



GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ

Gloria Prieto, Luz Myriam González,
Orlando Vargas, Adriana Matamoros
luzgonz@ingeominas.gov.co;
gprieto@ingeominas.gov.co;
ovargas@ingeominas.gov.co

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar procesos geoquímicos ambientales y continuando con estudios adelantados anteriormente en suelos de la Sabana de Bogotá, el INGEOMINAS llevó a cabo un muestreo sistemático de suelos en la cuenca del río Bogotá. Se recolectaron 273 muestras de suelos con base en una red bidimensional de celdas de 5 x 5 km, tomando muestras superficiales (A 0-25) y de horizonte C.

En el INGEOMINAS se analizaron contenidos pseudo-totales de Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni, extraídos con agua regia y mezcla de ácidos, usando la técnica de ICP-AES y en Activation Laboratories de Canadá se determinaron 48 elementos, también por ataque con mezcla de ácidos y determinación por ICP-AES y activación neutrónica. Se efectuó un análisis estadístico y geoestadístico a los resultados y se elaboraron mapas de concentración puntual y de distribución espacial.

Los patrones de distribución geoquímica permiten diferenciar dos zonas, la primera correspondiente a la cuenca alta y media del río, incluyendo la Sabana de Bogotá y el Distrito Capital, en donde en la mayoría de los suelos se presentan niveles inferiores a los máximos de referencia y una segunda zona correspon-

diente a la cuenca baja, en donde se concentran elementos en niveles que sobrepasan los valores de referencia usados para establecer la calidad y el uso adecuado de los suelos.

En la primera zona, los suelos, de texturas variadas, tienden a la acidez (pH 4 a 6,5) y en general presentan concentraciones bajas para la mayoría de los elementos, con excepción de algunos sitios de la cuenca media donde se presenta acumulación de algunos metales. En la segunda zona, los suelos tienen textura predominantemente franco arcillosa, son más básicos (pH 6,6 a 9) y poseen altos contenidos de la mayoría de los elementos analizados.

Estadísticamente, se diferenciaron tres grupos de asociación de elementos, el grupo 1, integrado por As, Cd, Cu, Cr, Mo, Ni y Zn; el grupo 2 por Co y Mn y el grupo 3 por Pb; estos grupos corresponden a asociaciones geoquímicas naturales, propias de rocas sedimentarias y adicionalmente representan residuos de actividades antrópicas industriales, agropecuarias y de transporte. El comportamiento del Pb, indica un origen posiblemente antrópico.

La información generada es útil para definir líneas base geoquímicas en esta importante zona del país, apoyar la planeación del uso del suelo y soportar la toma de decisiones sobre el manejo integral de la cuenca del río Bogotá.

Palabras clave: suelos, metales pesados, elementos potencialmente peligrosos, cuenca del río Bogotá, geoquímica.

ABSTRACT

In order to study environmental geochemical processes in the Central Region of Colombia, the geochemistry project of INGEOMINAS, carried out a systematic geochemical sampling programme in soils along the Bogotá River basin. The sampling program was carried out based on a bi-dimensional net (5x5km cells), collecting one sample per 25 km² and one cell duplicate sample per 100 km². 273 samples of superficial soil (A0-25) and C-horizon (up to 2m depth) were collected.

In the INGEOMINAS laboratories pseudo-total contents of Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu and Ni were determined (aqua regia and multi-acid digestion/ICP-AES); and in Activation Laboratories of Canada 48 elements were measured (multi-acid digestion/ICP-AES; INAA).

This paper presents results of As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, and Zn in the superficial horizon (A0-25) of the soil samples, including some data generated for previous projects carried out for INGEOMINAS in this region. The data were processed statistically and geo-statistically, dots and distribution maps by element were constructed.

Geochemical patterns allow differentiating two main zones. First zone covers the high basin of the Bogotá river including

the Savannah of Bogotá, and the Capital City, the soils have acidic pH (pH 4-6,5), textural variability and relatively low concentration of elements with the exception of some places in the middle basin. Second zone, comprises the low river basin, the soils have more basic pH (pH 6,6-9), texture predominantly argillaceous and high contents of trace elements.

Statistically three association groups were differentiated: **group 1:** As, Cd, Cu, Cr, Mo, Ni and Zn; **group 2:** Co and Mn and **group 3:** Pb, not displaying significant correlation with any other element. These groups correspond to natural geochemical associations characteristic of sedimentary rocks. They represent also common associations of residues of activities such as industry, agriculture and transport. Lead behaviour, on the other hand seems to indicate mainly anthropic origin (old leaded gasoline and industrial emissions).

The systematic soil sampling carried out along the Bogotá River basin, allowed to determine accumulation levels of potentially harmful elements, to discriminate possible origin and to analyze parameters and factors that determine local mobility and bio-availability of these elements. This information contributes to the geochemical base lines definition, is basic to soil use planning and is support to the Bogotá River basin management.

1. ANTECEDENTES

La cuenca del río Bogotá es de vital importancia para el desarrollo social y económico de la zona central del país, razón por la cuál INGEOMINAS, adelantó un muestreo geoquímico sistemático de suelos con la finalidad de estudiar procesos geoquímicos locales. El manejo adecuado de la cuenca del río Bogotá no solo está relacionado con la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, sino también con la calidad de los suelos. Esta última depen-

de de sus propiedades físicas intrínsecas y de su composición geoquímica.

Las propiedades físicas y químicas de los suelos son heredadas del material parental y modificadas tanto por procesos de meteorización antiguos y actuales, como por la actividad antrópica que los afecta. El estudio de procesos geoquímicos en suelos permite determinar zonas de acumulación o deficiencia de elementos químicos, que son esenciales para las plantas en ciertos niveles de concentración, pero que si exceden esos niveles, se convierten en potencialmente tóxicos; estos estudios también permiten identificar el origen de los elementos que puede ser natural o de carácter antrópico.

El conocimiento de los factores que intervienen en la movilidad, transporte y acumulación de elementos, así como el análisis de su biodisponibilidad y efectos en el entorno, es básico para la correcta planeación y desarrollo de actividades socio-económicas.

1.1 Localización

La zona de estudio comprende la cuenca del río Bogotá (**Figura 1**) desde su nacimiento en el páramo de Guacheneque, municipio de Villapinzón, hasta su desembocadura en el río Magdalena, en la ciudad de Girardot. El área total de la cuenca es de aproximadamente 6.000 km².

1.2 Características generales de la zona

Geología regional. La cuenca del río Bogotá es el resultado de la evolución geológica desde el Cretáceo, cuando el área hacia parte del fondo del mar y estaba constituida principalmente por sedimentos marinos, arcillas y arenas, pasando por diversos fenómenos geológicos y geomorfológicos que moldearon y dieron origen al paisaje actual que alberga intensa y variada actividad antrópica (Van der Hammen, 1998). La geología de la cuenca del

río Bogotá esta constituida principalmente por rocas sedimentarias con edades desde el Cretáceo hasta depósitos cuaternarios recientes (INGEOMINAS, 1997) y ha sido detallada en diferentes estudios geológicos (Acosta y Ulloa, 1996; Acosta y Ulloa, 1997; Acosta y Ulloa, 1998; Acosta et al., 2000; Montoya y Reyes, 2003). Entre los materiales que afloran se encuentran areniscas intercaladas con arcillas que conforman el Grupo Guadalupe, tal y como se presentan en el Cerro de Monserrate y el Salto del Tequendama.

La Sabana de Bogotá, se destaca por su topografía plana constituida por depósitos cuaternarios fluvio-lacustres. Las rocas del Cretácico inferior (formaciones Trinchera, Socota, Capotes e Hilo), afloran en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, haciendo parte de la cuenca baja del río Bogotá y las rocas del Cretácico superior afloran tanto en los flancos oriental y occidental como también en la parte central y corresponden a las formaciones Simijaca, La Frontera, Grupo Olini, Conejo y Grupo Guadalupe; sin embargo, el Grupo Olini solo aflora en el sector más occidental (cuenca baja del río Bogotá). En la cuenca baja del río Bogotá afloran rocas de la Formación Barzaloza del Paleógeno y el Grupo Honda del Neógeno y en la cuenca alta afloran las formaciones Cacho, Bogotá, Regadera y Usme del Paleógeno y Tilatá del Neógeno.

Hidrología. El río Bogotá nace en el municipio de Villapinzón en el páramo de Guacheneque, a 3.300 m.s.n.m. y sus aguas fluyen hacia el suroeste para desembocar al río Magdalena en Girardot a 280 m.s.n.m. En su recorrido de 375 km, recibe las aguas de los ríos Sissaga, Neusa, Tibitó, Negro, Frío, Chicú, Salitre, Fucha, Tunjuelito, Balsillas (recoge aguas de los ríos Subachoque y Bojacá), Calandaima y Apulo (CAR, 2.000). En su trayectoria se pueden identificar tres sectores: la cuenca alta (165 km) con aguas tranquilas por el relieve plano; la cuenca media (90 km) con caudal torrencioso debido a un desnivel mayor a 2.000 metros en un trayecto corto y la cuenca

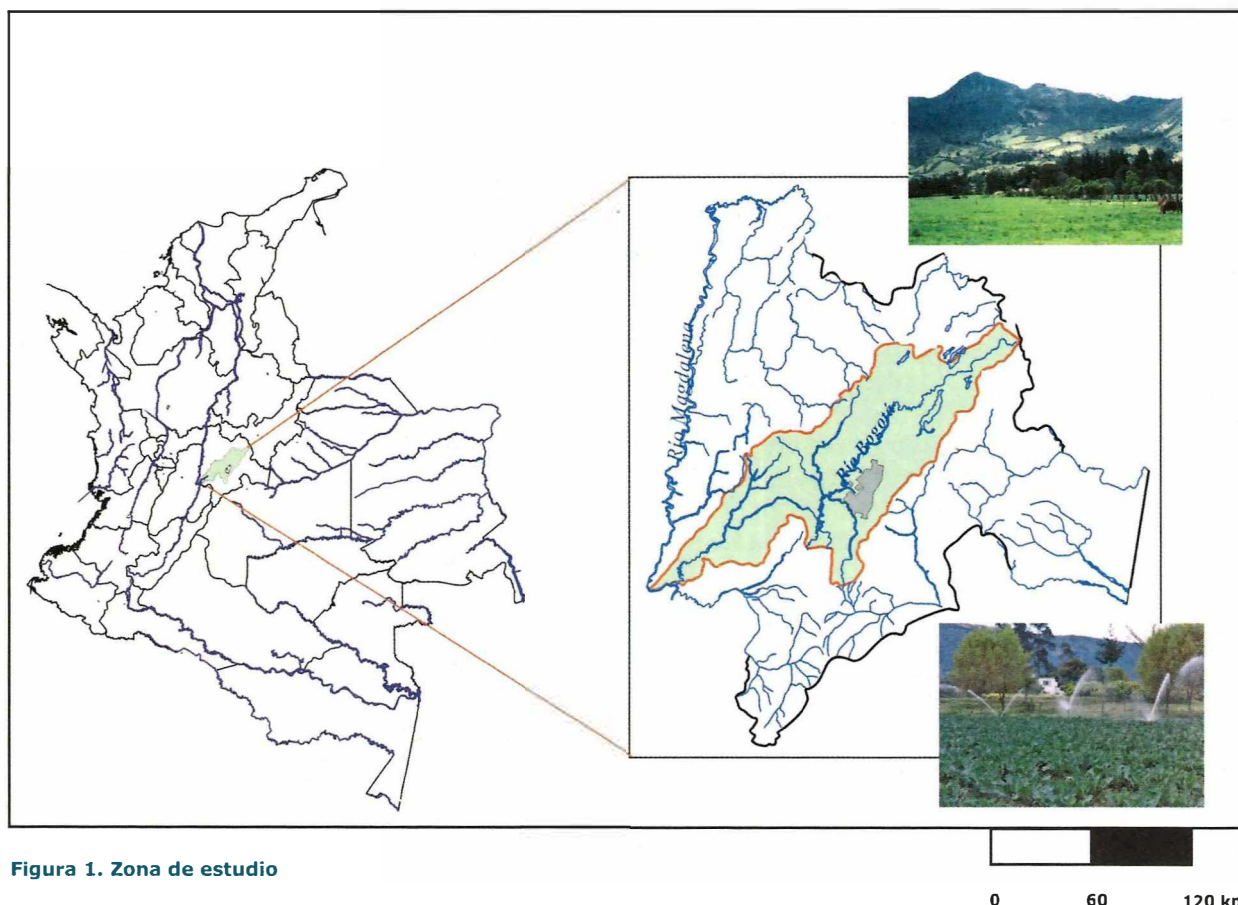


Figura 1. Zona de estudio

baja (120 km) con aguas tranquilas, en una zona de poco desnivel topográfico.

Suelos, clima y vegetación. Se destaca la presencia de suelos del paisaje de montaña, suelos del paisaje de planicie y suelos de paisaje de valle. En la cuenca del río Bogotá se presenta diversidad climática determinada por condiciones altitudinales, pluviometría y temperatura predominantes. Las formaciones vegetales predominantes son bosque seco montano bajo (bs-MB); bosque húmedo pre-montano (bh-PM); bosque húmedo montano bajo (bh-MB), bosque húmedo montano (bh-M) y bosque seco tropical (bs-T), (IGAC, 2000).

Actividad socio-económica. La actividad socioeconómica de la zona se ha incrementado y diversificado continuamente, y ha estado ligada al uso intensivo de recursos naturales

y a la expansión no planificada de la zona urbana, especialmente en la Sabana de Bogotá en donde se ubica la ciudad capital. Esta cuenca, incluyendo Bogotá D.C., en conjunto se ha convertido en una de las zonas de mayor densidad de población del país (19 % de la población total), es receptora de múltiples actividades humanas e industriales (30% de la industria nacional) y ejerce fuerte demanda de servicios públicos y de uso de recursos naturales.

2. METODOLOGÍA

El muestreo se realizó con base en una red bidimensional, para lo cual se tomó como referencia la cartografía del IGAC, se seleccionó el área correspondiente a la cuenca del río Bogotá y se dividió esta región en celdas de 5 x 5 km. La densidad de muestreo resultan-

te corresponde a una muestra cada 25 km². En cada subcelda de 5 x 5 km se localizó un punto de muestreo y adicionalmente se ubicó un punto por cada 10 x 10 km para tomar duplicados de celda. Los puntos de muestreo se localizaron aleatoriamente sobre la red bidimensional, pero se consideraron aspectos como el uso del suelo, la influencia del río Bogotá o de sus tributarios. Todos los puntos de muestreo se georrefenciaron haciendo uso de planchas cartográficas (escala 1:25.000) y aparatos de posicionamiento satelital (GPS).

Se colectaron 273 muestras de suelos superficiales, horizonte A (0-25 cm) y de horizonte C (hasta máximo 2 m), siguiendo orientaciones sobre muestreo del Programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP), proyectos 259 y 360 y estándares del INGEOMINAS (Figura 2).

En los laboratorios de INGEOMINAS se determinaron contenidos pseudo-totales de Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni, mediante digestión ácida (agua regia y multiácido: HF, HNO₃, HCl y HClO₄, según el elemento) en un digestor de microondas y se realizó la cuantificación por espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplado ICP-AES. En los laboratorios Activation Laboratories Ltd de Canadá se determinaron los contenidos totales de 48 elementos utilizando, según el elemento, análisis por activación neutrónica (INAA) o digestión ácida (multiácido) y cuantificación por espectrometría de emisión atómica con fuente acoplada de plasma (ICP-AES). La calidad analítica se controló mediante uso de patrones primarios y secundarios (exactitud) y por análisis por duplicado (precisión).

Como base de análisis se tomaron los suelos superficiales (A 0-25) y se consideraron los elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn, catalogados como elementos potencialmente peligrosos (EPPs) para la salud de ecosistemas, incluyendo al hombre. Los datos se sometieron a procesamiento estadístico usando el software SPSS y geoestadístico

usando ISATIS y SURFER, con los resultados se elaboraron mapas de concentración puntual y mapas de distribución espacial de los elementos de interés empleando Arc-GIS.

2.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico indica que en los suelos que se tomaron a lo largo de la cuenca del río Bogotá, se presenta una alta variabilidad espacial en el contenido de los elementos analizados, con algunos valores alejados de la distribución promedio de los datos. En la Tabla 1, se presentan las estadísticas para todos los datos y en la Tabla 2 el promedio, mínimo y máximo por municipio.

2.1.1 Correlación y asociación de elementos

Las correlaciones, entre pares de elementos o bivariadas, indican la existencia de relaciones positivas y altamente significativas entre las variables As-Cd, As-Cr, As-Mo, As-Ni, As-Zn, Cd-Mo, Cd-Ni, Cd-Zn, Co-Mn, Mo-Ni, Mo-Zn, Ni-Zn. Los análisis estadísticos multivariados, análisis factorial y de conglomerados jerárquicos, permiten diferenciar tres grupos de asociación de elementos, los cuáles corresponden a asociaciones naturales propias de los tipos de rocas presentes en la zona estudiada y a la vez son comunes en muchos residuos de actividades antrópicas industriales y agropecuarias:

Grupo 1: As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni y Zn;

Grupo 2: Co y Mn y **Grupo 3:** Pb, cuyo comportamiento es independiente de los demás elementos.

En la cuenca baja del río Bogotá, del municipio de La Mesa hacia el suroccidente, predominan rocas sedimentarias, tipo *shale* (lutitas), principalmente lodolitas, limolitas o arcillolitas negras, silíceas o calcáreas, las cuales acumulan metales durante su génesis y presentan asociaciones de elementos químicos similares a las encontradas en los suelos estudiados; aunque en los suelos, como

es natural, los contenidos son menores, por efecto de los procesos pedogenéticos que les dieron origen. El comportamiento del Pb, que no presenta asociación estadística significativa con otros metales, puede estar indicando un origen principalmente antrópico, originado en los residuos de la combustión de gasolina

a la que antiguamente se adicionaba plomo y de las emisiones de las diversas actividades industriales, que se desarrollan en algunas zonas específicas del área de estudio. Es posible que el riego con agua del río Bogotá, sea, junto con otras actividades antrópicas (agricultura, ganadería, industria), fuente de

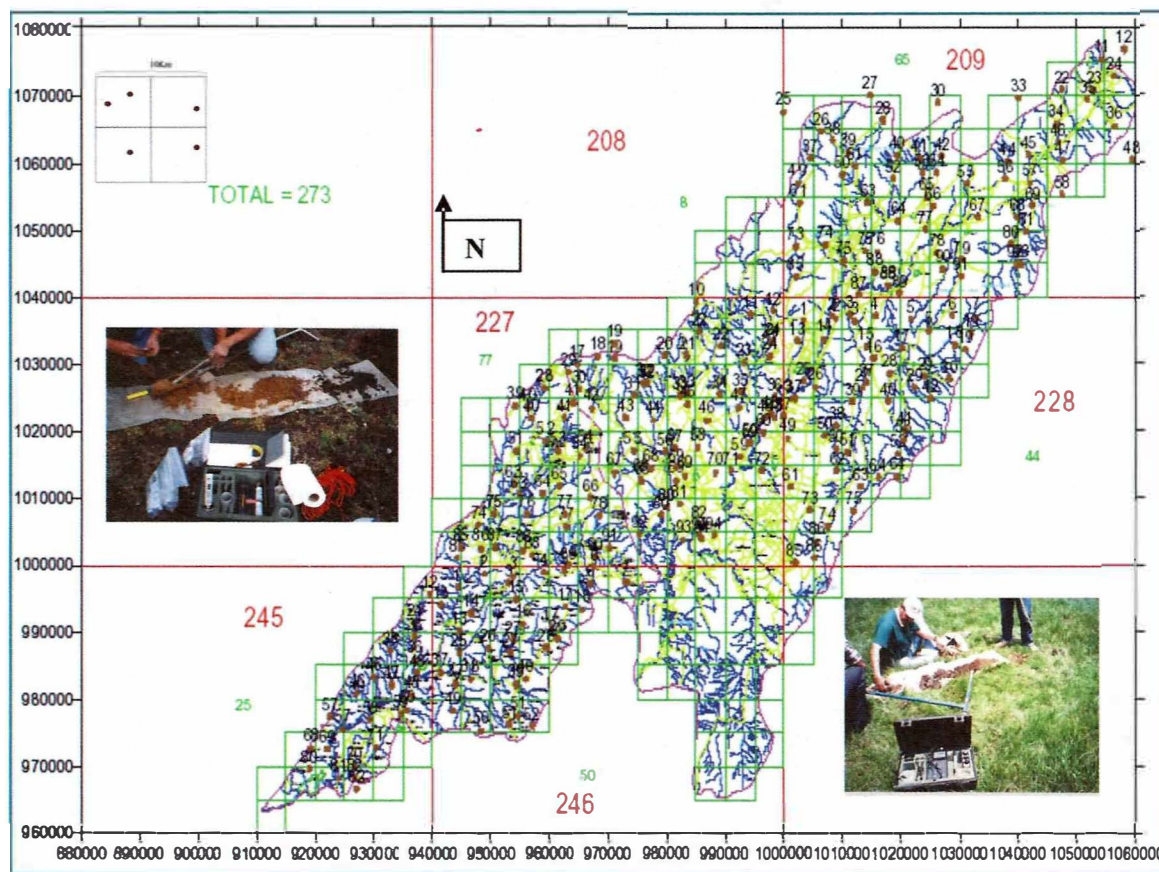


Figura 2. Sitios de muestreo

metales para los suelos de la cuenca del río Bogotá. Los aportes naturales del material geológico y parental de los suelos (en este caso lodolitas, lutitas, cenizas volcánicas, entre otros), contribuyen a la concentración de los metales en los suelos de la zona de estudio, con especial importancia en localidades de la cuenca baja.

2.1.2 Distribución espacial de elementos traza

La distribución de elementos que se aprecia en los mapas de distribución espacial, en suelos de la cuenca del río Bogotá, permite diferenciar dos zonas: una que va desde el nacimiento del río, en Villapinzón, hasta el embalse del Muña en Sibaté y corresponde a la cuenca alta, y otra que encierra la cuenca

baja del río hasta su desembocadura (Figura 3).

En la zona 1 que comprende la cuenca alta del río Bogotá, e incluye la Sabana de Bogotá, los suelos presentan tendencia ácida (pH 4 a

6.5), variabilidad textural y concentraciones relativamente bajas para la mayoría de los elementos. En algunas localidades específicas de ésta zona, en donde existen suelos de muy poca evolución, como los Epiaquents (Bogotá, Soacha, Guasca, Mosquera y Sopó), se pre-

Tabla 1. Parámetros estadísticos de los elementos y control de calidad analítica

Estadísticos		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
Numero datos	Válidos	218	235	234	234	234	235	221	234	235	234
	Unidad	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Media		6,2	1,2	5,7	58,0	19,1	245	4,7	21,8	23,1	103
Error típ. de la media		0,3	0,2	0,2	5,8	1,1	12,2	0,7	1,7	1,0	8,2
Mediana		4,8	0,3	5,0	50,0	15,7	197	2,4	14,9	20,6	65,0
Moda		3.5(a)	0,2	4,0	61,0	1(a)	1(a)	0,5	0,5	1,5	100,0
Desv. típ.		5,1	2,7	3,6	88,4	16,3	186	10,2	26,0	15,7	126,1
Varianza		26	7	13	7.814	266	34.750	104	679	246	15.897
Asimetría		2,9	4,2	1,6	12,4	5,5	1,9	5,8	3,8	4,2	3,4
Error típ. de asimetría		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Curtosis		10,5	20,1	3,5	175,9	43,3	6,4	41,4	16,7	32,5	12,0
Error típ. de curtosis		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Rango		34,3	19,1	20,5	1.310	166	1.383	96,7	188	167	750
Mínimo		0,26	0,15	0,5	2,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,2	3,3
Máximo		34,6	19,2	21,0	1.313	166	1.383	97,2	189	168	753
	25	3,5	0,2	3,8	31,0	11,3	113	0,5	9,9	14,6	45,7
	50	4,8	0,3	5,0	50,0	15,7	197	2,4	14,9	20,6	65,0
	75	6,8	0,9	7,0	70,9	21,6	323	4,1	22,9	28,0	105
	90	12,0	2,8	10,1	98,5	33,3	455	6,4	37,4	37,2	177
	95	16,6	6,4	13,0	111	42,2	605	19,8	67,4	45,0	388
	98	26,2	11,7	17,6	125	50,6	776	35,7	133	63,4	667

a. Existen varias modas. Se muestra el menor de los valores.

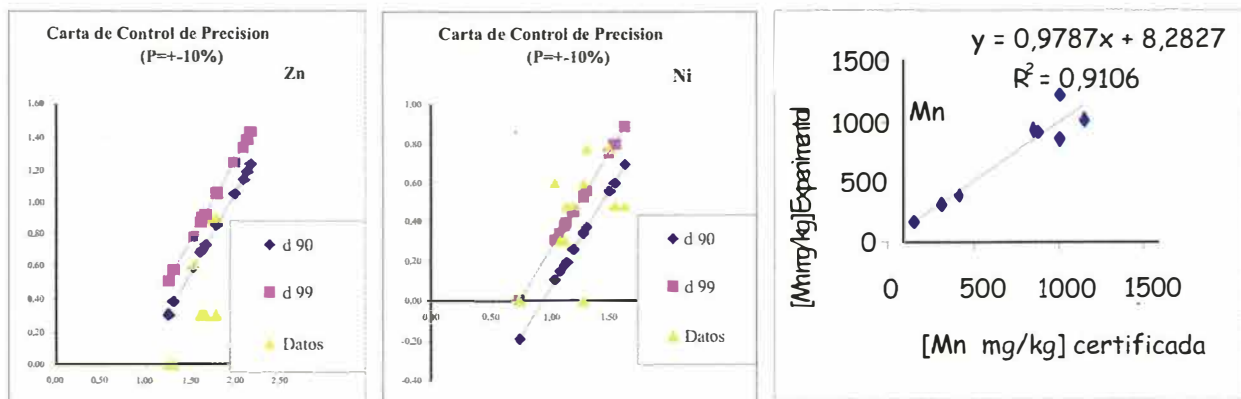


Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Agua de Dios	N	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Media	6	0,6	16	92	32	733	2	36	11	110
	Mínimo	4,3	0,2	13	74	28	454	0,5	28	2	95
	Máximo	9,6	1,4	21	112	41	877	4,5	41	17	154
Anapoima	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Media	19	6,4	11	111	36	312	19	78	29	354
	Mínimo	8,3	0,2	6	59	21	73	2,7	23	11	120
	Máximo	35	19,2	19	237	61	1.383	69	189	46	709
Anolaima	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Media	6	0,4	5	53	19	268	4	12	30	73
	Mínimo	3,5	0,2	3	29	12	44	0,5	6	21	55
	Máximo	8,9	1,4	7	93	47	378	11,3	19	44	108
Apulo	N	5	4	5	5	4	4	4	4	4	4
	Media	16	6,4	9	94	31	202	23	89	20	408
	Mínimo	12,0	0,2	6	69	27	137	0,5	25	7	176
	Máximo	21	14,8	12	118	40	234	61	130	47	586
Bogotá	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	3	1,6	5	161	37	267	1	19	41	102
	Mínimo	1,0	0,2	1	7	10	56	0,5	9	7	15
	Máximo	4,4	5,8	10	1.313	166	579	3,6	52	168	304
Bojacá	N	9	10	10	10	10	10	9	10	10	10
	Media	3	1,9	5	23	9	248	1	10	14	51
	Mínimo	0,4	0,2	1	3	1	8	0,5	1	2	3
	Máximo	6,2	8,7	8	52	15	500	3,3	22	28	200
Cachipay	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Media	16	5,1	5	85	19	174	38	65	22	306
	Mínimo	4,0	0,8	4	53	10	85	2,0	12	21	68
	Máximo	30	13,5	6	120	35	292	97	154	23	671
Cajicá	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Media	1	0,8	7	14	12	249	1	13	12	55
	Mínimo	0,3	0,2	1	3	1	3	0,5	1	2	14
	Máximo	2,5	1,4	20	20	22	703	0,8	22	19	91
Chifí	N	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2
	Media	7	0,6	4	16	21	441	1	17	32	64
	Mínimo	7,2	0,5	4	15	17	148	0,6	13	22	57
	Máximo	7,2	0,7	4	17	26	734	1,0	21	42	71

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Chocontá	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Media	5	0,2	4	52	13	201	2	11	19	55
	Mínimo	3,2	0,2	2	37	5	29	0,5	7	12	35
	Máximo	7,6	0,2	7	84	17	407	4,5	16	26	85
Cota	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Media	2	0,8	5	17	16	168	1	12	14	48
	Mínimo	1,2	0,2	1	12	10	35	0,5	8	9	22
	Máximo	3,0	1,5	7	31	26	322	2,4	18	21	75
Facatativa	N	12	16	16	15	15	16	12	15	16	15
	Media	4	0,7	5	36	17	224	2	13	19	56
	Mínimo	0,5	0,2	1	10	6	1	0,5	3	1	7
	Máximo	6,6	2,7	8	76	44	510	4,8	23	37	111
Funza	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Media	4	1,7	5	12	15	453	1	11	16	55
	Mínimo	3,0	0,6	2	10	12	122	0,5	7	10	20
	Máximo	4,3	3,7	9	13	18	728	1,2	15	25	82
Gachancipá	N	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	4,6	0,2	2,3	24,8	6,6	49,4	0,5	4,8	25	58
	Mínimo	4,6	0,2	1	3	2	4	0,5	1	2	10
	Máximo	4,6	0,2	4	47	12	95	0,5	9	48	105
Girardot	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Media	4	0,6	7	55	18	239	2	21	10	103
	Mínimo	3,7	0,2	3	41	11	47	0,5	14	7	49
	Máximo	5,1	1,0	11	76	22	569	3,9	26	13	145
Guasca	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	5	0,2	4	45	17	245	3	11	20	44
	Mínimo	3,1	0,2	1	39	6	68	1,1	2	14	15
	Máximo	6,5	0,4	7	50	49	471	5,7	17	26	76
Guatavita	N	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Media	5	0,2	5	49	15	245	3	13	21	50
	Mínimo	3,4	0,2	4	37	8	134	1,3	10	16	40
	Máximo	5,8	0,4	6	76	24	371	5,1	18	27	65
La Calera	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	4	0,2	3	54	13	120	1	9	40	45
	Mínimo	0,8	0,2	1	28	6	19	0,5	1	16	17
	Máximo	6,8	0,7	6	82	23	338	3,8	22	95	72
La Mesa	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	12	3,4	8	89	22	188	8	44	25	268
	Mínimo	4,2	0,2	3	56	10	114	1,8	13	15	95
	Máximo	21	10,9	17	119	33	354	17,4	95	42	753

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Madrid	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Media	3	2,1	7	19	21	468	1	18	15	80
	Mínimo	3,1	1,5	5	17	17	228	0,5	15	14	55
	Máximo	3,5	3,2	11	20	27	728	0,9	24	15	124
Mesitas del Colegio	N	8	8,0	8	8	8	8	8	8	8	8
	Media	7	0,8	6	73	16	228	11	19	32	85
	Mínimo	2,6	0,2	2	46	9	37	2,1	8	27	44
	Máximo	10,6	1,7	10	103	23	574	29,2	35	42	139
Mosquera	N	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	4	2,0	5	10	14	163	1	13	14	97
	Mínimo	3,5	1,7	5	9	13	36	0,5	12	14	86
	Máximo	3,5	2,3	5	10	14	291	0,8	15	15	107
Nemocón	N	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Media	5	0,2	4	42	13	144	2	11	20	50
	Mínimo	2,8	0,2	1	16	8	43	0,5	5	5	18
	Máximo	6,2	0,2	7	55	20	256	4,1	15	28	70
San Antonio de Tena	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Media	5	0,9	3	81	13	251	3	18	22	119
	Mínimo	2,0	0,4	2	38	11	165	0,5	11	20	97
	Máximo	6,3	1,2	5	119	15	340	7,4	25	24	150
San Antonio del Tequen-dama	N	2	2,0	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	3	0,6	6	51	12	330	2	12	20	94
	Mínimo	3,0	0,2	4	44	9	226	1,9	10	18	85
	Máximo	4,0	1,1	8	57	15	434	2,4	13	21	104
Sesquillé	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Media	5	0,3	5	60	19	231	3	13	28	61
	Mínimo	4,3	0,2	2	53	16	117	1,2	8	17	42
	Máximo	5,8	0,8	6	67	22	317	4,8	16	37	75
Sopó	N	5	7	7	7	7	7	4	7	7	7
	Media	3	0,5	5	23	9	168	2	13	18	48
	Mínimo	1,2	0,2	2	10	4	91	0,5	6	14	34
	Máximo	4,5	1,2	11	53	13	204	4,3	20	30	60
Subachoque	N	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Media	7	0,2	7	60	18	288	2	15	25	60
	Mínimo	4,1	0,2	5	38	11	209	0,5	10	19	43
	Máximo	11,4	0,5	9	90	33	444	4,2	21	28	77

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Suesca	N	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3
	Media	4	0,2	11	58	22	319	2	15	19	73
	Mínimo	4,1	0,2	6	57	14	197	1,6	9	17	59
	Máximo	4,7	0,2	15	59	29	457	3,7	24	21	93
Tabio	N	1	3	3	3	3	3	1	3	3	3
	Media	1	0,8	5	21	13	124	1	16	15	66
	Mínimo	1,2	0,3	2	13	8	97	0,5	9	10	18
	Máximo	1,2	1,6	7	33	18	166	0,5	27	21	138
Tausa	N	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Media	6	0,3	6	55	19	280	3	19	28	78
	Mínimo	3,5	0,2	4	43	13	89	0,5	10	15	44
	Máximo	8,6	1,0	9	66	33	427	5,0	27	75	154
Tena	N	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	5	0,2	4	51	16	238	3	14	26	99
	Mínimo	3,0	0,2	4	27	14	100	2,4	11	24	79
	Máximo	7,1	0,2	4	75	19	376	2,9	18	28	120
Tenjo	N	2	4	4	4	4	4	2	4	4	4
	Media	3	2,0	3	15	24	150	1	13	16	156
	Mínimo	2,0	0,5	2	9	16	67	0,5	5	8	19
	Máximo	3,6	6,1	7	23	30	354	0,5	26	34	563
Tocaima	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Media	8	2,1	7	84	25	272	10	46	16	180
	Mínimo	2,9	0,2	2	39	15	93	0,5	16	2	48
	Máximo	21	11,1	13	127	50	764	35	141	33	665
Tocancipá	N	3	5	5	5	5	5	3	5	5	5
	Media	4	0,4	3	28	11	87	2	11	21	44
	Mínimo	2,2	0,2	3	10	3	49	0,5	8	11	28
	Máximo	5,6	1,0	5	52	17	163	4,0	17	32	58
Villapinzón	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Media	5	0,2	4	50	12	180	3	13	24	41
	Mínimo	4,2	0,2	3	44	8	60	0,5	9	19	25
	Máximo	6,6	0,2	4	61	15	282	6,3	17	26	58
Viotá	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Media	6	0,3	5	64	27	187	4	19	27	83
	Mínimo	3,0	0,2	1	42	6	38	0,5	8	10	31
	Máximo	11,1	0,8	10	89	146	474	6,2	31	42	160
Zipacón	N	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	4	0,4	5	40	14	435	4	10	25	75
	Mínimo	3,5	0,2	4	34	10	326	3,3	9	24	62
	Máximo	3,8	0,6	5	45	17	545	3,9	12	26	89

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Zipaquirá	N	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Media	6	0,5	6	46	21	302	3	15	29	97
	Mínimo	2,0	0,2	2	3	7	63	0,5	6	12	18
	Máximo	12,9	0,8	11	75	38	580	4,4	29	55	221
Total	N	218	235	234	234	234	235	221	234	235	234
	Media	6	1,2	6	58	19	245	5	22	23	103
	Mínimo	0,3	0,2	1	3	1	1	0,5	1	1	3
	Máximo	35	19,2	21	1.313	166	1.383	97	189	168	753

sentan arcillas y condiciones reductoras (saturación con agua) que favorecen formas no móviles y concentración de especies químicas reducidas, que pueden ser en algunos casos las más tóxicas para los seres vivos (ejemplo Cr+3). En términos generales, en los suelos de los municipios ubicados en la cuenca alta del río, la mayoría de los elementos estudiados se presentan en niveles de concentración inferiores a los máximos de referencia, a partir de los cuáles se considera que pueden afectarse las propiedades o la calidad de uso de los suelos. No obstante lo anterior, en algunas localidades de la cuenca alta se encontraron concentraciones importantes de Cd, Cu, Pb y Mn, cuya presencia además de ser de origen geogénico, puede relacionarse con emisiones del transporte automotor, especialmente en el caso de Pb y Mn; así como con aportes de residuos de agroquímicos y de actividades pecuarias e industriales para el caso de Cd, Cu y Mn.

En la zona 2, que comprende la cuenca baja del río, el pH de los suelos es más básico (pH 6,6 a 9), la textura es predominantemente franco arcillosa y se presentan contenidos altos de elementos trazas. La mayoría de suelos de la cuenca baja se desarrollan sobre lodolitas calcáreas, que por su naturaleza pueden contener elementos traza y ser fuente de cantidades apreciables de elementos a

los suelos. La presencia de arcillas y el pH alcalino, actúan sinérgicamente y aumentan la retención de los elementos en forma de sales, hidróxidos u otros compuestos insolubles en los suelos de ésta zona (Cu, Ni, Zn y Co especialmente). Los suelos de la cuenca baja, como los Typic Calciustolls o Typic Ustorthens concentran en general elementos en niveles que sobrepasan los valores de referencia, a partir de los cuales se pueden afectar las propiedades o calidad de uso de los suelos.

2.1.3 Influencia de parámetros fisicoquímicos en el comportamiento de los metales traza

Factores que van desde las condiciones climáticas (pisos climáticos dependientes de la altitud), confieren a los suelos determinadas condiciones físicas y químicas que guardan correlación y explican los procesos de concentración y acumulación de elementos químicos en los suelos de la cuenca baja (zona 2) y de movilidad en la cuenca alta del río Bogotá (zona 1).

Los valores de pH difieren de una zona a la otra. En la cuenca baja, en donde se acumulan mayores niveles de metales predominan valores de pH con tendencia básica (6.6 - 9.0); mientras que en la cuenca alta en la cual los metales se encuentran en menores

concentraciones, predominan valores de pH con tendencia ácida (4.0 - 6.5).

El predominio de suelos con pH ácido y neutro en la cuenca alta, favorece la existencia de formas móviles de Cu, Ni, Zn, Co, Mo, As y Cd, y facilita su migración explicando en parte, la menor concentración de elementos en los suelos de la cuenca alta del río, en comparación con la cuenca baja.

No obstante lo anterior, en algunos puntos de la cuenca alta y media, la presencia de material arcilloso y materia orgánica se conjugan, a pesar de las condiciones de acidez, dando como resultado acumulación de cantidades importantes de elementos cuyo origen puede ser geogénico o antrópico. En estos sitios, los colores oscuros de los suelos pueden relacionarse con la presencia de complejos órgano-minerales, materiales húmicos y minerales de bajo ordenamiento cristalino, provenientes de ceniza volcánica (material parental), presentes en varios sectores de ésta zona. La presencia de materiales provenientes de cenizas volcánicas fue confirmada con la prueba de Fieldes y Perrot, en suelos de la cuenca alta (alrededores de Zipacón, Tenjo y La Calera).

Además, específicamente en la parte central de la cuenca alta del río Bogotá, se presentan niveles casi impermeables de arcillas, que actúan como una barrera geoquímica dando lugar a procesos de concentración local como resultado del ciclo de períodos de lluvia intensos seguidos de otros más secos, llegando a encontrarse sitios con niveles de cadmio hasta de 5 a 14 ppm en las cercanías de Bojacá (Gonzalez, LM., Vargas, O, 1997).

Por otra parte, en la cuenca baja, los colores oscuros y marrones grisáceos en algunos de los suelos, puede relacionarse con la presencia de lutitas, limolitas y arcillolitas negras, que por su origen presentan alto contenido de material carbonoso. En ésta zona, predominan los suelos alcalinos, existen zonas caracterizadas por la presencia de rocas clásticas limoarcillosas con intercalaciones de calizas,

las cuáles además de conferir características alcalinas a los suelos, aportan carbonatos, material arcilloso y metales tales como As, Cr, Cu, Mn, Mo y Zn. Estas condiciones de existencia de material arcilloso y de pH alcalino, se complementan para aumentar la precipitación y concentración de los elementos en forma de sales, hidróxidos u otros compuestos insolubles. En esta zona se encontraron niveles hasta de 19 ppm de Cd, 189 ppm de Ni y 35 ppm de As en sectores cercanos a La Mesa, Apulo y Anapoima.

2.1.4 Movilidad vs. acumulación de elementos traza

En los suelos de la cuenca baja del río (zona 2), y en algunos sitios de la cuenca media, los elementos traza se presentan en general, en concentración superior a los máximos a partir de los cuáles, se considera que pueden afectarse las propiedades o la calidad de uso de los suelos (Ver Tablas 2 y 3 y Figura 3). Llama la atención el Cd que es el elemento que se presenta enriquecido en mayor número de localidades de la cuenca alta. Su origen además de aporte natural, puede estar relacionado con residuos de agroquímicos, riego con aguas residuales del río Bogotá, emisiones y residuos industriales, entre ellos residuos de curtiembres, que existen en algunas partes de ésta zona. Elementos como Zn, Cr y Pb, presentan altas concentraciones en algunos suelos de la cuenca alta, sin embargo a diferencia del Cd su distribución es muy local y se puede asociar a fuentes específicas en su zona de ocurrencia.

Por otra parte, en la cuenca baja del río Bogotá (zona 2), el Cd, Cr, Ni, Zn y Mo, son los elementos que con mayor frecuencia se encuentran por encima de los límites que definen calidad de uso del suelo (Tabla 3, Figura 3). Como se dijo anteriormente, el origen de éstos elementos se puede relacionar con los aportes de sus materiales parentales (principalmente lodolitas con intercalaciones de calizas, arcillolitas lodosas no calcáreas, lodolitas calcáreas), pero también con los aportes

de actividades antropogénicas, especialmente uso de agroquímicos; con residuos de actividades industriales y de transporte, y con el uso de agua del río Bogotá (luego de su paso por la zona urbana de la ciudad capital) para riego de cultivos.

Los parámetros fisicoquímicos de esta zona, antes discutidos, pueden llevar a la formación de especies químicas inmóviles (Cu, Cd, Ni, Zn, Co, Mn y Pb), e incluso coprecipitados (en especial de Cd, Cu y Zn).

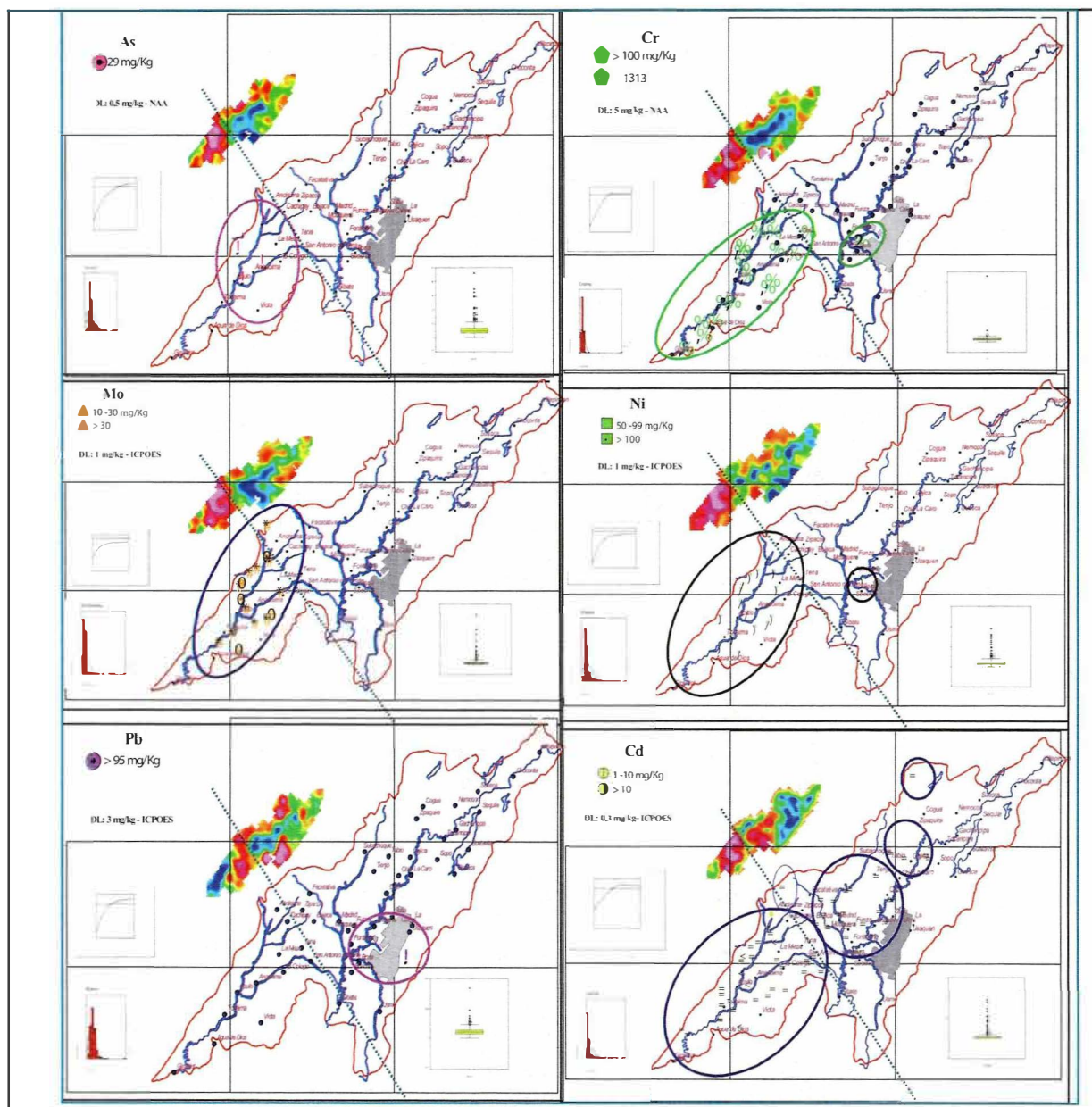


Figura 3. Distribución de As, Cr, Mo, Ni, Pb, Cd en la zona de estudio

Tabla 3. Sitios con niveles altos de elementos potencialmente peligrosos (EPPs) y valores internacionales de referencia

(concentraciones en mg/kg)													
Elementos	Plancha	Subcelda	Municipio	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
Cr	245	71	Agua de Dios	4,3	0,6	21	112	30	877	2	31	9	103
Cd, Zn	245	57 DC	Agua de Dios	9,6	1,4	13	77	28	711	4	41	8	154
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	16	Anapoima	12,1	8,8	6	120	34	73	37	99	18	425
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	27	Anapoima	16,3	9,4	12	125	44	153	19	111	39	608
Zn	246	2	Anapoima	18,0	0,4	17	73	21	407	3	39	22	159
As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn	246	14	Anapoima	29,1	17,8	8	237	61	101	27	161	24	709
As, Zn	246	3 DC	Anapoima	32,4	0,2	19	65	46	1383	3	25	36	160
As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn	227	85 DC	Anapoima	34,6	19,2	6	149	52	113	69	189	11	697
Cd	227	28	Anapoima	4,4	1,4	5	37	14	378	3	9	27	76
Cd, Mo, Ni, Zn	246	26	Apulo	14,3	8,3	10	98	27	233	13	82	10	437
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	227	85	Apulo	17,9	2,3	6	118	27	137	20	121	16	431
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	1	Apulo	21,3	14,8	8	111	40	203	61	130	7	586
Cd, Zn	227	94 TC	Bogotá	1,0	5,8	10	7	40	579	1	26	31	207
Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	227	94	Bogotá	1,1	3,7	5	1313	166	408	1	52	168	304
Cd	227	94 DC	Bogotá	3,4	2,8	5	25	44	305	1	23	27	114
Cd, Zn	227	55	Bojacá	3,3	8,7	8	8	13	500	1	14	13	200
Cd	227	68 DC	Bojacá	1,9	2,8	4	7	15	114	2	17	13	37
Cd	227	68	Bojacá	2,8	2,8	5	13	10	323	1	22	12	45
Cd	227	67	Bojacá	6,2	3,4	4	16	7	197		7	10	20
Cd, Mo, Zn	227	63 DC	Cachipay	13,5	1,0	4	82	13	146	15	28	23	179
As, Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	228	63	Cachipay	29,7	13,5	5	120	35	85	97	154	21	671
Cd	227	1	Cajicá	2,5	1,4	3	14	14	105	1	11	14	47
Cd	227	33	Facatativa		2,7	4	10	22	152	1	15	15	100
Cd	227	70	Funza	3,0	3,7	9	13	13	728	1	15	25	82
Cd, Zn	245	57	Girardot	4,2	1,0	11	57	19	569	4	26	10	145
Cd, Mo, Ni, Zn	227	74	La Mesa	10,5	4,6	6	94	23	159	16	55	17	315
Cd, Cr, Ni, Zn	227	88	La Mesa	10,9	3,8	17	104	29	354	5	60	31	308
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	227	75 DM	La Mesa	16,6	6,8	8	111	23	139	16	67	17	375
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	227	75	La Mesa	16,6	6,4	8	119	22	136	17	67	22	372
Cd, Cr, Ni, Zn	227	76	La Mesa	20,7	10,9	5	105	33	171	9	95	15	753
Cd	227	56	Madrid	3,1	3,2	11	17	17	728	1	24	15	124
Cd	227	57	Madrid	3,5	1,6	5	20	18	228	1	15	14	55
Cd, Mo	246	4	El Colegio	10,0	1,4	5	96	23	71	29	35	39	139
Mo	246	4 DM	El Colegio	10,1	1,0	4	83	23	68	29	32	42	138
Cd	227	69	Mosquera	3,5	1,7	5	9	14	291	1	12	15	86
Cd	227	81	Mosquera		2,3	5	10	13	36	1	15	14	107
Cd, Zn	227	90	San A. de Tena	5,5	1,2	3	87	15	165	7	25	20	150
Cd	227	12	Tabio		1,6	7	33	18	166	1	27	21	138
Cd, Zn	227	23	Tenjo		6,1	7	23	30	354		17	34	563
Cd, Zn	245	36	Tocaima	7,2	1,5	6	99	24	251	6	46	10	146
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	37	Tocaima	10,8	1,8	12	108	20	112	22	69	33	170
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	49	Tocaima	12,7	4,7	7	80	21	183	25	61	33	314
Cd, Mo, Ni, Zn	246	52	Viotá	21,4	11,1	6	77	33	147	35	141	19	665
Zn				5,4	0,2	8	58	15	474	4	23	24	160
Cu	246	29	Viotá	5,7	0,2	5	60	146	164	6	25	40	95
Valores de referencia, mg/kg (Kabata-Pendias, 2000)				0,8-	1	50	100	36-50	1500	10	50	85	140

3. CONCLUSIONES

El muestreo sistemático adelantado en suelos de la cuenca del río Bogotá, permitió determinar contenidos y acumulación de elementos potencialmente tóxicos, evaluar su posible origen (antropogénico o geogénico) y analizar localmente parámetros y factores condicionantes de la movilidad y bio-disponibilidad de estos elementos.

Los patrones de distribución geoquímica diferenciaron una zona con suelos de características ácidas y bajos valores de elementos potencialmente peligrosos (EPPs) que coincide con la cuenca alta del río Bogotá y una zona con suelos básicos y arcillosos con altas concentraciones de EPPs que coincide con la cuenca baja del río Bogotá. Además localmente en algunos puntos de la cuenca media se presenta acumulación de metales en el suelo.

La concentración actual, movilidad y acumulación de elementos en suelos de la cuenca del río Bogotá, han sido determinadas por las condiciones fisicoquímicas del material parental y de los productos de meteorización resultantes (pH, potencial redox, mineralogía, presencia de arcillas, entre otras), por condiciones climáticas y por la calidad y propiedades de los aportes antropogénicos recibidos. La información generada contribuye a la definición de líneas base geoquímicas, sirve de apoyo a la planeación de uso del suelo y es soporte en la toma de decisiones sobre el manejo integral de la cuenca del río Bogotá.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, J., Ulloa, C. 1996. Memoria explicativa de la geología de la plancha 208 Villeta. INGEOMINAS. Bogotá.

Acosta, J., Ulloa, C. 1997. Memoria explicativa de la geología de la plancha 227 Bogotá Nor-occidente. INGEOMINAS, Informe 2302. Bogotá.

Acosta, J., Ulloa, C. 1998. Geología de la plancha 246, Fusagasuga. INGEOMINAS, Informe 2374. Bogotá.

Acosta J., Guatame, R., Caicedo, J., Cardenas, J. 2000. Geología de la plancha 245, Girardot. INGEOMINAS, Informe 2474. Bogotá.

CAR, 2000. Manejo integral de cuencas, cuenca hidrográfica del río Bogotá. Un CD. Bogotá.

IGAC, 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Bogotá.

INGEOMINAS, 1997. Mapa geológico de Colombia. Bogotá D.C.

González, LM., Vargas, O. 2004. El problema de la contaminación de los suelos por metales pesados. En: Aspectos geoambientales de la Sabana de Bogotá. Publicación Especial No. 27. INGEOMINAS. Bogotá.

González, LM., Vargas, O. 1997. Estudio de la movilización de contaminantes en suelos de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS. Informe Interno. Bogotá, 1997.

Montoya, D., REYES, G. 2003. Geología de la plancha 209, Zipaquirá. INGEOMINAS. Informe interno. Bogotá.

Kabata Pendias and Pendias. 2000. Standards for the assessment of soil and crop pollution with heavy metals as a guideline for agricultural land use.

USGS, 2001. Metals in continental soils. Washington D.C.

Van der hammen, T. 1998. Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá: análisis y orientaciones para el ordenamiento territorial. CAR. Bogotá.

Vrom, 1991. Environmental quality standards for soils and water, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. The Hague.