

**MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA ZONA METROPOLITANA DE
BUCARAMANGA PARA BASAMENTOS Y CAPAS DE ACUÍFEROS**

**GERMÁN ORLANDO JOYA SEPÚLVEDA
WILMER ANDRÉS DEANTONIO MONROY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA ZONA METROPOLITANA DE
BUCARAMANGA PARA BASAMENTOS Y CAPAS DE ACUÍFEROS**

**GERMÁN ORLANDO JOYA SEPÚLVEDA
WILMER ANDRÉS DEANTONIO MONROY**

**Trabajo de grado para optar el título de
INGENIERO CIVIL**

**Director
SULLY GÓMEZ ISIDRO
Ing. Civil, M.sc., PhD**

**Co-director
WALTER LEONARD ANTOLINEZ QUIJANO
Ing. Civil Msc (c).**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

*A Dios por darme fortaleza y la sabiduría para,
poder sacar esta carrera adelante.*

*A mi madre Guillermina Sepúlveda, por su cariño,
Su apoyo, paciencia y fortaleza para dar,
por culminada esta etapa de mi vida.*

*A mis hermanitas, Lílana Victoria, Sandra Milena, y Belsi yohana,
por su amor incondicional, y apoyo constante.*

*A mi tía Celina por su gran apoyo,
Su cariño y comprensión.*

*A mi amigo Jesús Evelio, por su apoyo constante,
Su credibilidad y su lealtad,
en los buenos y malos momentos.*

*A mis amigos Natanael Sandoval y wilmer Andrés por los buenos
momentos, su paciencia, y confianza.*

*A mis demás amigos y compañeros de estudio,
por su gran amistad ayuda y comprensión.*

G. O. J. S.

DEDICATORIA

*A Dios por darme la vida y sabiduría para
haber sacado esta carrera adelante.*

*A mi madre Ilma Dianey, a mi padre Luis Alfredo
y a mi hermana Paola,
Por su continuo apoyo y cariño recibido,
por ser cada uno de ellos mi fuerza en los
momentos difíciles y compartir cada uno de
mis triunfos.*

*A mis primos Viviana y Ferney por su
apoyo y estar siempre presentes en mi
corazón.*

*A mi primo Fernando por el apoyo brindado durante la carrera y
demás familiares por su respaldo, su cariño y apoyo constante.*

*A mis amigos German Orlando, Jesús Evelio y compañeros del alma
mater por los buenos momentos, su paciencia, confianza,
y aquellos que creyeron en mi trabajo.*

Wilmer Andrés

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas, brindarnos el conocimiento y una formación integral.

A la Escuela de Ingeniería Civil y al Claustro de Profesores por su dedicación, y sus grandes aportes.

Nuestros sinceros agradecimientos a nuestra directora Ing. Civil, M.sc., PhD Sully Gómez Isidro, por ser nuestro guía para la ejecución del presente proyecto, por su paciencia y por los conocimientos brindados.

A los Ingenieros José Alfredo Rueda Núñez, Walter Leonard Antolínez Quijano, por sus valiosos aportes para que este proyecto fuera una realidad.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	18
1. CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN	20
1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)	20
1.1.1 Definición de un MDE	20
1.1.2 Estructura de datos de un MDE	22
1.1.2.1 Estructura Raster	23
1.1.3 Resolución Espacial del MDE	23
1.1.4 Métodos de Interpolación y Variogramas	24
1.1.5 Errores en los MDE	25
1.1.6 Procesos de Validación del MDE	26
2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL REFERENCIADO EN MAGNA - SIRGAS	28
2.1 MAGNA – SIRGAS	29
2.1.1 Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas: SIRGAS	29
2.1.2 Marco Geocéntrico Nacional de Referencia: MAGNA	30
2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL 1:10000	33
2.2.1 Ubicación y descripción general de la zona de estu	33
2.2.1.1 Localización	33
2.2.1.2 Hidrografía	34
2.3 ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍAS DIGITALES 1:10000.	35
2.3.1 Toma de fotografía aérea	35
2.3.2 Modelo Digital de Elevación	36
2.3.3 Ortofotomosaico	36
2.3.4 Precisión final	36
2.3.4.2 Precisión Altimétrica	36

2.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CAPA QUEREPRESENTA LA SUPERFICIE DEL TERRENO DEL ÁREA DE BUCARAMANGA	37
2.4.1 Revisión de la cartografía digital y corrección	37
2.4.2 Extracción de datos de cartografía digital	38
2.4.3 Algoritmo Interpolador en Surfer V 9.0	38
2.4.4 Validación del MDE	40
3. ACUÍFEROS, GEOMETRÍA Y ESPACIALIZACIÓN DE CAPAS	47
3.1 CLASIFICACION DE LOS ACUÍFEROS	47
3.1.1 Acuíferos Libres	47
3.1.2 Acuíferos Confinados	47
3.1.3 Acuíferos Semiconfinados	48
3.2 BASAMENTOS	48
3.3 FORMACIONES ACUÍFERAS EN LA REGIÓN DE ESTUDIO	49
3.3.1 Sedimentos cuaternarios – formación Bucaramanga	49
3.3.1.1 Miembro Órganos	50
3.3.1.2 Miembro Finos	50
3.3.1.3 Miembro Gravoso	52
3.3.1.4 Miembro limos rojos	53
3.3.2 Formación Girón	53
3.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CAPA DE FINOS Y BASAMENTO DE LOS ACUÍFEROS	55
3.4.1 Espacialización de las capas Finos y Formación Girón	55
3.4.2 Capa de Finos	56
3.4.3 Capa del basamento Girón	56
4. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	57
4.1 SOFTWARE ArcGIS	59
4.2 INTEGRACIÓN DEL MDE PARA CAPAS Y BASAMENTOS DE ACUIFEROS A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	60
4.2.1 Migración del MDE para Capas de Finos y Basamentos de Acuíferos al Software ArcGis	60

4.2.2 Estructuración del SIG	61
5. PRODUCTOS FINALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
5.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA	62
5.2 MODELO DIGITAL DE LAS CAPAS FINOS Y BASAMENTO DE ACUÍFEROS	64
5.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO INTEGRANDO EL MDE PARA LAS CAPAS DE ACUÍFEROS	66
6. CONCLUSIONES	69
7. RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72
CONSULTAS VÍA WEB	75
ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fotografía modelo digital de elevaciones que contiene la meseta de Bucaramanga	21
Figura 2. SIRGAS: Sistema de Referencia para Las Américas	30
Figura 3. Sistema MAGAN-SIRGAS: Red básica GPS y estaciones.	31
Figura 4. Localización del área Metropolitana de Bucaramanga	34
Figura 5. Área de estudio de la zona metropolitana de Bucaramanga	37
Figura 6. Tipos de acuíferos	48
Figura 7. Miembros finos de la formación Bucaramanga ubicado en el Barrio Primero de Mayo, sector Quinta Estrella	52
Figura 8. Formación Girón ubicada en el Cerro de Palonegro	54
Figura 9. Funcionamiento de un SIG	57
Figura 10. Formato Raster y Vectorial	58
Figura 11. MDE en 3D de la Zona de Estudio	63
Figura 12. MDE en 3D del Basamento del Acuífero superficial de Bucaramanga	65
Figura 13. MDE en 3D del Basamento Formación Girón	65
Figura 14. Integración de los MDEs en 3D cortes	67
Figura 15. Corte A-A' longitudinal en dirección Norte-Sur	67
Figura 16. Corte B-B' Transversal sector Norte en dirección Este-Oeste	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resoluciones espaciales típicas de diferentes mapas topográficos	24
Tabla 2. Diferencias entre Datum BOGOTÁ Y el MAGNA-SIRGAS	32
Tabla 3. Error medio cuadrático para diferentes algoritmos de interpolación	39
Tabla 4. Valores residuales (ΔZ) que representan la diferencia entre elevaciones	41
Tabla 5. Estadísticos para los datos muestrales	43
Tabla 6. Coeficiente de Chauvenet para distintos tamaños de muestra	44
Tabla 7. Resultado de la segunda aplicación del criterio de Chauvenet	45

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. REGISTRO FOTOGRAMÉTRICO DE LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA	77
ANEXO 2. GRAFICAS EN 2D Y 3D DE RESULTADOS FINALES: CORTES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	82
ANEXO 3. PUNTOS OBTENIDOS MEDIANTE ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS REALIZADOS POR INGEOMINAS, BASAMENTO FINOS	86
ANEXO 4. PUNTOS OBTENIDOS MEDIANTE ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS REALIZADOS POR INGEOMINAS, BASAMENTO GIRÓN	87
ANEXO 5. PUNTOS OBTENIDOS DE LA CARTOGRAFÍA 1:10000 MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE CAMPO PARA EL BASAMENTO GIRÓN	88
ANEXO 6. PERFILES REPRESENTATIVOS DE CADA UNO DE LOS CORTES GENERADOS	89
ANEXO 7. VARIOGRAMA GENERADO PARA LA CAPA DE FINOS	91

RESUMEN

TITULO: MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA EN ESCALA 1:10000 PARA MODELAR BASAMENTOS Y CAPAS DE ACUÍFEROS.*

AUTORES: JOYA SEPULVEDAD GERMAN ORLANDO,
DEANTONIO MONROY WILMER ANDRES.**

PALABRAS CLAVES: Acuíferos, Modelo Digital de Elevaciones, Formación Girón, Capa de Finos, Basamentos, SIG, Modelos Raster.

DESCRIPCION

El objetivo principal de este proyecto fue elaborar un Modelo Digital de Elevaciones para modelar cartográficamente basamentos y capas de acuíferos, y la capa de finos. El desarrollo del Modelo Digital de Elevaciones se realizó a partir de la información cartográfica disponible a escala 1:10000 con curvas de nivel cada 10 metros, el modelo se generó mediante la información obtenida de la toma de fotografía aérea digital, el modelo definitivo se generó con un tamaño de celda de 10x10 metros a partir de la interpolador Kriging y se referenció al sistema coordenado MAGNA-SIRGAS.

MDE generado representa mejor el terreno cuando se compara con la información cartográfica existente y de acuerdo al reconocimiento del terreno. Con la incorporación de la información de campo se logró reducir el error medio cuadrático a 1.539 y definir mejor las áreas que representaban deficiencia de información dentro de la zona en estudio

La validación del MDE obtenido se realizó con un reconocimiento de la zona, a través de tomas de campo mediante GPS en las cuales se tomaron las coordenadas y material fotográfico de 49 puntos. Se generó además un Sistema de Información Geográfica que integra el Modelo Digital de Elevaciones, la capa superficial, capa de finos y el de basamentos de acuíferos enmarcado en el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS.

* Proyecto de Grado

** Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Sully Gómez Isidro, Codirector: Walter Leonard Antolinez Quijano.

ABSTRACT

TITLE: DIGITAL ELEVATION MODEL METROPOLITAN AREA BUCARAMANGA 1:10000 SCALE TO MODEL BASEMENTS AND LAYERS OF AQUIFERS.*

AUTHORS: JOYA SEPULVEDAD GERMAN ORLANDO,
DEANTONIO MONROY WILMER ANDRES.**

KEY WORDS: Aquifer, Digital Elevation Model, Formation Girón, Layer of Fine, Basements, SIG, Models Raster.

DESCRIPTION

The main objective of this project was to elaborate a Digital Model of Elevations to model basements and layers cartographically of aquifer, and the layer of fine. The development of the Digital Model of Elevations was carried out starting from the available cartographic information to scale 1:10000 with curved of level each 10 meters, the Model was generated by means of the obtained information of the taking of digital air picture, the definitive Model was generated with a size of cell of 10x10 meters starting from the interpolator Kriging and you indexes to the coordinated system MAGNA-SIRGAS.

Generated MDE represents the land better when it is compared with the existent cartographic information and according to the recognition of the land. With the incorporation of the field information it was possible to reduce the half quadratic error at 1.539 and to define the areas that represented deficiency of information inside the area in study better.

The validation of the obtained MDE was carried out with recognition of the area, through field takings by means of GPS in which took the coordinates and photographic material of 49 points. It was generated a System of Geographical Information that integrates the Digital Model of Elevations, the superficial layer, it also castrates of fine and that of basements of aquifers framed in the reference system MAGNA-SIRGAS.

* Project of grade

** Universidad Industrial de Santander. Faculty of Engineering's Physical Mechanics, School of Civil Engineering, Director: Sully Gómez Isidro, Codirect or: Walter Leonard Antolinez Quijano

INTRODUCCIÓN

Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón, conforman la zona metropolitana de Bucaramanga que se encuentra en el departamento de Santander, los cuales son beneficiarios de los recursos hídricos proporcionados por este sector y que son de gran importancia para el sostenimiento de sus actividades, agronómicas, ganaderas, domésticas e industriales etc.

Debido a la dependencia de estos recursos se presenta la necesidad de estudiar e investigar las características geomorfológicas e hidrogeológicas del área metropolitana de Bucaramanga para basamentos y capas de acuíferos y así poder generar información que permita disminuir la incertidumbre en esos aspectos, que tiendan a garantizar el manejo de los recursos hídricos sosteniblemente.

Para lograr esta meta el presente estudio tiene como objetivo realizar un modelo digital de elevaciones del área metropolitana de Bucaramanga a partir de una cartografía digital a escala 1:10000 para modelar los basamentos de los acuíferos y crear bloque-diagramas de la zona en estudio y a partir de estos generar los espesores y cortes geológicos en donde se mostraran perfiles.

A lo largo del desarrollo teórico de un MDE para la migración a un SIG, una de las líneas más interesantes se centra en un análisis de las diferentes herramientas de SIG como elementos, operadores y funciones, que conforman parte del lenguaje para la recopilación de datos y resolución de algoritmos que resuelven determinados problemas espaciales.

Los productos finales del estudio realizado brindarán herramientas muy prácticas para construcción de modelos hidrológicos en aguas subterráneas. El presente informe estará compuesto por capítulos en donde se muestra cada uno de los aspectos. En el capítulo uno (1) se hará una breve conceptualización a cerca de

los Modelos Digitales de Elevación y representación en el formato que se estructura el MDE en base a su resolución y error que se pueda generar. El capítulo dos (2) se establece el marco de referencia para la adopción e implementación del sistema MAGNA-SIRGAS haciendo una revisión de la cartografía digital 1:10000 en el sistema MAGNA-SIRGAS y un análisis detallado, se muestra el procedimiento de cómo y en base a que herramientas se creó y valido el modelo digital de elevación (MDE). En el capítulo (3) se realizará una breve conceptualización de la formación Girón y las capas y/o miembros que conforman formaciones, que son generadoras de acuíferos existentes en el área metropolitana de Bucaramanga. En el capítulo cuatro (4) se conceptualizará de manera explícita cada uno de los procesos constructivos e integración de los bloques-diagramas en el software ArcGis¹ y en el capítulo (5) se hará el análisis de los resultados obtenidos de metodología aplicada para la creación del SIG, por consiguiente se realizarán conclusiones al final del documento.

En la realización del presente trabajo, se incorporaron varios software para el procesamiento de datos y su consecutiva visualización. Comenzando que la cartografía digital utilizada se incorporó a partir del software AutoCAD. Posteriormente se elaboró el Modelo Digital de Elevaciones, a través del software comercial Surfer v.9, junto con herramientas de Microsoft Office 2010. Los procesos de transformación de los MDE, la importación de capas y la creación del Sistema de Información Geográfico, se realizaron mediante el software comercial ArcGIS v.9.3.1.

¹ El Grupo GPH, cuenta con las licencias pertinentes de todos los software comerciales utilizados en este proyecto.

1. CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

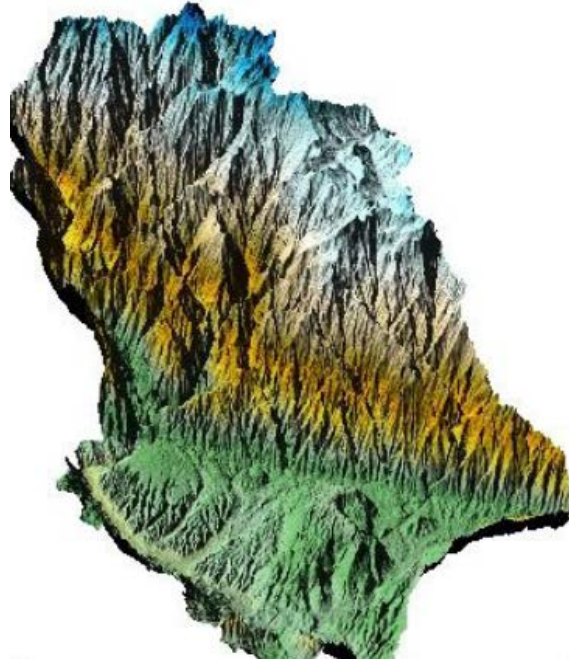
En este capítulo se hará una breve definición de lo que es un Modelo Digital de Elevación; cual es el método de interpolación más apropiado para la creación del (MDE) así como error que este debe generar y su respectivo análisis, también se desarrollará una descripción de los parámetros establecidos.

1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)

El uso de los modelos digitales de elevación (MDE) se ha extendido a muchos ámbitos como los estudios topográficos o geológicos, así como modelos digitales hidrológicos; estos modelos me ofrecen una representación visual y matemática de coordenadas referenciadas bajo el sistema MAGNA-SIRGAS; estas me permiten caracterizar las formas de relieve u objetos presentes en el mismo.

1.1.1 Definición de un MDE. Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representan de manera digital una variable continua que distribuye en el espacio una característica del territorio sobre una superficie de dos dimensiones, las que comúnmente se representan con las letras X, Y; a la variable continua se suele representar con la letra Z y generalmente corresponde a una descripción de altitud de la superficie del terreno. (Felicísimo A., 1994)

Figura 1. Fotografía modelo digital de elevaciones que contiene la meseta de Bucaramanga



Fuente: Proyecto de grado Elaboración de un modelo digital de elevaciones y generación del mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del Río Lebrija. Autor: Deimer Ariel Pérez Solano

Dentro del Modelo Digital de Elevación se aplica la función que relaciona una variable de elevación con las coordenadas (X, Y) de un punto en el terreno sobre un dominio espacial concreto. Esta función no es continua pero se resuelve en intervalos que serán definidos por la cantidad y la calidad de los datos obtenidos en el levantamiento topográfico, restitución fotogramétrica, etc. Y su consecuente pérdida de la información debido a la discretización del modelo en la búsqueda de una estructura de datos idónea.

El proceso para la generación del Modelo digital, parte de la información primaria y/o secundaria², aunque para el MDE esta información puede estar conformada por curvas de nivel o archivos digitales de tipo Raster, que será distribuida

² Esta información puede estar conformada por curvas de nivel o archivos digitales tipo Raster.

irregularmente para generar nuevos puntos que se hacen parte de los nodos de una red regular de tal manera que el producto de la interpolación representen el terreno con la mayoría de los datos obtenidos.

El resultado del Modelo Digital de Elevación siempre se verá incluido dentro del rango de variación de los datos, es por esto que se hace muy conveniente la presencia de datos auxiliares y puntos originales tomados en la zona de afectación, para darles el mejor tratamiento a las irregularidades como formas cóncavas y convexas existentes dentro del modelo para lograr su validación. (Buenahora C. y Osorio H., 2005)

1.1.2 Estructura de datos de un MDE. De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud, z , al que acompañan los valores correspondientes de x e y , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial.

Las variantes aparecen cuando se definen las interrelaciones entre estas unidades elementales de información.

A diferencia de la cartografía tradicional en la cual se utilizan únicamente las curvas de nivel para presentar las superficies del terreno, los MDE cuentan con una variedad de alternativas. En todas ellas la altitud se describe básicamente mediante un conjunto finito y explícito de cotas. Los valores de elevación de un punto localizado aleatoriamente serán determinados mediante la interpolación a partir de los datos propios de ubicación y de altitud de los puntos que se encuentran en su entorno. (Felicísimo A., 1994).

Las estructuras de datos en los sistemas de información geográfica y por extensión, en los Modelos Digitales de Elevación, se ha desarrollado básicamente en función de la concepción básica de la representación de los datos Raster.

1.1.2.1 Estructura Raster. El modelo de datos Raster está basado en la localización espacial, el cual se le asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie.

Una estructura Raster representa la variación de la superficie continua sobre el área específica, se componen de áreas rectangulares organizadas de forma matricial, las cuales reciben el nombre de celda o pixel y su unión genera la malla regular o grilla del modelo, cada celda debe ser rectangular, debe guardar tanto las coordenadas de la localización como el valor temático. La localización de cada celda es implícita, y depende directamente del orden que ocupa en la rejilla.

Al emplear una estructura Raster para la generación de un modelo se debe tener en cuenta la resolución y la precisión ya que en últimas estos dos parámetros determinarán el nivel de detalle con el cual se representa el terreno. La resolución hace referencia a la longitud de cada celda en la matriz, por lo que se pueden manejar dos resoluciones una en X u otra en Y; y la precisión corresponde a el número de decimales que se usa para almacenar los valores de la variable Z. (Pérez Solano D., 2010).

1.1.3 Resolución Espacial del MDE. La resolución espacial (conocida también como proceso de Fijación de la Rejilla – GridPosting) de un MDE depende en gran medida de factores como: el intervalo entre las curvas de nivel y la escala del mapa topográfico. El intervalo entre las curvas de nivel variará según el terreno del área de interés y el nivel de detalle que puede ser representado a determinadas escalas. La siguiente tabla ilustra algunas resoluciones espaciales típicas de diferentes mapas topográficos: “es posible utilizar diferentes tamaños de celdas para diferentes escalas de mapas topográficos, pero podría resultar en una pérdida de precisión.”

Tabla 1. Resoluciones espaciales típicas de diferentes mapas topográficos.

Escala	Intervalo de Curvas	Geográfico	Dist (m)
1:24,000	30 Pies	1/3 Arco Segundo	10 Metros
1:50,000	20 Metros	1 Arco Segundo	30 Metros
1:100,000	40 Metros	2 Arco Segundo	60 Metros
1:200,000	50 Metros	3 Arco Segundo	90 Metros
1:250,000	100 Metros	3 Arco Segundo	90 Metros

Fuente: http://www.landinfo.com/espanol/productos_dems.htm

La resolución espacial del MDE establece valoración de la estructura de las curvas de nivel, se debe tener en cuenta que para alcanzar una resolución bastante óptima es necesario tener un equilibrio para así poder aumentar o disminuir el tamaño de la celda “pixel”, para que la morfología del terreno no presente un cambio significativo, por consiguiente el tamaño de la celda define la resolución de un archivo de tipo Raster. A mayor tamaño de la celda, menor resolución, y a menor tamaño de la celda, mayor resolución.

1.1.4 Métodos de Interpolación y Variogramas. La interpolación se hace en función de la distancia y consiste en darle valores a los puntos que conforman el entorno al punto problema, asignándole un valor mayor a los puntos que se encuentran cerca y un valor pequeño o nulo a los que se encuentran a gran distancia, este consiste en hacer una ponderación, de manera que minimice la varianza de estimación o error de estimación que garantice el uso óptimo de la información disponible.

Los métodos de interpolación asumen que la altitud puede definirse como una variable generalizada suponiendo que la variación espacial puede ser explicada mediante funciones de correlación espacial. Los métodos opera como un estimativo estadístico de semivarianza que estudia la dependencia de los datos debido a la construcción de un MDE, es razonable decir que el valor de la altitud de un punto se ve relacionado de alguna manera por el valor de altitud de los puntos vecinos ubicados a distancias variables.

La semivarianza tendrá valores diferentes en función de la distancia debido a la correlación existente entre los datos, a mayor distancia menor será la correlación entre los valores de altitud, por esto se requiere del variograma para estudiar la relación entre semivarianza y la distancia. El variograma nos permite conocer la distancia para el cual los puntos se consideran independientes entre sí, también permite conocer el valor del error esperado para cada punto que será función de los valores de semivarianza obtenidos para los datos.

Se establece una adaptación a los datos regularmente espaciados. Los métodos de interpolación por lo general utilizan 8 vecinos más próximos al punto problema, solo es necesario calcular y utilizar dos coeficientes. El primero es el correspondiente a la distancia existente a los 4 vecinos más próximos (un intervalo entre filas o columnas) y el segundo se aplica a los datos situados en diagonal (el intervalo anterior multiplicado por 1.414, la raíz cuadrada de 2). (Felicísimo A., 1994).

1.1.5 Errores en los MDE. Los errores que se presenta en momento de realizar el Modelo Digital de Elevaciones, son debido a cambios constantes en el relieve a través del tiempo, unos buenos gráficos, una leyenda fácilmente legible, unos colores correctamente elegidos y otros aspectos formales de la presentación, tiene como resultado una sobrevaloración de la calidad de la información presentada.

La calidad de un MDE depende del tipo y magnitud de los errores implicados. Los MDE son modelos simplificados de la realidad, los parámetros modelados son, inherentemente imprecisos, aunque su representación puede realizarse con más o menos exactitud. Los MDE pueden ser contruidos mediante la digitalización de mapas existentes, o información resultante de la restitución fotogramétrica, imágenes satelitales.

La corrección de errores puede realizarse mediante algoritmos para estimar un valor aceptable (aunque no real) que sustituya el dato erróneo. Dada una matriz de datos, existe un hueco (dato erróneo) cuyo valor es necesario estimar, para lo cual se usara la información de su entorno inmediato.

1.1.6 Procesos de Validación del MDE. El proceso de validación del MDE consiste en comparar Elevaciones del modelo vs Elevaciones Reales, esto con el fin de encontrar el error del modelo, con información que se considera real y que puede consistir en puntos correctamente tomados con GPS u otro aparato de alta precisión. La validación de un MDE será aceptada o rechazada si cumple o no con los criterios de calidad determinados por métodos estadísticos.

Una forma de determinar la exactitud del modelo es mediante el Error Medio Cuadrático (EMC), el cual se calcula de acuerdo a la siguiente formula (Barringer y Liburne, 1997; Chaplot et al., 2006):

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum(Z_I - Z_T)^2}{n}}$$

Dónde:

n= Número de puntos considerados.

Z_I = Valor de cota estimado por e MDE.

Z_T = Valor de cota observado obtenido de los puntos georreferenciados.

Otra forma de determinar la exactitud del modelo, es mediante la sustracción aritmética de puntos del modelo y los puntos de referencia reales para encontrar un Valor Residual o Error Residual.

$$Z_{RESIDUAL} = Z_{GRID} - Z_{GPS}$$

Dónde:

$Z_{RESIDUAL}$: Diferencia de elevación entre el MDE y los puntos de GPS.

Z_{GRID} : Valor de Elevación en el MDE para una ubicación espacial determinada.

Z_{GPS} : Es la elevación obtenida con el equipo GPS.

Los parámetros de aceptación del modelo serán definidos por normas y reglamentaciones nacionales, (Pérez Solano D., 2010).

2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL REFERENCIADO EN MAGNA - SIRGAS

En el siguiente capítulo el objetivo es la elaboración de un Modelo Digital de Elevación de la Zona Metropolitana de Bucaramanga, el cual dará un servicio de insumo para el desarrollo de modelos hidrológicos e hidrogeológicos dentro de la misma. Esta información es obtenida de cartografías digitales aunque en la actualidad debido a los nuevos desarrollos tecnológicos y su fácil acceso a ellos con la ayuda de herramientas computacionales, los datos pueden ser extraídos de información tipo satelital y radar ya que estos proporcionan mejoras en la precisión de los modelos creados a partir de ellos. Este modelo será elaborado de la forma tradicional en donde la información base es una cartografía digital en curvas de nivel a escala 1:10000.

Hasta hace muy poco en Colombia, era muy complicado el manejo de estas nuevas técnicas de espacialización y geoprocésamiento debido a la incompatibilidad del sistema de referencia coordinado de la cartografía utilizada en el país y los sistemas de navegación global GNSS³, incluidos los GPS⁴. Sin embargo hoy en día, el IGAC como entidad gubernamental encargada de los sistemas de referencia nacionales, se ha encargado de adoptar un nuevo marco de referencia el cual garantiza la compatibilidad de las coordenadas colombianas en base a los nuevos desarrollos tecnológicos espaciales de posicionamiento.

En este capítulo se hará una breve conceptualización acerca del marco de referencia que fue adoptado por nuestro país y también los análisis y procesos que se llevaron a cabo para la realizar el Modelo Digital de Elevaciones para la Zona Metropolitana de Bucaramanga.

³ Global Navigation Satellite Systems

⁴ Global Positioning Systems

2.1 MAGNA – SIRGAS

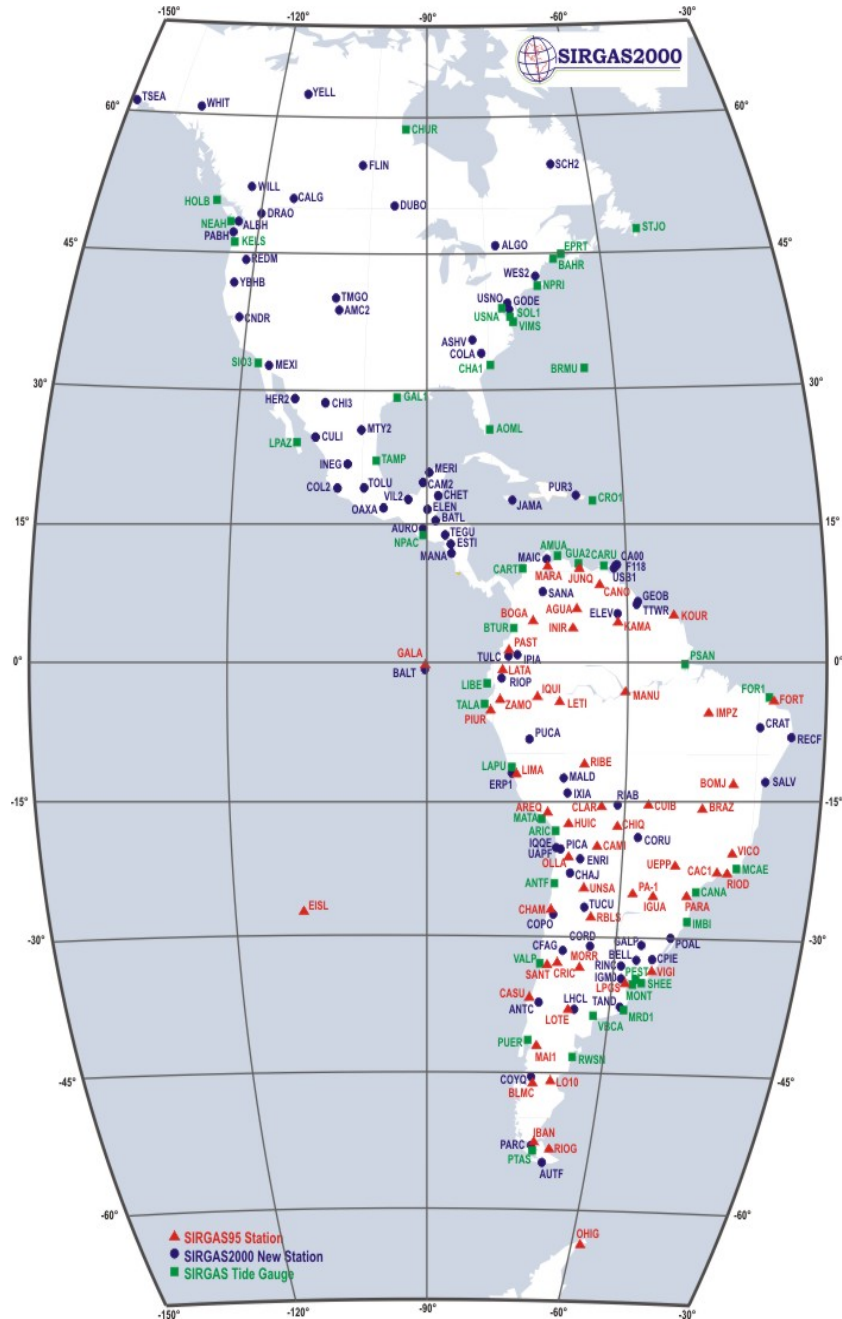
En la práctica, la consecuencia más relevante de la introducción de MAGNA-SIRGAS en el datum clásico BOGOTÁ está asociada al cambio de las coordenadas de un mismo punto de aproximadamente 500m en dirección suroeste (Tremel et al. 2001, Sánchez et al. 1999); lo cual necesariamente afecta a todos los productores y usuarios de la información geográfica en el país.

Hoy en día en el sector público y privado, utilizan con intensidad la tecnología GPS, que se basa por coordenadas de los satélites en un sistema de referencia geocéntrico. El datum BOGOTÁ con su incompatibilidad con esta tecnología hace evidente la necesidad de introducir un sistema de referencia geocéntrico en nuestro país de aceptación a nivel internacional que garantice mantener las altas precisiones ofrecidas por esta tecnología en la determinación de coordenadas.

2.1.1 Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas: SIRGAS.

SIRGAS es la ampliación del ITRF en América. Está conformado por una red de más de 180 estaciones Geodésicas de alta precisión (algunas de ellas en funcionamiento continuo), cuya distribución ofrece un cubrimiento homogéneo sobre el continente y, por lo tanto, las condiciones necesarias para que las redes nacionales estén vinculadas al ITRF. El datum Geodésico correspondiente al SIRGAS está definido a partir de los parámetros del elipsoide GR80 (Geodetic Reference System, 1980), orientado según los ejes coordenados del sistema de referencia SIRGAS. Esto garantiza la consistencia entre el sistema SIRGAS y el sistema de referencia satelital. Ver mapa Figura 2.

Figura 2. SIRGAS: Sistema de Referencia para Las Américas.

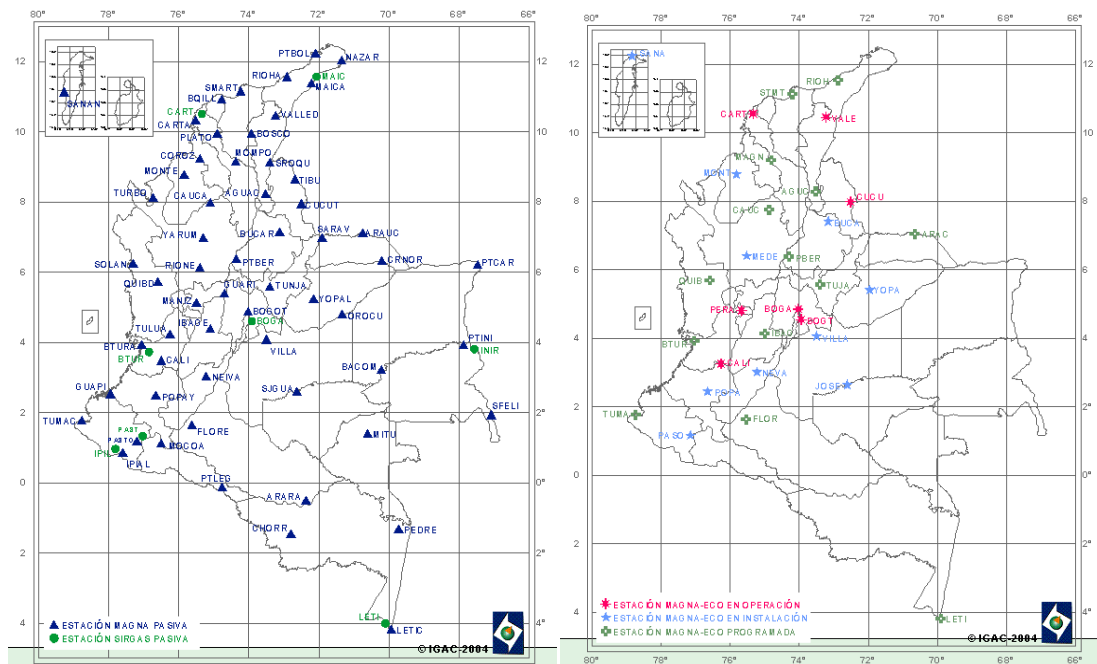


Fuente: <http://www.sirgas.org/index.php?id=77>

2.1.2 Marco Geocéntrico Nacional de Referencia: MAGNA. En Colombia el IGAC, organismo nacional encargado de determinar, mantener, establecer y proporcionar los sistemas oficiales de referencia Geodésico, Gravimétrico y

Magnético surge a partir de estaciones SIRGAS la determinación de la red básica GPS, el cual se denomina MAGNA que, por estar referida a SIRGAS esta denominada convencionalmente como MAGNA-SIRGAS. Refiriéndose a ella está conformada por un número aproximado de 70 estaciones GPS de cubrimiento nacional en donde seis (6) de ellas están en funcionamiento continuo, ocho (8) son vértices SIRGAS y 16 hacen parte de la red Geodinámica CASA (Central and South American Geodynamics Network).

Figura 3. Sistema MAGAN-SIRGAS: Red básica GPS y estaciones.



Fuente: http://www2.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/MAGNAWEB_final/MAGNAEco.htm

Las coordenadas de las estaciones MAGNA-SIRGAS están definidas sobre el ITRF94. la precisión es del orden de ($\pm 2\text{mm} \text{ --- } \pm 7\text{mm}$) en su interior, la exactitud horizontal en $\pm 2\text{cm}$ y la exactitud vertical en $\pm 6\text{cm}$ (Tremel et al. 2001, Sánchez et al. 1999). Existen discrepancias entre el datum BOGOTÁ Y el MAGNA-SIRGAS, en la siguiente tabla se muestran en resumen.

Tabla 2. Diferencias entre Datum BOGOTÁ Y el MAGNA-SIRGAS.

MAGNA-SIRGAS	Datum BOGOTÁ	DISCREPANCIA
Geocéntrico	No Geocéntrico	Origen de coordenadas [x=0, y=0, z=0] del Datum BOGOTÁ, desplazado del origen MAGNA-SIRGAS 530m.
Tridimensional	Bidimensional	Las coordenadas curvilíneas (Φ , λ , h) de MAGNA-SIRGAS es la misma superficie de referencia (el elipsoide). El Datum BOGOTÁ, (Φ , λ) se refiere al elipsoide y h al nivel medio del mar, imposibilita la definición consistente de coordenadas tridimensionales.
Elipsoide asociado: GRS80 (Geodetic Reference System 1980) a=6 378 137 m 1/f=298 257 222 101	Elipsoide asociado: internacional o de Hayford (1924) a=6 378 117 m 1/f=297	La diferencia de los elipsoides asociados a MAGNA-SIRGAS y al Datum BOGOTÁ no solo radica en su ubicación con respecto al geocentro, sino también en sus dimensiones geocéntricas; los radios ecuatoriales discrepan 251m y los aplanamientos 1.42×10^{-5} .
Exactitud (con respecto a las coordenadas SIRGAS=ITRF=WGS84): Φ, λ =2cm h=6cm	Exactitud (con respecto a las coordenadas SIRGAS=ITRF=WGS84): Φ , λ = \sim 500m	Exactitud representa la consistencia de las coordenadas de una red con respecto a otras definidas aparte. Si dichas redes se establecen a partir del sistema global, la compatibilidad entre ellas es muy alta (2cm), cuando las que están referidas al datum locales requieren de procesos adicionales de transformación que permitan su comparación.
Coordenadas del punto datum (Observatorio Astronómico de Bogotá) $\Phi=04^{\circ}35'46.3215''$ $\lambda=74^{\circ}04'39.0285''$ h=2641.469m	Coordenadas del punto datum (Observatorio Astronómico de Bogotá) $\Phi=04^{\circ}35'56.57''$ $\lambda=74^{\circ}04'51.30''$ h=indeterminable	Las coordenadas del punto Datum referidas a los dos sistemas difieren entre sí, aproximadamente 500m, los cuales equivalen a la discrepancia mínima para cualquier punto de la red antigua ARENA con respecto MAGNA-SIRGAS. $\Delta\Phi=-10.25'' \dots \sim -307,5m$ $\Delta\lambda=-12.27'' \dots \sim -368.2m$

Fuente: http://www.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/MAGNAWEB_final/MAGNAPpal.htm

2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL 1:10000

La información base en la consecución de un MDE, influye directamente en la calidad del mismo, tanto en la exactitud vertical como en la horizontal. Esta información extraída de cartografía digital en curvas de nivel es una forma tradicional. Hoy día gracias a la tecnología existen diferentes procesos para crear Modelos Digitales de Elevación con mayor precisión.

La elaboración del MDE para Área Metropolitana de Bucaramanga constituye el producto del procesamiento y la interrelación de información obtenida a partir de la cartografía digital 1:10000. Se trabajo una escala grande (1:10000), para poder visualizar, interpretar, analizar, manipular, y establecer dimensiones con mayor precisión, en sectores que comprenden el Área de estudio.

2.2.1 Ubicación y descripción general de la zona de estudio. En este numeral se mostraran las generalidades del Área Metropolitana de Bucaramanga, como marco de referencia para la localización y caracterización de la zona de estudio.

2.2.1.1 Localización. El área Metropolitana de Bucaramanga que comprende a Bucaramanga, Girón, Floridablanca y Piedecuesta se encuentra ubicada al nororiente de Colombia (7°08'N 73°08'W) en el Departamento de Santander, en el valle del Rio de Oro y a 400 km al norte de la capital Bogotá. Se asienta en la cordillera oriental del sistema andino colombiano. El área de estudio de este proyecto comprende 152 km². En la figura 4 se muestra la localización nacional y regional del área Metropolitana de Bucaramanga.

Figura 4. Localización del área Metropolitana de Bucaramanga.



Fuente: <http://www.amb.gov.co/jurisdiccion.html>

2.2.1.2 Hidrografía. Los ríos principales de Bucaramanga son el Río de Oro y Río Suratá, y las quebradas de La Flora, Tona, La Iglesia, Quebrada Seca, Cacique, El Horno, San Isidro, Las Navas, La Rosita y Bucaramanga.

El Río de Oro es uno de los más importantes que atraviesan el área metropolitana de Bucaramanga. Su paso es ubicado según el POT⁵ de Bucaramanga en la escarpa occidental, desembocan en zona de Piedecuesta, la quebrada Grande, Suratá y el Río Lato. En la zona de Girón recibe las aguas del Río Frío, la Quebrada La Iglesia, la Quebrada Chimitá, la Rosita que tienen como afluente a la Quebrada El Loro, y la Quebrada Seca que tienen a su vez a la Quebrada la Joya como su afluente. Otras quebradas importantes de esta zona son las quebradas La Pincha, Chapinero, las Navas con su afluente Dos Aguas, La Argelia, La Cuyamita. El Río de Oro forma junto al Río Suratá el Río Lebrija

⁵ Plan de Ordenamiento Territorial

En la escarpa de Malpaso se encuentran las quebradas El Carrasco y Guacamaya, que vierten sus aguas en la Quebrada La Iglesia y las cañadas El Macho quien recibe las aguas de la cañada La Bomba. En la escarpa norte se encuentra la Quebrada Chitota y la Quebrada Zanjon de Regadero.

2.3 ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍAS DIGITALES 1:10000.

La captación de la información altimétrica constituye, lógicamente, el paso inicial en el proceso de construcción del MDE, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos manipulable por medios informáticos. Numerosos autores han coincidido en que esta fase inicial es la más Costosa (en términos de tiempo y trabajo) de todo el proceso de manejo de los MDE.

Por añadidura, se trata de la fase de mayor trascendencia ya que la calidad de su resultado es el principal factor limitante para todos los tratamientos que se realicen posteriormente. (Felicísimo A., 1994).

Las actividades propuestas para la elaboración de la cartografía a escala 1:10000 del Área Metropolitana de Bucaramanga son:

2.3.1 Toma de fotografía aérea. Consiste en sobrevolar el área y tomar fotografías verticales que cubran toda el área, de esto depende el nivel de detalle y precisión que se busque, teniendo en cuenta que un vuelo más bajo nos ofrece mejor resolución.

Esta herramienta se utiliza para obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), de los objetos físicos fotografiados, realizar mediciones e interpretaciones confiables.

2.3.2 Modelo Digital de Elevación. El objetivo es obtener un modelo digital del terreno a nivel del suelo. Útil para fines múltiples tales como: Modelamiento, análisis de hidrología (escorrentía, avenidas, etc.), estudios de erosión y diseño de infraestructura (regadíos, canalizaciones, redes de carretera y ferrocarriles, etc.).

Se generara un modelo digital de elevaciones en sus dos versiones de terreno (MDT) y superficie (MDS) con la resolución y precisión de la escala del proyecto.

2.3.3 Ortofotomosaico. Corresponde a las salidas finales a partir del mosaico de las fotografías aéreas corregidas por todas sus distorsiones debido al uso del modelo de elevación del terreno (MDT). Este proceso permite generar una nueva imagen ortogonal llamada ortofotomapa, las cuales son empalmadas.

El proceso consiste en ajustar imagen por imagen a los puntos aerotriangulados, una por una, las imágenes van tomando georeferencia y eliminado las líneas de mosaico entre una y otra hasta formar una sola imagen de toda una línea de imágenes en el sentido en que haya sido hecho el vuelo.

2.3.4 Precisión final. El Instituto Geográfico Agustín Codazzi se compromete a elaborar los planos con la calidad suficiente para cumplir con las siguientes especificaciones:

2.3.4.1 Precisión Planimétrica. Al menos el 90% de los puntos extraídos del mapa deben concordar dentro de 0.5 mm a la escala del mismo, respecto a la posición del punto del terreno. El error medio cuadrático correspondiente es de 0.30 mm a la escala solicitada.

2.3.4.2 Precisión Altimétrica. Por lo menos el 90% de las curvas de nivel y de las elevaciones interpoladas a partir de las curvas deberán concordar dentro de medio (1/2) intervalo básico de curva, con las elevaciones en el terreno.

2.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CAPA QUEREPRESENTA LA SUPERFICIE DEL TERRENO DEL ÁREA DE BUCARAMANGA.

Luego de la elaboración de la cartografía digital 1:10000 en curvas de nivel, la cual fue obtenida por parte de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), se hará una breve revisión para continuar con la captura de datos. .

2.4.1 Revisión de la cartografía digital y corrección. La cartografía digital obtenida por la CDMB fue analizada para llevar a cabo la elaboración del MDE.

Para un buen modelamiento se necesita que cada una de las curvas de nivel tenga su respectiva información, y se comporte como polilínea (que cada curva de nivel se comporte como una línea continua), Se encontraron curvas que no cumplían estas condiciones, se hizo su respectiva corrección y corte de la zona de estudio que se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Área de estudio de la zona metropolitana de Bucaramanga.



Fuente: CDMB y modificado por los autores

2.4.2 Extracción de datos de cartografía digital. Teniendo lista la cartografía digital en formato .dwg propio de AutoCAD (AUTODESK) procedemos a extraer los datos contenidos allí, coordenadas(X, Y), y su elevación correspondiente Z, para este propósito usamos la herramienta SPELL- Map Versión 1.0.0.32 B (2003-2006) creado por el Ingeniero JORGE A. GUZMAN de la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil.

Dando uso a esta herramienta es conveniente que la cartografía digital sea guardada como .dxf para ser cargado a SPELL-Map. Luego de tener los datos arrojados automáticamente en archivo.txt estarán listos para ser llevados al software Surfer V.9. En el siguiente ítem se hablara sobre Surfer y se define claramente el interpolador que usaremos en la creación de una superficie tridimensional que nos representa la capa superficial del MDE.

2.4.3 Algoritmo Interpolador en Surfer V 9.0. Surfer 9 es el más flexible y poderoso software de trazado de isoclinas (contorno) y visualización de superficies en 3D (mapeo de la superficie en 3D) actualmente disponible. Surfer transforma fácil y precisamente sus datos X, Y, Z en espectaculares contornos llenos de color, superficies, relieves sombreados, imágenes, y en mapas vectoriales (representación geométrica) en minutos.

Ahora cuenta con funciones de transparencia, diseños múltiples, más formatos de importación y compatibilidad ampliada, así como de exportación.

Surfer provee una extensa serie de métodos para crear cuadrículas y un mayor control sobre los parámetros de interpolación, más que cualquier otro software en el mercado. Surfer interpola rápidamente datos con distribuciones tanto regulares como irregulares con cualquiera de los doce métodos de interpolación donde puede generar archivos tipo raster.

Surfer 9 incluye una extensa gama de opciones de personalización, que permiten tener un control total sobre mapas. Surfer permite sobre posicionar o acomodar cualquier número de mapas y desplegar un sin número de mapas por página. La escala, la inclinación y la rotación de los mapas es controlada por quien lo opera, para hacer la mejor presentación posible. Además en Surfer, se pueden personalizar los mapas, agregando textos, símbolos, polilíneas y polígonos.

El siguiente paso es definir el algoritmo interpolador a emplear, pues cada técnica de interpolación, en función del algoritmo y los parámetros que maneja, generan una replica que intenta aproximarse a la realidad. La elección del interpolador se determino mediante el proceso de Validación Cruzada, que consiste en el uso de una herramienta estadística contenida en el software *Surfer V.9* que calcula el Error Medio Cuadrático (EMC) de cada algoritmo de interpolación.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del EMC generados en la validación cruzada de cuatro (4) interpoladores seleccionados para la generación del MDE en el software Surfer V.9 para una población muestral de 30000 puntos:

Tabla 3. Error medio cuadrático para diferentes algoritmos de interpolación.

VALIDACIÓN CRUZADA	
INTERPOLADOR	EMC
Radial BasisFunction	0.95687732204274
NearestNeighbor	0.6244991593334
Kriging	0.26561914797551
Inverse Distance to a Power	1.0392722633218

Fuente: software Surfer V.9 y modificado por los autores.

De acuerdo con los resultados anteriormente señalados arrojados por la validación cruzada, se decidió generar el MDE definitivo utilizando el algoritmo de interpolación Kriging con semivariograma lineal ya que este presenta el menor Error Medio Cuadrático.

La resolución espacial para la construcción del MDE parte de la escala 1:10000, se tuvo en cuenta que el tamaño del pixel no debe exceder de la separación que existe entre las curvas de nivel, siendo esta de 10 metros numeral 1.1.3, esto se hace con el fin de evitar la pérdida de información altimétrica y resolución optima en el MDE creado.

2.4.4 Validación del MDE. La validación del MDE de la Zona Metropolitana de Bucaramanga (ZMB) consistió en comparar Elevaciones del modelo *vs.* Elevaciones Reales; esto con el fin de encontrar el Valor Residual o Error Residual obtenido para el modelo (numeral 1.1.6).

Las elevaciones reales (X, Y, Z) consistieron en 29 puntos localizados de manera distribuida en el campo de la ZMB, estos puntos tomados con la ayuda de un GPS precisión Trimble Geo XM de propiedad de la Universidad Industrial de Santander en el transcurso de los días 12 al 20 del mes de Octubre del 2011. La precisión máxima usada es de aproximadamente 6 metros, sin embargo dependiendo de las condiciones en el campo y la disponibilidad de la cobertura satelital, esta precisión puede variar. También se contó con 20 mojones georreferenciados espacialmente por el IGAC para un total de población muestral de 49 puntos con los que se llevará a cabo la validación de MDE. El tamaño de la muestra para este tipo de validación fue dado siguiendo estándares internacionales que recomiendan un tamaño de muestra de mínimo 30 datos (NMAS, NSSDA, USGS) .⁶ (Ariza f. y Atkinson A., 2006).

Los cálculos realizados para los valores residuales (Numeral 1.1.6) se determinaron con la ayuda del software Surfer V.9 a través de la herramienta **Grid – Residuals**. En la tabla 3 se indican los valores residuales obtenidos (Δz) y que

⁶ NMAS: United state National Map Accuracy Standards
NSSDA: National Standards for Spatial Data Accuracy
USGS: US Geological Survey

representan la diferencia entre las elevaciones de la cartografía digital tomadas y las reales medidas directamente en campo.

Tabla 4. Valores residuales (ΔZ) que representan la diferencia entre elevaciones.

ID	DESCRIPCIÓN	ESTE	NORTE	Elevación	(ΔZ_m)
MOJONES IGAC					
1	Puerta Del Sol	1106439.291	1277716.724	955.1991	5.185401533
2	Giróntransejes	1100949.862	1273148.149	701.3280	1.504807049
3	Trinitarios Provenza	1107111.845	1275403.706	911.4352	0.362292567
4	Curva Del Diablo	1103723.776	1282002.038	880.3189	-0.473826698
5	Motel Los Pirineos Vía Cúcuta	1108535.191	1279607.761	1298.3223	6.105106027
6	Toma Del Acueducto La Flora	1107288.544	1282264.498	1132.5450	2.545000176
7	Bavaria	1104231.292	1284111.952	756.8106	5.193846887
8	Barrio La Trinidad Entrada Por San Bernardo	1109117.981	1276332.149	1022.1800	16.84745044
9	Barrio La Feria	1102837.133	1278962.266	900.2760	-4.344844781
10	CDMB	1105861.922	1279075.431	993.6720	24.15740046
11	Calle 45 Tres Estrellas	1103270.767	1276891.795	886.1873	5.755419432
12	La Virgen A La Salida De Florida Hacia Piedecuesta	1109792.458	1272010.445	974.9330	-1.417795538
13	Forjas	1102178.420	1281166.460	649.3934	-0.599684921
14	Tanque Del Acueducto En El Barrio Caracolí Floridablanca	1110437.253	1273578.608	1025.2910	12.19187374
15	Autopista A Girón	1102687.474	1275187.895	744.1983	0.623477335
16	Barrio Bucaramanga	1104942.923	1276135.814	846.4009	5.67823552
17	La Cumbre Bellavista	1108986.085	1273858.276	994.1127	11.43657144
18	Centro Abastos	1100904.932	1277470.304	668.6443	-0.208813221
19	Barrio El Porvenir	1104079.902	1274933.728	884.1920	4.238621206
20	Sport Country Club	1105925.323	1270934.522	890.4620	0.211336871
ZONA METROPOLITANA					
21	No conocida	1104145.15	1275683.4	780.416	-1.172848958
22	No conocida	1100788.43	1277277.9	672.489	-0.731438823
23	No conocida	1104670.04	1278869.89	932.743	0.622342211
24	No conocida	1104837.03	1279510.41	944.19	-2.940845444

ID	DESCRIPCIÓN	ESTE	NORTE	Elevación	(ΔZ_m)
25	No conocida	1104410.69	1281985.66	830.372	0.26486319
26	No conocida	1103616.93	1283939.5	623.568	1.385196058
27	No conocida	1105744.73	1281334.79	992.025	-0.141594803
28	No conocida	1105250.72	1278260.92	893.863	0.085991238
29	No conocida	1107399.07	1280726.01	1125.052	-2.024971613
30	No conocida	1107693.9	1278856.74	1061.252	-1.044995615
31	No conocida	1107875.45	1279070.77	1041.967	11.20270009
32	No conocida	1104067.6	1273095.74	748.43	-1.393254244
33	No conocida	1108518.36	1272942.66	868.147	-0.05142164
34	No conocida	1110113.86	1273220.67	937.727	-0.449379275
35	No conocida	1107110.2	1275422.4	911.435	-0.536926257
36	No conocida	1104939.91	1276150.38	846.401	3.798179956
37	No conocida	1108987.36	1273880.52	994.113	4.289276264
38	Edificio Álvaro Beltrán Pinzón UIS	1105575.56	1281696.14	974.81	2.2898089
39	Residencias UIS	1106055.19	1281415.83	1007.17	1.058023267
40	Centro Comercial Megamall	1106606.61	1280313.26	1028.25	-1.552067681
41	Parque san pio	1106747.42	1279055.09	980.12	-6.923960224
42	Romboy caballo de Bolívar	1105745.81	1281163.27	1003.6	8.407645139
43	parque de los niños (parroquia)	1105869.45	1279897.12	1004.25	7.155723718
44	parque Santander (iglesia sagrada familia)	1105493.66	1279141.41	969.26	9.835400179
45	parque la concordia	1105934.26	1278485.84	959.17	4.358502078
46	San Andresito la Isla	1105977.22	1278041.92	950.23.9	8.496052604
47	parque las cigarras	1105619.28	1277443.46	933.57	4.864743155
48	Carrefour Floridablanca	1107056.92	1274330.12	874.34	5.508564992
49	parque de Floridablanca	1109562.98	1272845.58	931.06	2.198658353

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi y autores.

Para llevar a cabo la validación del modelo se establece como hipótesis estadística, que la distribución que mejor se adapta a la verificación de las diferencias entre las medidas del terreno y las del MDE, es la Distribución Normal ($N(0,1)$). Para demostrar lo anterior, nos valemos de herramientas estadísticas y estándares internacionales.

Para comenzar se filtraran las observaciones que presentes desvíos mayores o errores aparentes respecto de las medidas de tendencia central como la media aritmética y que perjudicarán la validación de el modelo al ingresar errores de puntos que no pertenecen al espacio muestral. Para ello se utilizó el criterio de Chauvenet aplicado a Modelos Digitales de Elevación propuesto por Márquez, E., 2007, que considera eliminar directamente la observación (Δz_i) que supere en valor a:

$$\pm \varepsilon_{max} = Kc * \sigma_z \quad \text{Donde:}$$

$$\pm \varepsilon_{max} = \Delta z_{max}$$

Kc : coeficiente de chauvenet

σ_z : Desviacion estandar de los valores Δz

El análisis estadístico para los 49 valores (Δz) se hizo mediante la herramienta Excel y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5. Estadísticos para los datos muestrales.

SUMA	151.849
MEDIA	3.099
DESVIACION ESTANDAR	5.563
N	49

Fuente: Autores

La determinación del coeficiente de Chauvenet (Kc) para el filtrado de datos se extrajo de la siguiente tabla en donde Kc depende del número de datos.

Tabla 6. Coeficiente de Chauvenet para distintos tamaños de muestra.

Cuadro de valores de Chauvenet					
n	k	n	k	n	k
4	1,54	12	2,03	26	2,35
5	1,68	14	2,10	30	2,39
6	1,73	16	2,16	40	2,50
7	1,79	18	2,20	50	2,58
8	1,86	20	2,24	100	2,80
9	1,92	22	2,28	200	3,02
10	1,96	24	2,31		

Fuente: <http://www.fing.edu.uy/ia/deptogeo/teoria1/MUESTREO.pdf>

Para 49 datos usando interpolación lineal, el valor de K_c es de 2.572, luego el valor de $\pm \varepsilon_{max} = 14.31 \text{ metros}$.

Comparando este resultado con los residuales podemos ver que los puntos, 8 y 10 se eliminan debido a la superación en valor a $\pm \varepsilon_{max}$.

Calculando nuevamente obtenemos una nueva media y desviación estándar que se muestra a continuación.

MEDIA	2.262
DESVIACION ESTANDAR	4.241
N	47

Aplicando nuevamente el criterio de Chauvenet con el fin de lograr un muestreo con mejor ajuste se encontró que los puntos 14, 17, 31 y 44 superaban al $\pm \varepsilon_{max}$. Seguidamente se calculó la nueva media y desviación estándar donde los resultados de esta aplicación se muestran en la tabla 6.

Tabla 7. Resultado de la segunda aplicación del criterio de Chauvenet.

MEDIA	1.539
DESVIACION ESTANDAR	3.399
N	43
Kc	2.524
$\epsilon_{\text{máx.}}$	8.581

Fuente: Autores

Los puntos eliminados son llamados errores sistemáticos y esto ocurre debido a errores acumulados en la toma de datos o al procesamiento de los mismos; para este caso los errores pueden ser por causa de fallas en la toma de los datos, cobertura satelital, error en el equipo utilizado etc.

Para dar por terminado este proceso de validación, se compara el Error calculado para el MDE generado, con los errores máximos permitidos según los estándares de control de la exactitud vertical de dos entidades internacionales.

1. **NMAS (National Map Accuracy Standards):** El estándar especifica que un máximo del 10% de los puntos seleccionados de la muestra pueden tener un Error vertical mayor de la mitad del intervalo entre curvas de nivel de la fuente de mayor precisión. Para una fuente en formato Raster, este Error será la mitad del tamaño del pixel. (Ariza F. y Atkinson A., 2006).

2. **USGS (United States Geological Survey)** para categorías de exactitud de **MDE:** El test está basado en el uso de umbrales para el error máximo y la desviación estándar de la media. Este test para el control de categorías de los **MDE** se basa en la cuantificación de los niveles de exactitud, que luego son utilizados para determinar las categorías de exactitud del **MDE**.

Según la **USGS** se tiene tres niveles así⁷:

- Para los **MDE** de nivel 1: El valor máximo de desviación típica es de 15 metros y la muestra no debe contener puntos en los cuales el Error Vertical sea superior 50 metros.
- Para los **MDE** de nivel 2: El valor máximo de la desviación típica es igual a 7.5 metros y la muestra no debe contener puntos para los cuales el Error Vertical sea superior al doble del intervalo de la fuente de más precisión.
- Para los **MDE** de nivel 3: El valor máximo de la desviación típica es igual a 7.5 metros y la muestra no debe contener puntos para los cuales el Error Vertical sea superior al intervalo de la fuente de más precisión.

⁷ Para MDE aplicables a mapas de contornos o vectoriales, la USGS adopta el estándar para la precisión vertical según la NMAS. <http://nationalmap.gov/standards/nmas647.html>

3. ACUÍFEROS, GEOMETRÍA Y ESPACIALIZACIÓN DE CAPAS

Acuífero es el nombre que se le da a una capa de roca capaz de almacenar gran cantidad de agua. Algunas capas almacenan más cantidades que otras, la capacidad del material para almacenarla depende del tamaño del grano, entre mayor sea este su habilidad de almacenamiento aumenta.

Las aguas subterráneas son un producto atractivo por su calidad y bajo costo de aprovechamiento, por su naturaleza subterránea poseen un medio de protección natural brindado por el sustrato litológico. En la región de Bucaramanga el agua subterránea se utiliza, en los lavaderos de carros, Moteles e Industrias, es poco conocida y se usa sin control. Existen pozos y cisternas de los cuales se tiene poca información.

A continuación mostraremos algunos conceptos acerca de ellos en su clasificación.

3.1 CLASIFICACION DE LOS ACUÍFEROS

Pueden variar según el factor que se tome en cuenta. Para este caso los clasificaremos según la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos.

3.1.1 Acuíferos Libres. El nivel permeable esta directamente en contacto con la atmósfera. La presión del agua en el acuífero se iguala a la atmosférica por debajo del techo del mismo. La superficie del agua será el nivel freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no, lo importante es que no tenga por encima ningún material impermeable.

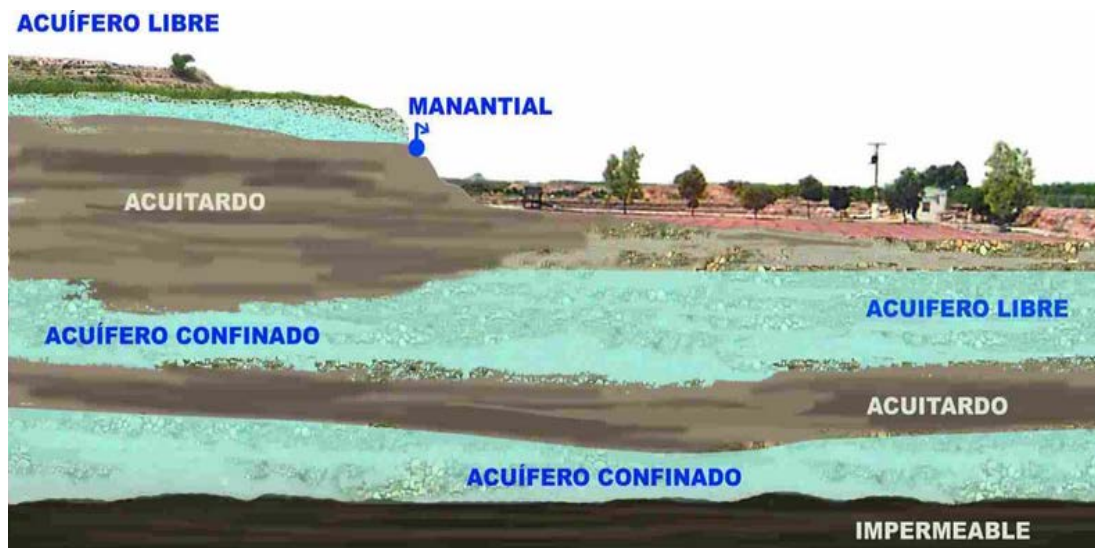
3.1.2 Acuíferos Confinados. El agua que contienen está sometida a cierta presión, superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la

formación geológica, saturándola totalmente. Están sellados por materiales impermeables que no permiten que el agua ascienda hasta igualar su presión a la atmosférica.

3.1.3 Acuíferos Semiconfinados. Se caracterizan por tener el techo (parte superior) y/o el muro (parte inferior) sellado por materiales que no son totalmente impermeables, sino que constituyen un acuitardo, es decir un material que permite una filtración vertical que alimenta muy lentamente al acuífero principal.

A continuación en la figura se muestran algunos tipos de acuíferos.

Figura 6. Tipos de acuíferos.



Fuente:http://www.igme.es/internet/divulgacion_didactica/libro_aguas_sub/paginas_html_final_espanol/pagina20/pagina20.html

3.2 BASAMENTOS

Son formaciones geológicas de baja o nula permeabilidad que no permiten la transmisión de agua, como por ejemplo un macizo granítico no alterado o rocas metamórficas con muy poca meteorización y sin fracturación, por lo tanto se

constituyen en la capa geológica que sostiene un acuífero. Algunas veces es llamada la base de los acuíferos debido a que sirven como soporte. Estas formaciones pueden variar de acuerdo al tipo de roca, pueden ser areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomeráticas de color rojo violáceo y gris verdoso, de estratificación cruzada y capas gruesas, también pueden ser de granos finos como limos rojos, miembro órganos y gravas.

En la zona de estudio se han identificado como principales Basamentos el nivel de finos de la Formación Bucaramanga, que es el que conforma el acuífero superficial de la meseta de Bucaramanga y la Formación Girón, que conforma el acuífero más profundo de la formación Bucaramanga. (Ingeniería de suelos, 1991). Estos Basamentos serán modelados para obtener las superficies bases de acuíferos y desarrollar en el futuro el modelamiento físico y matemático de los acuíferos de la región.

3.3 FORMACIONES ACUÍFERAS EN LA REGIÓN DE ESTUDIO

En este ítem se conceptualiza en breve, las capas y/o miembros que conforman las formaciones en esta región del área metropolitana de Bucaramanga, en donde se destacan las particularidades de las zonas más favorables para la acumulación de aguas subterráneas.

3.3.1 Sedimentos cuaternarios – formación Bucaramanga. Por lo general los suelos se componen de capas y, a menudo, la calidad del suelo varía considerablemente de una capa a otra. Basándonos en el informe de la Compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P, Estudio Geoeléctrico realizado en el Área Metropolitana en el Proyecto “Modelo Hidrológico Básico de Bucaramanga” realizado por Carlos M. Wandurraga B. Geólogo MP No. 1086 Bucaramanga, Abril del 2003, plantea lo siguiente: “La formación Bucaramanga fue descrita inicialmente por De Porta (1958) y corresponde a edad cuaternario,

que morfológicamente pertenece a un sistema de abanicos aluviales erosionado, y acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el cerro de Palonegro y el Río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. El abanico está ligeramente inclinado hacia el occidente, con una pendiente de 2 a 7°, con una superficie suavemente ondulada.

La parte más antigua de la Formación Bucaramanga tiene unos 730.000 años, ubicándola dentro del Pleistoceno medio – superior. Teniendo en cuenta las clasificaciones de Hubach (1952), y Niño y Vargas (1993), los autores de la Microzonificación Sísmica de Bucaramanga proponen dividir la Formación Bucaramanga de base de techo, en los siguientes miembros: Miembro Órganos, miembro Finos, Miembro Gravoso y Miembro Limos Rojos.

3.3.1.1 Miembro Órganos. Definido por Hubach (1952), quien describe niveles lenticulares limoarenosos, con espesores de hasta 5 m. de acuerdo con Bueno y Solarte (1994), corresponde a una serie monótona de niveles polimícticos, de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limoarenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura. Con base a ensayos realizados, se estima que su espesor podría superar los 180 metros, siendo el nivel más potente de la Formación Bucaramanga. (Mancera y Salamanca, 1994).”

3.3.1.2 Miembro Finos. Este nivel fue reconocido por Hubach (1952). Se ubica estratigráficamente entre el Miembro órganos y Miembro Gravoso, en contactos netos, planos, paralelos. Es una extensa capa lenticular horizontal, de unos 15 m. de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limoarenosos y arenolimosos de color gris verdoso”.

Los mejores afloramientos se encuentran en las canteras de la antigua ladrillera Bucaramanga y en la empresa de ladrillos y tubos donde es explotada para la producción de ladrillos y tejas. Otros sectores donde aflora son los barrios Ciudadela Real de Minas, Campo Hermoso y La Feria entre otros. Otros estudios han identificado presencia de acuíferos superficiales, sobre este miembro, en Bucaramanga existe un nivel de agua estable de agua subterránea que puede extenderse a toda la meseta, en algunas ocasiones le ha llamado el acuífero superior de la meseta de Bucaramanga (Ingeniería de suelos, 1991). Igualmente se ha hecho un inventario de un número importante de pozos que actualmente se encuentran en explotación en el acuífero superficial, es probable que los pozos profundos sea el tipo de captación más antiguo a lo largo del estudio por parte (Rodríguez, Julio y Torres, Diana, 2011), se llevo a cabo la identificación de 16 puntos localizados en el Área Metropolitana, 10 en Girón y 2 Floridablanca.

La secuencia del miembro Finos se puede dividir en dos conjuntos:

- **Conjunto arcilloso.** Localizado hacia la base, se caracteriza por ser arcilloso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela, en donde el espesor varía ampliamente, como en el barrio Porvenir (9m) y cuchilla de Palomitas (2m).
- **Conjunto arenoso.** Se localiza hacia el techo, donde muestra una alternancia de niveles arenolimosos con niveles limoarenososarcósicos de colores amarillento a pardo amarillento. Hacia la base de este conjunto predominan costras y un nivel arcilloso pardo oscuro. En la cuchilla Palomitas solo se observan las arcillas grises a verdes en contacto erosivo con el suprayacente miembro Gravoso.

En el barrio Malpaso, el miembro Finos, muestra niveles arenosos abigarrados, con un nivel intermedio de base conglomerática, suprayaciendo un nivel arcillo

arenoso, de color gris verdoso, moteado de blanco, producto de la alteración de los feldespatos.

Figura 7. Miembros finos de la formación Bucaramanga ubicado en el Barrio Primero de Mayo, sector Quinta Estrella.



Fuente: pdf. Asesoría Geológica en el área metropolitana de Bucaramanga, para la explotación de aguas subterráneas. pag 21

En la construcción del MDE incluiremos esta capa de finos que hace parte de la formación Bucaramanga sabiendo que los finos conforman el basamento del acuífero superficial.

3.3.1.3 Miembro Gravoso. “Definido por Niño y Vargas (1992). Presenta niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Los cantos son en su mayor parte tamaño grava de diámetro promedio 15cm, y Bloques de Roca en menor cantidad, hasta de 0.8m de diámetro, subangulares a subredondeados, en matriz areno–arcillosa–limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido; en general el depósito es matriz soportado. El contacto inferior con el Miembro Finos es neto, continuo y

suavemente ondulado y el contacto superior con el miembro limos rojos es gradacional. Su espesor varía entre 8 y 30 m.” (Carlos M. Wandurraga B. Geólogo)

3.3.1.4 Miembro limos rojos. Según Carlos M. Wandurraga B. Geólogo el miembro limos rojos se compone: “Definido por Julivert (1963). Está constituido por arenas arcillosas gravosas, y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Presenta bloques angulares esporádicos de arenisca asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Suprayace el segmento Gravoso y su contacto con este es gradacional. Corresponde al nivel sobre el cual se encuentra edificada la ciudad de Bucaramanga. Consta de limos de color amarillento a rojizo y cantos de areniscas en la parte inferior. Geomorfológicamente este miembro constituye lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, con el relieve semiplano y pendientes de 2 a 7%. El drenaje es escaso paralelo y superficial. (Niño y Vargas. 1992).”

3.3.2 Formación Girón. “Esta unidad fue descrita por (Hettner, A., 1982, en Ward, D., et al. 1973), para referirse a unas intercalaciones de areniscas de grano grueso, de areniscas conglomeráticas y capas rojas de limolita y arcillolita.

En el área aflora en el costado Occidental, sobre el cerro de Palonegro y en la zona Oriental sobre los Barrios, La Cumbre, Santa Ana, Bellavista, y altos de Bellavista, y está conformada principalmente por areniscas conglomeráticas y conglomerados de color rojo con guijos de cuarzo que varían en diámetro de 2 a 4 mm en la zona Oriental que corresponde a la parte basal – media del Girón.

En la parte occidental está constituida por areniscas y lodolitas de color rojizo, que corresponden al nivel superior de la Formación, su rumbo general es NW y su buzamiento es SW.

La morfología que presentan corresponde a escarpes fuertes, colinas y cerros aislados como se observa al Occidente del casco urbano de Piedecuesta. Lanhenheim (1954), quien designo los afloramientos del cañón del río Lebrija como la sección tipo, la dividió informalmente en un miembro inferior arenoso de 750m, un miembro medio arcilloso de 1250m y en otro superior arenoso de 1500m.”(Carlos M. Wandurraga B. Geólogo)

Los acuíferos identificados en la zona sobre esta formación en general son muy pobres, sin embargo se ha hecho inventario de pozos profundos localizados en el municipio de Lebrija, Girón y cerca al río de oro los cuales registran en estas zonas un total de 4 pozos profundos (Rodríguez, Julio y Torres, Diana, 2011). Debido a que su permeabilidad es baja, se constituye en la región en el basamento de un Acuífero Regional.

Figura 8. Formación Girón ubicada en el Cerro de Palonegro.



Fuente: pdf. Asesoría Geológica en el área metropolitana de Bucaramanga, para la explotación de aguas subterráneas. pág. 17

3.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CAPA DE FINOS Y BASAMENTO DE LOS ACUÍFEROS.

Para el Área Metropolitana de Bucaramanga se realizó un modelo geológico-geofísico (INGEOMINAS), a partir del cual se diferenciaron las unidades geológicas con posibilidades hidrogeológicas y se destacan las particularidades de las zonas más favorables para la acumulación de aguas subterráneas.

El modelo geológico-geofísico es la representación del estado actual del conocimiento acerca de la correlación espacial entre las características del subsuelo tanto geológicas como físicas y geométricas. Las características geológicas tienen que ver con el tipo de litología, textura, elementos estructurales y ambientales de depositación.

Las características físicas se refieren a la distribución de diferentes propiedades físicas tales como la resistividad eléctrica, la conductividad eléctrica, la densidad, etc., tanto hacia profundidad como lateralmente, las cuales se determinan a partir de la aplicación de los métodos geofísicos correspondientes. INGEOMINAS 2004, (Vásquez y De Bermoudes).

3.4.1 Espacialización de las capas Finos y Formación Girón. Al generar un MDE en donde se incluyen más capas debemos tener en cuenta que cuando creamos un SIG se necesita que todos los elementos que van a conformarlo estén bajo las mismas condiciones de trabajo, esto quiere decir que las capas se encuentren referenciadas espacialmente bajo el mismo Sistema de Coordenadas y que su tamaño de celda "pixel" sea exactamente el mismo. Para la construcción de la capa superficial se decide usar un tamaño de celda de 10x10 teniendo en cuenta lo expuesto en el numeral 1.1.3, por esta razón es conveniente generar estas dos capas de igual tamaño de celda.

3.4.2 Capa de Finos. La información obtenida para llevar a cabo la construcción de esta capa partió de estudios geológicos y geofísicos realizados por INGEOMINAS en donde se reinterpreta toda la información Geotécnica: Perforaciones, Piezómetros, etc. Tomando toda la información proponen espesores de capas Geológicas (Limos Rojos, Gravoso, Finos, Órganos, etc.

Los puntos que se encuentran en la tabla **Anexo 3**, son los que se usarán para generar la capa de finos que se incluirá en el MDE. Llevando la información obtenida a un archivo de texto (.txt) procedemos a llevarlos al Software Surfer mediante la herramienta **Grid Data** conociendo el algoritmo interpolador Kriging con semivariograma lineal definido en el numeral **2.4.3**. Y la resolución espacial ver numeral **1.1.4**. Este resultado es la representación espacial del Basamento del acuífero superficial.

3.4.3 Capa del basamento Girón. De igual manera que se obtuvo la información para la construcción de la capa de finos que representa el acuífero superficial, se obtuvieron los que representaran la capa del basamento inferior (Formación Girón), teniendo presente que esta formación está por debajo de los finos a profundidades de 30m hasta 400m. Los puntos obtenidos mediante los estudios realizados por Ingeominas se muestran en la tabla del **Anexo 4** y una muestra de datos extraídos de la cartografía digital 1:10000 debido a que la Formación Girón en diferentes zonas aflora en la superficie del terreno.

Teniendo esta información, la llevamos a Surfer V 9.0 en donde se desarrolla de la misma forma expuesta en el anterior ítem teniendo como resultado una representación espacial del Basamento inferior.

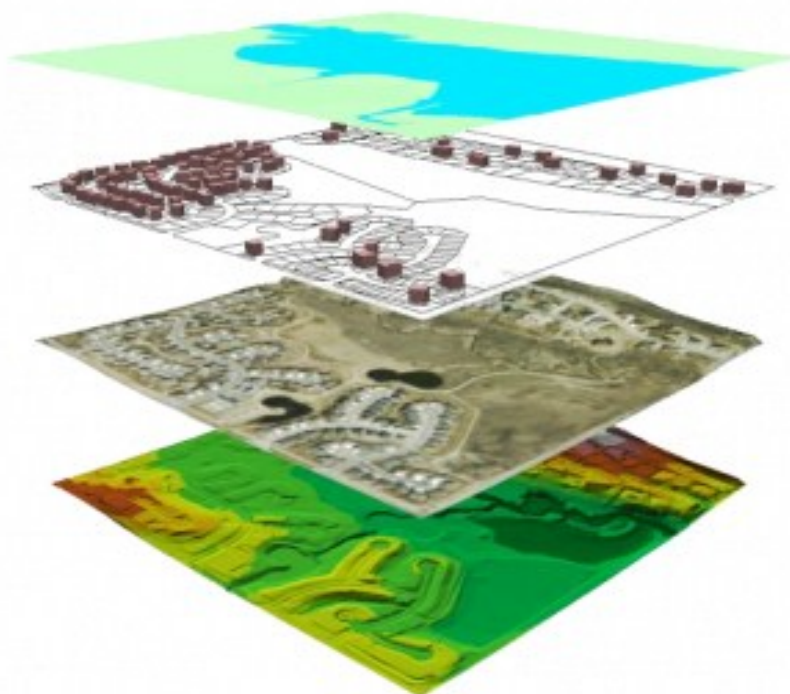
Dados los resultados anteriores procedemos a llevar estos tres modelos a ARGIS para crear un SIG en donde se mostrara el MDE en general

4. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los Sistemas de Información Geográfica permiten separar la información en diferentes capas temáticas y almacenarlas independientemente, por esta razón se hacen una herramienta indispensable en la elaboración de trabajos, ya que se puede acceder a cada una de estas capas de una manera ágil, rápida y sencilla.

Un SIG permite la representación del mundo, almacenando información sobre este, en una serie de niveles temáticos. El SIG almacena la información cartográfica digital, a la cual se anexa una información atributiva organizada mediante tablas. Los datos descriptivos recogidos en las tablas permiten realizar las consultas, análisis, gráficos e informes relativos a los datos espaciales.

Figura 9. Funcionamiento de un SIG



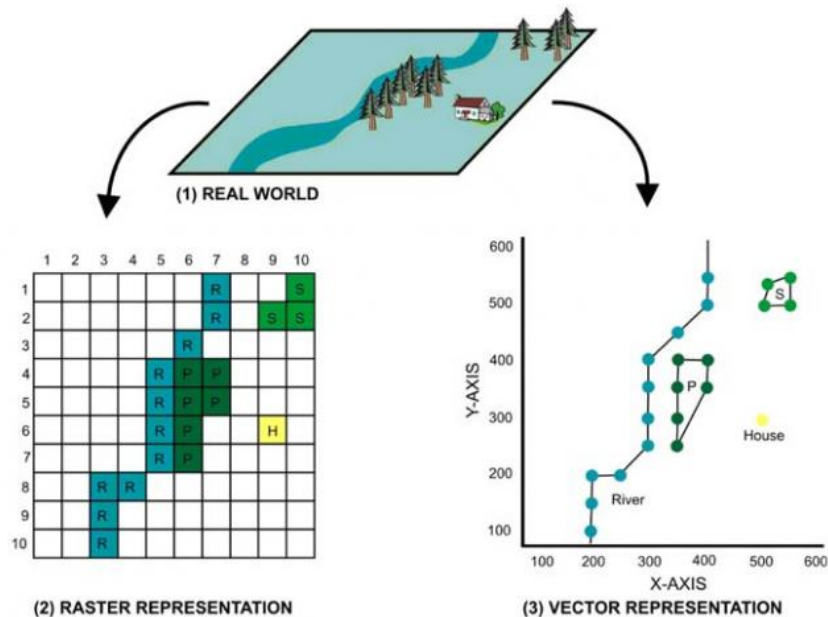
Fuente:<http://www.mingaservice.com/web/component/content/article/36-sistemas-de-informacion-geografica-sig.html>

Los SIG pueden ser representados a través de dos tipos de datos espaciales: Vectorial y Raster. Estos formatos se diferencian por la manera de almacenar los datos geográficos y por su apariencia.

En el formato Vectorial la información real es representada por puntos y líneas que definen sus límites, estableciendo un sistema de coordenadas para representar cada objeto.

El formato Raster, el espacio está representado por un conjunto de celdas adyacentes llamadas pixel, que representan las unidades de información espacial. Estas establecen su localización por un sistema de referencias de filas y columnas, acompañado por la extensión del mapa y el tamaño de la celda. Los pixeles no mantienen una relación mutua entre sí. En la cobertura de tipo Raster, cada celda tiene un valor o código asignado, correspondiente al tipo de información temática que representa la celda.

Figura 10. Formato Raster y Vectorial



Fuente: <http://www.cookbook.hlurb.gov.ph/book/export/html/203>

Entre sus múltiples utilidades, sobresalen:

- Obtener información instantánea y actualizada.
- Apoyo en la fase de diagnóstico.
- Facilidad en el análisis de la información.
- Agilidad en la manipulación de datos.
- Facilidad en las consultas.
- Mayor nivel de procesamiento, integración y cálida de datos.
- Información detallada, confiable y geo-referenciada.
- Eficiencia en las respuestas (rápidas, oportunas y confiables).
- Mayor velocidad de acceso a información tanto espacial, como no espacial.

4.1 SOFTWARE ArcGIS

ArcGIS es la herramienta más extendida en el mundo por sus avanzadas capacidades de visualización, exploración, consultas y análisis de información de datos geográficos, además de las numerosas técnicas de integración de datos desde todo tipo de fuentes y herramientas de edición. Igualmente este software se considera de gran utilidad para estudiantes de diversas especializaciones y para profesionales que manejen información georreferenciada y que deban representar dentro de un entorno espacial georreferenciado la información propia de sus trabajos de investigación o consultoría.

4.2 INTEGRACIÓN DEL MDE PARA CAPAS Y BASAMENTOS DE ACUIFEROS A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

La migración del MDE al entorno de un SIG ofrecido por ArcGis es básicamente un problema de formato, al describir el procedimiento aplicado para la integración del MDE en un Sistema de Información Geográfica a través del software ArcGis con la interfaz grafica de ArcMap y Arcscene, con el fin de interrelacionar las características de cada modelo, para poder integrar los modelos es necesario realizar la transformación de los formatos a extensiones legibles por el programa ArcGis.

Para que los datos puedan ser integrados en un mismo mapa las proyecciones debe ser definidas entre las celdas del MDE, las capas de finos y de basamentos de acuíferos en formato Raster, así como la descripción de que los modelos generados se encuentre en un sistemas de coordenadas MAGNA-SIRGAS, ya que de esto depende la posibilidad de realizar operaciones entre las celdas de cada mapa y generar una nueva capa de información que combine las características de los MDE creados.

4.2.1 Migración del MDE para Capas de Finos y Basamentos de Acuíferos al Software ArcGis. Se elaboró el Modelo Digital de Elevaciones para la capa de finos y de basamentos, con una estructura de datos tipo Raster y celdas de 10x10 metros mediante el software Surfer V.9, cuya extensión característica es *.grd.

El primer paso en el proceso de migración consiste en exportar este archivo *.grd, a una extensión *.ASCII, el cual será la base para la inclusión del modelo a ArcGis. Estando en la interfaz grafica de ArcGis, se procede a convertir el archivo *.ASCII, el cual es la extensión característica de ArcGis para información tipo de Raster. El proceso de transformación se realiza mediante la herramienta ***Conversión Tools – ToRaster – ASCII toRaster.***

Por último se define una referencia espacial para el archivo final y la extensión del área de trabajo (Data Frame). Es conveniente aclarar que el MDE se encuentra georreferenciado al sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS, en este paso solo se le definirá este sistema, para que sirva como base en la georreferenciación de los mapas

4.2.2 Estructuración del SIG. Para la elaboración del SIG, es integrar los archivos en formato RasterDataset generados al mismo ambiente SIG arcGis. Para esto, se cargan los archivos del MDE, la capa de finos y la del basamento de acuíferos al mismo archivo *.Mxd.

Consecutivamente, se procede a establecer la misma referencia espacial y la extensión del área de trabajo para los archivos de la capa de finos y la del basamento de acuíferos de acuerdo con los parámetros del archivo del MDE.

El producto final consiste en un archivo *.Mxd que contiene un SIG con información de la capa superficial, la capa de finos y la del basamento, para cualquier punto localizado a una resolución de 10 metros.

5. PRODUCTOS FINALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

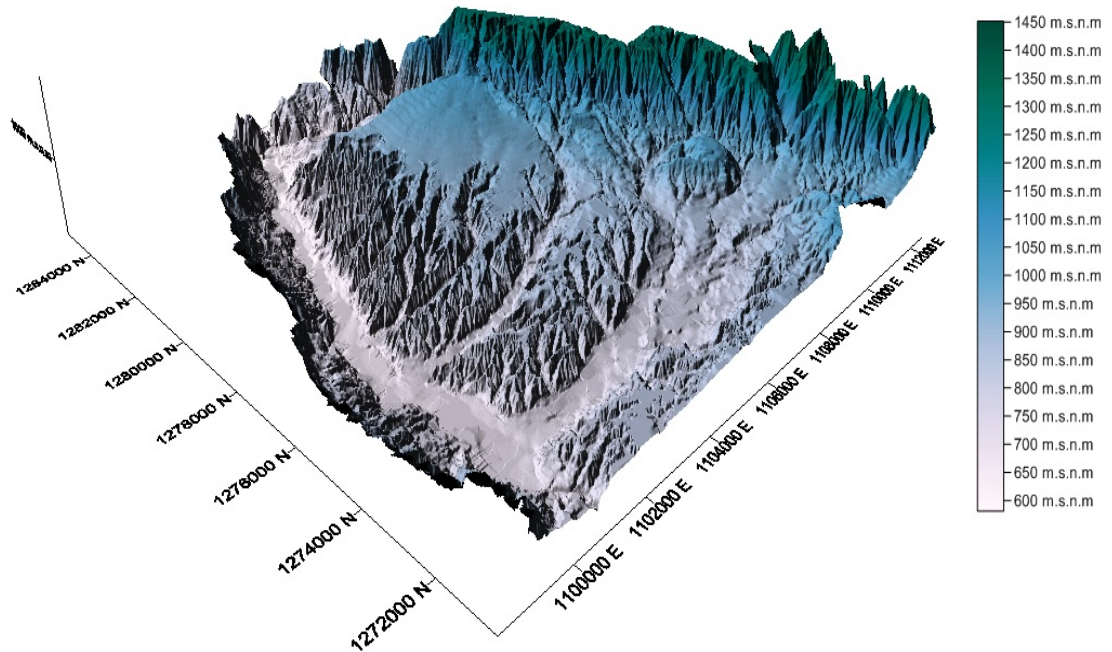
Durante este capítulo, se pretende resaltar la importancia de las metodologías utilizadas en los Modelos generados a partir de los resultados obtenidos así como la integración de estos a un Sistema de Información Geográfico.

Por consiguiente, ya que los productos finales Consisten en modelos Digitales, se presentará además, realizar los análisis respectivos para cada uno de ellos, con el fin de validar la veracidad con que estos Modelos se ajustan a la realidad, como también sus aplicaciones, ventajas y sus limitaciones.

5.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

La figura (11), muestra el modelo de elevaciones definido bajo una estructura de tipo Raster con celdas de 10 x 10 metros y un error promedio de 1.5 metros para desviación estándar de 3.399, generado a partir de Cartografía Digital 1:10000 en el Sistema de Coordenadas MAGNA – SIRGAS, suministrada por la Corporación Autónoma Regional para la Meseta de Bucaramanga.

Figura 11. MDE en 3D de la Zona de Estudio



Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por los autores

El proceso de validación del MDE se realizó comparando las elevaciones de 49 puntos reales de los cuales 6 de ellos fueron eliminados debido a que las estadísticas desarrolladas superaban el error máximo permitido en cada análisis (Numeral 2.4.4). Este proceso demostró una concordancia con las exigencias de dos entidades internacionales NMAS y USGS de las cuales se concluye que:

Según **NMAS (National Map Accuracy Standards)**, la precisión vertical, tal como se aplica a los mapas de curvas de nivel en todas las escalas, será de tal manera que no más de 10 por ciento de las elevaciones excedan un error de 15 metros, en un 90 por ciento de los puntos (numeral 2.4.4). El MDE generado cumple esta exigencia para 96.6 por ciento de los puntos, lo cual valida el modelo para este estándar de calidad. En la comprobación de elevaciones tomado del mapa, el error vertical aparente puede ser disminuido suponiendo un desplazamiento horizontal en el error horizontal permitida para un mapa de esa escala.

Según la Clasificación de la **USGS (United States Geological Survey)**, para Modelos Digitales, el MDE generado para el Área Metropolitana de Bucaramanga se clasifico como de nivel 3 (numeral 2.4.4) En función de esta clasificación, la desviación típica no debe ser mayor a 7.50 metros y la muestra no debe tener puntos para los cuales el error vertical sea superior al intervalo de la fuente de más precisión.

El MDE generado posee una desviación estándar calculada de 3.399 metros y la discrepancia máxima de los puntos de la muestra no supera los 30 metros. Ver (Tabla 3).

El MDE se encuentra en formato Raster, está limitado al tamaño del pixel, es decir, la información de elevación por cada pixel en el mapa es confiable para un área máxima de 10 x 10 m².

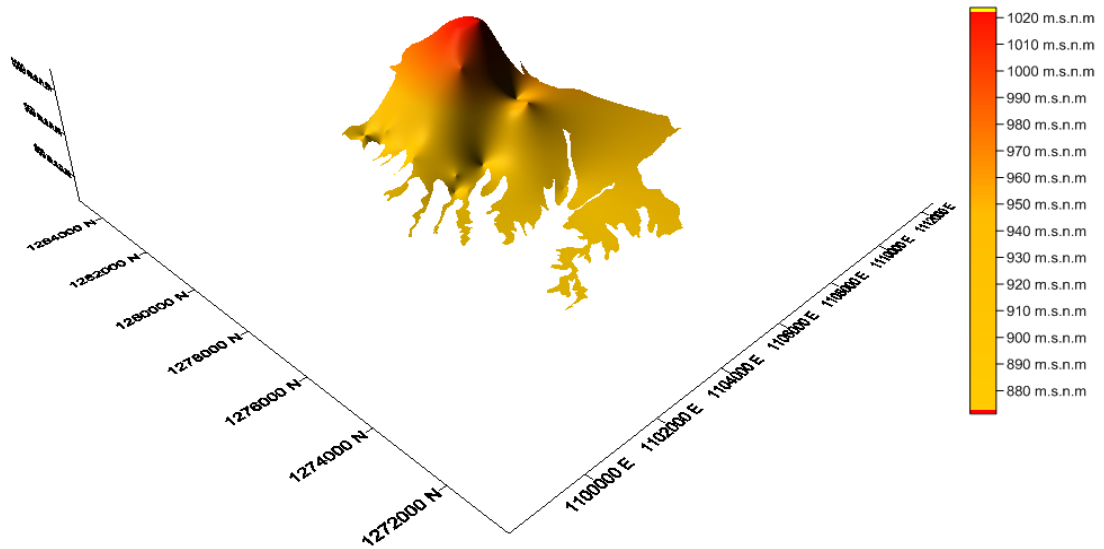
5.2 MODELO DIGITAL DE LAS CAPAS FINOS Y BASAMENTO DE ACUÍFEROS

La Figura muestra el Modelo de la Capa que de finos que representa el basamento del acuífero superficial y la Figura el Modelo del Basamento inferior en formato Raster, generados a partir de Cartografía Digital, con celdas de 10 x 10 metros, el cual está limitado al tamaño del pixel, es decir, la información por cada pixel en el Modelo es confiable para un área máxima de 10x10 m².

El análisis realizado presenta algunos problemas espaciales que se deben tener en cuenta para un buen funcionamiento de los algoritmos. Entre estas dificultades se destaca la existencia de formas cóncavas. La concavidad puede responder a una forma real del terreno pero, más frecuentemente, a problemas derivados de construcción de los MDE, como consecuencia esto puede ser atribuido a los procesos de restitución fotogramétrica o especialmente cuando la distancia entre

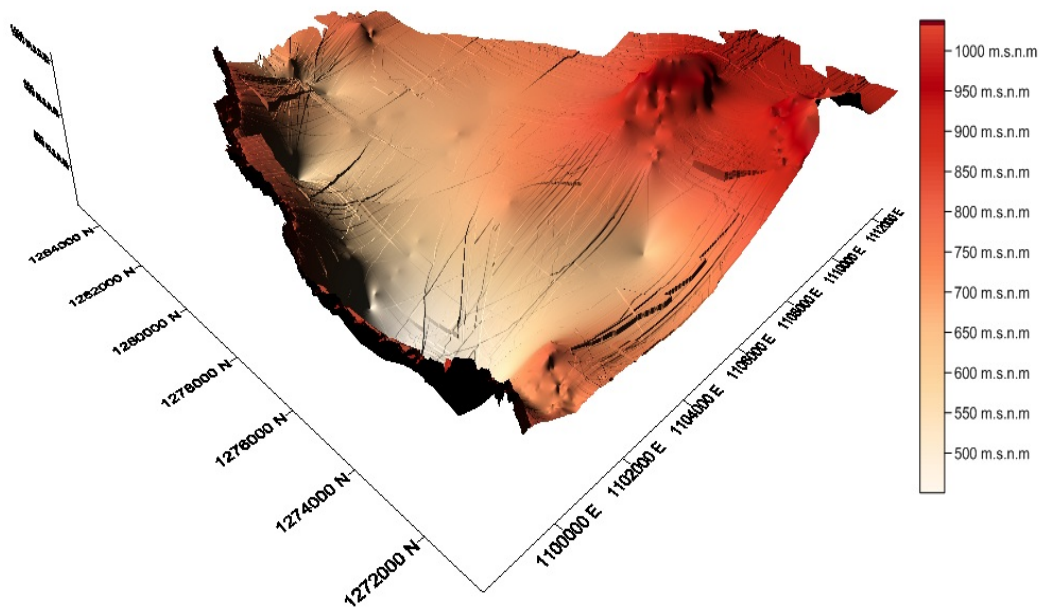
las filas y las columnas del modelo matricial es pequeña en comparación con la resolución del modelo.

Figura 12. MDE en 3D del Basamento del Acuífero superficial de Bucaramanga



Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por los autores

Figura 13. MDE en 3D del Basamento Formación Girón



Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por los autores

5.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO INTEGRANDO EL MDE PARA LAS CAPAS DE ACUÍFEROS

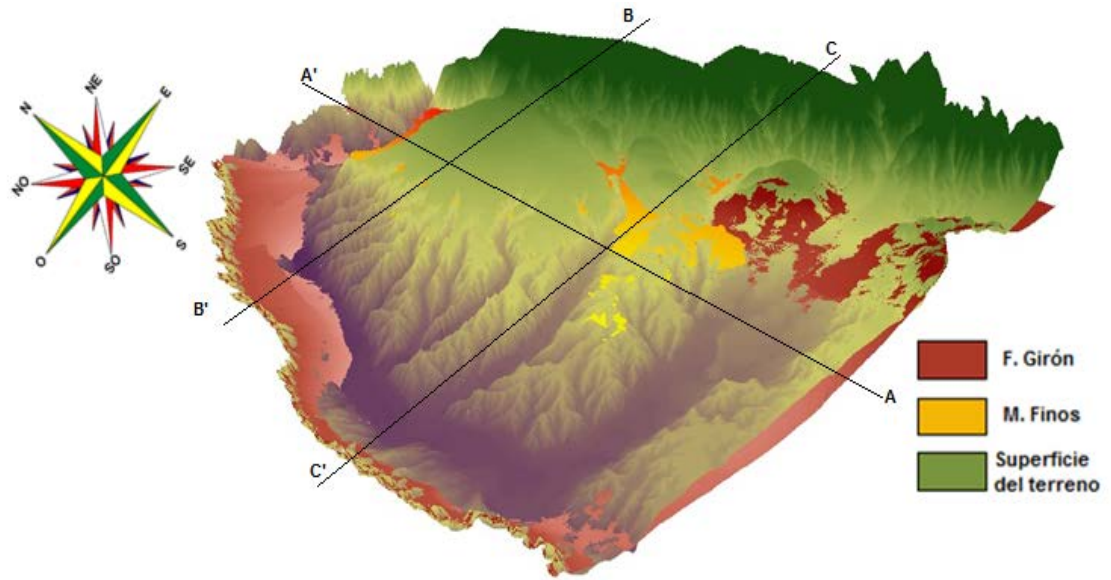
El resultado final consiste en un archivo con extensión *.MXD, el cual es el formato utilizado para proyectos SIG de ArcGIS y que contiene un Sistema de Información Geográfico que integra información superficial del terreno, capas de Finos y Basamentos de Acuíferos, con una estructura de datos tipo Raster con una resolución de 10 metros en el sistema referenciado a coordenadas MAGNA – SIRGAS.

La importancia del Sistema de Información Geográfico generado en este proyecto, enmarcado en el contexto hidrológico, radica en la posibilidad de combinar factores propios de una o varias características asociadas a cada uno de los grupos temáticos asociados al SIG por medio de la operación entre celdas y píxeles que componen cada capa de información.

La importancia de crear un SIG de este tipo radica en que las soluciones para muchos problemas frecuentemente requieren del acceso a varios tipos de información que solo pueden ser relacionados por su distribución espacial.

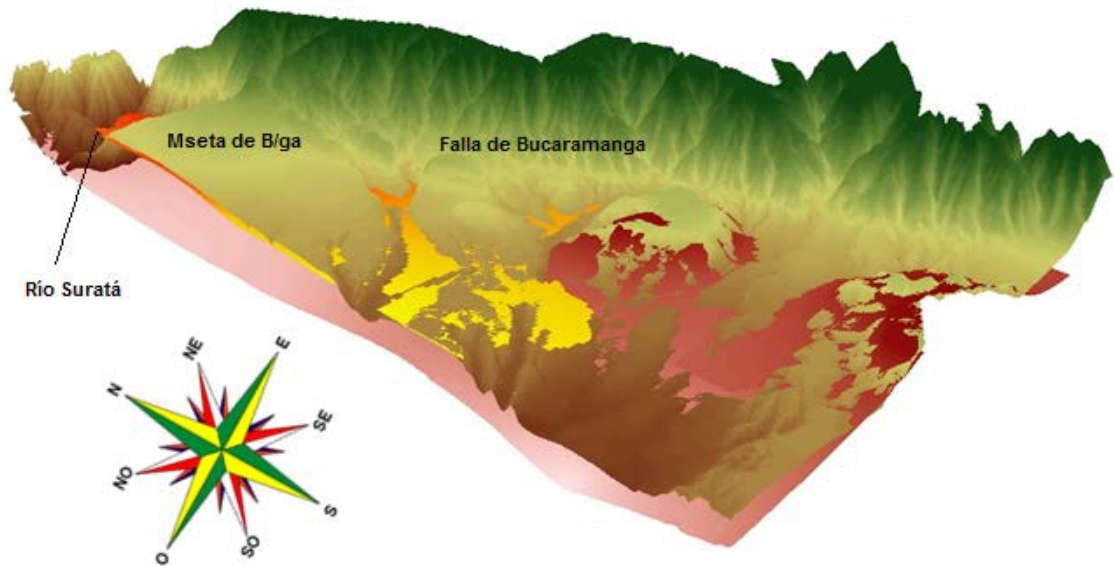
Los resultados del modelo deben compararse con los datos reales y determinar de este modo la exactitud del modelo para que así halla una veracidad sobre este, utilizando los análisis de datos (herramientas estadísticas) se permite utilizar el modelo matemático del territorio almacenado en el SIG para utilizar y validar diversas hipótesis.

Figura 14. Integración de los MDEs en 3D cortes



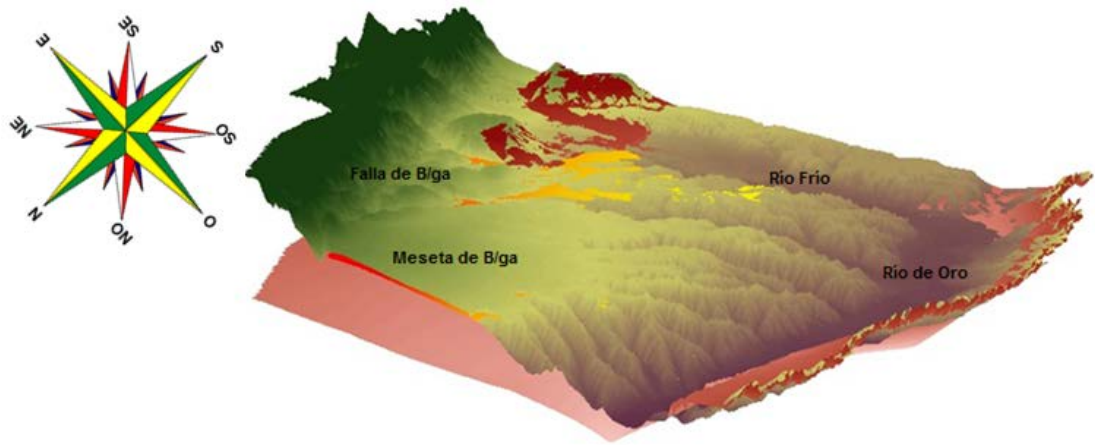
Fuente: Software ArcGIS 10 y modificado por los autores

Figura 15. Corte A-A' longitudinal en dirección Norte-Sur



Fuente: Software ArcGIS 10 y modificado por los autores

Figura 16. Corte B-B' Transversal sector Norte en dirección Este-Oeste



Fuente: Software ArcGIS 10 y modificado por los autores

6. CONCLUSIONES

El MDE de la superficie del terreno fue generado a partir de cartografía digital 1:10000 proveniente de la CDMB referenciada en el Sistema Coordinado MAGNA-SIRGAS, Sistema actualmente usado en Colombia. Mediante estructura de datos tipo Raster y tamaño de celda “pixel” de 10m se generó el MDE para un Área de aproximadamente 152 Km cuadrados de la zona Metropolitana de Bucaramanga, con error promedio de 1.5m en mediante proceso de validación con desviación estándar de 3.399m.

La validación, se realizó mediante herramientas estadísticas con 43 puntos tomados en campo (puntos Reales), con la ayuda de un GPS y error de precisión de aproximadamente 6m y variable dependiendo de las condiciones en campo y cobertura satelital, con puntos del MDE comparando diferencias entre sus elevaciones, estos resultados fueron contrastados con los estándares de calidad y exactitud vertical de entidades internacionales NMAS (National Map Accuracy Standards) y USGS (U.S. Geological Survey). La solución demostró que el MDE cumple con los requisitos de calidad exigidos.

Se crearon mediante el Software Surfer V.9 con 17 puntos el MDE de finos que representa el Acuicierre superficial de Bucaramanga, y con 29 puntos el MDE del Basamento Girón que conforma el acuífero inferior del depósito aluvial de la Formación Bucaramanga representándonos de manera muy simplificada su geología estructural con posible mejoramiento en futuro. Se uso formato tipo Raster y tamaño de celda de 10 m. Estos puntos fueron obtenidos por estudios realizados por INGEOMINAS 2004 y 2001. Otros puntos usados para el basamento Girón fueron extraídos de la cartografía 1:10000 por reconocimiento de campo, ya que este aflora en algunas zonas del área de estudio. No se efectuó validación para estas dos capas debido a las dificultades que se presentan para obtener información de este tipo (geológico).

De acuerdo con los MDE generados en este proyecto, se obtuvieron parámetros con el fin de entender la geomorfología la cual se ajustó más a la realidad pues dentro del modelo se mejoraron varias zonas que tenían deficiencia para el MDE y por lo tanto se logró tener una buena definición o representación real del terreno y de los basamentos. Para la capa de finos obtenida con resolución de 10 x 10 metros, en las zonas de mayor deficiencia de información se utilizó un ajuste mediante el variograma creado para mejorar algunas de las zonas que presentaban problemas, debido al manejo que Surfer aplica a la interpolación espacial para obtener capas tipo Raster.

Se elaboró un Sistema de Información geográfico (SIG), que integra el MDE de la cartografía y las capas de los basamentos, en estructura de datos Raster de celdas 10 x10 metros. El avance en el desarrollo de la información del SIG permite un aumento en la resolución espacial de la modelización agilizando el análisis de distintas escalas espaciales para tener una mayor visualización y/o acercamiento de zonas donde posiblemente se necesiten estudios.

El uso de las capas y basamento es obtener un Modelo Digital de Elevación, útil para fines múltiples tales como: comenzar a plantear Modelos Hidrológicos conceptuales y también servirá como base para el planteamiento del modelo numérico de flujo el cual describe matemáticamente el comportamiento de los niveles freáticos en el tiempo.

En los esquemas generados los cuales son una explicación en forma de cortes oBloque-diagramas, de la dinámica de los sistemas acuíferos y los componentes del ciclo hidrológico, nos permiten visualizar la topografía con un mejor detalle, luego de un análisis se concluyo que esta región posee pendiente descendente en dirección Este a Oeste permitiendo que el flujo de aguas subterráneas corra en este sentido y vaya a drenar al Rio de Oro.

7. RECOMENDACIONES

Cuando se generan Modelos Digitales de Elevación mediante mapas cartográficos en formato tipo Raster, se recomienda usar el tamaño de celda "Pixel" más adecuado de acuerdo a la escala y diferencia entre curvas de nivel en que se encuentre dicha información, esto con el fin de evitar pérdida en la precisión. Esto quiere decir que al momento de ir a un punto específico visualizo una resolución ya sea buena o mala de acuerdo al tamaño de celda optado.

Para los procesos de validación del MDE es recomendable tomar la mayor cantidad de puntos de control, especialmente que se encuentren distribuidos en toda el área de trabajo y en zonas críticas, para llegar a obtener una validación de mayor confianza.

Es recomendable usar gran cantidad de puntos para elaboración de modelos digitales de elevación y que estén distribuidos uniformemente para algunos tipos sobre toda el área de estudio, de lo contrario al momento de hacer un análisis detallado, los resultados me mostraran insuficiencias. La representación visual no sería la más adecuada a la realidad, por causa de los cambios fuertes que se generarían en su topografía.

Cuando se genera un SIG en formato Raster, antes de realizar el proceso de integración es necesario dar formato a cada una de las capas que van a ser implicadas, esto se refiere a implantar los límites del proyecto, igualar el tamaño de celda "Pixel". Se recomienda también, trabajar en versiones de ArcGIS más recientes, debido a que en su base de datos, estas versiones ya incluyen los parámetros requeridos para llevar a cabo el proceso de migración de los Sistemas Coordenados utilizados en Colombia a MAGNA-SIRGAS.

BIBLIOGRAFÍA

BUENAHORA, Carlos Andrés y OSORIO, Henry. Desarrollo del Modelo Digital de Elevaciones de la Cuenca del Río Sucio Municipio de Tona. Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2009.

CASTELLANOS Sandoval, Rafael L. y TORRES Herrera, Disson Andrés, Elaboración de un Modelo de Elevaciones y Subdivisión del Tipo de Suelos de la Cuenca del Río de Oro Parte Alta. . Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2009.

GONZALEZ, Jorge Eliecer y CAMARGO, Leonardo. Vulnerabilidad a la Contaminación del Agua Subterránea en la Zona Aluvial de Bucaramanga. Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2010.

Informe Hidrogeocol. LTDA, Prospección Geoeléctrica para Evaluar las Posibilidades Acuíferas en la Meseta de Bucaramanga.

Informe Ingeominas, 2001, Subdirección de Amenazas Geoambientales, Zonificación Sismo- geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, Ministerio de Minas y Energía. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero –Ambiental Nuclear.

Ing. Suarez Díaz, Jaime, Modelo Hidrológico Básico de Bucaramanga, Ingeniería de Suelos Ltda y Explotación de Aguas Subterráneas – Bucaramanga. 2002.

Lora Yepes, Eddie, Sistema de Información Geográfica, Aplicación en Hidráulica de Ríos y Costas, 2005.

Pedregal Mateos, Belén, Introducción a ArcGIS, Fuentes Cartográficas y SIG II. PÉREZ, Deimer Ariel. Elaboración de un Modelo Digital de Elevaciones y Generación del Mapa de Clasificación Vegetal para la Cuenca Superior del Río Lebrija. Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2010.

RODRIGUEZ, Julio Cesar y TORRES, Diana Carolina. Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga. Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2010.

SALAZAR, José Luis y QUINTAN, Deivis Orlando. Elaboración de un Modelo Digital de Elevaciones y Delimitación del tipo de Vegetación presente en la Cuenca Superior del Río de Oro. Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2009.

VÁSQUEZ, Luis Eduardo y DE BERMOUDES, Olga. Modelo Geológico- Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga. INGEOMINAS (2004).

Vicente González, José Luis y Behm Chang, Virginia, Consulta, Edición y Análisis Espacial con ArcGIS 9.2. Tomo I: Teoría, 2008.

WANDURRAGA B., Carlos Manuel (Geólogo MP No. 1086). Estudio Geoeléctrico realizado en el Área Metropolitana en el Proyecto “Modelo Hidrológico Básico de

Bucaramanga” Compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A.
E.S.P. Abril del 2003.

Zambrano A, Jorge E y Rey Porras, Alexander, Asesoría Geológica en el Área
Metropolitana de Bucaramanga, para la Explotación de Aguas Subterráneas.
Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático: Universidad Industrial de
Santander y compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. S.A.
E.S.P.C.A.M.B, 2003.

CONSULTAS VÍA WEB

Clasificación de las Unidades Geológicas en Relación a las Aguas Subterráneas.

Fuente tomada de internet:

<http://www.fortunecity.com/campus/carthage/1033/Pag2/acuif.htm>

FELICÍSIMO, Ángel. Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Disponible en internet:

<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>

Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas. Subcomisión 1.3b de la IAG. Grupo de Trabajo de la Comisión de la Cartografía del IPGH.

Internet:<http://www.sirgas.org/index.php?id=15>

SURFER V 9, Self-Paced Training Guide. Disponible en internet.

<http://pdflens.com/Surfer-9-Self-Paced-Training-Guide.html>.

ANEXOS

ANEXO 1. REGISTRO FOTOGRAMÉTRICO DE LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

En este anexo se muestran algunas fotos que corresponden en su medida a los sitios más representativos del Área Metropolitana, los cuales fueron tomados mediante (GPS) para realizar en el proyecto, su respectiva validación, por el método más apropiado.

Foto 1. Carrefour de Floridablanca (cañaveral)



Foto 2. Centro Comercial MEGAMALL



Foto 3. Parque de los Niños (Bucaramanga)



Foto 4. Parque de la Concordia (Bucaramanga)



Foto 5. Parque las Cigarras (Bucaramanga)



Foto 6. Parque Principal de Floridablanca



Foto 7. Parque San Pio (Bucaramanga)



Foto 8. Parque Santander (Bucaramanga)



Foto 9. Centro Comercial San Andresito Isla



Foto 10. Romboy Caballo de Bolívar UIS (B/ga)



Foto 11. Laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón UIS (Bucaramanga)



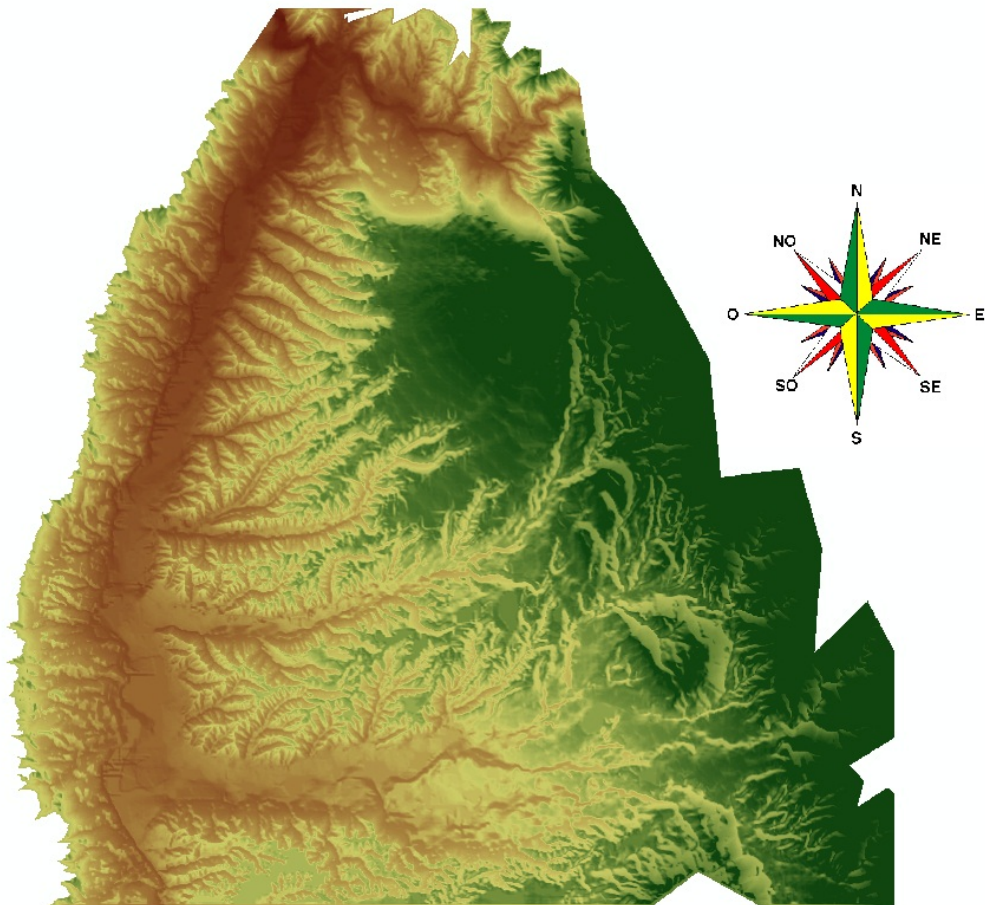
Foto 11. Residencias Universitarias UIS (Bucaramanga)



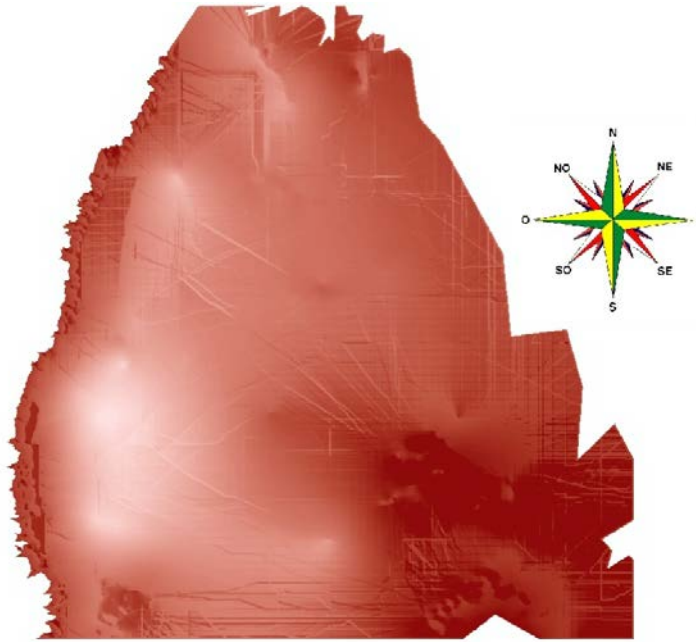
ANEXO 2. GRAFICAS EN 2D Y 3D DE RESULTADOS FINALES: CORTES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES.

Estas graficas se generaron para crear diferentes tipos de cortes en 3D, utilizando ArcGis con aplicaciones en Arcscene y ArcMap que es otra aplicación en 2D dedicada a visualizar, consultar, analizar y editar datos geográficos y realizar salidas cartográficas. Arcscene es un módulo que se encuentra en una de las herramientas de ArcMap, con la finalidad de servir como un visor en 3D.

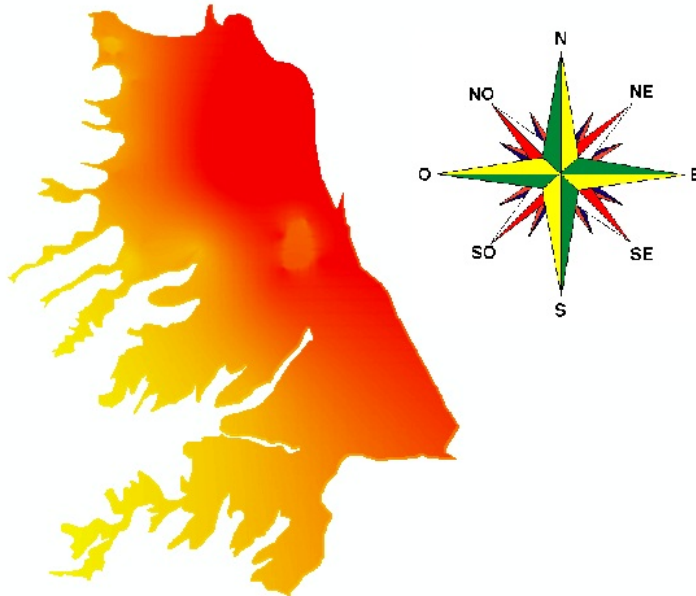
Grafica 1. Representación Visual (2D) en ArcMap de la cartográfica Digital de la zona de estudio



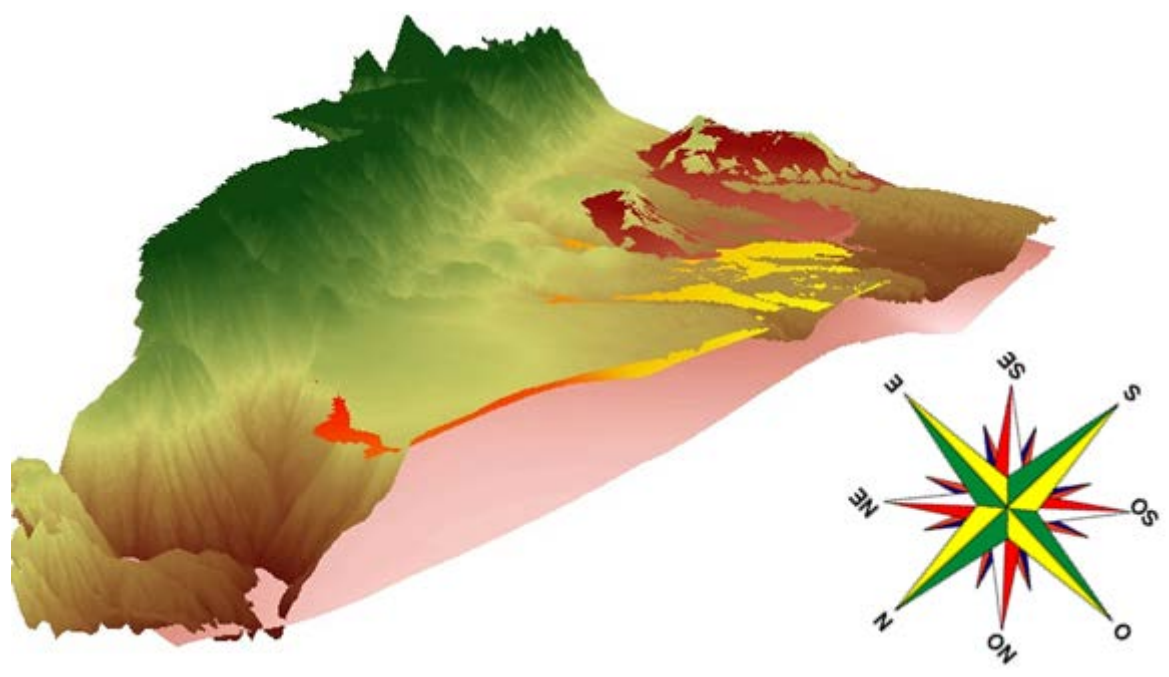
Grafica 2. Representación Visual (2D) en ArcMap de la Capa que representa el basamento Formación Girón



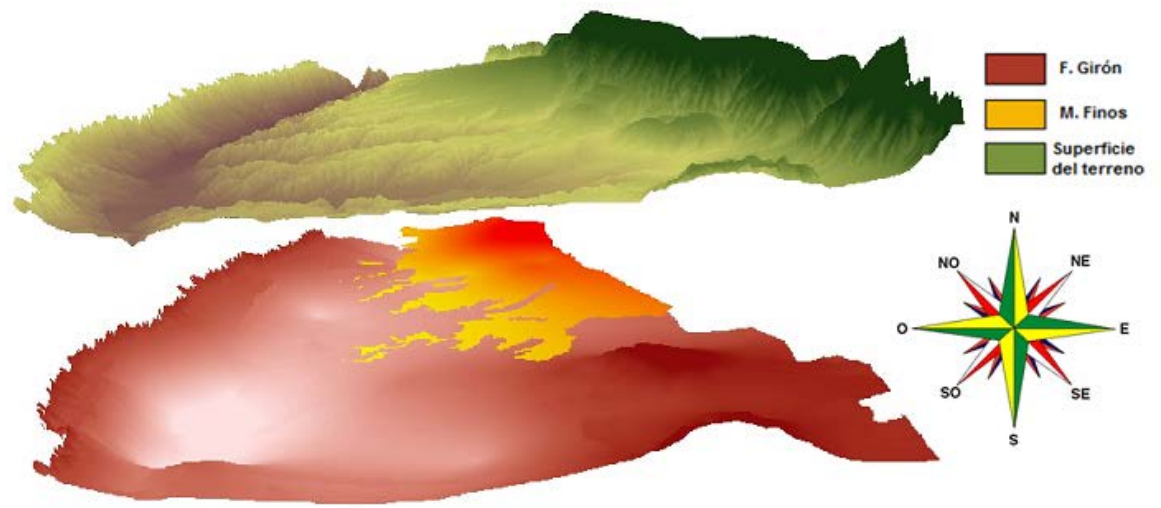
Grafica 3. Representación Visual (2D) en ArcMap de la Capa que representa el Basamento del Acuífero superficial de Bucaramanga



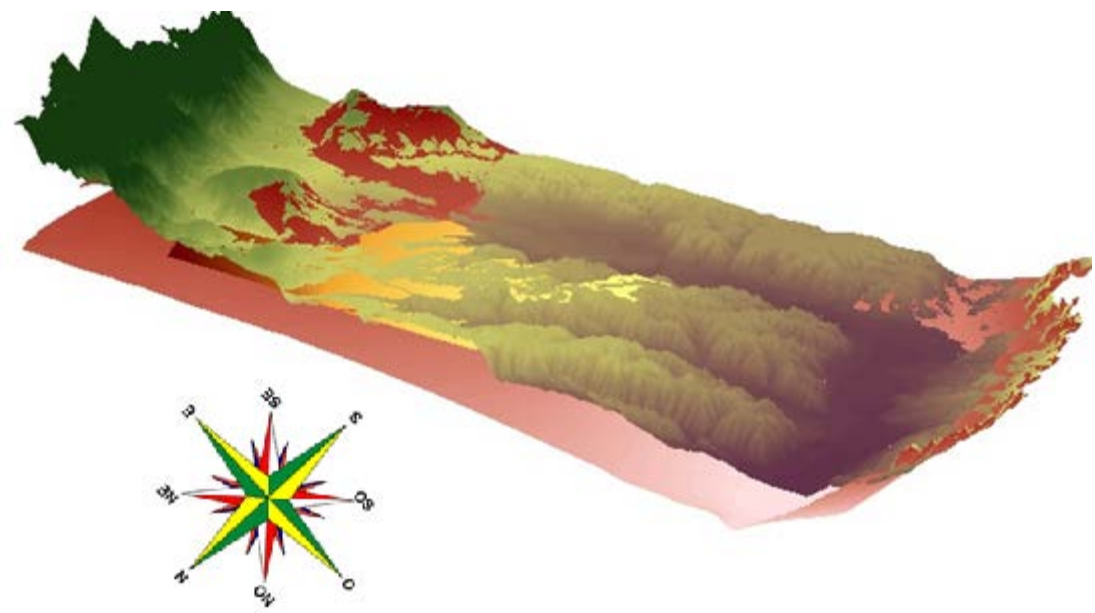
Grafica 4. Representación Visual (3D) de corte longitudinal en Arcscene en dirección Norte-Sur



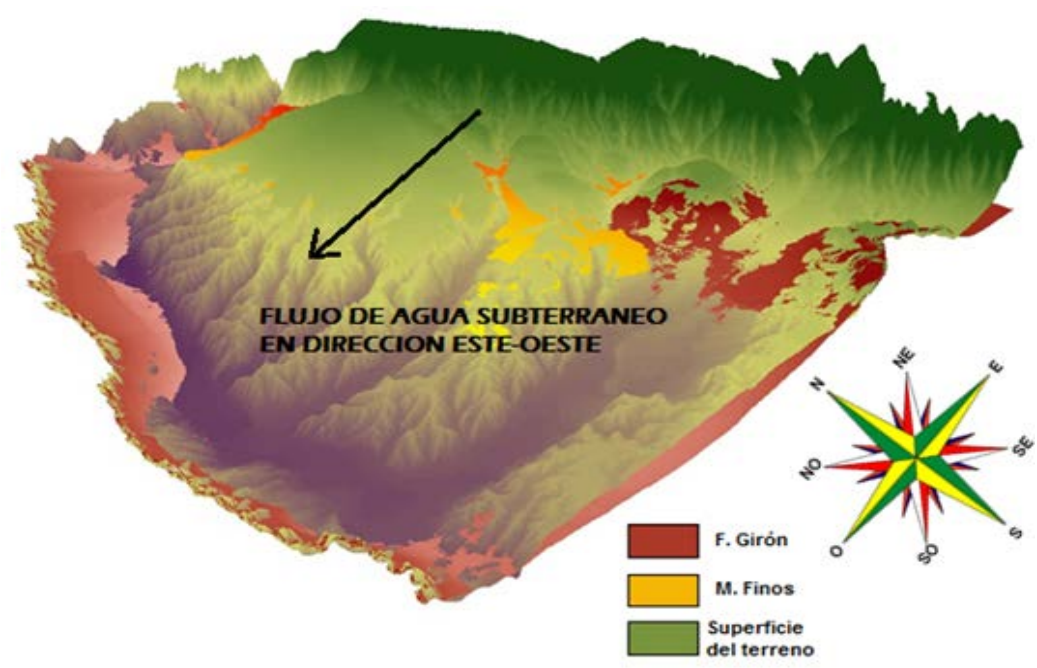
Grafica 5. Representación Visual (3D) de Bloque-Diagrama espaciado en Arcscene completo



Grafica 7. Representación Visual (3D) de corte transversal sector Sur en Arcscene en dirección Este-Oeste



Grafica 8. Representación Visual (3D) representación del flujo de agua subterráneo.



ANEXO 3. PUNTOS OBTENIDOS MEDIANTE ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS REALIZADOS POR INGEOMINAS, BASAMENTO FINOS

Espesores de las Unidades Geológicas														cotas		
Punto de Información	N	E	Z, m.s.n.m	Q _{al} , Q _{al1} , Q _{al2} , Q _{fe}		Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{bf}	Q _{bo}			J _g	
				grueso	fino			grueso	grueso	fino		zona meteoriz	roca sana			
Piezómetro SV1	1276602	1106081	919.4	0	0	10	12	19	24	30+						895.4
P. Parque A.Nariño	1278344	1106651	980.0	0	0	6.5	8.0	8.8	21.7	34.2	47.7	53,6+				958.4
Piezómetro SR03	1278247	1104535	917.2	0	0	5	0	25	0	30+						892.2
P.Metrocentro	1278650	1105410	940.0	0	0	1	16	19.8	41.2	48	100+					898.8
P.Parque de los Niños	1279847	1105871	1010.0	0	0	3.1	5.5	8.4	22.5	25	100+					987.5
P. San Pio	1279052	1106974	990.0	0	0	6	44	0	0	59	197.5	295			>295	946.0
Piezómetro SM3	1280210	1106831	1041.3	0	0	4	5	13.8	17.5	25.5	>25,5					1023.8
Piezómetro SN2	1280322	1104292	934.1	0	0	5	0	23	27	32+						907.1
Piezómetro SA8	1279748	1104155	929.2	0	0	0	0	13.5	18.6	25.4	31+					910.6
Piezómetro SA5	1279551	1103960	923.9	0	0	0	0	18.5	21.8	30+						902.1
Piezómetro SJ3	1278541	1104384	910.5	0	0	0	0	8.4	24	31+						886.5
Piezómetro SJ4	1278680	1104561	925.0	0	0	0	0	23.8	0	30+						901.2
Piezómetro SM5	1280670	1106464	1035.0	0	0	3.1	9	13	19	27	30+					1016.0
Piezómetro SN5	1281090	1104446	934.0	0	0	5.8	7	16	18	24	30,2+					916.0
Piezómetro SN7	1281163	1104262	929.4	0	0	7	10	17.5	30	32,5+						899.4
Piezómetro SR2	1281488	1104079	919.7	0	0	5	10	0	0	16	30+					909.7
Piezómetro SR3	1281693	1104198	917.2	0	0	0	0	6	13.5	18	31+					903.7

Qbq: Miembro Gravoso

Qal2: Depósitos Aluviales Terrazas medias Qbf: Miembro Finos

Qblr: Miembro Limos Rojos

Qal1: Depósitos Aluviales Terrazas bajas Qbo: Miembro Órganos

Qfe: Depósito de flujo de Escombros

Qda: Deslizamiento Activo Jg: Formación Girón

ANEXO 4. PUNTOS OBTENIDOS MEDIANTE ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS REALIZADOS POR INGEOMINAS, BASAMENTO GIRÓN

Espesores de las Unidades Geológicas																				Cotas Techo Formacion Girón			
Punto de Información	N	E	Z, m.s.n. m	Q _{al1} , Q _{al1f} , Q _{al2} , Q _{fe}	Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{bf}	Q _{bo}		J _g		J _j		TRP _t	J _{rog}	zona meteoriz		roca sana		
							grueso	fino	grueso		grueso	fino	zona meteoriz	roca sana		zona meteoriz	roca sana			zona meteoriz	roca sana		
SEV ING-55	1275712	1104233	795.0	5.4	0	0	0	0	0	0	53.4	90.4		>90,4									704.6
P. San Pio	1279052	1106974	990.0	0	0	6	44	0	0	59	197.5	295		>295									695.0
SEV D-18	1280974	1103781	795.0	0	0	0	0	0	0	0	82	148	0	>148									647.0
SEV D-33	1277910	1101141	695.0	3.7	0	0	0	0	0	0	87	0	0	147+									608.0
SEV D-34	1277412	1100875	685.0	3.2	0	0	0	0	0	0		55	0	172+									630.0
SEV D-35	1276266	1100488	685.0	3.2	0	0	0	0	0	0	17.2	195	0	>195									490.0
SEV D-36	1275619	1100324	690.0	11.7	0	0	0	0	0	0	0	239	0	>239									451.0
SEV D-25	1275163	1099842	690.0	1.8	0	0	0	0	0	0	13.8	128	0	>128									562.0
SEV D-24	1275843	1099839	700.0	7	0	0	0	0	0	0	0	160	0	>160									540.0
SEV D-31	1281105	1102125	660.0	7.9	0	0	0	0	0	0	0	117.9	0	>118									542.1
SEV ING-5	1275688	1099802	695.0	0	0	0	0	0	0	0	26	110	0	>110									585.0
SEV ING-6	1276200	1099869	680.0	0	0	0	0	0	0	0	29	132	0	>132									548.0
SEV ING-10	1276845	1100908	700.0	0	0	0	0	0	0	0	18.8	217	0	>217									483.0
SEV ING-13	1272862	1102381	740.0	3	0	0	0	0	0	0	0	115	0	>115									625.0
SEV ING-44	1282793	1104758	700.0	0	4.1	0	0	0	0	0	19.1	80	0	>80									620.0
SEV ING-45	1283013	1104576	705.0	0	3	0	0	0	0	0	0	90	0	>90									615.0
SEV ING-21	1271470	1110102	1000.0	6.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119+									993.1
SEV ING-22	1270130	1110953	950.0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>66									884.0
SEV ING-23	1268841	1111787	995.0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>33									962.0
SEV ING-54	1275466	1108446	880.0	0	0	0	0	0	0	0	10	53	0	>53									827.0
SEV D-26	1273048	1101294	740.0	0	0	0	0	0	0	0	17	190	0	>190									550.0
P. Aldea de los Niños	1271473	1110686	950.0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62+									938.0
P. Ruitoque	1269945	1110982	960.0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>50									910.0
SEV ING - 80	1281365	1102220	670.0	11	0	0	0	0	0	0	0	36	0	>36									634.0
SEV ING-68	1272850	1105600	760.0	5.4	0	0	0	0	0	0	28	134	0	>134									626.0
SEV ING-72	1274710	1107100	875.0	2.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130+									872.3
SEV ING-82	1275310	1108200	896.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9	39+									891.1
SEV D-8	1275574	1108501	890.0	3.5	0	0	0	0	0	0	16.5	52	0	>52									838.0
P. Estación El Bosque	1274230	1106963	855.0	0	0	0	0	0	0	0	20	27	0	>27									828.0

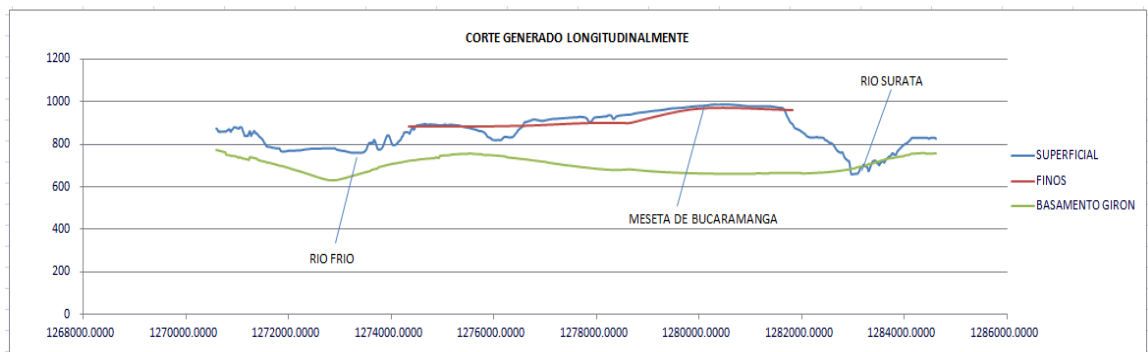
**ANEXO 5. PUNTOS OBTENIDOS DE LA CARTOGRAFÍA 1:10000 MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE CAMPO
PARA EL BASAMENTO GIRÓN**

ESTE	NORTE	ELEVACION	ESTE	NORTE	ELEVACION	ESTE	NORTE	ELEVACION	ESTE	NORTE	ELEVACION
1099022	1270583	880	1099247	1270773	920	1099818	1279522	850	1099533	1271454	820
1099027	1270585	880	1099248	1270773	920	1099817	1279524	850	1099533	1271453	820
1099030	1270586	880	1099249	1270774	920	1099816	1279525	850	1099532	1271452	820
1099034	1270587	880	1099249	1270774	920	1099815	1279526	850	1099532	1271452	820
1099038	1270588	880	1099250	1270775	920	1099814	1279528	850	1099532	1271451	820
1099042	1270589	880	1099250	1270776	920	1099814	1279529	850	1099532	1271450	820
1099047	1270590	880	1099250	1270777	920	1099814	1279530	850	1099532	1271449	820
1099051	1270592	880	1099250	1270777	920	1099815	1279532	850	1099532	1271447	820
1099055	1270595	880	1099251	1270778	920	1099815	1279533	850	1099531	1271445	820
1099058	1270596	880	1099251	1270779	920	1099814	1279534	850	1099531	1271443	820
1099060	1270598	880	1099251	1270780	920	1099813	1279535	850	1099530	1271441	820
1099062	1270600	880	1099251	1270781	920	1099812	1279535	850	1099529	1271439	820
1099063	1270601	880	1099252	1270782	920	1099811	1279536	850	1099528	1271437	820
1099063	1270602	880	1099252	1270783	920	1099810	1279537	850	1099528	1271436	820
1099063	1270603	880	1099251	1270785	920	1099809	1279538	850	1099527	1271434	820
1099064	1270606	880	1099251	1270786	920	1099809	1279538	850	1099527	1271433	820
1099065	1270608	880	1099251	1270787	920	1099809	1279539	850	1099527	1271430	820
1099065	1270611	880	1099251	1270787	920	1099809	1279540	850	1099527	1271428	820
1099066	1270612	880	1099251	1270788	920	1099809	1279541	850	1099527	1271426	820
1099066	1270613	880	1099250	1270789	920	1099811	1279543	850	1099527	1271422	820
1099065	1270614	880	1099250	1270790	920	1099813	1279546	850	1099526	1271419	820
1099065	1270614	880	1099248	1270793	920	1099814	1279548	850	1099526	1271415	820
1099065	1270615	880	1099245	1270796	920	1099816	1279550	850	1099525	1271414	820
1099065	1270616	880	1099243	1270799	920	1099818	1279553	850	1099525	1271414	820
1099065	1270616	880	1099242	1270800	920	1099820	1279555	850	1099524	1271413	820
1099065	1270617	880	1099242	1270800	920	1099822	1279558	850	1099522	1271412	820
1099065	1270618	880	1099241	1270801	920	1099823	1279560	850	1099521	1271412	820

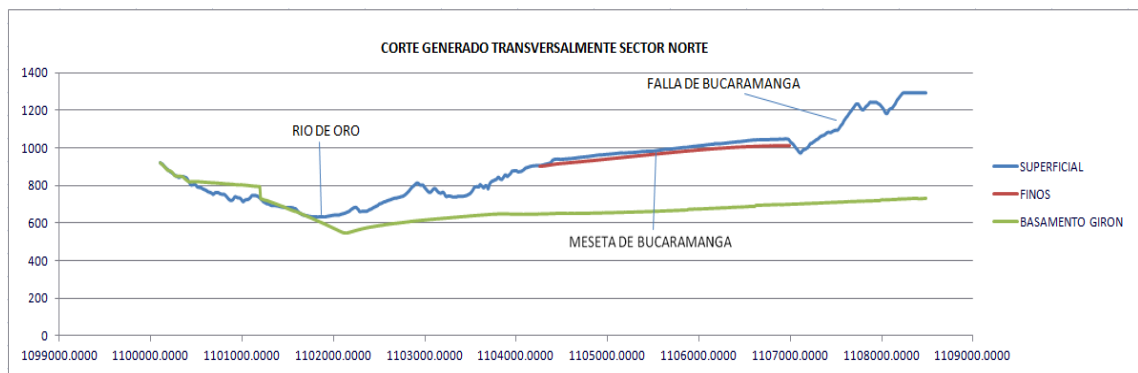
ANEXO 6. PERFILES REPRESENTATIVOS DE CADA UNO DE LOS CORTES GENERADOS

Estos perfiles se generaron a partir de Surfer por medio de la herramienta Grid-Slice que permiten extraer una serie de puntos partiendo de dos puntos coordenados que representan un corte en línea recta. Estos puntos son llevados a excel para crear las curvas que se muestran en las graficas. Como podemos observar en cada una de ellas por razones de falta de información en la capa del basamento Formación Girón y la capa Finos que representa el acuífero superficial, se presentan una serie de acontecimientos erróneos en algunos sectores.

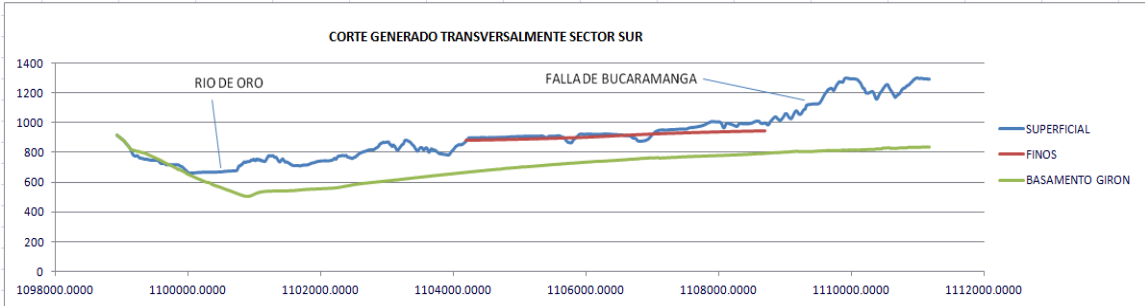
Perfil 1. Corte generado del área estudiada en dirección Norte-Sur



Perfil 2. Corte generado transversalmente del área estudiada, sector norte en dirección Este-Oeste



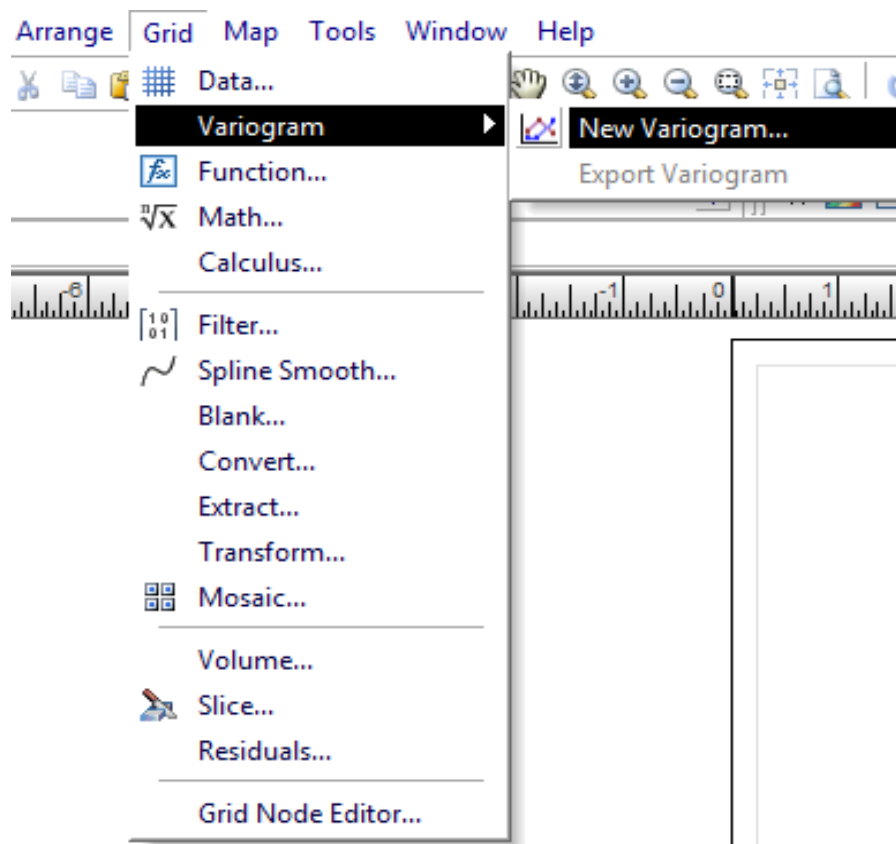
Perfil 3. Corte generado transversalmente del área estudiada, sector sur en dirección Este-Oeste



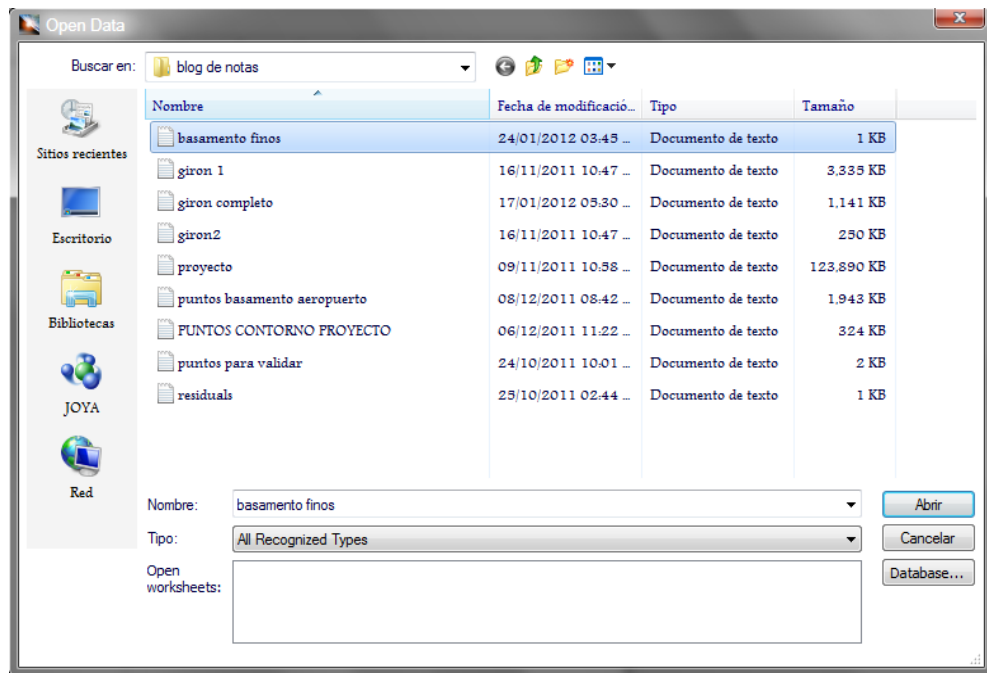
ANEXO 7. VARIOGRAMA GENERADO PARA LA CAPA DE FINOS.

El variograma es una herramienta que nos permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida. En nuestro caso utilizamos el variograma para la capa de finos ya que esta es la que presenta mayor dispersión entre los puntos, en zonas donde no existen valores concretos, por eso la necesidad de ajustar nuestros datos y nos permitan conocer una mejor distribución para todos los puntos en el espacio.

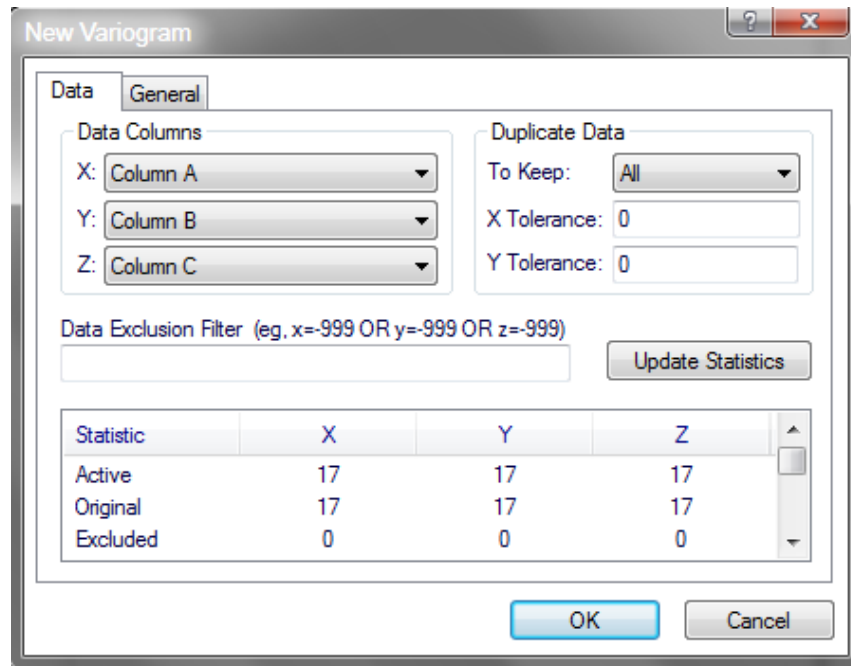
Para construcción del variograma en surfer utilizamos la herramienta Grid seguido de Variogram y elegimos New Variogram.



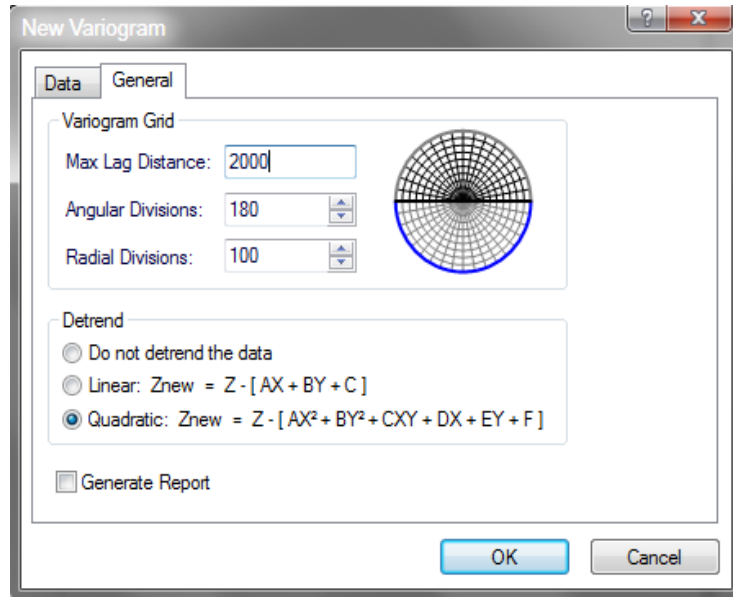
En la ventana que aparece seleccionamos el archivo donde tenemos nuestros datos los cuales deben contener las coordenadas X, Y, Z.



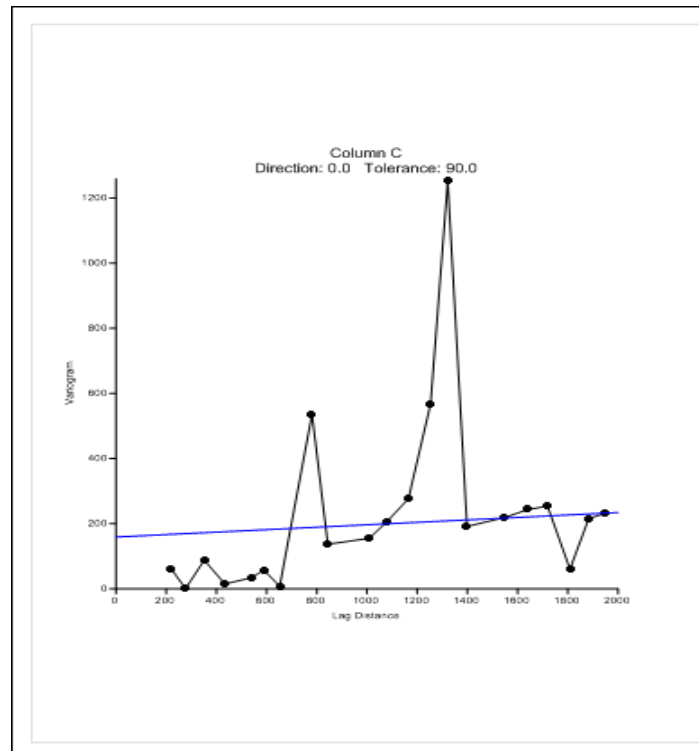
Al abrir aparece la ventana donde debemos indicar las variables X, Y, Z de nuestros datos.



Ahora nos vamos a la ventana general, donde podemos seleccionar el tipo de variograma y remover tendencias, y para esto utilizaremos la opción Quadratic.

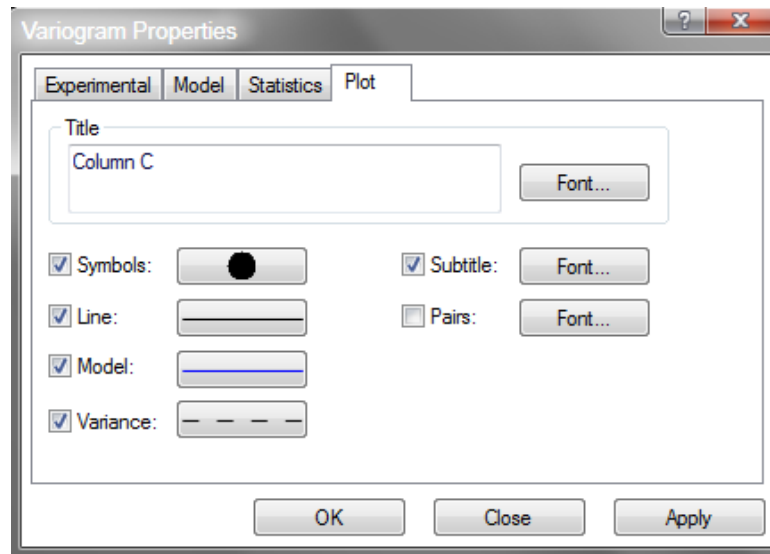


Obtenemos el variograma al cual se le deben cambiar algunas propiedades.

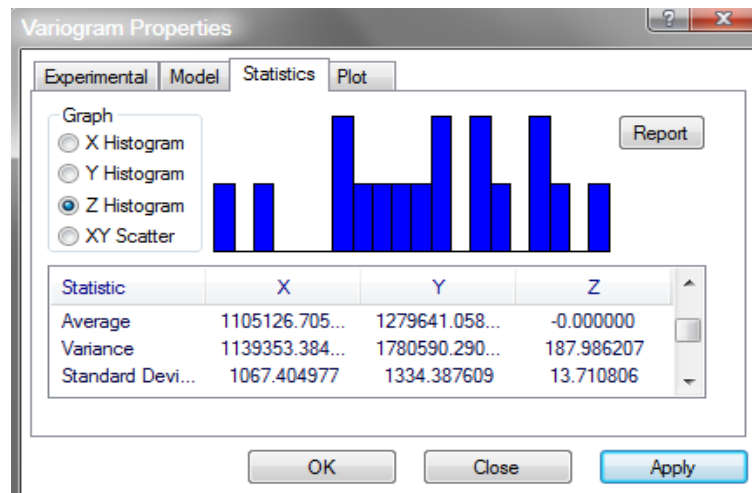


Cambiamos propiedades del variograma. Damos doble clic sobre el variograma y aparece una ventana de la siguiente forma. Y posteriormente cambiamos las propiedades del variograma para que se nos ajuste a uno mejor.

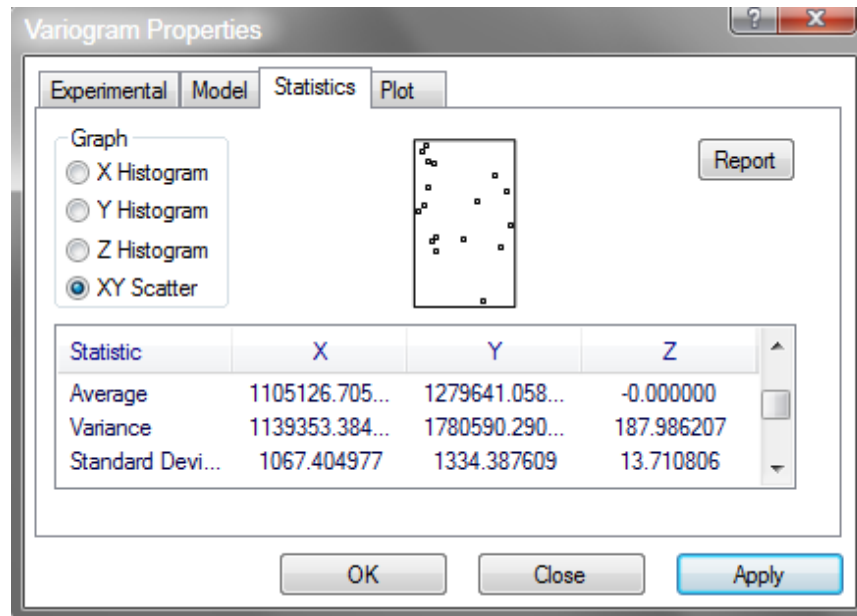
Pestaña Plot, damos Clic donde dice Variance.



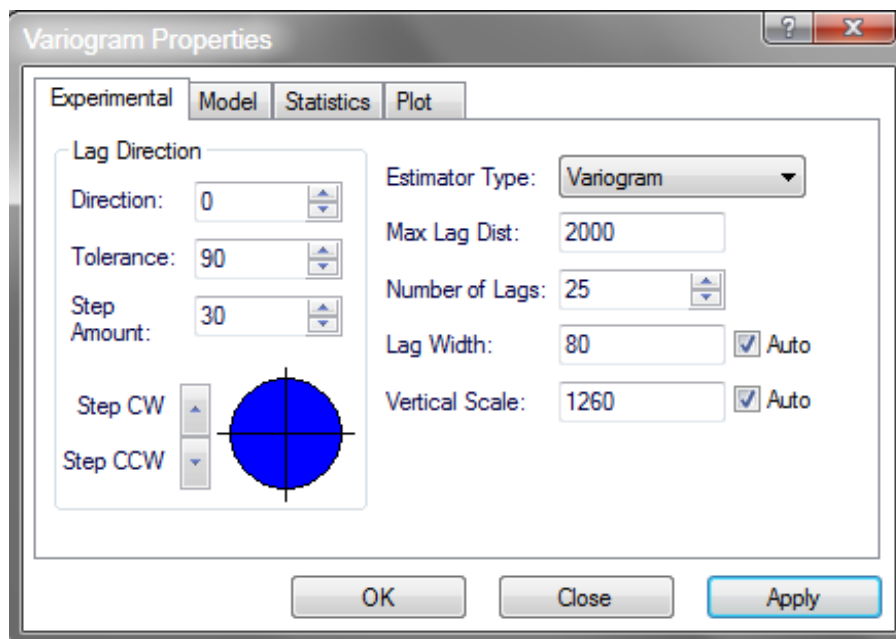
En la **pestaña Statistics** dentro de las opciones de Graph, seleccionamos Z Histogram para ver el histograma de los datos y en la parte inferior buscamos el valor de la varianza y lo anotamos para posteriormente introducirlo al modelado del variograma. En este caso varianza = 187.9862.



Si seleccionamos XY Scatter podemos ver cómo están distribuidos los datos.



En la pestaña experimental, esta ventana muestra los parámetros necesarios para el ajuste de un modelo teórico al semivariograma.



Dirección: Controla la dirección en la cual se va a construir el semivariograma experimental. La convención es que en el eje X positivo es la dirección 0° y a lo largo del eje "Y" positivo la dirección 90°. *En este caso será de 158°.*

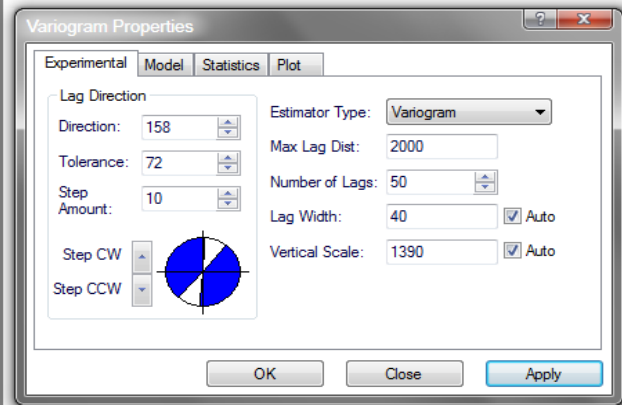
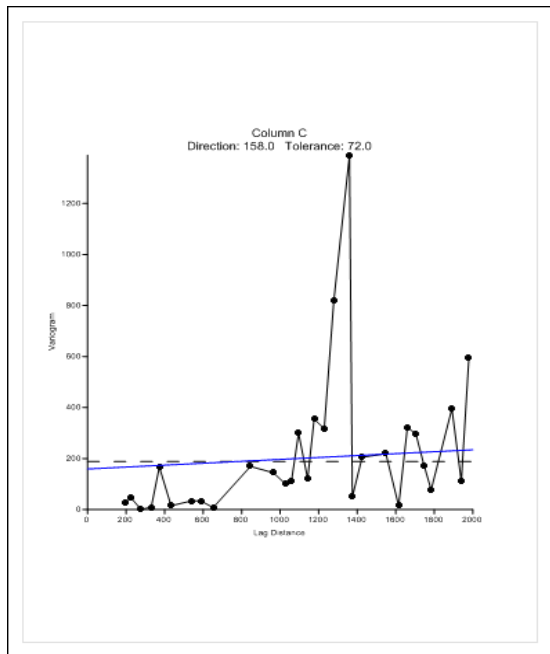
Tolerance: Especifica el tamaño del ángulo que tiene en cuenta el semivariograma experimental. Si el valor es 90, en el modelado se incluirán todos los dato, si es inferior tendrá en cuenta solo los datos en la dirección que se haya estipulado. *Siguiendo con el ejercicio colocamos 72°.*

Step Amount: Para la construcción del semivariograma y la evaluación de la isotropía, es necesario ver su comportamiento en varias direcciones. Con esta opción se determina el ángulo de rotación a partir de aquel semivariograma que esté construido. *Acá colocamos 10°.*

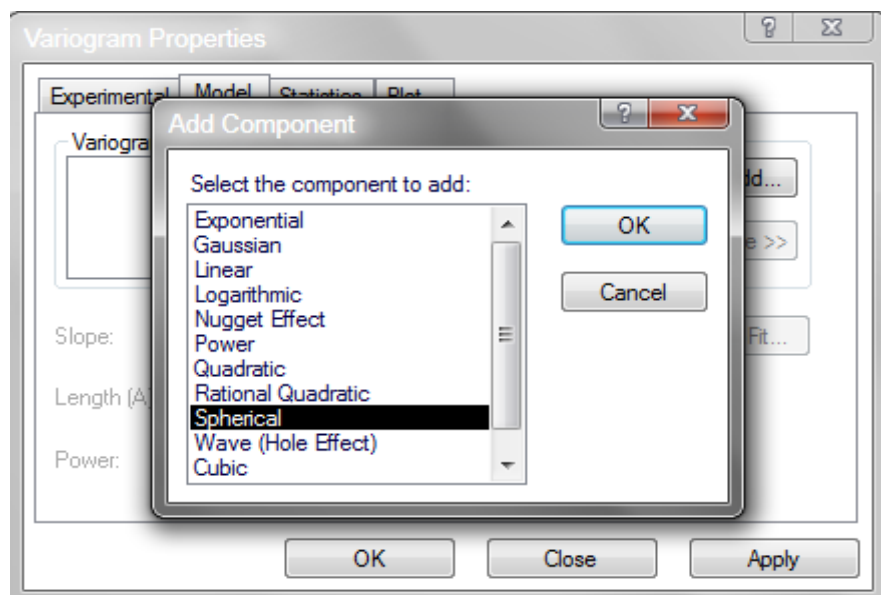
EstimatorType: Existen las opciones variograma, variograma estandarizado, autocovarianza, autocorrelación. Lo que se usa mas generalmente es el semivariograma. *Dejamos el valor por defecto.*

Max lagdistance: Permite especificar la máxima distancia en X a la cual se va a construir el semivariograma. *En nuestro caso colocamos 2000.*

Numberlags: Determina cuantos puntos serán incluidos en el semivariograma. Por defecto se tiene una cantidad de 25. *En este caso coloca 50.*

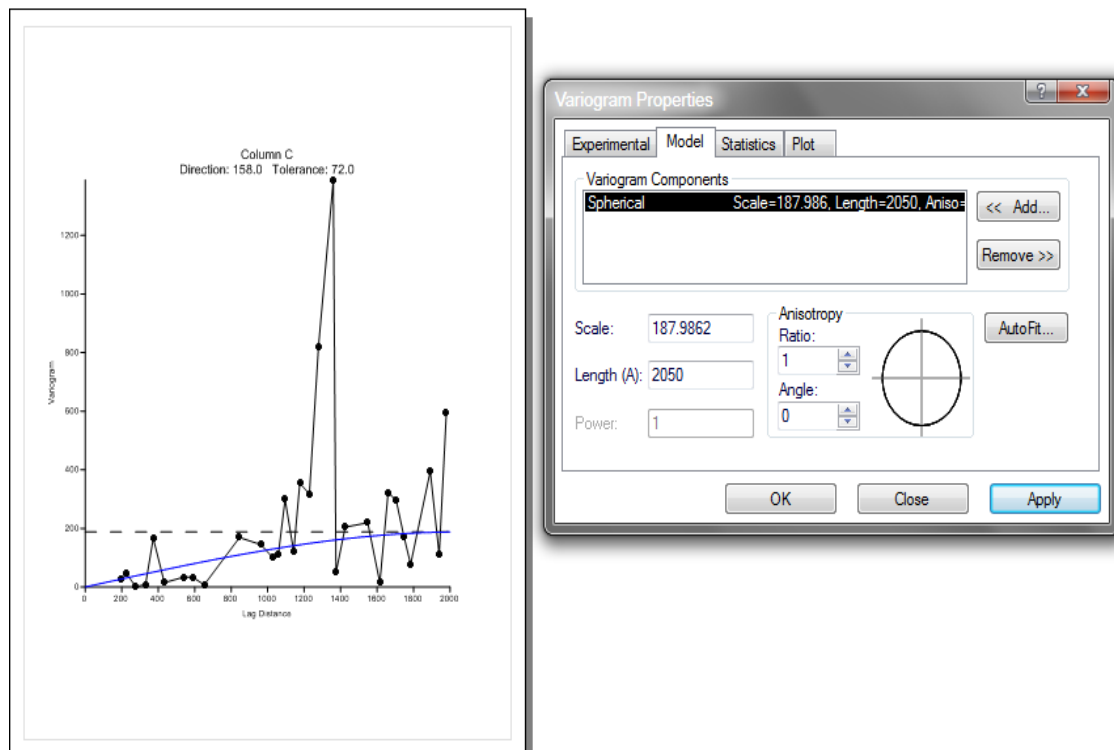


En la pestaña **Model** están todas las opciones de semivariograma teórico. En nuestro caso escogemos el variograma **Spherical (esférico o circular)** este es el modelo más utilizado. Su comportamiento es lineal para separaciones pequeñas cercanas al origen y tiende aplanarse conforme aumenta la distancia.



En **Scale** el valor a colocar es el correspondiente a la varianza de nuestros datos que para este caso es de 187.9862.

En **Length** corresponde al alcance o rango del variograma a modelar. El valor a colocar debe ser tal que el variograma debe pasar y cortar los primeros datos. En este caso colocamos 2050.



Y pulsamos OK para obtener nuestro variograma que se utilizara en el momento que vayamos a realizar la interpolación por el método de Kriging para la Capa de Finos.