

**DESARROLLO DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES  
DE LA CUENCA DE RIO SUCIO MUNICIPIO DE TONA**

Carlos Andrés Buenahora Ballesteros  
Henry Osorio Cuevas

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ciencias Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Bucaramanga  
2005

**DESARROLLO DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES  
DE LA CUENCA DE RIO SUCIO MUNICIPIO DE TONA**

Por:  
Carlos Andrés Buenahora Ballesteros  
Henry Osorio Cuevas

Trabajo dirigido de grado para obtener  
el título de ingeniero civil

Director:  
Jorge A. Guzmán Jaimes. I.C, M. Sc.

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ciencias Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Bucaramanga  
2005

## CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABLAS.....	v
LISTA DE FOTOGRAFÍAS.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	x
1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE).....	1
1.1 DEFINICIÓN DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	1
1.2 INTERPOLACIÓN O LLENADO DE ESPACIOS “GRIDDING”.....	5
1.2.1 La Distancia Inversa.....	5
1.2.2 Kriging ó Krigeaje.....	6
1.2.3 Radial Basis Function.....	8
1.3 ERRORES Y SU ANÁLISIS.....	10
1.3.1 Valoración del error medio en el DEM.....	13
2. ZONA DE ESTUDIO.....	14
2.1 SUB-ZONAS DE TRABAJO.....	15
2.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	17
2.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO.....	20
2.3.1 Información topográfica.....	21

2.3.2	Información GPS.....	21
3.	PROCESAMIENTO DEL DEM.....	24
3.1	CARTOGRAFÍA IGAC.....	24
3.2	AJUSTE DE LA INFORMACIÓN.....	25
3.3	RESULTADOS DEL MODELO.....	34
3.3.1	Modelamiento por zonas.....	34
3.3.2	Modelo digital de elevaciones de la cuenca.....	42
3.4	PARAMETRIZACIÓN Y SENSIBILIDAD.....	44
4.	PARÁMETROS MORFOLÓGICOS.....	49
4.1	ÁREA, RED DE DRENAJE, CURVA HIPSOMÉTRICA, MAPA DE PENDIENTES, SINUOSIDAD Y COMPACIDAD.....	49
	CONCLUSIONES.....	54
	BIBLIOGRAFÍA.....	56
	ANEXOS.....	58

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Estructura del modelo raster.....	3
Figura 1.2: Orientación y dirección de los ejes de la anisotropía.....	9
Figura 2.1: Localización de la cuenca Río Sucio.....	14
Figura 2.2: Zonas de trabajo durante la fase de campo.....	16
Figura 2.3: Poligonal correspondiente a la zona 3 (Pitones).....	18
Figura 2.4: Distribución y densidades de la información del DEM.....	20
Figura 3.2.1: Metodología para el ajuste de la cartografía correspondiente al área de campo. El fondo de color negro indica que no hay información.....	27
Figura 3.2.2: Modelo de las zonas trabajadas durante la fase de campo.....	28
Figura 3.2.3: Residuos producto de la información de campo y cartografía.....	29
Figura 3.2.4: (a) Neighborhood Square (b) Estructura del modelo D8, (c) Mascara empleada para el suavizado de la información.....	31
Figura 3.3.1: Modelo Zona I, parte de la divisoria sur de la cuenca.....	35
Figura 3.3.2: Modelo Zona II, La cueva.....	36
Figura 3.3.3: Modelo Zona III, Pitones.....	36
Figura 3.3.4: Modelo Zona IV, El Alto.....	37
Figura 3.3.5: Modelo Zona V, López Bajo.....	38
Figura 3.3.6: Modelo Zona VI, López Alto.....	38
Figura 3.3.7: Modelo Zona VII, El Progreso.....	39

Figura 3.3.8: Modelo Zona VIII, El Carbón.....	40
Figura 3.3.9: Modelo Zona IX, Armenia, Escuela, Bellavista.....	40
Figura 3.3.10: Modelo Zona X, La Casita.....	41
Figura 3.3.11: Modelo Zona XI, La Cruz, La Caiceda y Bélgica.....	41
Figura 3.4.1: Curva EMC vs Angulo para el análisis de anisotropía del método Radial Basis Function (Multiquadric).....	45
Figura 3.4.2: Curva EMC vs Factor de forma ( $R^2$ ) del método Radial Basis Function (Multiquadric).....	45
Figura 3.4.3: Modelo digital de elevaciones de la cuenca experimental de Río Sucio incorporando información cartográfica y de campo .....	47
Figura 4.1: Red de drenajes de la cuenca experimental Río Sucio extraída del DEM. ....	50
Figura 4.2: Curva hipsométrica y valor de la elevación media de la cuenca.....	51
Figura 4.3: Mapa de pendientes de la cuenca experimental Río Sucio.....	52

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Descripción de las zonas trabajadas durante la fase de campo.....	16
Tabla 2.2: Coordenadas antena base Medellín.....	22
Tabla 2.3: Información de la precisión de los mojones antes y después de la corrección diferencial.....	23
Tabla 3.2.1: EMC para los métodos de interpolación empleados en el modelo de la cartografía y de campo.....	25
Tabla 3.2.2: Rango de valores de z para las diferentes tonalidades dentro del residuo.....	28
Tabla 3.2.3: Estadísticos de los residuos producto de la información de campo y cartografía.....	30
Tabla 3.3.1: Resultados de la interpolación por los diferentes métodos.....	44
Tabla 3.4.1: Parámetros de anisotropía y Factor de forma y error medio cuadrático del modelo digital de elevaciones de la cuenca experimental de Río Sucio.....	46
Tabla 3.4.2: EMC para los residuos producto del proceso de validación con datos del GPS diferencial.....	47
Tabla 4.1: Clasificación de la cuenca de acuerdo con su tamaño.....	49
Tabla 4.2: Forma de la cuenca según el índice de compacidad.....	53

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Foto 2.1: Zona III, Pitones.....	17
Foto 2.2: Zona XII, Parte alta de la cuenca.....	19
Foto 2.3: Cierre de la cuenca.....	19
Foto 3.3.1: Foto zona I parte de la y divisoria sur de la cuenca.....	35
Foto 3.3.2: Foto zona II, La cueva.....	36
Foto 3.3.3: Foto zona III, Pitones.....	36
Foto 3.3.4: Foto zona IV, El Alto.....	37
Foto 3.3.5: Foto zona V, López Bajo.....	38
Foto 3.3.6: Foto zona VI, López Alto.....	38
Foto 3.3.7: Foto zona VII, El Progreso.....	39
Foto 3.3.8: Foto zona VIII, El Carbón.....	40
Foto 3.3.9: Foto zona IX, Armenia, La Escuela, Bellavista.....	40
Foto 3.3.10: Foto zona X, La Casita.....	41
Foto 3.3.11: Foto zona XI, La Cruz, La Caiceda y Bélgica.....	41

## AGRADECIMIENTOS

A Dios Padre: amor, inspiración y vida.

A nuestros padres por su apoyo y esfuerzo a lo largo de la carrera.

Al Ingeniero Jorge Alberto Guzmán Jaimes por habernos compartido sus conocimientos y por su orientación y dedicación durante el proyecto.

Al grupo de Investigación en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH), por su apoyo técnico y en especial al Ingeniero Edward Niño por su valiosa asesoría durante el proyecto.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga por su colaboración durante el trabajo de campo y al Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” por la información suministrada en este proyecto.

A los habitantes de la vereda El Tembladal, especialmente a don Jairo Lesmes.

## RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA CUENCA DE RIO SUCIO MUNICIPIO DE TONA.\*

AUTORES: BUENAHORA BALLESTEROS CARLOS ANDRES, OSORIO CUEVAS HENRY\*\*

PALABRAS CLAVE: Cuenca del Río Sucio, Cuenca Superior del Río Lebrija, Modelo Digital de Elevaciones, Modelos Raster.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de este proyecto fue elaborar el Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca experimental de Río Sucio, a partir de información cartográfica disponible a escala 1: 10000 con curvas de nivel cada 50 metros e información obtenida en campo a partir de levantamientos topográficos con poligonales abiertas y datos obtenidos por GPS Diferencial. Debido a los cambios en la superficie a través del tiempo y el error generado en el proceso de restitución de las fotografías aéreas, fue necesario desarrollar un proceso de ajuste basado en la metodología del procesamiento digital de imágenes que permitiera mejorar y reducir el nivel de ruido en la imagen una vez incorporadas la información proveniente de dos fuentes de información diferente.

El DEM se generó a un tamaño de celda de 30 x 30 metros usando el interpolador Radial Basis Function, Multiquadric con un RMSE de 1.592 mts. El DEM 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 y definir mejor las áreas que presentaban deficiencia de información dentro de la zona en estudio.

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil  
Director: Jorge Alberto Guzmán J. (I.C, M. Sc.)

## ABSTRACT

TITLE: I DEVELOP OF THE DIGITAL MODEL OF ELEVATIONS OF THE BASIN OF LAUGHS DIRTY MUNICIPALITY OF TONA.

AUTHOR: BUENAHORA BALLESTEROS CARLOS ANDRES, OSORIO CUEVAS HENRY

KEYWORDS: Cuenca del Rio Sucio, Cuenca Superior del Rio Lebrija, Digital Elevation Model, Raster Models.

### DESCRIPTION:

The main goal of the Project was to develop the Digital Elevation Model - DEM of the "Cuenca Experimental del Rio Sucio" from cartographic information 1:100000 with contour lines 50 mt each and data taken directly at the field through topography and GPS Differential techniques. Due to the changes on the surface of the catchment and the systematic error in the photogrametry processes it was necessary to use an imaging technique to reduce the noise result of the two kinds of data when the new data (taken on field) was incorporated.

To generate the DEM with a cell size of 30x30 mt a Multiquadric Radial Basis function was used. An RMSE equal to 1.592 mt was obtained. The DEM generated represented the morphology of the catchment better compared to the previous cartographic map. With the new field data the RMSE was reduced and the definition of some areas improved significantly.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos digitales de elevaciones (Digital Elevation Model, DEM), “describen la altimetría de una zona mediante un conjunto de cotas” (Felicísimo, 1994) donde la información ó los datos se encuentran estructurados por modelos vectoriales ó modelos raster. En los DEM es necesario conocer el manejo y la importancia que cada estructura del modelo (Raster, Vectorial) le impone a la información de forma que permita encontrar la representación más exacta posible del DEM respecto a la superficie. Por esta razón se dedicó el capítulo 1 de este proyecto para definir en forma completa los modelos digitales de elevaciones, su estructura, los diferentes métodos de interpolación y los errores que pueden surgir en la generación del modelo. También se introduce un análisis de estos errores con el fin de entender el resultado del modelo final.

La información a la cual se tiene mayor acceso es la cartográfica, pero es importante tener claro que está información es producto de un proceso de restitución de hace varios años, la cual trae consigo un error generado por dicha restitución y otro debido a los cambios en la morfología a través del tiempo. Con el ánimo de disminuir estos errores y para conseguir una representación más exacta de la realidad, fue necesario introducir datos (X, Y, Z) mediante fuentes primarias a través métodos directos (Levantamiento topográfico, GPS). Para la adquisición de esta información fue necesario analizar los sitios de baja calidad de información que impedían obtener una representación real del terreno en el modelo. Las fuentes, la metodología utilizada y el procesamiento de dicha información se describen con detalle en el capítulo 2.

Como se mencionó anteriormente el cambio en la morfología del terreno es frecuente a través del tiempo. Teniendo en cuenta este parámetro es necesario para el procesamiento del DEM encontrar la mejor forma de unir la información existente (Cartografía IGAC) y los datos extraídos por medio de las fuentes primarias, sin perder información valiosa y sin introducir errores que alteren la calidad del modelo. En el capítulo tres se describe la metodología de ajuste de la información utilizada en este proyecto, basada en la teoría del procesamiento digital de imágenes (Algebra de Mikonsky), así como la razón del modelamiento por zonas elaboradas con la información primaria y los resultados del modelo final a partir del mejor método de interpolación.

Finalmente en el capítulo cuatro se presentan los parámetros geomorfológicos de la cuenca experimental de Río Sucio, elaborados a partir del modelo digital de elevaciones construido en el transcurso de este proyecto, como complemento de la información de la cuenca.

La elaboración del modelo digital de elevaciones (Digital Elevation Model, DEM) de la cuenca experimental de Río Sucio esta motivado por la necesidad de tener una mejor referencia cartográfica para los distintos estudios que se realizan actualmente en la cuenca de Río Sucio y por ser una parte importante en los modelos hidrológicos proyectados para la cuenca.

## 1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM)

En este capítulo se da la definición de modelo digital de elevaciones, los métodos de interpolación más utilizados para la generación de estos así como los posibles errores y su respectivo análisis. También se presenta una corta descripción de los parámetros esenciales usados este proyecto.

### 1.1 DEFINICIÓN DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

“Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”. (Felicísimo, 1994).

Dentro del DEM se aplica una función que relaciona la variable 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 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, parte de la información primaria y/o secundaria que es distribuida irregularmente para generar nuevos puntos que 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 DEM siempre se vera 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 para darles el mejor tratamiento a las irregularidades como formas cóncavas y convexas existentes dentro del modelo para lograr su validación.

Para la estructuración de los datos del DEM se cuenta básicamente con dos modelos de datos: Los modelos de datos vectoriales que son objetos geoméricamente definidos por las coordenadas de sus nodos y los modelos de datos Raster “los cuales son la forma más común de representar la variación de una superficie continua sobre un área determinada, para el caso en el cual la variable representada sea la altura del terreno, el modelo toma el nombre de modelo digital de elevaciones.

Los elementos básicos de la estructura raster son áreas rectangulares organizadas en forma matricial, que forman una partición regular del área de interés. Cada una de las áreas recibe el nombre de celda, y la agregación de las celdas conforma lo que se conoce como la malla regular (grid) del modelo. En la figura 1.1 se muestra el esquema de un modelo raster con todos sus componentes. La malla se encuentra en el sistema de coordenadas definido por los ejes  $X$  y  $Y$ , y las respectivas resoluciones son  $resX$  y  $resY$ , las cuales son la longitud ó coordenadas planas de los lados de los píxeles. El origen de la malla usualmente se define en la esquina inferior izquierda del modelo, y sus coordenadas  $X$  y  $Y$  se denotan con  $MinX$  y  $MinY$  respectivamente. Un píxel se identifica por sus coordenadas matriciales en la malla, esto es, por la fila y la columna a la cual pertenecen. Las filas son paralelas al eje  $X$  y usualmente se enumeran como  $i = 0, 1, 2, \dots$  siguiendo la dirección del eje  $Y$ . Las columnas, por su parte, son paralelas al eje  $Y$  y se enumeran como  $j = 0, 1, 2, \dots$  siguiendo la dirección del eje  $X$ . De esta manera, un píxel se identifica por el par  $(i, j)$ . Las coordenadas de un píxel se pueden especificar con las coordenadas de cualquiera de sus esquinas o las de su centroide. De esta manera, las coordenadas del píxel  $(i, j)$  están dadas por  $X(i, j) = MinX + (j \times resX)$  en la dirección  $X$ , y  $Y(i, j) = MinY + (i \times resY)$  en la dirección  $Y$ . Para representar la superficie formada por la variable de interés, a cada celda del DEM se le asigna un único valor. Este valor usualmente representa el valor medio de la variable, tomado sobre los puntos que están contenidos en la celda.

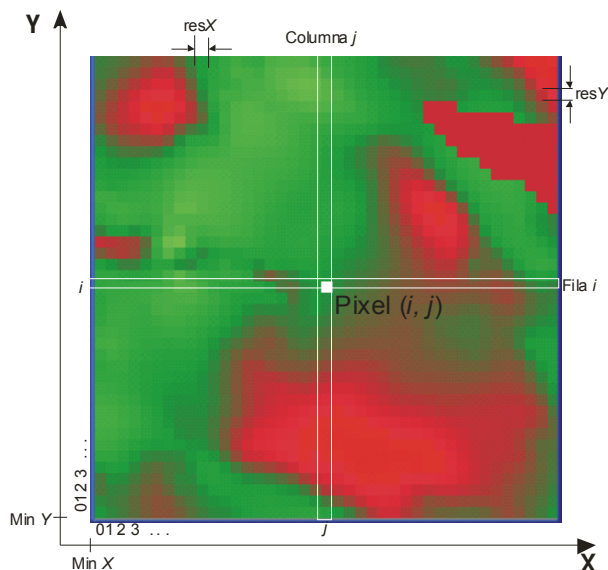


Figura 1.1: Estructura del modelo raster.

El modelo de datos raster presenta algunas ventajas y desventajas que se requieren conocer, para mejor entendimiento del modelo que será construido a lo largo de este proyecto, estas son presentadas a continuación:

- **Ventajas**

La mayor ventaja del modelo raster es su simplicidad, tanto en el almacenamiento de la información como en su manipulación. Por lo anterior el modelo raster tiene las siguientes características favorables respecto a las demás estructuras de DEM:

Debido a la posición implícita de las celdas, cada uno de ellas se puede almacenar usando una única entrada igual al valor de su elevación. Por otra parte, la estructura de malla ofrece una forma muy natural de dividir una superficie y coincide con las estructuras matemáticas más simples que se usan para modelar la mayoría de los fenómenos físicos. De esta manera, la implementación de algoritmos de modelación y el uso de las técnicas del cálculo es mucho más

directo que cuando se usan las estructuras de redes irregulares de triángulos (TIN, Triangulated Irregular Network).

Como el almacenamiento de la información se puede hacer respetando las posiciones relativas de las celdas, las búsquedas de información, los cálculos locales y muchos otros análisis espaciales se pueden hacer a nivel de la base de datos.

El modelo raster puede ser usado para la representación geométrica de estructuras vectoriales, tales como puntos, líneas y polígonos: un punto puede representarse como una celda, una línea por un conjunto de celdas contiguas de ancho igual a una celda y con el mismo valor de elevación, y un polígono como un conjunto de celdas con el mismo valor de elevación. Esta técnica es el principio de la rasterización. La equivalencia entre las estructuras raster y vectorial es una gran ventaja para representar la red de drenaje asociada a un DEM, usando su misma estructura de malla.

- Desventajas

Desde su aparición, han sido notadas algunas evidentes desventajas que el modelo raster presenta entre ellas están:

El modelo raster no se ajusta localmente a la variabilidad de la superficie que está representando. La variable que controla el nivel de detalle de la representación es el tamaño de la grilla del modelo, la cual es una variable global. Esto, por ejemplo, es especialmente problemático en los DEM que tienen zonas de relieve abrupto, junto con zonas planas. En este caso se pueden presentar una de dos situaciones: el modelo no puede dar información detallada para las zonas abruptas, o las zonas planas quedan sobremuestreadas aumentando los volúmenes de información.

Debido a que un modelo raster solo toma un número finito de valores, se requieren muchas celdas para que se pueda aceptar que el modelo representa de manera continua una variable continua”. (Tomado de la tesis de Ramírez Osorio, 2002)

## 1.2 INTERPOLACIÓN O LLENADO DE ESPACIOS “GRIDDING”.

“La construcción de un DEM entendido como matriz regular es básicamente un problema de interpolación: se definen las localizaciones del punto problema (Intersección de filas y columnas) y se estima la altitud de cada uno de ellos en función de los datos del entorno existentes en el modelo digital. Los algoritmos de interpolación deben tener en cuenta así mismo las diversas estructuras auxiliares para introducir variantes en los mecanismos de calculo.” (Felicísimo, 1994).

La interpolación se realiza en función de la distancia y consiste en darle valores de importancia a los puntos que conforman el entorno al punto problema, asignándole un valor mayor a aquellos que se encuentran cerca y un valor pequeño o nulo a aquellos que se encuentran a gran distancia. Los métodos de interpolación pueden ser: Inverse Distance to a Power, Kriging, Radial Basis Function, Minimum Curvature, Nearest Neighbor, Polynomial Regression, Moving Average, entre otros que tienen un análisis similar en el sentido que se basan en la cercanía de los puntos.

1.2.1 Método de la Distancia Inversa. El método de la distancia inversa calcula la distancia que existe entre cada dato y el punto problema para establecer una relación de proporcionalidad entre el peso y la distancia, donde un parámetro a definir es el encargado de controlar el peso en función de la distancia; siempre se ve la necesidad de estudiar el error producido al aplicar estos métodos, debidos en general al desigual reparto espacial de los puntos entre las líneas y a lo largo de

ellas que se ven reflejados en las llamadas terrazas producto de la ausencia de datos entre curvas de nivel sucesivas.

Las ecuaciones 1 y 2 son utilizadas por el método de la distancia inversa:

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (1)$$

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2} \quad (2)$$

Donde:

$h_{ij}$  = Es la distancia o separación efectiva entre el nodo “j” de la grilla y el punto vecino “i”.

$\hat{Z}_j$  = Es el valor interpolado para la grilla del nodo “j”.

$Z_i$  = Son los puntos vecinos

$d_{ij}$  = Es la distancia entre el nodo “j” de la grilla y el punto vecino “i”.

$\beta$  = Es el peso (*parámetro Power*)

$\delta$  = Es el parámetro de suavizado.

1.2.2 Kriging ó Krigeaje. “El Kriging ó Krigeaje consiste en efectuar una ponderación, es decir, atribuir un peso a cada valor observado, los pesos son calculados de manera que minimice la varianza de estimación resultante teniendo en cuenta las características geométricas del problema” (Matheron, 1970). “Al minimizar la varianza de estimación o error de estimación se garantiza el uso óptimo de la información disponible” (Zhang, 1996).

El Kriging ó Krigeaje al igual que el Radial Basis Function asume que la altitud puede definirse como una variable generalizada suponiendo que la variación espacial puede ser explicada al menos parcialmente mediante funciones de correlación espacial. “Un estimativo estadístico que tiene el Kriging es la semivarianza que estudia la dependencia de los datos debido a que en la

construcción de los DEM es muy razonable suponer 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. Al igual puede suponerse que la influencia de los puntos más lejanos es menor que la de los más próximos, esta dependencia también es analizada dentro de la semivarianza.

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; es por esto que se requiere del semivariograma para estudiar la relación entre la semivarianza y la distancia. Para finalmente dar el peso correspondiente a la distancia entre los datos, estos pesos se estiman a partir de los valores de los semivariogramas mediante métodos de cálculo matricial. El semivariograma también 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.

Un parámetro muy importante para la validez del DEM es que el semivariograma sea de validez general para toda el área del DEM lo cual se traduce en que la interdependencia de los datos sea función exclusiva de la distancia entre ellos y no de su posición espacial absoluta. Esto se debe a que el Kriging es muy óptimo como estimativo desde el punto de vista estadístico pero presenta algunos problemas a la hora ser utilizado para la construcción de DEM, su principal problema es el expuesto anteriormente” (Felicísimo, 1994) y es por esto la necesidad de analizar otros métodos como la función base radial.

Las variables en las que se indica el uso del Kriging son aquellas donde su distribución tiene una fuerte componente estocástica, ya que los valores puntuales pueden ser representados satisfactoriamente cumpliendo con los parámetros anteriormente mencionados.

1.2.3 Radial Basis Function. “El método Radial basis function tiene diversidad de métodos de interpolación de datos para producir superficies suavizadas. Todos los métodos del Radial basis function son exactos interpoladores, entre los cuales se encuentran los siguientes métodos expresados por las ecuaciones 3 a la 7:

Inverse Multiquadric:

$$B(h) = \frac{1}{\sqrt{h^2 + R^2}} \quad (3)$$

Multilog:

$$B(h) = \text{Log}(h^2 + R^2) \quad (4)$$

Multiquadratic:

$$B(h) = \sqrt{h^2 + R^2} \quad (5)$$

Natural Cubic Spline:

$$B(h) = (h^2 + R^2)^{3/2} \quad (6)$$

Thin Plate Spline:

$$B(h) = (h^2 + R^2) \text{Log}(h^2 + R^2) \quad (7)$$

Donde  $h$  es la distancia relativa del punto al nodo y  $R^2$  es el factor de suavizado asignado por el usuario. Como una aproximación del factor de suavizado se puede calcular mediante la expresión (8):

$$R^2 = \frac{(\text{Longitud de la diagonal de los datos})^2}{25 * \text{Número de datos}} \quad (8)$$

Sin embargo no hay una metodología universal aceptada. Los valores altos de  $R^2$  frecuentemente son utilizados para sitios como cimas de montañas.

Una opción avanzada que presenta el Radial basis function es la Anisotropía que tiene en cuenta la orientación de la información para asignar pesos al momento de realizar la interpolación, ya que el comportamiento de la variable regionalizada puede variar según en la dirección que se analice. Cuando el semivariograma calculado en diferentes direcciones (Norte–Sur, Este–Oeste, y en direcciones intermedias con tolerancias de  $22.5^\circ$ ), muestra similar comportamiento, se dice que el fenómeno es isotrópico, cuando muestran diferentes comportamientos es Anisotrópico.

En el caso más general, la Anisotropía puede ser representada como una elipse; la elipse es especificada por las longitudes de dos ejes ortogonales y por la orientación de un ángulo, las longitudes de los ejes son llamados radio 1 y radio 2. La orientación del ángulo esta definido en el sentido contrario a las manecillas del reloj entre el eje positivo x y el radio 1 (Figura 1.2), subsecuentemente la elipse queda definida de esta manera, una elipse puede estar definida con más de un arreglo o parámetro, así:

Radio 1 = 2, Radio 2 = 1, Angulo = 0

La elipse anterior también se puede representar de esta manera:

Radio 1 = 1, Radio 2 = 2, Angulo = 90

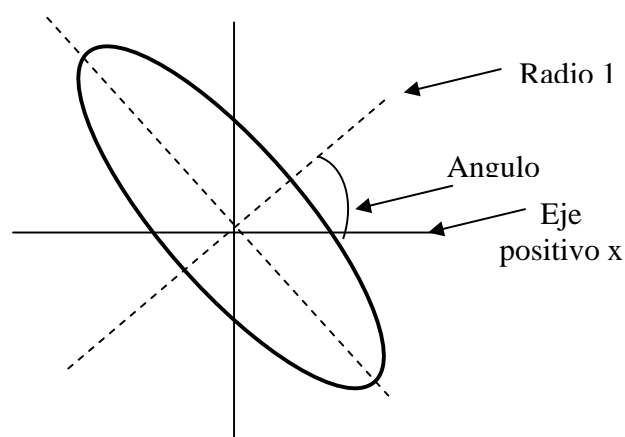


Figura 1.2: Orientación y dirección de los ejes de la anisotropía.

Para la mayoría de los métodos de interpolación son más importantes las longitudes relativas de los ejes que la longitud real de los mismos. Las longitudes relativas se expresan como una proporción en el grupo de la anisotropía, la proporción esta definida como radio 1 dividido por radio 2. La proporción de la elipse descrita anteriormente sería de 2 a 0.5, la proporción de 2 significa que el radio 1 es dos veces mayor que el radio 2, y el ángulo esta definido en el sentido contrario a las manecillas del reloj entre el eje positivo x y el radio” (Guía de usuario Surfer,2002).

### 1.3 ERRORES Y SU ANÁLISIS

Los DEM generados a partir de planos cartográficos poseen información tomada a partir de fotografías aéreas realizadas hace mucho tiempo y que no han sido actualizadas debido al alto costo y a la complejidad del trabajo que representa. Esta situación necesita atención al momento de realizar el modelo debido a cambios constantes del relieve por ciertos procesos 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.

Dadas estas circunstancias y otras similares, no es extraño observar la ausencia de cualquier mención a la exactitud a las bases cartográficas digitales. Tampoco es frecuente cuestionar los resultados de un análisis, ni fácil comprobar la bondad de unos resultados cuando no se presentan estadísticos relativos al error de los datos y operaciones.” (Felicísimo, 1994).

Este análisis de los resultados y estadísticos relativos al error no serán eludidos en este trabajo, pues tendrá una base estadística que dará una estimación de la calidad de los resultados.

La calidad del DEM depende de la cuantificación del error debido a la imprecisión de la información que deberá ser controlada para mayor confiabilidad de los resultados.

“El modelo raster se ve afectado por el error atributivo que supone una asignación imprecisa de la altitud o de la curva de nivel. El origen de este error suele estar en las múltiples operaciones geométricas implicadas en la construcción del modelo. Este error es de naturaleza estadística y global.

Los DEM pueden ser construidos mediante la digitalización de mapas preexistentes, información resultante de la restitución fotogramétrica, imágenes satelitales. Permiten construir modelos con Errores Cuadráticos Medios (ECM) variables en función del relieve y de los métodos utilizados. La magnitud del error limita sus aplicaciones en grandes escalas pero pueden ser razonables si se generan modelos matriciales donde el ECM es aproximadamente el 10% del tamaño de la celda ó Grid”. (Felicísimo, 1994).

Debido a las imprecisiones de los datos originales y en los múltiples procesos de generalización, interpolación, etc. que sufre el DEM durante su construcción se generan los pits o sumideros los cuales son producidos debido a errores de subestimación en la cota de la celda afectada  $Z(x)$ . Para la corrección de los pits modificamos la cota de la celda afectada igualándola al mínimo valor de  $z$  de las celdas adyacentes como indica la ecuación 9. Otra forma como corregimos los pits fue tomando el valor promedio de las celdas contiguas y reemplazándolo en la celda afectada como lo indica la ecuación 10; es necesario tener en cuenta que no todos los pits son producto de la interpolación sino que pueden formar parte del terreno, como por ejemplo un lago, los cuales no harán parte de la corrección.

$$Z(x) = Z_{corr} = \underset{i=1,\dots,8}{\text{Min}}(Z(x_i)) \quad (9)$$

$$Z(x) = Z_{corr} = \text{Prom}_{i=1, \dots, 8}(Z(x_i)) \quad (10)$$

Otro error producido es el generado por la digitalización manual de mapas siendo este el método más usado para incorporar información topográfica debido a que la digitalización automática es compleja. Los errores producidos en la digitalización manual son generalmente de dos categorías: por causas externas relacionadas generalmente por la deformación de los documentos y el mal estado de los mapas antiguos o por su mala calidad; el otro error es debido a causas operacionales que hacen referencia a los procesos de digitalización y manipulación posterior de los datos. De este se derivan otros errores tales como: el error topológico porque el operador sigue una línea equivocada debido a una mala interpretación, otro error es el estocástico generado por la imprecisión en la colocación del cursor al seguir una línea, por ultimo se encuentra el error de generalización debido a la simplificación de las curvas transformadas a polilíneas de tramos rectos.

Los errores producidos durante el levantamiento topográfico también deben ser tenidos en cuenta, los hay de varios tipos y los podemos definir de la siguiente manera:

1. Errores accidentales
  - 1.1 Error instrumental: imperfección en la fabricación o un mal ajuste del instrumento.
  - 1.2 Error personal: leer mal los datos en el instrumento.
  - 1.3 Error natural: en los cuales pueden influir, temperatura, humedad, viento, etc.
2. Errores sistemáticos: error debido a una causa permanente y conocida o desconocida, entre ellos están:
  - 2.1 Error por conexión instrumental deficiente.
  - 2.2 Error en la graduación defectuosa de la burbuja de aire del prisma.

- 2.3 Errores accidentales como: pequeñas inexactitudes fortuitas.
- 2.4 Error por hundimiento o levantamiento del trípode.
- 2.5 Error por no centrar bien la burbuja de aire.
- 2.6 Error por mala anotación en el registro.
- 2.7 Error producido por las condiciones climáticas, etc.

1.3.1 Valoración del error medio en el DEM. Existen muchos indicadores para la estimación del error en la construcción del DEM, entre los más nombrados tenemos el error medio (*EM*) aunque este no es una medida válida de la calidad del DEM, otro indicador es el error medio cuadrático (*EMC*) que fue utilizado en este proyecto y se calcula mediante la expresión (11), que permite una evaluación objetiva de la calidad del DEM generado.

$$EMC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{entrada} - Z_{Generado})^2} \quad (11)$$

## 2. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca experimental de Río Sucio se encuentra localizada en el municipio de Tona (Santander) (Figura 2.1), a 7° 12' Latitud Norte y 72° 59' Longitud Oeste, entre los 1900 y 3500 m.s.n.m. Según el IGAC se encuentra ubicada en las planchas cartográficas 110-III-C-1 y 110-III-C-2 entre las coordenadas 1'286.000 y 1'290.000 Norte y 1'123.000 y 1'129.000 Este, tiene un área aproximada de 10 Km<sup>2</sup> y una pendiente media del 50%.

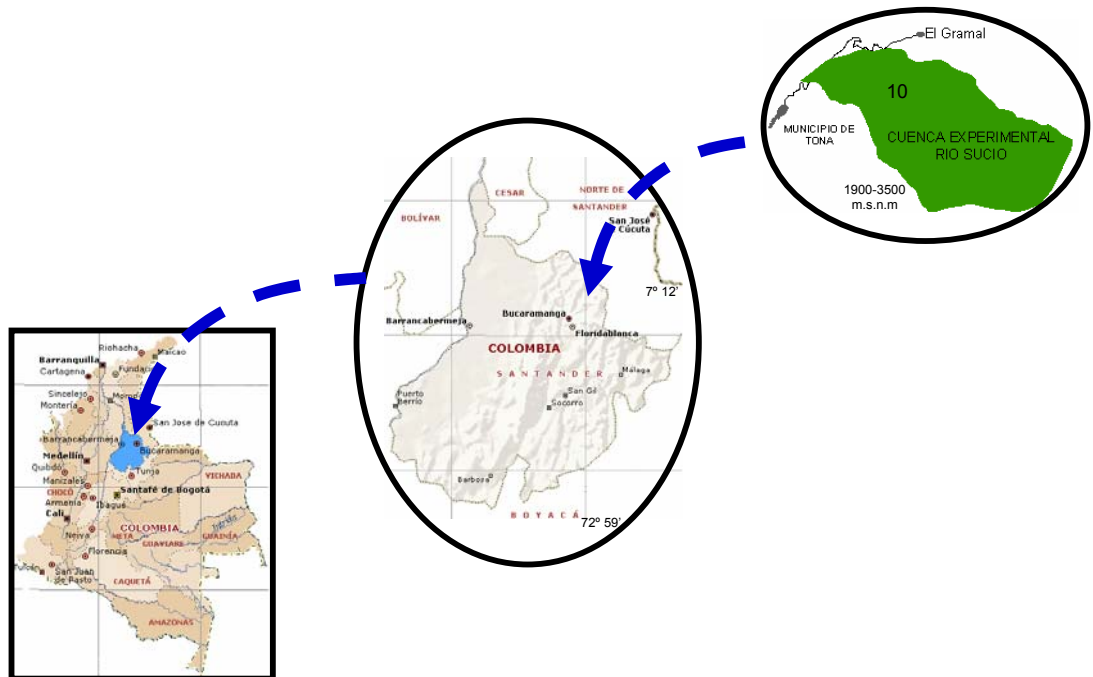


Figura 2.1: Localización de la cuenca Río Sucio

El tipo de terreno es muy variado, comprendido por escarpes, zonas onduladas y planas; el uso del suelo en su mayoría es utilizado para la ganadería y cultivos de papa, arveja, cebolla y zanahoria.

Como la cuenca en su forma y uso es muy variada fue necesario dividir la zona en sub-zonas de trabajo de tal manera que fuera posible realizar los levantamientos topográficos, a efecto de obtener información directa que permitiera mejorar la calidad del DEM, motivo por el cual se le dedicara la siguiente sección.

## 2.1 SUB-ZONAS DE TRABAJO

Como primera medida es necesario identificar las zonas de escasa información y que generan problemas a la hora de la construcción del modelo. Para esto fue necesario un reconocimiento de la cuenca por medio de una exploración en campo para poder confrontarla con un modelo inicial generado a partir de la cartografía existente de la zona, que se encuentran a escala 1:10000 y con curvas de nivel cada 50 metros. De esta confrontación surgieron las deficiencias de varias zonas, entre ellas se encuentran las zonas llanas y algunas de montaña. La Información y distribución de las zonas elegidas se pueden apreciar en la tabla 2.1 y la figura 2.2 respectivamente, allí se muestran trece zonas de la cuales las primeras once se trabajaron con Estación total electrónica, debido a que en estas regiones es posible realizar este tipo de levantamiento por la forma de su relieve. El levantamiento de las zonas restantes fue realizado con GPS diferencial siendo la dificultad de acceso, la presencia de bosques y su relieve escarpado el principal impedimento para realizarlo con Estación. (Para tener una mejor visualización de la forma del relieve de la cuenca, en el *anexo B* se muestran trece fotografías que cubren gran parte del área de la cuenca). El tiempo empleado en esta etapa fue de 45 días a partir del 14 de Agosto del 2004.

Tabla 2.1: Descripción de las zonas trabajadas durante la fase de campo.

ZONA	NOMBRE	DATOS	AREA	EQUIPO
I	EL CHORRERON	41	14554	E.T.E.*
II	LA CUEVA	294	87272	E.T.E.*
III	PITONES	242	166522	E.T.E.*
IV	EL ALTO	263	247937	E.T.E.*
V	LOPEZ BAJO	118	93596	E.T.E.*
VI	LOPEZ	297	162151	E.T.E.*
VII	EL PROGRESO	325	127127	E.T.E.*
VIII	EL CARBON	598	316450	E.T.E.*
IX	ARMENIA, LA ESCUELA Y BELLAVISTA	1145	655723	E.T.E.*
X	LA CASITA	1115	417672	E.T.E.*
XI	BELGICA Y LA CAICEDA	767	226881	E.T.E.*
XII	PARTE ALTA DE LA CUENCA	1803	670427	Rover
XIII	PARTE BAJA DE LA CUENCA		352768	Rover
TOTAL		7008	3539080	

\* E.T.E.: Estación Total Electrónica

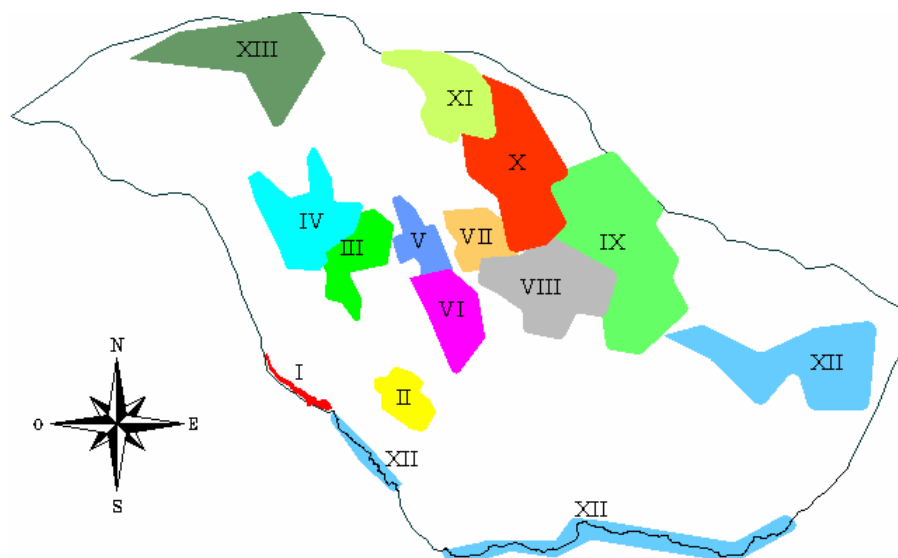


Figura 2.2: Zonas de trabajo durante la fase de campo

La selección de estas zonas se hizo de acuerdo a la metodología de trabajo a seguir durante esta etapa, así como por la movilidad del equipo y el avance del proyecto, también con el fin de cubrir la mayor cantidad de área posible a trabajar que permitiera complementar la información existente que presentaba mayor deficiencia.

## 2.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Para realizar el levantamiento topográfico de las zonas ya identificadas fue necesario definir el tipo de levantamiento de acuerdo con la precisión necesaria, Facilidad de acceso y tecnología disponible para la generación del modelo. Bajo estas condiciones se optó por realizar levantamientos de radiación con poligonales abiertas usando una estación total electrónica GTS-200 de TOPCON con una precisión de 5 mm. en distancia y de diez segundos en ángulo, amarradas mediante la materialización de mojones en concreto que luego serían referenciados con GPS diferencial de precisión submétrica (TRIMBLE- GEO-XT).

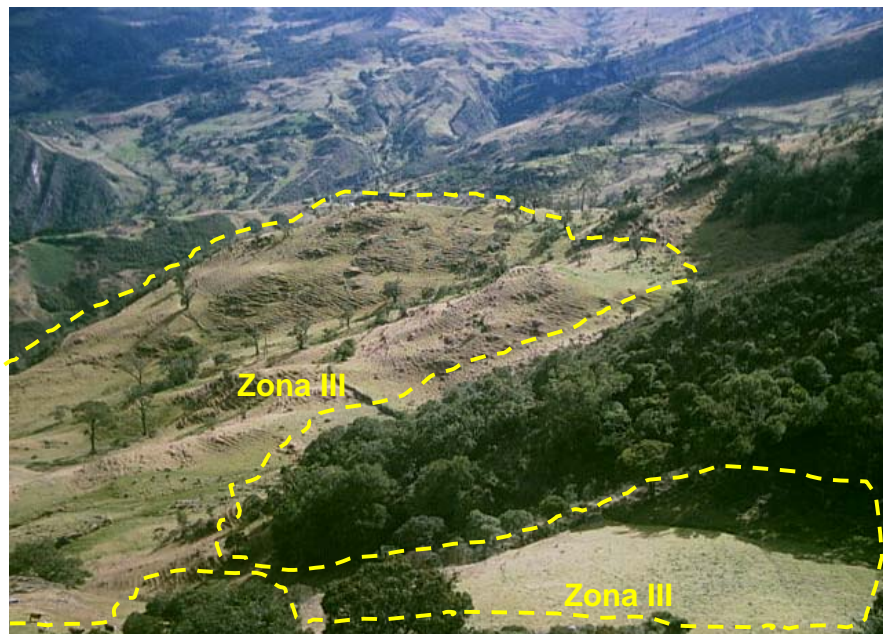


Foto 2.1: Zona III, Pitones

Con el fin de abarcar la totalidad de la zona, se realizaron levantamientos de radiación por medio de poligonales abiertas con estación electrónica, mediante líneas quebradas que unen las distintas estaciones desde donde se tomaron las mediciones para los puntos del levantamiento, como muestra la figura 2.3 la cual corresponde a la zona 3 (Pitones) (Ver Foto 2.1) que cuenta con un total de 242 datos para un área de 166522 m<sup>2</sup>.

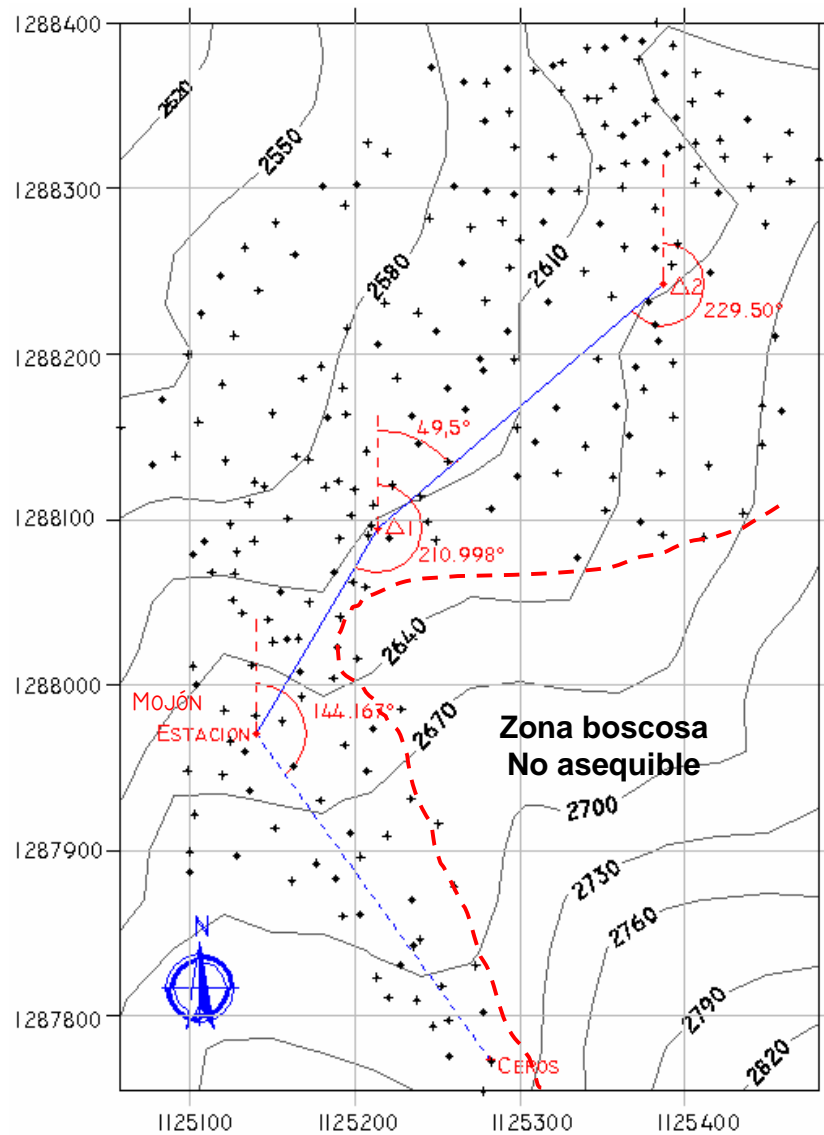


Figura 2.3: Poligonal correspondiente a la zona 3 (Pitones)

Las zonas de trabajo se referenciaron con ayuda del GPS, usando dos puntos por poligonal, uno donde se iniciaba la poligonal y otro al cual se daban ceros con el fin de calcular el azimut correspondiente. En la figura 2.3 se muestra el levantamiento topográfico de la zona III con los puntos procesados y la parte de la zona III que no se pudo trabajar debido a la presencia de bosques. La poligonal abierta se muestra con la línea continua y la línea a trazos de color azul señala la dirección al punto donde se dieron ceros.

Al momento de trabajar en campo se pudo apreciar que no en todas las zonas se podía realizar el levantamiento debido a la dificultad de acceso a estos sitios ya sea porque eran boscosas o porque se ubicaban en pendientes muy fuertes (mayores a 60%), tal como se muestra en la Foto 2.2 correspondiente a la zona XII y la foto 2.3 correspondiente al cierre de la cuenca. Esto genera inconvenientes a la hora de construir el modelo pues existirán zonas de suficiente y otras de escasa información que modificarán las escalas, de esto surge la necesidad de encontrar la escala apropiada para generar el modelo.



Foto 2.2: Zona XII, Parte alta de la cuenca



Foto 2.3: Cierre de la cuenca

De las once zonas trabajadas con la estación topográfica se logró cubrir el 25.2% del área total y un 10.2 % con GPS, con el fin de cubrir la mayor superficie, para un total aproximado de 35.4 % del área de la cuenca.

A continuación se muestra en la figura 2.4 un esquema que hace referencia a la distribución de puntos y a la densidad de ellos con respecto a la información que nos aporta la cartografía dentro de la generación del DEM y en tabla 2.1 se

encuentra la descripción de las zonas haciendo referencia al número total de datos por zona con su correspondiente área y tipo de levantamiento.

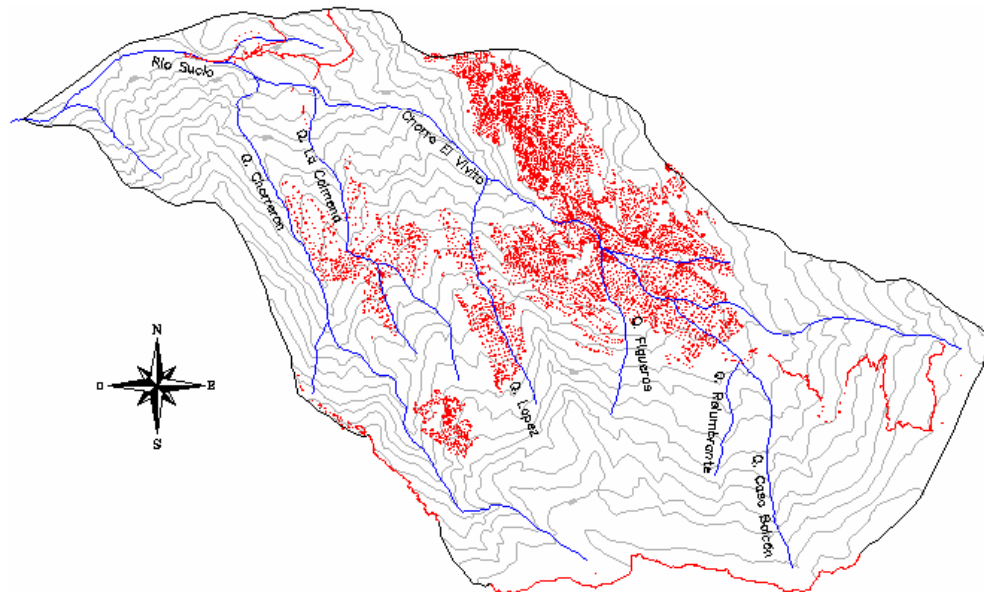


Figura 2.4: Distribución espacial de la información de campo tomada en la Cuenca Experimental de Río Sucio.

La tabla 2.1 presenta una diferencia referente a la cantidad de datos tomados por zona, esto se debió a la extensión del área de la zona levantada, a la dificultad para hacer el levantamiento así como en la variedad de su relieve. La zona de El Chorrerón corresponde a una parte de la divisoria sur de la cuenca la cual es muy boscosa y de gran pendiente, así como la Cueva, Pitones, El Alto, El Progreso, López y López Bajo que presentan pendientes medias con extensiones largas y estrechas, por otro lado las zonas restantes del levantamiento con Estación eran más amplias con pendientes moderadas incluso casi planas en algunas partes lo que facilitaba la toma de datos de manera continua.

### 2.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO

El trabajo de campo procesado en oficina se realizó en dos etapas que dependieron del equipo utilizado durante el levantamiento, como sigue a continuación:

2.3.1 Información topográfica. Para llevar acabo esta etapa se transfirieron los datos de campo a formato digital a través de una hoja de cálculo de Microsoft Excel para cada zona, como paso fundamental para el procesamiento de los datos. En esta manipulación de la información se tiene en cuenta: la conversión de ángulos, cálculo del azimut y contrazimut, cálculo de proyecciones y coordenadas y cálculo de las altitudes. (*Ver anexo A*)

2.3.2 Información GPS. La señal emitida por los satélites NAVSTAR (GPS) está intencionalmente perturbada con la denominada SA (Selective Availability, Disponibilidad Selectiva) que produce una incorrección de las coordenadas calculadas por un receptor GPS (en navegación) por lo cual se hace necesaria su corrección. Cuando se emplea un receptor de código (C/A Coarse dquisition) la corrección calculada en un punto es aplicable a distancias de algunos cientos de kilómetros (200-500 Km.) de la antena base.

La corrección diferencial es el proceso en el cual se sitúa un receptor en un punto conocido, llamado "estación base", y se utilizan estos datos recogidos para calcular las correcciones en cada instante dadas las coordenadas precisas de la estación. La posición incógnita de otro receptor ubicado en una "estación móvil" (denominado también estación remota o rover) puede mejorar la precisión de su posición aplicando aquellas correcciones.

La corrección diferencial utilizada en este trabajo es a post proceso porque el rover no se encontraba recibiendo la corrección para cada satélite enviada por la antena base en el momento de la toma de datos. La antena base empleada en esta corrección diferencial se encuentra en Medellín (Antioquia) cuyas coordenadas precisas se encuentran consignadas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Coordenadas antena base Medellín.

<b>Coordenadas Base Medellín</b>	
Norte:	6°13'0.47173"
Oeste:	75°34'9.14133"
m.s.n.m	1603.833

Para la obtención de los archivos de datos de la época necesarios para la corrección diferencial se tomaron de la publicación suministrada por Procálculo de la página en Internet: [www.procalculo.com](http://www.procalculo.com)

Los mojones de las zonas referenciados con GPS presentan un cambio significativo en la precisión una vez realizado el proceso de corrección diferencial, esto es importante al momento de ubicar las zonas dentro del modelo una respecto a la otra y en concordancia con la cartografía, ya que pueden resultar zonas muy desfasadas en altitud y posición que pueden generar escalones y traslajos en las zonas contiguas, esto es apreciable por ejemplo para el caso del mojón cinco (Ver tabla 2.3), el cual presentaba una diferencia de posición de siete metros en la dirección Norte y de nueve metros en altitud. En promedio la precisión horizontal de los mojones se encontraba en 6.04 metros antes de la corrección, logrando aumentarla a 0.68 metros y la precisión vertical que estaba en 10.12 metros se aumento a 1.19 metros. La precisión del punto se encuentra enmarcada dentro de los radios de un elipsoide para los cuales se puede notar la disminución de estos y su consecuente aumento de la precisión una vez realizado el proceso de corrección diferencial, esto se encuentra consignado dentro de la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Información de la precisión de los mojones antes y después de la corrección diferencial.

		Norte (m)	Este (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Precisión	
					Horizontal(m)	Vertical(m)
<b>Mojón 1</b>	Rover	1287195.148	1125118.451	3040.992	5.90	9.00
	Corregidos	1287191.184	1125117.100	3041.841	0.70	1.20
<b>Mojón 2</b>	Rover	1287130.300	1125636.401	3048.340	6.30	12.00
	Corregidos	1287125.799	1125633.630	3053.621	0.90	1.50
<b>Mojón 3</b>	Rover	1287974.797	1125139.471	2659.054	5.70	9.10
	Corregidos	1287970.730	1125139.803	2659.480	0.60	1.10
<b>Mojón 4</b>	Rover	1288166.756	1124966.938	2555.297	5.80	8.60
	Corregidos	1288162.067	1124967.376	2557.371	0.60	0.90
<b>Mojón 5</b>	Rover	1288258.442	1125686.967	2718.293	5.80	10.00
	Corregidos	1288251.352	1125688.488	2709.641	0.50	1.40
<b>Mojón 6</b>	Rover	1287862.548	1125780.045	2865.784	5.80	10.00
	Corregidos	1287860.733	1125780.509	2858.488	0.60	1.30
<b>Mojón 7</b>	Rover	1288183.250	1126115.030	2690.635	6.80	10.00
	Corregidos	1288177.928	1126115.944	2688.055	1.00	1.20
<b>Mojón 8</b>	Rover	1288043.068	1126458.839	2794.037	6.50	12.00
	Corregidos	1288037.306	1126460.789	2784.760	0.80	1.30
<b>Mojón 9</b>	Rover	1287713.994	1127082.930	2922.120	6.00	11.00
	Corregidos	1287713.144	1127082.691	2920.517	0.60	1.20
<b>Mojón 10</b>	Rover	1288687.084	1126208.884	2661.378	5.80	8.60
	Corregidos	1288685.959	1126209.640	2662.481	0.60	0.80
<b>Mojón 11</b>	Rover	1288937.570	1126016.817	2592.018	6.00	11.00
	Corregidos	1288936.993	1126016.061	2591.606	0.60	1.20

### 3. PROCESAMIENTO DEL DEM

En este capítulo se describe la importancia que tiene la cartografía IGAC y la información tomada en campo para la construcción del modelo digital de elevaciones de la cuenca experimental Río Sucio, como también la necesidad de realizar un ajuste que permita la unión de la información cartográfica y la obtenida en campo, la cual fue mencionada en el capítulo 2, sección 2.2. Realizado este ajuste se procedió a escoger el mejor método de interpolación para generar el modelo mediante un análisis de sensibilidad en la variación de los parámetros que cada método tiene en cuenta.

#### 3.1 CARTOGRAFÍA IGAC

Como punto de partida para este proyecto se hizo necesaria la obtención de la información correspondiente a las planchas cartográficas IGAC 110-III-C-1 y 110-III-C-2. Estas se encuentran a escala 1:10000 y con curvas de nivel cada 50 metros, correspondientes al área de la cuenca y sus alrededores, cabe notar que estas planchas provienen de la restitución de fotos aéreas del año 1976 para las cuales traen consigo un error implícito producto de la restitución y otro error debido a cambios en la morfología del terreno, ocasionado por la erosión y uso del suelo a través del tiempo.

Para la obtención de esta información fue necesaria la digitalización manual de las planchas cartográficas IGAC 110-III-C-1 y 110-III-C-2. A esto fue necesario realizarle la generalización que es un proceso de limpieza para eliminar los elementos que se repiten o aquellos que no se necesitan como por ejemplo bloques con atributos. Este proceso también incluye la corrección de algunos

elementos como las curvas de nivel que se cruzan al momento de unir las planchas y aquellas que no quedan completamente cerradas, etc.

Finalmente se extrajeron 8099 puntos (X, Y, Z) de la digitalización de las planchas cartográficas IGAC 110-III-C-1 y 110-III-C-2, 5205 puntos (X, Y, Z) extraídos con la estación electrónica y 1803 puntos obtenidos con GPS durante la fase de campo (Capítulo 2). Con estos datos disponibles de cartografía y campo, se vio la necesidad de encontrar el desfase o la variación espacial que presentaban la totalidad de la información. Esto se verá con mayor detalle en la siguiente sección.

### 3.2 AJUSTE DE LA INFORMACIÓN

Inicialmente se generó el modelo correspondiente a los datos de la cuenca extraídos de la cartografía IGAC, por los métodos: Kriging, Inverso a la distancia, Vecino más cercano y Radial Basis Function, incluidos en el software: Surfer 8.01-Mayo 2002. Por Golden Software, Inc. El cual es utilizado a lo largo de este proyecto para la construcción de todos los modelos.

Se encontró el menor valor de error medio cuadrático (EMC = 1.868) con el método Radial Basis Function Multiquadric, los resultados de estas interpolaciones se muestran en la tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1: EMC para los métodos de interpolación empleados en el modelo de la cartografía y de campo.

Método de interpolación	EMC Cartografía	EMC Campo
Kriging	2.908	1.683
Inverso a la distancia	8.051	3.835
Vecino mas cercano	3.162	4.495
Radial basis function (Multiquadric)	1.868	1.591

A estos datos se le adjuntó la información de campo con el fin de generar el modelo y así poder apreciar las diferencias tanto en la forma del relieve como en la variación del error; es entonces cuando se vio la necesidad de encontrar el tipo o la forma de la variación espacial que presentaban los datos de campo al ser incorporados dentro de la información cartográfica, así como la metodología de ajuste de la información basada en un procedimiento consistente que evite la pérdida de información y además que permita mostrar el detalle de las zonas trabajadas dentro del modelo final.

Para encontrar la metodología de ajuste fue necesario realizar un análisis de la diferencia ó residuo entre la información de campo y la cartográfica (Figura 3.2.1), con el fin de apreciar a mayor escala su variabilidad espacial y poder tener mejor apreciación del resultado al que se quiere llegar. Para generar este residuo se construyeron dos modelos independientes los cuales corresponden, el primero a la información de campo (Figura 3.2.1.a) y el segundo a la cartografía existente (Figura 3.2.1.b), generados mediante el método de interpolación Radial Basis Function (Multiquadric) por el cual se obtuvieron mejores resultados (Ver tabla 3.2.1).

El modelo correspondiente a la cartografía se generó a un tamaño de celda de 30 x 30 siendo esta la escala donde no presenta ruido (superficie mal definida) al momento de la interpolación. Con el fin de mantener el buen grado de detalle la información de campo se procesó a un tamaño de celda de 10 x 10. El cálculo del residuo se llevo a cabo por medio de la sustracción celda a celda del modelo de campo y cartografía (Figura 3.2.1.c). Para la sustracción de los dos modelos fue necesario que estos tuvieran la misma escala y además se encontraran dentro de los mismos límites de coordenadas (1124640 E, 1287060 N) y (1127250 E, 1289370 N).

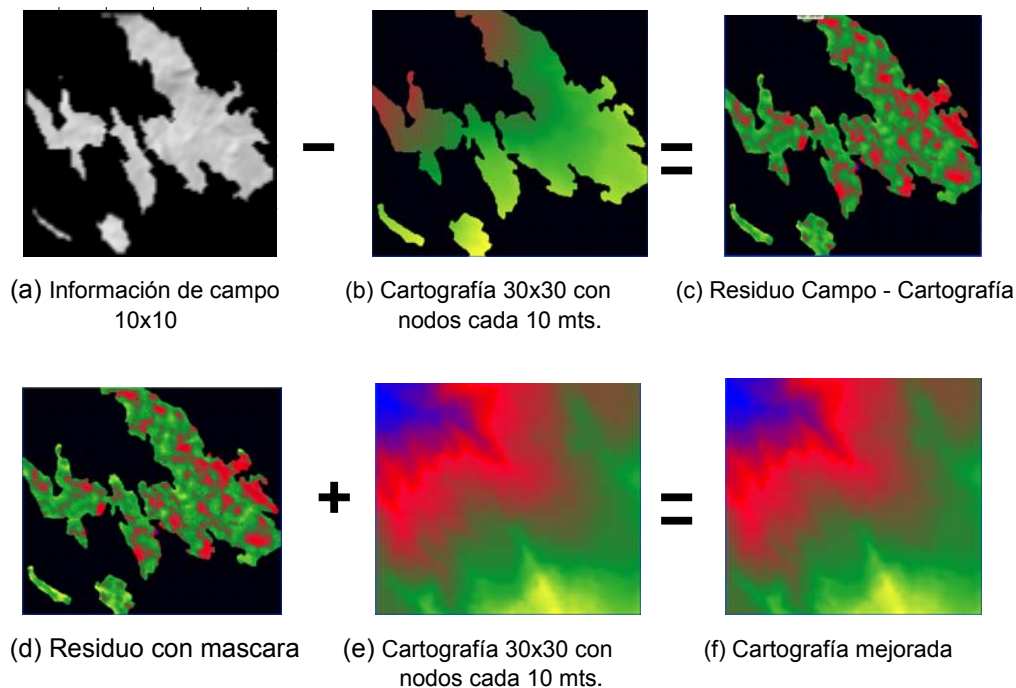


Figura 3.2.1: Metodología para el ajuste de la cartografía correspondiente al área de campo. El fondo de color negro indica que no hay información.

Como el modelo correspondiente a la cartografía se encuentra a un tamaño de celda de 30 x 30 fue necesario llevarlo al tamaño de la celda del modelo de campo sin generar otra interpolación que conllevaría a producir mayores errores, esto se realizó insertando nodos dentro de las celdas mediante una interpolación cúbica pero conservando en el archivo de la grilla una representación exacta de los datos originales y así poder tener para las celdas de 30 x 30 nodos cada 10 mts (Figura 3.2.1.b). Al insertar los nodos no se extrapola más allá de los límites de la celda original.

Como en el modelo de campo la distribución de los datos no llena la totalidad de los límites (1124640 E, 1287060 N) y (1127250 E, 1289370 N) de la grilla a comparar, es necesario demarcar las zonas trabajadas durante la fase de campo para eliminar la información adicional producto de la interpolación y así encontrar los residuos únicamente de las zonas trabajadas (Figura 3.2.1.a) y (Figura 3.2.2).

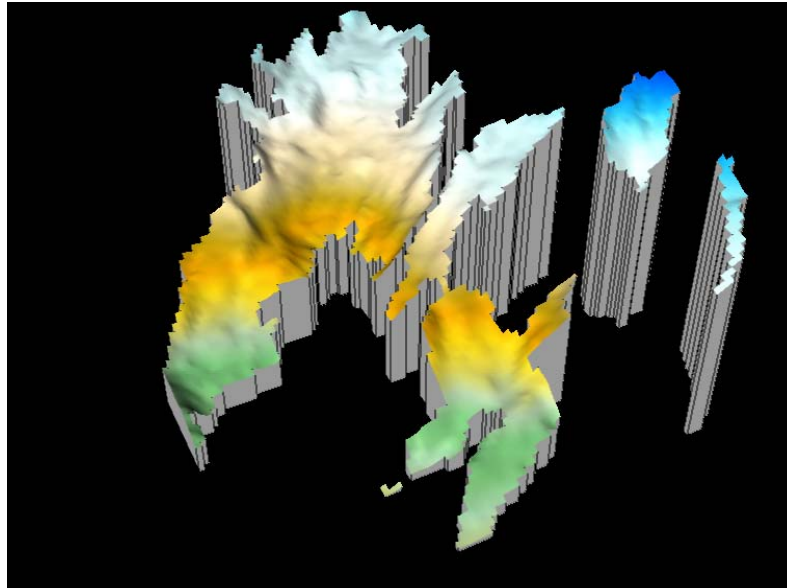


Figura 3.2.2: DEM de las zonas trabajadas durante la fase de campo

La operación realizada fue la siguiente: a la grilla de campo se le resto la grilla de cartografía para generar el residuo correspondiente (Figura 3.2.1.c), encontrando de esta manera que los datos de campo en su mayoría se encuentran por encima de los datos de la cartografía, como se puede observar en la figura 3.2.3 para la cual sus tonos varían de amarillo a azul y representan la diferencia de altitud entre los modelos. (Ver tabla 3.2.)

Tabla 3.2.2: Rango de valores de z para las diferentes tonalidades dentro del residuo.

Color	Rango Z (mts.)	# Celdas
Amarillo	50 a 35	93
Verde Claro	34 a 15	4120
Verde Oscuro	14 a 3	13437
Rojo	2 a -8	4348
Azul	-9 a -30	128

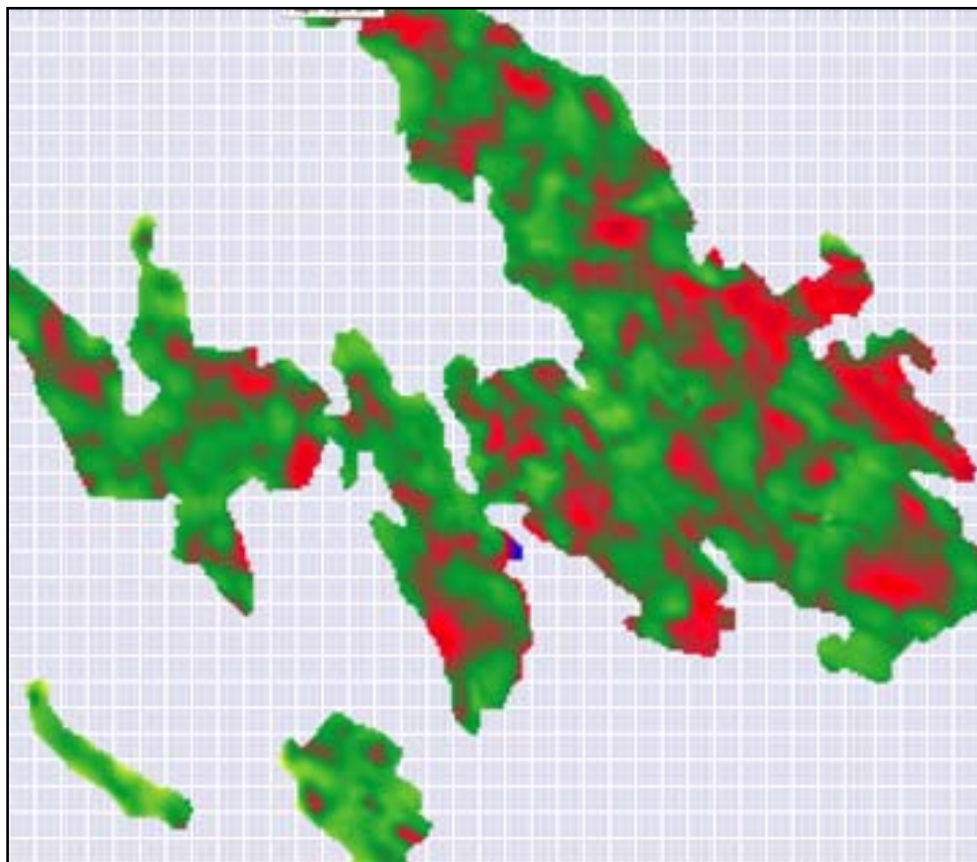


Figura 3.2.3: Residuos producto de la información de campo y cartografía (Software Spell-Map).

Durante el análisis de los residuos se logró observar que los valores más elevados se encontraban dentro de las zonas de alta montaña. Estas operaciones fueron realizadas en el Software SPELL-Map versión 1.0 B – 2003 elaborado por Ing. M.Sc. Jorge Alberto Guzmán Jaimes, Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, Colombia.

A los residuos se les cálculo los estadísticos (Tabla 3.2.3) para ver el tipo de distribución que presentaban e identificar aquellos valores que tenían mayor desfase.

Tabla 3.2.3: Estadísticos de los residuos producto de la información de campo y cartografía.

Estadísticos	Residuo
Número de datos	22126
Mínimo	-41.079
Máximo	57.387
Media	8.95818
Error estándar	0.05103
Varianza	57.6157
Desviación Estándar	7.5905
Coefficiente de Variación	0.84733
Coefficiente de Asimetría	0.528

Los residuos presentan una distribución Normal ya que para esto el 68% de los datos deberán encontrarse dentro del rango comprendido por la media mas o menos la desviación estándar como se muestra en la expresión 12:

$$\bar{x} \pm \sigma = 8.96 \pm 7.6 \quad (12)$$

$$1.36 < R < 16.56$$

El número de datos que se encuentran dentro de este rango es 15949 de la totalidad de los residuos (22126) y corresponden al 72%, esta distribución Normal también se puede apreciar con el valor del error estándar el cual es menor a 1.25, como el coeficiente de asimetría es positivo indica una cola hacia la derecha de la distribución, “las técnicas de la geoestadística lineal que predominan el campo de las geociencias producen los mejores resultados cuando el coeficiente de variación es menor a 1.0” (Krajewski y Gibbs, 1993; Journel y Huijbregts, 1978; David, 1977) valor de gran importancia para el estudio de estas variaciones distribuidas espacialmente.

Para los datos restantes (28%) se llevo a cabo un suavizado (*Smoothing*), basado en la metodología del procesamiento digital de imágenes (Convolution), “la cual hace referencia a la operación que tiende a suavizar la imagen de entrada ( $f$ ) por

nivelación rápida de la fluctuación de los valores en escala de grises, este es un operador binario que tiene dos entradas, la primera una imagen  $f$  y la segunda una máscara  $M$ . Este término (*Smoothing*) particularmente aplica un tipo de operación promedio que a menudo es usado para mejorar y reducir el nivel de ruido en la imagen. Es necesario introducir el término *Neighborhood Square* que representa la colección de las celdas contiguas al píxel  $(i, j)$  como se muestra en la figura 3.2.4.a.

A esta expresión se le asocia el término de máscara (Mask) que es un arreglo bidimensional de números reales basado en el modelo D8 (Figura 3.2.4.b), donde cada uno de estos números reales está referido al centro. En la figura 3.2.4.c se presenta la máscara  $M$  usada en el ajuste de los residuos que presentaban mayores problemas.

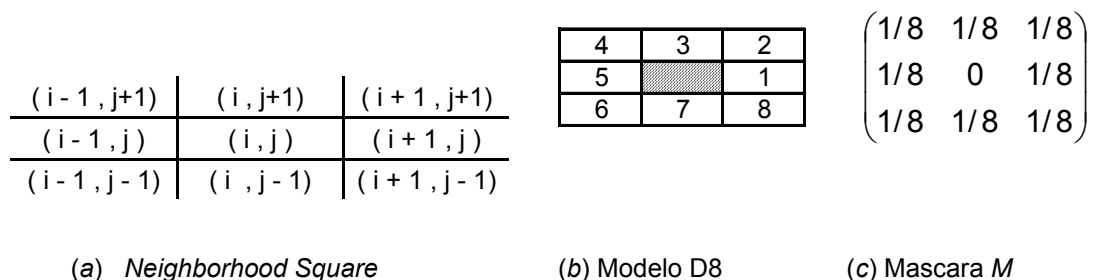


Figura 3.2.4: (a) Colección de las celdas contiguas al píxel  $(i, j)$ , *Neighborhood Square*, (b) Estructura del modelo D8, (c) Máscara empleada para el suavizado de la información.

De hecho, una máscara es nada más que una matriz limitada que contiene el origen dentro de su dominio. El suavizado utilizado está dado por la expresión (13):

$$[SMOOTH(f; M)]_{(i,j)} = \sum_{(u,v) \in N} M_{ij}(u,v) \times f(u,v) \quad (13)$$

Donde  $N$  representa la colección de las celdas contiguas al píxel  $(i, j)$  de la máscara  $M$  cuando el centro de  $M$  es colocado sobre el píxel  $(i, j)$ ,  $M_{ij}(u, v)$  es el valor de la máscara en el píxel  $(u, v)$ , y  $f(u, v)$  es el valor gris de la imagen  $f$  a  $(u, v)$ . Intuitivamente el valor del  $Smooth(f; M)$  en el píxel  $(i, j)$  es el promedio de las celdas contiguas. “La máscara debe hacerse centrada con las celdas contiguas al píxel” (Dougherty Y Glandina, 1987). Por ejemplo:

Sea:

$$f = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 6 & 0 & 6 \end{pmatrix} f'$$

Sea  $f'$  una porción de la imagen de entrada ( $f$ ) así:

$$f' = \begin{pmatrix} 8 & 8 & 0 \\ 8 & 8 & 0 \\ 6 & 0 & 6 \end{pmatrix}$$

De acuerdo a la definición de  $Smooth$  los valores de  $f'$  son multiplicados por el correspondiente valor de la máscara  $M$  anteriormente descrita y su suma es tomada como resultado del píxel  $(i, j)$ :

$$\begin{aligned} [Smooth(f; M)]_{(i, j)} &= (1/8 * 8) + (1/8 * 8) + (1/8 * 0) + \\ & (1/8 * 8) + (0 * 8) + (1/8 * 0) + \\ & (1/8 * 6) + (1/8 * 0) + (1/8 * 6) \\ &= 3 \frac{3}{2} = 4.5 \end{aligned}$$

Entonces la máscara  $M$  aplicada sobre la imagen  $f$  sería:

$$M = \begin{pmatrix} 1/8 & 1/8 & 1/8 \\ 1/8 & 0 & 1/8 \\ 1/8 & 1/8 & 1/8 \end{pmatrix}$$

$$f = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 6 & 0 & 6 \end{pmatrix}$$

Con el procedimiento de cálculo para los píxeles que permanecen en el dominio de  $f$  se obtuvo para la matriz limitada el *Smooth* ( $f; M$ ):

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 5 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 8 & 5 & 3\frac{3}{4} & 0 \\ 0 & 2 & 3\frac{3}{4} & 5\frac{3}{4} & 3\frac{3}{2} & 2\frac{3}{2} & 6 \\ 0 & 1\frac{3}{4} & 2\frac{3}{2} & 3\frac{3}{2} & 2\frac{9}{4} & 1\frac{9}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 6 & 0 & 6 \end{pmatrix}$$

Este fue el procedimiento que se llevo a cabo para la variabilidad espacial de los residuos que estaban generando deficiencias durante la construcción del MDE.

Esta superficie suavizada (Figura 3.2.1.d) se le sumó a la superficie producto de la cartografía (Figura 3.2.1.e) para así dar por terminado el respectivo ajuste de los datos correspondiente al área de información tomada durante la fase de campo (Figura 3.2.1.f). Para completar la información del DEM a estos datos se les agregó la información (Cartográfica) del área restante a la cuenca y los datos

obtenidos por medio del Rover con su respectiva corrección diferencial, estos datos se ajustaron adecuadamente a la información de campo y no presento mayores problemas al momento de realizar el ajuste. A continuación se presentan los resultados del modelo para la información ajustada, procedimiento realizado en esta sección.

### 3.3 RESULTADOS DEL MODELO

Durante este capítulo se pretende resaltar la importancia del modelamiento por zonas con el propósito de encontrar posibles errores en la manipulación de los datos, poder observar a una mejor escala el trabajo realizado en campo y así evitar errores en la construcción del modelo final de la cuenca experimental Río Sucio como se verá en la sección 3.3.2.

3.3.1 Modelamiento por zonas. A partir de los datos de campo ya procesados se crearon los modelos para cada una de las once zonas ya mencionadas, con el propósito de tener una escala mayor y poder observar con más detalle su relieve y los errores que se pudieron cometer durante el procesamiento de los datos. El método de interpolación escogido para el modelamiento de las zonas fue Radial Basis Function, pues arrojó mejores resultados, como se verá más adelante en la siguiente sección. Debido a la gran densidad de información recopilada dentro de cada zona, estos modelos se lograron crear a un tamaño de celda de 5 x 5 para las zonas de la I a la VII y de 10 x 10 para las restantes, obteniendo de esta manera un buen detalle para las regiones donde se tenía deficiencia de información y así cumplir uno de los objetivos propuestos de este proyecto.

La zona I corresponde a una parte de la divisoria sur de la cuenca, este modelo cuenta con solo 41 datos (Figura 3.3.1), pues la zona es de alta pendiente, con abundante vegetación (Foto 3.3.1) lo cual impedía desplazarse libremente a través

de ella y adquirir mayor información. El tamaño de la celda para esta zona es de 5 x 5, el error medio cuadrático (EMC) es de 3.297 valor elevado en comparación con las demás zonas, debido a la escasez de datos tomados; Esta zona fue una de las que presentó mayor dificultad al momento del ajuste, pues los mayores valores de residuo se encontraban allí (ver figura 3.2.3).

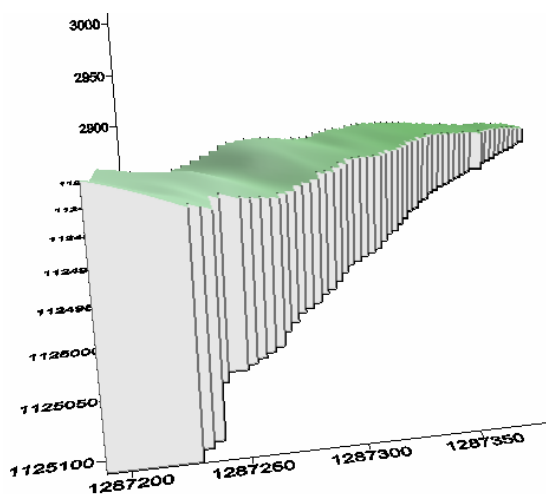


Figura 3.3.1: Modelo Zona I, parte de la divisoria sur de la cuenca



Foto 3.3.1: Foto zona I parte de la y divisoria sur de la cuenca

La zona II (la cueva), comprendida entre los 2850 y 3050 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 87272 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al sur-oeste de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 294 datos, su tamaño de celda es de 5 x 5 (Figura 3.3.2), el EMC es de 1.686, para esta zona ya se logró realizar una mejor distribución de la información. La pendiente media de la zona es aproximadamente del 57% pero es un terreno despejado lo cual permitió cubrirla en su mayoría (ver foto 3.3.2).

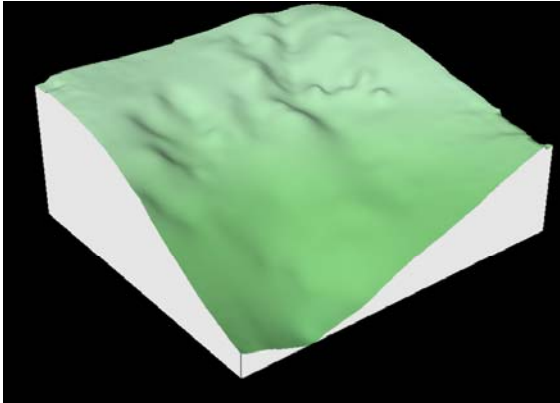


Figura 3.3.2: Modelo Zona II, La cueva



Foto 3.3.2: Foto zona II, La cueva

La zona de Pitones corresponde a la zona III, comprendida entre los 2550 y 2700 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 166522 m<sup>2</sup>, se encuentra localizada al suroeste de la cuenca. Este modelo cuenta con 242 datos de campo, su tamaño de celda es de 5 x 5 (Figura 3.3.3), el EMC es de 2.172, debido a una distribución de puntos más sectorizada que obligó a realizar dentro del modelo regiones grandes de interpolación, de las cuales no se tiene información. Esto se debe a que dentro de estas zonas no es posible la toma de datos por su topografía y vegetación (Foto 3.3.3).

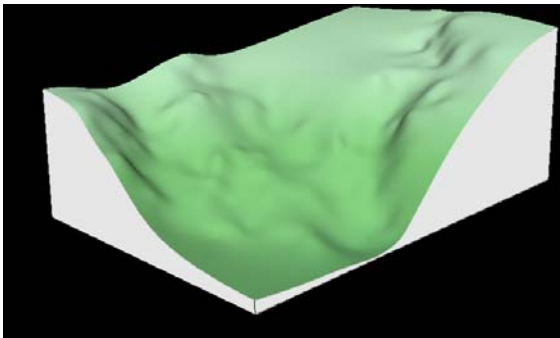


Figura 3.3.3: Modelo Zona III, Pitones



Foto 3.3.3: Foto zona III, Pitones

La zona IV (El Alto), comprendida entre los 2400 y 2600 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 247937 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al sur-oeste de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 263 datos, su tamaño de celda es de 5 x 5 (Figura 3.3.4), el EMC es de 2.078, para esta zona se logró realizar una mejor distribución de la información, aunque al igual que en todas, existieron lugares para los cuales no se pudo extraer datos (ver foto 3.3.2), a pesar de que esta es un área dedicada a la ganadería.



Figura 3.3.4: Modelo Zona IV, El Alto

Foto 3.3.4: Foto zona IV, El Alto

La zona V (López Bajo), comprendida entre los 2620 y 2810 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 93596 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al sur-oeste de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 118 datos, su tamaño de celda es de 5 x 5 (Figura 3.3.5), el EMC es de 2.184, para esta zona la distribución de la información se realizó de forma alargada lo que permitió que para el área del modelo, una buena parte quedara sin información obligándolo a interpolar hacia los lados una gran cantidad de área, lo que conlleva al aumento del EMC. La pendiente media de la zona es aproximadamente del 42% (ver foto 3.3.5).

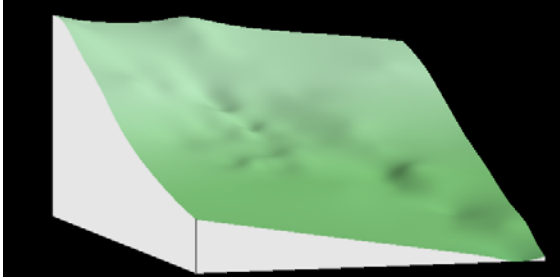


Figura 3.3.5: Modelo Zona V, López Bajo

Foto 3.3.5: Foto zona V, López Bajo

La zona VI (López Alto), comprendida entre los 2810 y 2955 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 162151 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al sur de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 297 datos, su tamaño de celda es de 5 x 5 (Figura 3.3.6), el EMC es de 2.340, este valor de error se debió a la forma de la distribución de la información, pero al igual que en los demás modelos se puede apreciar muy bien la forma de la zona, lo que representa un buen trabajo de campo. La pendiente media de la zona es aproximadamente del 26% (ver foto 3.3.6).

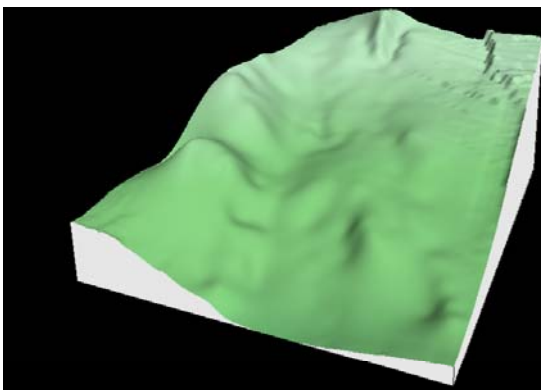


Figura 3.3.6: Modelo Zona VI, López Alto

Foto 3.3.6: Foto zona VI, López Alto

La zona VII (El Progreso), comprendida entre los 2590 y 2760 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 127127 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al sur-oeste de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 325 datos, su tamaño de celda es de 5 x 5 (Figura 3.3.7), el EMC es de 1.996, para esta zona se logró realizar una mejor distribución de la información, aunque al igual que en todas, existieron lugares para los cuales no se pudo extraer datos (ver foto 3.3.7). La pendiente media de la zona es aproximadamente del 48%.

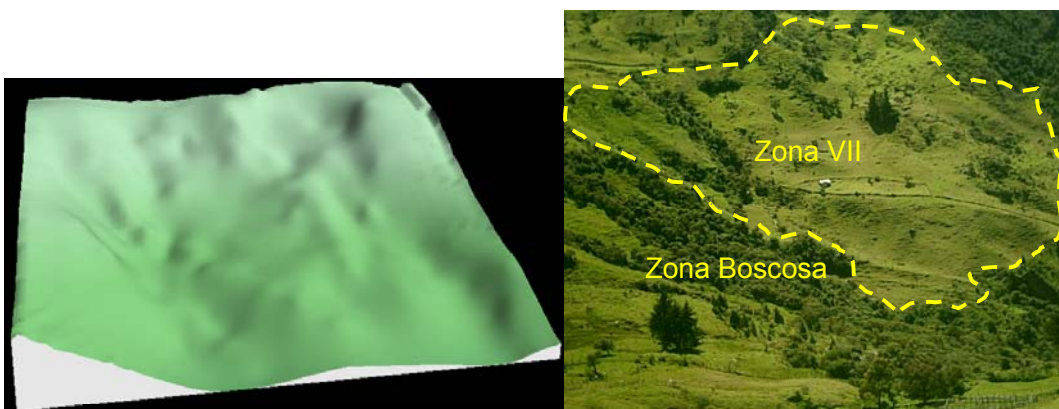


Figura 3.3.7: Modelo Zona VII, El Progreso      Foto 3.3.7: Foto zona VII, El Progreso

La zona VIII (El Carbón), comprendida entre los 2735 y 2920 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 316450 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al sur-este de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 598 datos, su tamaño de celda es de 10 x 10 (Figura 3.3.8), el EMC es de 1.387, para esta zona se logró realizar una mejor distribución de la información, (ver foto 3.3.8). La pendiente media de la zona es aproximadamente del 30%.

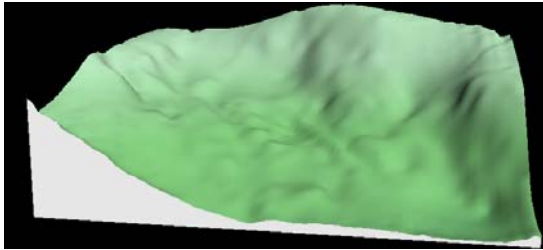


Figura 3.3.8: Modelo Zona VIII, El Carbón

Foto 3.3.8: Foto zona VIII, El Carbón

La zona IX (Armenia, La Escuela, Bellavista), comprendida entre los 2715 y 2960 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 655723 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al norte del Este de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 1145 datos, su tamaño de celda es de 10 x 10 (Figura 3.3.9), el EMC es de 1.603, para esta zona ya se logró realizar una mejor distribución de la información, (ver foto 3.3.9). La pendiente media de la zona es aproximadamente del 22%.

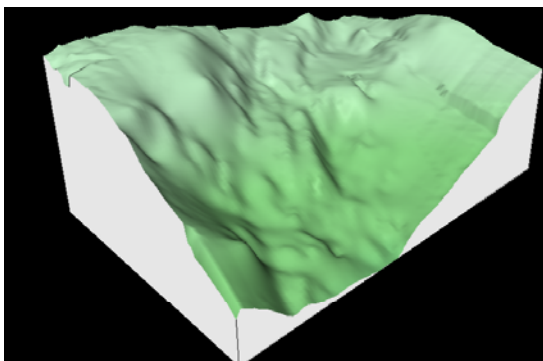


Figura 3.3.9: Modelo Zona IX, Armenia, Bellavista

Foto 3.3.9: Foto zona IX, Armenia, La Escuela, Escuela, Bellavista

La Zona X (La Casita), comprendida entre los 2590 y 2790 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 417672 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al norte de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 767 datos, su tamaño de celda es de 10 x 10 (Figura 3.3.10), el EMC es de 1.128, en esta zona se logró

realizar una buena distribución de la información, (ver foto 3.3.10). La pendiente media de la zona es aproximadamente del 18%.

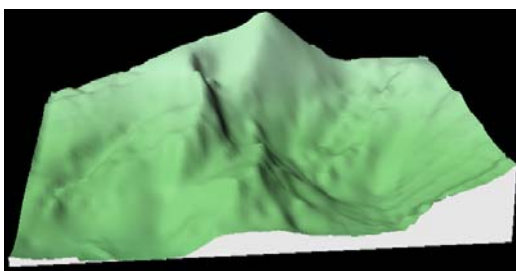


Figura 3.3.10: Modelo Zona X, La Casita



Foto 3.3.10: Foto zona X, La Casita

La Zona XI (La Cruz, La Caicedo, Bélgica), comprendida entre los 2465 y 2635 m.s.n.m. tiene un área aproximada de 226881 m<sup>2</sup> y su ubicación se encuentra al norte del oeste de la cuenca como se ve en la figura 2.2. Este modelo cuenta con 1115 datos, su tamaño de celda es de 10 x 10 (Figura 3.3.11), el EMC es de 1.289, en esta zona se logró realizar una buena distribución de la información, (ver foto 3.3.11). La pendiente media de la zona es aproximadamente del 20%.

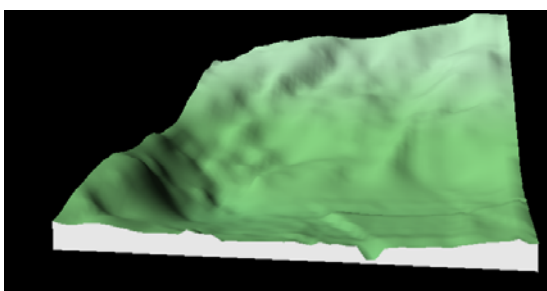


Figura 3.3.11: Modelo Zona XI, La Cruz, La Caiceda y Bélgica



Foto 3.3.11: Foto zona XI, La Cruz, La Caiceda y Bélgica

El detalle de esta información fue la base para el mejoramiento de la información cartográfica que dio lugar al modelo digital de elevaciones de la cuenca experimental del Río Sucio, el cual se expondrá en la siguiente sección.

3.3.2 Modelo digital de elevaciones de la cuenca. Existen muchas metodologías de interpolación para la generación de modelos digitales de elevaciones, pero algunas fueron descartadas por el análisis del error, pues no dan una buena aproximación de los datos de entrada, tales como: El Inverso a la distancia, Mínima curvatura, regresión polinomial, Triangulación con interpolación lineal, inverso a la distancia, entre otros. Sin embargo, existen otros para los cuales muchos autores los han catalogado como potentes métodos de interpolación en la generación del DEM. Dentro de estos se encuentran el Kriging y el Radial Basis Function, los cuales se valoraron mediante el error medio cuadrático.

La estimación del EMC se realiza por medio de la validación cruzada: “Sea  $Z(x)$  una función aleatoria estacionaria con semivariograma  $\gamma(h)$ , su función de covarianza  $C(z)$  viene dada por  $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$  donde  $\sigma^2$  es la varianza de  $Z(x)$ . Sea  $Zx_1, Zx_2, \dots, Zx_n$  los valores de  $Z(x)$  en  $n$  puntos medidos. La validación cruzada consiste en suprimir el  $i$ -ésimo valor medido  $Zx_i$  y estimarlo a partir del resto de los datos. El valor estimado  $Z^*x_i$  se calcula por krigeaje (Sección 1.2.2). Si se repite este proceso para los  $N$  puntos, se pueden calcular  $n$  errores de validación, (ecuación 14).

$$E(x_i) = Z^*(x_i) - Z(x_i) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

Así se van probando diferentes valores de los parámetros del semivariograma hasta que los errores de validación cumplen los siguientes estadísticos:

1. El error medio, dado por:  $1/n \sum_{i=1,n} [Z(x_i) - Z^*(x_i)]$ , debe ser aproximadamente igual a cero.
2. El error medio cuadrado, dado por:  $1/n \sum_{i=1,n} [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2$ , debe ser pequeño.
3. La medida:  $1/n \sum_{i=1,n} \{[Z(x_i) - Z^*(x_i)]/\sigma\}^2$ , debe ser igual a uno.
4. La medida:  $Corr \{[Z(x_i) - Z^*(x_i)]/\sigma, Z^*(x_i)\}$ , debe ser cero.
5. La medida:  $Corr \{Z(x_i), Z^*(x_i)\}$ , debe ser uno”.

(Journel y Huijbregts, 1978; David, 1977; Armstrong y Carignan, 1997).

Otros autores plantean que las medidas fundamentales son las indicadas por los enunciados 1 y 3, (Lamorey y Jacobsom, 1995; Bacchi y Kottegoda, 1995).

La validación cruzada se realizó para los métodos de interpolación de Kriging descrito anteriormente con sus diferentes componentes (Nugget effect, Quadratic, Gaussian, linear, etc.) que generan los variogramas, con el fin de encontrar el que mejor se ajustara a nuestra información, y el método Radial Basis Function (Multiquadric, Thin Plate Spline) para confrontarlos mediante el error medio cuadrático (ecuación 15):

$$EMC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{entrada} - Z_{Generado})^2} \quad (15)$$

Los resultados arrojados muestran (ver tabla 3.3.1) que el método Radial Basis Function (RBF) se ajusta mejor a la información, es por esta razón que se decidió trabajar sobre este, con el fin de encontrar el mínimo error posible para la validación del modelo.

Tabla 3.3.1: Resultados de la interpolación por los diferentes métodos.

<b>COMPARACIÓN DE METODOS DE INTERPOLACIÓN</b>	
METODO	EMC
Kriging (Linear)	1.708
RBF (Thin Plate Spline)	1.618
RBF (Multiquadric)	1.592

Para la obtención del mínimo error posible se optó por modificar los parámetros del método Radial Basis Function como lo indica la siguiente sección.

### 3.4 PARAMETRIZACIÓN Y SENSIBILIDAD

El método multicuadrático es considerado por muchos como el mejor. Para comprobar esta hipótesis se generaron varios modelos para las diferentes funciones del método Radial Basis Function (Multiquadric, Thin Plate Spline), para los cuales se buscó la reducción del error variando los parámetros de *Anisotropía* y *Factor de forma* de la siguiente manera: se realizó la validación cruzada para el modelo, analizando en principio para una determinada proporción (longitudes relativas) con direcciones intermedias y tolerancias cada  $22.5^\circ$ , hasta encontrar la proporción y el ángulo que arrojara el menor error medio cuadrático, luego con estos parámetros encontrados se realizó un procedimiento parecido para las direcciones intermedias pero para encontrar el factor de forma  $R^2$  que ayudara a minimizar este error. Para esto se generaron curvas de *EMC vs Angulo* (ver figura 3.4.1) para diferentes proporciones de las longitudes relativas, esta posee una forma sinusoidal con periodo de  $180^\circ$  y con un mínimo de EMC igual a 1.612 mts en  $45^\circ$ , la otra curva es la correspondiente al EMC vs  $R^2$  (ver figura 3.4.2) que sirvió para encontrar con los parámetros de *Anisotropía* el *Factor de forma* que dieran el menor error, su forma es cóncava con un mínimo de EMC igual a 1.592 para un factor de forma  $R^2$  de 65.

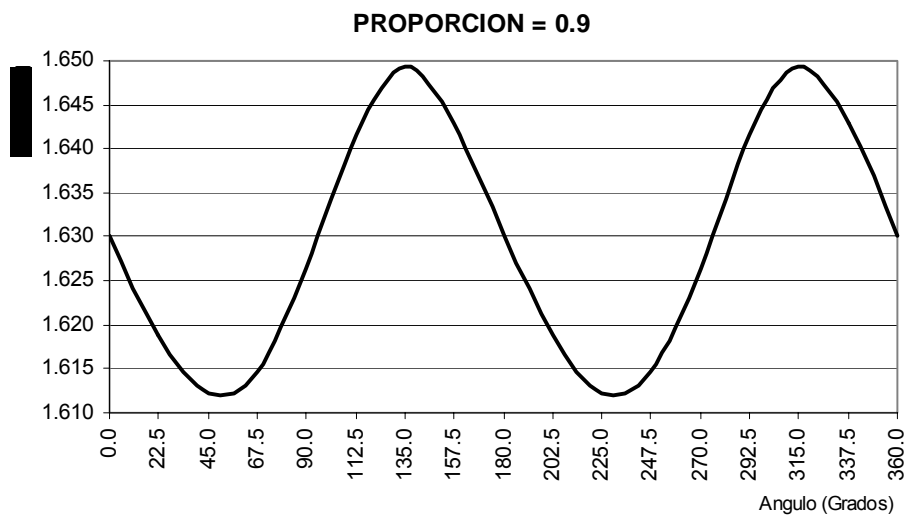


Figura 3.4.1: Curva EMC vs Angulo para el análisis de anisotropía del método Radial Basis Function (Multiquadric)

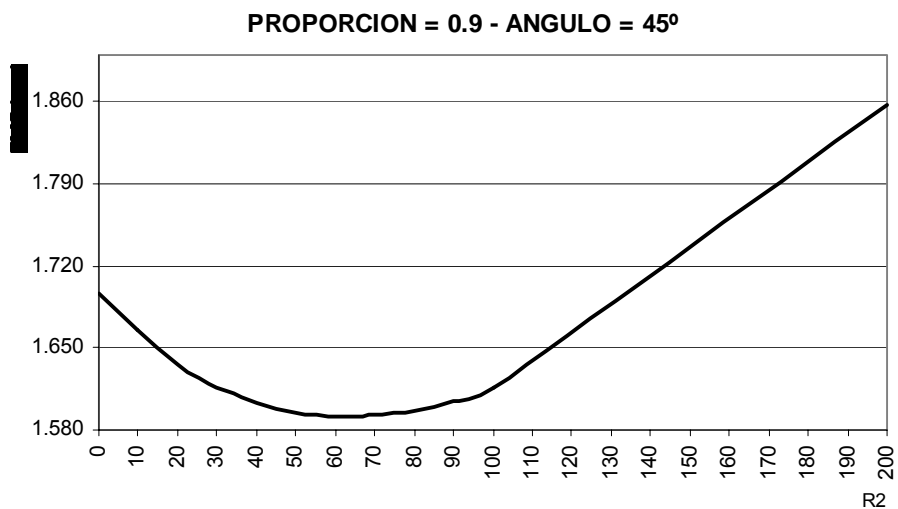


Figura 3.4.2: Curva EMC vs Factor de forma ( $R^2$ ) del método Radial Basis Function (Multiquadric)

Los resultados y los parámetros encontrados después de un minucioso análisis son los presentados en la tabla 3.4.1 y con los cuales se generó el modelo final.

Tabal 3.4.1: Parámetros de anisotropía y Factor de forma y error medio cuadrático del modelo digital de elevaciones de la cuenca experimental de Río Sucio.

<b>PARAMETROS</b>	
Método de interpolación	Radial Basis Function (Multiquadric)
Proporción (r)	0.9
Angulo	45°
Factor de forma ( $R^2$ )	65
Error medio cuadrático (EMC)	1.592

Como resultado del modelo final se puede apreciar mejor definición de las zonas que poseían escasa información (Zonas trabajadas durante la fase de campo, Figura 3.4.3), también se logró una disminución del error medio cuadrático en comparación con el modelo inicial (Cartografía IGAC) el cual pasó de 1.868 a 1.592 mts.

Otra forma de apreciar la ventaja de este modelo con respecto al generado solo partir de la cartografía IGAC es por medio de una validación realizada utilizando los puntos del GPS diferencial como puntos de control, esto tiene mucho sentido ya que estos puntos tienen precisión conocida y suficiente para llevar un control de la calidad, además, a diferencia de los puntos geodésicos que tienden a encontrarse en las cimas y otros lugares destacados, los puntos (X, Y, Z) del GPS diferencial tienen una distribución adecuada sobre el área de la cuenca. También debe destacarse que los puntos geodésicos sobre el mapa se digitalizan manualmente por lo que una introducción mal realizada es causal complementaria de un error muy significativo que pone en duda la calidad del DEM. Esta validación se realizó calculando el EMC obtenido de la diferencia de las altitudes entre los puntos de control (X, Y, Z) tomados con GPS, y las generadas por los dos modelos, esta validación involucro 1768 datos y cuyos resultados fueron satisfactorios debido a la disminución del EMC del modelo generado en este

proyecto, estos valores de errores se encuentran consignados en la tabla 3.4.2. Según los estándares de calidad de la USGS el EMC se utiliza para describir la exactitud vertical del DEM y debe realizarse con un mínimo de 28 puntos de control: 20 puntos interiores y 8 de borde para garantizar su validez.

Tabla 3.4.2: EMC para los residuos producto del proceso de validación con datos del GPS diferencial.

Modelo	EMC
DEM Cartografía	19.505
DEM Final	7.036

Con los parámetros de la tabla 3.4.1 se generó el modelo digital de elevaciones (DEM) de la cuenca experimental Río Sucio (Figura 3.4.3) del municipio Tona (Santander), con una totalidad de 5205 datos tomados en campo con Estación Total, 1803 datos tomados con Rover (GPS) y 8099 datos extraídos de la cartografía IGAC correspondientes a la cuenca, para un total de 15107 datos procesados.

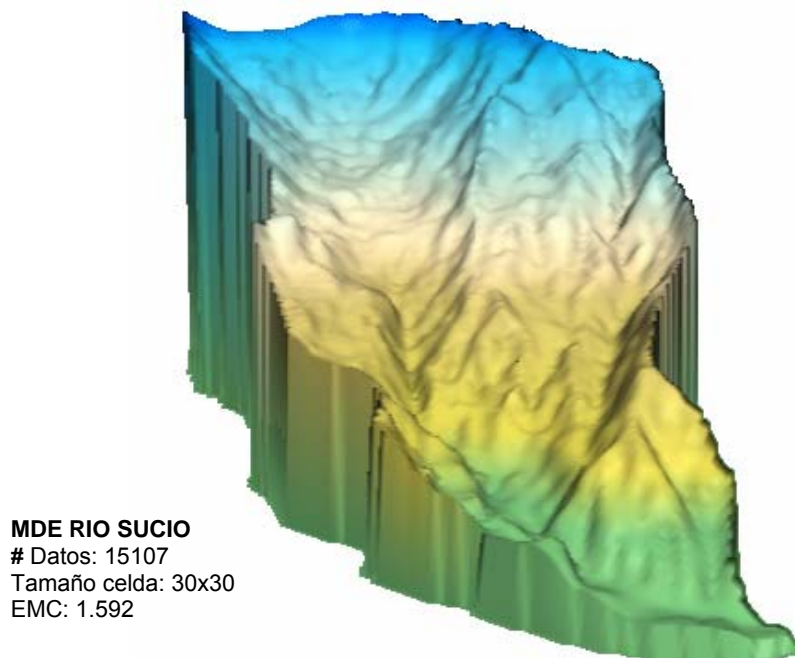


Figura 3.4.3: Modelo digital de elevaciones de la cuenca experimental de Río Sucio incorporando información cartográfica y de campo. (Software Surfer-8.01)

Al igual que en el modelamiento por zonas al modelo final se le hizo un análisis y corrección de sumideros para poder definir la red de drenaje, adicional a este se calcularon y analizaron los demás parámetros morfológicos de la cuenca presentados en el siguiente numeral.

## 4. PARÁMETROS MORFOLÓGICOS

A través del procesamiento de la información topográfica y cartográfica se obtienen parámetros ó constantes que indican las características fisiográficas de la cuenca. Las más importantes son enunciadas en la siguiente sección:

### 4.1 ÁREA, RED DE DRENAJES, CURVA HIPSOMÉTRICA, MAPA DE PENDIENTES, SINUOSIDAD Y COMPACIDAD

- Área: El área de la cuenca es la superficie en proyección horizontal delimitada por el parte aguas y permite clasificar la cuenca de acuerdo a su tamaño como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Clasificación de la cuenca de acuerdo con su tamaño. Tomada de Ortiz, O. 2002

<b>Unidad hidrológica</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>
Micro cuenca	10 - 100
Sub cuenca	101 – 700
Cuenca	Más de 700

La cuenca experimental de Río Sucio posee un área aproximada de 10 Km<sup>2</sup>, que según la tabla 4.1 se clasifica como Micro cuenca.

- Red de drenajes: La red de drenajes que contiene esta cuenca se logró demarcar mejor con la inclusión de los puntos tomados en campo. Esta red la constituyen principalmente ocho cauces: la quebrada el Chorrerón, la quebrada la Colmena, quebrada López, quebrada Figueros, quebrada Relumbrante, quebrada

Casa Balcón, el chorro el Vivito y el cauce principal Río Sucio, como se ve en la figura 4.1.

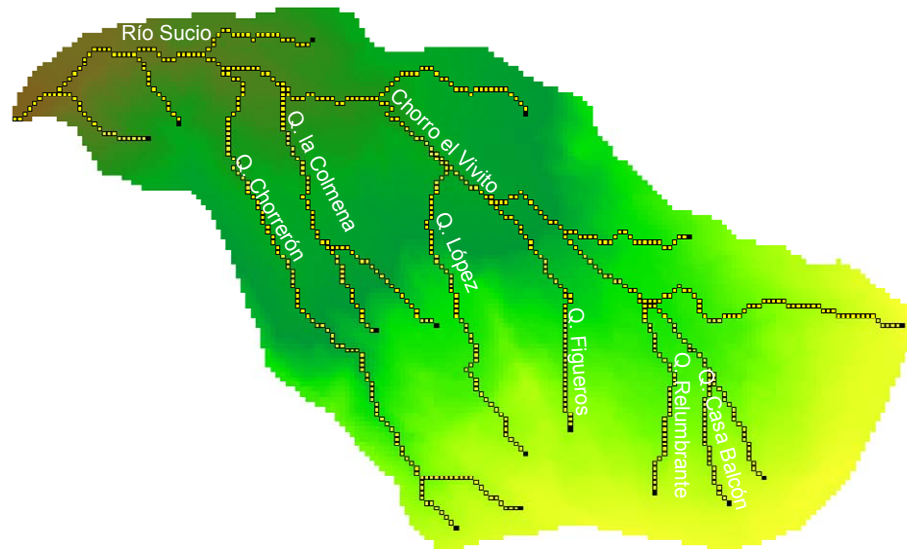


Figura 4.1: Red de drenajes de la cuenca experimental Río Sucio extraída del DEM.

La red de drenajes también permitió clasificar la cuenca como una cuenca exorreica de orden 3 y su punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca exactamente en el sitio conocido como la batea, ubicado sobre la vía que del municipio de Tona conduce hacia a la estación el Gramal.

- Curva hipsométrica: La curva hipsométrica es una gráfica que representa las áreas acumuladas medidas en proyección horizontal entre las curvas de nivel, es una gráfica de porcentajes acumulados de áreas vs las elevaciones respectivas de la cuenca, a partir de esta podemos encontrar la elevación media (figura 4.2).

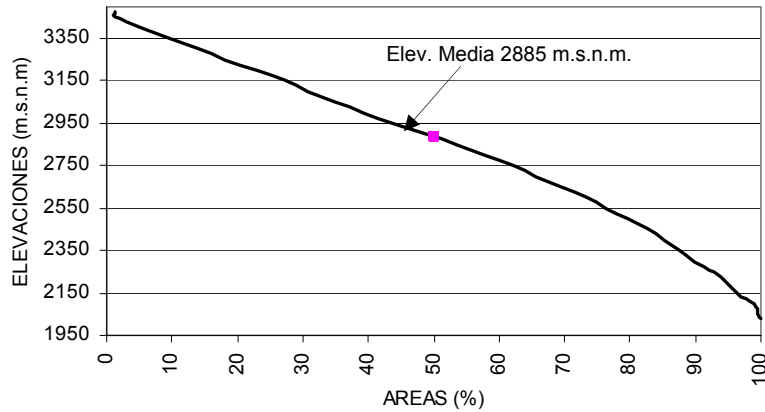


Figura 4.2: Curva hipsométrica y valor de la elevación media de la cuenca

- Mapa de pendientes: El mapa de pendientes indica la inclinación del terreno, tanto en magnitud como en dirección, representada por vectores sobre una escala de colores como se indica en la figura 4.3. La dirección del vector muestra hacia donde desciende el terreno, en tanto que el color señala la magnitud de la pendiente expresada como una razón entre la altitud y la longitud, así un valor de 1 corresponde a una pendiente  $45^\circ$  ó del 100%.

También se logró destacar que la cuenca en su mayoría posee una pendiente media aproximada del 50%, siendo esta relegada en la figura 4.3 por los vectores de color azul, es necesario decir que esta cuenca cuenta con zonas planas y regiones con pendientes muy altas que alcanzan valores hasta del 200%. La pendiente del terreno se encuentra directamente relacionado con el radio de curvatura como se como se verá mas adelante.

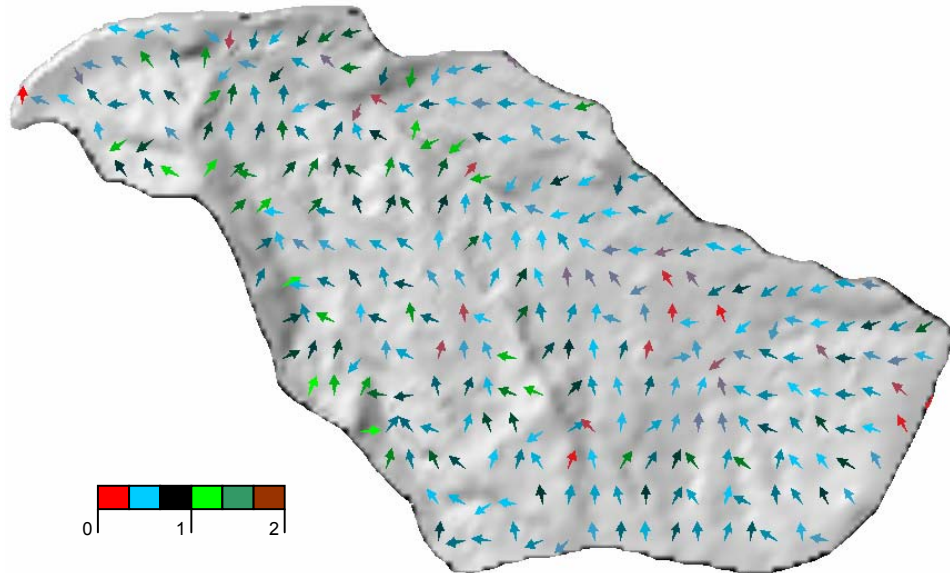


Figura 4.3: Mapa de pendientes de la cuenca experimental Río Sucio (Software Surfer-8.01).

- Índice de sinuosidad: La sinuosidad del curso del agua es un controlador de la velocidad de escurrimiento, a mayor pendiente menor sinuosidad y mayor radio de curvatura de los meandros. El coeficiente de sinuosidad  $St$ , es el cociente entre la longitud del valle  $L_v$ , y la del eje del río  $L_e$  (Ecuación 16), (las longitudes son las proyecciones de los valores reales sobre un plano horizontal).

$$St = \frac{L_v}{L_e} \quad (16)$$

$$St = \frac{5579}{6293} = 0.886$$

Un valor de sinuosidad igual 0.886 y una pendiente media de 50% indica poca curvatura en el cause de las quebradas como se puede apreciar en la figura 4.1.

- Coeficiente de Gravelius ó índice de compacidad: Parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Este parámetro, describe la geometría de la cuenca y está

estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico. Las cuencas redondeadas tienen tiempos de concentración cortos con gastos pico muy fuertes y recesiones rápidas, mientras que las alargadas tienen gastos pico más atenuados y recesiones más prolongadas. El índice de compacidad es calculado de acuerdo con la ecuación 17.

$$K_c = 0.28PA^{-1/2} \quad (17)$$

Donde:

$P$  = Perímetro de la cuenca (14.27 Km.)

$A$  = Área de la cuenca (10 Km<sup>2</sup>)

$$K_c = 0.28(14.27)(10)^{-1/2}$$

$$K_c = 1.264$$

La forma de la cuenca, en concordancia con el valor que adopte el índice de compacidad, se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Forma de la cuenca según el índice de compacidad.

Clase de forma	Índice de compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 - 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 - 1.50	Oval-redonda a oval-oblonga
Clase III	1.51 - 1.75	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

De acuerdo con el índice de compacidad y la tabla 4.2 la cuenca es de clase II y tiene una forma oval-redonda a oval-oblonga.

## CONCLUSIONES

Se mejoró la información cartografía IGAC notablemente con la medida directa de la altitud sobre el terreno (Levantamiento topográfico, GPS) en la fase de campo, pues permitió definir mejor las zonas que no representaban claramente la superficie real del terreno. El 35% del área total de la cuenca lo constituyen once zonas para las cuales fue posible obtener buena densidad de información (X, Y, Z), que permitieron generar once modelos (sección 3.3.1) con tamaños de celdas de 5 x 5 mts para siete de estos y de 10 x 10 mts para los restantes. Para el 65% del área restante de la cuenca no fue posible realizar levantamientos y por consiguiente obtener información, debido a que estas zonas están constituidas por pendientes muy altas, paredes verticales, presencia de bosques y relieve escarpado (Fotos 2.2 y 2.3) que impedían el desplazamiento a través de ellas. Sin embargo las zonas de mayor deficiencia de información eran las zonas llanas y onduladas que fueron precisamente las que se trabajaron y las que ayudaron a darle mayor detalle al modelo final.

Debido a los errores generados en el proceso de restitución de las fotografías aéreas y a los cambios en la morfología de la cuenca, no se podía integrar la información cartográfica y los datos (X, Y, Z) obtenidos durante la etapa de campo, sin antes encontrar el proceso de ajuste que conservara la información de mayor calidad (Datos de campo) y que no alterara la forma real del terreno en el modelo. La necesidad de este proceso de ajuste se evidenció aun más cuando a la información cartográfica, se le adicionaron los datos de campo sin ninguna modificación para generar el modelo, pues el EMC pasó de 1.868 a 7.717, también se visualizaron fuertes picos y apreciables sumideros que no correspondían con lo observado en campo.

Este proceso de ajuste fue presentado en el numeral 3.2 del capítulo 3 y consistió básicamente en ajustar la información cartográfica a la información de campo. De este proceso se obtuvieron buenos resultados pues disminuyó el EMC a 1.592 y se logró la representación real del terreno en el modelo, una vez rasterizada la información con el mejor método de interpolación, Radial Basis Function (Multiquadric) (Tabla 3.4.1), pues fue el que presentó menor error durante el proceso de validación cruzada.

Este modelo a diferencia del anterior se distingue por tener una mejor definición de las zonas que inicialmente presentaban deficiencia de información (X, Y, Z), además se logró disminuir el valor del EMC de 1.868 (Tabla 3.2.1) a 1.592 (Tabla 3.4.1) del proceso de interpolación. También se pudo apreciar la disminución del error medio cuadrático obtenido de la diferencia de las altitudes entre los puntos de control (X, Y, Z) tomados con GPS, y las generadas por los dos modelos, el cual pasó de 19.505 a 7.036 mts.

A partir del modelo generado se obtuvieron los parámetros morfológicos básicos de la cuenca con el fin de entender la geomorfología, pues esta es quien controla los volúmenes de escurrimiento y la velocidad de respuesta de la cuenca. De acuerdo al DEM generado en este proyecto, estos parámetros se ajustan más a la realidad pues dentro del modelo se mejoraron gran cantidad de zonas que tenían deficiencia de información y por lo tanto se logró tener una buena definición ó representación real del terreno. Este cambio en la forma del terreno reflejó la necesidad de conocer los nuevos parámetros que controlan directamente la respuesta de la cuenca, a fin de ser utilizados en posteriores proyectos.

Como resultado final del modelo se elaboró la cartografía de la cuenca a escala 1:10000, que contiene curvas de nivel cada 50 metros, la red de drenajes y la localización de los mojones utilizados en la referenciación de las once zonas trabajadas con Estación Total Electrónica (*ver Anexo C*).

## BIBLIOGRAFÍA

- ARMSTRONG, M. y CARIGNAN, J. 1997.** “Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.”, École de Mines de Paris, 112 p., “Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.”, École de Mines de Paris, 112 p.
- BACCHI, B. y KOTTEGODA, N.T. 1995.** Identification and Calibration of Spatial Correlation Patterns of Rainfall, Journal of Hydrology 165, Elsevier Science B.V., pp. 311-348.
- DAVID, M. 1977.** Geostatistical Ore Reserve Estimation, Elsevier, Amsterdam, 364 p.
- DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM) ACCURACY.** [Online]  
<http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/acrodcs/dem/3DEM0897.PDF>
- DOUGHERTY y GLARDINA, 1987.** Matrix Structured Image Processing, Editorial Prentice-Hall.Inc, Páginas 44-50. New Jersey.
- FELICÍSIMO, A. 1994.** Modelos Digitales del Terreno. Asturias (España), [Online] <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>.
- JOURNEL, A. G. y HUIJBREGTS, C. J. 1978.** Mining Geostatistics, Academic Press, New York, 600 p.
- KRAJEWSKI, S. A. y GIBBS, B.L. 1993.** A Variogram Primer, Gibbs Associates, 93 p.

- LAMOREY, G. y JACOBSOM, E. 1995.** Estimation of Semivariogram Parameters and Evaluation of the Effects of Data Sparsity, *Mathematical Geology*, Vol.27, No.3, pp. 327-358.
- MATHERON, G. 1970.** “La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications” *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5, Ecole de Mines de Paris*, 212 p.
- ORTIZ, O. 2002.** Evaluación hidrológica. Lima (Perú). [Online] <http://www.itdg.org.pe>.
- RAMIREZ, J. 2002.** Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales del terreno, Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- ZHANG, X.F., VAN EIJKEREN, J.C.H. y HEEMINK, A.W. 1995,** On the Weighted Least Squares Method for Fitting a Semivariogram Model, *Short Note, Computers & Geosciences*, Vol. 21, No. 4, pp. 605,608.
- MANUAL DEL USUARIO SURFER. 2004.** Golden Software, Inc.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

### Procesamiento de los datos de campo

Todo trabajo de campo se complementa con su respectiva etapa de oficina. Para llevar a cabo esta etapa se transfirieron los datos de campo a formato digital a través de una hoja de cálculo de Microsoft Excel como paso fundamental para el procesamiento de los datos. En esta manipulación de la información se tiene en cuenta el siguiente orden:

1. Conversión de ángulos: debido a que Microsoft Excel reconoce los ángulos en sistema decimal fue necesario convertir del sistema grados, minutos y segundos al sistema decimal y posteriormente a radianes para el cálculo de las funciones trigonométricas necesarias para la determinación de las coordenadas, de la siguiente manera:

$$172^{\circ}56'20'' \rightarrow 172 + \frac{56}{60} + \frac{20}{3600} = 172.93888$$

$$172.93888 * \frac{\pi}{180} = 3.01835 \text{ radianes}$$

2. Cálculo de azimut y contrazimut: Con el fin de ubicar geográficamente los datos de cada zona es necesario ver como se encuentran posicionados con respecto a la norte verdadera, mediante el cálculo del azimut de la línea de ceros y de los contrazimut para transportar la norte a los demás cambios realizados en cada zona. Con las coordenadas del mojón y del punto de ceros tomadas del resultado del proceso de corrección diferencial anteriormente mencionado se calcula el azimut de la línea que une estos dos así:

Coordenadas BM2:  
Norte: 1287125.799 m  
Este: 1125633.630 m

Coordenadas CEROS:  
Norte: 1287072.570 m  
Este: 1125683.735 m

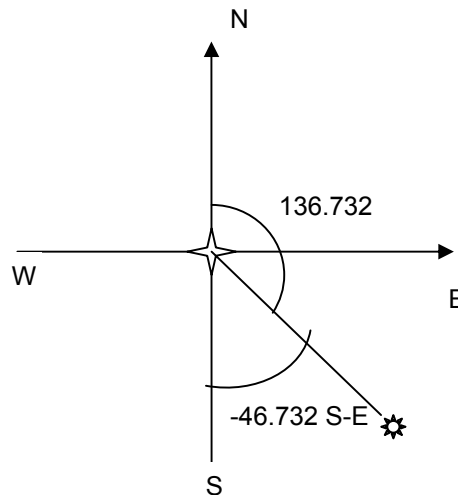
$$\text{AZIMUT} = \text{ATAN} \left[ \left( \frac{\Delta \text{Este}}{\Delta \text{Norte}} \right) \right] * \frac{180}{\pi}$$

$$\text{AZIMUT} = \text{ATAN} \left[ \left( \frac{1125633.630 - 1125683.735}{1287125.799 - 1287072.570} \right) \right] * \frac{180}{\pi}$$

$$\text{AZIMUT} = -46.732 \text{ S - E}$$

$$\text{AZIMUT} = -46.732 + 180$$

$$\text{AZIMUT} = 136.732$$



$$\text{CAz} = \angle \text{Horiz. del cambio} + \text{Az. anterior} \pm 180^\circ$$

$$\text{CAz} = 192.122 + 136.732 - 180$$

$$\text{CAz} = 148.854$$

3. Cálculo de proyecciones y coordenadas: cada punto tomado a partir de la estación esta referenciado de acuerdo a las coordenadas de la estación (sitio ubicación del BM), esta referenciación se hace calculando las proyecciones de cada punto y adicionándole las coordenadas norte y este del BM para obtener su ubicación geográfica: (los siguientes cálculos corresponden al BM 2)

Proyecciones :

$$N - S = \text{Cos} \left( \left( \angle \text{Hor.} + \text{Azimut} \right) * \frac{\pi}{180} \right) * \text{Distancia}$$

$$N - S = \text{Cos} \left( \left( 0 + 148.854 \right) * \frac{\pi}{180} \right) * 70.196 \text{ m}$$

$$N - S = -51.113$$

$$E - W = \text{Sen} \left( \left( \angle \text{Hor.} + \text{Azimut} \right) * \frac{\pi}{180} \right) * \text{Distancia}$$

$$E - W = \text{Sen} \left( \left( 0 + 148.854 \right) * \frac{\pi}{180} \right) * 70.196 \text{ m}$$

$$E - W = 48.113$$

Coordenadas :

$$N = \text{Coordenada Norte BM} + \text{Proy. N - S}$$

$$N = 1287125.799 \text{ m} + (-51.113) \text{ m}$$

$$N = 1287074.686 \text{ m}$$

$$E = \text{Coordenada Este BM} + \text{Proy. E - W}$$

$$E = 1125633.630 \text{ m} + 48.113 \text{ m}$$

$$E = 1125681.743 \text{ m}$$

4. Cálculo de las altitudes: Para complementar la información que acompañara cada punto (Norte, Este, Altitud) se termina esta fase con el cálculo de la cota respectiva de la siguiente manera:

$$\text{Altitud} = \text{Cota BM} + \text{VD (altura entre la estación y el prisma)} - \text{altura de prisma} + \text{altura de la estación}$$

$$\text{Altitud} = 3053.621 + 23.650 - 2.50 + 1.490$$

$$\text{Altitud} = 3076.261 \text{ m.s.n.m.}$$

Este procedimiento se realizó para la totalidad de los datos (5205) obtenidos con la estación total electrónica durante los 45 días de la fase de campo y están consignados en el archivo en formato Excel llamado: [E:\Carteras.xls](#)

## ANEXO B

### Fotos

En este anexo se muestran algunas fotos que corresponden a la cuenca, con el fin de mostrar mas a detalle su topografía y poderla comparar con los modelos de las zonas y el modelo final obtenidos durante capítulo 3 de este proyecto. También aquellas zonas donde no se obtuvo información durante la fase de campo debido a su difícil acceso, por sus características físicas como: terreno escarpado, pendientes mayores del 60% y presencia de bosques.



Foto B.1: Zona alta de la cuenca conocida como Figueroa que no fue trabajada durante la fase de campo debido a sus condiciones topográficas. Fuente: fotografía cedida por Rojas y Ulloa, 2005. Proyecto de grado.



Foto B.2: Río Sucio, Zona X, zona XI y parte de las zonas V, VIII, IX. Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.3: Parte de la divisoria superior de la cuenca. Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.4: Zona VI (López). Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.5: Parte Sur-Oeste de la cuenca comprendida por una parte de la divisoria sur, desembocadura de la quebrada El Chorrerón y Quebrada la Colmena. Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.6: Zona conocida como El Uvo, ubicada en la parte superior de la cuenca. Esta Zona no fue trabajada debido a su difícil acceso. Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.7: Bellavista, parte de la zona IX trabajada con Estación Total Electrónica. El cerro que se encuentra en la parte superior derecha es conocido como Las Cruces y al fondo se observa la parte plana de la zona X conocida como La Casita.



Foto B.8: Zona II conocida como La Cueva.



Foto B.9: Zona VII, El Progreso. Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.10: Parte superior de la zona X, ubicada abajo de la zona VIII (El Carbón) y al norte de la zona VII (El Progreso). Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.11: Parte superior de la zona VI (López). Esta zona no fue trabajada debido a sus pendientes altas y la presencia de bosques. Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)



Foto B.12: A la izquierda se observa la zona IX, al centro la Zona VIII y a la derecha la zona VII. Estas zonas fueron trabajadas con Estación Total Electrónica. . Fuente: (Rojas y Ulloa, 2005)

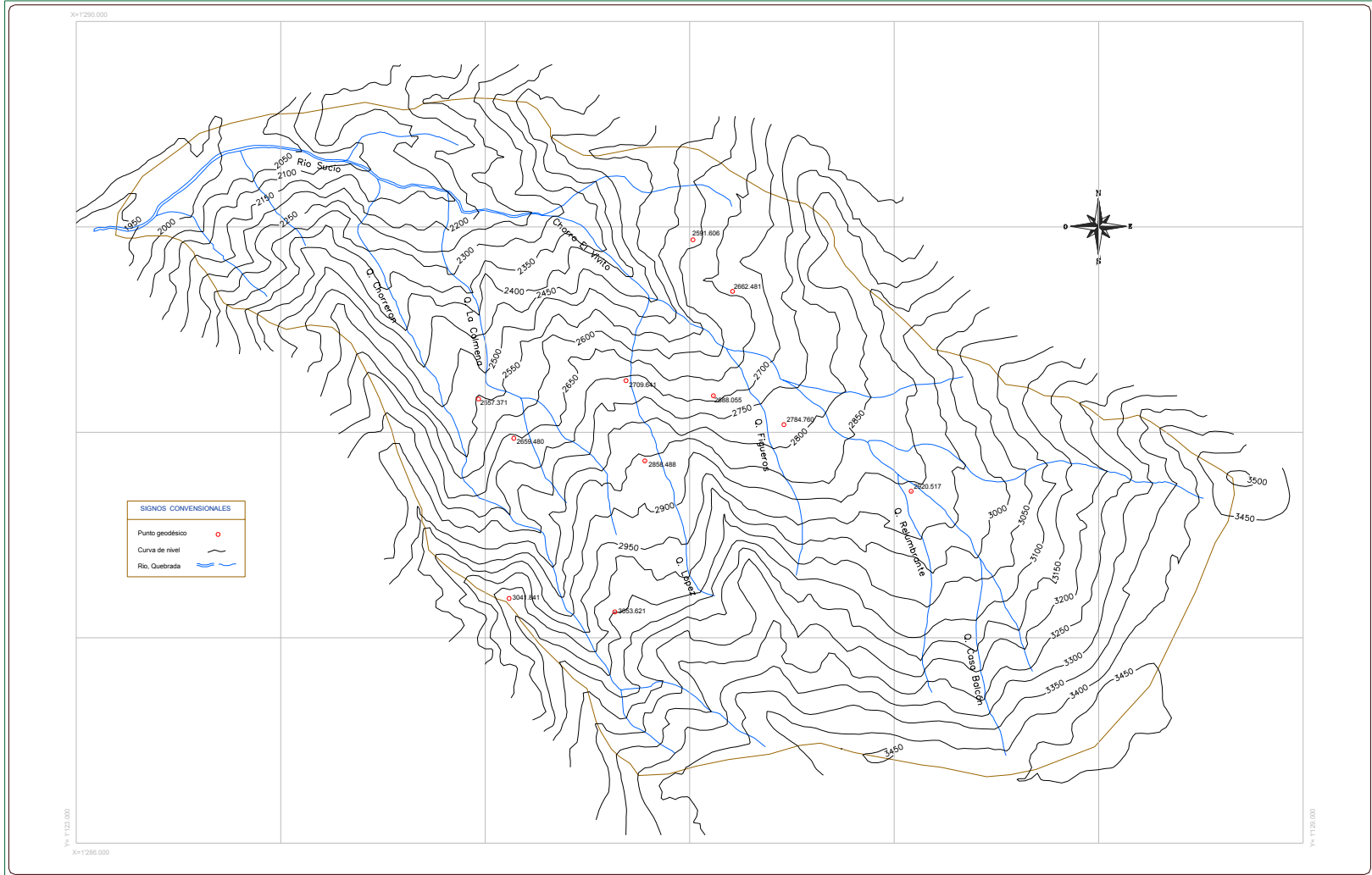


Foto B.13: Nacimiento de Río Sucio, ubicada entre la zona VII y la zona X. Zona comprendida por un deslizamiento y un enrocado vertical.

## ANEXO C

### PLANO TOPOGRAFICO DE LA CUENCA

Este plano a escala 1:10000 contiene curvas de nivel cada 50 metros y la red de drenajes de la cuenca generadas a partir del modelo digital de elevaciones desarrollado en este proyecto, también la localización de los BMs utilizados en la referenciación de las once zonas trabajadas con Estación Total Electrónica. De esta manera se logró mejorar la información cartográfica existente de la cuenca.



 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL</b>	<b>PROYECTO:</b> DESARROLLO DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA CUENCA DE RIO SUCIO MUNICIPIO DE TONA	<b>CONTIENE:</b> PLANO TOPOGRAFICO DE LA CUENCA GENERADO A PARTIR DEL DEM	<b>PRESENTA:</b> CARLOS ANDRES BUENAHORA B. HENRY OSORIO CUEVAS	<b>REVISO:</b> ING. M.Sc. JORGE A. GUZMAN J.	<b>FECHA:</b> MARZO DE 2005	<b>SON:</b> 1
							<b>ESCALA:</b> 1 : 10000