

Prospección geoquímica de suelos en los alrededores de la quebrada Chirapotó

FRANKLIN ORTIZ B.*

MARIA EUGENIA CHAMORRO G.**

RESUMEN

Un estudio geoquímico de suelos, a escala 1:10.000, fue realizado en un área de 6 km² en los alrededores de la quebrada Chirapotó (al sur del Departamento de Antioquia), con miras a determinar mineralizaciones vetiformes conocidas en dicha quebrada. Durante el trabajo de campo se recolectaron 144 muestras que fueron analizadas para Cu, Mo, Pb, Zn y Ag por espectrometría de absorción atómica y a las cuales se les determinó también el pH. Simultáneamente se realizó la cartografía geológica de la zona y se describieron los perfiles de los suelos generados en las distintas unidades litológicas.

Los resultados obtenidos en los análisis químicos fueron tratados estadísticamente mediante el uso de un microcomputador y en forma manual. Se analizaron siguiendo el método de Lepeltier (1969), análisis del factor y promedio móvil.

Cobre y molibdeno resultaron ser los elementos que mejor demarcan la continuidad para varias de las mineralizaciones conocidas en los afloramientos de las quebradas, aunque Pb, Zn y Ag sirven también parcialmente para su demarcación.

Aparentemente hay una relación muy estrecha entre los suelos generados en un tipo específico de roca y la acidez en él determinada, por ejemplo los suelos de las rocas sedimentaria resultaron ser los más ácidos del área. Igualmente se encontró que los valores promedios de los elementos metálicos en los suelos están muy ligados a las unidades litológicas a partir de las cuales se generaron.

* Profesor Titular, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional de Colombia-Seccional de Medellín.
A. A. 3840

** Ing. Geóloga, Universidad Nacional de Colombia-Medellín.

1. INTRODUCCION

Durante estudios anteriores en las vecindades de las minas nacionales de Marmato se habían detectado unidades litológicas y manifestación de minerales metálicos con características similares a las encontradas en la citada localidad. Por otra parte en la quebrada Chirapotó se encontraron varias manifestaciones vetiformes y anomalías geoquímicas para cobre, molibdeno, zinc, plomo y plata (González H. 1980).

Estas circunstancias motivaron el presente estudio que se centró en definir lo siguiente:

- Determinar mediante el estudio geoquímico de suelos la prolongación de las vetas encontradas en la quebrada Chirapotó durante trabajos anteriores de campo, al mismo tiempo, tratar de detectar otras posibles ocurrencias.
- Determinar los elementos metálicos que eventualmente servirán para caracterizar las diferentes unidades litológicas cartografiadas, en las cuales se observaron mineralizaciones diseminadas.

1.1 Localización y geografía

El área estudiada se ubica en la parte sur del departamento de Antioquia y al norte del municipio de Marmato (Caldas). Véase Figura 1.

La zona de estudio está ubicada entre las quebradas Angostura y San Pedro, afluentes del río Cauca; se halla localizada en la plancha 186-II-C, a escala 1:25000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Los límites del área están señalados por las coordenadas:

$$X = 1'108.540$$

$$Y = 1'167.650$$

$$X = 1'105.140$$

$$Y = 1'165.230$$

La región se caracteriza por una topografía muy abrupta con alturas que varían desde 650 metros sobre el nivel del mar hasta 1.200 m.s.n.m. y pendientes que varían entre 12° y 45°. Este aspecto es muy importante porque las quebradas que drenan el área en épocas lluviosas arrastran gran cantidad de material y por otra parte los movimientos de masa en la zona ocasionan numerosos depósitos coluvio-aluviales, los que hay que considerar durante un estudio de estas características.

Otro factor a considerar es el clima de la zona el cual presenta una temperatura promedio de 24°C y variaciones en la precipitación entre 1.000 y 2.000 milímetros al año.

Ha de tenerse en cuenta la escasa vegetación primaria, la abundancia de pastos y

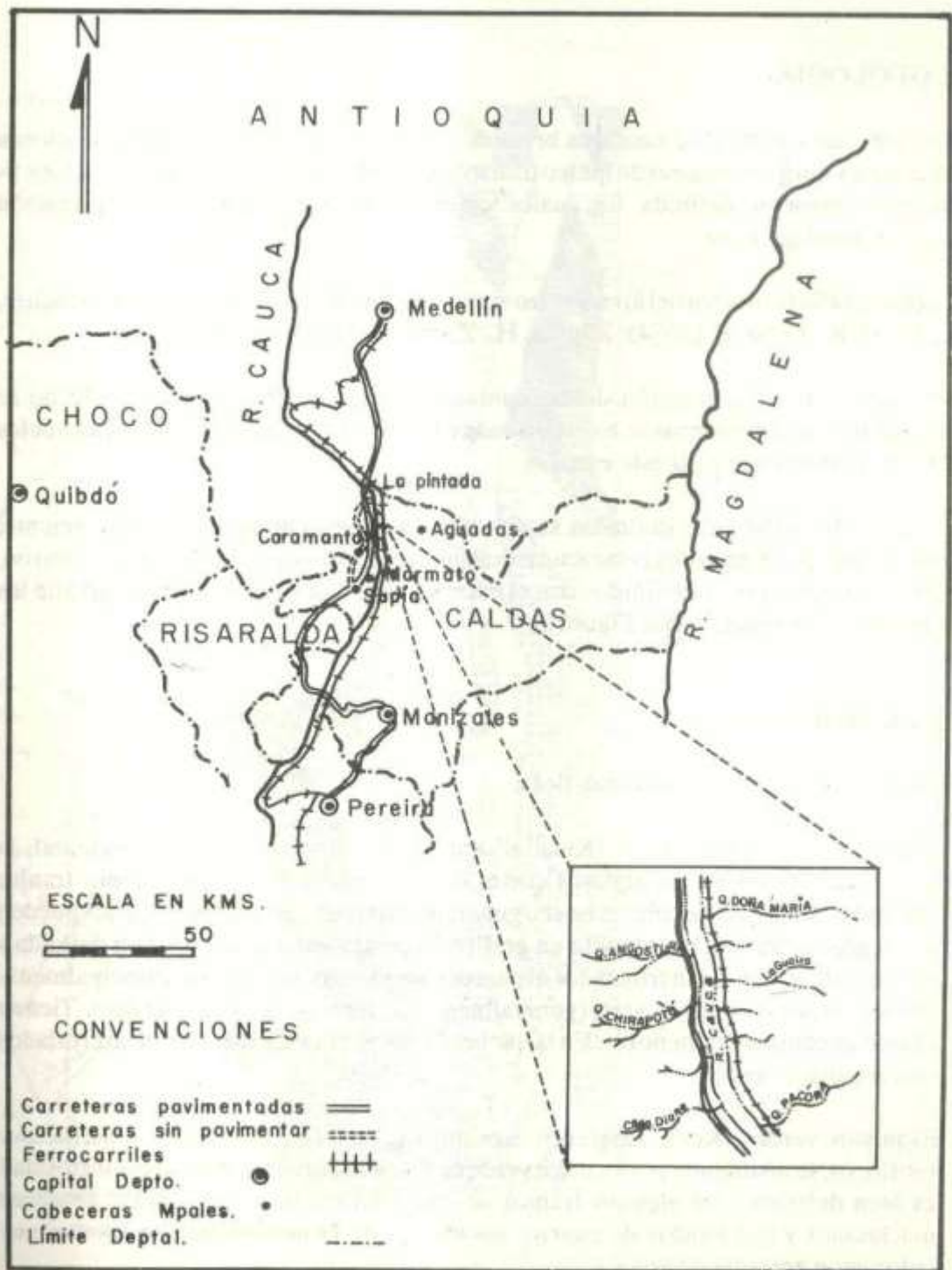


Fig.1. Mapa de localización del área.

cañaduzales que requieren el uso de herbicidas y fungicidas pudiendo causar contaminaciones que afectarían los resultados del trabajo.

2. GEOLOGIA

En forma muy general se hace una breve descripción de los tipos de roca que afloran en el área y que por proceso de meteorización han dado origen a suelos de características y composición definida, los cuales van a servir para hacer una interpretación geoquímica de la zona.

La cartografía geológica del área se hizo simultáneamente con los estudios de Sánchez, L., Parra, R., Ortiz, F. (1984); Zapata, H., Zamudio, M., Ortiz, F. (1984).

Lo relativo a la delimitación de las unidades demarcadas en la zona donde no se presentaron afloramientos se hizo con base en la descripción de los diferentes suelos durante el muestreo para este estudio.

Las unidades litológicas definidas se describen de la más antigua a la más reciente; descripción que se hará de las características macroscópicas que de ellas se observaron, pero no de los aspectos definidos con el microscopio, dado que no formó parte de los objetivos del trabajo. Véase Figura 2.

2.1 Cretáceo

Lo constituyen las rocas metamórficas:

- Esquistos cuarzo-sericíticos (Kes): afloran en la carretera troncal occidental, la quebrada Chirapotó, en algunos cortes del ferrocarril del Pacífico como franjas alargadas; son rocas de color grisáceo generalmente, aunque en algunos sitios pueden ser negros a causa del contenido en grafito. Presentan una foliación bien definida y localmente se muestran triturados al parecer por eventos tectónicos. Principalmente están compuestos por cuarzo (generalmente en lentes), sericita y grafito. Tienen clorita en cantidades menores. En la quebrada Angostura se encuentran intercalados con esquistos verdes.
- Esquistos verdes (Kev): Aparecen asociados a los esquistos cuarzo-sericíticos y biotíticos; se distinguen por su color verde en tonos oscuros y claros, su esquistosidad es bien definida y en algunos tramos se observan masivos. En general aparecen diaclasados y con bandas de cuarzo; los efectos de la meteorización les dan una coloración amarilla o verdosa.
- Esquistos anfibólicos (Kea): Aparecen a lado y lado de la quebrada Chirapotó en contacto con esquistos biotíticos; generalmente son masivos presentando una leve esquistosidad. Son de color verde grisáceo, compuestos esencialmente por hornblen-

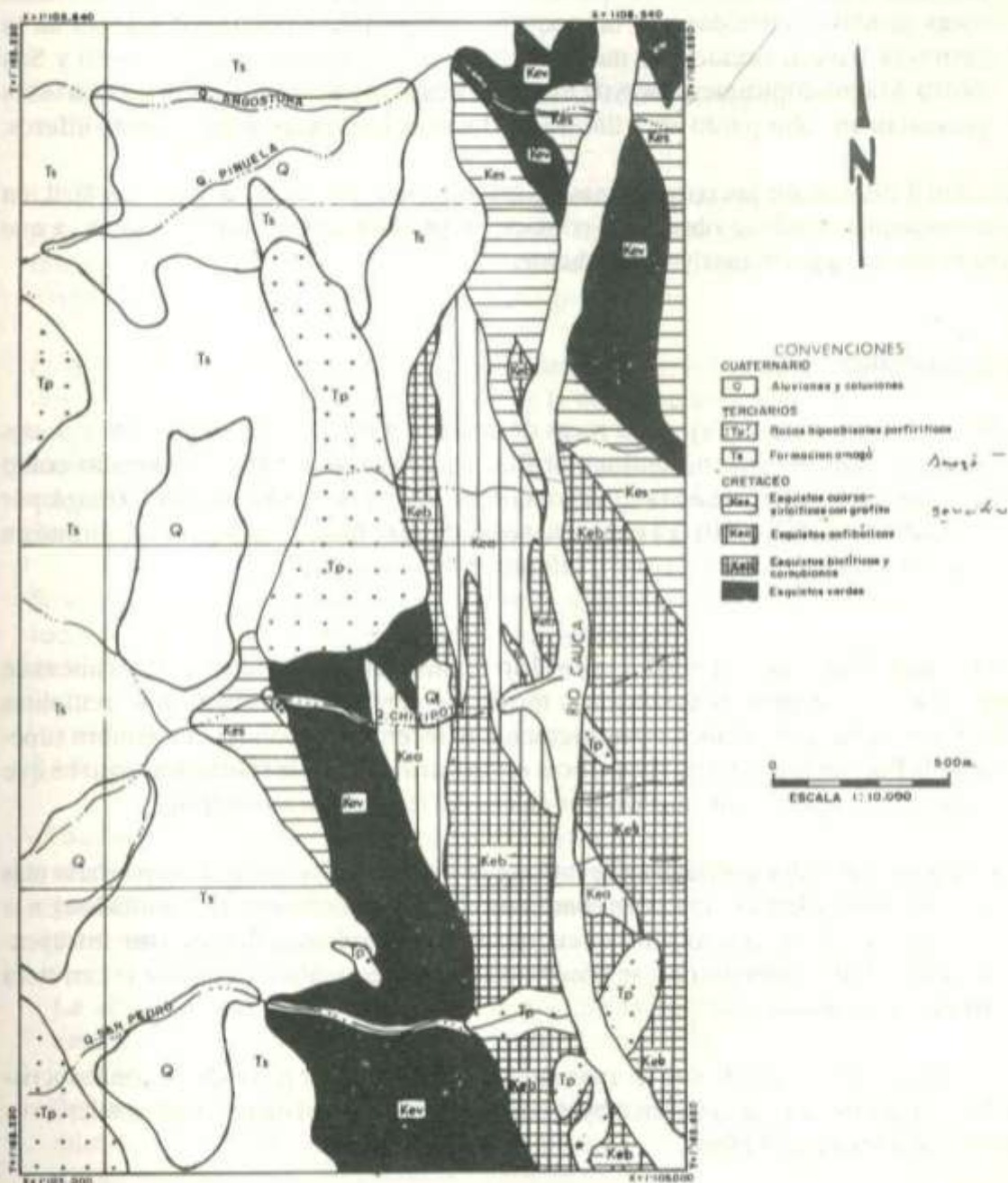


Figura 2. Mapa geológico generalizado del área de estudio.

da y plagioclasa, poseen también algunas venillas de cuarzo que en general son concordantes con la foliación.

- Esquistos y cornubianas biotíticas (Keb): Se encuentran en bandas alargadas, generalmente limitados entre los esquistos anfibólicos. En la quebrada San Pedro estas rocas se hallan intruídas por un pequeño cuerpo ígneo porfídico. Afloran en la carretera troncal occidental, más ampliamente en la quebrada Chirapotó y San Pedro. Macroscópicamente son de un color oscuro con tonos rojizos, aunque a veces presentan un color pardo amarillento producto de la alteración de algunos sulfuros.

Es difícil diferenciar las cornubianas de los esquistos biotíticos siendo más fácil, en afloramientos donde se observa el contacto entre las rocas porfídicas y éstas ya que adquieren un aspecto masivo y brechoide.

2.2 Cenozoico

- Rocas sedimentarias (Ts): estas rocas de acuerdo a estudios realizados en regiones próximas son de origen continental fluvio-lacustre y se han denominado como terciario carbonífero de Antioquia por GROSSE, E. (1926) y Formación Amagá, por GONZALEZ, H. (1980). El conjunto sedimentario fue dividido por este último en tres miembros (pisos de Grosse), Inferior, Medio y Superior.

Las rocas sedimentarias que afloran en el área consisten esencialmente de areniscas de colores amarillentos, de grano fino a medio y a menudo intercaladas con arcillolitas grises con varias tonalidades, aparentemente parecen corresponder al miembro superior de la Formación Amagá. Estas rocas están intruídas por las porfídicas caso en que adquieren un aspecto muy masivo por efecto del calentamiento sufrido.

- Rocas hipoabisales porfídicas (Tp): Ocupan en el área las zonas de topografía más abrupta; normalmente aparecen como protuberancias entre las otras unidades. En la parte central del área se localiza un cuerpo alargado de dirección norte-sur, intruyendo a las rocas sedimentarias; se observan además pequeños cuerpos en la carretera troncal occidental.

Las rocas en afloramiento son de apariencia masiva, de color gris oscuro, con fenocristales de plagioclasa y cuarzo (en mayor o menor proporción) en una matriz microcristalina de textura porfídica.

2.3 Cuaternario (Q)

Está constituido por depósitos no consolidados de material aluvial y coluvial, que cubre las rocas más antiguas. Se encuentran en cercanías a las quebradas que drenan el área y en las laderas de las montañas más empinadas.

Son acumulaciones de bloques de diferentes tamaños y composición arrastrados por las quebradas en épocas de invierno o por efecto de la gravedad. Las principales acumulaciones se encuentran en la confluencia de las Quebradas Angostura y Piñuela; en algunos afluentes a la quebrada Chirapotó (parte central de la zona) y en la quebrada San Pedro (al sur del área estudiada).

3. MANIFESTACIONES U OCURRENCIAS MINERALES Y SUS ALTERACIONES

La mineralización del área se encuentra asociada a las rocas hipoabisales y metamórficas, ya sea diseminada o vetiforme. Dicha mineralización está constituida generalmente por pirita, calcopirita, esfalerita y molibdenita. En algunas areniscas, sin embargo se observa pirita diseminada en poca proporción.

La presencia de mineralizaciones se manifiesta en superficie por tonalidades amarillentas, rojizas o blancuzcas que resultan de la descomposición de los sulfuros.

La meteorización de las rocas da lugar a la presencia de minerales arcillosos, los cuales en el caso de los pórfidos aparentemente son el resultado de la alteración que produce ácido sulfúrico, el cual puede ayudar a la formación de estos minerales.

Se verá a continuación la principal mineralización presente en los diferentes tipos de rocas por la influencia que esta tiene en la demarcación de las zonas eventualmente anómalas.

3.1 Rocas metamórficas

- Esquistos verdes, cuarzo-sericíticos y grafitosos: éstos se caracterizan por el bajo contenido de sulfuros, los cuales son predominantemente de pirita y se encuentran en general siguiendo la foliación o en venillas cortándola. El porcentaje de sulfuros estimado visualmente, no alcanza el 5%.

La alteración de la mineralización se manifiesta en afloramiento como manchas amarillentas, rojizas o blancuzcas, producto de la alteración de la pirita.

- Esquistos anfibólicos: La mineralización de estas rocas aparece vetiforme o diseminada. Los sulfuros más importantes son: pirita, calcopirita y molibdenita: las vetas varían en espesor desde unos pocos centímetros a una máxima de 20 cms; se localizan en varios sitios, principalmente en la quebrada Chirapotó.

- Esquistos y cornubianas biotíticas: La mineralización se encuentra siguiendo la foliación y a veces cortándola; específicamente en la quebrada Chirapotó se encuentra un filón de un metro de espesor cuya mineralización está constituida por pirita y molibdenita. En los cortes de la carretera se encontró pirrotina, calcopirita siguiendo

la foliación y a menudo diseminada en la roca. Cerca al desembocadura de la quebrada Chirapotó al río Cauca se observa un predominio de molibdenita y calcopirita en forma de venillas que están cortando la foliación de estas rocas.

3.2 Rocas hipoabisales

En las rocas porfídicas la mineralización se encuentra rellenando fracturas por un evento magmático hidrotermal. Se observan filones que siguen la tendencia de fracturas, muchos dan origen a mineralización en forma de estoverca. Presentan una alta concentración de pirita y algo de calcopirita, a veces molibdenita. Estos sulfuros se suelen presentar diseminados en el cuerpo alcanzando porcentajes que a una estimación visual corresponden a un 5 ó 10%.

La amplia oxidación de las rocas ayuda al reconocimiento rápido de los sulfuros ya que ellas se tiñen de manchas cafés, rojizas y blancuzcas.

Resumiendo, las mineralizaciones vetiformes en el área se consideran producidas por el magmatismo que originó las rocas porfídicas, aunque las mineralizaciones observadas en los esquistos biotíticos y concordantes con la foliación, aparentemente corresponden a otro evento mineralizante que acompañó el metamorfismo de la citada unidad.

4. GEOQUIMICA DE SUELOS

En este capítulo se discutirá lo relativo a la metodología seguida durante el estudio, sistema de muestreo empleado, características de los suelos desarrollados en las diferentes unidades litológicas, las técnicas analíticas y los análisis hechos a cada muestra. También se describen los perfiles generalizados de suelos; finalmente se hace una discusión sobre el tratamiento estadístico de los resultados geoquímicos.

4.1 Método de muestreo

Debido a lo abrupto del terreno el método geoquímico escogido fue el muestreo de suelos a lo largo de filos, tratando que éste fuese más o menos perpendicular a las mineralizaciones conocidas a las quebradas que drenan el área.

Se escogió una línea base, a la cual se amarraron topográficamente las demás líneas secundarias del muestreo, haciéndose a lo largo de ésta el primer muestreo y posteriormente en los filos normales a ella. Las muestras de suelo se tomaron con un barreno manual (auger) procurando que la cantidad de muestra recuperada fuese del horizonte C, que varió entre los 30 y 90 cms de profundidad, teniendo en cuenta que el terreno tiene pendientes pronunciadas y hay variaciones dependiendo de la roca que originó el suelo.

Se tomaron 144 muestras de las cuatro unidades que afloran en el área, cada una de ellas de un peso aproximado de 250 gramos, las que fueron debidamente empacadas y rotuladas en bolsas plásticas. La densidad del muestreo fue de una muestra cada 50 m, dejándose de tomar unas cuantas muestras a lo largo de las líneas por estar el sitio escogido muy cerca a una edificación, cañada, caminos o pequeños potreros (generalmente fumigados) lo que podría modificar los resultados químicos a causa de una eventual contaminación, y por lo tanto la interpretación posterior podría ocasionar datos erráticos.

Cada línea secundaria se amarró topográficamente a la línea base y simultáneamente a cada muestra se le hizo corrección topográfica, de tal manera que la distancia entre ellas fuese horizontal.

4.2 Técnicas analíticas

En forma resumida se verán cuales fueron los análisis químicos que se hicieron a las muestras:

- Espectrofotometría de absorción atómica: Las muestras se analizaron para cinco elementos por espectrofotometría de absorción atómica por considerarse este método uno de los más sensitivos y de resultados más confiables. Para ello fueron inicialmente secadas en un horno a una temperatura de 80°C, se les sacó a mano raíces, hojas y pedazos de roca, luego se pulverizaron en un mortero de porcelana, se cuartearon y finalmente este material se pasó por una malla de 80, siendo la fracción -80 la tenida en cuenta para el análisis espectrofotométrico.

Para obtener la solución que se llevó al equipo de absorción atómica se atacó la muestra con ácido nítrico, perclórico y clorhídrico.

- pH de las muestras: a todas las muestras se les determinó el pH utilizando un potenciómetro digital, siguiendo la técnica universal basada en la relación uno - uno (suelo - agua).

4.3 Características de los suelos

Los suelos presentan algunas características especiales que están dependiendo del material parental que los originó. Por ello se describen para cada unidad los horizontes que conforman su perfil, espesor de éstos, características y profundidad a la que se tomó la muestra. En la descripción de las propiedades físicas de los suelos el color se dará con base a la carta de color para rocas distribuida por la Sociedad Geológica de América; el sistema que utiliza es el llamado Munsell, de amplio uso en los Estados Unidos, en donde un color en particular se designa por un número y una letra (ejemplo 10 YR).

4.3.1 Unidad Ignea

Son suelos generados por rocas porfídicas y son los que presentan el perfil más desarrollado en el área. El pH varía de 4.6 a 6.7 por lo que se pueden clasificar como moderada a fuertemente ácidos.

En general la muestra se recuperó a una profundidad de 80 cms aunque se presentaron algunas variaciones debido a las pendientes. Un perfil generalizado para esta unidad (Figura 3) muestra las siguientes características:

- Horizonte A: de color pardo oscuro (10 YR 4/2), donde se observan raíces, fragmentos de cuarzo, presenta una textura limosa y es fácil de desmenuzarse.
- Horizonte de Transición (A-B) aproximadamente de 10 cms de espesor, donde aún se observan raíces, tiene igual textura que el horizonte A, pero empiezan a aparecer óxidos en manchas gruesas, claras y rojo amarillentas; presenta un color más claro.
- Horizonte B: se continúa aproximadamente hasta los 70 cms, es de color pardo claro (10 YR 5/4), con buen contenido de óxidos de hierro, alteración de los ferromagnesianos, fragmentos hasta de un centímetro de diámetro de roca y la textura es limosa.
- Horizonte de Transición (B-C) de coloración café clara (5 YR 6/4), de textura más arenosa y de límite claro y ondulado.
- Horizonte C: Presenta abundantes poros y puntos blancos (alteración de feldespatos en el caso de pórfidos andesíticos) que le dan una apariencia moteada a la capa; posee abundantes óxidos de hierro y manganeso, textura limo-arenosa, es levemente plástico; su color tiende a ser naranja (10 YR 6/6); se observan en algunos casos pequeños fragmentos de la roca original.

En el caso que haya sido un pórfido dacítico el que originó el suelo, es común observar fragmentos de cuarzo bipiramidal.

La topografía que presentan es la más abrupta y se localizan más ampliamente entre la quebrada Chirapotó y Cañada La Piñuela, entre alturas de 850 y 1.100 m.s.n.m.

4.3.2 Unidad sedimentaria

Estos suelos son de color amarillo o pardo grisáceo oscuro. Son los suelos más fuertemente ácidos, con un pH de 4.0 a 5.5, textura media.

La profundidad a que se encuentra el horizonte C, varía de acuerdo a las pendientes entre 40 y 50 cms, aunque en muchas ocasiones se dificulta tomar la muestra por la abundancia en cuarzo.

4.3.1 Unidad Ignea

Son suelos generados por rocas porfídicas y son los que presentan el perfil más desarrollado en el área. El pH varía de 4.6 a 6.7 por lo que se pueden clasificar como moderada a fuertemente ácidos.

En general la muestra se recuperó a una profundidad de 80 cms aunque se presentaron algunas variaciones debido a las pendientes. Un perfil generalizado para esta unidad (Figura 3) muestra las siguientes características:

- Horizonte A: de color pardo pardo oscuro (10 YR 4/2), donde se observan raíces, fragmentos de cuarzo, presenta una textura limosa y es fácil de desmenuzarse.
- Horizonte de Transición (A-B) aproximadamente de 10 cms de espesor, donde aún se observan raíces, tiene igual textura que el horizonte A, pero empiezan a aparecer óxidos en manchas gruesas, claras y rojo amarillentas; presenta un color más claro.
- Horizonte B: se continúa aproximadamente hasta los 70 cms, es de color pardo claro (10 YR 5/4), con buen contenido de óxidos de hierro, alteración de los ferromagnesianos, fragmentos hasta de un centímetro de diámetro de roca y la textura es limosa.
- Horizonte de Transición (B-C) de coloración café clara (5 YR 6/4), de textura más arenosa y de límite claro y ondulado.
- Horizonte C: Presenta abundantes poros y puntos blancos (alteración de feldespatos en el caso de pórfidos andesíticos) que le dan una apariencia moteada a la capa; posee abundantes óxidos de hierro y manganeso, textura limo-arenosa, es levemente plástico; su color tiende a ser naranja (10 YR 6/6); se observan en algunos casos pequeños fragmentos de la roca original.

En el caso que haya sido un pórfido dacítico el que originó el suelo, es común observar fragmentos de cuarzo bipiramidal.

La topografía que presentan es la más abrupta y se localizan más ampliamente entre la quebrada Chirapotó y Cañada La Piñuela, entre alturas de 850 y 1.100 m.s.n.m.

4.3.2 Unidad sedimentaria

Estos suelos son de color amarillo o pardo grisáceo oscuro. Son los suelos más fuertemente ácidos, con un pH de 4.0 a 5.5, textura media.

La profundidad a que se encuentra el horizonte C, varía de acuerdo a las pendientes entre 40 y 50 cms, aunque en muchas ocasiones se dificulta tomar la muestra por la abundancia en cuarzo.

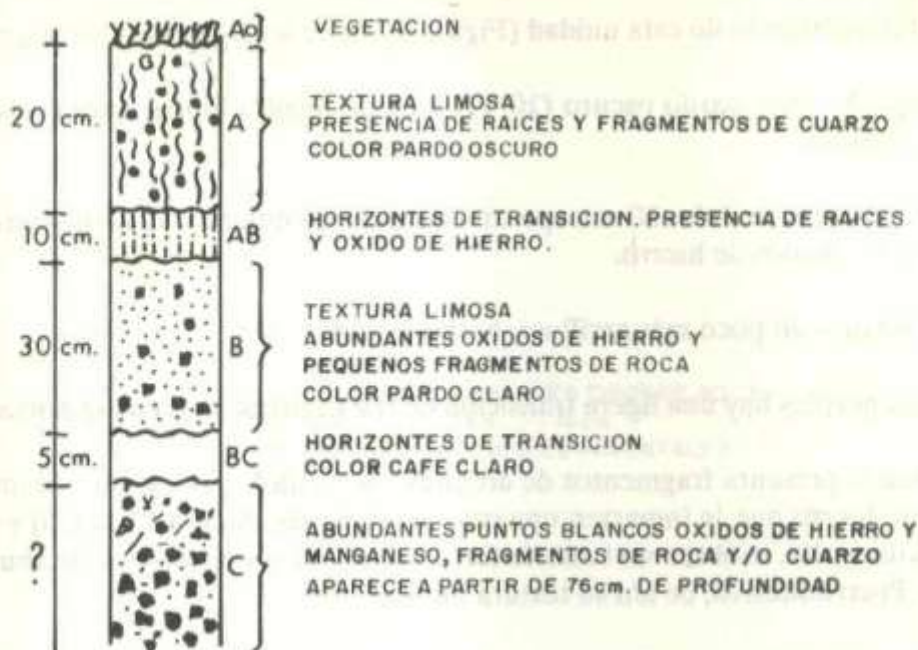


Figura 3. Perfil generalizado de los suelos derivados de la unidad ignea



Figura 4. Perfil generalizado de los suelos derivados de la unidad sedimentaria

Un perfil generalizado de esta unidad (Figura 4), tiene las siguientes características:

- Horizonte A: color pardo oscuro (10 YR 4/2), de textura limoarcillosa, con pocas raíces, plástico.
- Horizonte B: a partir de los 20 cms aproximadamente, contiene fragmentos de cuarzo, feldespato y óxidos de hierro.

Presenta textura un poco más arcillosa; bastante duro.

En algunos perfiles hay una ligera transición de B a C; otros carecen del horizonte B.

- Horizonte C presenta fragmentos de arenisca y/o arcillolita o limolita, abundantes óxidos de hierro que le imparten una coloración parda clara (10 YR 6/6) y puntos blancos de caolín, se observan también ferromagnesianos y generalmente abundante cuarzo. Poco adhesivo, de ahí su textura limosa.

Los suelos normalmente presentan un relieve de formas relativamente inclinadas, las cuales en algunas partes tienen ondulaciones, a causa de las variaciones en el conjunto sedimentario, es decir, a la presencia de capas de arenisca, conglomerados y sedimentos arcillosos intercalados.

La vegetación principalmente la constituyen árboles frutales y caña de azúcar.

4.3.3 Unidad metamórfica

El pH de los suelos de esta unidad varía de 5.3 a 7.3 por lo que en algunas partes es casi alcalino. (Véase Figura 5).

Un perfil generalizado es el siguiente:

- Horizonte A: es delgado y de color pardo oscuro (10 YR 4/2), de textura limoarcillosa, con óxidos de hierro y muy poco contenido de materia orgánica.

En el caso de los esquistos cuarzosericíticos con grafito, se pudo apreciar en los suelos un color casi negro; son suelos muy plásticos, presentando buen contenido de materia orgánica, muy adhesivos y textura media. Contienen abundante cuarzo y sericita.

- Horizonte B: generalmente carecen de él.
- Horizonte C: se encuentra a poca profundidad, se distingue por la presencia de fragmentos de la roca original; generalmente presentan un color pardo pálido (10 YR 6/2), adhesivos, con fragmentos diminutos de cuarzo, textura limosa, con ferromagnesianos alterados y fáciles de desmenuzar.



Figura 5. Perfil generalizado de los suelos derivados de la unidad coluvia-aluvial



Figura 6. Perfil generalizado de los suelos derivados de la unidad metamorfica

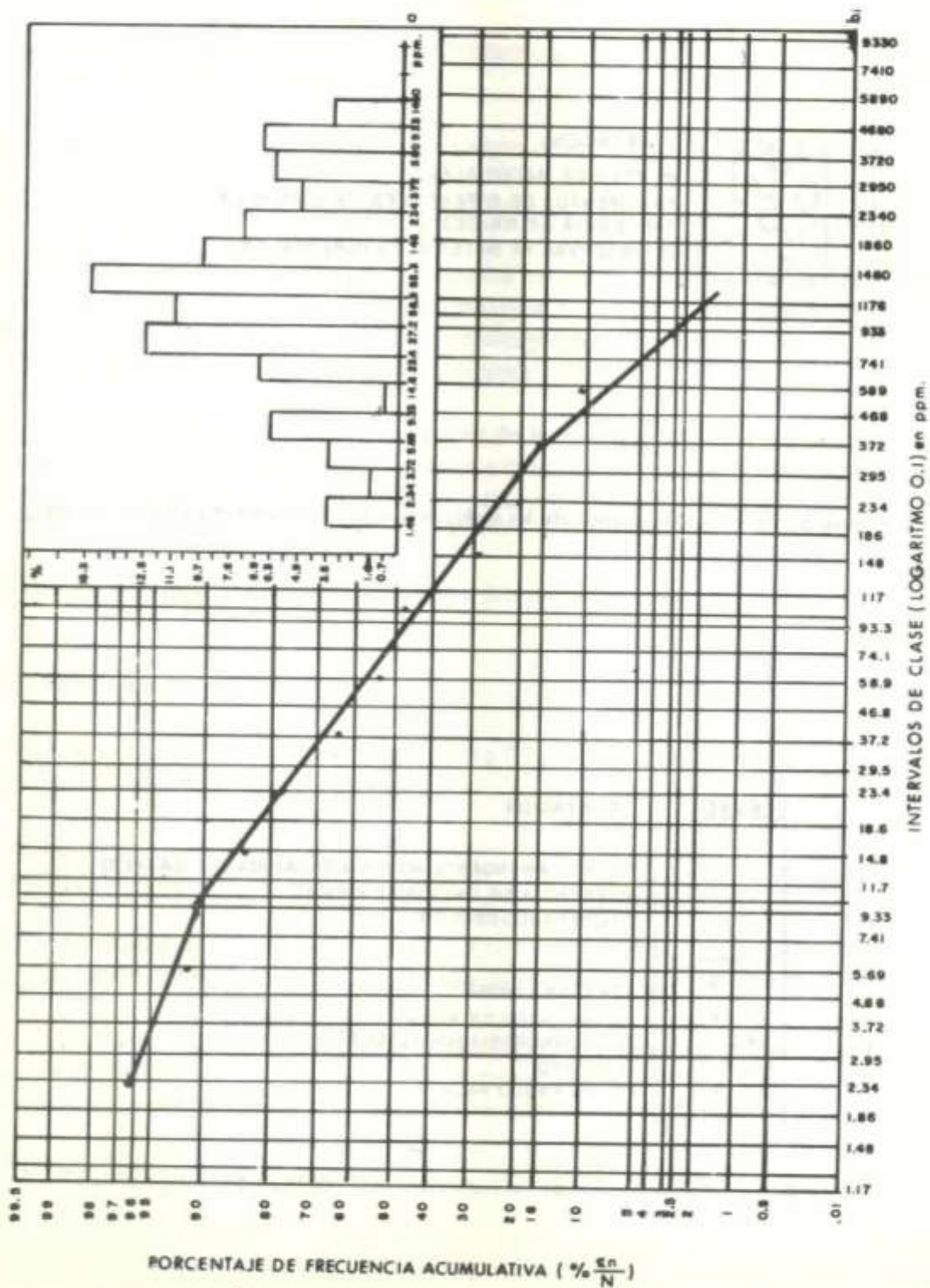


Figura 7. Distribucion de frecuencia para el Cobre a. Relativas b. Acumulativas

Los esquistos de las diversas unidades metamórficas dan lugar a relieves bastante abruptos, sus suelos son muy poco desarrollados y solo tienen por vegetación diferentes tipos de pastos.

4.3.4 Depósitos no consolidados

Su pH varía de 5.4 a 5.6, clasificándose como moderadamente ácidos.

No tienen un perfil de suelo desarrollado (Figura 6). Las pocas muestras se tomaron a poca profundidad y se caracterizaron por presentar fragmentos de diferentes tipos de roca. Se encuentran en la cercanía de quebradas y caños que drenan el área y están cubiertos por abundantes rodados de roca.

4.4 Análisis estadístico de los resultados

Con el fin de facilitar la interpretación y obtener conclusiones con base en la información geológica disponible, se llevó a cabo el tratamiento estadístico de los datos provenientes de los análisis químicos de las muestras del área.

Dicho análisis estadístico se hizo mediante el uso de un computador Texas Instrument TI-90/4A que permite obtener en forma rápida resultados confiables.

Mediante programas elaborados previamente y aplicables a la prospección geoquímica como el Método de Lepeltier y Análisis Factorial, se le suministraron al computador los datos como un solo conjunto con el fin de obtener inicialmente los principales parámetros estadísticos: valor normal ("background"), desviación estandar, valor umbral ("threshold"), coeficientes de correlación y los gráficos (o en su defecto, los datos para elaborarlos) que son representativos de la distribución relativa y acumulativa de cada elemento analizado y posteriormente obtener las zonas anómalas así como sus delimitaciones.

Los resultados obtenidos del computador, mediante el método de Lepeltier, permitieron definir las distribuciones relativas del Cu, Mo, Zn, Pb y Ag analizados y de los cuales se obtuvieron los gráficos de frecuencias relativas y acumulativas. Se muestra como ejemplo de este tipo de gráficos y análisis respectivo el del cobre.

La Figura 7a, refleja para la totalidad de datos del cobre un histograma casi simétrico, con una amplia dispersión de valores que van desde un mínimo de 2 ppm a 1.340 ppm.

El histograma se puede separar en tres partes, teniendo en cuenta los diferentes contenidos que identifican tres poblaciones de datos (histograma multimodal), la primera refleja una distribución asimétrica negativa que incluye valores muy "bajos" que están entre 2 y 10 ppm; comprende aproximadamente el 15% de los datos totales. La segunda parte muestra una distribución simétrica con valores que van desde 10 ppm

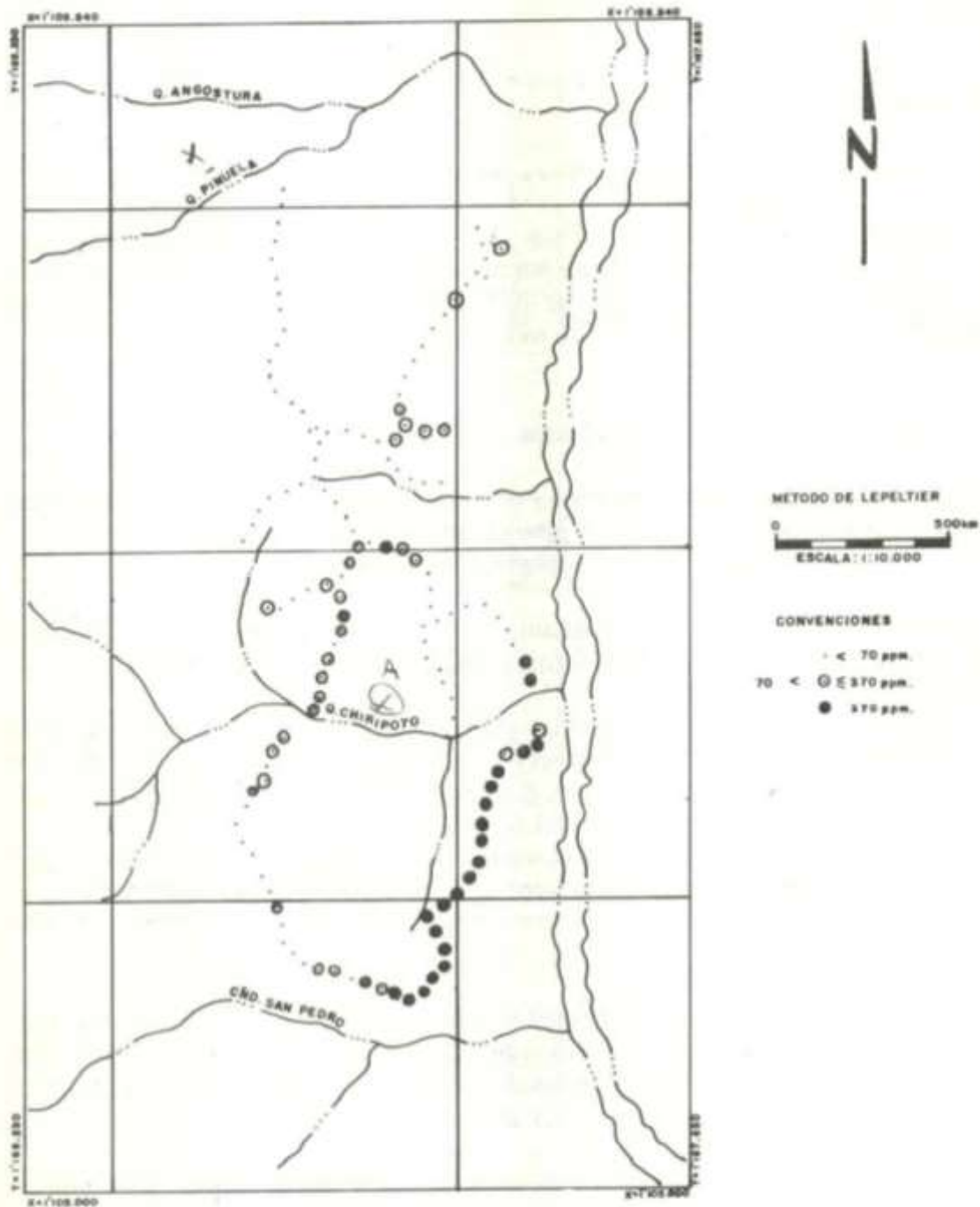


Figura 8. Mapa geoquímico de valores anómalos para el cobre

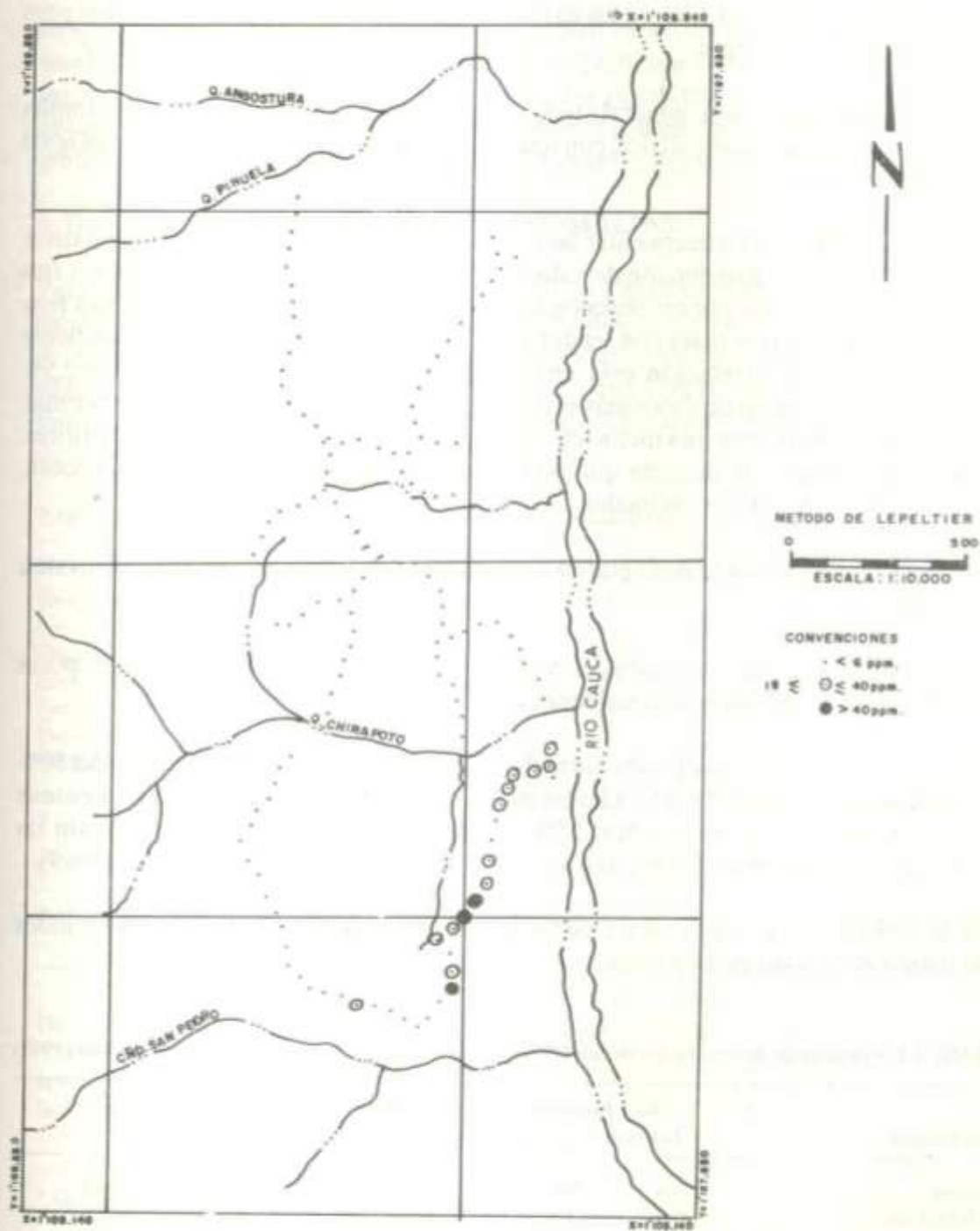


Figura 9. Mapa geoquímico de valores anómalos para molibdeno

hasta 350 ppm, que corresponden a la población del total de datos; en esta parte está incluido el valor modal que corresponde a 71 ppm. La tercera parte corresponde a los valores más "altos" por encima del valor normal, presenta una distribución de valores negativos, comprende el 27% de los datos totales, siendo el valor mínimo de 400 ppm y el máximo de 1.340 ppm.

Desde un punto de vista general, todo el conjunto de datos muestra una amplia distribución en el área, asimétrica, con tendencia positiva, cuyo valor promedio es igual a 70 ppm.

Existe una correlación directa entre las curvas de frecuencias relativas y acumulativas (Figura 7b) para la distribución de valores del cobre. En esta última se denotan tres poblaciones, definidas por quiebres en la curva. La primera formada por valores muy "bajos", menores al normal y con tendencia a la izquierda, reflejada por una pendiente suave. La segunda población está entre la proyección de las líneas 16% y 2.5% comprende el número de datos más reducido que están por encima del valor normal. La línea resultante tiene una inclinación de la pendiente mayor que las dos anteriores, con tendencia hacia la derecha que podría indicar un posible sector para el cobre, caracterizado por valores anómalos.

El valor umbral calculado de la gráfica correspondiente a toda la población equivale a 370 ppm.

Es de anotar que para el molibdeno y la plata, se detectaron valores en muy pocas muestras por lo que éstos se consideran anómalos.

Para todos los elementos el valor normal gráfico corresponde a la proyección del 50% de la ordenada sobre la línea resultante de la abscisa y el valor umbral generalmente se lee en la intersección de la línea 2.5%. Sin embargo éste varía de acuerdo con las poblaciones resultantes de los análisis y siguiendo los criterios de Lepeltier (1969).

En la Tabla 1, se hace un resumen de los resultados matemáticos y gráficos obtenidos mediante el método de Lepeltier.

TABLA 1. Resumen de los resultados matemáticos y gráficos obtenidos por el método de Lepeltier (1969)

Elementos	Rs.* Matemáticos		Rs.* Gráficos		Rango Variación	
	Normal	Umbral	Normal	Umbral		
Cobre	64	1.560	70	370	2 -	1.340
Molibdeno	3	12	6	40	-	79
Zinc	68	259	70	100	14 -	520
Plomo	20	168	20	90	6 -	590
Plata	1	3	2	10	1 -	12

* Resultados en ppm. Para un total de 144 muestras de suelo

Por otra parte mediante el análisis factorial fueron determinados dos factores definidos; el primero de ellos por los puntajes 0,82, 0,89 y 0,70 para la triada (Zn, Pb, Ag) y el segundo por 0,75, 0,89 y 0,47 para (Cu, Mo, + Ag).

Respecto al promedio móvil se anota que se hizo manualmente y solamente para los resultados de las muestras localizadas entre las quebradas San Pedro y Chirapotó. Los valores se escogieron siguiendo una progresión geométrica de factor 2, con ello se obtuvo un mapa de contornos que conjuntamente con mapas de análisis factorial y los gráficos de Lepeltier se utilizaron para establecer las anomalías en el área.

5. DISCUSION DE RESULTADOS Y ANOMALIAS

Para dirigir las zonas eventualmente anómalas se hizo un análisis de las concentraciones de los elementos, su valor promedio en los diferentes suelos (Tablas 2 y 3). Luego se trató de correlacionar las anomalías encontradas con las asociaciones de elementos obtenidos por el método de análisis factorial, con el fin de ver si éstas se cumplen; también se considerará el tipo de roca que originó los suelos anómalos y la presencia de mineralizaciones.

TABLA 2. Valores promedios de los suelos derivados de la unidad metamórfica

Unidad litológica	Número de Muestras	Valor Promedio (ppm)				
		Cu	Mo	Zn	Pb	Ag
Esquistos biotíticos	19	337	11	76	56	1.5
Esquistos anfibólicos	19	453	11	101	81	1.8
Esquistos verdes	10	120	2	123	26	0.9
Esquistos cuarzo-sefiríticos	5	78	2	122	39	0.6

* Con base en 144 muestras

TABLA 3. Valores promedios de los suelos derivados de las unidades ígnea, sedimentaria y coluvio-aluvial

Unidad litológica	Número de Muestras*	Cu	Valor Promedio (en ppm)			Ag
			Mo	Zn	Pb	
Ígnea	40	172	2	77	31	1
Sedimentaria	46	42	2	82	35	0.9
Coluvio-aluvial	5	141	2	126	23	0.8

* Con base en 144 muestras

Los valores más altos en todos los elementos se encuentran en los suelos derivados de los esquistos anfibólicos. Los suelos de los esquistos biotíticos igualmente presentan valores altos en todos los elementos a excepción del zinc, esto podría explicarse de acuerdo al comportamiento geoquímico de ese elemento y dado que éste tipo de rocas

originan suelos pobres en fracción fina, pudiendo ser lixiviados fácilmente y dada la movilidad de este elemento para no ser captado; con pH altos.

Los suelos derivados de la unidad ígnea presentan en general valores altos de cobre y plata y los valores más bajos en plomo.

Esto último podría explicarse porque dichos suelos presentan contenidos de materia orgánica que produce CO_2 pudiendo originarse el carbonato de plomo que es bastante soluble; la unidad sedimentaria presenta valores muy bajos para todos los elementos, lo que podría explicarse debido a que sus suelos son los más ácidos.

En general se puede decir que los suelos citados se movilizan bastante en el área, dado que los pH son bajos en toda la zona, con excepción de la región oriental donde se detectaron pH superiores a 5.4 llegando a alcanzar hasta 7.3. En esta situación deberían presentarse contenidos "altos" de cobre, plomo y plata y valores "bajos" de zinc y molibdeno. Nótese que de acuerdo a la Tabla 2, los valores promedios de la unidad son altos también en molibdeno. Habría sin embargo dos explicaciones para la alta concentración de la unidad metamórfica:

-Un pH alto que impide la movilización de los iones Cu, Pb y Ag.-

- Contenidos "altos" en esta zona debido a una alta acumulación de minerales metálicos que son integrantes de las mineralizaciones que en esta parte se encuentran.

Las concentraciones (en ppm) de cada uno de los elementos interpretados, se colocaron en mapas a escala 1:10.000. En estos se diferenciaron los sitios con valores menores y mayores que el umbral calculado gráficamente, por ser éste más próximo al valor promedio de cada elemento en los suelos.

Los mapas con los valores anómalos de cada elemento se superpusieron al mapa geológico con el fin de visualizar los tipos de roca que originaron esos suelos, para luego correlacionar dichos valores con los resultados obtenidos por el método estadístico del análisis factorial y el promedio móvil, que junto con el conocimiento de las mineralizaciones que existen en el área y la concentración de los elementos en cada unidad litológica, sirvan para definir las posibles anomalías.

De acuerdo a lo ya expuesto se encontró que en la unidad metamórfica en general aparecen valores anómalos para todos los elementos. En el caso del cobre se hallaron valores superiores a 370 ppm (valor umbral) en la parte sureste del área, entre las quebradas San Pedro y Chirapotó y en suelos provenientes de rocas hipoabisales, esquistos verdes, esquistos biotíticos y esquistos anfibólicos; también hay valores bastante altos en muestras tomadas en el sector noreste de la zona analizada y en suelos derivados de rocas hipoabisales.

Para el molibdeno los pocos valores anómalos, se encuentran en suelos de los esquistos

biotíticos y esquistos verdes, entre las quebradas Chirapotó y San Pedro coincidiendo parcialmente con los valores anómalos del cobre.

Para el plomo el mayor número de valores anómalos se registra en suelos provenientes de los esquistos biotíticos, habiendo unas pocas muestras anómalas en los suelos de esquistos verdes y esquistos anfibólicos, los que guardan cierta relación con el cobre y el molibdeno aunque hay otros valores hacia el occidente de la zona.

La plata solo presentó un valor por encima del umbral y el zinc, muestra una distribución errática en los valores anómalos que se presentan por toda la zona y en suelos derivados de las distintas unidades.

Los mapas geoquímicos de valores obtenidos permiten considerar que el cobre y el molibdeno demarcan bastante bien una zona anómala al sur de la quebrada Chirapotó (Figuras 8 y 9) la cual está de acuerdo con el análisis factorial realizado. Dicha anomalía se asocia a rocas metamórficas y se halla cerca al contacto con un pequeño cuerpo de rocas porfídicas.

Los valores allí encontrados son superiores varias veces a los promedios que se citan en la literatura para suelos derivados de rocas metamórficas. Todo esto se corroboró con las mineralizaciones que se hallaron en la quebrada Chirapotó.

El zinc, plomo y la plata tienen un comportamiento que coincide en general con el del cobre y el molibdeno.

6. CONCLUSIONES

El estudio geoquímico de los suelos, los resultados de los análisis químicos interpretados estadísticamente, así como el conocimiento geológico del área condujo a las siguientes conclusiones:

- Los distintos suelos del área presentan diferencias en cuanto a la acidez o basicidad dependiendo del tipo de roca a la cual están asociados. Los suelos de la unidad sedimentaria son los más ácidos del área. Dicha acidez podría en parte explicar, el hecho que en estos suelos no se hayan detectado valores anómalos.
- Las unidades litológicas se pueden diferenciar entre sí por los contenidos medios de los elementos analizados, es así como los derivados de la unidad sedimentaria presentan valores "bajos" para todos los elementos, mientras que los suelos derivados de la unidad metamórfica, en especial los provenientes de esquistos anfibólicos y esquistos biotíticos, muestran los más "altos" valores.
- Los resultados obtenidos por los tres métodos: Lepeltier, Análisis Factorial y Promedio Móvil, indican la misma zona anómala y muestran los suelos derivados de

esquistos biotíticos y esquistos anfibólicos como los de mayor interés en cuanto a mineralización de Cu, Mo, Zn, Pb y Ag.

- El cobre y el molibdeno son los elementos que demarcan mejor las anomalías en la zona.
- El Zn, Pb y Ag aunque reafirman las zonas anómalas no sirven para identificar con seguridad anomalías en la zona, a pesar que las señalan porque presentan otras áreas que pueden ser confundidas con ellas.
- Aunque las mineralizaciones son de tipo vetiforme, ellas se dan en un número muy alto y delgadas en espesor, así que el muestreo de suelos parece determinar una zona muy amplia. Esta gran amplitud podría también deberse a que el espaciamiento entre las distintas líneas del muestreo fue muy amplio y no cortó bien perpendicular la tendencia de la mineralización.
- El área más promisoría para posibles exploraciones se localiza al sureste del área, entre la quebrada San Pedro y Chirapotó; es un sector asociado a suelos provenientes de esquistos biotíticos y esquistos anfibólicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se hizo gracias al aporte económico de INGEOMINAS y a la sugerencia de personas que ayudaron en algunas etapas del estudio, pertenecientes a la misma institución. Por tal colaboración se expresan los más sinceros agradecimientos.

BIBLIOGRAFIA

- GONZALEZ, H. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Bol. Geol. Ingeominas, Medellín Vol. 23, No. 1, pp 1-98, 1980.
- GONZALEZ, H. Geología del Cuadrángulo J-8 (Sonsón). Ingeominas, Bogotá. Inf. 1704, 421p. 1976.
- GROSSE, E. Estudio geoquímico del terciario carbonífero de Antioquia. Berlín. Dietrich Rainer editors. 1926, 362p.
- LEPELTIER, C. Simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. Economy Geology, Vol. 64, pp 538-550. 1969.
- MORA, B., CUELLAR, J. Paragénesis del yacimiento de las minas nacionales de Marmato. Tesis Geología, Universidad Nacional de Colombia, 1982, 56 p.
- VINOGRADOV, A. The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils. Consultants bureau, 2ed. New York. 1959, 208 p.