

Herramientas de Análisis Estadístico y Espacial aplicadas en la separación Línea Base – Anomalía Geoquímica. Implicaciones en Exploración de Recursos Naturales. Parte 2: Zinc en Sedimentos Activos Plancha 5-09 y 208 – Villeta, Colombia

Spatial and Statistical Analysis Tools applied in Geochemical Baseline – Anomaly discrimination. Implications for Natural Resources Exploration. Part 2: Zinc in Stream Sediments Sheets 5-09 and 208 – Villeta, Colombia

OSCAR JAVIER GARCÍA – CABREJO¹

GIOVANNI MORENO-SÁNCHEZ²

¹Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

E-mail: oscar.garcia@gmail.com

²Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS

E-mail: gmorenos@unal.edu.co, gmoreno@ingeominas.gov.co

GARCÍA-CABREJO, O. & MORENO-SÁNCHEZ, G. (2006): Herramientas de Análisis Estadístico y Espacial aplicadas en la separación Línea Base – Anomalía Geoquímica. Implicaciones en Exploración de Recursos Naturales. Parte 2: Zinc en Sedimentos Activos Plancha 5-09 y 208 – Villeta, Colombia.- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 31, pp. 39-56, 14 Figs., Bogotá.

RESUMEN

Se emplea la concentración de Zn en sedimentos activos en las planchas 5-09, (escala 1:500000) y 208 (escala 1:100000) como caso de estudio, con el fin de comparar los valores de línea base – anomalía para dos escalas de muestreo y por unidad geológica en el sector central de la plancha 208 – Villeta. Dichos valores de línea base – anomalía se reportan para cada uno de los métodos. El muestreo de baja densidad (Plancha 5-09) delimita sectores con las concentraciones mayores de Zn (zona anómala), en el flanco W de Cordillera Oriental al W de Bogotá y específicamente el sector central de la Plancha 208 – Villeta. Esto implica que a nivel regional el muestreo de baja densidad permite delimitar de forma efectiva anomalías regionales o blancos de exploración potenciales. A nivel particular en el sector central de la Plancha 208 – Villeta, la Formación El Peñón presenta los valores más altos de Zn, en donde se delimitan las zonas anómalas de interés, mientras que las unidades del Cretácico inferior y superior representan zonas de empobrecimiento en Zn respecto de toda la región.

Palabras Clave: *Anomalía geoquímica, blancos exploratorios, correlación espacial, distribución de probabilidad, exploración geoquímica, fractal, geoestadística, línea base, Muestreo, recursos minerales, Zinc.*

ABSTRACT

We work with Zn concentration in stream sediments in sheets 5-09 (1:500000 scale) and 208 (1:100000 scale) as a case study, in order to compare the baseline – anomaly values for two sampling scales and by geological unit in the central part of the 208 – Villeta sheet. Such baseline – anomaly values are reported for each method. The low resolution sampling (5-09 sheet) draw zones with the highest Zn concentrations (anomalous zone), in the W flank of the Cordillera Oriental W of Bogotá in the central 208 – Villeta sheet. At a regional level the low density sampling permit it to sketch in a straightforward way regional anomalies or exploratory targets. At a detail level in the central 208 – Villeta sheet, the Peñón Formation have the highest Zn concentration where is delimited the anomaly interest zones, whereas the lower and upper Cretaceous correspond to depleted Zn zones.

Key words: *Baseline, exploratory targets, fractal, geochemical anomaly, geochemical exploration, geostatistics, mineral resources, probability distribution, sampling, spatial correlation, Zinc.*

INTRODUCCION

Con el fin de probar los diferentes métodos de separación de línea base y anomalías geoquímicas (GARCÍA-CABREJO & MORENO-SÁNCHEZ 2006), estos se aplican en un caso regional conformado por 180 muestras ubicadas en la Plancha 5-09 a escala 1:500000 (VARGAS *et al.* 2001; INGEOMINAS 2002). Así mismo con el fin de determinar como varían los resultados de estos métodos con la escala, dentro del área inicial se emplearon los resultados de un muestreo detallado realizado en la Plancha 208 – Villeta a escala 1:100000 (SARMIENTO *et al.* 1985; ACOSTA & ULLOA 2001). Estos dos casos se seleccionaron en virtud de sus diferencias en cuanto a escala, número de datos (robustez de los métodos) y contexto geológico (variaciones de concentración por unidad geológica). Se plantea además la influencia que tiene cada uno de los aspectos antes mencionados en la determinación de los valores de línea base – anomalía y la definición de áreas de interés.

Para usar los métodos de discriminación de líneas base – anomalías geoquímicas antes mencionados, estos se implementaron en Fortran 90, dadas las facilidades que ofrece este lenguaje de programación para la realización de cálculos numéricos (AKIN 2003). Los procedimientos geostatísticos de krigeaje factorial y krigeaje robusto

se implementaron usando la librería de Fortran 90 ATALIB desarrollada por GARCÍA-CABREJO & MORENO (2005).

El procedimiento de separación línea base – anomalía geoquímica coincide en sus fases principales con la caracterización estadística de la información, paso fundamental, en el cual el analista se familiariza con los rasgos principales de la información geoquímica obtenida en los procedimientos de muestreo. La caracterización estadística de información geoquímica esta conformada por las siguientes etapas (Fig. 1).

1. Análisis exploratorio de datos: El cual incluye la determinación de las estadísticas descriptivas básicas (promedio, desviación estándar, rango, etc.) haciendo la correspondiente discriminación por unidad geológica. Así mismo se elaboran diferentes gráficos diagnósticos (diagramas de probabilidad acumulada, diagramas cuantil – cuantil, mapas de puntos, etc.), con los cuales se pueden visualizar la variabilidad y otras características del conjunto de datos geoquímicos. En esta etapa se aplican tanto los métodos estadísticos, gráficos y la estadística espacial U, antes explicados.

2. Análisis de la estructura de correlación espacial: En esta etapa se determina la existencia o no de correlación

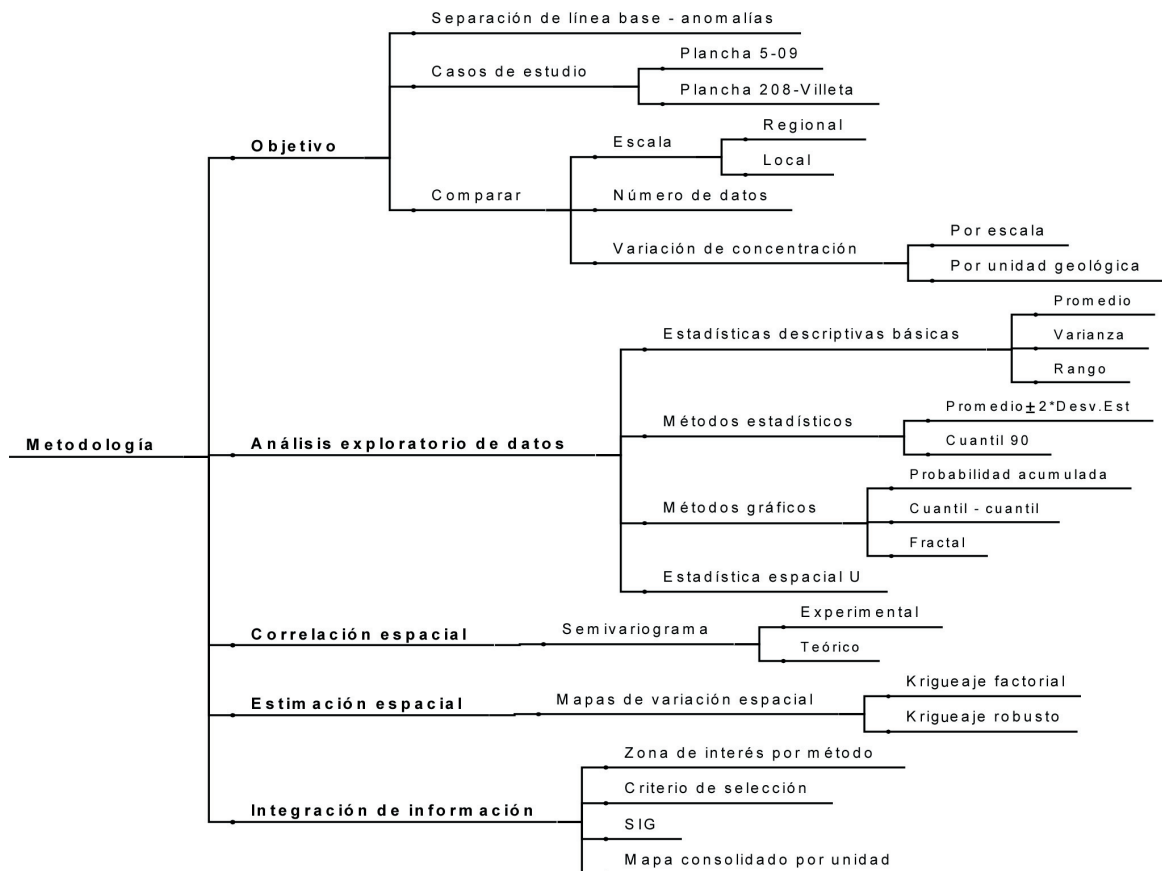


Fig. 1. Diagrama de flujo de metodología empleada.

espacial de la información geoquímica, así como la existencia de direcciones preferenciales de variación espacial de las concentraciones (anisotropía geométrica) mediante el cálculo y modelamiento del semivariograma.

3. Estimación espacial: En esta etapa se incluye la elaboración de mapas de la variación espacial de las concentraciones de elementos estudiados por unidad, para lo cual se requiere haber realizado las dos etapas anteriores (1 y 2). Los procedimientos de estimación espacial a realizar corresponden a krigueaje ordinario (para el método fractal de concentración – área), krigueaje factorial y krigueaje robusto.

El analista de información geoquímica define hasta que etapa quiere llevar el análisis, pero en el caso que no estudie la componente espacial de la información estaría perdiendo aspectos de relevancia de la misma relacionada directamente a procesos geológicos (litológicos, estructurales, ambiental, etc.).

El procedimiento de separación línea base – anomalía va a depender del método, ya que algunos de ellos definen un valor de umbral (métodos estadísticos, métodos gráficos y método fractal), mientras que otros realizan la discriminación de forma directa (estadística espacial U, krigueaje factorial, krigueaje robusto). Debido a que la comparación en términos de umbrales no se puede realizar con todas las metodologías, esta se realizó usando las muestras anómalas y las áreas definidas por éstas. El procedimiento de separación y de delimitación de áreas de interés se realizó primero por método por unidad geológica, para luego obtener un mapa consolidado de zonas de interés para esa respectiva unidad. El método empleado para generar este mapa consolidado de zonas de interés emplea un Sistema de Información Georeferenciada y se encuentra conformado por los siguientes pasos:

Con los resultados de las 8 metodologías de separación se definen las áreas de interés por método. Con las metodologías que definían muestras en vez de áreas, esto se realizó por medio de la asignación de un área de influencia para la muestra anómala (método estadístico) mientras en las otras se obtienen las áreas de interés directamente (método geoestadístico).

Se define el criterio de selección de muestra anómala consolidada. En este caso se determinó que un área es de interés si al menos 4 métodos los determinan así. El paso final consiste en la generación del mapa consolidado de las zonas de interés por unidad geológica.

CASO DE ESTUDIO: Zn EN SEDIMENTOS ACTIVOS PLANCHAS 5-09 Y 208

En el presente trabajo se emplean datos de concentración de Zinc en sedimentos activos colectados en las planchas 5-09 y 208 (VARGAS *et al.* 2001, SARMIENTO *et al.* 1985) como caso de estudio, con el fin de comparar los

valores de línea base – anomalía para las dos escalas muestreo y por unidad geológica en el sector central de la plancha 208 – Villeta. Dichos valores de línea base – anomalía se reportan para cada uno de los métodos.

Marco Geológico

Plancha 5-09

El sector central de Colombia cubierto por la plancha 5-09 escala 1:500000 comprende parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Tolima, Meta, Casanare, Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío. Desde el punto de vista geológico puede dividirse en 4 zonas (Fig. 2).

- Llanos Orientales (Zona A, Fig. 2). Constituido principalmente por depósitos de origen aluvial. Corresponde a una zona de morfología plana en la cual transcurren drenajes de primer orden que nacen en el sector E de la Cordillera Oriental.

- Cordillera Oriental (Zona B, Fig. 2). Metamorfitas del Proterozoico y del Cámbrico – Ordovícico afloran en los macizos de Santander, Floresta y Quetame (WARD *et al.* 1973, MOJICA & VILLARROEL 1984, RESTREPO-PACE 1995, BRANQUET *et al.* 2002), así mismo, sedimentitas del Paleozoico se localizan adyacentes a ellos. Un evento ígneo intrusivo de edad ordovícica afecta los macizos de Santander y Floresta (WARD *et al.* 1973, ULLOA & RODRÍGUEZ 1982). El Jurásico está representado en sedimentitas de origen fluvial (Grupo Girón; CEDIEL 1968) y volcánico (Formación Saldaña; MOJICA & LLINAS 1984). Plutonitas del Jurásico se presentan en el Macizo de Santander. Sedimentitas del Cretácico indican una secuencia marina transgresiva – regresiva, la cual puede ser sintetizada en los grupos Cáqueza (Berriasiano – Hauteriviano), Villeta (Barremiano – Turoniano) y Guadalupe (Coniaciano – Maastrichtiano; COOPER *et al.* 1995). Se presentan plutonitas básicas del Cretácico que cortan sedimentitas marinas anteriores al Cenomaniano (FABRE & DELALOYE 1983; VÁSQUEZ & ALTENBERGER 2005). El Terciario inicia con sedimentitas de ambiente transicional (formaciones Guaduas, Seca, Umir), las cuales van alternando de ambientes continentales energéticos a marino transicional y durante el Terciario registran el levantamiento de la Cordillera Oriental (COOPER *et al.* 1995, VILLAMIL 1999, BRANQUET *et al.* 2002).

- Valle del Magdalena (Zona C, Fig. 2). Corresponde a una cuenca intermontana que separa las cordilleras Oriental y Central y a través de la cual fluye el Río Magdalena. Sus límites son los piedemonte E de la Cordillera Central y W de la Cordillera Oriental, correspondientes desde el punto de vista estructural a cabalgamientos de vergencias opuestas (MOJICA & FRANCO 1990).

- Cordillera Central (Zona D, Fig. 2). El Proterozoico corresponde a metamorfitas de alto grado (Neis de Tierradentro, Neis de San Lucas). Un conjunto poli – metamórfico del Paleozoico conforma el núcleo de la Cordillera Cen-

tral (Complejo Cajamarca). Magmatitas de edad Acadiana (evento Devónico, 350Ma) y Hercínica (evento Pérmico – Triásico, 240Ma) corresponden a la clasificación general de ortoneis (Intrusivo Néisico Sintectónico; GONZÁLEZ 2001a, NÚÑEZ 2001). Sedimentitas del Paleozoico afloran en Antioquia y Tolima (Formación La Cristalina, Formación Santa Teresa, correspondientes al Ordovícico). Plutonitas del Jurásico (batolitos de Ibagué, Sonsón, Segovia) registran un importante evento magmático (GONZÁLEZ 2001a, GONZÁLEZ 2001b, NÚÑEZ 2001). El Triásico – Jurásico en el Valle Alto del Magdalena presenta sedimentitas de origen continental (Formación Luisa), marino calcáreo (Formación Payandé) y volcánico (Formación Saldaña; MOJICA & LLINAS 1984; BAYONA *et al.* 1994). Un importante evento magmático del Cretácico genera el Batolito Antioqueño y otro vulcano – sedimentario de características básicas el Complejo Quebradagrande (GONZÁLEZ 2001a, NIVIA *et al.* 1997). Metamorfitas de medio a alto grado (Complejo Arquía; McCOURT *et al.* 1984) y sedimentitas del Cretácico inferior (Formación Valle Alto, Formación Abejorral; RODRÍGUEZ & ROJAS 1985) afloran en el sector central de la Cordillera Central. La sedimentación marina en el sector E de la Cordillera Central inicia en el Aptiano y de allí en adelante es comparable con los Grupos Villeta y Guadalupe de la Cordillera Oriental (GUERRERO *et al.* 2000). El Terciario en el flanco E de la Cordillera Central presenta sedimentitas de origen continental (Grupo Gualanday, Grupo Honda, Formación Mesa; GUERRERO 1995), plutonitas (Batolito del Bosque) y vulcanitas (andesitas del Complejo Ruiz – Tolima; NÚÑEZ 2001).

Sector central Plancha 208 – Villeta

La zona correspondiente al muestreo de alta densidad obtenido durante el desarrollo del “Proyecto Esmeraldas” (SARMIENTO *et al.* 1985), comprende el sector central de la Plancha 208 – Villeta (ACOSTA & ULLOA 2001). Esta región se encuentra comprendida entre la Falla de Bituima al W y la Falla de Supatá al E. Las unidades más antiguas correspondientes a las formaciones Útica y Murca del Cretácico inferior (MORENO 1990) afloran en los anticlinales de Villeta y Murca con orientación NNE – SSW y N – S respectivamente (Fig. 3). Dichos anticlinales se encuentran separados por el Sinclinal de Río Zumbé, desarrollado sobre rocas de la Formación Trincheras (SARMIENTO *et al.* 1985, MARTÍNEZ & VERGARA 1999). El Anticlinal de Villeta se encuentra afectado por múltiples cabalgamientos constituyentes del Sistema de Fallas de Quebrada Negra de dirección NNE – SSW y vergencia al E. El Anticlinal de Murca encuentra desplazado de forma dextral su eje por acción de la Falla de Talauta, la cual es una estructura de tipo inverso con componente lateral, orientación NNE – SSW y vergencia al W. La Falla de Bituima de tipo inverso y orientación N – S, presenta vergencia W y a través de ella se ponen en contacto rocas de las formaciones Trincheras, Socotá, Capotes e Hiló, con el Grupo Guaguaquí (conjunto litológico infrayacente al Grupo Olini). La Falla de Supatá con dirección N – S es de tipo inverso con vergencia al W y pone en contacto rocas de la Formación Capotes con rocas del Cretácico Superior (ACOSTA & ULLOA 2001).

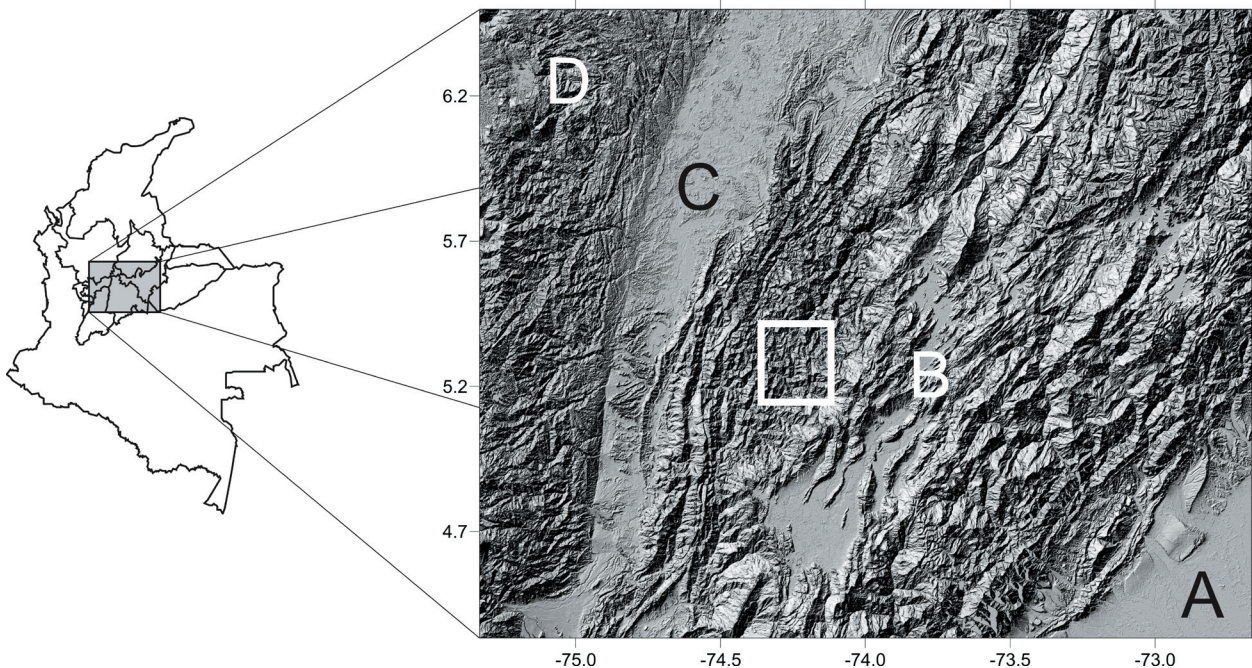


Fig. 2. Localización de la plancha 5-09. El recuadro interno en blanco corresponde al sector central de la plancha 208 – Villeta.

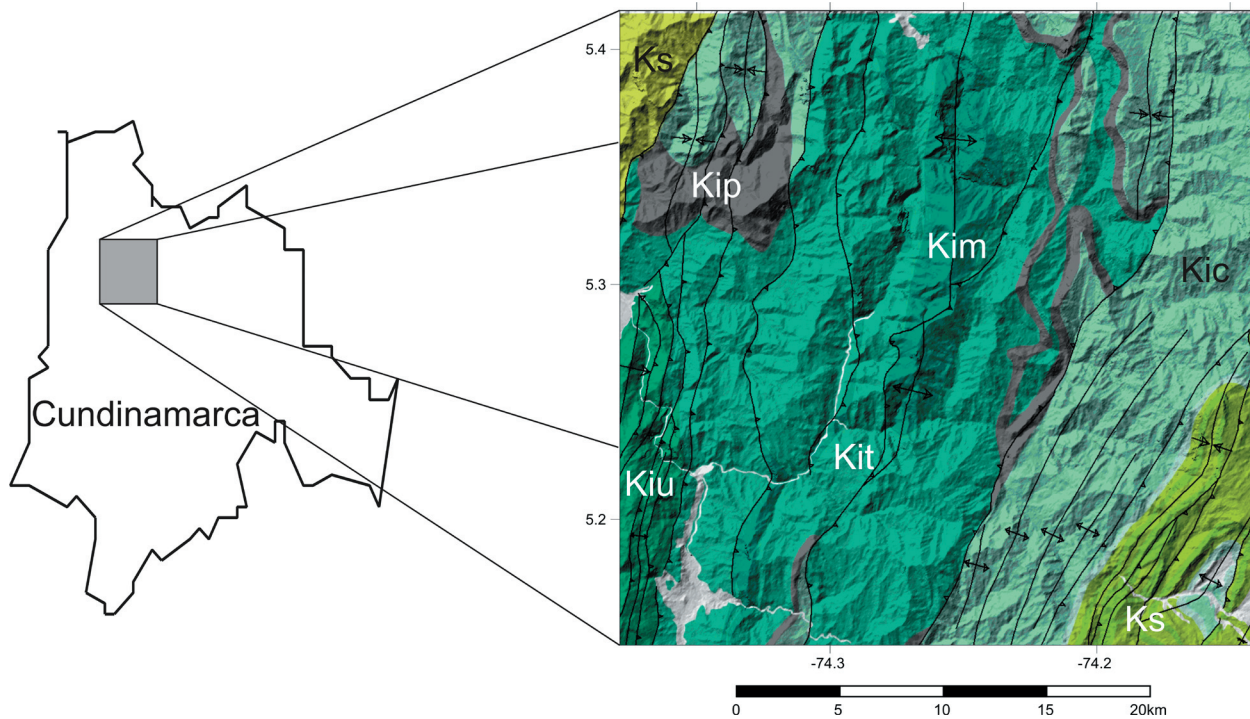


Fig. 3. Mapa geológico simplificado del sector central de la Plancha 208 – Villeta (Modificado de ACOSTA & ULLOA 1998). Kiu: Formación Útica; Kim: Formación Murca; Kit: Formación Trincheras; Kip: Formación Peñón; Kic: Formación Capotes; Ks: Cretácico Superior.

Las unidades aflorantes en el sector central de la Plancha 208 – Villeta son:

- **Formación Útica.** En la sección Útica – Tobia, la parte inferior de la unidad consta de lodolitas negras intercaladas con arenitas grises. El resto de la unidad (cerca de 500m) esta conformada por arenitas de grano fino a grueso con intercalaciones de lodolitas negras y hacia la parte superior de la unidad calizas. MORENO (1990) indica para la unidad un ambiente marino somero y edad Berriasiano.

- **Formación Murca.** Aflorante en al Anticlinal de Murca. Presenta 920m de espesor y esta constituida por arenitas de grano grueso con estratificación cruzada, intercaladas con limolitas y lodolitas. MORENO (1990) interpreta para la unidad un ambiente con influencia de corrientes de turbidez y una edad Valanginiano Superior.

- **Formación Trincheras.** La localidad tipo de la unidad corresponde a la Quebrada Trincheras en el Municipio de Apulo – Cundinamarca (CÁCERES & ETAYO 1969). En la carretera Guayabal – Quitasol, la Formación Trincheras está constituida por una secuencia de 1260 m compuesta en la parte inferior y media por una sucesión de lodolitas negras laminadas con intercalaciones de arenitas de cuarzo de grano fino en capas delgadas, plano paralelas, correspondiente a condiciones de plataforma mixta, sili-

ciclástica – calcárea. La parte superior consta de arcillolita negra en capas delgadas con intercalaciones de limolitas silíceas, sugiriendo condiciones marinas distales (ACOSTA & ULLOA 2001). CÁCERES & ETAYO (1969) indican una edad Barremiano – Aptiano Inferior.

- **Formación Peñón.** ACOSTA & ULLOA (2001) proponen el nombre y rango informal de Formación El Peñón, para designar una sucesión de lodolitas negras, calcáreas, aflorantes en la vía El Peñón – Guayabal y definen como localidad tipo la carretera que une la localidad de Palacio con el alto de Las Cruces al NW de El Peñón. La Formación El Peñón es la unidad aflorante a través del cañón del Río Zumbe, donde SARMIENTO *et al.* (1985) delimitaron un sector con anomalías de Zn. Presenta 381m de espesor y esta constituida por dos segmentos. El inferior de 84m consta de lodolitas calcáreas negras intercaladas con biomicritas, y limolitas negras. El segmento superior de 296m consta de lodolitas calcáreas negras con laminación plano paralela estratificadas en capas delgadas a medias. ACOSTA & ULLOA (2001) indican para la unidad una edad Aptiano Superior y un ambiente marino reductor de aguas poco profundas.

- **Formación Capotes.** ACOSTA & ULLOA (2001) indican que en el sector de Vergara, Cerinza y Pacho, la unidad presenta 1500m de espesor y consta de 3 segmentos. El segmento 1 de 550m de espesor, consta de lodolitas negras

con laminación plano paralela e intercalaciones de limolitas de cuarzo negras hacia la parte superior del segmento. El segmento 2 de 420m de espesor consta de limolitas de cuarzo negras con intercalaciones de lodolitas. El segmento 3 con 530m de espesor consta de lodolitas negras intercaladas con limolitas de cuarzo negras. A través de la unidad son frecuentes los niveles con yeso. ETAYO (1979) asigna al “Miembro Capotes” una edad Albiano temprano.

- Cretácico Superior. En el presente trabajo se agrupan bajo esta denominación las unidades suprayacentes a la Formación Capotes e infrayacentes a unidades del Terciario. Corresponde a las unidades Formación Hiló, Formación Pacho, Formación Simijaca y Formación La Frontera. Esta asignación se realizó dado el bajo número de muestras de sedimentos activos que eran asignables a cada unidad por separado, lo cual hacía inviable la obtención de parámetros estadísticos confiables, y la elaboración de mapas de distribución espacial.

Características del muestreo de sedimentos activos

La plancha 5-09 se encuentra localizada en el sector central de Colombia entre las coordenadas geográficas 4°20'N – 75°20'W y 6°30'N – 72°40'W. El muestreo realizado por VARGAS *et al.*, (2001) empleó como referencia una red de celdas de 20km x 20km, en donde seleccionaron cuencas de drenaje menores de 200km², en las cuales se recolectaron muestras de sedimentos activos, totalizando 180 estaciones de muestreo (Fig. 4). El caso de aplicación del presente trabajo se centra en el estudio comparativo de la distribución de los valores de Zinc en sedimentos activos colectados en la plancha 5-09 y el sector central de la Plancha 208 – Villeta (Fig. 5), los cuales fueron obtenidos mediante análisis con ICP – OES y absorción atómica respectivamente y registrados en partes por millón (ppm). También se propone comparar los valores de línea base – anomalía para las dos escalas de estudio y por unidad geológica en el sector central de la plancha 208 – Villeta. Dichos valores de línea base – anomalía se reportan para cada uno de los métodos.

Análisis de información

Para la caracterización estadística de la información se procedió a la definición de los conjuntos de datos a analizar. En el caso de la Plancha 5-09 se consideraron todos los valores de las muestras sin separaciones adicionales, porque al separarlos por unidad geológica no se tendría un número suficiente de datos para realizar un análisis estadístico representativo.

Para el sector central de la Plancha 208 – Villeta, los datos se subdividieron por unidad geológica con el fin de realizar un estudio detallado de las posibles variaciones en los contenidos de Zn debido al control litológico. Esta separación se realizó mediante operaciones de consulta en un Sistema de Información Geográfica y las unidades consideradas para tal subdivisión fueron las siguientes:

- Formación Útica – Murca.
- Formación Trincheras
- Formación Peñón
- Formación Capotes
- Unidades del Cretácico Superior suprayacentes a la Formación Capotes.

Los resultados del análisis estadístico se consignan en la Tabla 1, en la cual se presentan los valores de los parámetros estadísticos básicos. Para cada unidad geológica presente en la Plancha 208 se cuenta con un número de muestras suficiente para que los resultados obtenidos tengan cierto nivel de confiabilidad estadística, así como para realizar los subsecuentes análisis de correlación y estimación espacial.

Así mismo de la Tabla 1 resulta evidente que las formaciones Útica – Murca y las unidades de edad Cretácico Superior, así como la Formación Trincheras y la Formación Capotes presentan características estadísticas similares de acuerdo a los valores de los parámetros estadísticos, específicamente promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. Es de resaltar que la Formación Peñón presenta los valores de concentración promedio más alto entre las unidades consideradas.

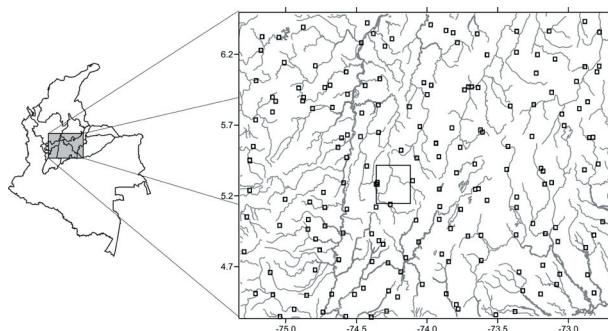


Fig. 4. Localización de los puntos de muestreo para sedimentos activos dentro de la plancha 5-09. El recuadro interno en negro corresponde al sector central de la plancha 208 – Villeta.

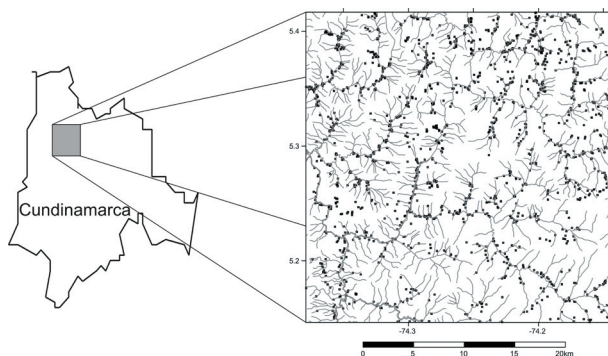


Fig. 5. Localización de muestras para sedimentos activos en el sector central de la plancha 208 – Villeta.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas básicas Zn (ppm).

Método	5-09 Global	Sector central Plancha 208 - Villeta				
		Fm. Útica - Murca	Fm. Trincheras	Fm. Peñón	Fm. Capotes	Cret. Superior
Promedio	123.2	257.7	412.8	1065.5	470.0	274.1
Desviación est.	117.0	320.2	368.7	743.6	548.6	330.0
Coef. Variación	1.0	1.2	0.9	0.7	1.2	1.2
Máximo	837.0	1940.0	1380.0	4800.0	6200.0	1410.0
Q3	132.7	435.0	650.0	1360.0	665.0	326.0
Mediana	90.5	120.0	330.0	1065.0	270.0	170.5
Q1	64.5	43.5	86.0	630.0	115.5	65.0
Mínimo	11.1	4.0	1.0	21.0	1.0	4.0
Número de datos	176	96	681	136	380	92

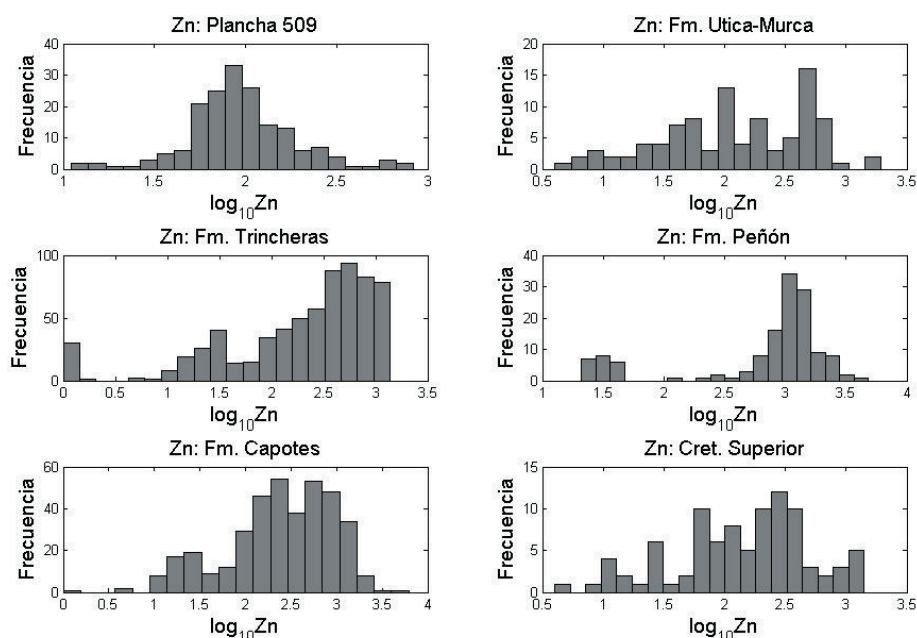


Fig. 6. Histogramas de concentración de Zn (ppm) Plancha 5-09 y 208 (separación por litologías).

En la figura 6 se presentan los histogramas para el contenido de Zn para cada uno de los muestreos considerados. Tanto en la Plancha 5-09 como en la Plancha – 208 para las diferentes unidades, los histogramas revelan una distribución con sesgo positivo marcado y que al graficarla en escala logarítmica tiende a la normalidad, lo cual es típico de las distribuciones geoquímicas. En este caso la transformación logarítmica aplicada corresponde al logaritmo en base 10 (con el cual se obtienen valores negativos), pero es de recordar que el objetivo en este caso no es el de interpolar el resultado de dicha transformación sino la identificación de diferentes grupos con características estadísticas claras dentro de las unidades geológicas, y con la cual se pueda realizar la discriminación entre las líneas bases y las anomalías geoquímicas usando los mé-

todos gráficos explicados anteriormente.

Los métodos de separación línea base – anomalía explicados en la sección 3 se pueden clasificar en dos grandes grupos: aquellos que determinan umbrales (estadísticos, gráficos y fractal) y los que determinan áreas directamente (krigueaje factorial, krigueaje robusto y estadística espacial U). Los resultados de los métodos que definen umbral se consignan en la Tabla 2, de la cual se puede apreciar que en términos generales los valores de umbrales obtenidos son diferentes para cada unidad geológica considerada. Para los métodos gráficos, los valores de umbral obtenidos son mayores que los obtenidos para los métodos estadísticos. En el caso del método del cuantil 90 este arrojó los menores valores en todos los

Tabla 2. Valores umbral Zn (ppm).

Método	5-09 Global	Sector central Plancha 208 - Villeta				
		Fm. Útica - Murca	Fm. Trincheras	Fm. Peñón	Fm. Capotes	Cret. Superior
Prom+2*desv	357.3	897.9	1150.2	2552.7	1567.2	933.9
Q90	234.9	598.0	1024.0	1818.0	1140.0	653.0
Qqplot	495.2	851.1	1220.0	2400.0	2089.3	1258.9
Probplot	501.2	799.8	1129.8	2500.0	2089.3	1000.0
Fractal	468.0	690.0	1098.0	2435.0	1127.0	1260.0

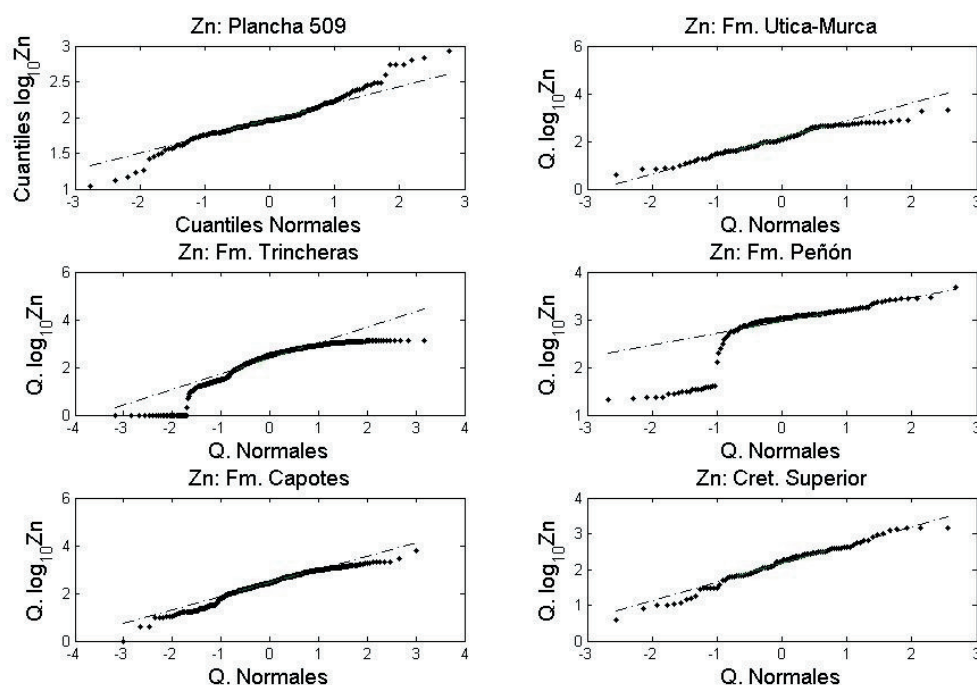


Fig. 7. Diagramas cuantil – cuantil Plancha 5-09 y 208 (separación por litologías).

casos sugiriendo que se debería considerar un cuantil superior como es el caso del cuantil 95. Los diagramas cuantil – cuantil y de probabilidad acumulada tanto por la Plancha 5-09 y 208 aparecen en las figuras 7 y 8. De estos diagramas resulta claro la ocurrencia de un quiebre de pendiente en la parte superior derecha de los mismos, el cual se tomó como valor de umbral. Estos valores en cada caso aparecen consignados en la Tabla 2. Los resultados del método fractal de concentración – área aparecen en la figura 9 y los valores de umbral obtenidos son similares a los obtenidos mediante los métodos gráficos. Los quiebres de pendiente en los diagramas de variación de área acumulada en función de la concentración se pueden identificar claramente en todos los casos a excepción de la Formación Trincheras, en el cual no se aprecia un cambio de pendiente brusco que pueda ser definido como valor de umbral. Para este caso particular se realizó la determinación de la pendiente de forma numérica mediante

diferencias finitas centrales y se seleccionó la concentración en donde se producía la intersección de las líneas de proyección de sectores en donde la pendiente es constante. Así mismo los diagramas de área acumulada en función de la concentración (Fig. 9) presentan un patrón de variación bastante complejo en comparación con los diagramas cuantil – cuantil y de probabilidad acumulada, lo cual confirma que la distribución de concentraciones de Zn es diferente en cada litología.

De los semivariogramas de Zn para cada una de las unidades estudiadas (Fig. 10) resulta evidente la existencia de una anisotropía geométrica (variación del rango de influencia con la dirección). Los semivariogramas experimentales de Zn en las planchas 5-09 y 208 permitieron definir direcciones de anisotropía (Azimut 30° y Azimut 120°) que en ambos casos se interpretaron como resultado del control litológico y estructural que condicionaron

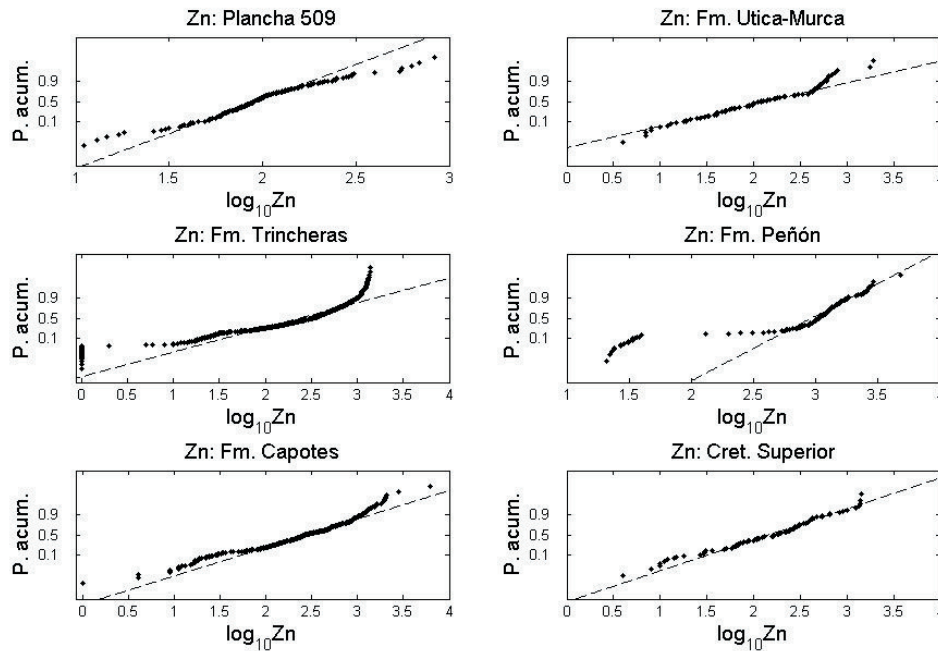


Fig. 8. Diagramas de probabilidad acumulada Plancha 5-09 y 208 (separación por litologías).

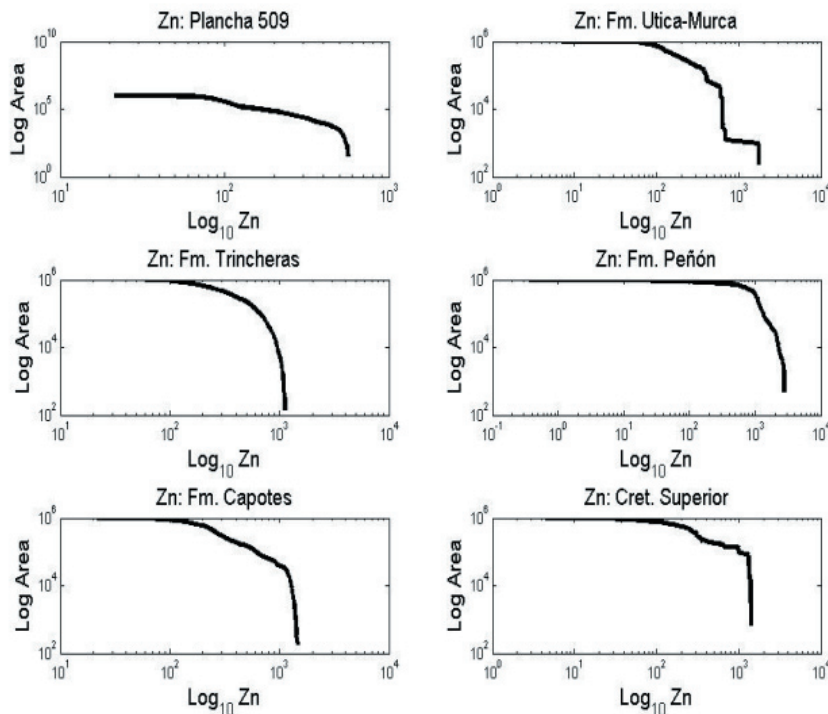


Fig. 9. Método fractal concentración – área. Plancha 5-09 y 208 (separación por litologías).

la distribución espacial del Zn en las áreas cubiertas por el muestreo. Los respectivos modelos de ajuste se presentan en la Tabla 3. Los modelos seleccionados en este caso corresponden a semivariogramas esféricos y una componente de efecto pepita. Para el caso de la Plancha

5-09, la variación espacial es bastante suave en comparación de las unidades de la Plancha 208, en donde la contribución del efecto pepita a la varianza total de los datos es muy grande (a excepción de la Formación Peñón y las unidades de edad Cretácico Superior). Esto va a

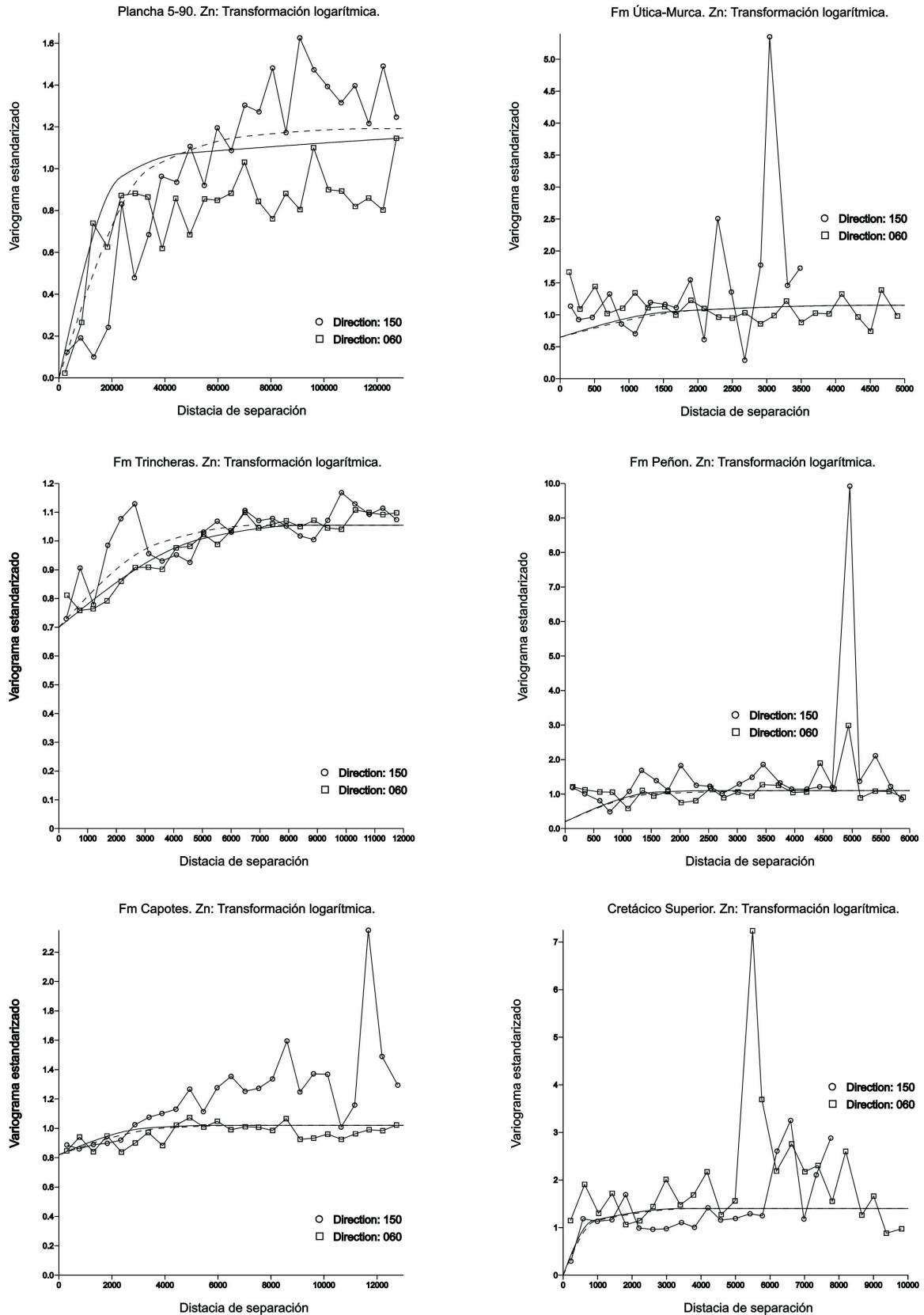


Fig. 10. Estructura de correlación espacial. Semivariogramas experimentales y teóricos.

Tabla 3. Semivariogramas teóricos Zn (ppm). Ajuste mediante modelo esférico.

Zn (ppm)		Efecto Pepita	Rango	Escala	Rango	Escala	Rango	Escala
5-09 Global		0.000	35000	0.740	70000	0.285	120000	0.166
Plancha 208 - Villeta	Fm. Útica - Murca	0.650	2000	0.300	4500	0.200		
	Fm. Trincheras	0.700	3500	0.155	7000	0.200		
	Fm. Peñon	0.200	1600	0.700	4000	0.200		
	Fm. Capotes	0.820	4000	0.125	7000	0.075		
	Cret. Superior	0.000	1000	1.000	4000	0.400		

tener serias implicaciones en los posteriores procedimientos de separación de línea base – anomalía geoquímica mediante los métodos geoestadísticos. La presencia de una estructura de correlación espacial clara tanto para la concentración de Zn en la Plancha 5-09 y la Plancha 208 indica que los procesos de dispersión superficial responsables por las variaciones del Zn en los sedimentos activos distan mucho de ser fenómenos aleatorios. Sin embargo el fuerte efecto pepita observado en los semivariogramas del Zn en las Unidades de la Plancha 208 indicaría la presencia de fenómenos de remoción superficial de Zn que actúan rápidamente y que hacen que las variaciones de este elemento sean erráticas. Así mismo en el caso de los modelos ajustados para la Plancha 5-09 y 208, se puede apreciar un efecto proporcional causado por las diferencias en el muestreo (escala), ya que tanto los parámetros estadísticos (promedio, varianza y coeficiente de variación) como los mismos semivariogramas (valor de meseta o sill) están indicando que la variación en la distribución espacial de Zn es más suave a una escala mayor (Plancha 5-09) que a nivel local (Plancha 208), como resultado de los procesos de dispersión que ocurren para cada escala específica.

Los semivariogramas calculados y ajustados anteriormente son elementos importantes para la separación de anomalías geoquímicas usando los procedimientos geoestadísticos de krigueaje factorial y krigueaje robusto. Para el caso del krigueaje factorial de la información de la Plancha 5-09, la anomalía se encuentra asociada a la primera estructura del semivariograma (modelo esférico con rango de influencia de 75km), mientras que la línea base estaría asociada a la segunda estructura (modelo esférico con rango igual a 150km, Fig. 10 y Tabla 3).

Para el caso de las unidades estudiadas en la Plancha 208, los procedimientos de krigueaje factorial y robusto se realizaron por unidad geológica mediante la metodología de krigueaje zonal en el cual se tuvo en cuenta la información del polígono correspondiente a cada unidad geológica. Los semivariogramas presentan un valor de efecto pepita bastante alto y por lo tanto la anomalía geoquímica se obtuvo separando esta componente del semivariograma. La línea base se obtuvo separando la estructura del semivariograma con modelo esférico. Los resultados de este procedimiento aparecen en la figura 11 (Plancha 5-09) y figura 12 (sector central Plancha 208).

Como se puede apreciar del mapa de línea base para la Plancha 5-09 (Fig. 11), los valores más altos de Zn se localizan en el tercio W de la Cordillera Oriental, al W de la Sabana de Bogotá y específicamente en el sector central de la Plancha 208 – Villeta. De esta forma se demuestra la eficacia del muestreo de baja densidad o regional, a la hora de delimitar áreas de interés de un elemento particular, para entonces, en una etapa posterior, realizar un muestreo de detalle en la zona previamente delimitada. Debe tenerse en cuenta que la forma de los contornos tanto de la línea base, como de la anomalía correspondientes a la variación de concentración de Zn, siguen un azimut de dirección 30° correspondiente claramente a la orientación principal de las unidades geológicas y de los rasgos estructurales principales, indicando un control litológico y estructural. Este rasgo de anisotropía geométrica es también evidente mediante el estudio de los semivariogramas. La presencia de las anomalías mayores en la zona de la Plancha 208 – Villeta, indica para estas zonas condiciones favorables para la generación de mineralizaciones de Zn.

SARMIENTO (2002) indica que la Cordillera Oriental de Colombia presenta características comunes con otras áreas geológicas del mundo que presentan depósitos exhalativos sedimentarios estratiformes de metales base encajados en rocas sedimentarias tales como Pb y Zn (SARMIENTO 1987). Entre estas características se encuentran (SARMIENTO 2002):

1. Existencia de una cuenca mayor de sedimentación con dimensiones del orden de varios centenares de kilómetros o cuenca de primer orden, que contiene una secuencia gruesa de sedimentitas y que esta infrayacida por basamento de naturaleza cratónica.

2. Existencia de cuencas menores de segundo orden con dimensiones de varias decenas de kilómetros evidenciadas por variaciones laterales de facies y espesor de las sedimentitas.

3. Fallas y alineamientos en las márgenes de las cuencas de primer y segundo orden. Dichas fallas presentando actividad contemporánea con la sedimentación.

4. Intrusiones menores que evidencian actividad ígnea coetánea con la sedimentación.

5. Existencia de cuencas menores restringidas (cuencas de tercer orden) en donde la sedimentación ocurrió en un medio euxínico de baja energía.

6. Evidencias que indican actividad tectónica de fallas simultáneamente con la sedimentación en las cuencas de tercer orden.

Al estudiar los mapas de la Plancha 208 – Villeta (Fig. 12), obtenidos mediante la metodología de krigeaje zonal en el cual se tuvo en cuenta la información del polígono correspondiente a cada unidad geológica, se observa como los valores más altos tanto para línea base como para anomalía, mediante krigeaje factorial y robusto, se obtienen para la Formación El Peñón. Es también de resaltar la forma como las concentraciones tienden a reflejar y delimitar los contrastes entre unidades geológicas, siendo este un criterio a la hora de avocar por un control litológico y estructural de las concentraciones de Zn que puedan dar lugar a mineralizaciones. Respecto de este particular es de resaltar que estudios previos realizados en el sector central de la Plancha 208 – Villeta por SARMIENTO *et al.* (1985), indicaban que el sector del Río Zumbado al N de Útica presentaba condiciones propicias para la presencia de mineralizaciones de Zn.

En este sentido, los resultados del presente trabajo además de confirmar las observaciones de SARMIENTO *et al.* (1985), permiten refinar la continuidad de las áreas con anomalías positivas de Zn y de esta forma las posibles zonas mineralizadas.

Una ventaja importante de la utilización de los procedimientos geoestadísticos para la separación de líneas base – anomalía geoquímica consiste en la incorporación de la correlación espacial de la variable en estudio por medio del semivariograma. Esta función de semivariograma al caracterizar la correlación espacial del fenómeno puede ser interpretada en términos de los procesos que condicionan la variación espacial del fenómeno en estudio, y por lo tanto se puede relacionar con la estructura geológica del área de estudio (ya sea la estratigrafía o la configuración estructural). Es por esta razón que los mapas obtenidos por medio de krigeaje no se consideran como mapas sino como modelos de la variación espacial de la variable de interés que incorporan la correlación espacial.

Para la Plancha 5-09 las muestras anómalas seleccionadas por los métodos estadísticos, gráficos, fractal y estadística espacial U aparecen representadas en la figura 11. En esta figura y en la Tabla 2 es posible apreciar que los dos métodos gráficos, el método del promedio y la desviación estándar y el método fractal presentan un valor de umbral similar y por lo tanto tienden a separar las mismas muestras, mientras que el cuantil 90 y la estadística U separan las mismas muestras y otras adicionales. Este resultado se puede interpretar como equivalente al hecho que en estos dos últimos métodos el umbral corres-

pondería a un valor menor al definido por los otros métodos mencionados anteriormente. Así mismo las muestras seleccionadas por el método de la estadística espacial U (Fig. 13) aparecen agrupadas formando una región compacta y continua en contraposición a los restantes métodos de discriminación en donde las muestras anómalas presentan un patrón de ocurrencia puntual. Este mismo comportamiento se puede apreciar para los resultados obtenidos en la Plancha 208 (Fig. 13). Esto es debido a que el método de la estadística espacial U, al tener en cuenta las relaciones de vecindad y de cercanía espacial en la determinación del valor de U, tiende a resaltar zonas anómalas en lugar de muestras por separado.

IMPLICACIONES EN LA EXPLORACIÓN GEOQUÍMICA

El análisis de información geológica, geoquímica, geofísica, etc., inicia desde la definición de los objetivos a cumplir en un proyecto (estudio regional, local, etc.) y de allí, a una planeación óptima del muestreo, acorde con los objetivos planteados. Así, mediante un muestreo regional, de baja densidad o baja resolución, se busca la delimitación de las estructuras de primer orden o fundamentales que caracterizan una región de interés, tal es el caso de las provincias geológicas, los terrenos geológicos, las cuencas geológicas, etc.

Un mensaje elemental corresponde al hecho que una estructura óptima del conocimiento en exploración va de lo general a lo específico, y en este sentido el muestreo de la Plancha 5-09 (VARGAS *et al.* 2001) es un ejemplo meritorio, ya que si bien fue diseñado expresamente para suplir las necesidades de un reconocimiento de baja resolución, al emplear celdas de 20km x 20km y cuencas de drenaje menores de 200km², cumple el objetivo de brindar una visión regional de la distribución de elementos químicos en el sector central de Colombia. Del análisis del Zn de la Plancha 5-09 fue posible delimitar el sector central de la Plancha 208 – Villeta, como la zona de concentraciones más altas para este elemento, pero lo contrario no necesariamente sería posible.

Realizar un muestreo de alta densidad o alta resolución en una zona determinada, sin la guía de un estudio regional previo puede resultar una tarea de alto riesgo económico, ya que el hecho de llevar a cabo una recolección de datos de alto detalle espacial, si bien con total seguridad permitirá al explorador delimitar la presencia de diferentes poblaciones estadísticas, valores de línea base, anomalía, obtención de mapas de distribución espacial de la concentración del elemento de interés, etc., no necesariamente implica o garantiza que dichos valores de línea base, anomalía, mapas, análisis y conclusiones, representen la zona más favorable o de concentraciones más altas dentro de por ejemplo una provincia geológica.

Así, un asunto de alta relevancia en exploración consiste en la inversión de esfuerzos y recursos (infraestructuras, presupuesto, etc.) para definir blancos explorato-

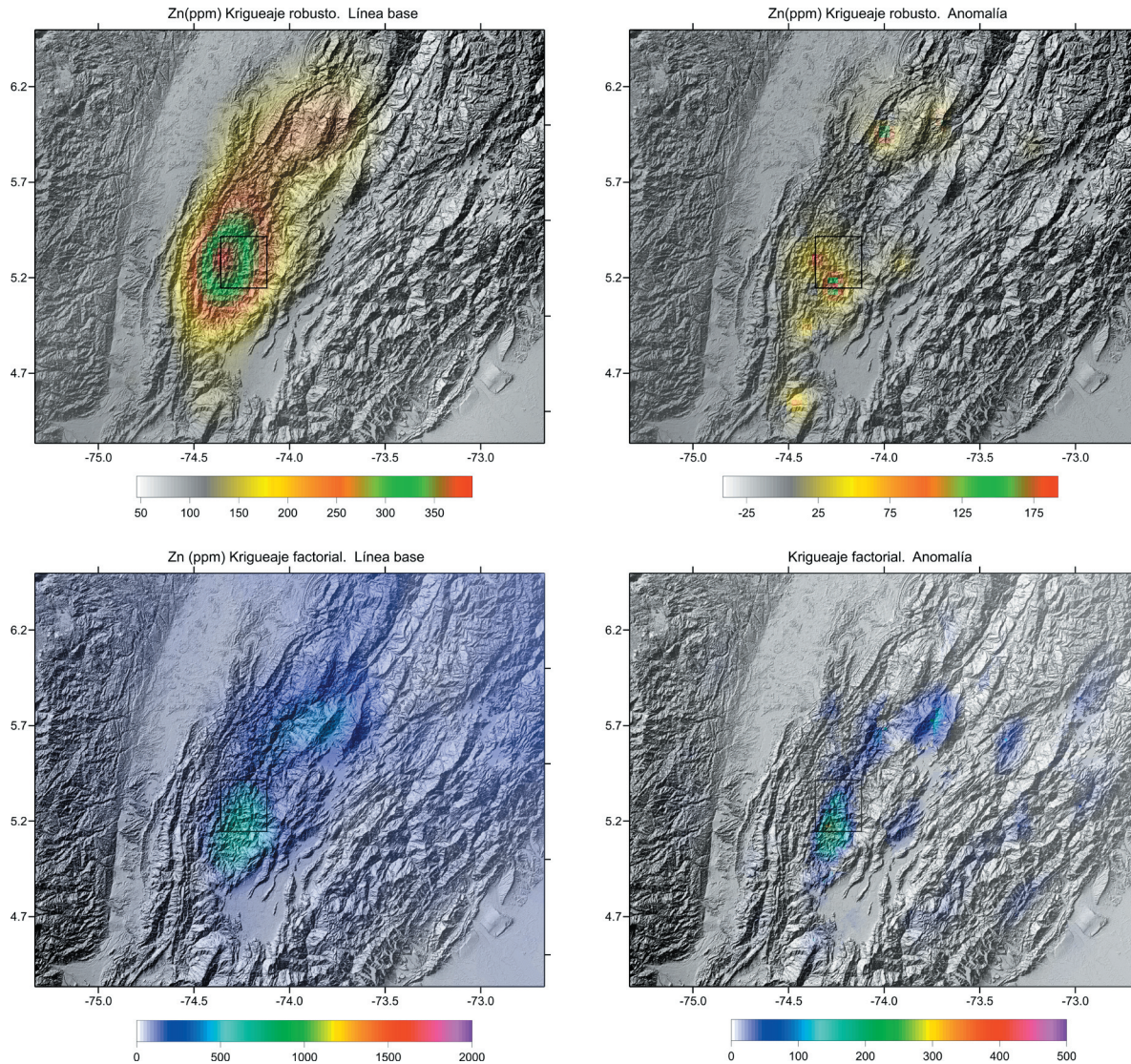


Fig. 11. Krigeaje factorial y robusto Plancha 5-09.

rios potenciales. Una forma consiste en el desarrollo de programas de exploración regional multipropósito de baja densidad a partir del cual se delimiten zonas menores con ambientes geológicos, estilos estructurales, potencial minero, ambiental, etc., favorables a la ocurrencia de la variable de interés particular. La otra forma consiste en el desarrollo de muestreos de detalle en zonas donde se tengan fuertes indicios geológicos, estructurales, históricos, etc., de la ocurrencia de algún tipo de mineralización de interés como en el caso del muestreo del sector central de Plancha 208 – Villeta de SARMIENTO *et al.* (1985). Así, en un territorio en gran medida inexplorado como Colombia, la primera alternativa permitiría abrir la opción al paso de recursos a reservas, y se constituye en una alternativa económicamente viable a la hora de conocer la localización, extensión, concentración, etc., de nuestros recursos naturales.

El análisis de la información en geología debe ser integral y en este sentido la información geoquímica tiene un fuerte asidero geológico ya que la geología (ambiente de formación) se constituye en el contexto en el cual ésta se desarrolla, si bien en algunos casos como en ambientes tropicales, los procesos superficiales pueden tener gran importancia. En el presente trabajo el control geológico de la información geoquímica estuvo dado en el caso de la Plancha 208 – Villeta, por la discriminación de muestras de acuerdo con la unidad geológica sobre la cual fueron colectadas. Esto implica por otro lado que de ante mano se está dando peso al modelo geológico (mapa geológico) ya que en él se sintetizan los eventos ambientales y estructurales que dieron origen a los diferentes tipos litológicos y por ende a las concentraciones minerales en ellos hospedados. Así, el krigeaje zonal factorial y robusto tiende a reflejar y sintetizar los contrastes litológicos.

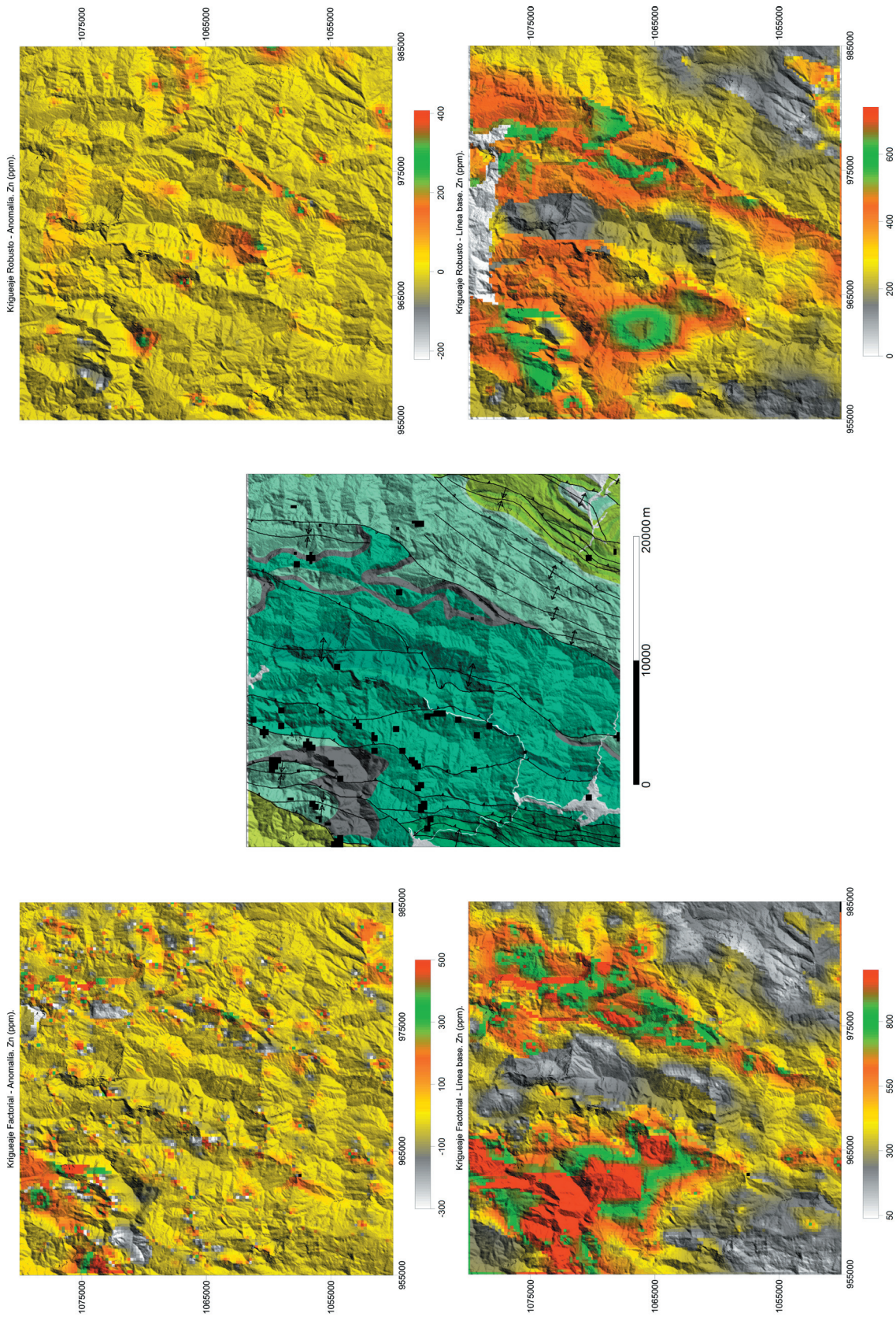


Fig. 12. Krigueaje zonal factorial (derecha) y robusto (izquierda), sector central de la Plancha 208 - Villeta. El krigueaje zonal de la línea base (abajo) tiende a reflejar contrastes litológicos. El diagrama central corresponde al modelo geológico (convenciones como en la figura 3).

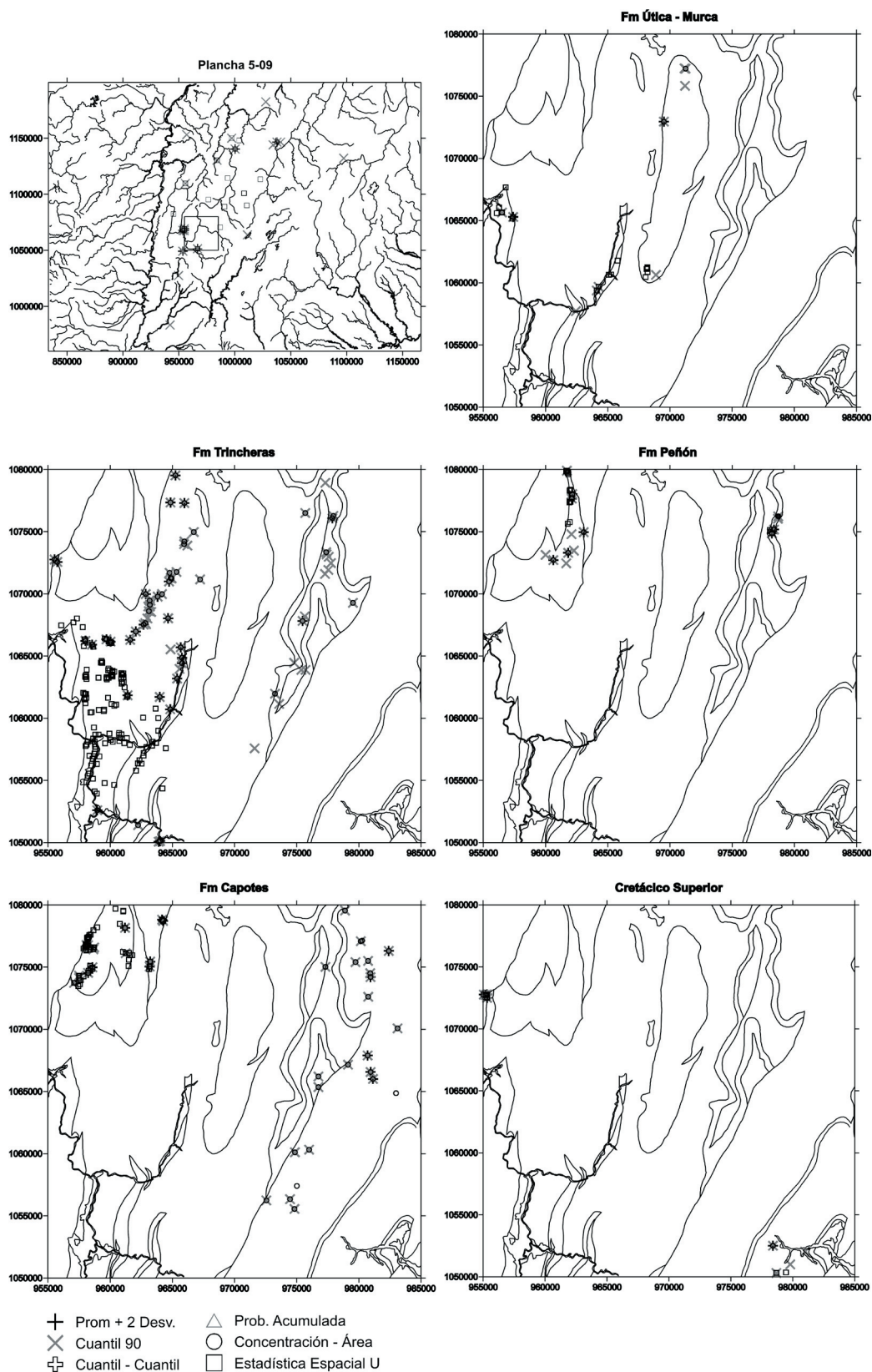


Fig. 13. Mapas de integración de métodos estadísticos, gráficos, fractal y estadística espacial U por unidad geológica, para la delimitación de anomalías positivas de Zn.

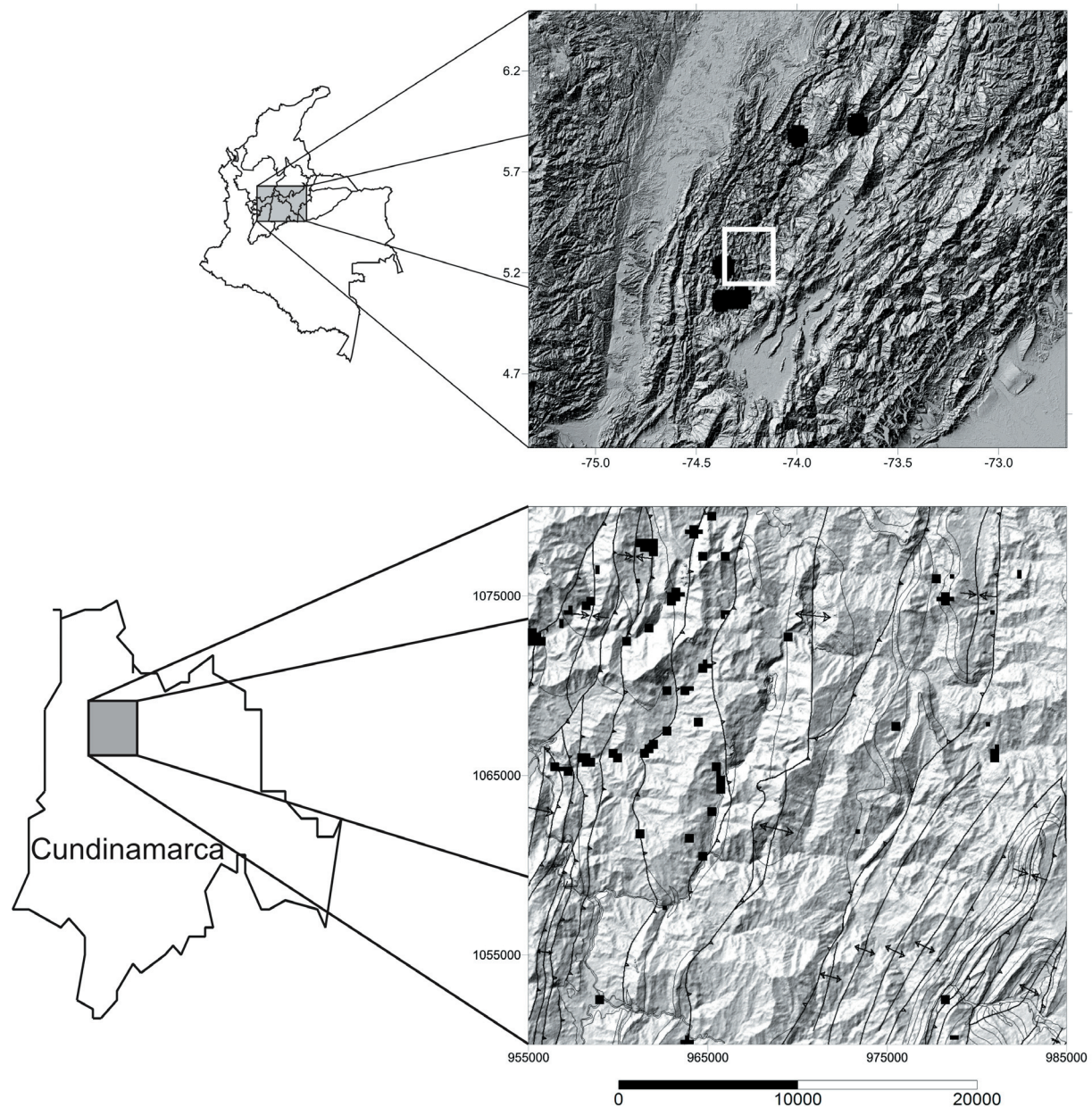


Fig. 14. Muestras anómalas definidas a partir del análisis en un Sistema de Información Geográfica integrando las 8 metodologías de análisis estadístico – espacial.

Es por lo tanto una herramienta invaluable a la hora de definir zonas enriquecidas o empobrecidas en elementos de interés.

No hay un único método de separación línea base – anomalía y por lo tanto cuanto menos un método estadístico, uno gráfico y uno geoestadístico deben ser tenidos en cuenta a la hora de realizar una evaluación integral de la información geoquímica. El análisis exploratorio de los datos tiene por finalidad familiarizar al analista con la información. Mediante el conocimiento de las estadísticas des-

criptivas básicas, el rango de variación de los datos, el valor promedio, y los rangos de dispersión alrededor de este, son determinados. Sin embargo estos valores por si solos, no nos brindan información referente acerca de la correlación espacial de los datos. Este tipo de información, tan importante a la hora de relacionar las mineralizaciones a la geología tiene su herramienta en el semivariograma, el cual se constituye en la etapa inicial del proceso de estimación espacial. El modelamiento del semivariograma trae consigo el conocimiento de la estructura espacial de la información y la definición de la ausencia o presencia de anisotropía

geométrica. Dependiendo de la complejidad geológica, el semivariograma será indicativo de procesos de correlación espacial de corto o largo alcance y por lo tanto es una forma de caracterizar la estructura de correlación espacial que tiene serias implicaciones geológicas y estructurales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El muestreo de baja densidad delimita sectores con las concentraciones mayores de Zn (zona anómala), en el flanco W de Cordillera Oriental al W de Bogotá y especialmente el sector de la Plancha 208 – Villeta. Esto implica que a nivel regional el muestreo de baja densidad permite delimitar de forma efectiva anomalías regionales o blancos de exploración potenciales.

A nivel particular en el sector central de Plancha 208 – Villeta, la Formación El Peñón presenta los valores más altos de Zn, en donde se delimitan las zonas anómalas de interés, mientras que las unidades del Cretácico inferior y superior representan zonas de empobrecimiento en Zn respecto de toda la región.

Los semivariogramas experimentales de Zn en las planchas 5-09 y 208 permitieron definir direcciones de anisotropía (Azimut 30° y Azimut 120°) que en ambos casos se interpretaron como resultado del control litológico y estructural condicionantes de la distribución espacial de Zn en las áreas cubiertas por el muestreo. Esta información geológica de tipo suave fue incorporada en el modelamiento de la distribución espacial del Zn y se constituye en un modelo de entrada para los métodos geoestadísticos de separación de línea base – anomalía (krigeaje factorial y robusto).

En este caso particular se utilizó solamente el Zn como elemento central del análisis realizado, sin embargo en la mayoría de los casos el conjunto de datos geoquímicos es de naturaleza multivariada, por lo tanto se hace necesario utilizar metodologías que permitan definir asociaciones geoquímicas y sus anomalías relacionadas.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) por facilitar los datos obtenidos en sus proyectos de investigación. A las Químicas Luz Myriam González y Gloria Prieto (Ingeominas, Bogotá) quienes amablemente realizaron valiosos aportes en etapas iniciales del presente proyecto.

GMS reconoce el apoyo recibido mediante el programa “Becas para Estudiantes Sobresalientes de Postgrado” (Vicerrectoría Académica, Universidad Nacional de Colombia) durante sus estudios en el programa curricular “Maestría en Ciencias – Geología” del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCIAS

ACOSTA, J. & ULLOA, C. (1998): Geología de la Plancha 208 – Villeta. Escala 1:100000. Ingeominas. Bogotá.

ACOSTA, J. & ULLOA, C. (2001): Geología de la Plancha 208 – Villeta. Escala 1:100000. Memoria Explicativa. 84p. Ingeominas. Bogotá.

AKIN, E. (2003): Object Oriented programming via Fortran 90/95. Cambridge University Press. 360p. USA.

BAYONA, G., GARCÍA, D. & MORA, G. (1994): La Formación Saldaña: producto de la actividad de estratovolcanes continentales en un dominio de retroarco. En: Etayo, F. (Ed). Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena. Capítulo 1: 1 – 21. Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

BRANQUET, Y., A. CHEILLETZ, P. R. COBBOLD, P. BABY, B. LAUMONIER, AND G. GIULIANI (2002): Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guatque – Medina area), Colombia. *Journal of South American Earth Sciences* 15, 391 – 407.

CÁCERES, C. & ETAYO F. (1969): Bosquejo geológico de la Región del Tequendama. 1 Congreso Colombiano de Geología. Guía de Excursión Precongreso. 22p. Bogotá.

CEDIEL, F. (1968): El Grupo Girón, una Molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional, Boletín Geológico, 16 (1-3), 5 – 96. Bogotá.

COOPER, M., ADDISON, F., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PENAS, R., PULHAM, A. & TABORDA, A. (1995): Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 79 (10), 1421 – 1443.

ETAYO, F. (1979): Zonation of the Cretaceous of Central Colombia by ammonites. *Publicaciones Geológicas Especiales de Ingeominas* 2, 1 – 186. Bogotá.

FABRE, A. & DELALOYE, M. (1983): Intrusiones básicas cretácicas en las sedimentitas de la parte central de la Cordillera Oriental. *Geología Norandina* 6, 19 – 28. Bogotá.

GARCÍA – CABREJO, O. & MORENO, G. (2005): ATALIB F90 versión 0.400: Librería de modelamiento geoestadístico en fortran 90. Reporte técnico, Grupo ATALIB. Manuscrito no publicado.

GARCÍA-CABREJO, O. & MORENO-SÁNCHEZ, G. (2006): Herramientas de análisis estadístico y espacial aplicadas en la separación línea base – anomalía geoquímica. Implicaciones en Exploración de Recursos Naturales. Parte 1: Revisión metodológica. *Geología Colombiana* 31, 45 – 54.

GONZÁLEZ, H. (2001a): Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Geología, Recursos Geológicos y Amenazas Potenciales. Escala 1:400000. 256p. Ingeominas. Bogotá.

GONZÁLEZ, H. (2001b): Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Escala 1:100000. 93p. Ingeominas. Bogotá.

GUERRERO, J. (1995): Stratigraphy and sedimentary environments of the Honda Group in the La Venta area. Miocene uplift of the Colombian Andes. En: Kay, R., Madden, R., Cife-

- Ili, R. & Flynn, J. (Eds). A History of Neotropical Fauna: Vertebrate Paleobiology of the Miocene of Tropical South America. Smithsonian Institution Press. Washington.
- GUERRERO, J., SARMIENTO, G. & NAVARRETE, R. (2000): The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities Including Aipe, Guaduas, Ortega, and Piedras. *Geología Colombiana* 25, 45 – 110. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2002): Atlas Geológico Digital de Colombia. Versión 1.1. Plancha 5-09. Escala 1:500000. Bogotá.
- MARTÍNEZ, J. & VERGARA, L. (1999): La Sucesión Paleambiental del Cretácico de la Región de Tequendama y Oeste de la Sabana de Bogotá, Cordillera Oriental Colombiana. *Geología Colombiana* 24, 107 – 147. Bogotá.
- MCCOURT, W., ASPDEN, J. & BROOK, M. (1984): New geological and geochronological data from the Colombian Andes: Continental growth by multiple accretion. *Journal of the Geological Society* 141, 841 – 835.
- MOJICA, J. & VILLARROEL, C. (1984): Contribución al conocimiento de las Unidades Paleozoicas del área de Floresta (Cordillera Oriental Colombiana, Departamento de Boyacá) y en especial al de la Formación Cuiche. *Geología Colombiana* 13, 55 – 79. Bogotá.
- MOJICA, J. & LLINÁS, R. (1984): Observaciones recientes sobre las características del basamento económico del Valle Superior del Magdalena en la región de Payandé – Rovira (Tolima, Colombia). *Geología Colombiana* 13, 81 – 128. Bogotá.
- MOJICA, J. & FRANCO, R. (1990): Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. *Geología Colombiana* 17, 41 – 64. Bogotá.
- MORENO, J. (1990): Stratigraphy of the Coger Cretaceous Rosablanca and Cumbre Formations, Uta Sandstone and Murca Formation, West Flank, Eastern Cordillera, Colombia. *Geología Colombiana* 17, 65 – 86. Bogotá.
- NIVIA A., MARRINER G., & KERR A. (1997): El Complejo Quebradagrande una posible cuenca marginal intracratónica del Cretáceo Inferior en la Cordillera Central de los Andes Colombianos. VII Congreso Colombiano de Geología. INGEOMINAS, 16p. Bogotá. Inédito.
- NÚÑEZ, A. (2001): Mapa Geológico del Departamento del Tolima. Geología, Recursos Geológicos y Amenazas Geológicas. 101p. Ingeominas. Bogotá.
- RESTREPO–PACE, P. (1995): Late Precambrian to Early Mesozoic Tectonic Evolution of the Colombian Andes based on new geochronological, geochemical and isotopic data. Tesis de Doctorado, Universidad de Arizona. 195p.
- RODRÍGUEZ, C. & ROJAS, R. (1985): Estratigrafía y tectónica de la serie infracretácica de San Félix, Cordillera Central de Colombia. En: Etayo, F. & Laverde, F. (Eds). Proyecto Cretácico, Contribuciones. Publicaciones Geológicas Especiales 16. Ingeominas. Capítulo XXI, 1 – 21. Bogotá.
- SARMIENTO, L., FORERO, H., CARDOZO, E. & RAMÍREZ, C. (1985): Importancia de la estratigrafía en la evaluación de anomalías geoquímicas: caso del área ario Zumbe, Útica (Cundinamarca). En: Etayo, F. & Laverde, F. (Eds). Proyecto Cretácico, Contribuciones. Publicaciones Geológicas Especiales 16. Ingeominas. Capítulo XXVIII, 5 – 10. Bogotá.
- SARMIENTO, L. (1987): Minerales de Zinc. En: Villegas (Ed). Recursos Minerales de Colombia. Publicación Geológica Especial 1. Ingeominas, Segunda Edición. Tomo I Minerales preciosos, Minerales metálicos, 490 – 563. Bogotá.
- SARMIENTO, L. (2002): Condiciones geológicas favorables de las Sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos exhalativos submarinos de plomo y Zinc. *Boletín de Geología UIS* 24 (39), 49 – 72. Bucaramanga.
- ULLOA, C. & RODRIGUEZ, G. (1982): Intrusivos ácidos Ordovícicos y post – Devónicos en la Floresta (Boyacá). VI Congreso Colombiano de Geología, 18p. Cali.
- VARGAS, O., GONZÁLEZ, L., PRIETO, G., ESPINOSA, A. & MATAMOROS, A. (2001): Interpretación Geoquímica de Baja Densidad con Geología y Mineralizaciones en la Plancha 5-09 – Proyecto Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica – Informe Final Levantamiento Geoquímico en la Plancha 5-09. Informe 2656. Ingeominas. Bogotá.
- VÁSQUEZ, M. & ALTENBERGER, U. (2005): Mid-Cretaceous extension-related magmatism in the eastern Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 20, 193 – 210.
- VILLAMIL, T. (1999): Campanian–Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 153, 239 – 275.
- WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, J., TÉLLEZ, N. & JARAMILLO, L. (1973): Geología de los Cuadrángulos H - 12, Bucaramanga y H - 13, Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico de Ingeominas Vol. XXI*, 1 – 3. Bogotá.

Manuscrito recibido Junio 2005; aceptado Octubre 2006