

# MODELACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN EL HORIZONTE A DE SUELOS, PLANCHA 170 (VÉLEZ, DEPARTAMENTOS DE SANTANDER Y BOYACÁ)

## MODELING ELEMENT TRACE IN THE HORIZON TO OF SOILS, PLATE 170 (VÉLEZ, DEPARTMENTS OF SANTANDER AND BOYACÁ)

LUIS HERNÁN SÁNCHEZ

*Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia, lhsanche@unalmed.edu.co*

LUZ MYRIAM GONZÁLEZ

*Subdirección de Geología Básica, INGEOMINAS, Bogotá D.C, Colombia*

ALVARO ESPINOSA

*Subdirección de Geología Básica, INGEOMINAS, Bogotá D.C, Colombia*

Recibido para revisar Marzo 26 de 2007, aceptado Agosto 14 de 2008, versión final Septiembre 26 de 2008

**RESUMEN:** En este estudio, se analizó la distribución espacial de varios metales potencialmente tóxicos o peligrosos (EPP) en suelos de la plancha 170 (Vélez). Se empleó una metodología de muestreo de baja densidad y se tomaron muestras de suelos del horizonte A, que fueron analizadas para 48 elementos químicos, usando plasma acoplado a masas y activación neutrónica. Los primeros tres componentes representan el 88% de la variabilidad total de los datos, identificándose las siguientes asociaciones: CP1= V-Sb-Mo-Cr-Ni-Zn-Cu-U, la cual representa el 73% de la varianza, incluye el mayor número de elementos y puede estar relacionado con la presencia de lodolitas y areniscas ricas en uranio y otros metales. El segundo componente principal CP2 = Ni-Zn-Cu podría representar la presencia de depósitos con sulfuros y por último CP3 = Mo-V-Ni-Sb-Cr indicaría una asociación natural derivada de *shales* que acumulan estos metales. Aplicando técnicas geoestadísticas se generó el mapa *krigeado* para el primer componente principal (CP1).

**PALABRAS CLAVE:** Suelos, elementos tóxicos, plancha 170 (Vélez), geoestadística.

**ABSTRACT:** The spatial distribution of many metals that can be potentially dangerous or of certain toxicity (EPP) in soils of the area of Colombian cartography (Plancha 170 Vélez) was analyzed in this study. It was used a sampling methodology of low density and it was taken soil samples at the A horizon, analysed for 48 elements using (ICP-MS) and neutronic activation. The first three components represent 88% of the total variability of the data, showing associations as: CP1= V-Sb-Mo-Cr-Ni-Zn-Cu-U, with a 73% of the variance and with the major numbers of elements that can be relational to lithologies as lodolites and sandstone maybe some rich in uranium and others metals. The second principal component CP2 = Ni-Zn-Cu could be with relationship to sulphur bearing ore deposits, and finally CP3 = Mo-V-Ni-Sb-Cr indicates a natural association to lithologies as shales that act as metal scavenger. For the first principal component (CP1) it was generated a krigging map applying geostatistic techniques.

**KEY WORDS:** Soils, toxic elements, geostatistics, plancha 170 Vélez.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del Proyecto de Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica realizado por INGEOMINAS, uno de cuyos productos es el Atlas Geoquímico de Colombia, se realizó un muestreo de aguas, suelos y sedimentos en las planchas 168, 169 y 170 (Espinoso et al., 2003). En este artículo se tomaron los resultados del análisis de suelos de la Plancha 170 (Vélez) para ilustrar el modelamiento geoquímico usando herramientas estadísticas y geoestadísticas.

Entre la gama de los contaminantes que se pueden encontrar en suelos, los elementos potencialmente tóxicos y entre ellos los metales pesados revisten especial interés por varias razones. En primer lugar, muestran una tendencia, bajo circunstancias normales, a acumularse en los suelos y a tener tiempos largos de persistencia debido a las interacciones con los componentes particulares de estos. Sin embargo, es posible que los cambios ambientales puedan dar lugar a condiciones físicas y químicas, que permitan la liberación de cantidades importantes de esos metales retenidos en los suelos, este efecto se denomina el efecto de la “bomba de tiempo química” (Schulin et al., 1995). En segundo lugar, los metales pueden estar asociados a diferentes fases del suelo y moverse a lo largo de los perfiles. Su origen puede ser natural o antrópico, por ejemplo, es posible que provengan de la roca parental (influencia litológica), de la inadecuada disposición de basuras, también como de la deposición atmosférica y fluvial local, emisiones industriales y de la minería. Además, muchos de los metales pesados son esenciales para las plantas, animales y la salud humana en bajas concentraciones, pero en concentraciones más altas, pueden ser tóxicos.

Generalmente, se presentan cambios en la concentración de metales pesados con la profundidad relacionados con cambios en la mineralogía y en las condiciones de pH y Eh (González y Vargas, 1998). La concentración de metales en los horizontes superficiales puede interferir con ciertos procesos que determinan la

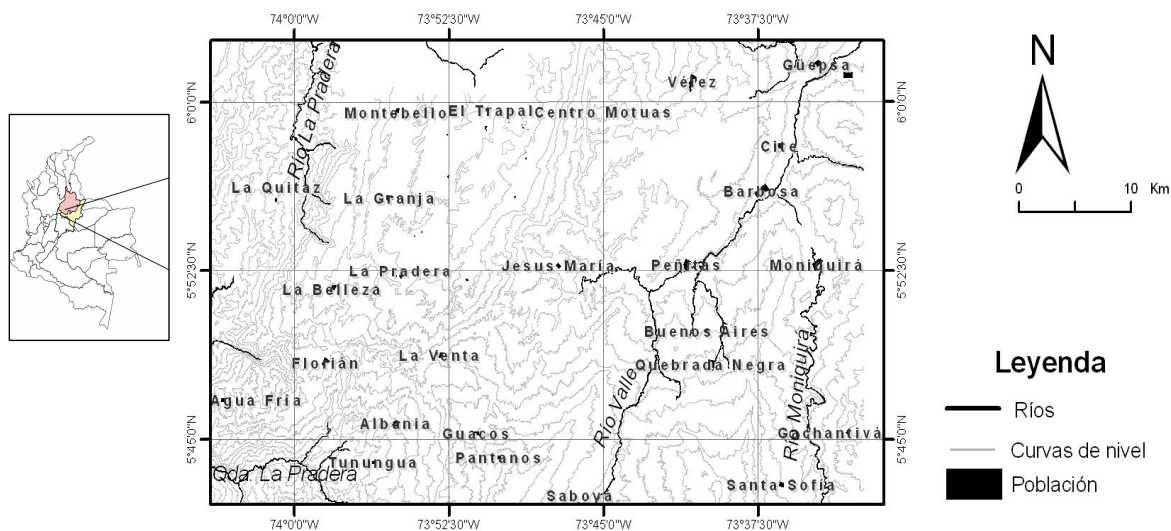
calidad del suelo y pueden afectar la salud de los seres vivos.

El uso de la geoestadística permite la delimitación de regiones con niveles anómalos, ya sea de interés para recursos minerales o de contenidos altos de elementos potencialmente peligrosos (EPP) especialmente para la agricultura, siendo este el camino óptimo para establecer programas de prospección, monitoreo y de recuperación de áreas contaminadas. Inicialmente se busca realizar un análisis multivariado, cuyo objetivo es encontrar cuales elementos muestran altas correlaciones. El proceso consiste en simplificar bases de datos que puedan contener varias variables. El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica de síntesis de la información, donde los factores o componentes principales representan una combinación lineal de las variables originales independientemente entre sí. La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original, el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero y así sucesivamente.

A estos factores se les denomina componentes principales. Un componente principal puede ser considerado como una variable regionalizada (VR) y la escala de variación de cada VR puede ser estimada utilizando la construcción del semivariograma, ayudando así a definir una anomalía regional o una provincia geoquímica.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Se encuentra localizado al sur del departamento de Santander y al norte del departamento de Boyacá. Las poblaciones más importantes son Moniquirá, Peñitas, Buenos Aíres, Montebello, Florián, Albania, Guacos, Tununga, Briceño, y Vélez ( figura 1). El área trabajada se localiza dentro de la plancha a escala 1: 100.000, de la plancha 170 (IGAC), entre las coordenadas  $X=1.000.000$  y  $X=1.060.000$  O, y  $Y=1.120.000$  y  $Y=1.160.000$  N.



**Figure 1. Localización zona de estudio**  
**Figure 1. Study Zone location**

## 2.1 Geología de la zona De Estudio

El marco geológico en donde se ha desarrollado este estudio presenta rocas del Jurásico, Cretáceo Inferior, Cretáceo Superior y Cuaternario. La plancha geológica 170 - escala 1:200.000, INGEOMINAS (2002), sirve de base para la presentación general del marco geológico y de la literatura estratigráfica y tectónica empleada en este informe (figura 2). En esta región afloran de la más antigua a las más recientes, las formaciones: Arcabuco, Cumbre, Rosablanca, Paja, Tablazo (San Gil Inferior) y Simití (San Gil Superior) y localmente Areniscas de Chiquinquirá y Depósitos Cuaternarios.

## 2.2 Hidrografía

La red hidrográfica en el área de estudio esta compuesta por drenajes que convergen en su mayoría al río Magdalena. Las principales cuencas hidrográficas en la plancha 170 son los ríos: La Pradera, Valle, y Moniquirá.

## 2.3 Minería

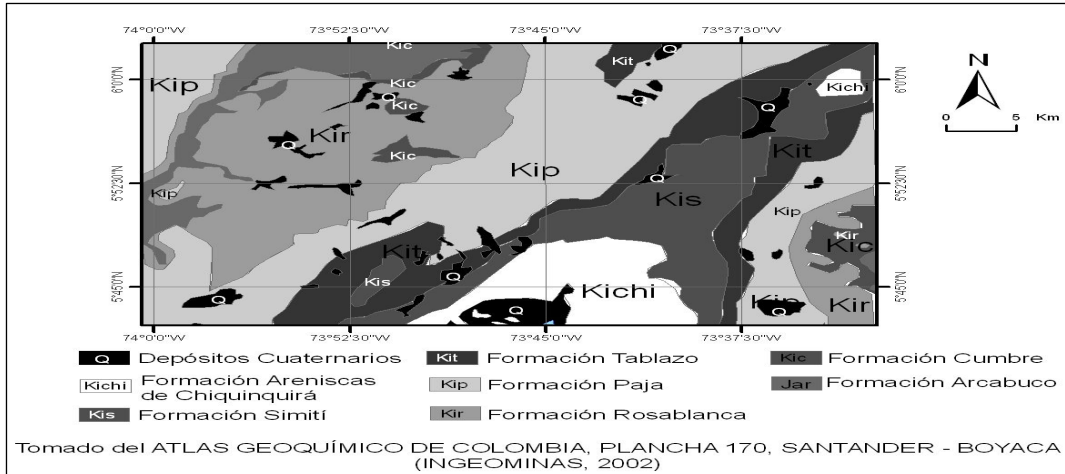
En la plancha 170, se presentan ocurrencias de minerales metálicos de pequeña magnitud,

asociados a rocas del cretáceo inferior, principalmente en las formaciones Rosablanca, Paja y el Tablazo que se sitúa concordantemente con los estratos de la formación Paja en una topografía escarpada.

Los recursos más importantes de esta área, los constituyen minerales no metálicos, entre los cuales se destacan las grandes reservas de calizas, aptas para ser usadas como cal en agricultura y cemento principalmente, que presenta contenido de carbonato cálcico superior al 70%; además barita en la Formación Rosa Blanca, caolín en la Formación Cumbre, en el Alto de Arcabuco y en Moniquirá; en la Formación Paja se presentan asfaltita y calizas. En Vélez existe minería subterránea de carbón.

Las mineralizaciones de metales básicos como plomo, cinc, cobre y manganeso se encuentran en depósitos relativamente pequeños y muy dispersos. En los municipios de Sucre y Bolívar se encuentran asociados a secuencias sedimentarias del Cretáceo Inferior, donde los sulfuros se presentan en forma de lentes, venas y diseminaciones en calizas y areniscas calcáreas especialmente de la Formación Rosa Blanca. Algunas de estas mineralizaciones han sido explotadas en forma rudimentaria.

En las poblaciones de Sabanagrande, Guatavá y entre Sucre y Sabanafiera en las formaciones Rosablanca y Paja se presentan manifestaciones de galena y esfalerita.



**Figura 2.** Mapa geológico de la plancha 170-Vélez  
**Figure 2.** Geological Map of the plancha 170-Vélez

**3. METODOLOGÍA**

Las muestras de suelo se tomaron de manera que fueran representativas del tipo de suelo dominante en la cuenca seleccionada, en lo posible se tomaron suelos residuales. Se recolectaron aproximadamente 2 kg. de muestra de suelo superficial u horizonte A (0-25 cm), mezclando cantidades iguales de muestras provenientes de 3 a 5 apiques (submuestras), separadas por distancias mínimas de 5 m entre ellas. No se incluyó la capa orgánica superficial.

Se analizaron 48 elementos, por activación neutrónica (INAA) y por plasma acoplado inductivamente (ICP) en el instituto de exploración geofísica geoquímica de Pekín, China. El primer caso se trata de una técnica no destructiva de análisis total, mientras que para el segundo se requiere colocar la muestra en solución; para tal efecto, se usa el ataque de digestión con cuatro ácidos: HF, HNO<sub>3</sub>, HCl y HClO<sub>4</sub>.

**4. ANALISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS**

Un análisis de componentes principales tiene sentido, si existen altas correlaciones entre las variables, la normalidad de los datos se garantiza haciendo transformaciones ln(x). Para este

análisis se seleccionaron las variables mejor correlacionadas.

**Tabla 1.** Matriz de correlación de los elementos seleccionados para ACP  
**Table 1.** Correlation matrix of selected elements for ACP

ln(Cr)	1								
ln(Cu)	0,62	1							
ln(Mo)	0,82	0,61	1						
ln(Ni)	0,71	0,65	0,71	1					
ln(Sb)	0,8	0,68	0,83	0,68	1				
ln(U)	0,71	0,48	0,63	0,39	0,66	1			
ln(V)	0,87	0,64	0,92	0,72	0,92	0,68	1		
ln(Zn)	0,66	0,6	0,65	0,74	0,64	0,54	0,67	1	
ln(Cr)									
ln(Cu)									
ln(Mo)									
ln(Ni)									
ln(Sb)									
ln(U)									
ln(V)									
ln(Zn)									

Con un análisis de componentes principales para estas ocho variables se recogen los valores propios (*eigenvalue*) de cada componente principal (Tabla 2) y se ve como debajo de este valor aparece la proporción de varianza explicada (Ratio) para cada uno de los CP y luego la varianza explicada acumulada (cumulative), la cual es muy importante para saber cuantos componentes principales se van a utilizar en el análisis. Se seleccionan los tres primeros componentes principales, ya que con estos se explica el 87.5% de la varianza. Se nota que el CP1 (73% de la varianza) tiene correlación positiva con todos los elementos seleccionados V-Sb-Mo-Cr-Ni-Zn-Cu-U.

Esta asociación puede mostrar una significativa correlación con las unidades geológicas de origen sedimentario marino de edad cretácea subyacentes de los suelos de la región, puede estar relacionada con la presencia de lodolitas y areniscas ricas en uranio y otros metales. El componente principal dos (CP2) muestra afinidad positiva con depósitos de sulfuros (Ni-Zn-Cu) y tiene correlación negativa con el resto de los elementos analizados. CP3 tiene una correlación positiva significativa con Mo-V-Ni-Sb-Cr, acoplable a una asociación natural derivada de *shales* que acumulan estos metales.

**Tabla 2.** Matriz de correlación componentes principales (CP)

**Table 2.** Correlation matrix of main components (MC)

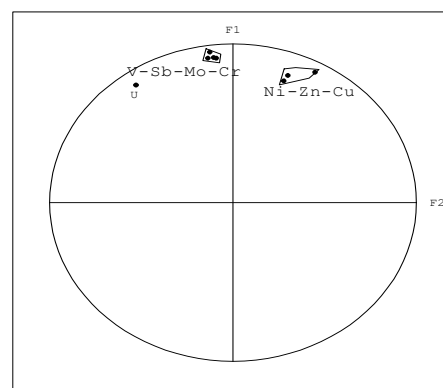
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
Ln(Cr)	0,3764	-0,1647	0,1305	0,0483	-0,5914	0,2866	0,6035	-0,1259
Ln(Cu)	0,3173	0,3305	-0,6031	-0,6183	-0,0254	0,1994	-0,0377	0,0467
Ln(Mo)	0,3767	-0,1095	0,3812	-0,0693	0,197	0,5398	-0,4814	-0,3661
Ln(Ni)	0,3395	0,5338	0,2044	0,165	-0,4599	-0,423	-0,3747	-0,0071
Ln(Sb)	0,3782	-0,1268	0,1517	-0,2734	0,3968	-0,5801	0,2998	-0,3991
Ln(U)	0,3063	-0,6324	-0,4981	0,2662	-0,1656	-0,205	-0,3431	-0,0047
Ln(V)	0,3922	-0,1517	0,2936	-0,1166	0,1849	-0,0132	0,0204	0,8298
Ln(Zn)	0,3312	0,3573	-0,2737	0,6512	0,4246	0,1705	0,2329	-0,0006
Eigen	5,8494	0,6994	0,449	0,4302	0,2257	0,1604	0,1398	0,0461
Ratio	73,12%	8,74%	5,61%	5,38%	2,82%	2,00%	1,75%	0,58%
Cumul	73,12%	81,86%	87,47%	92,85%	95,67%	97,68%	99,42%	100,00%

Según el círculo de correlación mostrado en la figura 3, la correlación de todas las variables con el primer factor (73% de la varianza total) es muy fuerte y del mismo signo, por lo tanto es el CP ideal para mostrar la rutina de la modelación geoestadística que nos ocupa en este estudio.

### 5. VARIOGRAFÍA

Con el fin de modelar la estructura espacial de cada uno de los CP seleccionados se construyeron semivariogramas omnidireccionales, para los cuales se seleccionaron los mejores modelos a través de un análisis de validación cruzada. La tabla 3 y la figura 4 reportan la información geoestadística del efecto de pepita, el modelo teórico asignado y los principales parámetros deducidos de la estructura regionalizada correspondiente para los componentes principales CP1, CP2 y CP3.

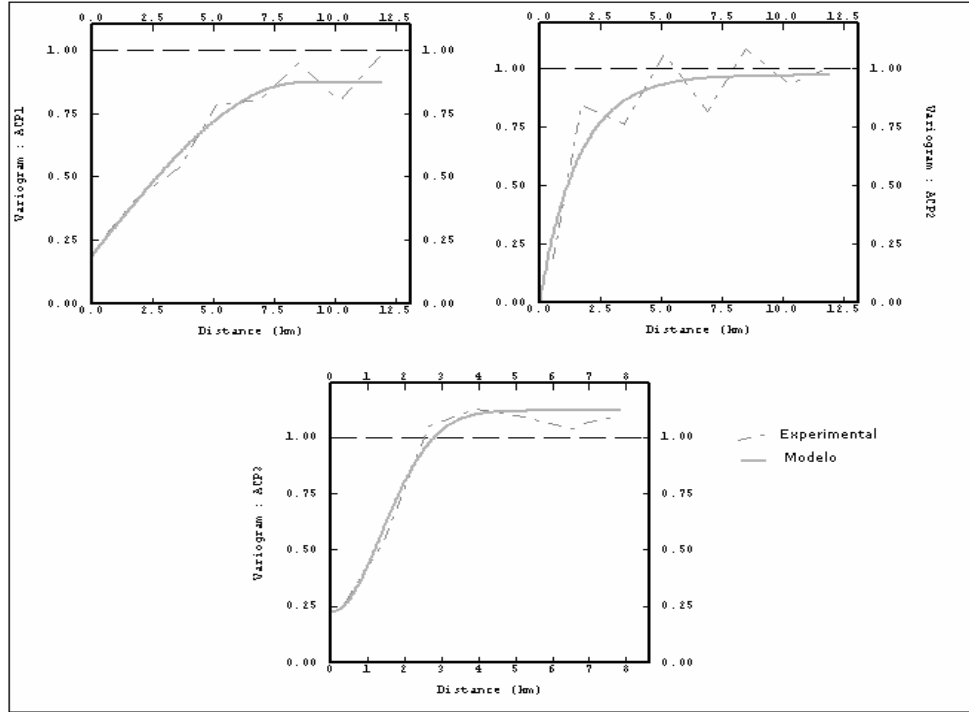
El análisis de componentes principales transforma el conjunto de variables originales en un conjunto más pequeño de variables, las cuales son combinaciones lineales de las primeras, que contiene la mayor parte de la variabilidad presente en el conjunto inicial.



**Figura 3.** Círculo de correlación CP1 y CP2  
**Figure 3.** Correlation circle CP1 and CP2

**Tabla 3.** Datos estructurales de los componentes principales seleccionados  
**Table 3.** Structural data of selected main components

Variable	Efecto de pepita	Modelo	Rango (Km)	Meseta
CP1	0,1911	Esférico	8,54	0,6788
CP2	0,0000	Exponencial	4,75	0,9719
CP3	0,2242	Gaussiano	3,39	0,8921



**Figura 4.** Variogramas experimental y teórico para los tres componentes principales  
**Figure 4.** Theoretical and experimental variograms of the three main components

## 6. MODELACIÓN ESPACIAL DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES

Con el fin de realizar la cartografía automática de la distribución espacial de los componentes (CP), identificados, que puede indicar la existencia de recursos mineros potenciales o de contaminación de suelos para cada uno de las asociaciones, se generaron mapas mediante *Kriging* Ordinario.

Aquí mostraremos los resultados obtenidos para el primer componente (CP1, figura 5), donde se destaca una zona de alta frecuencia para esta asociación (anomalía) en el municipio de Vélez y sus alrededores, también es de importancia para este CP la región de Montebello, Albania y Turrungua. Si descomponemos los CP a sus respectivos elementos asociados podemos construir los mapas de anomalías para cada elemento en particular, en nuestro caso consideraremos únicamente el elemento vanadio descompuesto, siendo este el de mayor peso

absoluto sobre el CP1. La figura 6, es el resultado del modelamiento de la variable V descompuesta del CP1. Aquí se destaca igualmente la zona del Municipio de Vélez con niveles de vanadio sorprendentemente altos; con registros de  $\ln(V)$  muy por encima de 4,55, sobre todo cuando pensamos en suelos agrícolas, donde la concentración máxima tolerable no debe estar por encima de 3,91 (Reimman et al., 1998). La mayor acumulación de vanadio en los seres humanos tiene lugar a través de las comidas (trigo, semilla de soja, aceite de oliva, aceite de girasol, manzanas y otras). El vanadio puede tener un número de efectos sobre la salud humana, cuando la toma es muy alta. Los efectos graves del vanadio son irritación de pulmones, garganta, ojos y cavidades nasales, además de daño cardíaco y vascular, inflamación del estómago e intestinos, daño en el sistema nervioso, irritación de la piel, temblores severos y parálisis, sangrado de la nariz, dolor de cabeza y mareos, (Lenntech, 2005).

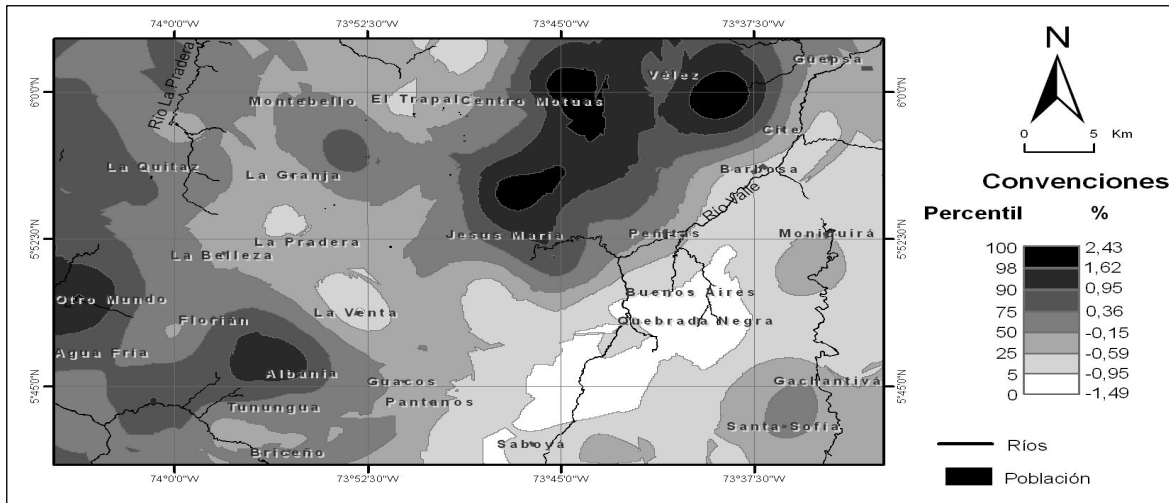


Figura 5. Mapa del primer componente principal (CP1)  
 Figure 5. Map of the first main component (CP1)

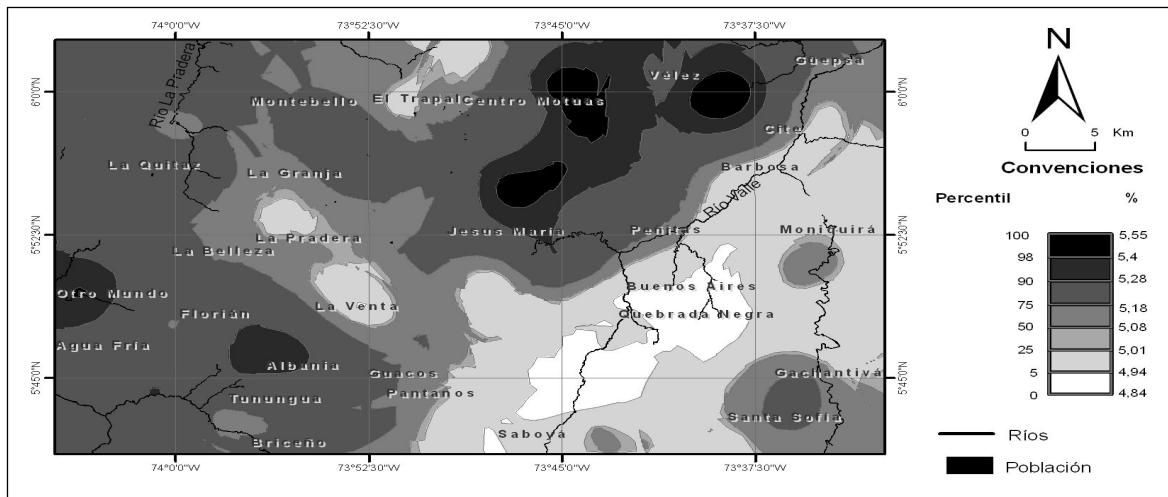


Figura 6. Variable vanadio descompuesto del primer componente principal CP1  
 Figure 6. Vanadium levels decomposed of the first main component CP1

### 7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Aunque la concentración total de un elemento químico en suelos no es un criterio exacto para evaluar toxicidad, debido que se tienen en cuenta tanto contenidos disponibles como no disponibles, se puede usar este razonamiento para evaluar la magnitud del enriquecimiento de los EPP y proponer estudios mas detallados tendientes a establecer un riesgo real de la presencia de estos elementos tóxicos para el ambiente (Espinosa et al., 2003). Los valores de referencia usados para comparar los contenidos

remediables de los elementos en los horizontes A y C, son los estándares de calidad ambiental del VROM, 1994, citados por (Reimann et al., 1998), para los elementos As, Cr, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, basados en estudios ecotoxicológicos, y los compilados por Kabata-Pendias (2001), para los elementos Sb, Mo, Se, Mn, Be, Co, Hg, Tl, V y B. Las concentraciones de referencia VROM en mg/kg de los EPP son As (29), Cr (100), Cd (1,0), Cu (50), Ni (50), Pb(85), Zn (200); las concentraciones de referencia Kabata-Pendias (2001) en mg/kg para los EPP son Be (10),

Co (50), Tl (1), V (50), B (25), Sb (5), Hg (2), Mo (5 – 10), Se (10), Mn (1,500).

## 8. CONCLUSIONES

La presencia de altos valores de algunos elementos químicos en los suelos, esta espacialmente relacionada con la secuencia sedimentaria cretácica en la plancha 170 (Vélez), el aporte de los elementos puede provenir de depósitos estratiformes dentro de ella, tipo Ni-Zn-Mo hospedados en *shales*, como también depósitos de sulfuros de Zn-Pb-Ag.

El 57% de los suelos analizados, presentan contenidos mayores a los de las normas internacionales para por lo menos uno de los EPP. Los elementos que se encuentran en mayor proporción superando los valores recomendados en el horizonte A, son el molibdeno en el 44%, vanadio en el 40%, cinc en el 36%, cadmio y antimonio en aproximadamente el 24%, de los suelos estudiados.

La identificación de la presencia de EPP en estos suelos, debe ser usada para la planeación de estudios más detallados en el establecimiento del riesgo potencial para los seres vivos que los utilizan para uso en cultivos agrícolas y ganadería. En la actualidad, el 92% de los sitios analizados se dedica a la agricultura y el 77% a la ganadería, lo cual constituye una razón importante para una evaluación más detallada de la dinámica de los EPP en estos suelos y en los productos agrícolas y pecuarios que allí se producen.

## REFERENCIAS

- [1] ESPINOSA, A., SÁNCHEZ, L.H., GARCIA, G., GARZÓN, T., Informe final levantamiento geoquímico en la plancha 170. INGEOMINAS. Bogotá D.C. 2003.
- [2] GONZÁLEZ, L.M.; VARGAS, O., Estudio de parámetros reguladores de la retención de metales pesados en suelos de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS. Bogotá D.C. 1998.
- [3] IGAC., Plancha 170, Escala 1:100.000. Bogotá – Colombia, 1974.
- [4] INGEOMINAS., Atlas Geoquímico de Colombia. plancha 170 (Vélez). Escala 1:200.000, departamento de Santander y Boyacá, 2002. 1 hoja.
- [5] KABATA-PENDIAS A., Trace elements in soils and plants. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, p. 413, 2001.
- [6] LENNTECH., Efectos ambientales del Vanadio. [online]. disponible en <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/V.htm> o ([info@lenntech.com](mailto:info@lenntech.com)). Purificación del agua y tratamiento del aire. Delft, Holanda. [citado 21 marzo 2005].
- [7] PANAH, A., CHENG, Q., and BONHAM-CARTER, G., Modelling lake sediment geochemical distribution using principal component, kriging y multifractal power-spectrum analysis, *Geochemistry*, V4 (parte 1), p. 59-70. 2004.
- [8] REIMAN, C., AYRAS, M., CHEKUSHIN, V., BOGATYREV, I., BOYD, R., CARITAT, P., DE, DUTTER, R., FINNE, T.E., HALLERAKER, J.H., JAEGER, O., KASHULINA, G., LEHTO, O., NISKAVAARA, H., PAVLOV, V., RAISANEN, M.L., STRAND, T. Y VOLDEN, T.,. *Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region*, Servicio Geológico de Noruega, p. 745, 1998.
- [9] SHULIN, R., GEIGER, G., and FURRER G. Heavy metal retention by soil organic matter under changing environmental conditions. En: W. Salomons and W. M. Stigliani (eds.), *Biogeodynamics of Pollutants in Soils and Sediments - Risk Assessment of Delayed and Non-Linear Responses*, Springer, Berlin. P.53 – 85, 1995.