

# APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS EN LA HIDROGEOLOGÍA DEL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

## GEOSTATISTICS TECHNIQUES IN BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO HYDROGEOLOGY

OSCAR MEJÍA RIVERA

*Ingeniero Geólogo, CORANTIOQUIA, omejia@corantioquia.gov.co*

TERESITA BETANCUR VARGAS

*Geóloga, Universidad de Antioquia, ptebv787@udea.edu.co*

LIBARDO LONDOÑO CIRO

*Ingeniero de Petróleos, Universidad San Buenaventura, libaranto@epm.net.co*

Recibido para revisar 30 de Mayo de 2006, Aceptado 14 de Noviembre de 2006, Versión final 19 de Febrero de 2007

**RESUMEN:** El desarrollo de los sistemas de información Geográfica (SIG) y la aplicación de la geoestadística ha dado un nuevo impulso al análisis de la información espacial aplicada a la hidrogeología.

En la subregión de Bajo Cauca Antioqueño, las aguas subterráneas representan un recurso natural estratégico al constituir casi la única fuente segura de abastecimiento para más de 200000 habitantes de la región y en la medida en que juegan un papel importante en la regulación del sistema hídrico regional al estar conectado con decenas de ciénagas y humedales.

El objetivo general de este trabajo consistió en obtener a partir de la reinterpretación de información secundaria, un modelo conceptual del sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño, utilizando técnicas geoestadísticas tipo kriging. Se ha logrado obtener una representación espacial de las superficies freática y piezométrica de los acuíferos, así como proponer una posible distribución de la transmisividad hidráulica y sugerir la red de flujo más probable para el sistema acuífero superior. Con los resultados de este trabajo, se pretende alimentar un modelo numérico y con este, contribuir a la creación de herramientas de gestión para la administración de este recurso estratégico en la región.

**PALABRAS CLAVE:** Geoestadística, SIG, Modelo digital de terreno, Hidrogeología, kriging.

**ABSTRACT:** Geographic Information Systems and geostatistics are very utile to spatial information on hydrogeology.

On the Bajo Cauca Region groundwater is a strategic natural resource, ground water provides water to 200.000 inhabitants and groundwater is a important control to the hydrologic system.

Field information and previous studies were used and the objective of this work was to obtain a hydrogeological conceptual model to the Bajo Cauca antioqueño using geostatistics techniques.

**KEY WORDS:** Geostatistics, GIS, Digital Elevation Model, Hydrogeology, Kriging.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Bajo Cauca antioqueño, es una región que a pesar de ser cruzada por ríos tan importantes como el río Cauca; presenta un déficit de abastecimiento de agua para los diversos usos requeridos en la región, que van desde el suministro doméstico hasta los usos agrícolas, pecuarios, comercial y en menor escala industriales. La respuesta a la carencia de disponer de agua apta para las diferentes actividades, ha sido extraerla del subsuelo desde pozos y aljibes. No obstante, solo desde hace unos tres años, se ha venido realizando una tarea sistemática de evaluación del potencial hidrogeológico real de los “acuíferos del Bajo Cauca antioqueño”; evaluación que se ha venido complementando y que hoy permite contar con aproximaciones importantes en relación con la cantidad y calidad de los recursos hídricos subterráneos identificados, como por ejemplo, la existencia de un sistema conformado por tres unidades acuíferas.

Entre las diferentes entidades e instituciones que acompañan este proceso de conocimiento: CORANTIOQUIA, Universidad de Antioquia, se pretende llegar a formular estrategias de manejo que permitan trabajar y buscar la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo como parte de los recursos estratégicos identificados en la región.

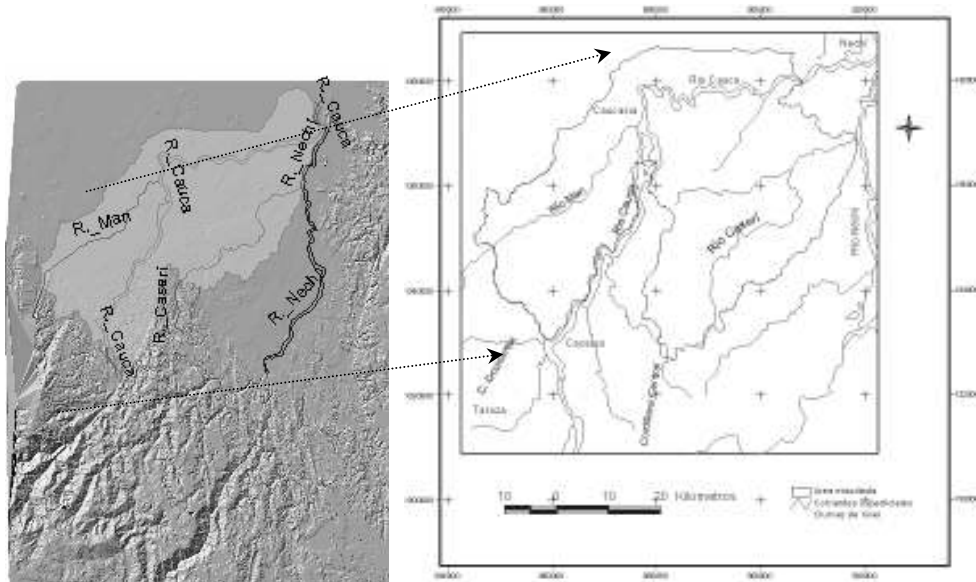
Una de las actividades que se pretende adelantar a corto plazo, es la construcción de un modelo numérico que permita simular el flujo de agua subterránea y definir escenarios posibles para la toma de decisiones, que permitan identificar áreas críticas, potenciales restringidos, así como sugerir medidas de manejo para la administración y protección del recurso. Para construir dicho modelo numérico, se requiere contar con modelos digitales de terreno que representen el flujo de agua, la geometría de las tres unidades acuíferas identificadas, y sus propiedades hidráulicas.

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la aplicación de la

geoestadística han supuesto un impulso al análisis de la distribución espacial aplicada a la hidrogeología. Un SIG es un conjunto de programas informáticos que sirven para capturar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales (Burrough y McDonnell, 1998). Aunque los SIG permiten la manipulación de datos espaciales, la caracterización y modelación de los patrones de distribución espacial de dichos datos requiere del uso de técnicas estadísticas y matemáticas adecuadas. La geoestadística es una valiosa herramienta para ese tipo de propósitos.

## 2. GENERALIDADES

La subregión del Bajo Cauca (Figura 1), posee una extensión de 8.485 km<sup>2</sup>, está localizada al noreste del departamento de Antioquia, se conforma por seis municipios ubicados entre las serranías de Ayapel, en la cordillera Occidental y San Lucas, en la cordillera Central, estos municipios son: Cáceres, Tarazá, Caucasia, Zaragoza, El Bague y Nechí. El Bajo Cauca es una región rica y diversa social y culturalmente. Sus habitantes, más de 200.000, se distribuyen el 57% en la zona urbana y el 43% en áreas rurales. La mayor parte del territorio se encuentra en alturas comprendidas entre los 30 y 1.000 m.s.n.m. La planicie aluvial del territorio de Cáceres, Caucasia, El Bague, Nechí, y Zaragoza, esta bañada por los ríos Cauca, Man, Nechí, Cacerí y cientos de pequeños afluentes. En esta inmensa llanura flanqueada por montañas, se forman numerosas ciénagas con una extensión de más de 40.000 hectáreas, conectadas con los ríos mediante caños, formando complejos sistemas de lagos, pozas, pantanos y playones que retienen el agua de las crecientes y la liberan lentamente en el estiaje. Sin lugar a dudas una de las principales riquezas naturales del Bajo Cauca la constituye este complejo sistema cenagoso en el que se desarrolla una amplia diversidad biológica.



**Figura 1.** Localización del área de estudio  
**Figure 1.** Localization

El Bajo Cauca es la puerta de entrada de Antioquia a la Costa Atlántica al encontrarse en límites con los departamentos de Córdoba, Sucre y Bolívar. Caucasia ha sido históricamente el centro de servicios más importante en la región y establece comunicación con todos los demás municipios a través de la red vial conformada por la Troncal de la Paz y las vías Caucasia-Nechí y Zaragoza-Caucasia. Este municipio cuenta además con la red fluvial de los ríos Cauca y Nechí..

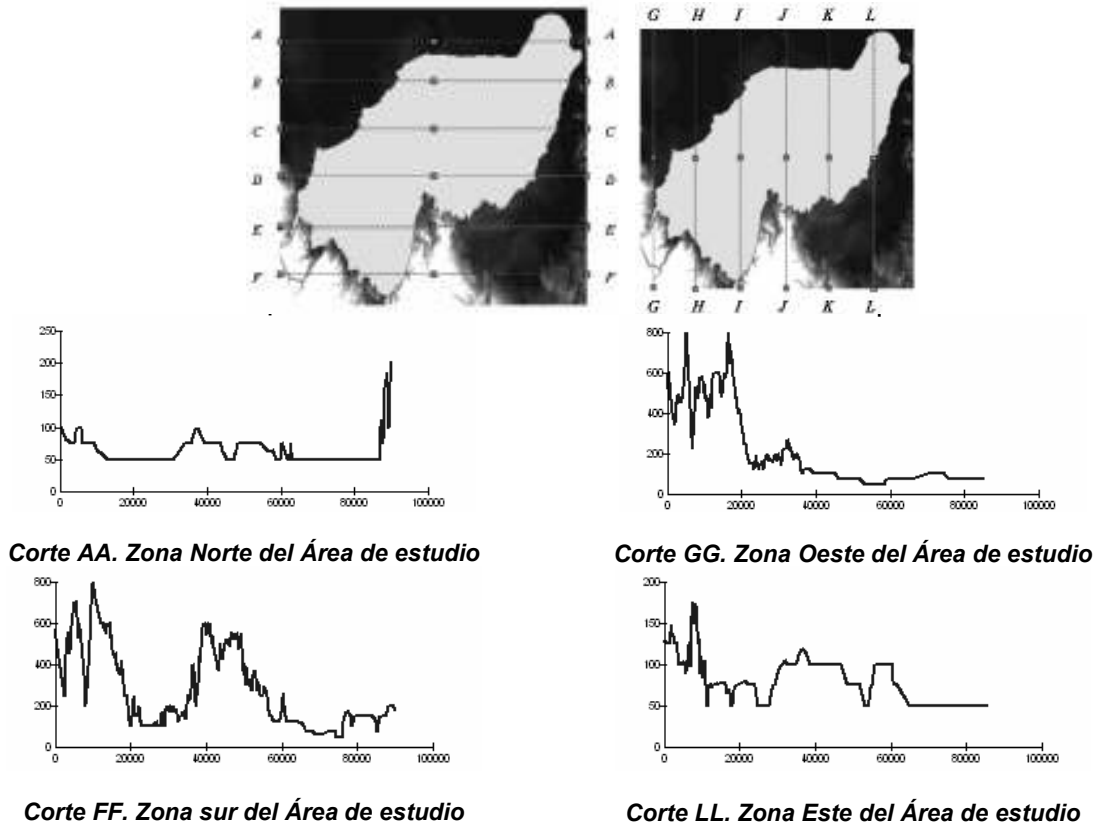
### 2.1 Caracterización altimétrica de la zona de estudio

De manera general, el Bajo Cauca antioqueño posee una topografía suave y homogénea. No obstante, el territorio circundante presenta hacia su parte sur y oeste un marcado cambio altitudinal que con fines hidrogeológicos, especialmente en lo relativo a la identificación de potenciales zonas de recarga, merece ser considerado aunque sea de un modo general. En la figura 2 se presentan una serie de cortes -realizados en el marco de este trabajo-, en las

direcciones este-oeste y sur-norte para la zona de interés incluyendo algunas regiones vecinas.

### 2.2. La Demanda del Recurso Hídrico en el Bajo Cauca Antioqueño

Aún existiendo imponentes corrientes de agua superficial en el Bajo Cauca Antioqueño como los ríos Cauca, Man, Nechí y Caserí, las condiciones de abastecimiento del recurso para satisfacer la demanda para consumo humano son muy precarias. La Gobernación de Antioquia en su publicación Lineamientos de Política Departamental en Antioquia para el Agua (2005), revela datos acerca de la cobertura en el servicio de acueducto y acceso a agua potable en cada una de las nueve subregiones del departamento. Para las cabeceras municipales del Bajo Cauca la cobertura promedio es del 82.41 %, siendo el porcentaje más bajo de todas las subregiones. Solo el 35.51% de la población urbana tiene acceso a agua potable y en el área rural, solo el 20.66% de los habitantes cuentan con este recurso fundamental.



**Figura 2.** Comportamiento hipsométrico del área de estudio en las direcciones Este oeste y Norte Sur.  
**Figure 2.** Hypsometric and cross sections

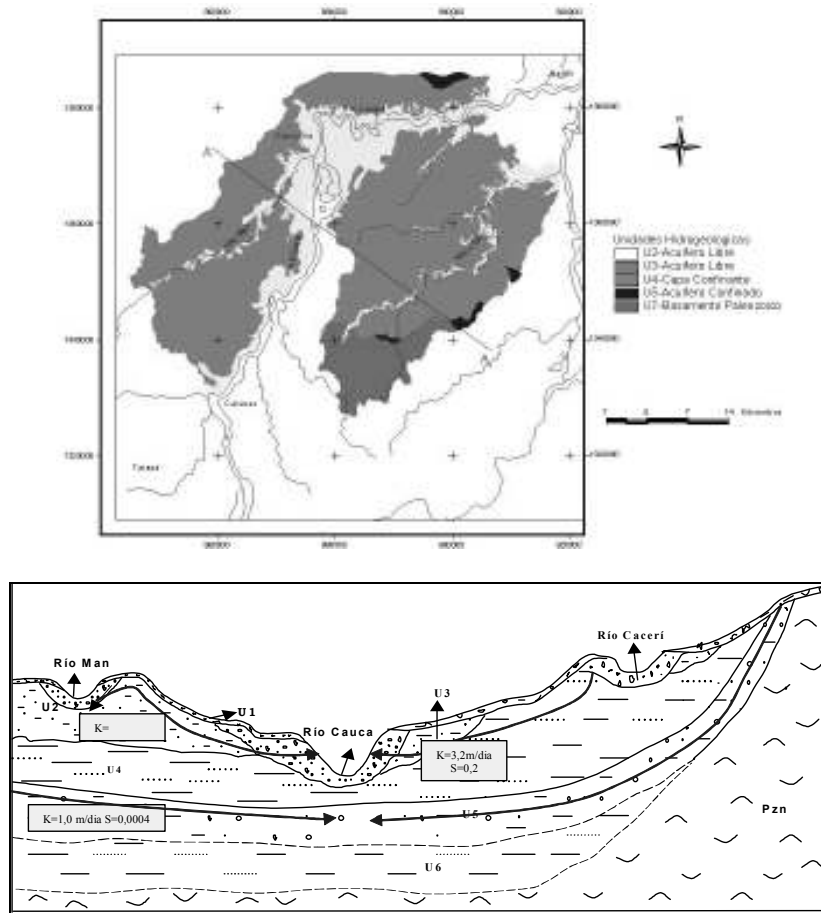
### 3. ESTUDIOS PREVIOS

La Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) con algunas firmas consultoras y con la Universidad de Antioquia, viene adelantado una serie de estudios relacionados con el recurso hídrico subterráneo en el Bajo Cauca antioqueño (2001, 2003, 2004, 2005, 2006), los cuales proporcionan una primera aproximación al modelo conceptual del sistema acuífero para el 70% de la zona con potencialidad hidrogeológica.

Mediante trabajo directo en campo en la región del Bajo Cauca antioqueño se han inventariado a la fecha 1927 puntos de agua, 1837 aljibes, 70 pozos y 20 manantiales. De los 70 pozos inventariados sólo 30 cuentan con columna estratigráfica obtenida al momento de la perforación, y de ellas únicamente cinco han

sido descritas cuidadosamente por profesionales de la geología, las demás fueron levantadas por los técnicos que realizaron las actividades de perforación. Las actividades del inventario permitieron también realizar la nivelación para épocas de invierno y verano, a partir de la cual se puede obtener las superficies freática y piezométrica de los acuíferos e identificar de manera preliminar las direcciones de flujo del agua subterránea.

Con la realización de casi 100 sondeos eléctricos verticales, mediante su correlación con algunas columnas estratigráficas y la posterior interpretación se logró obtener un primer modelo estratigráfico regional a partir del cual se definieron las unidades hidrogeológicas del Bajo Cauca antioqueño. En la figura 3 se presenta el mapa hidrogeológico con el que se contaba antes de la realización de este trabajo.



**Figura 3.** Mapa hidrogeológico preliminar y parcial del Bajo Cauca Antioqueño y corte interpretativo. (Fuente: UdeA-CORANTIOQUIA, 2005)

**Figure 3.** Preliminary Hydrogeological map to the Bajo Cauca antioqueño.

Las unidades hidrogeológicas definidas fueron:

**Unidad hidrogeológica U<sub>1</sub>:** Conformada por un horizonte de arcilla y suelo que se extiende a través de toda la zona presenta espesores entre 2 y 9 metros.

**Unidad hidrogeológica U<sub>2</sub>:** En ella se conjugan los depósitos aluviales pertenecientes a las llanuras aluviales de los ríos Cauca, Caserí y Man, de sus principales afluentes y las terrazas aluviales. U<sub>2</sub> tiene espesores entre 20 y 90 m, los sitios más potentes se localizan hacia el caso urbano de Caucasia, en la localidad de Jardín y cerca de las confluencias de los ríos Man y Cauca y de los ríos Caserí y Nechí. Esta unidad constituye un acuífero libre; su extensión es de

450 km<sup>2</sup>, tendría un volumen de 15.739 millones de m<sup>3</sup>.

**Unidad hidrogeológica U<sub>3</sub>:** Constituida por saprolitos no consolidados del Miembro Superior de la Formación Cerrito, se comporta como un acuífero libre donde aflora en superficie y como un acuífero semiconfinado cuando se encuentra por debajo de los depósitos aluviales de U<sub>2</sub>. U<sub>3</sub> tiene espesores de 60 m al occidente en Santa Rosita y de 115 m hacia Alcalá y Kilómetro 18, cerca al Cauca disminuye su espesor y puntualmente se pincha contra U<sub>2</sub>. Tiene una extensión de 1.600 km<sup>2</sup> y su volumen sería de unos 30.879 millones de m<sup>3</sup>.

**Unidad hidrogeológica U<sub>4</sub>:** Subyace a las unidades U<sub>2</sub> o U<sub>3</sub>. Esta constituida por el

Terciario del Miembro Medio de la Formación Cerrito, su extensión donde aflora es de 70 km<sup>2</sup>, es una unidad confinante.

**Unidad hidrogeológica U<sub>5</sub>:** Representa al Miembro Inferior de la Formación Cerrito, se comporta regionalmente como un acuífero confinado con zonas de recarga hacia el norte del área de estudio, y hacia las partes altas de las cuencas de los ríos Man y Caserí, su espesor no ha sido determinado. Por debajo de U<sub>5</sub>, al norte, existirían antiguas secuencias de rocas sedimentarias, U<sub>6</sub>, y al sur se localizaría el basamento formado por rocas metamórficas fisuradas de edad Paleozoica.

La información recopilada durante el inventario de puntos de agua y un posterior monitoreo de niveles freáticos y piezométricos en algunos puntos cuidadosamente seleccionados permitió modelar las superficies piezométricas para periodos de invierno y verano. En términos generales en los dos periodos analizados el patrón de flujo de las aguas subterráneas es el mismo.

#### 4. LA NECESIDAD ACTUAL

El panorama de demanda de las aguas subterráneas en el Bajo Cauca antioqueño es razón suficiente para determinar lo estratégico de este bien natural y el avance en el conocimiento de estos recursos, es fundamental para su adecuada administración por parte de las entidades competentes, CORANTIOQUIA en este caso. Un primer modelo hidrogeológico parcial obtenido mediante exploración de aproximadamente el 70% de la zona con potencial acuífera define la presencia de un acuífero libre, de otro semiconfinado y de un tercero confinado.

Los modelos conceptuales parciales concebidos paso a paso a través de la realización sucesiva de tres proyectos en tres zonas adyacentes: La cuenca media y baja del río Man (2003), el norte de Caucasia (2004) y la cuenca del río Caserí (2005), colectaron un importante volumen de información que hoy puede integrarse y mediante técnicas de modelación geoestadística, construir un modelo regional interpolando la

información en las áreas donde se conoce y extrapolando interpretaciones hacia los extremos no estudiados para proponer un modelo regional que oriente el trabajo de futuras exploraciones, que pueda ser ajustado y verificado por futuros proyectos y que constituya el primer insumo para la ejecución de un modelo numérico de flujo y transporte de solutos en el sistema hidrogeológico de interés.

El Objetivo General de este trabajo consistió en obtener a partir de la reinterpretación de información secundaria un modelo conceptual del sistema acuífero del Bajo Cauca Antioqueño (BCA), utilizando técnicas geoestadísticas, de manera que permita alimentar un modelo numérico y contribuir al conocimiento de la disponibilidad de un recurso estratégico en la región

#### 5. MARCO CONCEPTUAL BÁSICO

En el campo de las geociencias, son comunes las variables espacialmente distribuidas. Para su estudio, son usados diversos procedimientos geoestadísticos de estimación o simulación. Esto es, a partir de un conjunto de muestras o datos tomados en localizaciones del dominio en que se manifiesta un fenómeno a estudiar y considerando que es estadísticamente representativo de una realidad, que por lo general es siempre desconocida; se buscan dos fines diferentes: Primero, proporcionar valores estimados en localizaciones de interés y segundo, generar valores que en conjunto presenten iguales características de dispersión que los datos originales.

En aplicaciones hidrogeológicas, es normal disponer de información directa acerca de algún parámetro que interesa describir, por ejemplo el espesor de una capa acuífera, la porosidad, el nivel piezométrico o la permeabilidad. Estas medidas pueden provenir de ensayos in situ o de ensayos de laboratorio sobre testigos. Por esta razón las medidas directas de parámetros hidrogeológicos suelen ser escasas y espacialmente dispersas. A este tipo de datos se lo llama información dura, ya que su incertidumbre puede considerarse nula o despreciable. Además de la información anterior,

es posible contar con un tipo de información de tipo indirecta que no proporciona una medida del parámetro que interesa, sino la de algún otro que esperamos tenga alguna correlación con el primero; por ejemplo, es posible relacionar medidas geoelectricas con valores de profundidad, espesor, porosidad y mas débilmente con valores de permeabilidad. Dada la incertidumbre que conlleva el establecimiento de estas relaciones, a este tipo de información se la denomina información blanda.

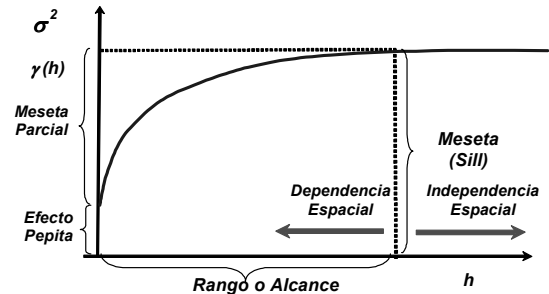
En general un método que predice, para una determinada localización, un valor del atributo que es idéntico al valor medido en esta posición se lo llama un método preciso ó exacto. Todo otro tipo de método se lo llama inexacto. La diferencia (absoluta o cuadrada) entre el valor observado y el valor estimado es en la gran mayoría de los casos usada como indicador de la calidad de la interpolación inexacta. Desde un punto de vista más general, los métodos de interpolación se los clasifica en dos grandes grupos: Métodos globales y Métodos locales determinísticos.

Una aproximación al problema de interpolación viene dado por la teoría de los métodos geoestadísticos. Esta metodología se basa en la correlación espacial de los datos geográficos. La geoestadística proporciona estimaciones probabilísticas de la calidad de la interpolación. Permite también hacer predicciones por superficies o volúmenes más grandes y pueden incorporar en el cálculo datos livianos con el fin de mejorar la precisión de la interpolación.

**El Kriging**

El método geoestadístico kriging, describe la correlación tanto espacial como temporal que existe entre los valores de un atributo distribuido en el espacio. Tradicionalmente se le ha utilizado en las llamadas geociencias; sin embargo, sus principios se aplican cada vez más en una amplia variedad de campos científicos como pesqueras, silvicultura, cartografía y, meteorología, entre otras ciencias.

El semivariograma es una medida del grado de dependencia espacial entre las muestras (Figura 4.), es decir, el diagrama de semivarianzas en función de la distancia de un punto se llama semivariograma. Bajo condiciones de estacionariedad, el variograma alcanza un límite superior, **la meseta**, para un cierto  $h$ , **el alcance**. Los variogramas direccionales revelan características tales como el efecto pepita y la anisotropía (Armstrong, 1998).



**Figura 4.** Principales elementos del Variograma. (Mejía, 2006)

**Figure 4.** Main variogram components.

El semivariograma es una medida del grado de dependencia espacial entre las muestras; es decir, el diagrama de semivarianzas en función de la distancia. Para una variable intrínseca y estacionaria se representa como:

$$\gamma_x = \frac{1}{2} E [ Z(x + h) - z(x) ]^2 ,$$

Donde  $x$  y  $h$ , pertenecen a  $\mathcal{R}^n$ .

Kriging es el método de cálculo de una variable regionalizada, usando un criterio de minimización de la estimación de la varianza. Para ello se resuelve un conjunto de ecuaciones utilizando la información presente en el variograma, las distancias relativas entre los datos y la posición del punto donde se desea realizar la estimación. El variograma teórico o del modelo, se genera mediante ajuste estadístico y se utiliza para calcular los pesos que se usarán el proceso de krigeado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f(x, y) = \sum_1^n W_i Z_i$$

Donde,

- n:** Es el número de puntos conocidos  
**Z<sub>i</sub>:** Es el valor de cada punto.  
**W<sub>i</sub>:** Es el peso asignado a cada punto

## 6. INSUMOS Y MÉTODOS EMPLEADOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el conjunto de actividades y proyectos que le han antecedido. Desde el año 2002 un grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia y la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA-, ha venido desarrollando una serie de estudios soportados en trabajo de campo, fotointerpretación, medición de parámetros hidráulicos, exploración geofísica, diseño e implementación de redes de monitoreo, formulación de modelos conceptuales parciales y preliminares, entre otras actividades.

El análisis geoestadístico es un proceso multipaso que requiere como mínimo: i) Un análisis exploratorio de los datos; ii) Evaluación de la normalidad y posibles transformaciones necesarias para lograrla; iii) Determinación de tendencias y anisotropías, iv) Construcción del semivariograma para la determinación del rango, la meseta y el valor del efecto pepita; v) Ajuste de modelos teóricos para variogramas, vi) Análisis del efecto pepita; vii) Evaluación de los agrupamientos o clusters y viii) Validación cruzada.

El conjunto de datos definitivo que se utilizó para modelar la geometría del sistema acuífero conformado por las unidades hidrogeológicas identificadas como U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>, U<sub>4</sub>, U<sub>5</sub>, corresponde a información estratigráfica de captaciones de agua y sondeos eléctricos verticales. Dada la conexión hidráulica lateral que existe entre U<sub>2</sub> y U<sub>3</sub>, teniendo en cuenta que U<sub>1</sub> constituye una delgada cobertura orgánica, estas unidades se redefinieron como una única unidad hidrogeológica libre designada en adelante como U<sub>123</sub>. Para representar el basamento del sistema, que hacia el sur de la

zona de estudio esta conformado por una roca metamórfica de edad Paleozoico y poder entonces modelar toda la zona de interés que hacia el norte presenta un limite muy irregular definido por la frontera entre Antioquia y Córdoba, fue necesario agregar algunos puntos inferidos de acuerdo con el conocimiento geológico de la región (Betancur & Mejía, 2005).

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Geometría Acuífera.

La tabla 1 presenta una síntesis de los principales estadísticos asociados a los espesores de las unidades U<sub>123</sub>, U<sub>4</sub> y U<sub>5</sub>.

**Tabla 1.** Estadísticas básicas para Espesores de la Unidad acuífera U<sub>123</sub> a partir de información litoestratigráfica y de inferencias hidrogeológicas.

**Table 1.** Basic statistics to hydrogeological unit U<sub>123</sub>.

Descripción	Datos de campo			Datos de campo e inferidos		
	U <sub>123</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>123</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>
Numero de datos	131	39	16	152	59	35
Media	39,81	34,00	62,81	35,40	23,15	36,74
Mediana	38,00	20,00	70,50	28,5	7	40
Desv. Estándar	31,02	42,28	24,34	31,80	37,64	36,29
Kurtosis	-0,50	3,38	1,46	-0,54	6,05	-1,83
Coefficiente de Asimetría	0,48	1,91	-1,22	0,59	2,42	0,12
Coefficiente de variación	0,78	1,24	0,39	0,90	1,63	0,99

La tabla 2 presenta los principales resultados obtenidos para cada uno de los modelos empleados en la construcción de la superficie de espesores de la Unidad acuífera U<sub>123</sub>.

En su orden, los modelos que producen el mejor ajuste son el Gaussiano, el esférico y por ultimo el exponencial. Luego de realizar la transformación a los datos originales, se obtuvo la nueva superficie de predicción para los espesores de la unidad acuífera U<sub>123</sub> y su respectivo mapa de errores (Figura 5).

De manera semejante, procedimientos como el aquí ilustrado para la unidad hidrogeológica U<sub>123</sub>, se usan para definir la geometría de las unidades hidrogeológicas U<sub>4</sub> y U<sub>5</sub>, así como las

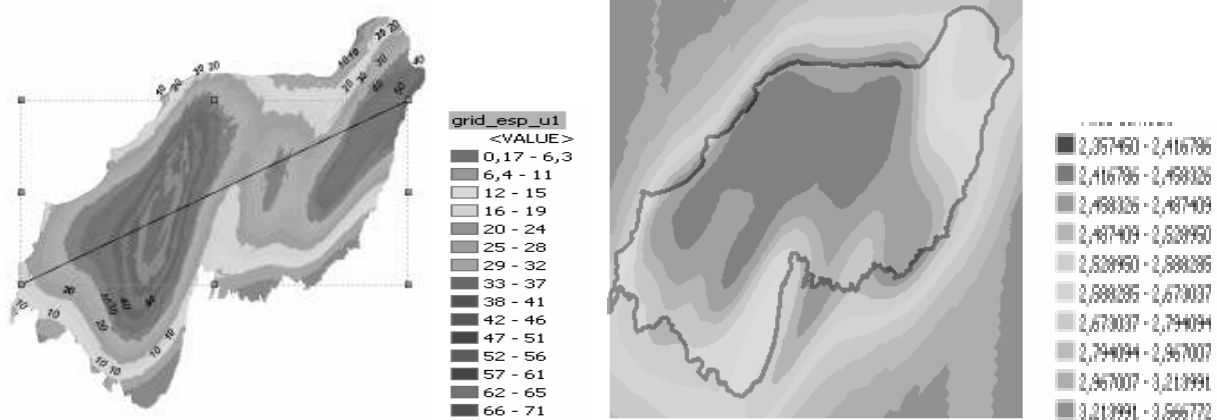


propiedades hidráulicas y la superficie piezométrica de la unidad U<sub>123</sub>.

**Tabla 2.** Síntesis de los principales parámetros empleados en cada uno de los modelos de ajuste de semivariograma. (Referencia: 12 Lags)

**Table 2.** Parameters and geostatistic models used.

Modelo	#	interpolación	Rango mayor	Rango menor	Ef. Pepita	Meseta parcial	Dirección	Tamaño del Lag	Factor de Anisotropía	RMSS
Esférico	1	Global	6344,3	*	*	7,3465	*	3482,6	1	1.528
	2	Local	771,96	*	*	5,0856	*	104,91	1	1,059
	3	Local	969,49	567,34	0	4,9279	346,7	104,91	1.7088	1.067
	3a	50-50	8772,7	4768,5	3,0917	3,4074	18,7	752,74	1.8397	0,9481
	4	Global	39564	16761	5,0776	2,5241	23,6	3482,6	2.3605	0,9613
Exponencial	5	Local	7840,8	5541,1	2,7546	3,4693	31,9	661,49	1.415	0,9674
	5a	50-50	8922,4	6240,3	2,7992	3,8365	30,5	752,74	1.4298	0,9471
	6	Global	39555	15023	4,1383	3,5109	23,5	3482,6	2.633	0,9758
Gaussiano	7	Local	7727,5	3909,5	3,498	2,7185	20,1	661,49	1.9766	0,9736
	7a	50-50	8741,1	4393,9	3,5851	3,0388	20,9	752,74	1.9894	0.954
	8	Global	39557	13272	5,3661	2,28	23	3482,6	2.9805	0,9597



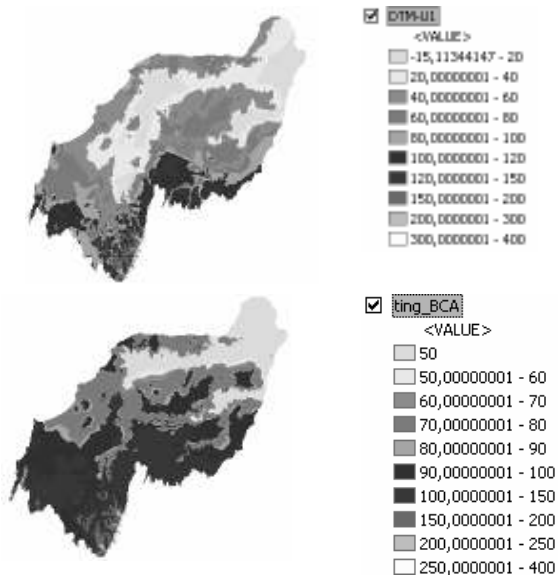
**Figura 5.** Superficie raster de predicción de los espesores de la Unidad acuífera U<sub>123</sub> obtenida mediante Modelo Gaussiano y Mapa de error estimado de la predicción.

**Figure 5.** raster surface to hydrogeological unit U<sub>123</sub> and error map.

El modelo digital de terreno (DTM) que se requiere para propósitos de modelamiento numérico de flujo de aguas subterráneas en el bajo Cauca antioqueño, debe corresponder a la

superficie de profundidades medidas respecto al nivel del mar. Para obtener dicha superficie ha sido necesario obtener un modelo de elevación digital (DEM), que usado de manera conjunta con el mapa de espesores de U<sub>123</sub>, permite

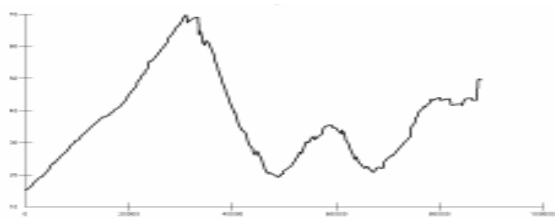
Obtener mediante una operación algebraica la superficie deseada (figura 6).



**Figura 6.** Modelos digitales de Elevación de la superficie y la base de U<sub>123</sub>.

**Figure 6.** Digital Elevation Models to U<sub>123</sub>

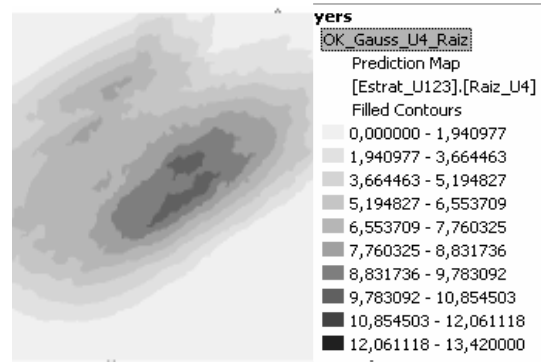
Para ilustrar el aspecto de la superficie obtenida, se presenta un detalle de la geometría de la base de la unidad acuífera superior U<sub>123</sub>, a lo largo de una sección suroeste – noreste tal como se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Corte en sentido SW-NE a lo largo de la base de U<sub>123</sub>.

**Figure 7.** Cross section to U<sub>123</sub>

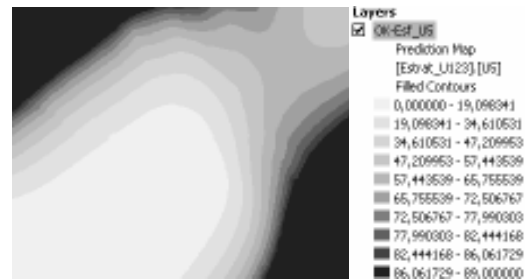
Para la capa U<sub>4</sub>, que subyace la unidad acuífera U<sub>123</sub>, el modelo que produce el mejor ajuste es de tipo Gaussiano. (figura 8).



**Figura 8.** Superficie resultante a partir de Kriging para la Unidad acuífera U<sub>4</sub>.

**Figure 8.** Raster surface to U<sub>4</sub>

Para U<sub>5</sub>, que corresponde a la unidad acuífera mas profunda se obtuvo una morfología que representa bastante bien la hipótesis que plantea la existencia de un sinclinal con un posible eje a lo largo de la trayectoria actual del río Cauca (figura 9). Un modelo de ajuste tipo estable, permitió lograr este resultado.



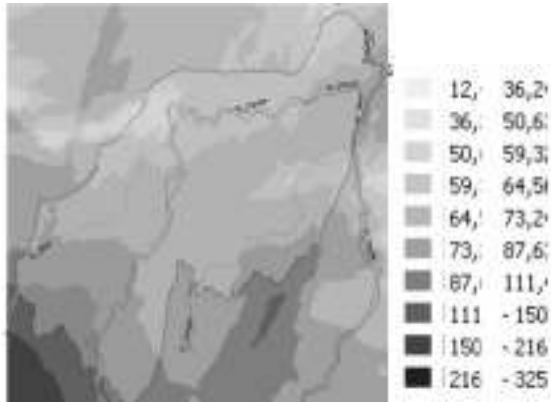
**Figura 9.** Superficie resultante a partir de Kriging para la Unidad acuífera U<sub>5</sub>.

**Figure 9.** Raster surface to U<sub>5</sub>

### 7.2. Superficie piezométrica de U<sub>123</sub>

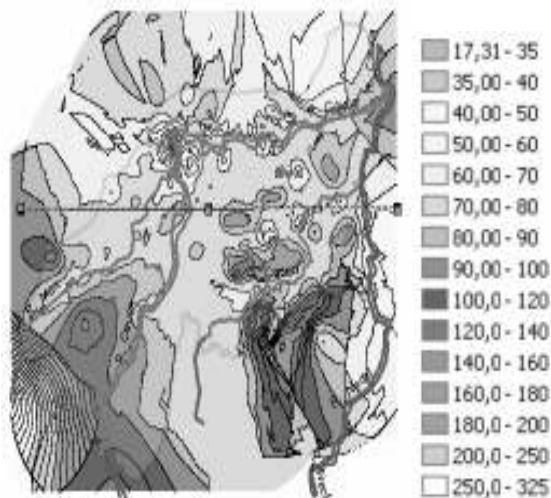
Para la generación de esta superficie, fue necesario ajustar el conjunto de la información requerida sobre nivel piezometrico del agua con base al conocimiento de la Hidrogeología de la región del Bajo Cauca antioqueño.

El Modelo que mejor ajuste produjo desde el punto de vista geoestadístico, es el kriging ordinario a partir de transformación logarítmica de los datos, remoción de tendencias lineales, consideración de anisotropía en sentido norte sur, efecto pepita y ajuste Gaussiano. (Figura 10).



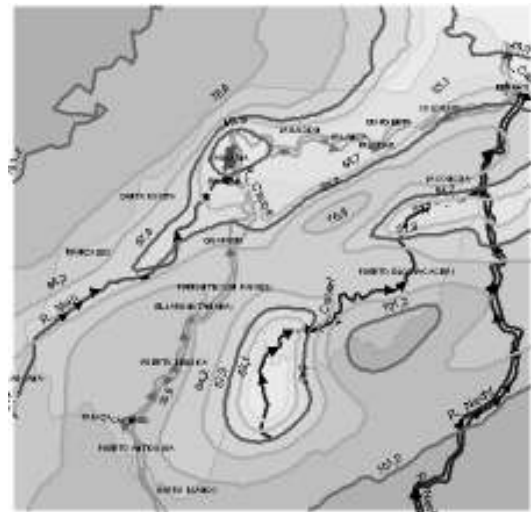
**Figura 10.** Superficie piezométrica de la Unidad acuífera  $U_{123}$ . Kriging ordinario y Modelo Gaussiano.  
**Figure 10.** Freatic surface to  $U_{123}$

La superficie piezométrica  $U_{123}$  fue reclasificada. La figura 11 presenta las resultantes líneas equipotenciales.



**Figura 11.** Superficie piezométrica y Líneas equipotenciales de la Unidad  $U_{123}$ .  
**Figure 11.** Freatic surface and equipotential lines to  $U_{123}$

El modelo de elevación resultante fue suavizado mediante técnicas de interpolación blandas. (Figura 12).



**Figura 12.** Superficie piezométrica final de la Unidad acuífera  $U_{123}$ .  
**Figure 12.** Final freatic surface to  $U_{123}$

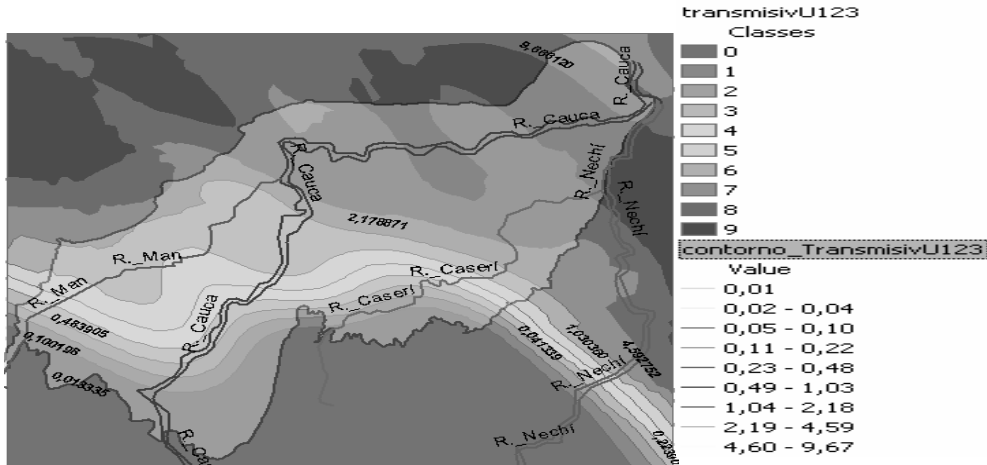
Las superficies equipotenciales han sido comparadas con los reportes que se tienen a partir de la experiencia en la región, obteniéndose resultados bastante satisfactorios.

### 7.3. Transmisividad de la Unidad acuífera $U_{123}$

El conjunto de valores de transmisividad usados en el modelo, han sido obtenidos mediante pruebas de bombeo en las que se midieron los comportamientos de los abatimientos y las recuperaciones de los niveles dinámicos de los pozos.

Mediante técnicas convencionales como Jacob o Theis, se estimaron los parámetros hidráulicos representativos de las inmediaciones del pozo como son la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento y a partir de estos datos y del conocimiento de la distribución geométrica del acuífero, se pudo inferir la permeabilidad.

A partir de la información existente y la inferida, se construyó la superficie de transmisividad para la Unidad acuífera  $U_{123}$  a partir de la aplicación de Kriging ordinario, transformación logarítmica, remoción de tendencias de segundo orden, anisotropía, efecto pepita y con modelo de ajuste exponencial (Figura 13).



**Figura 13.** Distribución de la transmisividad para la Unidad acuífera  $U_{123}$ , obtenida mediante kriging ordinario y modelo exponencial. (Transmisividad en  $m^2/día$ ).

**Figure 13.** Transmissivity to  $U_{123}$

## 8. DISCUSIÓN FINAL

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de la geoestadística, han supuesto un nuevo impulso al análisis de la distribución espacial de variables hidrogeológicas. Lo anterior permite a partir de la interpretación de información recopilada durante varios años de estudios de exploración de aguas subterráneas en el Bajo Cauca antioqueño, obtener para la región, un primer modelo conceptual del sistema acuífero y con este contribuir al conocimiento de la disponibilidad de este recurso estratégico para la región.

Utilizando técnicas geoestadísticas ha sido posible; construir un modelo geométrico del sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño, obtener una representación espacial de las superficies freática y piezométrica; sugerir, a partir de la información existente, la red de flujo más probable y proponer una posible distribución de su transmisividad hidráulica.

Entre los métodos de interpolación geoespacial existentes, el Kriging y sus variantes, constituyen un método ideal para representar con mayor confiabilidad estadística que otras técnicas, la variabilidad espacial de parámetros

hidrogeológicos como el espesor de los acuíferos y las propiedades hidráulicas.

Mientras que los métodos tradicionales utilizan el concepto euclidiano de la distancia para el cálculo de los pesos que se aplicarán a cada dato muestral, el kriging considera para la localización de las muestras, tanto la distancia euclídea como la geométrica; razón por la cual el kriging minimiza la varianza del error esperado.

El mejor modelo de la geometría del sistema acuífero del BCA se obtuvo utilizando métodos geoestadísticos de interpolación tipo Kriging lineal ordinario. Esta técnica se usó para la modelación de las tres unidades acuíferas identificadas y denominadas como  $U_{123}$ ,  $U_4$  y  $U_5$ . Para la superficie piezométrica, el Modelo que mejor ajuste produjo desde el punto de vista geoestadístico fue el kriging ordinario con transformación logarítmica, remoción de tendencias lineales, anisotropía en sentido norte sur, efecto pepita y ajuste Gaussiano.

La superficie de transmisividad en la Unidad acuífera  $U_{123}$ , se obtuvo a partir de Kriging ordinario, transformación logarítmica, remoción de tendencias de segundo orden, anisotropía, efecto pepita y con modelo de ajuste exponencial.

Existe un conjunto de tendencias que pueden ser explicadas por las condiciones litoestratigráficas y por los lineamientos mayores y direcciones dominantes como las establecidas por el río Cauca y por las estructuras tipo falla que existen en la región.

El conjunto de procesos sedimentarios asociados al río Cauca y al sistema hídrico que lo constituye, incluyendo ecosistemas lénticos que conforman el complejo de ciénagas y lagunas; aparte de ser la principal razón del potencial hidrogeológico del BCA, también explican la complejidad geométrica de los acuíferos que se han formado allí durante miles de años. Esta complejidad representa una dificultad y un reto en la construcción de modelos matemáticos que permitan representar la imbricada red de estratos sedimentarios que conforman el sistema acuífero.

Cerca de siglo y medio de laboreo minero en la zona, la remoción de potentes horizontes del suelo en busca del oro aluvial que ha sido depositado a lo largo y ancho de las grandes extensiones que conforman el BCA; es una razón adicional para explicar la heterogeneidad y en ocasiones la ausencia de continuidad espacial en las formaciones hidrogeológicas de la región. Se debe estudiar de manera sistemática los criterios que deben considerarse para el análisis de la concavidad de las superficies resultantes mediante la técnica del kriging. No puede olvidarse que entre cada par de puntos que intervienen en el proceso de interpolación, pueden definirse infinitas trayectorias, desde las convexas a las cóncavas, pasando por las trayectorias lineales de curvatura infinita.

Es evidente la dificultad de obtener representaciones de la realidad hacia las zonas que describen los límites del dominio espacial que desea modelarse, es claro que en los procesos de modelamiento reviste una gran complejidad el ajuste de la información experimental en las zonas de frontera; esto requiere definir un conjunto de criterios o condiciones de borde mínimos a ser tenidos en cuenta para representar adecuadamente dichos límites.

La geoestadística es una técnica sutil e ingeniosa para aproximarse a lo que no se conoce mediante lo conocido, asumiendo el riesgo de los procesos y las técnicas de predicción.

Finalmente, es necesario recordar que frente a la realidad geométrica de un sistema, a pesar de que este posee una sola realidad matemática, hay infinitas maneras simplificadas de representarla.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las instituciones que han venido trabajando en la región del Bajo Cauca con el fin de conocer el sistema acuífero, CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia, y a la Universidad San Buenaventura por contribuir a la formación de especialistas en SIG.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ARMSTRONG, A. (1998). Basic Linear Geostatistics. Springer. New York.
- [2] BETANCUR; V, T & Mejía, O. (2005). Inédito. Una base de datos litoestratigráfica de las Unidades acuíferas del Bajo Cauca Antioqueño.
- [3] BURROUGH, P.A. & McDonnell, R. A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford Univ. Press, New York.
- [4] CORANTIOQUIA – Hidrogeoma. 2001. “Inventario y caracterización de las aguas subterráneas en el casco urbano del Municipio de Cauca”.
- [5] CORANTIOQUIA – Universidad de Antioquia. (2.003) Evaluación hidrogeológica entre los municipios de Cauca y Cáceres.
- [6] CORANTIOQUIA – Universidad de Antioquia. (2.004) Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos al norte del municipio de Cauca.
- [7] CORANTIOQUIA – Universidad de Antioquia. (2.005). Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos en la cuenca del río Caserí.
- [8] MEJÍA, O. Técnicas geoestadísticas en Hidrogeología. Caso de Estudio el bajo cauca antioqueño. Trabajo de Grado. Universidad de San Buenaventura. 2006.