

**DISTRIBUCION DE CROMO, NIQUEL Y COBALTO EN LA SAPROLITA Y EN
LOS CONCENTRADOS DE SEDIMENTOS FLUVIALES DERIVADOS DE
LAS DUNITAS DE MEDELLIN**

Informe 1841

Por:

JAIRO ALVAREZ AGUDELO — RAUL H. MUÑOZ ARANGO
Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras

1981

CONTENIDO

	<u>Página</u>
RESUMEN	49
1. INTRODUCCION	49
1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO	49
1.2. LOCALIZACION	49
1.3. CLIMA	49
1.4. VEGETACION	51
1.5. RELIEVE Y DRENAJE	51
1.6. METODOS DE CAMPO	51
1.7. METODOS DE LABORATORIO	53
2. MARCO GEOLOGICO REGIONAL	53
2.1. OCURRENCIAS DE CROMITA	54
3. GEOQUIMICA	54
3.1. DISTRIBUCION DE CROMIO, NIQUEL y COBALTO EN LA SAPROLITA DERIVADA DE DUNITA, AREA DE SANTA ELENA	54
3.1.1. CROMO	54
3.1.1.1. Interpretación	58
3.1.2. NIQUEL Y COBALTO	60
3.1.2.1. Interpretación	61
3.2. CROMO, NIQUEL y COBALTO EN LOS CONCENTRADOS EN BATEA	64
3.2.1. RESULTADOS	64
4. CONCLUSIONES	70
5. RECOMENDACIONES	70
6. BIBLIOGRAFIA	71

FIGURAS

1. Ubicación, marco geológico y ocurrencias de cromita en las dunitas de Medellín	50
2. Pendientes topográficas y ubicación de los sondeos. Area de Santa Elena . . .	52
3. Concentración de cromo, níquel y cobalto en los sondeos de las líneas L0 y 1L0. Area de Santa Elena	55
4. Concentración de cromo, níquel y cobalto en las muestras de saprolita de los sondeos del perfil A A.	56
5. Distribución de la frecuencia acumulativa en cromo, níquel y cobalto en la saprolita de dunita del área de Santa Elena	57
6. Histogramas de valores Co, Ni y Cr en la saprolita derivada de dunita. Area de Santa Elena	58
7. Distribución de cobalto, níquel y cromo en saprolita de dunita. Area de Santa Elena	59

8. Relación de estabilidad entre algunos compuestos de níquel y cobalto en agua a 25°C y una atmósfera de presión total	62
9. Diagramas de correlación Co - Fe, Co - Mn, Ni - Fe, Ni - Mn en muestras de saprolita derivada de dunita del área de Santa Elena	63
10. Contenido de cromo en los concentrados de las quebradas que drenan el cuerpo de dunitas de Medellín	65
11. Contenido de níquel y cobalto en los concentrados de las quebradas que drenan el cuerpo de dunitas de Medellín	66
12. Histogramas de contenidos de Cr, Co y Ni en los concentrados en batea provenientes de corrientes que drenan la dunita y las rocas encajantes de la misma	68
13. Distribución de la frecuencia acumulativa en cromo, cobalto y níquel en los concentrados en batea de la dunita de Medellín y de las rocas encajantes . . .	68
14. Diagramas de dispersión mostrando la correlación entre pares de elementos trazas	69

RESUMEN

En el cuerpo de dunitas de Medellín, se presentan varios depósitos podiformes de cromita. En una zona restringida de dicho cuerpo, alrededor de una ocurrencia de cromita, se hizo un estudio geoquímico sobre la distribución de Ni, Co y Cr en la saprolita y en los concentrados en batea procedentes de la ultramafita, con el fin de conocer la utilidad de estos elementos como indicadores de mineralizaciones. Los análisis fueron realizados por espectrografía semicuantitativa.

El níquel y el cobalto en la saprolita son afectados notoriamente por la meteorización química siendo redistribuidos y lixiviados y no son útiles como indicadores de ocurrencias de cromita. Ambos elementos tienen una coherencia geoquímica más alta con el hierro que con el manganeso. El cromo, en cambio, se encuentra principalmente en los minerales resistentes (cromita y magnetita), e indica la distribución primaria del mismo en la dunita.

La zona al oeste del depósito de Patio Bonito, tiene valores altos en cromo, lo cual sugiere una mayor concentración de cromita y mejores posibilidades para cuerpos de cromita.

La prospección geoquímica usando concentrados en batea, demostró ser útil y mediante esta herramienta se encontraron dos áreas anómalas, en la cuenca de captación de la quebrada Las Palmas.

1. INTRODUCCION

En varias partes del mundo se presentan depósitos podiformes de cromita relacionados con ultramafitas tipo Alpino, los cuales han sido objeto de investigación y explotación exhaustiva. En Colombia, depósitos conocidos de dicho mineral sólo ocurren asociados con las dunitas de Medellín. La importancia de la cromita en diferentes campos de la industria y la escasez de la misma en el país hace que la investigación de las ocurrencias

de dicho mineral sea considerada dentro de las actividades exploratorias del Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (INGEOMINAS).

La literatura sobre prospección geoquímica aplicada a ocurrencias de cromita es relativamente escasa, igualmente sobre la distribución de elementos en el ambiente exógeno relacionado con saprolita derivada de dunitas. En los aspectos mencionados, no se ha realizado antes en Colombia ningún estudio usando técnicas geoquímicas.

1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Obtener información preliminar sobre la distribución de cromo, níquel y cobalto en la saprolita, producto de meteorización de dunita, en una área contigua a la ocurrencia de cromita en Patio Bonito (área de Santa Elena); conocer las relaciones entre dichos elementos y la posibilidad de utilizarlos como "trazadores" si existe alguna variación en su concentración.
- Estudiar los contenidos de cromo, níquel y cobalto en los concentrados obtenidos de sedimentos fluviales mediante bateo y su relación con posibles depósitos de cromita.

1.2. LOCALIZACION

Los estudios geoquímicos de la saprolita y de los concentrados en batea, se hicieron en un cuerpo de dunita de 52 km de longitud, situado al oriente y norte de la ciudad de Medellín (Departamento de Antioquia). Para la saprolita se escogió un área de 0,13 km² localizada en la región de Santa Elena. Para los concentrados se muestrearon las diversas corrientes que drenan el área del cuerpo de dunita (Fig. 1).

1.3. CLIMA

La mayor parte del cuerpo ultramáfico aflora en zonas altas y frías cuya temperatu-

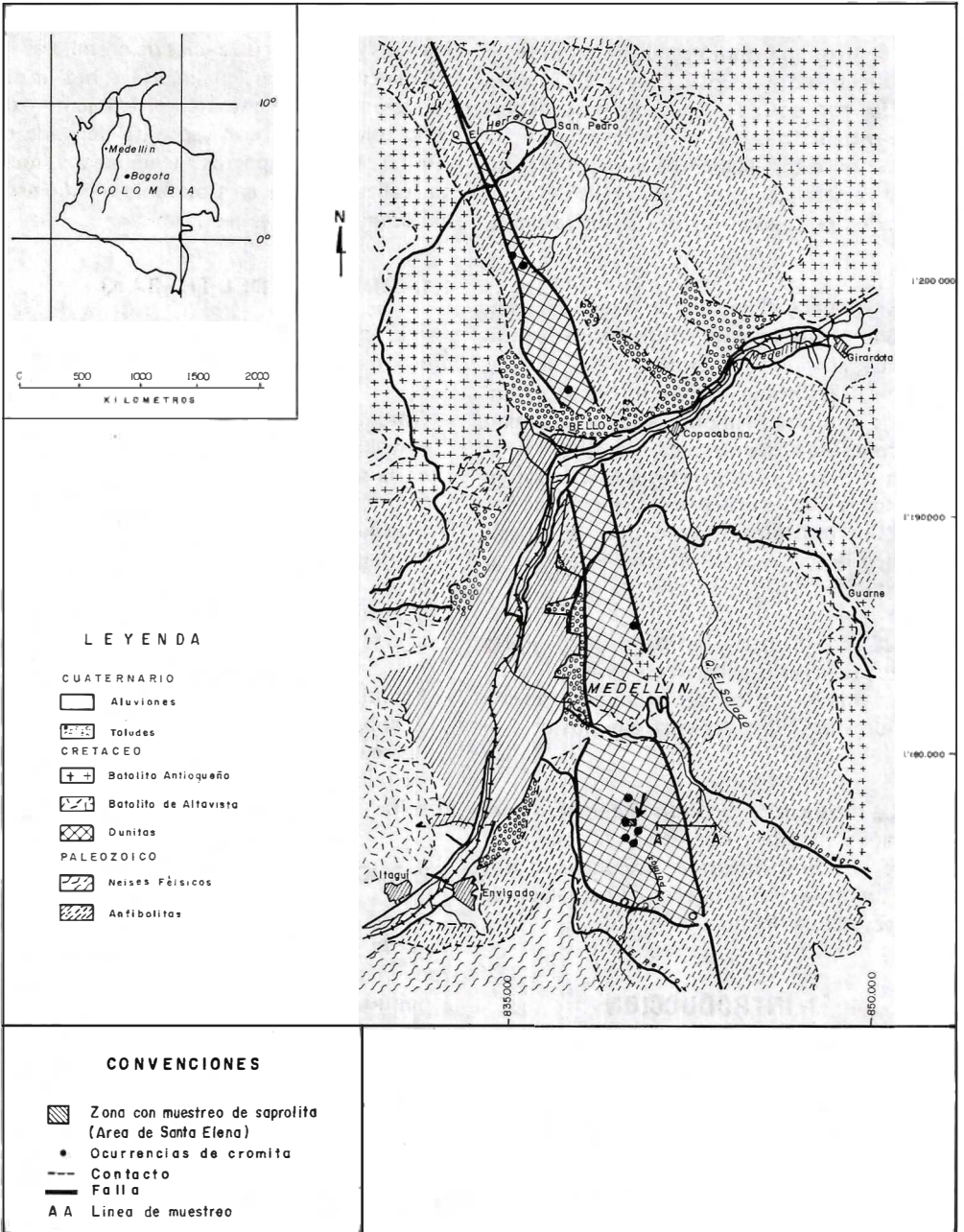


FIG. 1: Ubicación, marco geológico y ocurrencias de cromita en las dunitas de Medellín (Modificado de BOTERO, 1965).

ra promedio es de 17°C. Sólo un sector de pocos kilómetros cuadrados ubicado al norte del cuerpo, en vecindades de la población de Bello, se tiene una temperatura de 21°C.

La precipitación es de 1.800 mm anuales en promedio. Las fluctuaciones pluviométricas definen los siguientes períodos:

Invierno: Abril a mayo
Septiembre a noviembre

Verano*: Diciembre a marzo
Junio a agosto

1.4. VEGETACION

Unas de las características típicas de los suelos derivados de las dunitas, se relacionan con la esterilidad de los mismos. Este hecho es obvio en las laderas orientales del valle de Medellín y en los terrenos situados al noreste de la población de Bello. Allí la vegetación es exigua siendo comunes los helechos y pequeños arbustos.

Una situación contrastante se presenta donde las lateritas están cubiertas con cenizas volcánicas como ocurre en la mayoría del cuerpo ultramáfico. La vegetación en este caso, consiste principalmente en tierras cultivadas con hortalizas, zonas locales de bosque húmedo montano bajo (ESPINAL, 1964), plantaciones de coníferas y pasto.

1.5. RELIEVE Y DRENAJE

A pesar de la competencia y dureza de las dunitas, la posición de las mismas como parte integrante de los altiplanos del Oriente Antioqueño y del Llano de Ovejas al noroccidente de Medellín, con alturas superiores a los 2.400 m y la existencia de un drenaje poco desarrollado en ellos, induce a una topografía ondulada con diferencias de nivel menores de 100 m en general.

Sóloamente en la ladera oriental del valle de Medellín y al norte de Bello en donde la dunita aflora, la topografía es escarpada y las

pendientes sobrepasan, en algunos casos, los 45° de inclinación.

Buena parte de las quebradas afluentes del río Medellín que cortan la dunita, sólo lo hacen en la parte superior de su curso. En las zonas altas y relativamente planas el drenaje está pobremente desarrollado. Únicamente en el sector sur del cuerpo de dunita, la quebrada Las Palmas y sus tributarias forman una red de drenaje de alguna importancia, en la cual la mayoría de las corrientes van por encima de la dunita después de haber labrado su cauce en la cubierta de cenizas volcánicas. En el área estudiada buena parte de las quebradas afluentes del río Medellín, sólo cortan la dunita en las cabeceras de las mismas.

En el pequeño sector del área de Santa Elena, donde se realizó el muestreo de saprolita (Figura 1), la topografía es suave, con pendientes generalmente menores de 20° (Fig. 2), y un drenaje poco desarrollado de naturaleza esencialmente subterránea. El rasgo topográfico más importante lo constituye el Alto de Patio Bonito sobre cuya pendiente se presenta la ocurrencia de cromita del mismo nombre y sobre el cual se realizó el muestreo.

1.6. METODOS DE CAMPO

De acuerdo con los objetivos del trabajo, se procedió en la forma siguiente:

1.6.1. MUESTREO DE SAPROLITA EN EL AREA DE SANTA ELENA

Se seleccionó un rectángulo de 445 m x 300 m con centro en la ocurrencia de cromita de Patio Bonito (explotada y actualmente abandonada) (Figs. 1 y 2). En esta área se realizó un levantamiento con brújula y cinta ubicando los sitios de muestreo cada 25 m. En cada sitio se hizo un sondeo utilizando para ello un auger manual de 2" de diámetro (5.08 cm), con el cual se obtuvieron muestras tanto de la cubierta de cenizas volcánicas que reposan sobre la ultramafita, como de la parte saprolítica de esta última roca. Se realizaron un total de 272 sondeos

*Durante dichos meses se presentan lluvias, pero menos abundantes.

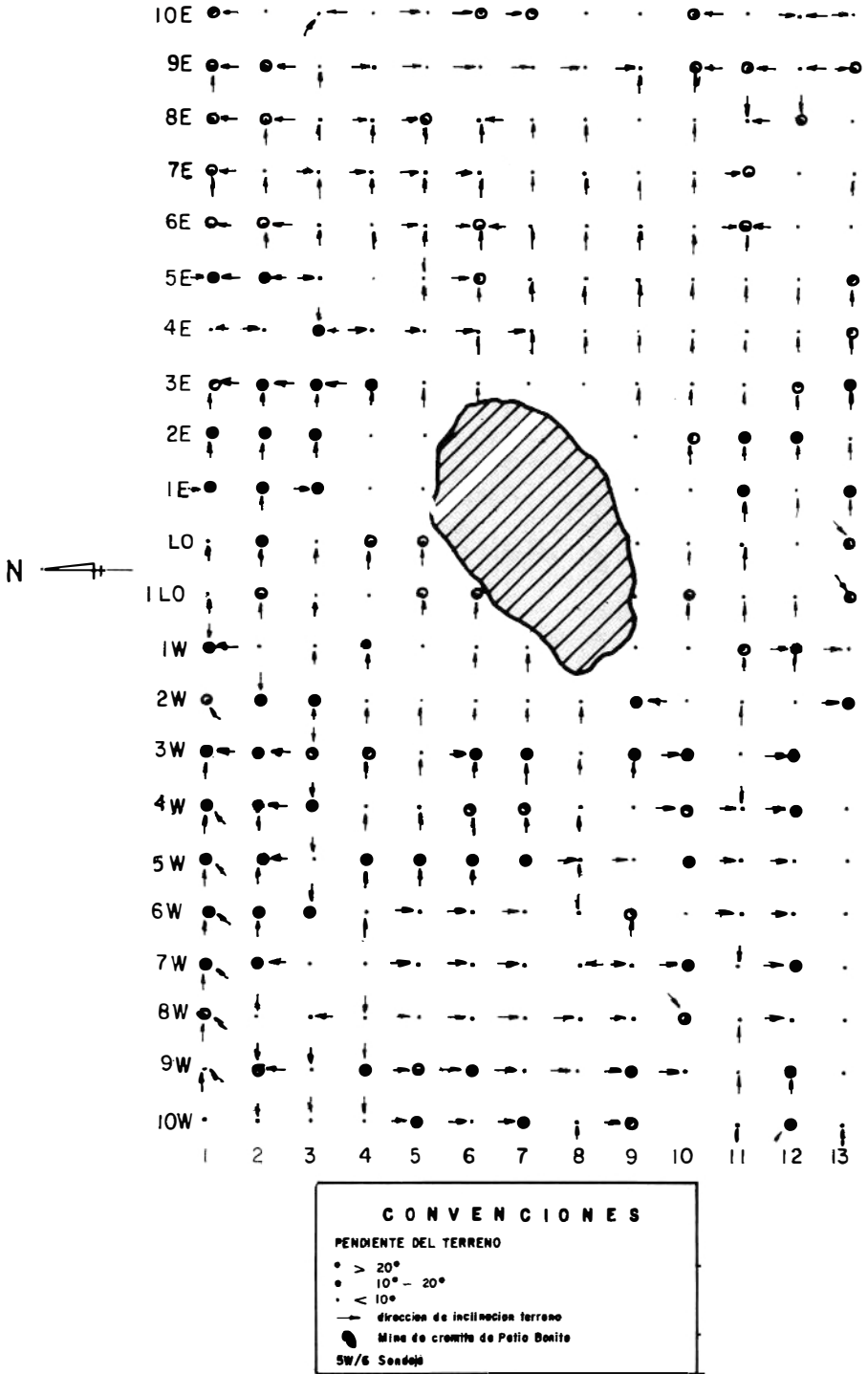


FIG. 2: Pendientes topográficas y ubicación de los sondeos. Area de Santa Elena.

con una profundidad que varió de 0.60 m a 2.50 m.

1.6.2. MUESTREO DE CONCENTRADOS DE BATEA

En cada una de las quebradas que drenan el cuerpo de ultramafita se recolectaron una o varias muestras de sedimentos fluviales activos, las cuales fueron sometidas al proceso de concentración por bateo manual. El distanciamiento entre muestras fluctuó entre 250 m y 500 m a lo largo del cauce de las quebradas. Asimismo, en cada sitio de muestreo el número de bateadas varió de una a tres dependiendo de la cantidad de concentrados.

1.7. METODOS DE LABORATORIO

Las determinaciones analíticas son semicuantitativas y fueron hechas por el ingeniero Darío Monsalve en un espectrógrafo Jarrell-Ash de 1,5 m montaje Wadworth, modelo 98 - 090. Las lecturas del espectro se efectuaron empleando un comparador visual de la misma marca.

Los patrones utilizados fueron preparados usando un factor de dilución de:

$$\sqrt[3]{10}$$

obteniéndose una serie de concentraciones cuyos valores se aproximan a los de la serie . . . 70; 50; 30; 20; 15; 10; 7; 5; 3; 2; 1.5; 1 . . .

Por este método, "la precisión se establece de acuerdo con el grado de variación de la serie de valores escogida para los patrones" (MONSALVE, 1979). La precisión de cualquier resultado se encuentra entonces, dentro de más o menos un intervalo en la serie de valores de los patrones con una probabilidad del 68% y dentro de más o menos dos intervalos con una probabilidad del 95%

A las muestras de suelo se les determinó el Eh - Ph usando un medidor Orion - 407A y para las determinaciones espectroquímicas se les sometió a un tratamiento ru-

tinario de secado, trituración y tamizado a malla 80. A los concentrados en batea se les estudió el contenido de Cr, Ni y Co tanto en la fracción fuertemente magnética (individualizada con imán de mano), como en la no magnética y débilmente magnética. A esta última fracción se le efectuó separación magnética de minerales claros y oscuros usando el separador isodinámico Frantz.

Los análisis realizados en cada una de las fracciones indicaron que los resultados cambian poco en la concentración de elementos como Ni, Co y Cr si la fracción no magnética es aproximadamente menor del 40%; si es mayor se diluyen las concentraciones. Por consiguiente, si la toma de muestras es correcta, en el ambiente geológico donde se desarrolló este estudio, debe contener menos del 40% de fracción no magnética, no justificándose ninguna separación. Toda la muestra, por lo tanto, se analizó espectrográficamente.

2. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

La unidad litológica mayor en el área está constituida por anfibolitas, con algunas intercalaciones y cuerpos menores de meta-sedimentos con metamorfismo de alto grado, en facies anfibolita, cuya edad posible es Paleozoica (BOTERO, 1963, Fig. 1). La dunita es un cuerpo alargado y de edad precretácea tardía, que se amplía hacia el sur. Principalmente en el sector central se han desarrollado sobre dicho cuerpo, cubiertas lateríticas residuales o transportadas de poca extensión. Tiene contactos cubiertos y en áreas locales donde se observa en contacto con las anfibolitas, son tectónicos. Dos batolitos granitoides cretácicos, el de Altavista y el Antioqueño, intruyen las rocas paleozoicas y un apófisis de este último se inyecta en el cuerpo ultramáfico (BOTERO, 1963). Una delgada capa de cenizas volcánicas andesíticas posiblemente recientes, cubre las rocas al oriente y noroccidente de Medellín.

2.1. OCURRENCIAS DE CROMITA

Varios depósitos podiformes de cromita se encuentran asociados con la dunita conformando una asociación que es característica en ultramafitas tipo alpino (THAYER, 1967). Los depósitos conocidos, los cuales han sido explotados, son de pequeñas dimensiones y sólo alcanzan a varias decenas de toneladas. Su ubicación dentro del cuerpo de dunita es dispersa y aparentemente no obedece a ningún control estructural (Fig. 1). El rumbo de las distintas ocurrencias es aparentemente concordante con el de la roca encajante. Como un hecho adicional e importante, se presentan a lo largo de todo el cuerpo de dunita, abundantes "riesgos" de cromita constituidos por fragmentos de centímetros a decímetros, los cuales indican la presencia de dicho mineral a profundidad en las áreas vecinas.

3. GEOQUIMICA

En el estudio de la saprolita se investigó la distribución de Cr, Co, Ni. Estos mismos elementos fueron analizados en las muestras de sedimentos fluviales, concentrados por bateo.

3.1. DISTRIBUCION DE CROMO, NIQUEL Y COBALTO EN LA SAPROLITA DERIVADA DE DUNITA, AREA DE SANTA ELENA

Como se mencionó antes, se hicieron manualmente 272 sondeos los cuales se profundizaron hasta cuando se encontró saprolita típica producto de la meteorización química "in situ" de las dunitas. El color de dicho material es gris claro a gris verdoso y en él se identifican a menudo los rasgos de la roca original. Sin embargo, cuando existe abundante agua freática y el nivel de ésta afecta, ya sea la parte superior de la saprolita o la inferior de las cenizas volcánicas ocasionando argilización y oxidación en diversos grados, se hace difícil diferenciar en cortos intervalos de perforación las unidades antes dichas. Una situación similar puede ocurrir si existe alguna capa laterítica delgada o incipiente.

Con el fin de conocer en detalle las variaciones en Cr, Ni y Co en los diferentes horizontes de suelo en las cenizas y en la zona meteorizada de la dunita infrayacente, se muestrearon a todo lo largo de su longitud los sondeos LO y 1LO. En dichos sondeos solamente se tomaron muestras cuando se observaron cambios en el color del material. En todos los demás sondeos se llegó directamente al tope de la zona saprolítica de la dunita donde se obtuvieron las muestras correspondientes.

Para saber con certeza las concentraciones normales (o de background) de Cr, Ni y Co en la saprolita, se hizo una línea adicional (AA.) de 12 sondeos en dirección oeste-este, en la parte oriental del cuerpo de dunita y alejados de cualquier ocurrencia conocida de cromita (Fig. 1). Los sondeos se ubicaron de tal manera que 6 de ellos quedaron sobre el cuerpo ultramáfico, de acuerdo a los contactos conocidos (BOTERO, 1963), y el resto sobre las anfibolitas.

3.1.1. CROMO

Las rocas ultramáficas y entre éstas las dunitas, se caracterizan por tener concentraciones promedias en cromo más altas que los demás tipos de rocas, alcanzando un valor de 2.000 ppm (VINOGRADOV, 1962). Sin embargo, las dunitas de Medellín poseen un valor promedio menor que el anotado, alcanzando 1400 ppm.

En el área de Santa Elena, las concentraciones en dicho elemento son notoriamente diferentes entre la cubierta de cenizas volcánicas andesíticas y la saprolita derivada de la dunita, como puede notarse en el contraste de valores de los perfiles verticales de los sondeos de las líneas LO y 1LO (Fig. 3). Una situación similar se presenta con respecto a la distribución de níquel y cobalto.

Si se observan los valores obtenidos en las muestras de los sondeos del perfil AA (Fig. 4), se encuentra que la concentración normal del cromo en la saprolita de la dunita es aparentemente de 7.000 ppm. Este valor baja sustancialmente en las anfibolitas fluc-

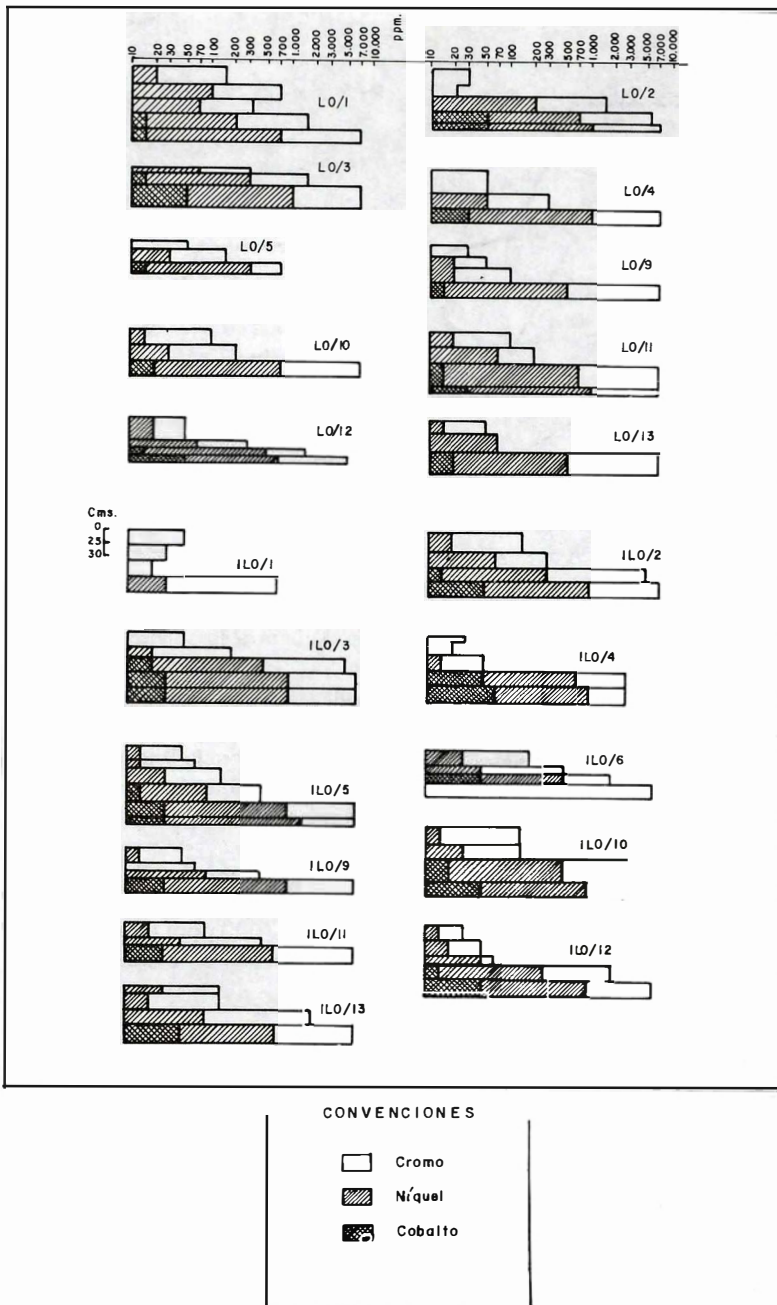


FIG. 3: Concentración de cromo, níquel y cobalto en los sondeos de las líneas LO y 1LO. Area de Santa Elena. Se incluyen los valores en la cubierta de cenizas volcánicas.

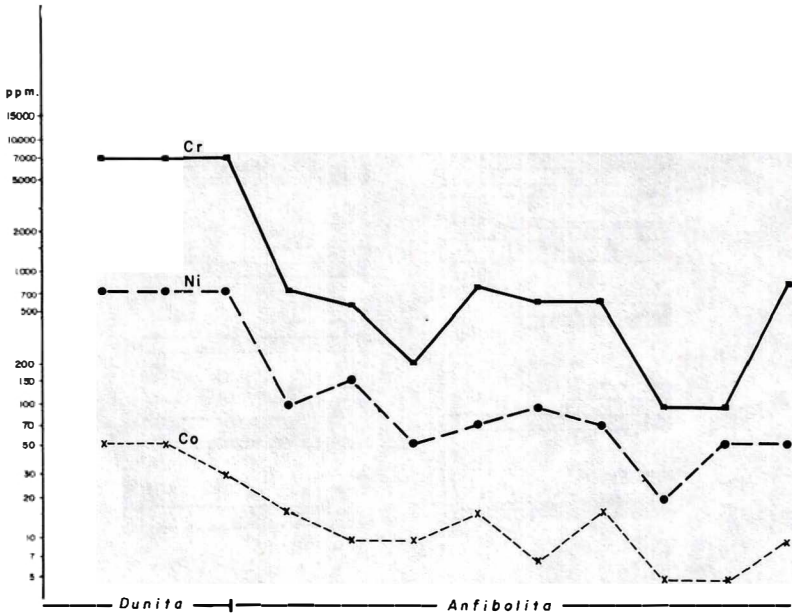


FIG. 4: Concentración de Cr, Ni y Co en las muestras de saprolita de los sondeos del perfil A.A.

tuando entre 100 y 700 ppm. Un comportamiento parecido se presenta para el Ni, Co (Fig. 4), y para algunos óxidos de elementos mayores, tales como el MgO y el TiO₂, que varían en la forma siguiente:

Saprolita de dunita: Saprolita de anfibolita:

MgO	15% - 25 %	0,4% - 5,9%
TiO ₃	0,7 % - 1,1%	1,3 % - 4,4%

Utilizando el fuerte contraste entre los valores anotados, fue posible corregir el contacto reportado por Botero (1963) entre ambos tipos de roca.

Tanto en el cálculo de la distribución de frecuencias acumulativas (Fig. 5), como en el histograma (Fig. 6), se escogieron como intervalos de clase, las concentraciones correspondientes a la escala de valores del método espectrográfico semicuantitativo utilizado. Este hecho conduce a un exceso de algunos de los valores y falta de otros, lo que

conlleva a una necesaria extrapolación durante la construcción de la curva de distribución de frecuencia y la consiguiente imprecisión en la obtención de los parámetros estadísticos.

El histograma del cromo tiene una distribución asimétrica negativa con un valor modal de 7000 ppm que es igual a la concentración normal de dicho elemento en el perfil AA.

La línea de distribución de frecuencias acumulativas (Fig. 5), tiene un quiebre negativo en el nivel 85% lo que sugeriría la posible existencia de dos poblaciones. Asimismo, los valores bajos alcanzan un 15% por lo tanto se puede utilizar la parte de la línea de distribución con quiebre negativo (valores altos) para el cálculo de los parámetros estadísticos convencionales. Hecho en esta forma el valor normal (background), calculado como el valor de la abscisa en el punto de intersección de la línea de distribu-

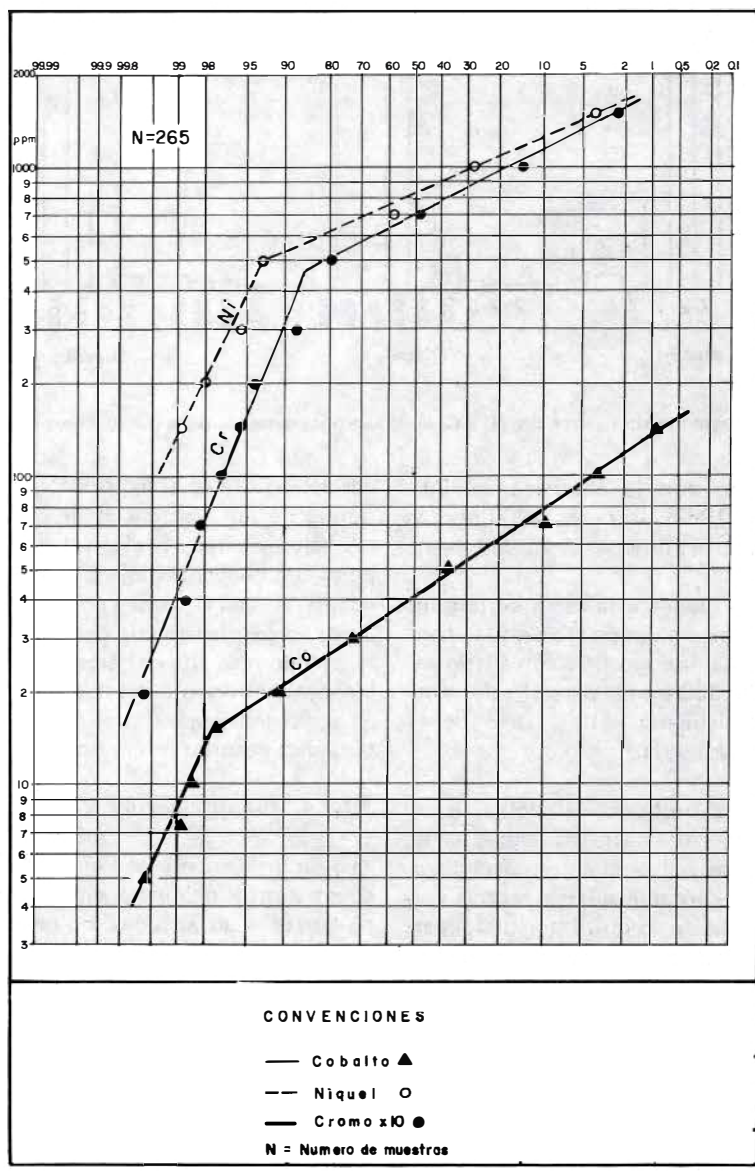


FIG. 5 Distribución de la frecuencia acumulativa en cromo, níquel y cobalto en la saprolita de dunita del área de Santa Elena.

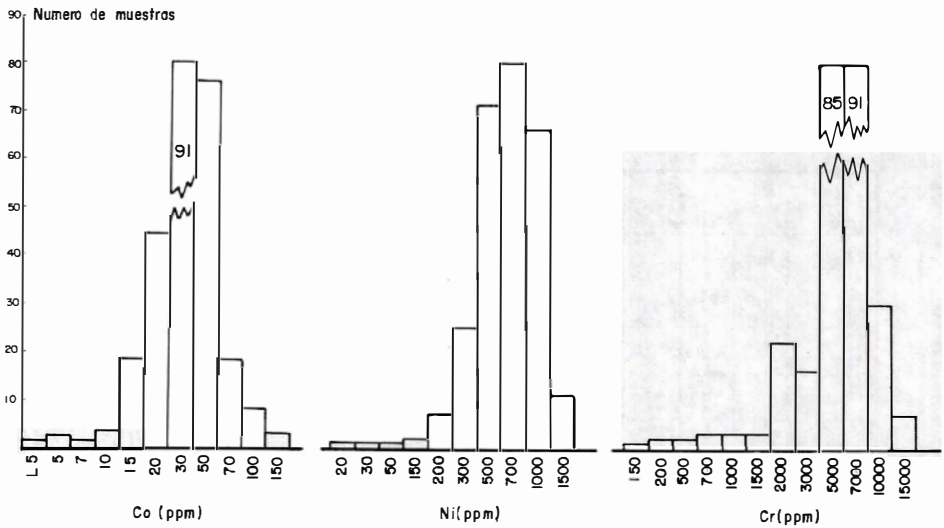


FIG. 6: Histogramas de valores Co, Ni y Cr en la saprolita derivada de la dunita. Area de Santa Elena.

ción del cromo con la ordenada del 50% (LEPELTIER, 1969), sería de 7.000 ppm y el valor umbral (threshold), 15.000 ppm.

Si se prolongara la recta correspondiente a los valores bajos en cromo (pendiente suave), daría una concentración altísima e irregular (> 20.000 ppm), para el valor normal. Por consiguiente esta parte de la recta no debe ser usada.

La causa probable del doblamiento en la recta lognormal hacia los valores bajos, definiéndose dos poblaciones, no está clara; podría ser por contaminación o mezcla con material piroclástico, o quizá por una repartición no homogénea e irregular del cromo en unas zonas con concentración relativamente normal y en otras con contenidos bajos. En algunos casos tampoco se descarta que pudiera haber un mal muestreo por una identificación errónea de la zona a muestrear.

En la saprolita los valores más altos de cromo son 2 veces el valor modal (7.000 ppm), y se localizan en el sector noroccidental del área. (Fig. 7). Valores un poco menores (1.5 el valor modal), se ubican al oriente

del depósito y en el sector antes dicho. En el rumbo de las ocurrencias de cromita todos los valores están en el nivel normal (7.000 ppm), de concentración. Los valores relativamente ricos en Cr tienen contornos que coinciden aproximadamente con la zona topográficamente más alta del área (Fig. 7), en cambio hacia el oriente del depósito de cromita en zonas más bajas, no se presentan concentraciones notorias en cromo.

3.1.1.1. Interpretación.- El Cr^{3+} es un elemento que reemplaza isomórficamente al Fe^{3+} y Al^{3+} y se encuentra principalmente en el grupo espinel en las rocas ultrabásicas. En las dunitas ocurre como cromita principalmente, ya sea finamente diseminado en la roca, formando concentraciones de algún interés económico o reemplazando al hierro en la magnetita. La cromita es un mineral resistato y por lo tanto, su dispersión secundaria está controlada por factores físicos principalmente.

En épocas anteriores a la deposición de la cubierta volcánica, se desarrollaron posiblemente suelos lateríticos residuales sobre el cuerpo de dunitas; sin embargo, las condiciones imperantes parece que no fueran

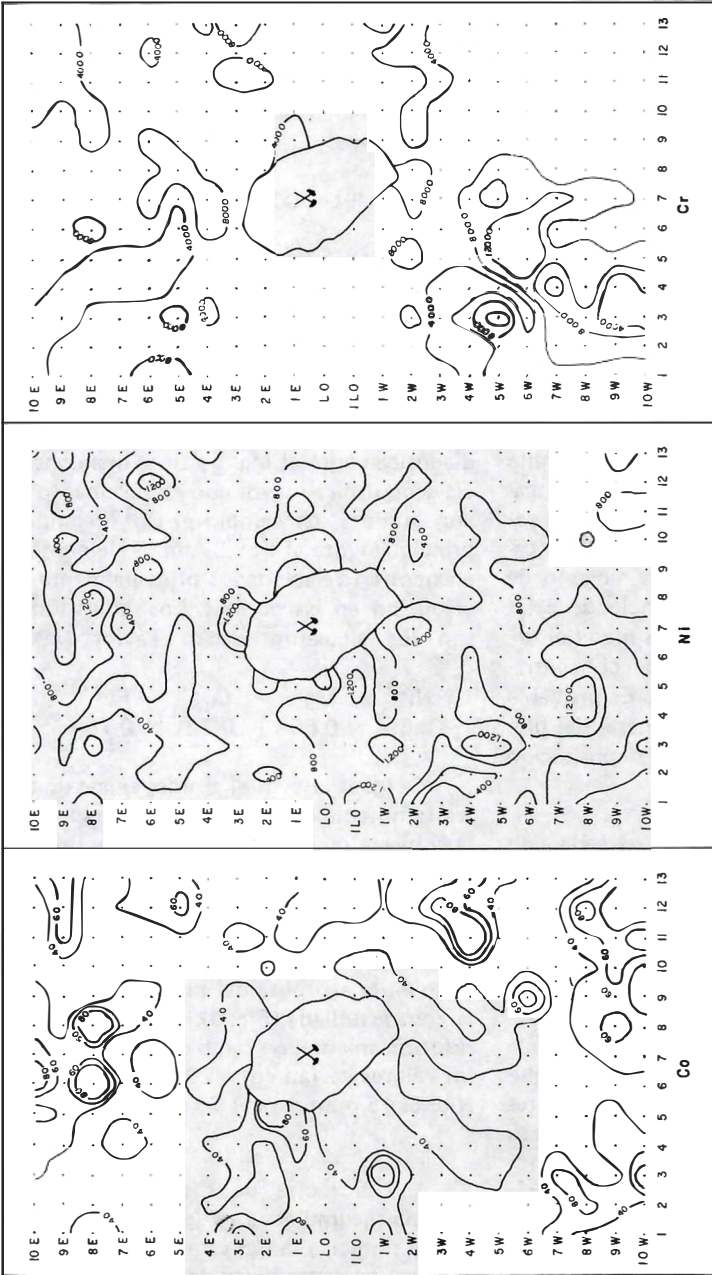


FIG. 7: Distribución de Cobalto, Niquel y Cromo en saprolita de dunita. Area de Santa Elena

lo suficientemente favorables para que su espesor tuviera alguna importancia o dichos suelos fueran erodados. Este hecho fue corroborado por los sondeos, puesto que en ellos no se encontró una clara cubierta laterítica bajo las cenizas y encima de la saprolita, aunque algunos valores de cromo en los análisis podrían sugerir su presencia y quizá mezcla con cenizas. Concomitantemente es probable que se hayan formado "riegos" de cromita sobre los depósitos de este mineral y que los granos diseminados del mismo en las dunitas fueran liberados. En el mapa de curvas de isoconcentración (Fig. 7), la ubicación de los valores "altos" de cromo hacia una zona situada al noroccidente del depósito, topográficamente más alta que éste, y la ausencia de los mismos hacia áreas más bajas situadas al oriente del depósito, sugiere tentativamente que no existió dispersión clástica de granos de cromita con movimientos pendiente abajo, que ocasionaran la formación de concentraciones coluviales sobre la pendiente o aluviales en canales de drenaje. De hecho, en ninguno de los sondeos se observó, infrayaciendo a las cenizas, alguna capa o lente de material detrítico de cromita producto de concentración residual o por transporte. Es probable que un incipiente desarrollo general del drenaje haya existido antes de la depositación de las cenizas.

La erosión en el área muestreada, con posteridad a la depositación de las cenizas, aparentemente no ha sido intensa. El drenaje es principalmente subterráneo. En cambio, en áreas vecinas mejor drenadas, las quebradas corren directamente sobre la dunita.

El hecho de que los minerales de cromo en estado trivalente sean muy insolubles y que probablemente sólo a altos valores de pH se produzca un cambio limitado en su estado de oxidación, con formación de cromatos (GOLDSCHMIDT, 1958), excluiría los procesos de meteorización química con formación de dichas sales, como factores de alguna importancia en el área estudiada, ya que el pH determinado en la saprolita varía de 3,7 a 4,7. De acuerdo con lo anotado antes, los valores "altos" en cromo en la sapro-

lita reflejarían probablemente la distribución primaria del mismo en la dunita, en la cual estaría formando cromita principalmente y quizás en parte incorporado en la magnetita. Ambos óxidos se concentrarían con los inatacados como granos detríticos. El factor de enriquecimiento sería de 7 a 11 con respecto a la concentración promedia de Cr en las dunitas de Medellín, determinada por métodos cuantitativos.

3.1.2. NIQUEL Y COBALTO

El níquel y cobalto, son elementos siderófilos cuya abundancia promedia en rocas ultrabásicas es de 2.000 ppm y 200 ppm respectivamente (VINOGRADOV 1962). En las dunitas de Medellín los valores promedios son de 2800 ppm y 130 ppm para los elementos antes anotados. El Ni^{2+} reemplaza diadósicamente el Mg^{2+} y tiene una coherencia geoquímica mayor con este elemento que con el Fe^{2+} , en cambio el Co^{2+} reemplaza principalmente al Fe^{2+} . Ambos elementos se encuentran relacionados principalmente con el olivino en las dunitas. Los radios iónicos son los siguientes según Taylor (1965):

Ni^{2+}	Mg^{2+}	Co^{2+}	Fe^{2+}
0.69Å	0.66Å	0.72Å	0.75Å

Igual que en el cromo, existe un contraste notable en Ni y Co entre la saprolita y la cubierta piroclástica andesítica y una buena correlación positiva entre dichos elementos (Fig. 3).

Las concentraciones normales de Ni y Co en la saprolita del perfil A.A al este de la zona estudiada (Fig. 4), son 700 y 50 ppm respectivamente; en cambio en las anfibolitas los valores varían entre 20- 150 ppm para el Ni y 5- 15 ppm para el Co (Fig. 4).

Las rectas de distribución de frecuencia acumulativa (Fig. 5), tienen una forma similar a la del cromo, lo cual podría sugerir una causa parecida para la pendiente suave en la parte superior de las mismas.

El valor modal de la concentración

de níquel y cobalto en la zona saprolítica es de 700 y 30 ppm respectivamente, iguales al valor de la correspondiente media aritmética obtenida, acercando el promedio al valor más próximo en la lectura del espectrógrafo, lo cual es un reflejo de la poca dispersión de los datos. Obteniendo los valores normal y umbral de las rectas de distribución de frecuencia acumulada (Fig. 5), dan para el Ni 800 ppm y 1600 ppm y para el Co 40 ppm y 120 ppm respectivamente. La diferencia con los valores modales de los histogramas se debe precisamente al agrupamiento de los valores de acuerdo a los intervalos de lectura del espectrógrafo.

En los mapas de isoconcentración (Fig. 7), la distribución de los valores altos de Ni y Co equivalentes a más de 2 veces los respectivos modos, es relativamente heterogénea; sin embargo en el sector noroccidental se observa homogeneidad en el primer elemento mencionado coincidiendo parcialmente con las más altas concentraciones de cromo. Asimismo, la relación Ni/Co es mayor en el sector anotado, en cambio Cr/Ni es baja y se incrementa a valores altos hacia el sector oriental. De hecho, la constancia relativa de cualquiera de las razones mencionadas podría señalar un comportamiento relativo parecido en los respectivos elementos.

Es importante hacer notar que en las vecindades del depósito de cromita, los valores para Ni y Co son bajos con excepción de unos pocos valores altos cuya ubicación no es coincidente para ambos elementos.

3.1.2.1. Interpretación.- En el ciclo geoquímico exógeno, el Ni y el Co son elementos relativamente móviles bajo condiciones ácidas, como las imperantes en la saprolita procedente de la dunita en el área de Santa Elena, cuyo pH varía entre 3,7 y 4,7. Comparando los contenidos de Ni y Co con el promedio en las dunitas de Medellín, se observa que ambos elementos han sido lixiviados en mayor o menor grado (Fig. 7).

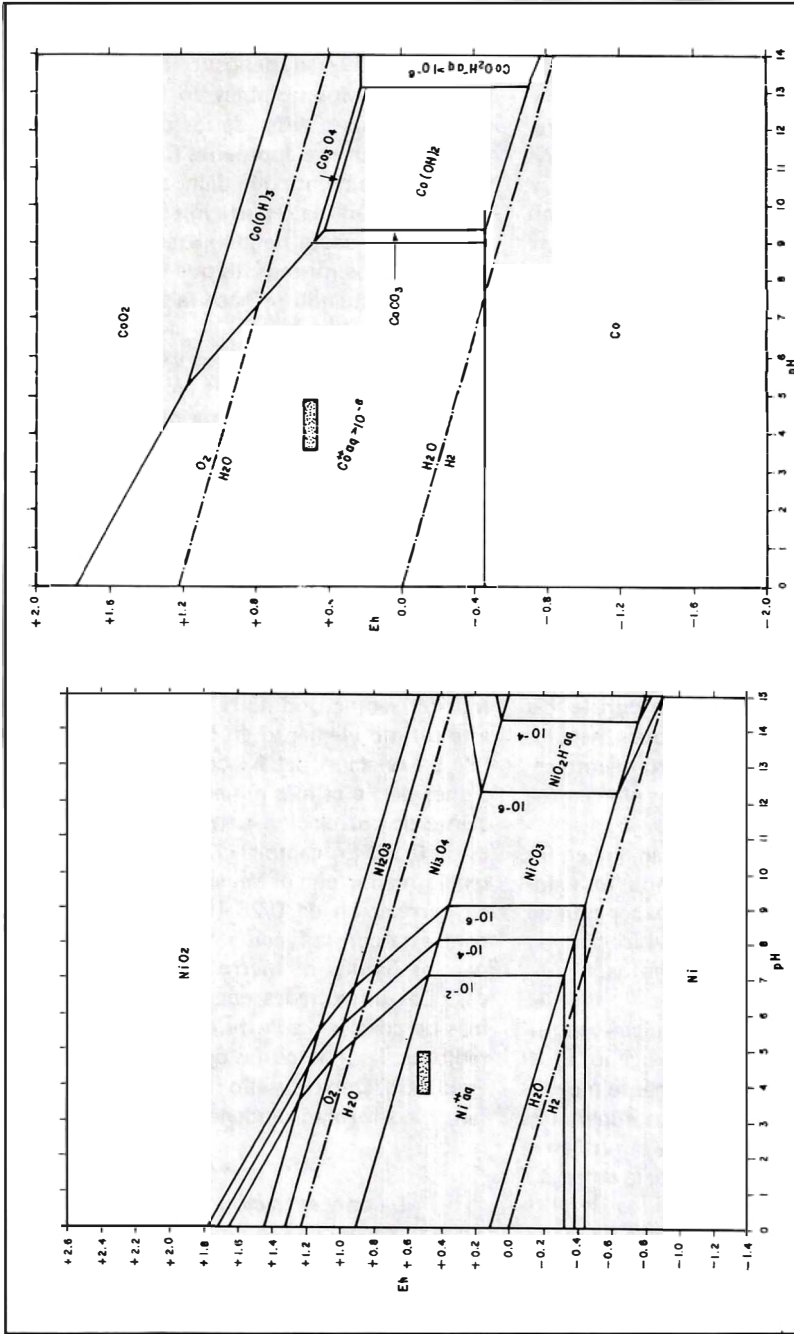
En un diagrama Eh-pH, bajo condiciones estandar, el campo determinado por

las diversas muestras se ubica en la parte de níquel y cobalto solubles (Fig. 8).

La distribución de las isoconcentraciones para Ni y Co (Fig. 7), sugiere que en las vecindades del depósito de cromita no existen cambios notables en la mineralogía primaria, que, a pesar de los procesos supérgenos, den lugar a anomalías positivas o negativas. Naturalmente que dichos procesos pueden enmascarar la repartición primaria de los elementos a causa de la lixiviación y redistribución de los mismos, lo que constituye una desventaja cuando se hace la interpretación.

Buena parte de los valores altos en Co se encuentran situados en zonas de muy bajo relieve o relativamente planas y relacionadas en gran parte con altas concentraciones en Fe y en parte de Mn. El coeficiente de correlación existente entre Co y Fe es de 0,46, que puede considerarse como bueno, si se tiene en cuenta que los análisis químicos son semicuantitativos. La correlación entre Co y Mn es menor teniendo un valor de 0,23 (Fig. 9). El níquel presenta altos valores, coincidentes con los del Co, en la parte central del sector oriental e independientes de este último elemento en la zona noroccidental. La relación del Ni con altas concentraciones de Fe es más o menos clara y el coeficiente de correlación entre ambos elementos es de 0,36. En cambio el Ni tiene una coherencia menor con el Mn siendo el coeficiente de correlación de 0,25 (Fig. 9). Este hecho contrasta con la fijación muy limitada del Ni por los óxidos de hierro en perfiles lateríticos. Las dificultades encontradas en diagramas de covarianza entre el Co, Mn y Ni - Fe radica en la imprecisión del método analítico empleado. Debido a ello los puntos se dispersan, y no forman tendencias claras de correlación.

La concentración local de Co y Ni en algunas zonas, ya sea en uno de los elementos o los dos, en comparación con áreas vecinas, podría deberse a la lixiviación en diferentes grados de Co y Ni en la saprolita y su transporte como iones solubles por aguas subterráneas, hacia lugares de topografía relativamente plana. Dichos iones podrían ser



CONVENCIONES
 [] Campo de las muestras analizadas.

FIG. 8: Relaciones de estabilidad entre algunos minerales de Ni y Co en agua a 25°C y 1 atmósfera de presión total. Para Ni, $PCO_2 = 10^{-4.9}$; para Co, total de especies carbonatadas disueltas $= 10^{-4.9}$ (GARRELS Y CHRIST, 1965) El área punteada corresponde a la ubicación de las muestras de saprolita de Santa Elena.

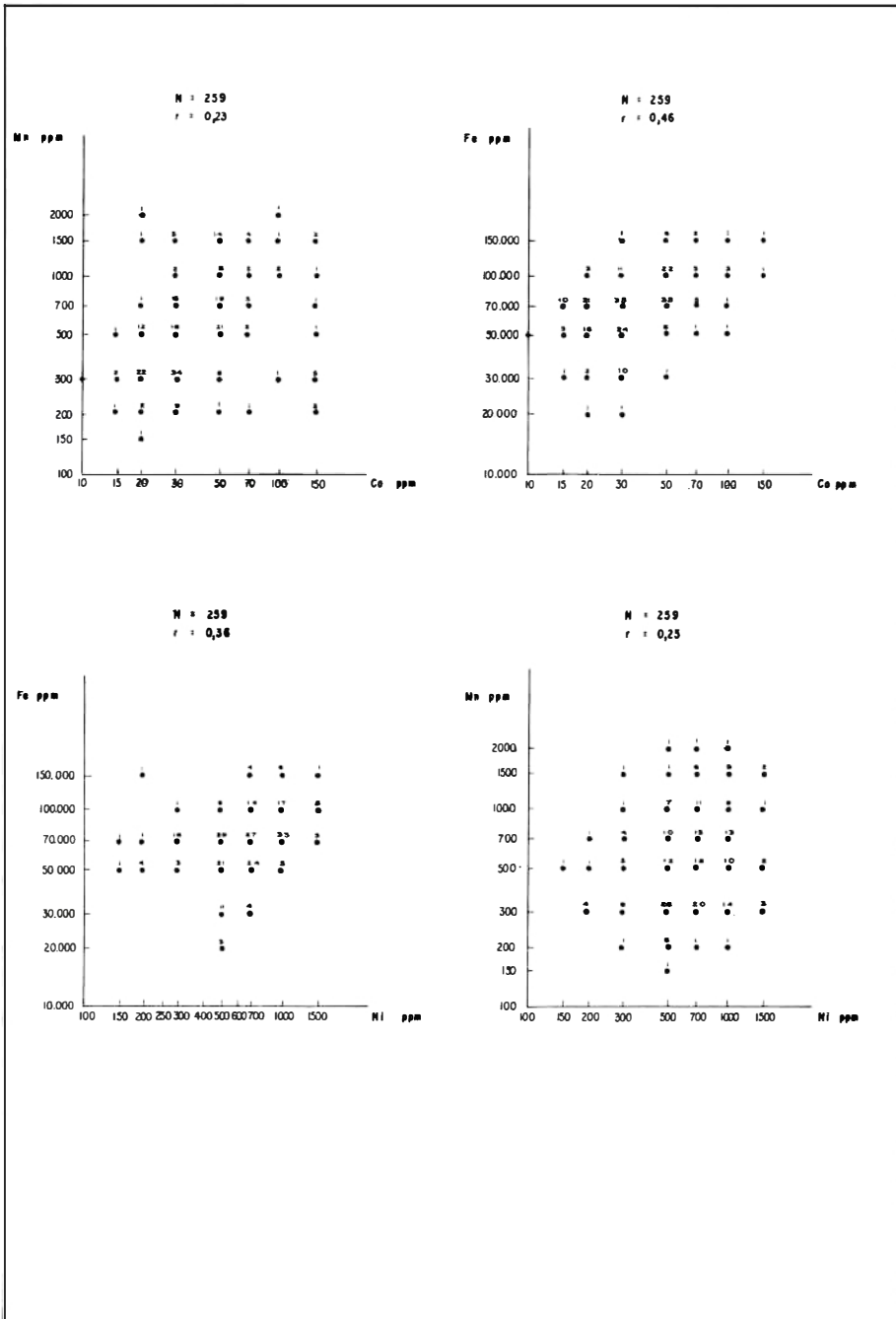


FIG. 9: Diagramas de correlación Co - Fe, Co - Mn, Ni - Fe, Ni - Mn en muestras de saprolita derivada de dunita del área de Santa Elena. El número sobre el punto indica la cantidad de muestras, $r =$ coeficiente de correlación $N =$ número total de muestras.

captados por minerales arcillosos y coloides hidratados de óxidos de hierro y manganeso a causa de la capacidad sortiva de dichos óxidos. En el análisis por difracción de rayos X, la existencia de material arcilloso tipo caolinita o montmorillonita es dudosa, por lo tanto la segunda posibilidad parece ser la más aceptable. Bajo las condiciones imperantes de Eh-pH en el área de estudio tanto el óxido de Fe como el de Mn serían estables. Asimismo, es posible que algún porcentaje de Ni y Co haya sido lixiviado de las cenizas y transportado por las aguas de infiltración.

Otra posibilidad para la existencia de zonas con valores relativamente altos en Ni y Co pero con contenidos por debajo de valor promedio en dunitas, puede ser simplemente la lixiviación preferencial de algunos sectores de la saprolita con respecto a otros. De todas maneras, la saprolita no muestra enriquecimiento en Ni por precipitación de garnierita, fenómeno que se presenta en depósitos de lateritas níquelíferas.

Los altos valores de la relación Cr/Ni fluctuando de 27 a 33 y la relativa homogeneidad de los mismos en todo el sector oriental del área, en donde para ambos elementos las concentraciones son normales, podrían sugerir la influencia de la paleotopografía de la dunita, esencialmente coincidente con la topografía actual, del drenaje y del pH. En efecto, el cromo hace parte de minerales estables y resistentes a reacciones químicas como son la cromita y magnetita, en este último mineral como un elemento traza, y el níquel es un elemento soluble y más móvil; por lo tanto el Cr se enriquece con relación al Ni.

La meteorización química es más activa e intensa en terrenos más o menos planos por mayor permanencia de las aguas superficiales y subterráneas; en estas condiciones la dispersión de los productos solubles es esencialmente hidromórfica.

Las razones más altas de Ni/Co, que varían de 30 a 75, coinciden con los valores altos de Cr y Ni. Este hecho podría deberse a varios factores, tales como el mayor enrique-

cimiento de los silicatos máficos primarios en níquel y/o a reacciones de intercambio iónico con óxidos hidratados principalmente de Fe. No obstante, la existencia de los valores altos en Ni en una zona relativamente pendiente con respecto al resto del área, donde la meteorización es lenta, podría sugerir que el primer factor es más posible.

3.2. CROMO, NIQUEL Y COBALTO EN LOS CONCENTRADOS EN BATEA

Como se anotó anteriormente, el drenaje en el área donde aflora la dunita es inapropiado para realizar un buen muestreo. Buen porcentaje de las quebradas cortan el cuerpo de dunita en las partes marginales del mismo y algunas de ellas, especialmente las situadas en los sectores central y sur del cuerpo, solo contienen agua en épocas de invierno. El muestreo más sistemático se llevó a cabo en la quebrada Las Palmas que forma una red de drenaje aceptable en el extremo sur de la dunita. Algunas de las muestras se tomaron en drenajes ubicados en la anfibolita, roca que encaja a la dunita, con el fin de observar el contraste en el contenido en Cr, Ni y Co entre ambas rocas.

En 21 quebradas se recolectaron 52 muestras de minerales pesados obtenidos mediante concentración por batea de los sedimentos arenosos comúnmente ricos en guijarros, las cuales se analizaron para cromo, níquel y cobalto (Figs. 10, 11).

3.2.1. RESULTADOS

La dispersión del cromo como granos detríticos es esencialmente clástica. En los sedimentos procedentes de la dunita, el cromo se encuentra principalmente en los resistentes (magnetita y cromita). La magnetita tiene un contenido en cromo superior a 100.000 ppm, el níquel varía de 700 a 1500 ppm y el cobalto no pudo determinarse por problemas de interferencia del cromo y titanio. El níquel y el cobalto, además de hallarse en parte en éstos, se encuentran también en los ferromagnesianos (olivino). Los análisis espectrográficos semicuantitativos realizados en las fracciones magnéticas y no

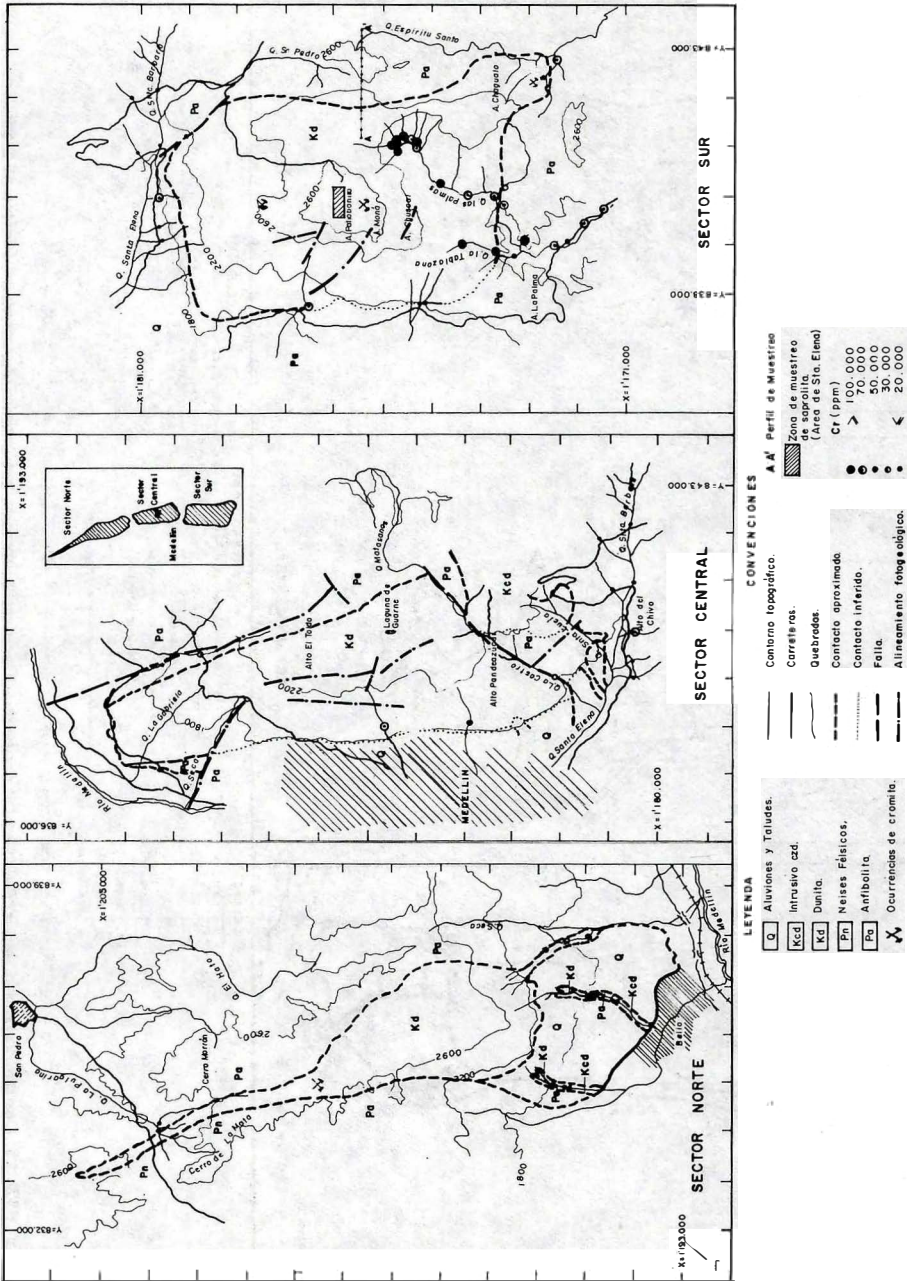


FIG. 10: Contenido de Cromo en los concentrados de las quebradas que drenan el cuerpo de dunitas de Medellín.

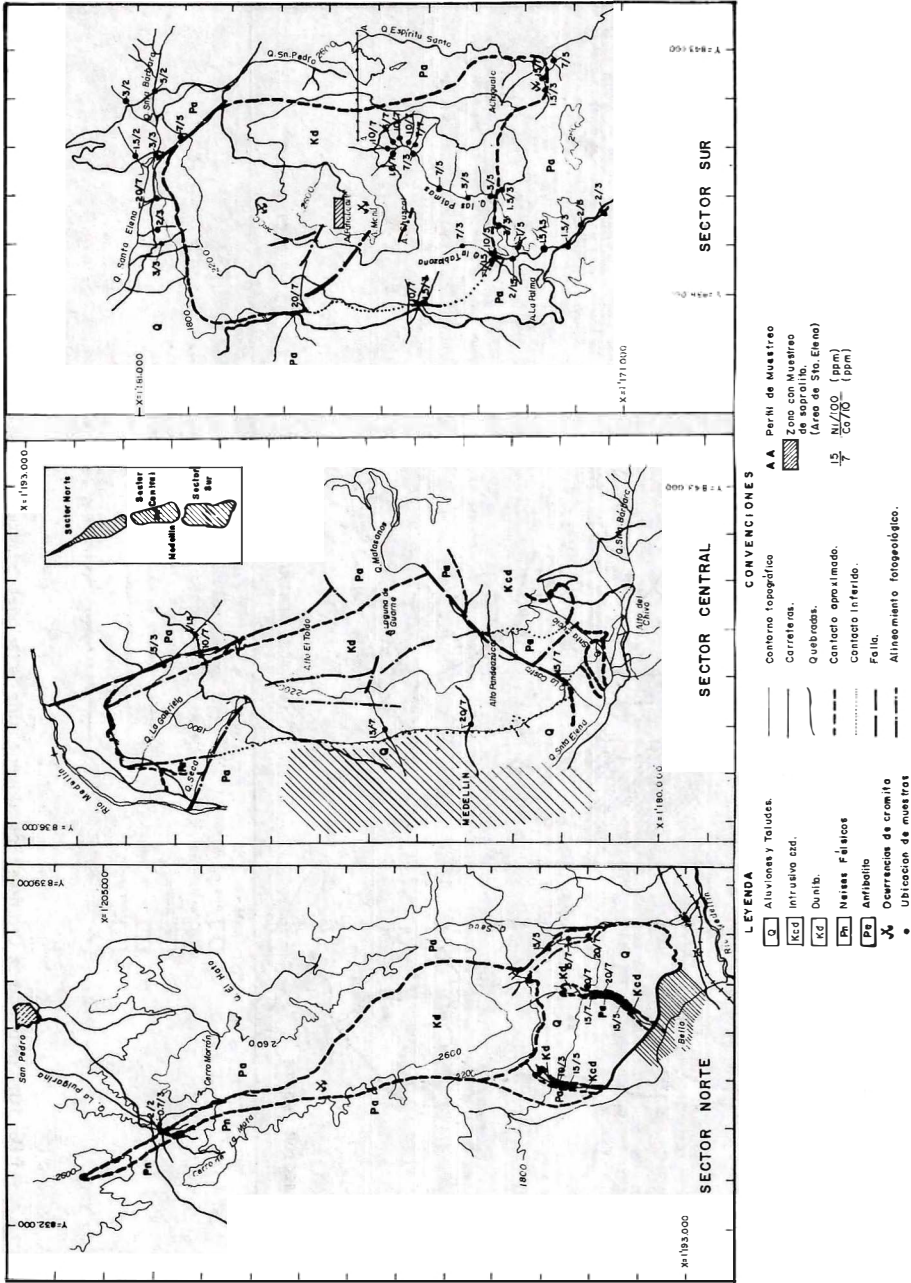


FIG. 11: Contenido de níquel y cobalto en los concentrados de las quebradas que drenan el cuerpo de dunitas de Medellín.

magnéticas, con porcentajes de esta última fracción variando entre 5 y 80%, indican preliminarmente que el Ni está repartido más uniformemente en ambas fracciones, en cambio el Co muestra una concentración preferencial en la fracción magnética.

Los histogramas de la Figura 12 se hicieron considerando todas las muestras, es decir, los concentrados provenientes de la dunita y de las rocas encajantes de la misma. En ellos se observa que el cromo especialmente y un poco menos el níquel, tienen una amplia dispersión de los valores, fenómeno que no sucede con el cobalto. En las curvas de frecuencia acumulativa de la Figura 13, se ve claramente la influencia de los concentrados derivados de varias unidades litológicas, por los quiebres frecuentes en las curvas. Sin embargo, a un nivel del 7% se presenta para el cromo un quiebre equivalente a valores mayores de 100.000 ppm que podrían considerarse como anómalos.

En general, la alta dispersión de los valores de cromo puede deberse a varias causas tales como un muestreo deficiente por inexistencia de un drenaje apropiado, falta de homogeneidad en el mismo y posiblemente influencia de factores geomorfológicos difíciles de evaluar en este trabajo. La configuración del sistema de drenaje, con corrientes de diferentes pendientes, puede influir sobre la concentración de cromita (cromita) sobre la roca base. Sin embargo, en las muestras recolectadas, las diferencias en la pendiente de las quebradas no parece influir mayormente en los valores de Cr, Co y Ni (Figs. 10, 11).

Dentro del cuerpo de dunita los valores de cromo en los concentrados varían de 3% a más de 20%, descendiendo drásticamente en la anfíbolita, en cambio en Ni y Co la variación litológica no se manifiesta con claridad, muy seguramente a consecuencia del muestreo escaso y poco uniforme. Los valores mayores de 50.000 ppm en Cr, 1500 ppm en Ni y 50 ppm en Co corresponden esencialmente a concentrados derivados de zonas donde aflora dunita (Figs. 10, 11).

Las cantidades de Ni y Co en las muestras tienen una correlación positiva con dispersión aceptable si se considera que los análisis son semicuantitativos; en cambio no existe correlación entre Ni - Cr y es muy pobre entre Co - Cr (Fig. 14).

La covarianza Ni - Co sugiere que dichos elementos pudieron seguir una trayectoria geoquímica similar en el ciclo de meteorización y que ambos no están relacionados durante la dispersión secundaria de la cromita, es decir, no se encuentran incorporados como era de suponer, en la estructura cristalina de la misma. Probablemente se hallan en la magnetita, en silicatos ferromagnesianos (olivino) o en granos ricos en óxidos hidratados de hierro. La relación con estos últimos es obvia en las muestras recolectadas en las corrientes que drenan áreas donde se presenta cubierta laterítica, tal como sucede al norte de la población de Bello y en otros sitios a lo largo del cuerpo de dunita; estas muestras tienen un contenido de Ni y Co comúnmente mayor que las demás (Fig. 11).

Las concentraciones más altas en cromo están localizadas en las cabeceras de la quebrada Las Palmas y en el tributario de ésta que nace en el Morro La Tablazona (Fig. 10). En la quebrada Las Palmas se observaron abundantes guijarros y guijos de cromita dentro de los rodados. Las cuencas respectivas de captación, aguas arriba de las muestras anómalas, tienen una superficie aproximada de 1.0 y 0.5 km² respectivamente. Los valores altos y anómalos (Fig. 10), están situados en el sector sur del cuerpo dunitico y no corresponden a ninguna ocurrencia conocida de cromita, aunque dicha zona está caracterizada por yacimientos podiformes de dicho mineral.

En la quebrada Las Palmas se observa la dispersión lineal de los valores de cromo (Fig. 10). Estos no descienden notoriamente al ocurrir el cambio litológico de dunita a anfíbolita. Así, aún a 2 km del contacto la concentración de cromo es 1/3 de los valores máximos hallados en las cabeceras de dicha quebrada.

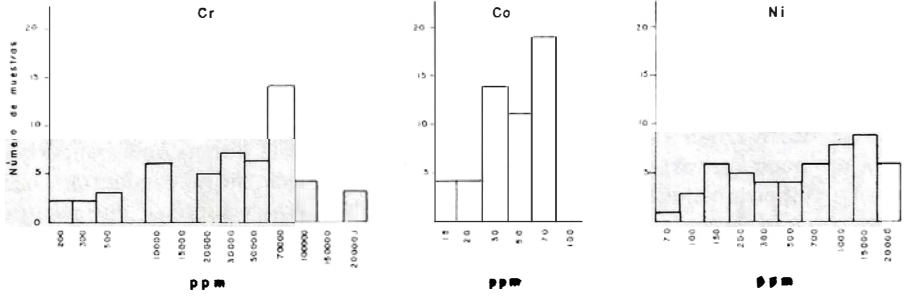


FIG. 12: Histogramas de contenidos de Cr, Co y Ni en los concentrados en batea provenientes de corrientes que drenan la dunita y las rocas encajantes de la misma.

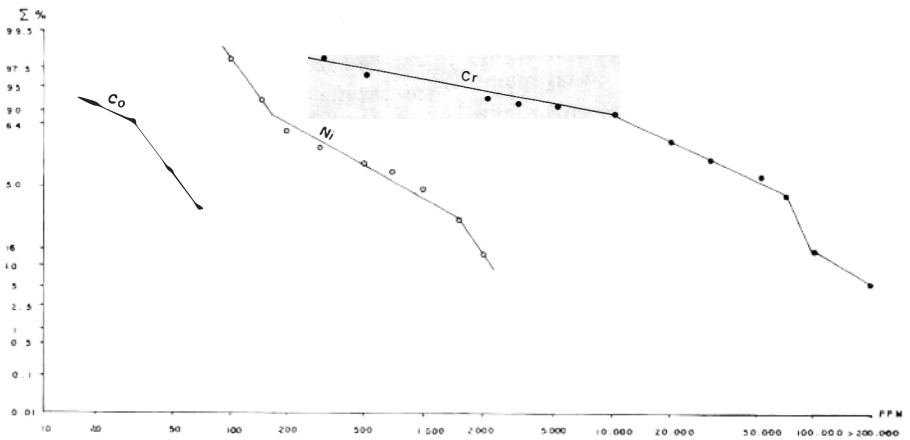


FIG. 13: Distribución de la frecuencia acumulativa en cromo, cobalto y níquel en los concentrados en batea de la dunita de Medellín y de las rocas encajantes.

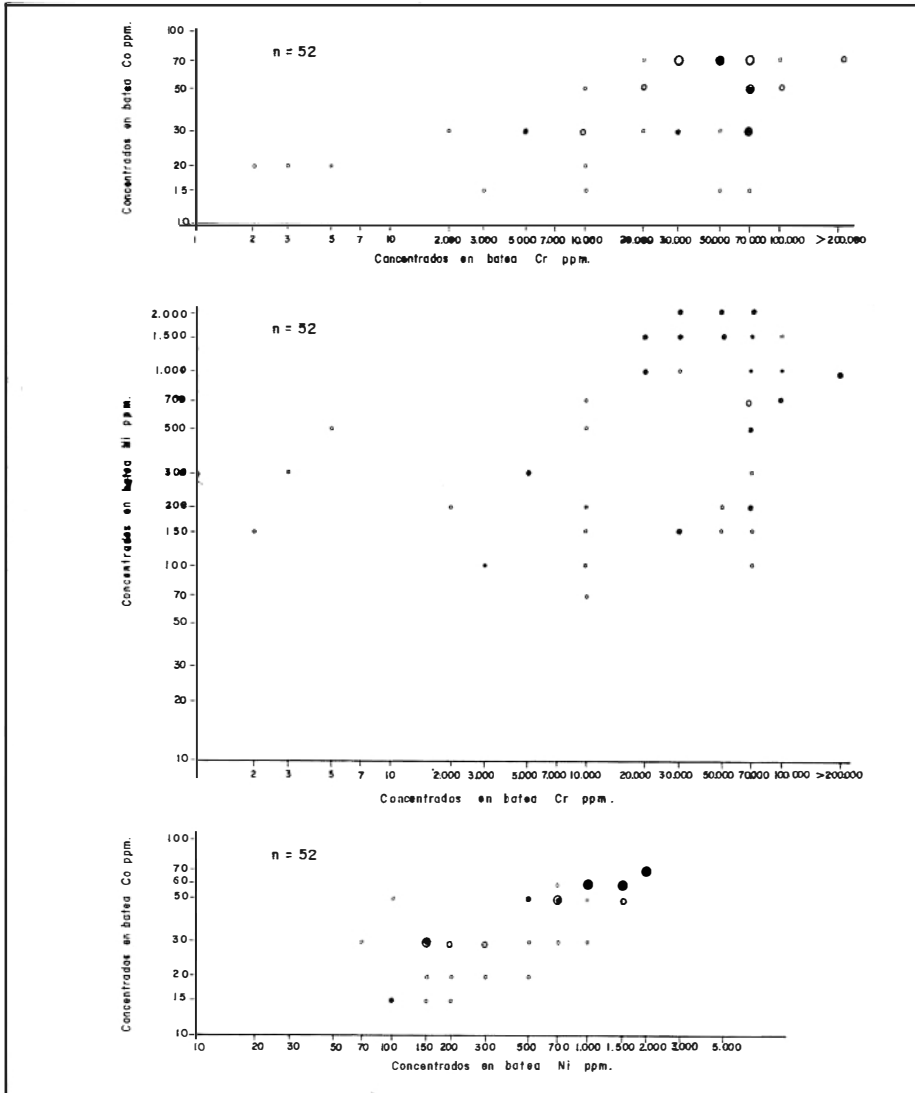


FIG. 14: Diagramas de dispersión mostrando la correlación entre pares de elementos trazas.

4. CONCLUSIONES

La concentración en cromo, níquel y cobalto en horizontes saprolíticos se puede utilizar para delimitar contactos o diferenciar rocas ultrabásicas (dunitas), de otros tipos de rocas ígneas tanto ácidas como básicas y sus equivalentes metamórficos.

- En el área estudiada, bajo la cubierta de cenizas volcánicas, no existió dispersión clásica de la cromita que hubiese ocasionado concentraciones coluviales sobre las pendientes o aluviales sobre los paleocanales de drenaje.

Los valores más altos en cromo en la saprolita se ubican al oeste del depósito de cromita de Patio Bonito, son iguales a más o menos dos veces el valor modal y coinciden con el valor umbral. Dichos valores indican probablemente la distribución primaria del cromo en la dunita, formando principalmente cromita o incorporado en la magnetita y aunque no señalan la existencia de un depósito grande o acumulación importante de cromita, sugieren una mayor concentración de este mineral en dicho lugar.

- La distribución de la isoconcentración de níquel y cobalto en la saprolita, señala que en las zonas aledañas al depósito de cromita de Patio Bonito, no existen cambios suficientemente importantes en la mineralogía primaria, de tal manera que a pesar de los procesos supérgenos, dan lugar a anomalías positivas o negativas. Dichos elementos son afectados notoriamente en la saprolita, por procesos de meteorización química. Por lo tanto, es improbable que el cobalto y el níquel en la saprolita sirvan como indicadores de ocurrencias de cromita.

- La prospección de cromita usando concentrados en batea, es una herramienta apropiada para el hallazgo de depósitos de dicho mineral.

- Contenidos anómalos en cromo se detectaron en los concentrados recolectados en los drenajes que constituyen las cabeceras de la quebrada Las Palmas y en su afluente la que-

brada La Tablazona. En los primeros drenajes anotados se hallaron, en los bloques rodados de sus cauces, numerosos guijos y guijarros de cromita.

5. RECOMENDACIONES

Realizar en las cuencas de captación de los drenajes anómalos en cromo, un estudio geológico detallado a lo largo de los cauces de las quebradas. Si es necesario debe complementarse con muestreo adicional de concentrados en batea.

- Dependiendo del estudio anterior decidir la utilización de levantamiento geofísico en las zonas anómalas combinando gravimetría y magnetometría. Si no es necesario este paso, se deben hacer trincheras y apiques.

- La ocurrencia en las dunitas de Medellín de abundantes riegos de cromita y de algunos depósitos del mismo mineral, hace pensar en la necesidad de realizar estudios más intensos en cuanto a prospección por métodos geofísicos. Estos estudios deben iniciarse en el sector sur del cuerpo de dunita. Asimismo en el sector oeste del depósito de cromita de Patio Bonito, deben realizarse los sondeos manuales menos espaciados y geofísica.

- Si en una área afloran ultramafitas con posibilidades de ocurrencias de cromita y en dicha área se tiene un sistema de drenaje bien desarrollado, se recomienda usar, antes de cualquier otro método, la prospección geoquímica de sedimentos fluviales, empleando concentrados en batea. Si no existe un drenaje apropiado en el área, el método de prospección de ocurrencias de cromita debe realizarse observando la presencia de detritos y bloques de cromita en la superficie de terreno.

- Si la ultramafita con posibles ocurrencias de cromita está cubierta por rocas más recientes, la prospección de cromita podría realizarse por muestreo de saprolita mediante sondeos manuales y el subsiguiente análisis de cromo. Este método podría ser efectivo si la ocurrencia de cromita aflora por de-

bajo de dicha cubierta, pero requiere una densidad alta para la red de sondeos puesto que no existe dispersión clásica o ésta es muy poca.

- En depósitos de cromita cubiertos o no expuestos, se recomienda la utilización de métodos geofísicos combinados de gravimetría y magnetometría.

6. BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, J., 1978.- *Exploración geoquímica. Inf. 1812*. Ingeominas. 27 p. Bogotá.
- , 1981.- *Aspectos petrológicos y geoquímicos de algunos cuerpos ultramáficos del sector septentrional de la Cordillera Central*. (en preparación).
- , 1982.- *Tectonitas dunitas de Medellín, Departamento de Antioquia, Colombia. (Informe en preparación)*.
- BOTERO, G., 1963.- *Contribución al conocimiento de la Geología de la zona central de Antioquia*. An. Fac. de Minas, No. 57, 101 p. Medellín.
- BOTERO, G., RICO, H., 1965.- *Mapa Geológico de la Plancha I-8 Medellín*. Ministerio de Minas y Petróleos. Inventario Minero Nacional, Bogotá.
- ESPINAL, L.S. 1964.- *Formaciones vegetales del Departamento de Antioquia*. Rev. Fac. Agron., V. 24, (60). 83 p. Medellín.
- GOLDSCHMIDT, V. M., 1958.- *Geochemistry*. Alez Muir ed., Oxford, 730 p. London.
- LEPELTIER, C., 1969.- *A simplified treatment of geochemical data by graphical representation*. Econ. Geol., V. 64, p. 538 - 550.
- MONSALVE, D., 1979.- *Procedimiento para el análisis espectroquímico semicuantitativo. Inf. 1813*. Ingeominas 19 p. Bogotá.
- TAYLOR, S. R., 1965.- *The application of trace element data to problems in petrology*. In physics and chemistry of the Earth. (L. H. Arhens, ed). V. 6. p. 133 - 213. Pergamon Press.
- THAYER, T. P., 1967.- *Chemical and structural relations of ultramafic and feldspatic rocks in alpine intrusive complexes*. In Wyllie, P. J., ed., ultramafic and related rocks John Wiley and Sons, New York, 464 p.
- VINOGRADOV, A. P., 1962.- *Average content of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the earth's crust Geochemistry*. V. 7, p. 641 - 644.