titanita, epidota, minerales opacos y circón.

La mineralización está constituida de un sistema de vetas de cuarzo y disseminaciones de sulfuros y oro nativo en el halo hidrotermal. Entre los tipos de alteración hidrotermal más comunes destacan la silicificación y la turmalinización, en general acompañadas por mica blanca, sulfuros y óxidos. La pirita es el sulfuro predominante, el cual aparece en superficie generalmente oxidado. La extracción de la mena en el yacimiento de Pau-a-Pique ha sido realizada esporádicamente por medio de excavaciones «garimperas» en la ladera este de la Sierra, denominadas aquí como blanco 1 y blanco 2 (fig. 1).

El blanco 1 corresponde al principal frente de trabajo, localizándose en la pendiente del blanco 2, con una diferencia de cota entre ellos de 120 m. Está representado por un sistema de vetas alojadas en el contacto del metaconglomerado milonítico con la milonita de anfíbol-biotita-clorita. Disseminaciones de pirita y fajas de mica blanca marcan la alteración de los metaconglomerados miloníticos adyacentes a las vetas, mientras que la epidota y la clorita rodean a las vetas junto a la milonita de anfíbol-biotita-clorita.

El blanco 2 se localiza en el sector superior, aproximadamente a 400 m de la parte superior de la sierra. Sus vetas rellenan fracturas de hasta 50-70° de inclinación al sudoeste, que interceptan el metaconglomerado milonítico. Estas vetas están rodeadas por un halo de alteración rico en mica blanca y óxidos de Fe.

Aspectos fisiográficos

El clima en el oeste de Mato Grosso es caluroso y húmedo con dos estaciones bien definidas, una seca y otra lluviosa. La estación seca se desarrolla de mayo a septiembre. Las precipitaciones pluviométricas anuales son del orden de 1.350 a 2.000 mm y la temperatura (media anual) es de 25° C.

El yacimiento Pau-a-Pique se encuentra en la porción meridional de la sierra homónima, la cual forma una faja lineal compuesta por un conjunto de crestas que se prolongan por cerca de 9 km de extensión a lo largo de una dirección NNW-SSE. El contraste en el relieve es bastante acentuado, con una diferencia de aproximadamente 200 m

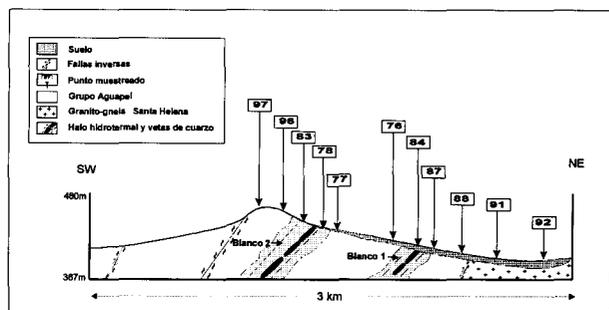


Fig. 2.—Perfil biogeoquímico compuesto abarcando los principales frentes de labra (blancos 1 y 2) en el área del depósito Pau-a-Pique. El halo de alteración en el blanco 1 se constituye de fajas de mica blanca, epidoto y clorita, y disseminaciones de pirita que envuelven a las vetas de cuarzo. En el blanco 2 la alteración aparece como fajas de mica blanca y óxidos de hierro.

entre la parte superior del yacimiento y la cima de la sierra. Al este de la Sierra de Pau-a-Pique predominan las milonitas formadas en los granito-gneises de Santa Helena, las cuales son recubiertas junto a la base de la ladera por un depósito aluvial relativamente espeso que posibilita el desarrollo de una densa vegetación del tipo selva tropical amazónica. El suelo aluvial es de color gris claro a amarillento, compuesto por humus, cuarzo, mica blanca, caolinita, rutilo y albita. Sobre las rocas granito-gneisicas los suelos son arenos-silíceos y ácidos (Menezes *et al.*, 1993).

En la parte superior de la Sierra del Pau-a-Pique las metareniscas miloníticas son recubiertas por un saprolito de poco espesor, constituido por cuarzo, mica blanca, y fragmentos de roca y de vetas de cuarzo. La vegetación es dispersa, de llanura. En el escarpe este, los metaconglomerados miloníticos están recubiertos por un saprolito raso (<1 m de espesor), de tonalidad amarillenta, también constituido por cuarzo, mica blanca, fragmentos de rocas y vetas acompañadas por pequeñas proporciones de oxihidróxidos de Fe y caolinita. Según Menezes *et al.* (1993), los suelos originarios de los metasedimentos del Grupo Aguapeí son mucho más ácidos y arenosos que aquellos derivados de los granito-gneises Santa Helena. En este dominio, la cubierta vegetal es de baja densidad y compuesta de arbustos de hasta 3 m de altura y gramíneas altas, conocidas en la región como «braquiara».

En el límite oeste de la Sierra del Pau-a-Pique existe otra unidad geomorfológica denominada Depresión del Guaporé, parcialmente recubierta por vegetación antrópica. Esta unidad es constituida por una planicie de arenas cuarzosas, probablemente originarias del Grupo Aguapeí (Figueiredo *et al.*, 1974). En el escarpe occidental de la sierra los metaconglomerados miloníticos están recubiertos

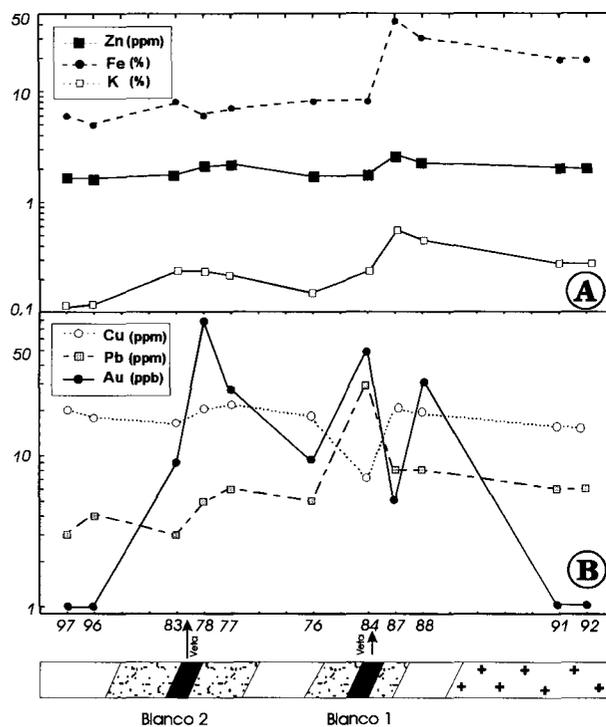


Fig. 3.—Patrón de distribución de los elementos Zn, Fe y K (3A) y Cu, Pb y Au (3B) en los suelos del área del depósito Pau-a-Pique con relación a la topografía del perfil.

por un saprolito raso con cubierta arbustiva (1 a 3 m de altura) y de vegetación rastrera.

Métodos

Durante los meses de julio y agosto de 1997, once pares de muestras de suelo-planta fueron recolectados en el área del depósito Pau-a-Pique, en perfiles transversales a la zona de cizallamiento Corredor, desde la parte superior de la sierra hasta el aluvio (fig. 2). Se recolectaron cinco pares de muestras en los depósitos de ladera sobre el halo mineralizado; un par sobre los depósitos de ladera; otro en la ladera de la sierra sobre la veta principal, junto al contacto metaconglomerado hidrotermalizado milonita de anfíbol-biotita-clorita en la ladera de la sierra; y dos pares en el aluvio sobrepuesto a los granitos-gneises de Santa Helena. En cada punto fueron muestreados aproximadamente 1 kg de suelo, 30 cm debajo de la zona de las raíces, y de 50 a 100 g de hojas de dos especies vegetales de porte arbustivo (de 1 a 3 m de altura).

Una de las plantas recolectadas pertenece a la familia Annonaceae (no identificada al nivel de género y especie) y la otra, al género *Piper* sp., familia Piperaceae. Por ser las dos de presencia común en el área, fue posible muestrear por lo menos una de ellas cada 50 -100 m a lo largo del perfil. Las hojas de esos vegetales fueron lavadas con agua destilada, deshidratadas en una estufa a 80° C. y después calcinadas en estufa eléctrica, a 450° C. Las muestras de suelo fueron secadas al aire libre, sometidas a separación granulométrica en la fracción de #80 mallas cuarteadas. Los minerales del suelo fueron identificados por difracción de rayos X (DRX), utilizándose 3 g de la fracción <80 mallas. Las medidas fueron

Tabla 1a.—Concentración de los elementos químicos en los suelos del área del depósito de Pau-a-Pique, MT (valores de Au en ppb; otros elementos en ppm, cuando no está especificado).

Muestra	Au	Ba	Co	Cr	Rb	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn	Sr	Fe	Ca	P	Mg	K	Al
97	1	86	2	140	92	1	20	3	6	12	45	3	1,7	0,01	11	0,01	0,11	1,25
96	1	97	2	110	18	1	18	4	5	10	42	3	1,6	0,01	9	0,01	0,12	1,00
83	9	220	3	130	46	3	16	3	8	12	57	5	1,74	0,01	9	0,03	0,24	1,60
78	78	260	3	150	49	4	20	5	6	13	54	9	2,07	0,01	14	0,02	0,24	1,35
77	28	300	3	160	54	6	22	6	7	15	57	8	2,17	0,01	16	0,02	0,22	1,40
76	9	260	3	130	45	3	18	5	8	11	88	13	1,69	0,07	37	0,03	0,15	1,15
84	50	540	10	71	170	3	7	29	8	6	36	15	1,74	0,01	9	0,03	0,24	2,00
87	5	720	12	82	48	3	20	8	42	15	490	11	2,58	0,05	10	0,48	0,54	1,80
88	32	690	12	110	57	6	19	8	30	14	345	23	2,24	0,12	28	0,3	0,46	1,60
91	1	810	5	76	76	1	15	6	19	8	395	11	1,98	0,1	12	0,19	0,27	1,30
92	1	810	5	76	76	1	15	6	19	8	395	11	1,98	0,1	12	0,19	0,27	1,30

Tabla 1b.—Concentración de los elementos químicos en las cenizas de las especies analizadas. A = anonácea; P = piperácea (valores de Au en ppb; otros elementos en ppm, cuando no está especificado).

Muestra	Au	Ba	Co	Cr	Rb	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn	Sr	Fe	Ca	P	Mg	K	Al
97a	128	310	13	1	170	1	145	2	433	33	957	1.002	0,42	16,3	1,7	3,6	17,8	0,6
96a	46	300	13	1	58	1	137	20	572	12	1.267	616	0,48	11,0	1,8	3,3	22,3	0,7
83a	126	15	9	15	48	3	58	2	282	22	526	33	0,24	2,3	1,1	1,8	4,5	0,2
78a	16	210	13	1	60	6	91	2	183	41	344	47	0,24	1,9	1,4	2,6	12,8	0,2
77a	30	150	6	1	7,5	1	68	11	235	17	751	75	0,23	4,0	2,3	2,1	8,2	0,3
76p	15	490	13	6	44	25	84	8	239	4	821	743	0,08	11,8	3,7	4,1	23,0	0,1
84p	150	840	6	10	54	7	57	8	252	3	1.658	734	0,16	13,0	5,8	2,2	20,0	0,3
87p	28	2.500	12	1	7,5	1	56	11	203	8	1.138	769	0,32	7,8	2,6	4,2	14,4	1,0
88p	76	860	7	1	58	12	249	9	327	8	716	619	0,06	7,4	2,5	2,5	14,5	0,2
91p	2,5	520	10	1	7,5	1	58	8	214	2	263	601	0,22	9,2	1,0	3,5	19,1	0,2
92p	30	540	10	1	7,5	14	60	9	138	3	456	616	0,08	10,0	2,0	3,0	15,5	0,2

realizadas con 2θ variando de 2 a 80° y una precisión de $0,026^\circ$. Alícuotas de aproximadamente 20 g de la fracción < 80 mallas de suelo y de 0,25 g de cenizas de las plantas fueron analizadas por activación neutrónica (INAA) para los elementos Au, Ba, Co, Cr, Rb, Fe, Se, Hg, Na, Sn y Sc, y por plasma de acoplamiento inductivo (ICP) para los elementos Ag, Zn, Cu, Pb, Ni, Mn, Sr, Mo, Ca, P, Mg, K, Al, Be y Cd en los laboratorios de Actlab. Ltd, Canadá. Los resultados de los análisis de suelo y planta se presentan en las tablas 1a y 1b. En todas las muestras estudiadas los niveles de Ag, Cd, Be, Hg, Sc, Sn y Se se sitúan por debajo del límite de detección, y por ello no son discutidos aquí.

Resultados

Geoquímica del Suelo

Los resultados del estudio muestran que las concentraciones de Fe, Cu, Ni y Co en el suelo, están por debajo de la media de la corteza terrestre (Beus, 1997), y las de cromo se sitúan cerca de la media de la corteza continental (Taylor y McLennan, 1985). La relación Cu: Ni en el suelo es de 1:1, mientras que el cromo sobrepasa casi diez veces la concentración absoluta de estos elementos (tabla 1a). Esta diferencia puede estar relacionada a la movilidad relativa

del Cu y del Ni en medios acuosos bajo condiciones oxidantes y ácidas cuando se compara con la movilidad del Cr (Rose *et al.*, 1979). Junto con el Fe, los niveles de Cr muestran una distribución regular en el suelo del área de estudio, independientemente de la topografía, el espesor del suelo o del tipo de sustrato. Los niveles de Fe en el suelo pueden estar relacionados con la presencia de oxidróxidos de hierro.

Los niveles de Pb y de Zn son también muy bajos en el suelo, probablemente debido a la ausencia de minerales específicos de estos elementos en la mena. Hay una cierta similitud entre el patrón de dispersión del Pb y el mostrado por el Rb, sugiriendo que esos elementos fueron fijados en la mica blanca y en los minerales de arcilla. Las zonas hidrotermalizadas identificadas por la distribución del K, Fe y Ba, así como del Zn, coinciden con los frentes de trabajo de la mena aurífera (fig. 3a y b; fig. 4).

Entre los álcalis, el K es el elemento predominante (tabla 1a). Su patrón de dispersión, así como el del Ba, distingue dos áreas ricas en mica blanca y minerales arcillosos situadas en los depósitos de ladera, las cuales coinciden con los halos hidrotermales en los metaconglomerados miloníticos. Los resultados de K (fig. 3) y de Ba (fig. 4) de las mues-

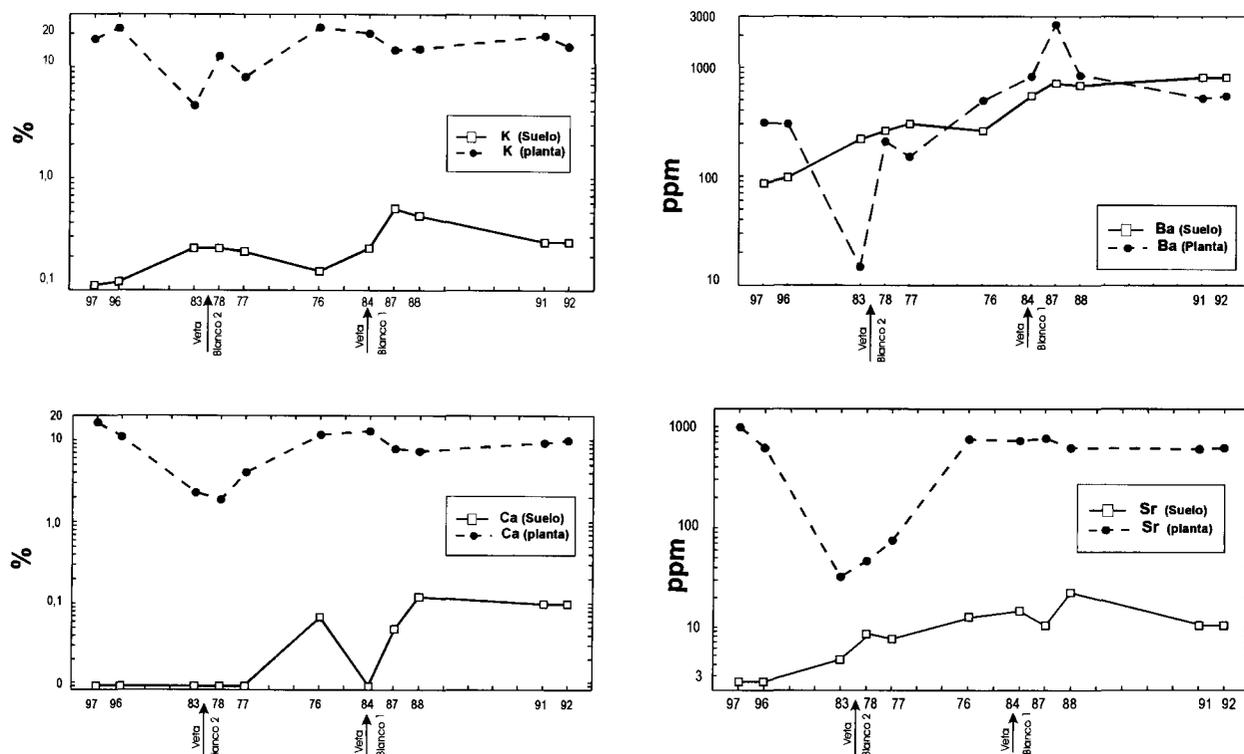


Fig. 4.—Gráfico comparativo entre el patrón de distribución del K, Ba, Ca y Sr en las cenizas de las plantas y en los suelos del área estudiada.

tras 84, 87 y 88 discriminan la primera área, la cual corresponde al blanco 1 (fig. 2). Los picos de estos elementos en las muestras 83, 78 y 77 coinciden con la situación del blanco 2 (fig. 2).

Aunque los niveles de oro se caracterizan de un modo general por una distribución irregular en los suelos del área, sus valores más altos están en los depósitos de ladera. Esta distribución puede estar relacionada a la presencia de pirita y calcopirita oxidadas presentes allí. Por ejemplo, en el halo hidrotermal del blanco 2, los niveles de Au aumentan mientras que los de Fe y Cu disminuyen. De manera similar, Mann (1984) observó que la oxidación de la pirita contribuye al proceso de ferrólisis (oxidación e hidrólisis del Fe) haciendo posible la remoción del Au en los depósitos auríferos aflorantes en el oeste australiano. Cabe destacar también que la zona de oxidación de un yacimiento actúa como una zona de concentración secundaria para el oro.

Biogeoquímica

Elementos nutricionales esenciales: Para las plantas, el K, Ca, Mg y Mo forman parte de los 16 elementos esenciales para su nutrición, pues están

directamente implicados en su metabolismo (Epstein, 1975). El K, absorbido en forma catiónica, es esencial para todas las plantas superiores; el Mg desempeña un papel importante en la síntesis de la clorofila; el Mo funciona como un componente de metaloenzimas y el Ca mantiene la integridad de la membrana celular, pues controla la difusión de los elementos en el tejido vegetal y garantiza la selectividad de los mecanismos de transporte iónico.

En este estudio las cenizas de las dos especies analizadas, contienen concentraciones de K, Ca y Mg superiores a las del suelo. Por ejemplo, el nivel de calcio en *Piper* sp. llega hasta 12,8 %, a pesar de que el suelo contiene <1 % de este elemento (tabla 1a y b). El nivel promedio de este elemento en las plantas es de 14 %, según Market (1995). La diferencia entre los valores de Ca en la planta con relación a los de los suelos en el área apreciada, puede ser atribuida a la alta solubilidad del Ca^{2+} y no a una absorción preferencial. La distribución del K y del Mg en las cenizas de los vegetales analizados es semejante, demostrando que las raíces intercambian cationes con el suelo y absorben sales de las soluciones meteóricas.

Además de esos nutrientes, el Na, el Co y el Sr funcionan como elementos adicionales o comple-

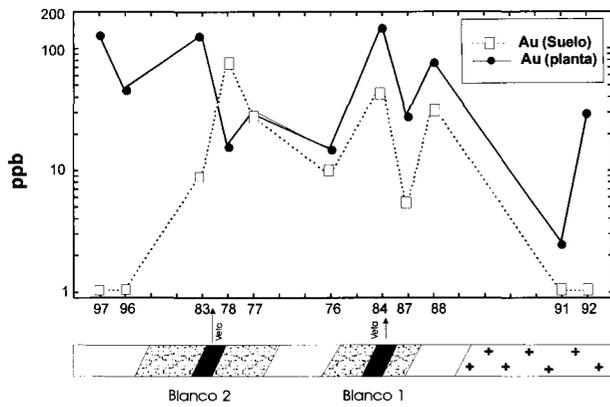


Fig. 5.—Distribución de los niveles de Au en las cenizas de las plantas y en los suelos del perfil muestreado.

mentarios para algunos organismos vivos. El Sr, Ca y Ba se acumulan en ambas especies con relación a los niveles del suelo, pero con un patrón de dispersión inverso al del substrato (fig. 4). La absorción de estos elementos por las plantas, así como la del Na, es atribuida a la incapacidad de los vegetales de distinguir elementos de radio iónico semejantes o isótopos de un mismo elemento (Antovics *et al.*, 1971; Epstein, 1975). El Co, que actúa como constituyente co-enzimático en la fijación del N, es absorbido en proporciones similares a la de la media de la mayor parte de vegetales.

En el ciclo biogeoquímico, el P, Mn, Fe y Zn son igualmente esenciales a los organismos vivos. En las cenizas de las especies analizadas, el Mn y el Zn están enriquecidos, mientras que la concentración de Fe está reducida en relación a los niveles del suelo (tabla 1a y b). La concentración media de P entre las cenizas analizadas está en un nivel de porcentaje en peso, sin embargo en el suelo estos elementos no sobrepasan 18 ppm.

El Cu, un micronutriente esencial para las plantas, en niveles medios de 140 ppm en las cenizas de las plantas en general (Market, 1995). En este estudio, las cenizas de las plantas presentan un nivel en media de 96 ppm de Cu. Sin embargo, a pesar de este valor está por debajo de la media en los vegetales considerados aquí, el cobre muestra un aumento en el orden de 4 a 6 veces con relación a los niveles del suelo del área.

Elementos no esenciales: En este grupo se reunieron los elementos cuya presencia en los tejidos vegetales no significa necesariamente que ejerzan una función específica en el metabolismo de las plantas. Por ello, su mayor absorción está más condicionada por factores externos como el tipo de roca, paragénesis, textura, pH del suelo, etc. (Gough, 1993) que a la absorción de los elementos esenciales. Estos últimos, aunque también puedan

tener su disponibilidad afectada por esos factores, generalmente, son absorbidos por el vegetal.

En ambientes superficiales, las variables referidas anteriormente influyen en la especiación química y en la movilidad de los elementos. Como resultado, los niveles absorbidos por la planta tienden a reflejar la concentración de los elementos en el suelo. Entre los elementos no esenciales a la nutrición vegetal analizados en este estudio, sobresalen el Ba, Rb, Ni, Pb, Cr y Au.

El Ba se encuentra enriquecido en los suelos superpuestos a la zona mineralizada con respecto al suelo que aparece en la parte superior de la Sierra del Pau-a-Pique. En *Piper* sp. su cantidad es tres veces mayor que aquella contenida en el suelo, alcanzando una media de 960 ppm. En la otra especie vegetal (fam. Annonaceae) presenta niveles en media de 195 ppm y una distribución semejante a la del K. En cuanto al Rb, su proporción en las cenizas del *Piper* sp. es menor que en las cenizas de la otra planta estudiada aquí, como también en el suelo (tabla 1b). El Cr con relación a los niveles del suelo presenta en ambas especies concentraciones muy bajas; el Ni y el Pb en comparación a los niveles del suelo son concentrados más en las anonáceas que en *Piper* sp.

El nivel de Au en media en las cenizas de la especie de la familia Annonaceae es de 69 ppb, mientras que en el suelo es de 24 ppb. Por lo tanto, esta especie presenta un aumento en Au correspondiente al triple de este elemento en el suelo. Sin embargo, el nivel de Au acumulado en este vegetal no es constante a lo largo del perfil de muestreo, pues varía de 128 ppb en los ejemplares recolectados en el eluvio a 30 ppb en los recolectados en los depósitos de ladera (fig. 5). En las cenizas de *Piper* sp., los niveles de Au también sobrepasan a los obtenidos de los suelos en los depósitos de ladera que recubren el blanco 2. También se reproduce el patrón de distribución de este elemento en el suelo (fig. 5).

Los niveles de Au en las plantas sobre el aluvio, presentan en términos absolutos un valor de 2 a 30 veces su contenido en el suelo aluvional. Sin embargo, esos valores son menores que aquellos registrados en los especímenes recolectados en los depósitos de ladera (fig. 5).

Discusión

De acuerdo a Brooks (1983), el concepto de potencial iónico (expresado por la proporción Z/r) tiene una correspondencia con la absorción de los elementos por las plantas. Los elementos con potencial iónico muy bajo o muy alto presentan una relación directa entre su solubilidad en el agua y la absorción por las plantas. Los que tienen bajo

Tabla 2.—Valores de la proporción planta/suelo (P/S) con relación al potencial iónico (Z/r) en las plantas muestreadas en el depósito de Pau-a-Pique, MT.

Z/r	< 2					> 2 < 3					> 6		> 12	
Elementos	K	Rb	Pb	Ba	Sr	Au	Ni	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Mo	P
Piperaceae	55	0,4	0,9	1,3	56	3,0	0,45	6,0	2,6	0,07	53	0,03	3,5	1.600
Annonaceae	72	1,3	1,4	1,0	63	3,0	2,0	5,0	15	0,17	10	0,02	0,8	1.400

potencial iónico ($Z/r < 2$) tienden a permanecer en solución, los de valor intermedio (2-12) generalmente precipitan como hidróxidos u óxidos; en cambio los elementos con potencial iónico superior a 12, forman oxiácidos solubles como nitratos y sulfatos. Existe una fuerte relación entre el coeficiente biológico de absorción (expresado por la proporción planta/suelo) de un elemento y su potencial iónico. Por este motivo los macronutrientes (cuyo Z/r es muy bajo o muy alto) son absorbidos en mayores cantidades (Brooks, 1983).

En el presente estudio se han comparado los valores obtenidos de la proporción planta/suelo (tabla 2) con el potencial iónico (Z/r) de los elementos considerados en las dos especies seleccionadas. La finalidad es verificar si hay correspondencia entre la movilidad de los elementos en ambientes superficiales, en especial de los que no están directamente implicados en el metabolismo vegetal, y su absorción y acumulación en los vegetales. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

a) *Macronutrientes con Z/r muy alto o muy bajo: P^{5+} y K^+*

Los macronutrientes se encuadran en el grupo de los elementos con alto potencial iónico, como es el caso del P^{5+} ($Z/r > 12$) o con bajo potencial iónico, como es el caso del K^+ y del Ca^{2+} ($Z/r < 2$), de ahí su significativa concentración en las plantas, que refleja la movilidad de estos elementos en soluciones superficiales. Los elevados valores de la proporción planta/suelo del P (1.600 en *Piper* sp. y 1.400 en la anonácea) y del K (55,0 en *Piper* sp. y 72,0 en la anonácea) ejemplifican esta idea, aunque en el suelo el K no sobrepase los valores de P. Los valores de la proporción planta/suelo (P/S) de 130 en *Piper* sp. y 3.500 en la anonácea, obtenidos para Ca, confirman esta hipótesis, ya que, en los suelos del área, este elemento presenta niveles inferiores al 1 %.

b) *Elementos con Z/r > 6: Cr_{6+} y Mo_{6+}*

Las proporciones planta/suelo obtenidas para el Cr y para el Mo (respectivamente, en la anonácea,

0,02 y 0,08 y en *Piper* sp. 0,03 y 3,5) revelan su baja disponibilidad. El Cr, en forma de óxidos y/u otros minerales, es inmóvil en superficies de alteración. Bajo progresiva oxidación se forman cationes que si bien son absorbidos por los minerales hidratados, arcillas y óxidos, son poco absorbidos por los vegetales (Kabata-Pendias y Pendias, 1984). En el caso del Mo, el aumento de la razón P/S en *Piper* sp. puede representar un efecto del muestreo, pues los ejemplares recolectados en el aluvión presentan niveles más elevados de este elemento que las demás muestras de esta especie. Los valores más significativos de Mo en los especímenes que crecen sobre el aluvión pueden estar relacionadas con la composición de los granito-gneises del Bloque Santa Helena, que constituyen el substrato de los suelos aluviales. Estas rocas son más ricas en Mo que en los metasedimentos del Grupo Aguapeí (Fernandes, 1998).

c) *Elementos con Z/r entre 2 y 3: Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} y Mn^{2+}*

El potencial iónico de Ni, Cu, Zn, Fe y Mn les otorga una relativa solubilidad. Sin embargo, la proporción planta/suelo del Fe (0,17 en la representante de las anonáceas y 0,07 en *Piper* sp.) indica que este elemento no se encuentra fácilmente disponible en los vegetales, siendo posible que su absorción se dé por medio de intercambios con los minerales del suelo. Por el contrario, el valor de esta proporción del Ni en la especie de las anonáceas ($P/S = 2,0$), sugiere que éste es acumulado en la planta a partir de la solución, pues es más absorbido que el Fe a pesar de tener mayor potencial tóxico y no ser esencial a la nutrición vegetal. Una situación contraria se observa en esta proporción en *Piper* sp. ($P/S = 0,45$) permitiendo deducir que bien en los suelos aluviales el Ni tiene un comportamiento diferente en cuanto a la especiación química, o que esta planta restringe su absorción, al contrario que la otra. En el caso del Cu ($P/S = 5,0$), Mn ($P/S = 15,0$) y Zn ($P/S = 53,0$) en la anonácea, y del Cu ($P/S = 6,0$), Mn ($P/S = 2,6$) y Zn ($P/S = 10,0$) en *Piper* sp., las proporciones obtenidas son un indicio de una mayor disponibilidad y fácil absorción a par-

Tabla 3.—Datos comparativos de los niveles de oro en las cenizas de las plantas en áreas auríferas de ambientes tropicales.

Papua, NG (Dunn, 1992)	255 ppb
Goiás, GO (Dunn, 1992)	305 ppb
Carajás, PA (Andrade <i>et al.</i> , 1991)	200 ppb
Background (Dunn, 1987)	5-10 ppb
Pau-a-Pique (<i>Este trabajo</i>)	150 ppb

tir de soluciones (dado el carácter de esencialidad de esos elementos), que de un enriquecimiento del substrato, ya que en los suelos del área éstos no se presentan en niveles considerables. Diferencias en los valores, en particular del Zn y del Mn, en las cenizas de los vegetales analizados, pueden ser atribuidas a: 1) particularidades de cada especie en el proceso de absorción, lo que les otorga diferentes grados de tolerancia en determinados elementos; o 2) diferencias en la movilidad relativa de esos elementos en medios acuosos. En el área estudiada, el relieve accidentado, la variedad de litotipos, la alteración hidrotermal y supergénica, asociados a suelos zonales y azonales con pH ácido, son factores que interfieren en la solubilidad de los metales y, así, en su biodisponibilidad.

d) Elementos con $Z/r < 2$: Rb^+ , Pb^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} y Au

Los valores de la proporción P/S de 0,04 del Rb y 0,9 del Pb en *Piper* sp. reflejan sus bajos niveles en el suelo (tabla 1a), ya que por su bajo potencial iónico son de fácil solubilización y, por lo tanto, biodisponibles. Por otro lado, en la representante de las anonáceas, la proporción P/S de 1,3 del Rb y 1,4 del Pb sugiere que esta especie es menos selectiva en la absorción, en especial del Pb, dado su carácter tóxico. En el caso del Ba, la proporción P/S de 1,3 (en *Piper* sp.) y 1,0 (en la anonácea), demuestra que los dos vegetales lo concentran en proporciones similares a la del suelo. Las altas proporciones obtenidas del Sr (P/S 56,0 en *Piper* sp. y 63,0 en la anonácea) confirman la semejanza del comportamiento entre éste y el Ca. En el Au, la proporción P/S de 3,0 obtenida en las especies, sugiere que éstas concentran el Au, el cual es más disponible a partir de la solución del suelo que de su concentración en algún mineral u otros componentes del medio.

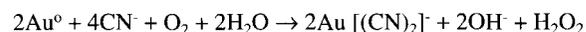
A pesar de que los datos existentes muestran la baja disponibilidad del Au para la mayoría de los vegetales, en cuyas cenizas han sido determinados valores de fondo que varían de 5 a 7 ppb (Vinogradov, 1962), 10 ppb (Beus & Gregorian, 1977) y hasta en el intervalo de 5 a 10 ppb (Dunn, 1992), la

prospección biogeoquímica del Au ha alcanzado un cierto éxito en ambientes tropicales (tabla 3).

En las regiones tropicales los niveles de Au en áreas mineralizadas determinados por la biogeoquímica varían de 100 a 300 ppb de Au (tabla 3). La comparación de los niveles obtenidos en las cenizas de las plantas estudiadas aquí con los que se exponen en la tabla 3 muestra que los resultados biogeoquímicos del depósito Pau-a-Pique tienen el mismo orden de importancia que los encontrados en otras áreas anómalas en oro. Entre éstas, cabe destacar la similaridad de los datos biogeoquímicos del depósito Pau-a-Pique con los de Carajás, Pará. Esta semejanza aumenta en importancia si se considera que ambos depósitos están situados en la misma faja climática del Cráton Amazónico.

Los niveles de Au son más elevados en las cenizas de las especies de vegetales estudiadas aquí que en el suelo del depósito Pau-a-Pique (fig. 5). Además de esto, su patrón de dispersión delimita el halo mineralizado en el perfil estudiado, por lo tanto, son representativas como medio de muestreo biogeoquímico.

Bajo el punto de vista biogeoquímico, la absorción de oro por las plantas parece no implicar una selectividad por parte de las especies, sugiriendo que la concentración de este elemento en los tejidos vegetales es producto de la baja toxicidad del elemento, asociado a la posibilidad de que éste sea solubilizado por componentes bióticos del medio. Según Lakin *et al.* (1974) y Boyle (1979), el ácido cianídrico producido por innumerables especies vegetales, algunos hongos y microorganismos presentes en el suelo, solubiliza el Au^0 formando complejos de Au $[(CN)_2]^-$. Con la consecuente reducción de la solución del medio, el oxígeno disuelto en el agua se torna un fuerte oxidante, disolviendo los complejos de Au que de ese modo son absorbidos por las plantas de acuerdo con la reacción:



La acumulación de Au en las plantas también está condicionada a otros factores que influyen en este proceso, como la química de la roca, las características de la mena (asociación mineral, tamaño del grano, etc.) y las especies químicas a las cuales el Au está relacionado.

Conclusiones

Los niveles de Au y de otros metales en el suelo superpuesto a la mena estudiada son caracterizados por bajos valores. El clima cálido y húmedo de la región favorece la oxidación de la pirita, produciendo

do soluciones ácidas, haciendo posible la solubilidad del Au y su precipitación, con los óxidos/hidróxidos de Fe y en parte, haciéndolo disponible para las plantas por vía aguas intersticiales.

Entre los elementos redistribuidos en el suelo, el Zn, K, y Fe presentan patrones de dispersión (fig. 3a y b) que marcan las zonas de alteración hidrotermal. A pesar del pequeño número de muestras analizadas, el K y el Fe están en proporciones significativas en el suelo, mientras que la concentración de Zn está cercana al límite de detección y, por eso, no es concluyente. El K es el único elemento que se encuentra en niveles considerables, tanto en los suelos (tabla 1a) como en las plantas (tabla 1b), y su patrón de dispersión separa las zonas hidrotermalizadas con mica blanca en torno de las vetas de cuarzo de la roca no alterada (figs. 2 y 3).

En la zona de alteración del blanco 2, la concentración de Au en las cenizas de la especie de la familia de las anonáceas revela un patrón de dispersión de este metal de modo coincidente con el halo hidrotermal junto a las vetas. La relación inversa entre los niveles de Au en estos dos medios de muestreo hace suponer que la planta absorbe el elemento diseminado en la fracción más fina y/o a partir de los complejos orgánicos del suelo. El mismo proceso parece ocurrir en el blanco 1, pues *Piper* sp. reproduce la distribución del Au en el suelo, además de realzarlo al triplicar en valores absolutos su concentración en el suelo. La elevada proporción $Au_{(planta)}/Au_{(suelo)}$ en *Piper* sp. sugiere que la absorción se da a partir de las soluciones que migran para los aluviones donde el nivel freático superficial permite que las raíces lo alcancen fácilmente. Por otra parte, en el área del blanco 1, además de indicar el halo de dispersión del Au junto a las vetas, *Piper* sp. muestra la concentración del elemento en los minerales del substrato. Tal comportamiento le otorga a esta especie un mayor significado bioquímico en cuanto a que reproduce con mayor fidelidad el patrón de dispersión del Au en el área muestreada.

Los datos geoquímicos del suelo y biogeoquímicos obtenidos en este estudio permiten concluir que:

1. Los vegetales estudiados acumulan Au en comparación con el suelo, presentando niveles más elevados en los ejemplares recolectados sobre el halo hidrotermal que en el área de las vetas.

2. Los vegetales recolectados en el aluvión tienden a presentar valores más elevados en la proporción $Au_{(planta)}/Au_{(suelo)}$ que los que fueron recolectados en los depósitos de ladera, sugiriendo que la razón $Au_{(planta)}/Au_{(suelo)}$ es influenciada por varios factores, entre los cuales sobresale la topografía.

3. La extensión del halo de dispersión del Au mostrado por la anonácea es mayor que el halo detectado por la geoquímica del suelo. Por eso, este vegetal parece ser un medio de muestreo adecuado para la localización de zonas hidrotermales, situadas en los depósitos de ladera y/o cercanos al eluvio.

4. El alcance del halo de dispersión del Au en el suelo y en *Piper* sp. coincide.

5. El valor de la proporción de la planta/suelo del Rb, Pb, Sr, Ni y Fe en la anonácea es mayor que el valor obtenido en *Piper* sp. sugiriendo que esta planta es menos selectiva en la absorción de estos elementos, lo que le otorga un carácter de planta tolerante con relación a la especie perteneciente a la familia de las piperáceas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a GEOMIN Ltda. por el apoyo logístico durante los trabajos de campo y a la coordinación del laboratorio de difracción de rayos X del Centro de Estudos em Petrologie e Geoquímia -CPGq/UFRGS, por los análisis realizados.

Referencias

- Andrade, W. O., Machesky, M. L., y Rose, A. W. (1991). Gold distribution in the surficial environment, Carajas region, Brazil. *J. Geochim. Explor.*, 40: 95-114.
- Alvarenga, C. J. S., y Saes, G. S. (1992). Estratigrafia e sedimentologia do Proterozóico Médio Superior da Região sudeste do Cratón Amazônico. *Rev. Bras Geoc.*, São Paulo, 22(4): 493-499p.
- Antonovics, J., Bradshaw, A. D., y Turner, R. G. (1971). *Heavy Metal Tolerance in Plants*. Advances in Ecological Research, 7(1); 74p.
- Barros, A. M., Silva, R. H., Cardoso, O. R. F. A., Freire, F. A., Souza Jr., J. J., Rivetti, M., Luz, D. S., Palmeira, R. C. B., y Tassinari, C. C. G. (1982). *Projeto RADAMBRASIL*, Folha SD-21 (Cuiabá), 192 págs.
- Beus, A. A., y Grigorian, S. V. (1977). *Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits*. Applied Publishing, Illinois, 287 págs.
- Bidwell, R. G. S. (1979). *Plant Physiology*. Mac Millan, New York, 726 págs.
- Boyle, R. W. (1979). The geochemistry of gold and its deposits. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 298: 79-85.
- Brooks, R. R. (1972). *Geobotany and Biogeochemistry in Mineral Exploration*. Harper & Row, New York, 290 págs.
- Brooks, R. R. (1983). *Biological Methods of Prospecting for Minerals*. John Wiley & Sons, 322 págs.
- Dunn, C. E. (1992). *Biogeochemical Exploration for Deposits of the Noble Metals*. Reprinted from NOBLE METALS AND BIOLOGICAL SYSTEMS, CRC Press, Florida, págs. 47-89.
- Fernandes, C. J., Pulz, G. M., Pinho, F. E., Quadros, A. P., Oliveira, A. S., Santos, A. F., y Souto, J. L.

- (1998). Petrografia dos conglomerados auríferos da Formação Fortuna, Grupo Aguapeí, no Depósito Pau-a-Pique, Estado do Mato Grosso, Brasil Central. *II Cong. Uruguayo Geol.*, Punta del Este, 1998: 221-226. *Atas.*
- Fernandes, C. J. (1998). *Geologia do Depósito Pau-a-Pique e Guias Prospectivos para Au no Grupo Aguapeí, sudoeste do Estado do Mato Grosso*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 134 págs.
- Figueiredo, A. J., Barros, A. M., Eulalio F.^o A., Rodrigues, A. P., Barreto, B. F., Couto, J. P. G., Reichel, J. L., Costa, S. A. G., Rezende, F.^o S. T., Pastore Jr., W. P., Berbert, C. O., Olivatti, O., Araujo, A. G., Triguís, J. A., y Melo, J. C. R. (1974). *Projeto Alto Guaporé*. Goiânia, DNPM/CPRM, Relatórios v.2 e 11.
- Epstein, E. (1972). *Nutrição Mineral das Plantas. Principios e Perspectivas*. Editora da Universidade de São Paulo, 341 págs.
- Gough, L. P. (1993). Understanding our fragile environment: lessons from geochemical studies. In: Bales, C. A., Runberg, S. K., y Welles, R. K. (eds.), *U.S. Geol. Surv.*, 1105: 34 págs.
- Kabata-Pendias, A., y Pendias, H. (1984). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Florida, 315 págs.
- Lakin, H. W., Curtin, G. C., y Hubert, A. E. (1974). Geochemistry of Gold in the Weathering Cycle. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1330: 80 págs.
- Levinson, A. A. (1974). *Introduction to Exploration Geochemistry*. Applied Publishing Ltd., Illinois, 614 págs.
- Machesky, M. L., Andrade, W. D., y Rose, A. W. (1992). Interaction of gold chloride and elemental gold with peat-derived humic substances. *Chemical Geology*, 102: 53-71.
- Mann, A. W. (1984). Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observations from Western Australia. *Econ. Geol.*, 79: 38-49.
- Markert, B. (1995). *Instrumental multielement analysis in Plant Materials*. Serie Tecnología Ambiental, CETEM/CNPq, 8: 32 págs.
- Menezes, R. G. et al. (1993). Pontes e Lacerda- Folha SD-21-Y-C-II. *Programa de Levantamento Geológico Básico do Brasil*. DNPM/CPRM, Brasília, 131 págs.
- Pinheiro, N. C., Miranda Jr., M. V., y Molina, A. L. S. (1992). *Mineralizações Auríferas e suas relações Litoestruturais, na Região da Serra do Pau-a-Pique: Pontes e Lacerda - MT*. Trabalho de Graduação, Universidade Federal de Mato Grosso, 56 págs.
- Pinho, M. A. S. B. (1990). *Geologia, Petrologia e Geoquímica das Rochas Ocorrentes ao Longo do rio Aguapeí, Sudoeste do Cráton Amazônico: Pontes e Lacerda - MT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 119 págs.
- Reading, K. A. L., Brooks, R. R., y Naidu, S. D. (1987). Biogeochemical prospecting for gold in the Canadian Arctic. *J. Geochem. Explor.*, 27: 143-155.
- Rose, A. W., Hawkes, H. E., y Webb, J. S. (1979). *Geochemical in Mineral Exploration*. Academic Press Inc, London, 657 págs.
- Shaw, W. H. R. (1960). Studies in Biogeochemistry-I. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 19: 196-215.
- Smith, B. H., y Keele, R. A. (1984). Some observations on the geochemistry of gold mineralization in the weathered zone at Norseman, Western Australia. *J. Geochem. Explor.*, 22: 21-42.
- Smith, S. C., y Kretschmer, E. L. (1992). Gold patterns in big sagebrush over the CX and Mag deposits, Pinson Mine, Humboldt County, Nevada. *J. Geochem. Explor.*, 46: 147-161.
- Tassinari, C. C. G., Teixeira, W., Siga, Jr., O., Kawashita, K., y Cordani, U. G. (1987). *Geological evolution and evaluation of recent geochronological data in Amazonian Region*. Project 204 IUGS UNESCO. Final meeting of the working group. Carajás, Pará, Brazil: 20-31.
- Taylor, S. R., y McLennan, S. M. (1985). *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Scientific, 312 págs.
- Vinogradov, A. P. (1959). *Geochemistry of Rare and Dispersed Elements in Soils*. Publishing House of the NA SSSR, Moscou, 254 págs.

Recibido el 26 de julio de 2000.

Aceptado el 4 de abril de 2001.