

**ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y
GENERACIÓN DEL MAPA DE CLASIFICACION VEGETAL PARA LA
CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA**

Deimer Ariel Pérez Solano

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2010

**ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y
GENERACIÓN DEL MAPA DE CLASIFICACION VEGETAL PARA LA
CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA**

Deimer Ariel Pérez Solano

Trabajo de grado para optar el titulo de

Ingeniero Civil

Director:

Sully Gómez Isidro

Ing. Civil, M.sc., PhD

Co-Director:

José Alfredo Rueda Núñez

Ing. Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2010

A DIOS...

A mi madre Leonarda y a mi padre Teddy por su continuo apoyo, no solo en mi carrera, sino también en toda mi vida, por ser mi fuerza en los momentos difíciles y compartir conmigo mis mejores triunfos...

A mi hermano Divier y mi hermana Dailyn, los amores de mi vida, y la razón por las que doy todo de mí para ser un buen ejemplo...

A mis Abuelas Carmen y María por sus oraciones...

A Ana por su apoyo, por su amor, por creer en mí y acompañarme en las buenas y en las malas...

A mis familiares y amigos por su apoyo...

DEIMER

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mis padres por su inagotable apoyo en el desarrollo de este proyecto y su inmensa colaboración durante todas las etapas de mi formación profesional y personal. De igual forma mi agradecimiento a toda mi familia, profesores, amigos por su colaboración y su confianza.

Al grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático GPH, a todos sus integrantes, compañeros y en especial a la Doctora Sully Gómez Isidro por su excelente dirección y por brindarme las herramientas y todo el apoyo necesario para la culminación exitosa de este trabajo.

Al Ingeniero José Alfredo Rueda Núñez por su valiosísima colaboración y su excelente dirección en todas las etapas de este proyecto.

Al Geólogo Jorge Pinto por su desinteresada y siempre dispuesta colaboración.

A la Corporación Autónoma para la defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, por su colaboración al suministrar la información base para el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CONCEPTUALIZACIÓN Y REVISIÓN DEL ARTE DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES EN LA REGIÓN DE SANTANDER	3
1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACION (MDE)	3
1.1.1 Definición de MDE.....	4
1.1.2 Estructura de datos de un MDE.....	4
1.1.2.1 Estructura Vectorial.....	5
1.1.2.2 Estructura Raster.....	5
1.1.3 Interpolación o llenado de espacios.	6
1.1.4 Procesos de validación del MDE.	6
1.2 REVISIÓN DEL ARTE DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN GENERADOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER	8
2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES A PARTIR DE IMÁGENES DE RADAR (SRTM) REFERENCIADO EN MAGNA – SIRGAS	10
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN SOBRE MAGNA – SIRGAS	11
2.1.1 Sistema Internacional de Referencia (ITRS).	11
2.1.2 Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas: SIRGAS.	12
2.1.3 MAGNA: Marco Geocéntrico Nacional de Referencia.	12
2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA A PARTIR DE IMÁGENES DE RADAR (SRTM)	15
2.2.1 Ubicación y descripción general de la zona de estudio.	15
2.2.1.1 Localización.....	15

2.2.1.2	Hidrografía.....	16
2.2.2	Imágenes de radar de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). 17	
2.2.3	Procesamiento de la información y generación del MDE.....	19
2.2.3.1	Traslación del sistema de referencia de las imágenes de radar a MAGNA-SIRGAS.....	19
2.2.3.2	Resolución y espacialización de MDE.	21
2.2.3.3	Validación del MDE.....	23
3.	CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA CSRL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES	31
3.1	TELEDETECCIÓN.....	31
3.1.1	Principios Físicos de Teledetección.	32
3.1.2	Firma Espectral.	32
3.2	CARTOGRAFÍA BASE PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA CSRL	33
3.2.1	Planes de Ordenamiento Ambiental de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo.	34
3.2.2	Cartografía unificada de la clasificación vegetal de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo en ArcGIS.	34
3.3	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA CSRL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES	37
3.3.1	Recolección y Análisis de la información satelital.....	37
3.3.2	Tratamiento de Imágenes y formato de bandas.	38
3.3.3	Clasificación Supervisada de imágenes satelitales.....	39

3.3.3.1	Entrenamiento.	40
3.3.3.2	Clasificación.....	41
3.3.3.3	Post – Clasificación.....	43
3.3.3.4	Mapeo.....	43
3.3.4	Resultados y Validación del mapa de clasificación vegetal.	44
3.3.4.1	Matriz de confusión de los temas y sus muestras.	45
3.3.4.2	Validación de los resultados.	47
4.	APROXIMACION A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO INTEGRANDO EL MDE Y EL MAPA DE CLASIFICACIÓN VEGETAL.....	50
4.1	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA	50
4.2	INTEGRACION DEL MDE Y EL MAPA DE CLASIFICACION VEGETAL DE LA CSRL AL ENTORNO SIG DE ARCGIS	52
4.2.1	Migración del MDE de la CSRL al software ArcGIS.....	53
4.2.2	Migración del mapa de clasificación vegetal de la CSRL al software ArcGIS. 53	
4.2.3	Creación del SIG.....	54
5.	PRODUCTOS FINALES Y ANALISIS DE RESULTADOS	56
5.1	MODELO DIGITAL DE ELAVACIONES DE LA CSRL.....	56
5.2	MAPA DE CLASIFICACIÓN VEGETAL	60
5.3	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO INTEGRANDO EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y EL MAPA DE CLASIFICACIÓN VEGETAL.....	62
	CONCLUSIONES	64

RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	68
ANEXOS	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de la revisión del estado del arte de los Modelos Digitales de Elevación generados en Santander	9
<i>Tabla 2:</i> Diferencias entre el Datum BOGOTÁ y MAGNA-SIRGAS	13
<i>Tabla 3:</i> Subcuencas hidrográficas de la CSRL.....	17
Tabla 4: Parámetros para la definición del sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS	21
Tabla 5: Error medio Cuadrático para diferentes algoritmos de interpolación ..	23
Tabla 6: Valor del Zresidual para cada uno de los puntos muestrales	24
Tabla 7: Estadísticos para los datos muestrales	26
Tabla 8: Coeficiente de Chauvenet para distintos tamaños de muestra	27
Tabla 9: Resultado de la segunda aplicación del criterio de Chauvenet.....	28
Tabla 10: Resultados del test t de student	29
Tabla 11: Clases temáticas para la clasificación vegetal	35
Tabla 13: Características de la Imagen Landsat ETM+.....	38
Tabla 14: Resultados de la matriz de clasificación para cada clasificador	42
Tabla 15: Matriz de confusión del tema para el clasificador Maxver 100%	45
Tabla 15: Áreas clasificada para cada grupo temático	47
Tabla 16: Ubicación y clasificación de los puntos tomados en campo	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localización de la Cuenca Superior del Río Lebrija	16
Figura 2: Imagen SRTM del territorio Colombiano	18
Figura 3: Imagen SRTM de la zona de estudio	20
Figura 4: Firma espectral para distintos tipos de cobertura	33
Figura 5: Clasificación vegetal integrada de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo a partir de los POATs	36
Figura 6: Etapa de Entrenamiento	40
Figura 7: Funcionamiento de un SIG	51
Figura 8: MDE en 3D de la región que contiene la CSRL en Surfer	57
Figura 9: MDE en 3D de la Cuenca Superior del Río Lebrija en Surfer	58
Figura 10: Mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del Río Lebrija.....	61

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A

Anexo A 1: Coordenadas MAGNA-SIRGAS de los orígenes de las zonas de proyección plana Gauss-Krüger en Colombia.....	73
Anexo A 2: Coordenadas en Datum BOGOTÁ de los orígenes de las zonas de proyección plana Gauss-Krüger en Colombia.....	73
Anexo A 4: Constantes del elipsoide GRS80 asociado a MAGNA-SIRGAS para conversión de coordenadas.....	74
Anexo A 5: Parámetros regionales de transformación, según el modelo Molodensky-Badekas, para migrar información georreferencia en Datum BOGOTÁ al sistema MAGNA-SIRGAS.....	74
Anexo A 6: Mapa de pendientes generado a partir del MDE.....	75

ANEXO B

Anexo B 1: Porcentaje representativo en cada tema en la clasificación supervisada con clasificador Maxver	75
Anexo B 2: Matriz de confusión para las muestras de los temas Bosque Natural Secundario y Cultivos Mixtos.....	76
Anexo B 3: Matriz de confusión para las muestra del tema Zona Urbana	76
Anexo B 4: Matriz de confusión para las muestras de los temas Cultivos Semipermanentes y Pastos Naturales	77
Anexo B 5: Matriz de confusión para las muestras de los temas Rastrojos y Pajonales.....	77
Anexo B 6: Matriz de confusión para las muestras de los temas Cultivos, Pastos Rastrojos y Vegetación de Páramo.....	78
Anexo B 7: Puntos de control para georreferenciación de las imágenes satelitales	78

Anexo B 8: Matriz de confusión para el clasificador Distancia Mínima Euclidiana	79
Anexo B 9: Registro fotográfico de la zona del estudio	79

ANEXO C

Anexo C 1: Vista 3D del MDE de la CSRL.....	84
Anexo C 2: Mapa de pendiente combinado con las elevaciones del MDE	84
Anexo C 3: Mapa de clasificación vegetal combinado con las elevaciones del MDE	85

RESUMEN

TITULO:

ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y GENERACIÓN DEL MAPA DE CLASIFICACION VEGETAL PARA LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA*

AUTOR:

PEREZ SOLANO DEIMER ARIEL**

PALABRAS CLAVES:

Cuenca, Modelo Digital de Elevaciones, Píxel, Imágenes Landsat, Clasificación Vegetal, SIG, Raster.

DESCRIPCION:

Los objetivos principales de este proyecto fueron elaborar el Modelo digital de Elevaciones y la Clasificación Supervisada de la Cobertura Vegetal de la Cuenca Superior del río Lebrija. El desarrollo del Modelo Digital de Elevaciones se realizó a partir de imágenes de radar SRTM con resolución espacial de 1 segundo de arco, el modelo definitivo se generó con un tamaño de celda de 30x30 metros a partir del interpolador Kriging Lineal y se referenció al sistema coordenado geocéntrico MAGNA-SIRGAS. La validación del modelo se realizó a partir de 40 puntos reales tomados en campo, obteniéndose un Error Medio Cuadrático de 4.158 metros.

La Clasificación Supervisada fue realizada a partir de imágenes Landsat 7 ETM+, la información contenida en cada una se encuentra distribuida en 8 bandas con diferente longitud de onda. Para este trabajo fueron utilizadas las bandas 3, 4, 5 y la cartografía de cobertura vegetal disponible en los Planes de Ordenamiento Ambiental de las subcuencas de Río de Oro, Río Tona y Suratá Bajo de la CDMB. La validación del mapa de vegetación obtenido se realizó con el reconocimiento de la zona, a través de observaciones de campo en las cuales se tomaron las coordenadas y material fotográfico de 25 puntos.

Se generó además un Sistema de Información Geográfica que integra el Modelo Digital de Elevaciones, la clasificación vegetal y el mapa de pendiente para la Cuenca Superior del Río Lebrija enmarcado en el sistema de referencia MAGNA SIRGAS.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora Sully Gómez Isidro. Codirector José Alfredo Rueda Núñez.

ABSTRACT

TITLE:

DEVELOPMENT OF A DIGITAL MODEL OF ELEVATIONS AND GENERATION OF THE VEGETAL CLASSIFICATION MAP FOR THE UPPER BASIN OF THE RIO LEBRIJA RIVER*

AUTHOR:

PEREZ SOLANO DEIMER ARIEL**

KEYWORDS:

Basin, Digital Model of Elevations, Pixel, Landsat Images, Vegetal Classification, SIG, Raster.

DESCRIPTION:

The main objectives of this project were to develop the Digital Elevation Model and Supervised Classification of Vegetation Cover in the upper basin of the Río Lebrija River. The development of Digital Elevation Model was made from SRTM radar images with spatial resolution of 1 arc second, the final model was generated with a cell size of 30x30 meters from Linear Kriging interpolator and referenced to the geocentric coordinate system MAGNA-SIRGAS. The Model validation was conducted from 40 real points taken in the field, obtaining a mean square error of 4.158 meters.

The Supervised Classification was made based on Landsat 7 ETM + images; the information contained in each image is distributed in eight different bands with different wavelength. For this work were used the bands 3, 4, 5 and vegetation maps available in the Environmental Management Plans for the watersheds in Rio de Oro, Rio Tona and Surata Bajo. The validation of the vegetation map obtained was carried out with the recognition of the area, through field observations in which were taken the coordinates and photographic register of 25 points.

It was also generated a Geographic Information System that integrates the Digital Elevation Model, vegetal classification and the map slope for the upper basin of Rio Lebrija River framed in the reference system MAGNA - SIRGAS.

* Work Degree

** Faculty of Physic Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Directress: Sully Gómez Isidro. Codirectress: José Alfredo Rueda Núñez.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Superior del Río Lebrija está localizada en el departamento de Santander. En esta cuenca hidrográfica se encuentran los municipios de Piedecuesta, Girón, Floridablanca, Bucaramanga, Suratá, Charta, Vetas y Tona, los cuales son beneficiarios de los recursos hídricos proporcionados por la cuenca y que son de vital importancia para el sostenimiento de sus actividades, agronómicas, ganaderas, domesticas, etc.

Es debido a la dependencia de estos recursos que se presenta la necesidad estudiar e investigar las características geomorfológicas e hidrogeológicas de la cuenca para así poder generar información que permita disminuir la incertidumbre en estos aspectos, mediante la elaboración de modelos conceptuales y prácticos para así proponer soluciones eficaces que tiendan a garantizar el manejo de los recursos hídricos en forma sostenible.

En pro de la consecución de esta meta, el presente estudio tiene como objetivos principales la elaboración del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), la clasificación de la cobertura vegetal presente en la cuenca y la integración de ésta información en un Sistema de Información Geográfico, todo lo anterior, generado a partir de tecnologías de percepción remota y enmarcado en un sistema de referencia coordinado geocéntrico, compatible con las tecnologías de posicionamiento global, lo cual ofrece una ventaja significativa respecto a los otros modelos generados para la cuenca, los cuales han sido creados a partir de cartografías digitales que no comparten las propiedades de compatibilidad con las nuevas tecnologías de posicionamiento.

Los productos finales de este estudio brindarán las herramientas para la construcción de modelos hidrológicos. Particularmente, constituirán algunos de los insumos necesarios en la aplicación de la metodología FAO Penman – Monteith para Evapotranspiración Real, específicamente en la determinación del coeficiente de cultivo (K_c) y del coeficiente de estrés hídrico (K_s). El presente informe está estructurado de la siguiente manera. El capítulo uno describe la revisión del estado del arte de los MDE generados en el departamento de Santander, además de una breve conceptualización a cerca de los MDE. El capítulo 2 establece el marco de referencia en la adopción e implementación del sistema de referencia MAGNA-SIRGAS y describe el procedimiento mediante el cual se generó y validó el MDE para la CSRL. El capítulo 3 hace referencia al proceso de clasificación supervisada de la cobertura vegetal en la cuenca y su respectiva validación. El capítulo 4 muestra la metodología aplicada en la integración del MDE y el mapa de clasificación vegetal a un Sistema de Información Geográfico y en el capítulo 5 se realiza el análisis de los resultados obtenidos con la metodología aplicada durante el proyecto. Las conclusiones y recomendaciones se muestran al final del documento.

En la realización del presente trabajo, se utilizaron una serie de software para el procesamiento de los datos y su posterior visualización y mapeo. En la Elaboración del Modelo Digital de Elevaciones, se utilizó el software comercial *Surfer v.9*, junto con herramientas de office 2007. La clasificación supervisada se realizó mediante el uso del software libre *Spring v 5.1.5*. Los procesos de transformación de formatos, la importación de capas de información, el mapeo y la generación del Sistema de Información Geográfico se realizaron mediante el software comercial ArcGIS v.9.3.1. La cartografía digital utilizada se incorporó a partir del software comercial AutoCAD.¹

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

Capítulo 1

1. CONCEPTUALIZACIÓN Y REVISIÓN DEL ARTE DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES EN LA REGIÓN DE SANTANDER

En este capítulo se realizará la revisión del arte de los Modelos Digitales de Elevaciones generados para la Cuenca Superior del Río Lebrija la cual es abastecedora de recurso hídrico en el departamento de Santander, considerando aspectos como insumos, metodología de trabajo y calidad del producto obtenido.

El Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) de la Universidad Industrial de Santander, así como entidades públicas y privadas en el departamento de Santander, se han preocupado por el estudio y el modelamiento de las variables físicas asociadas a los sistemas hidrológicos en presentes en el departamento de Santander.

A continuación se hace una breve conceptualización acerca de los MDE y una descripción de los modelos de elevación desarrollados por el grupo en el departamento de Santander con el fin de conocer la experiencia que se tiene sobre estas herramientas.

1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACION (MDE)

El uso de los modelos digitales de elevación (MDE) se ha extendido a un sinnúmero de ámbitos como los estudios topográficos o geológicos, así como modelos hidrológicos; prueba de ello son las aplicaciones en la estimación de la evapotranspiración, del drenajes y otras características fisiográficas, fundamentales a la hora de elaborar modelos hidrogeológicos conceptuales.

1.1.1 Definición de MDE. “Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es una estructura discreta de datos que representan de manera digital una variable continua que se distribuye en el espacio sobre una superficie de dos dimensiones” (Felicísimo A., 1994), las que comúnmente se representan con las letras X, Y; a la variable continua se suele representar con la letra Z y generalmente corresponde a la altitud de la superficie del terreno.

La estructura interna del MDE utiliza una función que relaciona la variable elevación con las coordenadas superficiales (x, y) de un punto en el terreno sobre un marco espacial determinado. A pesar que esta función no es continua, puede resolverse en intervalos que serán definidos por la cantidad (muestreo) y calidad (resolución) de los datos obtenidos en el levantamiento topográfico, restitución fotogramétrica, etc. y la resultante pérdida de información debido a los errores cometidos durante la transformación del modelo a una forma discreta en la búsqueda de una estructura de datos eficaz.

El proceso para la generación del modelo, parte de la información primaria y/o secundaria² 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 represente el terreno con la mayoría de los datos obtenidos. (Buenahora C. y Osorio H., 2005)

1.1.2 Estructura de datos de un MDE. De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud, z, al que acompañan los valores correspondientes de x e y, expresados en un sistema de proyección geográfica para una referenciación espacial precisa. Las variantes aparecen cuando se definen las interrelaciones entre estas unidades elementales de información.

La configuración de estas interrelaciones es lo que conforma las diferentes opciones en la estructura de datos. La determinación de una u otra estructura

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

es muy importante en la construcción del MDE, pues de ésta depende el futuro manejo de la información.

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

Históricamente, los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: **vectorial** y **raster**.

1.1.2.1 Estructura Vectorial. En los modelos con estructura vectorial los datos que conforman los atributos del terreno están representados por puntos acotados y por líneas. Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas y las líneas, por tanto, mediante un vector de pares de coordenadas. La altitud puede ser única para la línea o diferente para cada punto integrante de la misma. La simplicidad inicial puede perderse, evolucionando hacia otras estructuras donde, por ejemplo, los vectores son segmentos rectilíneos y se encuentran organizados topológicamente de forma más o menos compleja. (Felicísimo A., 1994)

1.1.2.2 Estructura Raster. Es la forma más común de representar la variación de una superficie continua sobre un área determinada, su componente principal son áreas rectangulares organizadas de forma matricial, cada una de las cuales reciben el nombre de celda o píxel y su unión genera la malla regular o grilla del modelo (Ver Figura 1); Cada celda ha de ser rectangular, aunque no necesariamente cuadrada. Cada celda de la rejilla

guarda tanto las coordenadas de la localización como el valor temático. La localización de cada celda es implícita, y depende directamente del orden que ocupa en la rejilla.

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

1.1.3 Interpolación o llenado de espacios. La construcción de un MDE matricial a partir de la información contenida en el vectorial es básicamente un problema de interpolación. El planteamiento global del problema podría ser, como sigue: dado un conjunto de puntos con coordenadas (x, y, z) , distribuidos irregularmente, generar un nuevo conjunto de puntos localizados en los nodos de una red regular de forma que la superficie interpolada sea una representación adecuada de la modelizada mediante los datos originales. (Felicísimo A., 1994)

La interpolación se realiza en función de la distancia y consiste en darle valores de importancia o pesos a los puntos que se encuentran alrededor al punto del cual se desea conocer el valor de altitud, asignándole un peso mayor a aquellos que se encuentran cerca y un valor pequeño o nulo a aquellos que se encuentran a gran distancia.

1.1.4 Procesos de validación del MDE. El proceso de validación del MDE consiste en comparar Elevaciones del modelo vs. Elevaciones Reales, esto con el fin de encontrar el error del modelo en contraste con información que se considera real y que puede consistir en puntos correctamente

georreferenciados tomados con GPS u otro aparato de alta precisión. La validación de un MDE arroja un indicador de la calidad del modelo, de acuerdo con estándares pre establecidos por entidades o personas con autoridad en el tema. Un MDE será aceptado o rechazado si cumple o no con los criterios de calidad determinados dicha entidad.

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

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

Donde:

n = Número de puntos considerados.

Z_I = Valor de cota estimado por el MDE.

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

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

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

Donde:

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

Z_{GRID}: Valor de elevación en el DEM para una ubicación espacial determinada.

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

Los parámetros de aceptación del modelo serán definidos por normas y reglamentaciones nacionales.

1.2 REVISIÓN DEL ARTE DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN GENERADOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

La revisión del estado del arte de los MDE generados en el departamento de Santander, se presenta con el fin de realizar un paralelo entre las metodologías y herramientas utilizadas por diferentes autores para la consecución de un Modelo Digital de Elevaciones que represente las características topográficas de diversas zonas dentro del departamento, y brindar las bases para contrastar los resultados de estos modelos, en pro de facilitar la adopción de una u otra metodología, o bien, proponer otro procedimiento que permita generar un MDE de mayor calidad.

En la revisión del estado del arte de los MDE, se tuvo en cuenta la información base a partir de la cual se generaron los MDE, las escalas de trabajo, las herramientas utilizadas, la estructura de datos del MDE, el tamaño de la celda, la determinación del interpolador usado, desarrollo del modelo y el error del mismo. La Tabla 1 muestra un breve resumen de las características de los Modelos Digitales de Elevaciones generados por el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático para en el departamento de Santander

Tabla 1: Resumen de la revisión del estado del arte de los Modelos Digitales de Elevación generados en Santander

Nombre del Modelo	Autor (es)	Información Base	Área de Trabajo (Km2)	Tamaño de Celda	Interpolador Usado	No de puntos para validación	Error
MDE De La Cuenca De Rio Sucio	Buenahora C. y Osorio H. 2005	7008 Puntos GPS y Cartografía IGAC 1:10000	10	30x30	Radial Basis Function - Multicuadratic Software Surfer	28	1,592 m
MDE de la cuenca de la Mesa De Barichara	Villamizar J. 2006	Cartografía IGAC 1:25000	232	50x50	Radial Basis Function - Thin Plate Spline Software Surfer	92	18,07 m
MDE de la Cuenca Superior Del Rio Lebrija	Serrano A. y Balaguera G. 2006	Cartografía IGAC 1:25000	1281	50x50	Radial Basis Function Software Surfer	Sin determinar	Sin determinar
MDE de la Cuenca Superior Del Rio De Oro	Salazar J y Quitian D. 2009	Cartografía IGAC 1:25000	80	30x30	Vecino más cercano Software ArcView	28	5,0 m

Fuente: Modificado por el autor

Capítulo 2

2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES A PARTIR DE IMÁGENES DE RADAR (SRTM) REFERENCIADO EN MAGNA – SIRGAS

El objetivo de éste capítulo es la elaboración de un Modelo Digital de Elevación para la Cuenca Superior del Rio Lebrija, el cual que servirá como insumo para el desarrollo de modelo hidrológicos e hidrogeológicos dentro de la misma. Esta información era obtenida anteriormente de mapas físicos, digitales o información de campo; En la actualidad, debido al fácil acceso a nuevas tecnologías y al avance de las herramientas computacionales, estos datos son extraídos de información satelital y de radar los cuales proporcionarán una mejora significativa a la precisión de los modelos generados a partir de ellos.

En Colombia, hasta hace muy poco, resultaba muy difícil el aprovechamiento de éstas nuevas técnicas de espacialización y geoprocésamiento debido a la incompatibilidad del sistema de referencia coordinado de la cartografía utilizada en el país con el sistema en el cual están alojadas las imágenes satelitales, de radar y los sistemas de navegación global GNSS³, incluidos los GPS⁴. Sin embargo, en la actualidad, el IGAC como entidad gubernamental encargada de los sistemas de referencia nacionales, se ha encargado de adoptar un nuevo marco de referencia el cual garantiza la compatibilidad de las coordenadas colombianas con estas tecnologías espaciales de posicionamiento.

En este capítulo se hará la conceptualización acerca del marco de referencia adoptado por Colombia y el análisis y procesamiento de imágenes satelitales de radar para la elaboración del Modelo digital de Elevaciones para la Cuenca Superior del Rio Lebrija.

³ Global Navigation Satellite Systems

⁴ Global Positioning System

2.1 CONCEPTUALIZACIÓN SOBRE MAGNA – SIRGAS

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

En la actualidad, tanto el sector público, como el privado, utilizan intensivamente la tecnología GPS, que se basa, por las coordenadas de los satélites, en un sistema de referencia geocéntrico. La incompatibilidad del Datum BOGOTÁ con esta tecnología hace evidente la necesidad de introducir un sistema de referencia geocéntrico en Colombia, de aceptación a nivel internacional y que garantice mantener las altas precisiones ofrecidas por esta tecnología en la determinación de coordenadas

2.1.1 Sistema Internacional de Referencia (ITRS). El sistema geocéntrico utilizado en Geodesia es un Sistema Convencional de Referencia Terrestre (ITRS: International Terrestrial Reference System). El ITRS se define con origen en el centro de masas terrestre (incluyendo océanos y atmósfera). Su eje Z coincide con el polo terrestre. El eje X es orientado hacia el meridiano de Greenwich y el eje Y es perpendicular a éstos dos.

La realización (materialización) del ITRS es el marco ITRF (International Terrestrial Reference Frame), el cual está conformado por un conjunto de estaciones con coordenadas cartesianas geocéntricas [X, Y, Z], observadas mediante técnicas de posicionamiento espacial de muy alta precisión. La principal utilidad del ITRF es que a partir de éste se calculan las coordenadas precisas de los satélites GNSS (incluso el GPS), lo que garantiza que cualquier

punto sobre la superficie terrestre que haya sido ligado al ITRF vigente está en el mismo sistema de referencia utilizado por los satélites.

2.1.2 Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas: SIRGAS.

SIRGAS es la ampliación del ITRF en América. Está conformado por una red con más de 180 estaciones geodésicas de alta precisión (algunas de ellas de funcionamiento continuo), cuya distribución ofrece un cubrimiento homogéneo sobre el continente y, por lo tanto, las condiciones necesarias para que las redes nacionales estén vinculadas al ITRF. El datum geodésico correspondiente al SIRGAS está definido a partir de los parámetros del elipsoide GRS80 (Geodetic Reference System, 1980), orientado según los ejes coordenados del sistema de referencia SIRGAS. Esto garantiza la consistencia entre el sistema terrestre SIRGAS y el sistema de referencia satelital.

2.1.3 MAGNA: Marco Geocéntrico Nacional de Referencia. En Colombia, el IGAC, organismo nacional encargado de determinar, establecer, mantener y proporcionar los sistemas oficiales de referencia geodésico, gravimétrico y magnético inició a partir de las estaciones SIRGAS la determinación de la Red Básica GPS, denominada MAGNA (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia) que, por estar referida a SIRGAS se denomina convencionalmente *MAGNA-SIRGAS*. Ésta está conformada por cerca de 70 estaciones GPS de cubrimiento nacional de las cuales 6 son de funcionamiento continuo, 8 son vértices SIRGAS y 16 corresponden con la red geodinámica CASA (Central and South American Geodynamics Network).

Las coordenadas de las estaciones *MAGNA-SIRGAS* están definidas sobre el ITRF94. Su precisión interna está en el orden de (± 2 mm... ± 7 mm), su exactitud horizontal en ± 2 cm y la vertical en ± 6 cm (Tremel et al. 2001, Sánchez et al. 1999).

Las principales discrepancias entre el Datum BOGOTÁ y MAGNA-SIRGAS se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2: Diferencias entre el Datum BOGOTÁ y MAGNA-SIRGAS

MAGNA-SIRGAS	Datum BOGOTÁ	Discrepancia
Geocéntrico	No geocéntrico	El origen de coordenadas [X=0, Y=0, Z=0] del Datum BOGOTÁ está desplazado del origen de coordenadas de MAGNA-SIRGAS (geocentro) ~531 m.
Tridimensional	Bidimensional	Las coordenadas curvilíneas (ϕ , λ , h) de MAGNASIRGAS se refieren a la misma superficie de referencia (el elipsoide), mientras que en el Datum BOGOTÁ, (ϕ , λ) se refieren al elipsoide y H al nivel medio del mar, imposibilitándose la definición consistente de coordenadas tridimensionales.
Elipsoide asociado: GRS80 (Geodetic Reference System 1980) a = 6 378 137 m 1/f = 298, 257 222 101	Elipsoide asociado: Internacional o de Hayford (1924) a = 6 378 388 m 1/f = 297	La diferencia de los elipsoides asociados a MAGNA-SIRGAS y al Datum BOGOTÁ no sólo radica en su ubicación con respecto al geocentro, sino también en sus dimensiones geométricas; los radios ecuatoriales discrepan 251 m y los aplanamientos $1,42 \times 10^{-5}$.

<p>Exactitud (con respecto a las coordenadas SIRGAS=ITRF=WGS84): $\phi, \lambda = 2 \text{ cm}$ $h = 6 \text{ cm.}$</p>	<p>Exactitud (con respecto a las coordenadas SIRGAS=ITRF=WGS84): $\phi, \lambda = \sim 500 \text{ m}$</p>	<p>La exactitud representa la consistencia de las coordenadas de una red con respecto a otras redes determinadas independientemente. Si dichas redes son establecidas a partir del sistema global de referencia, la compatibilidad entre ellas es bastante alta ($\sim 2 \text{ cm}$), mientras que, aquellas que están referidas a datum locales requieren de procedimientos adicionales de transformación que permitan su comparación.</p>
<p>Coordenadas del punto datum (Observatorio Astronómico de Bogotá) $\phi = 04^{\circ} 35' 46,3215''$ $\lambda = 74^{\circ} 04' 39,0285''$ $h = 2641,469 \text{ m}$</p>	<p>Coordenadas del punto datum (Observatorio Astronómico de Bogotá) $\phi = 04^{\circ} 35' 56,57''$ $\lambda = 74^{\circ} 04' 51,30''$ $h = \text{indeterminable}$</p>	<p>Las coordenadas del punto datum referidas a los dos sistemas difieren entre sí, aproximadamente, 500 m, los cuales equivalen a la discrepancia mínima para cualquier punto de la red antigua ARENA con respecto a MAGNA-SIRGAS.</p> <p>$\Delta\phi = -10,25'' \dots \sim -307,5 \text{ m}$ $\Delta\lambda = -12,27'' \dots \sim -368,2 \text{ m}$</p>

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

APpal.htm

2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA A PARTIR DE IMÁGENES DE RADAR (SRTM)

La información base en la consecución de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) influye directamente en la calidad del mismo, no solo en la exactitud vertical, sino también en el posicionamiento horizontal. Tradicionalmente esta información base era extraída de mapas cartográficos con curvas de nivel, sin embargo hoy en día, debido al fácil acceso a la información satelital y de radar, así como a la evolución de las técnicas y prestaciones computacionales asociados al geoprocésamiento, es posible elaborar un MDE que aproveche estas tecnologías y ofrezca una mejora tanto en la exactitud vertical como horizontal.

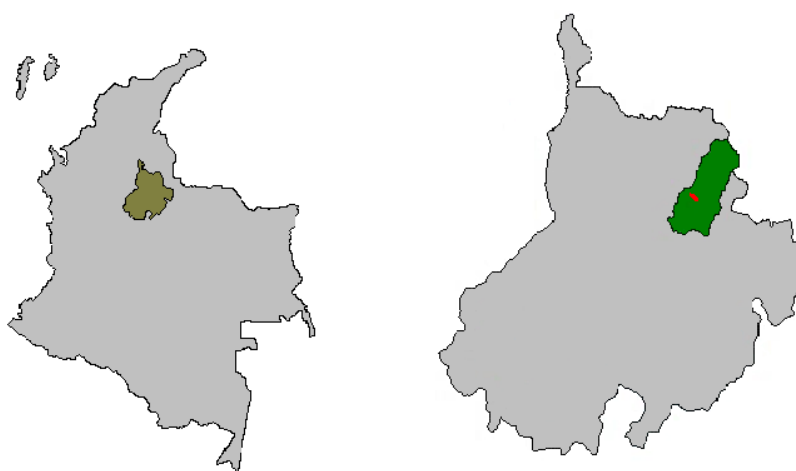
En este sentido, la elaboración del MDE para la CSRL constituye el producto del procesamiento y la interrelación de información obtenida a partir de imágenes de radar de la SRTM.

2.2.1 Ubicación y descripción general de la zona de estudio. En el presente numeral se expondrá con brevedad las generalidades de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), como marco de referencia para la localización y caracterización de la zona de estudio.

2.2.1.1 Localización. La CSRL con un área aproximada de 1281 km² constituye la más grande fuente abastecedora de agua de Bucaramanga y su área metropolitana. Se localiza en el nororiente del departamento de Santander, Provincia de Soto con coordenadas geográficas entre los 6°52'13,604' y 7°29'37,808' de Latitud Norte y los 73°16'30,03 y 72°46'14,825 de Longitud al Oeste del meridiano Greenwich y coordenadas planas en MAGNA-SIRGAS (1.251.572 y 1.320.654) Norte y (1.088.699 y 1.144.241)

Este, con origen en la ciudad de Bogotá. En la Figura 1 se muestra la localización nacional y regional de la CSRL.

Figura 1: Localización de la Cuenca Superior del Río Lebrija



Fuente: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia-santander-SIM.svg>

2.2.1.2 Hidrografía. La CSRL está delimitada aguas abajo por la unión de los ríos De Oro y Surata (Estación Café Madrid); al Sur, a unos 1600 m.s.n.m. con la Mesa de los Santos por encima de la depresión de Piedecuesta; hacia el Oeste, a unos 1100 m.s.n.m. las mesas de Llano de Palmas y de Lebrija, que dominan al norte al gran valle del Magdalena; al sur-oeste, el cañón del río Suárez; y hacia el Este, la mesa de los Santos entra en contacto con la falla del macizo ígneo-metamórfico de Santander que culmina en el páramo de Santurbán a poco mas de 4000 m.s.n.m. (Guzmán, et al 2003).

La CSRL está conformada por cuatro subcuencas, que son Río de Oro (conformada por la unión de los ríos de Oro y Hato o Lato), Río Frío, Río Tona y Río Surata (conformada por la unión de los ríos Charta, Surata y Vetas). En la *Tabla 3* se presenta una relación de las subcuencas hidrográficas en las que se divide la CSRL.

Tabla 3: Subcuencas hidrográficas de la CSRL

SUBCUENCA	CORRIENTE PPAL	MUNICIPIOS QUE CONTIENE	ÁREA Km ²
Río Surata	Unión de los ríos Surata, Vetas y Charta	Surata, Matanza, Charta y Vetas	473
Río Tona	Río Tona	Tona y Bucaramanga	208
Río de Oro	Unión de los ríos de Oro y Lato	Piedecuesta y Floridablanca	468
Río Frío	Río Frío	Girón y Floridablanca	132

Fuente: Balaguera y Serrano, 2006

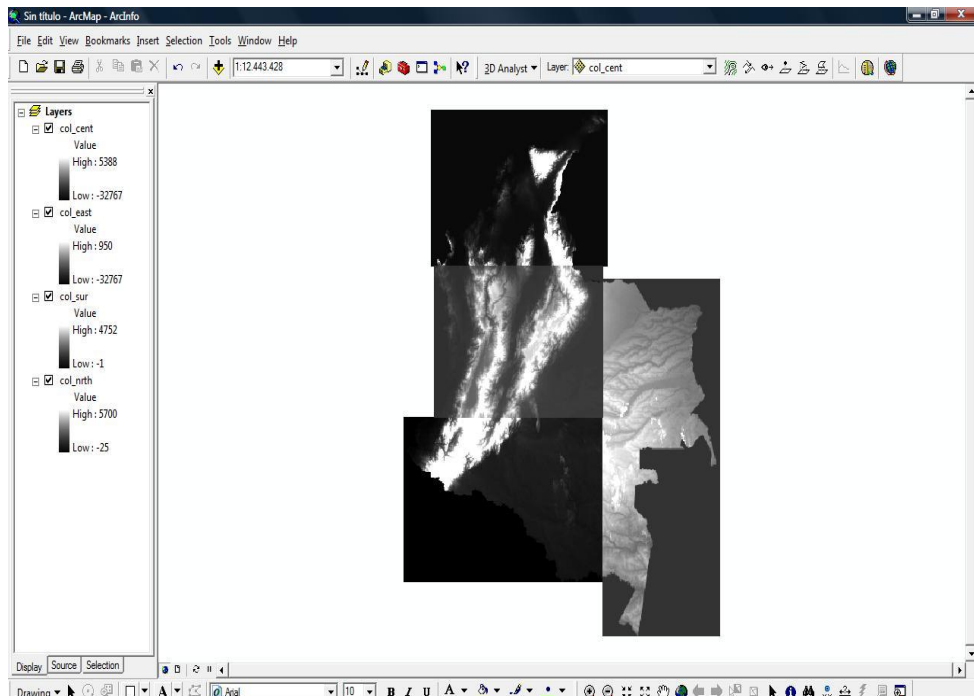
Con el MDE obtenido se espera representar adecuadamente, la hidrografía, drenaje y geomorfología de cada una de estas subcuencas.

2.2.2 Imágenes de radar de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

En febrero del 2000 la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geo-Espacial (NGA), y las Agencias Espaciales de Alemania e Italia lanzaron la Misión Topográfica de Radar (SRTM) la cual tuvo como objetivo la obtención de datos digitales topográficos de la tierra, con una resolución de 3 segundos de arco (equivalente a 90x90metros) de tamaño de grilla y una precisión absoluta altitudinal mínima de unos 12 metros. Sin embargo, y no obstante que los modelos digitales de elevación obtenidos de SRTM presentan una mayor calidad en cuanto al contenido de la información, no están exentos de presentar problemas para su análisis. El más importante de ellos es la falta de información ocasionada principalmente por la no medición del terreno en zonas donde la pendiente es mayor que el ángulo de incidencia del radar.

En el presente trabajo se utilizaron imágenes de radar SRTM con una estructura de datos tipo *Raster*, de 1 segundo de arco (30.823 metros de resolución espacial), cada una en formato *Raster Dataset* de ARCGIS (ESRI), las cuales abarcan el territorio Colombiano en cuatro regiones: Colombia Norte, Colombia Este, Colombia Centro y Colombia Sur. Estas imágenes se encuentran referidas al *Datum* horizontal WGS 84, considerado un estándar internacional y fueron tratadas, unidas, transformadas a una resolución de 1 segundo de arco y distribuidas para uso institucional por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. La Figura 2 muestra la imagen de radar ya tratada para Colombia.

Figura 2: Imagen SRTM del territorio Colombiano



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi y modificado por el autor

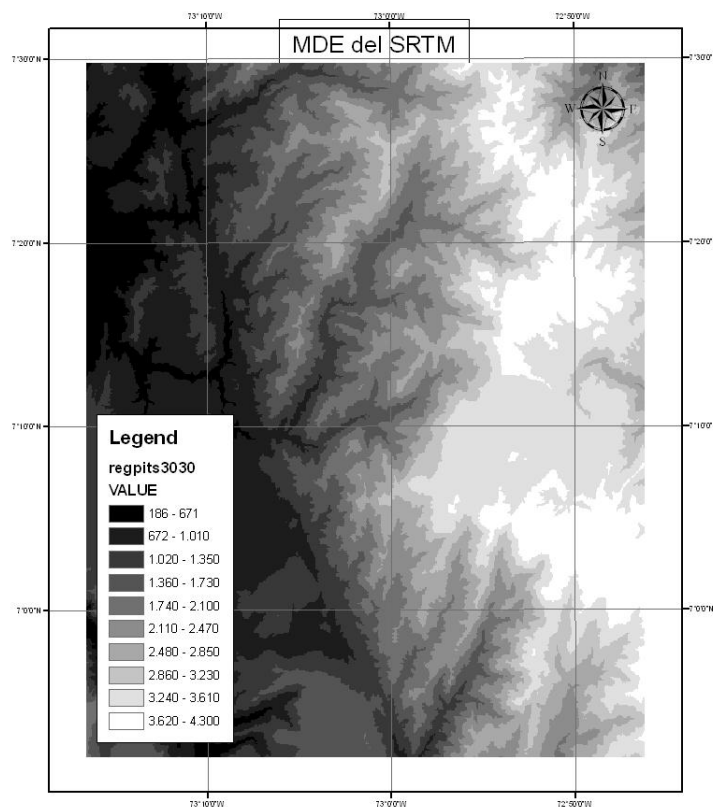
2.2.3 Procesamiento de la información y generación del MDE. Debido a que las imágenes de radar se encuentran sin referencia espacial, y con un área muy grande, es necesario someterlas a una serie de procesos de georreferenciación, corte, espacialización, formateado, entre otros pasos de geoprocésamiento con el fin de obtener un MDE limpio, en la resolución deseada y alojado en un formato que permita la integración del modelo a una base de datos SIG⁵.

2.2.3.1 Traslación del sistema de referencia de las imágenes de radar a MAGNA-SIRGAS. Como primer paso en la georreferenciación de la imagen SRTM, es necesario definir el área de trabajo para realizar una extracción de la región que contiene la Cuenca Superior del Río Lebrija. Para realizar el proceso de corte de la imagen se utilizó el software ArcGIS 9.3.

Utilizando la herramienta ***Spatial Analyst Tools – Extraction - Extract by Mask*** se procede a realizar el corte de la imagen de radar que en este caso corresponde al archivo de Colombia Centro. El producto consiste en un archivo en formato *Raster Dataset* con información topográfica de radar de la zona de estudio (Numeral 2.2.1.1).

⁵ Sistema De Información Geográfica

Figura 3: Imagen SRTM de la zona de estudio



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi y modificado por el autor

El paso a seguir es proyectar el archivo resultante en el paso anterior (Figura 3), el cual se encuentra en coordenadas geográficas referidas al *datum* horizontal WGS84 a coordenadas planas referenciadas en el sistema MAGNA-SIRGAS. Esto se llevó a cabo empleando la herramienta **Data Management Tools-Projections and Translations-Project Raster**.

Los parámetros requeridos para la definición manual del sistema de proyección MAGNA Transverse Mercator se muestran en la Tabla 4

Tabla 4: Parámetros para la definición del sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS

MAGNA Trasnverse Mercator	
Unidad Linear	Metros
Unidad Angular	Grados minutos segundos
Falso Norte	1000000
Falso Este	1000000
Factor de escala	1
Latitud de origen	04° 35' 46,3215"
Meridiano Central	74° 04' 39,0285"
Datum	D_MAGNA Bogotá

Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por el autor

2.2.3.2 Resolución y espacialización de MDE. El objetivo final de este trabajo es la integración entre el MDE y la clasificación vegetal a partir de imágenes satelitales (Landsat ETM+) de la CSRL enmarcados en una base de datos SIG de ArcGIS en formato *Raster*, que servirá como insumo para la determinación de algunos de los parámetros necesarios en la aplicación de la metodología FAO Penman – Monteith para evapotranspiración real (ETR).

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que el tamaño del pixel para el MDE debe ser de igual resolución al de las imágenes Landsat ETM+ utilizadas en la clasificación de la vegetación, se optó por adoptar un tamaño de pixel de 30x30 metros. Sin embargo, la imagen SRTM cortada y georreferenciada en el numeral anterior posee celdas de 1 segundo de arco que equivalen a 30.823 metros, lo que hace necesario una redistribución de los datos que permita el reajuste de la grilla para obtener celdas de 30x30 metros.

Para tal fin se utilizó el software *Surfer V.9* el cual cuenta con diferentes tipos de interpoladores geométricos que usan la información proveniente de los vecinos para calcular el valor del atributo que en este caso es la elevación. Se decidió utilizar este software por la diversidad de algoritmos de interpolación,

su facilidad de aplicación, la incorporación de herramientas estadísticas de validación, la calidad en la visualización 3D y la rapidez en el procesamiento de los datos para la generación del MDE.

El primer paso en la espacialización de los datos consiste en transformar el formato de la imagen georreferenciada, la cual se encuentra en formato *Raster Dataset* de ArcGIS a una extensión legible por el software Surfer. Para esto utilizamos la herramienta de ArcGIS ***Spatial Analyst Tools – Extraction – Sample***. Esta función genera un archivo de texto con las coordenadas XYZ de los puntos centrales en cada uno de los píxeles que conforman la imagen *Raster* original de la zona de estudio.

El siguiente paso es definir el algoritmo Interpolador a emplear, pues cada técnica de interpolación, en función del algoritmo y los parámetros que maneja, generan una replica que intenta aproximarse a la realidad. La elección del interpolador se determinó mediante el proceso de Validación Cruzada, la cual consiste en una herramienta estadística provista por el software *Surfer V.9* que calcula el Error Medio Cuadrático de cada algoritmo de interpolación. (Numeral 1.1.4).

A continuación se muestran los resultados del EMC generado en la validación cruzada de 5 interpoladores para generación de MDE en el software Surfer V.9 para una población muestral de 20.000 puntos:

Tabla 5: Error medio Cuadrático para diferentes algoritmos de interpolación

Validación cruzada	
Interpolador	EMC
Inverse Distace of a Power (Potencia 7)	4,5740696
Kriging (Semivariograma Lineal)	4,3016139
Nearest Neighbor	13,670333
Minimun Curvature	50,735473
Radial Basis Function (Thin Plate Spline)	4,7641836

Fuente: Software Surfer 9 y modificado por el autor

De acuerdo a los resultados de la validación cruzada se decidió generar el MDE definitivo utilizando el algoritmo de interpolación Kriging con semivariograma lineal ya que este presentó el menor Error Medio Cuadrático.

2.2.3.3 Validación del MDE. El proceso de Validación del MDE de la CSRL consistió en comparar Elevaciones del modelo vs. Elevaciones Reales; esto con el fin de encontrar el Valor Residual o error Residual obtenido para el modelo (Numeral 1.1.4).

Las elevaciones reales (X, Y, Z) consistieron en 33 puntos localizados en forma distribuida en campo, tratando de obtener puntos en cada una de las subcuencas pertenecientes a la Cuenca Superior del Río Lebrija. Los puntos se localizaron con ayuda de un GPS marca Trimble Geo XM durante los días 10 y 12 de febrero de 2010. La precisión máxima del mismo es de aproximadamente 3 metros, sin embargo dependiendo de las condiciones en el campo y de la disponibilidad de cobertura satelital, esta precisión puede variar. También se conto con 11 mojones georreferenciados espacialmente por el IGAC, para una

población muestral de 44 puntos con los cuales se realizará la validación del MDE para la CSRL. El tamaño de la muestra fue determinado siguiendo estándares internacionales que recomiendan un mínimo de 30 datos (NMAS, NSSDA, USGS)⁶. (Ariza F. y Atkinson A., 2006)

El cálculo de los valores residuales (Numeral 1.1.4) se determinó con la ayuda del programa Surfer V.9 a través de la herramienta **Grid – Residuals**. La Tabla 6 muestra los valores residuales (ΔZ) calculados por el software y que representan la diferencia entre la elevación de los puntos reales y la misma muestra de puntos homólogos medidos desde el mencionado MDE.

Tabla 6: Valor del Zresidual para cada uno de los puntos muestrales

	ID	ESTE (m)	NORTE (m)	Elevación	ΔZ (m)
MOJONES IGAC	Punto 1	1125117,100	1287191,184	3041,841	24,479
	Punto 2	1125633,630	1287125,799	3053,621	-1,606
	Punto 3	1125139,803	1287970,730	2659,480	-2,132
	Punto 4	1124967,376	1288162,067	2557,371	0,702
	Punto 5	1125688,488	1288251,352	2709,641	3,017
	Punto 6	1125780,509	1287860,733	2858,488	1,022
	Punto 7	1126115,944	1288177,928	2688,055	-3,251
	Punto 8	1126460,789	1288037,306	2784,760	-2,903
	Punto 9	1127082,691	1287713,144	2920,517	4,163
	Punto 10	1126209,640	1288685,959	2662,481	7,105
	Punto 11	1126016,061	1288936,993	2591,060	-3,987
	ID	ESTE (m)	NORTE (m)	Elevación GPS (m)	ΔZ (m)
ÁREA METROPOLITANA	Punto 12	1111103,777	1269922,933	965,118	-4,285
	Punto 13	1104145,145	1275683,398	780,416	-4,455
	Punto 14	1100788,433	1277277,904	672,489	-5,525
	Punto 15	1104670,043	1278869,887	932,743	-6,298
	Punto 16	1104837,034	1279510,409	944,190	-5,664

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

	Punto 17	1104410,686	1281985,658	830,372	-5,334
	Punto 18	1103616,931	1283939,499	623,568	-11,112
	Punto 19	1105744,734	1281334,792	992,025	-5,673
	Punto 20	1105250,720	1278260,919	893,863	-19,035
	Punto 21	1107399,066	1280726,008	1125,052	-3,465
	Punto 22	1107693,900	1278856,740	1061,252	-5,907
	Punto 23	1107875,452	1279070,773	1041,967	-18,701
	Punto 24	1104067,604	1273095,738	748,430	0,376
	Punto 25	1108518,355	1272942,663	868,147	-10,542
	Punto 26	1110113,857	1273220,665	937,727	-11,475
	Punto 27	1107110,202	1275422,397	911,435	-0,840
	Punto 28	1104939,910	1276150,384	846,401	8,010
	Punto 29	1108987,362	1273880,523	994,113	12,846
	ID	ESTE (m)	NORTE (m)	Elevación GPS (m)	ΔZ (m)
RIO DE ORO Salida de campo 12/10/2010	Punto 30	1114971,76	1265379,87	1101,575	-78,035
	Punto 31	1117640,33	1269231,93	2194,591	-2,571
	Punto 32	1118185,69	1269447,41	2241,281	4,296
	Punto 33	1118416,37	1269643,51	2252,46	9,255
	Punto 34	1118534,58	1270743,91	2333,274	-18,792
	Punto 35	1117199,83	1266764,59	1702,116	-10,127
	Punto 36	1116945,56	1266945,42	1837,288	2,650
	ID	ESTE (m)	NORTE (m)	Elevación GPS (m)	ΔZ (m)
TONA Y FRIO Salida de campo 12/02/2010	Punto 37	1123862,78	1275542,96	3418,016	-9,280
	Punto 38	1123740,84	1275400,45	3406,302	-11,948
	Punto 39	1122441,9	1277965,54	3412,937	-3,351
	Punto 40	1112573,08	1279376,53	1836,483	-3,919
	Punto 41	1114784,49	1280614,78	1804,214	-13,049
	Punto 42	1114793,54	1280567,78	1806,796	-28,310
	Punto 43	1117381,98	1285271,26	1360,697	-14,536
	Punto 44	1116105,66	1285316,45	1274,368	-40,134

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Grupo GPH

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

El primer paso consiste en la filtración de aquellas observaciones que presenten fuertes desvíos o errores aparentes respecto de las medidas de tendencia central como la media aritmética y que perjudicarán la validación del modelo al introducir errores de puntos que no pertenecen al espacio muestral. Con este fin se utilizó el criterio de Chauvenet aplicado a Modelos Digitales de Elevación propuesto por Márquez, E., 2007, el cual consiste en eliminar directamente la observación (ΔZ_i) cuyo valor sea mayor a:

$$\pm \varepsilon_{max} = K_c * \sigma_z$$

Donde:

$$\pm \varepsilon_{max}: \Delta Z_{max}$$

K_c : *Coficiente de Chauvenet*

σ_z : *Desviación estandar de los valores ΔZ*

Los estadísticos para los valores ΔZ de los 44 datos muestrales se muestran a continuación:

Tabla 7: Estadísticos para los datos muestrales

Suma	-288,32
Media	-6,55
Desviación	15,33
N	44

Fuente: El Autor

A continuación aplicamos el criterio de Chauvenet para filtrado de datos. La determinación del coeficiente Kc se extrajo de la Tabla 8 la cual depende del número de datos.

Tabla 8: Coeficiente de Chauvenet para distintos tamaños de muestra

n	Kc	n	Kc
2	1,15	10	1,96
4	1,54	20	2,24
6	1,73	40	2,48
8	1,86	50	2,57

Fuente: [http://156.35.33/DCIF/IPFabricacion/Fundamentos_Calibracion%20\(web\).pdf](http://156.35.33/DCIF/IPFabricacion/Fundamentos_Calibracion%20(web).pdf)

Usando interpolación lineal, el valor de Kc para 44 datos es 2.516, por lo tanto el valor de $\pm \varepsilon_{max}$ es 38.558 metros. Comparando este valor con los resultados del residual, se eliminan los puntos 30 y 44 ya que sus valores exceden $\pm \varepsilon_{max}$. La nueva media y desviación estándar se muestran a continuación.

Nueva Media	-4,051
Nueva Desviación	9,369
n	42

Se aplicó nuevamente el criterio de Chauvenet con el fin de lograr un muestreo con mejor ajuste y se eliminaron los puntos 1 y 42, cuyos valores superaron al $\pm \varepsilon_{max}$. Seguidamente se calculó la nueva media y la nueva desviación estándar. Los resultados de la segunda aplicación del criterio de Chauvenet se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultado de la segunda aplicación del criterio de Chauvenet

N	40
Kc'	2,48
Ezmax'	23,234
Media'	-4,158
Desviación'	7,50

Fuente: El Autor

Los puntos 1, 30, 42 y 44 son llamados errores sistemáticos o bias y corresponden a errores acumulados en la toma de datos o procesamiento de los mismos; en nuestro caso éstos errores pudieron ser generados por fallas en la toma de datos, error en el equipo utilizado, mala geometría satelital, entre otros.

Luego de realizar el filtrado de los datos, se procede a corroborar que la distribución de los valores de ΔZ corresponde a una distribución normal. A través de Pruebas de Hipótesis Estadísticas podemos plantear hipótesis nulas o alternativas para aprobar o rechazar la posibilidad de que la muestra en estudio proviene o no de una población con distribución de normal de media igual a cero y desviación estándar igual a uno.

$H_0: \mu = 0$ Hipótesis Nula

$H_1: \mu \neq 0$ Hipótesis Alternativa

Mediante el test de la t de student podemos verificar si se acepta la hipótesis nula, lo que quiere decir que los datos se comportan según una distribución normal, o si por el contrario se rechaza la hipótesis nula.

Para la aplicación del test de student se utilizó la herramienta informática G-Stat, que consiste en un programa de análisis estadísticos de libre distribución disponible en la web en el siguiente vínculo <http://www.e-biometria.com/g-stat/index.html>.

Los resultados de la prueba de hipótesis de la t de student arrojados por el programa G-Stat se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Resultados del test t de student

Hipótesis nula	Media=0
Hipótesis Aleatoria	Media≠0
Nivel de confianza	99%
N	40
Estadístico de contraste t	-2.5024
Valor P	0.077
Intervalo de confianza	[-7.9561, -0.1464]

Fuente: G-Stat y modificado por el Autor

La hipótesis nula se rechaza en el caso en el que Valor $P < 0.05$ (Tabla 10), en caso contrario no hay evidencia suficiente para poder rechazarla. (Manual del Usuario G-Stat).

Los resultados muestran que se acepta la hipótesis nula, lo que quiere decir que los datos se comportan como una distribución normal (N (0,1)).

Como último paso en el proceso de validación, se procede a comparar el error calculado para el Modelo Digital de Elevaciones generado en este proyecto, con los errores máximos permitidos, según los estándares de control de la exactitud vertical de dos entidades internacionales.

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

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

Así tendremos según la USGS tres niveles⁷:

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

⁷ Para MDE aplicables a mapas de contornos o vectoriales, la USGS adopta el estándar para la precisión vertical según la NMAS (<http://rmmcweb.cr.usgs.gov/nmpstds/nmas647.html>).

Capítulo 3

3. CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA CSRL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

Una unidad cartográfica de vegetación se diseña para representar un conjunto de elementos de vegetación de diferentes características y cualidades. Cada uno de ellos será asociado a una estructura formal a fin de diferenciarlo de los demás, esto es, clasificarlo. Tal tipo de estructura se elabora normalmente siguiendo criterios genéricos, morfológicos u otros elaborados.

Esta clasificación se extraerá de información en imágenes para reconocer patrones y objetos homogéneos. En este capítulo realizará una clasificación pixel a pixel a partir de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+, la cual utiliza la información aislada de cada celda para encontrar regiones homogéneas.

El producto final consistirá en un mapa con la clasificación del tipo de vegetación presente en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Esta información, junto con el MDE, servirá como insumo en la aplicación de la ecuación FAO Penman – Monteith para Evapotranspiración Real, específicamente en la determinación del coeficiente de cultivo (K_c) y del coeficiente de estrés hídrico (K_s).

3.1 TELEDETECCIÓN

La Teledetección se conoce como la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de una superficie o fenómeno, a través del análisis de información adquirida por un instrumento que no está en contacto físico directo con él. Se basa en que cada objeto, área o fenómeno emite un espectro electromagnético específico, en función de su propia naturaleza y de las

radiaciones que recibe. La reflectancia de ese espectro electromagnético se denomina firma espectral, la cual hace distinguible a ese objeto, superficie o fenómeno de los demás.

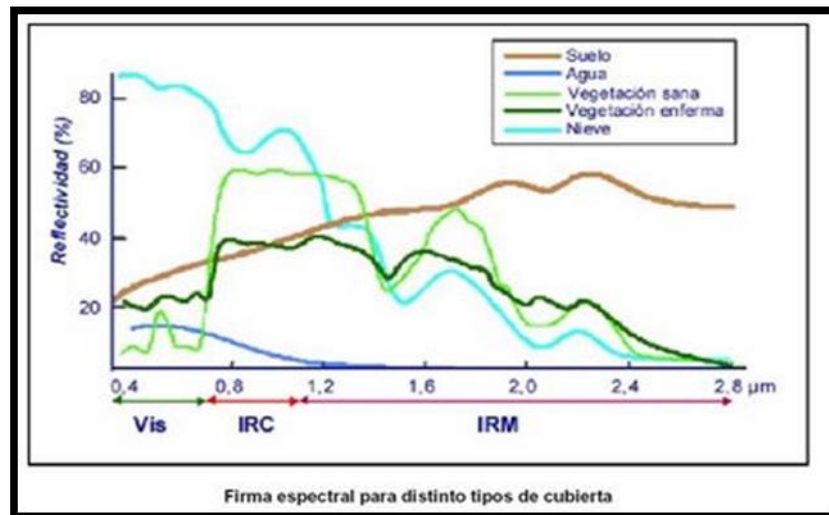
3.1.1 Principios Físicos de Teledetección. Los sensores de los satélites reciben la información de un objeto a través de la interacción del flujo de radiación que este emite y se dirige hacia el sensor. Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar)

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva, es decir, los sensores pasivos de teledetección reciben la señal de una fuente de luz o energía externa reflejada por la superficie de los cuerpos. Al contrario de la teledetección activa se basan en que los sensores emiten su propia fuente de energía que va directo hacia los cuerpos y reciben la señal de retorno (radares, sonares, láser). (Pinto, J., 2003 y Chuvieco, E. 1996)

3.1.2 Firma Espectral. Cada tipo de superficie interacciona con la radiación de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda muy concretas y reflejando otras diferentes en unas proporciones determinadas. Esta característica hace posible que se puedan identificar los distintos objetos: suelo, vegetación, agua, etc. ya que mediante experimentos de laboratorio se ha podido caracterizar el comportamiento de estas distintas superficies al recibir radiación y caracterizando los porcentajes de reflexión, absorción y transmisión. La radiación reflejada en función de la longitud de onda se le conoce como firma espectral de la superficie.

Figura 4: Firma espectral para distintos tipos de cobertura



Fuente: <http://fanpaulieb.blogspot.com/>

3.2 CARTOGRAFÍA BASE PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA CSRL

Para la clasificación de la cobertura vegetal de la CSRL a partir de imágenes satelitales, es necesario la introducción de información base o de referencia de la unidades de vegetación presentes en el área que se desea clasificar. La adquisición de esta información proviene del conocimiento previo de la vegetación presente en la cuenca. En este caso se utilizó la caracterización adoptada por los Planes de Ordenamiento Ambiental (POAT) correspondientes a las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo, realizados y provistos por la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB, 2003).

Debido a que esta información se encuentra separada y con leyendas distintas, se generó una nueva cartografía unificada, alojada en el software ArcGIS y con una nueva leyenda que integra las clases temáticas en los tres POATs

disponibles, uniendo las clasificaciones que compartan características vegetales similares.

3.2.1 Planes de Ordenamiento Ambiental de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo. Los Planes de Ordenamiento Ambiental de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo, fueron realizados por la CDMB en asociación con la firma Gradex Ingeniería S.A. y de un grupo interdisciplinario de expertos bajo la dirección del señor Juan Agustín Gualdrón Rueda.

Para este proyecto se contó con planos cartográficos digitales de escala 1:25000 en formato *.dwg propio de AutoCAD (AUTODESK) correspondientes a la clasificación vegetal de las microcuencas antes mencionadas y los informes respectivos.

Con el fin de conseguir un mapa que integre las características de vegetación de las tres microcuencas, se generó un nuevo archivo *.dwg donde se copiaron los tres mapas individuales, teniendo en cuenta las escalas y la referencia espacial. El producto consiste en un mosaico con información temática y espacial de las cualidades de vegetación de tres de las microcuencas que componen la CSRL, enmarcado en un archivo digital en extensión *.dwg.

3.2.2 Cartografía unificada de la clasificación vegetal de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo en ArcGIS. El primer paso en la generación de la nueva cartografía de clasificación vegetal, consiste en la creación de una leyenda que integre las características de las clases en los tres mapas. Para esto se recurrió a los informes de los POATs correspondientes a cada microcuenca y a través de un análisis minucioso de las cualidades de cada tipo de vegetación, se crearon las clases temáticas definitivas teniendo en cuenta las coincidencias de unas con otras.

La Tabla 11 muestra las clases temáticas definitivas para el mapa integrado de clasificación vegetal.

Tabla 11: Clases temáticas para la clasificación vegetal

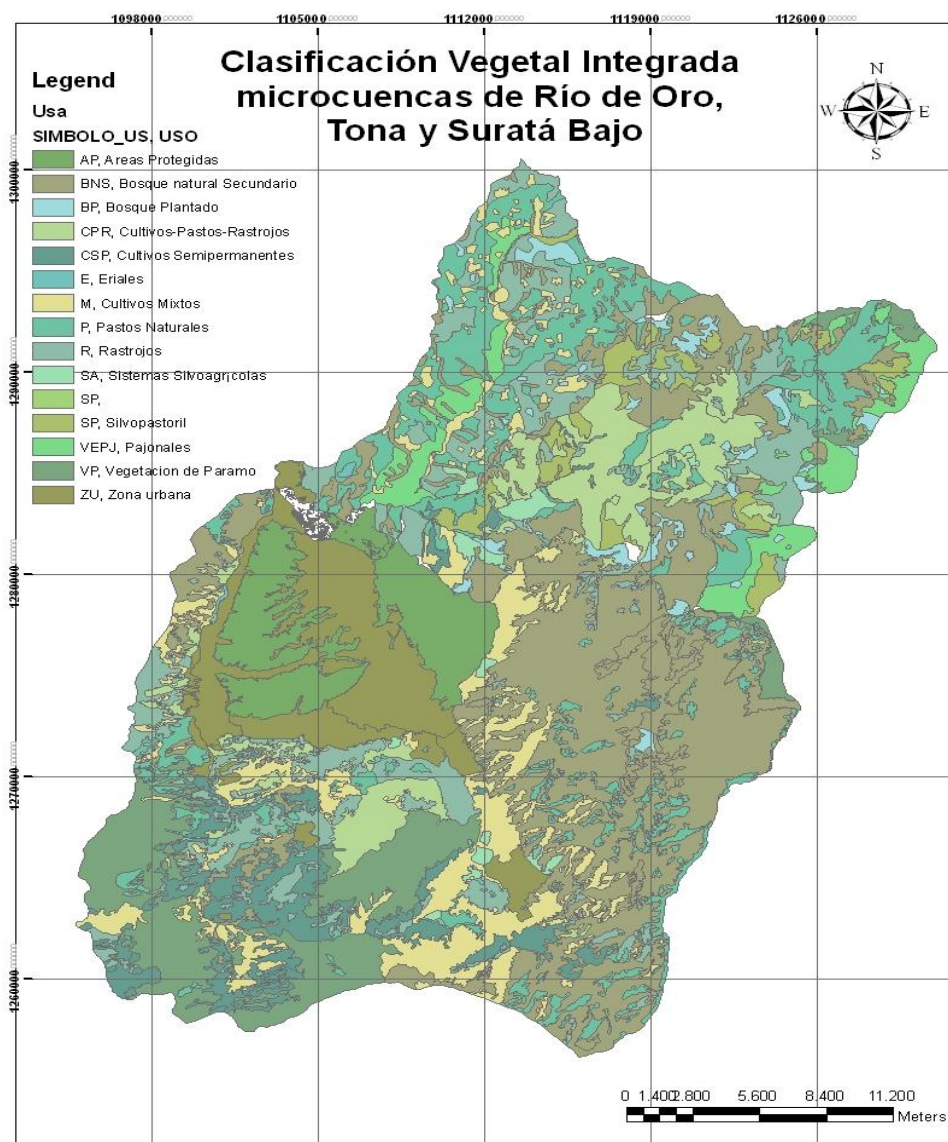
Nombre	Símbolo
Áreas protegidas	AP
Bosque Natural Secundario	BNS
Bosque Plantado	BP
Cultivos-Pastos-Rastrojos	CPR
Cultivos semipermanentes	CS
Erial	E
Cultivos Mixtos	M
Pastos Naturales	P
Rastrojos	R
Sistemas Silvoagrícolas	SA
Sistemas Silvopastoriles	SP
Pajonales	VEPJ
Vegetación de Páramo	VP
Zona Urbana	ZU

Fuente: Planes de Ordenamiento Ambiental CDMB y modificado por el autor

Seguidamente se importa el archivo final *.dwg al software ArcGIS, para luego hacer la migración al formato *.shp en donde se le atribuye a cada tipo de vegetación su identificación equivalente a la nueva clasificación temática.

Por último, se realiza la georreferenciación del mapa, refiriéndolo al sistema coordinado MAGNA-SIRGAS con el fin de mantener la correspondencia con la información espacial del MDE y de la clasificación supervisada a partir de imágenes satelitales.

Figura 5: Clasificación vegetal integrada de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo a partir de los POATs



Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por el autor

3.3 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA CSRL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

El objetivo de toda clasificación es la de reconocer clases o grupos cuyos miembros que posean características en común. Esto se realiza a través del conjunto de valores de un pixel en las diferentes bandas espectrales lo cual se define como patrón. Estos valores de pixel de referencias serán extraídos de la cartografía de clasificación vegetal generada en el numeral anterior (Figura 5).

Para realizar el proceso de clasificación se utilizó el software libre Spring el cual consiste en un procesador de datos geográficos para desarrollo de Sistemas de Información Geográfica, su principal característica es que integra en su funcionalidad un procesador de imágenes, para tratamiento de datos obtenidos mediante teledetección. A continuación se describe la metodología para la clasificación supervisada de imágenes satelitales mediante el software Spring:

3.3.1 Recolección y Análisis de la información satelital. El proceso de obtención de las imágenes depende básicamente de su disponibilidad, su calidad y por supuesto, el precio; teniendo esto en cuenta, se escogieron las imágenes satelitales correspondientes a la zona de estudio generadas a partir del sensor Landsat ETM+ y se descargaron de forma gratuita a través de la página Web <http://glovis.usgs.gov/ImgViewer/ImgViewer.html>. De las escenas existentes después de realizar un análisis sobre su calidad y el porcentaje de nubosidad presente en cada una de ellas se escogió para el estudio la imagen Landsat ETM+ de Junio de 2008.

No todas las bandas de la imagen satelital, son adecuadas para clasificación vegetal, por lo tanto, para determinar cuales nos permitirán identificar mejor la vegetación se hace el análisis de la firma espectral que corresponde a la vegetación verde (Figura 4), allí se ubican las bandas a partir de su longitud de

onda. Internacionalmente se utilizaran las bandas 3,4 y 5 como estándar para clasificación vegetal (Chuvioco, E., 1996).

Tabla 12: Características de la Imagen Landsat ETM+

Identificación	L71007055_05520030104
Sensor	Landsat 7 ETM+
WRS	7/55
Proyección UTM	WGS 84
Numero de Bandas	9
Resolución	30 mts
% Nubosidad	20%
Fecha	Jun-08

Fuente: https://landsat.usgs.gov/products_productinformation.php

3.3.2 Tratamiento de Imágenes y formato de bandas. En esta etapa están compilados todos aquellos procesos previos antes de realizar la clasificación, la mayoría de las imágenes que se obtienen de las diferentes entidades que se dedican a la promoción y distribución de estos productos informativos tienen la opción de ser adquiridas con determinados procesos de mejoramiento de imágenes. Tal es el caso de las imágenes utilizadas en este proyecto la cual se encuentra en formato TIFF, lo cual implicó cambios en la forma de visualizar y trabajar las bandas de las imágenes en los procesos de lectura de la imagen para la implementación en el software *Spring*. Para realizar este proceso *Spring* ofrece una herramienta llamada *Impima* que utiliza las imágenes y permite guardarlas en el formato deseado.

Es muy importante a la hora de iniciar un nuevo proyecto en *Spring*, asociarlo a un sistema de coordenadas, en este caso se utilizó el sistema de referencia SIRGAS-ITRF2000 con *datum* Bogotá, ya que MAGNA no está disponible en la última versión del software. Sin embargo la diferencia entre las coordenadas del MAGNA con respecto al SIRGAS es de 2 centímetros.

3.3.3 Clasificación Supervisada de imágenes satelitales. La Clasificación Supervisada es una herramienta en la cual previamente se deben seleccionar muestras de cada clase consecutiva. Esas zonas serán conocidas como zonas de entrenamiento y serán procesadas para identificar sus cualidades espectrales y reconocer regiones homogéneas. La combinación de bandas utilizada fue 4 Rojo, 5 Verde, 3 Azul (RGB), lo cual genera una imagen en falso color de la zona donde se puede visualizar mucho mejor las áreas de cobertura vegetal.

El primer paso para realizar la clasificación es geo- referenciar las imágenes con el fin de relacionarlas a un sistema de coordenadas específico. Para lograr esto, se localizaron mediante la herramienta web de uso libre Google Earth, 10 puntos de control dentro de la zona de estudio y fácilmente identificables en la imagen para luego introducirlos al programa. Esta operación debe realizarse al menos para 6 puntos. Estos puntos de control tomados de Google Earth están referenciados al sistema internacional WGS84 (Google Earth Userguide, 2007).

Con los puntos de control ubicados se debe observar el error medio cuadrático que muestra SPRING automáticamente, este error no debe ser mayor a 5 pixeles en caso de trabajar con uso de tierra o cobertura vegetal. Para nuestro caso, la georreferenciación arrojó un error de 0.013 pixeles, lo que demuestra que nuestra imagen se encuentra bien referenciada.

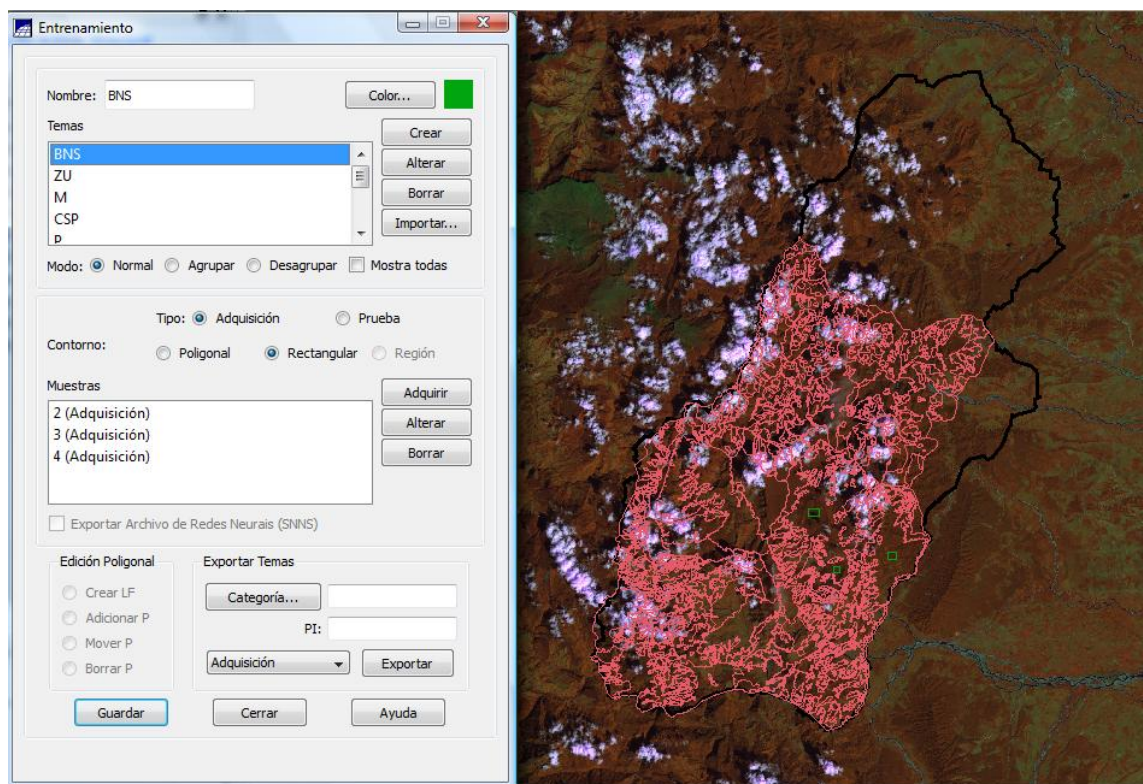
La clasificación será desarrollada en 4 fases:

- Entrenamiento
- Clasificación
- Pos- clasificación
- Mapeo

3.3.3.1 Entrenamiento. Consiste en seleccionar muestras en forma de zonas de pixeles que serán asignadas a una clase concreta basándose en información previa de la zona de estudio. Estas áreas de entrenamiento fueron extraídas de la cartografía unificada de la clasificación vegetal de las microcuencas de Río de Oro, Tona y Suratá Bajo generada anteriormente (Figura 5). Para mayor facilidad y exactitud en la selección de las muestras, se importó al programa *Spring* una máscara con los contornos de las clases temáticas elegidas proveniente de la cartografía base.

Para que la clasificación funcione deben ser asignadas un mínimo de dos áreas de entrenamiento por cada clase.

Figura 6: Etapa de Entrenamiento



Fuente: Software Spring 5.1.5 y modificado por el autor

3.3.3.2 Clasificación. Lo primero que se debe hacer es seleccionar uno de los clasificadores que están disponibles en el programa, el clasificador toma el conjunto de características de los píxeles para producir como salida una clase temática, en este caso el análisis será hecho utilizando los siguientes clasificadores:

- **Clasificador Maxver.** Es el método más común, considera la ponderación de las distancias entre medias de los niveles digitales de las clases utilizando parámetros estadísticos. El clasificador a partir de los conjuntos de entrenamiento, define el diagrama de las clases y sus distribuciones de probabilidad, considerando cada clase como una distribución de probabilidad normal.

El umbral de aceptación indica el porcentaje de píxeles de la distribución de probabilidad de una clase que será clasificado como perteneciente a dicha clase, un umbral de 99%, toma el 99% de los píxeles y el 1% de los píxeles que tengan menor probabilidad serán ignorados con esto se compensa la posibilidad de algunos píxeles de haber sido introducidos erróneamente en determinada clase, o estar entre dos clases.

- **Clasificador Mínima Distancia Euclidiana.** Este método de clasificación utiliza la distancia Euclidiana para asociar un píxel a una determinada clase. En esta clasificación cada píxel será incorporado a una clase a través del análisis de la medida de similitud de distancia Euclidiana.

El clasificador compara la distancia Euclidiana del píxel a la media de cada grupo. El píxel será incorporado al grupo que presente la menor distancia. Este procedimiento es repetido hasta que toda la imagen quede clasificada.

Después de elegir el clasificador se procede a realizar el análisis de la matriz de clasificación de las muestras, esta nos presenta la distribución del porcentaje de píxeles clasificados correcta e incorrectamente.

El resultado de este análisis presenta:

- **Desempeño Medio:** Es el porcentaje de píxeles sobre los que se tiene certeza de su buena clasificación.
- **Abstención Media:** Indica el porcentaje de píxeles que no fue clasificado en ninguna categoría.
- **Confusión Media:** Este valor determina el porcentaje de píxeles que no están bien clasificados.

Lo ideal sería una matriz de clasificación con un Desempeño medio de 100% lo cual indicaría que no hubo confusión entre las clases, sin embargo esta situación es difícil de lograr con imágenes con características espectrales parecidas, como es el caso de la clasificación vegetal.

Para disminuir la confusión entre las clases se realiza un análisis entre las muestras adquiridas para cada clase esto nos permite observar que muestras tienen gran certeza de pertenecer a la clase asignada.

Al analizar los desempeños y la confusión media de cada uno de los clasificadores, se seleccionó el clasificador Maxver, ya que éste presentó el mayor desempeño medio. La Tabla 13 muestra los resultados del análisis de la matriz de clasificación.

Tabla 13: Resultados de la matriz de clasificación para cada clasificador

Clasificador	Desempeño medio (%)	Confusión Media (%)
Maxver	71.53	28.47
Mínima Distancia Euclidiana	52.74	47.26

Fuente: Software Spring 5.1.5 y modificado por el autor

3.3.3.3 Post – Clasificación. Esta fase nos permite realizar el filtraje de las imágenes, lo que nos permitirá obtener temas más uniformes eliminando puntos aislados o clasificados por fuera de su vecindad, esto ayuda a la eliminación del ruido.

En este momento debe ser otorgado un peso el cual definirá el número de veces que se considerara la frecuencia del punto central y un umbral que será el valor por encima del cual será modificado el punto central.

La definición del peso fue de 2 y el umbral fue de 5, este valor depende de las características de la imagen clasificada, entre menor sea el peso y el umbral se realizara un número de sustituciones mayor. Se optó por utilizar estos valores de peso y umbral por ser los valores recomendados por defecto por el programa *Spring*.

3.3.3.4 Mapeo. Consiste en generar los mapas definitivos donde cada tema generado debe ser otorgado a una clase, en un modelo de datos temático.

Después de desarrollados todos los procesos para la clasificación el modelo matricial debe ser transformado a un modelo vectorial, este proceso es más complejo que si se transformara de vector a matriz, ya que además de extraer los contornos de los objetos, se deben crear también las relaciones espaciales entre ellos, tales como relaciones de vecindad y pertenencia entre polígonos, y conectividad entre arcos. Este proceso solo es aplicado a los datos donde los objetos presentes tienen extensión en área, o sea polígonos.

A partir de la imagen original, el algoritmo genera una imagen binaria conteniendo apenas las fronteras entre los objetos presentes. Este proceso permite suavizar las regiones de la imagen para permitir una mejor interpretación.

Finalmente se importa una máscara con los límites de la cuenca y se hace el corte con el fin de obtener el mapa de la zona de estudio.

3.3.4 Resultados y Validación del mapa de clasificación vegetal. El mapa final se generó a partir del clasificador Maxver con un 100% de Umbral (Numeral 3.3.3.2) ya que este fue el que presento un mayor porcentaje de desempeño medio, además, la representación cartográfica obtenida es la más ajustada a la utilizada como referencia. Para realizar este procedimiento se genero un eje Temático para cada tipo de vegetación:

- Zona Urbana ZU
- Cultivos Mixtos M
- Cultivos Semi-Permanentes CSP
- Pastos Naturales P
- Cultivos, Pastos, Rastrojos C-P-R
- Sistemas Silvoagrícolas SA
- Sistemas Silvopastoriles SP
- Bosque Natural Secundario BNS
- Rastrojo R
- Bosque Plantado BP
- Pajonales VEPJ
- Vegetación de Paramo VP

Se realizó el proceso de clasificación de forma repetida con el fin de seleccionar las muestras que arrojaran el menor error posible. Esto llevó a que los ejes temáticos correspondientes a los tipos de vegetación de Sistemas Silvoagrícola y Sistemas Silvopastoriles fueran eliminados, ya que las muestras tomadas en cada tema mostraban una alta probabilidad de pertenecer al tipo de vegetación Cultivos Semipermanentes, esto mismo sucedió con el eje temático Bosque Plantado, el cual se fusiono con Bosque Natural Secundario.

A continuación se presentan los resultados del Análisis de Muestras con el Clasificador Maxver 100% de Umbral.

- Desempeño Medio = 71.53%
- Abstención Media = 0%

- Confusión Media = 28.47%

El desempeño medio nos señala que el 71.53% de los pixeles fueron clasificados correctamente. Este porcentaje es muy bueno considerando la calidad de las imágenes, el porcentaje de nubosidad y la incertidumbre en los datos de entrada.

A continuación se realizará el análisis detallado de la matriz de confusión de los temas y de las muestras respectivas, además del proceso de validación cualitativo del mapa.

3.3.4.1 Matriz de confusión de los temas y sus muestras. En forma más explícita, los porcentajes que se presentan al analizar las muestras en la etapa de entrenamiento nos señalan el número de pixeles que están clasificados en cada tema.

Tabla 14: Matriz de confusión del tema para el clasificador Maxver 100%

Tema	BNS	ZU	M	CSP	P	R	VEPJ	CPR	VP
BNS	85.56	0.93	1.93	2.99	0.00	0.00	7.05	1.53	0.00
ZU	2.44	48.44	7.11	28.22	0.00	0.00	8.22	0.22	5.33
M	12.75	3.50	77.17	6.16	0.00	0.00	0.14	0.00	0.28
CSP	11.25	15.35	5.12	57.54	0.00	0.00	10.49	0.00	0.26
P	8.70	0.00	0.00	0.00	62.89	21.02	1.31	0.99	5.09
R	2.16	0.00	0.00	0.00	5.80	80.26	0.00	1.65	10.13
VEPJ	11.89	0.44	0.00	3.52	0.00	0.00	80.18	3.52	0.44
CPR	0.00	0.82	0.00	0.00	0.20	0.00	0.61	96.73	1.63
VP	26.60	4.37	5.49	5.12	0.00	3.81	7.72	1.77	45.12

Fuente: Software Spring 5.1.5 y modificado por el autor

La Matriz de Confusión del tema muestra los resultados en forma porcentual del nivel de aceptación de cada uno de los ejes temáticos generados para realizar la Clasificación Supervisada usando las muestras tomadas en la etapa de entrenamiento. Si la clasificación fuera perfecta los valores en la diagonal

principal sería cercanos al 100% pero esto es muy difícil de lograr considerando que las características espectrales de los tipos de vegetación son muy similares.

Los valores por fuera de la diagonal principal, por ejemplo el de 2.44 de la fila 2 y columna 1 indica que el 2.44% del área de la clase Bosque Natural Secundario fue clasificada como Zona urbana, esto mismo sucede con los demás valores.

Las matrices de confusión de las muestras señalan en forma porcentual la posibilidad de que cada muestra corresponda al tema al cual fue asignada. Estas matrices se muestran en el Anexo B.

Finalizado el proceso de clasificación supervisada y el análisis de los resultados mediante el software *Spring*, se procede a la generación del mapa de clasificación vegetal definitivo y la determinación de las áreas clasificadas para cada grupo temático de vegetación.

Tabla 15: Áreas clasificada para cada grupo temático

Área (Km x Km)	
Tema	Área
Bosque Natural Secundario	564.5216
Cultivos Mixtos	179.4344
Cultivos, Pastos, Rastrojos	44.2899
Cultivos Semipermanentes	110.9797
Pajonales	125.0434
Pastos Naturales	51.9208
Rastrojo	108.3251
Vegetación Páramo	57.5848
Zona Urbana	41.5221
Área Total Clasificada	1283.6218

Fuente: Software Spring 5.1.5 y modificado por el autor

3.3.4.2 Validación de los resultados. Para la validación de los resultados obtenidos se realizaron salidas de campo para el reconocimiento de la zona de estudio, allí se ubicaron 25 puntos a los cuales se le tomaron las coordenadas (Con GPS) y una secuencia de fotos a su alrededor. Estos puntos fueron ubicados sobre el mapa definitivo del cual se tomo se respectiva clasificación.

Tabla 16: Ubicación y clasificación de los puntos tomados en campo

Estación	Coordenadas		Resultado de la clasificación	Imágenes tomadas
	E	N		
1	1119100	1276167	Rastrojos	2
2	1119457	1276467	Pastos Naturales	9
3	1119306	1276144	Pastos Naturales	7
4	1119381	1275947	Pastos Naturales	4
5	1119699	1273780	Rastrojos	5
6	1119893	1270333	Bosque natural secundario	5
7	1119671	1270105	Bosque natural secundario	11

8	1119551	1269386	Pajonales	9
9	1119341	1266852	Cultivos Mixtos	5
10	1119045	1271619	Bosque natural secundario	10
11	1118160	1269212	Bosque natural secundario	12
12	1116994	1266960	Pajonales	8
13	1112697	1278065	Bosque Natural Secundario	5
14	1113578	1279664	Bosque Natural Secundario	4
15	1113804	1279623	Bosque Natural Secundario	5
16	1114644	1280525	Cultivos, Pastos, Rastrojos	7
17	1118519	1279664	Rastrojo	6
18	1119032	1276835	Pastos Naturales	6
19	1120323	1278065	Rastrojo	3
20	1121533	1278065	Pajonales	7
21	1113558	1282513	Rastrojo	5
22	1114829	1284297	Bosque Natural Secundario	4
23	1118048	1285281	Cultivos, Pastos, Rastrojos	5
24	1120938	1286449	Bosque Natural Secundario	3
25	1122783	1288356	Vegetación Páramo	3

Fuente: Grupo GPH

Para la validación de la clasificación se analizaron las fotografías tomadas en campo para determinar el tipo vegetación que allí se encuentra. Las imágenes tomadas en las estaciones de las cuales se adquirieron las muestras para comparación se muestran en el Anexo B 9. Se realizó un análisis comparativo entre la clasificación vegetal de las estaciones obtenidas a partir del mapa generado y los registros fotográficos de tomados en campo.

Las estaciones 6, 7, 11, 13, 14, 15, 22 y 24 fueron clasificadas según el mapa como Bosque Natural Secundario, lo que corroboran las fotografías tomadas en los respectivos puntos, las cuales muestran una combinación de bosque natural y bosque plantado como pinos y coníferas. Mientras que la estación 9

presenta rasgos de cultivos de diversas clases, lo que corresponde con la clasificación de Cultivos Mixtos obtenida del mapa.

Las estaciones 16 y 23 poseen características de pastos, mezclados con rastrojos y cultivos, lo que corresponde con la clasificación Cultivos, Pastos, Rastrojos dada en el mapa.

Las estaciones 12, 8 y 20 fueron clasificadas como Pajonales y la estación 25 fue clasificada como Vegetación de paramo, para ambos casos existe correspondencia con las imágenes tomadas en las estaciones respectivas.

Las estaciones 2, 3, 4 y 18 fueron clasificadas en el mapa como Pastos naturales, sin embargo las estaciones 2, 3, y 4 muestran una mezcla entre pastos y bosque, la estación 18 muestra correspondencia con la clasificación del mapa.

Las estaciones 1, 5, 17, 19 y 21 fueron clasificadas en el mapa como rastrojos, sin embargo, las estaciones 1, 19, 5 y 17 muestran una combinación de rastrojos con pajonales y vegetación boscosa. La estación 21 corresponde a la clasificación del mapa.

La mayoría de las estaciones de muestra, corresponden a las características arrojadas por el mapa de clasificación vegetal generado. Si bien, no todas las estaciones son símiles a su homólogo en el mapa, el error puede atribuírsele a la confusión media generada durante la clasificación supervisada en el software *Spring*, la cual corresponde al 28.47% de confusión (Numeral 3.3.4.1).

Capítulo 4

4. APROXIMACION A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO INTEGRANDO EL MDE Y EL MAPA DE CLASIFICACIÓN VEGETAL

La cuenca, vista como un sistema hidrológico, es la unidad espacial fundamental donde se desarrollan los procesos físicos que son base para el desarrollo de modelos hidrológicos. Estos modelos necesitan información fisiográfica, tal como la configuración de la red de drenaje de la cuenca, delimitación y subdivisión de la misma en subcuencas, superficies; así como información de tipo y cobertura vegetal y de suelo.

El presente capítulo pretende describir el procedimiento aplicado para la integración del MDE (Capítulo 2) y el mapa de clasificación vegetal (Capítulo 3) para la CSRL en un Sistema de Información Geográfica a través del software ArcGIS, con el fin de interrelacionar las características de cada modelo con lo cual se determinarán algunos de los parámetros necesarios para la generación de modelos hidrológicos, específicamente los coeficientes de cultivo (K_c) y estrés hídrico (K_s) aplicables a la ecuación FAO Penman-Monteith para Evapotranspiración Real.

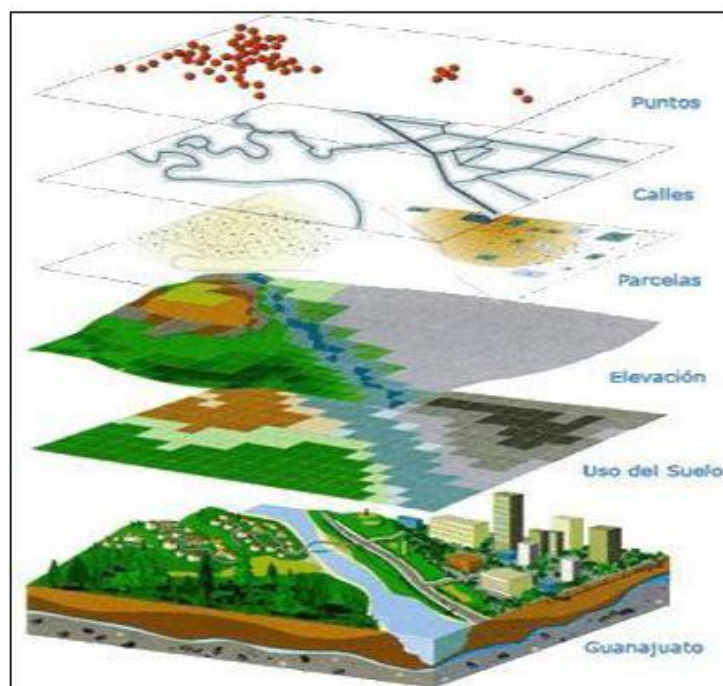
4.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Un Sistema de Información Geográfica es una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, modificación, análisis espacial, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada. (ESRI, 1993).

Los SIG permiten separar la información en diferentes capas temáticas y almacenarlas independientemente, por esta razón se hacen una herramienta indispensable en la elaboración de un trabajo, ya que se puede acceder a cada una de estas capas de una manera ágil, rápida y sencilla. Un SIG permite la representación del mundo, almacenando información sobre éste, en una serie de niveles temáticos.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses. Por esa razón, muchos de los estudios hidrológicos se ayudan de los SIG para la construcción de modelos más eficientes, especialmente cuando es necesaria la representación espacial de los parámetros que convergen en la aplicación de metodologías de modelamiento. A continuación se presenta una breve conceptualización acerca de los SIG y su interrelación con la hidrología en la construcción de modelos hidrológicos.

Figura 7: Funcionamiento de un SIG



Fuente: <http://dataplusdateunsupplement.blogspot.com>

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) juegan un papel fundamental en la elaboración de modelos hidrológicos, no sólo en la integración de la información, sino en la capacidad operatoria en procesamiento espacial que permite la extracción automática de los parámetros a incluir en la modelación hidrológica a partir de información de MDE, geología, clasificación vegetal y de suelo, etc. A su vez, los SIG permiten enlazar esta información a paquetes de capas de información hidrológica y realizar el postproceso, es decir recuperar las salidas de los modelos y graficarlas en el mismo ambiente SIG.

4.2 INTEGRACION DEL MDE Y EL MAPA DE CLASIFICACION VEGETAL DE LA CSRL AL ENTORNO SIG DE ARCGIS

La migración del MDE al ambiente SIG ofrecido por ArcGIS es básicamente un problema de formato. Debido a esto es necesario realizar la transformación de formatos a extensiones legibles por el programa ArcGIS. Es muy importante además, la unificación entre las grillas del MDE y el mapa de clasificación vegetal en formato *Raster*, así como la correspondencia entre los sistemas coordenados de ambos modelos, ya que de esto depende la posibilidad de realizar operaciones entre las celdas de cada mapa y generar una nueva capa de información que combine las características de vegetación de la cuenca con parámetros derivados del Modelo Digital de Elevaciones, como por ejemplo la pendiente.

A continuación se presenta la metodología aplicada para el traslado del Modelo Digital de Elevaciones y el mapa de clasificación vegetal de la Cuenca Superior del Río Lebrija al ambiente ArcGIS.

4.2.1 Migración del MDE de la CSRL al software ArcGIS. En el capítulo 2, se elaboró el Modelo Digital de Elevaciones para CSRL, con una estructura de datos tipo *raster* y celdas de 30x30 metros mediante el software *Surfer* V.9, cuya extensión característica es **.grd*. A continuación se presentan los pasos para la transformación del formato **.grd* a un formato admisible por ArcGIS.

- Primero se exporta el archivo a una extensión **.ASCII* desde el software *Surfer*
- Seguidamente, en la interfaz gráfica de ArcGIS, se convierte el archivo **.ASCII* que al formato *Raster Dataset*. Esto se realiza mediante la herramienta ***Conversion Tools – To Raster – ASCII to Raster***.
- A continuación se define la referencia espacial que corresponde al sistema coordenado MAGNA SIRGAS (Numeral 2.2.3.1).
- Por último se definen los límites del área de trabajo (*Data Frame*).

Tanto la referencia espacial, como la definición del área de trabajo son muy importantes en la creación del SIG ya que de esto depende integración exitosa del MDE con cualquier otro archivo raster.

4.2.2 Migración del mapa de clasificación vegetal de la CSRL al software ArcGIS. En el capítulo 3 se generó el mapa de clasificación vegetal para CSRL en formato *vector* y *raster* con un tamaño de pixel de 30x30 metros referencado al sistema coordenado MAGNA-SIRGAS, a través del software *Spring*. Debido a que el software no ofrecía la opción de exportar el mapa en formato *raster* a una extensión aceptada por ArcGIS, se decidió exportar el mapa tipo *vector* a un formato *shapefile*, el cual es la extensión característica de ArcGIS para información tipo *vector*.

El siguiente paso consiste en convertir el archivo *shapefile* a al formato *Raster Dataset*, teniendo en cuenta que el campo que se desea transformar es el correspondiente a la clasificación vegetal y que el tamaño del pixel deseado es de 30 metros. Esto se realiza mediante la herramienta ***Conversion Tools – To***

Raster – Feature class to Raster. Durante la transformación de *vector* a *raster*, es importante definir los mismos límites del área de trabajo (*Data Frame*) que se definieron para el MDE. La referencia espacial es importada automáticamente desde el archivo *vector* al archivo *raster*.

Seguidamente se procede a crear la leyenda para la representación de los pixeles según el tipo de vegetación correspondiente.

4.2.3 Creación del SIG. Cada celda en un archivo *Raster* contiene, en el centro de la misma, información que puede ser de tipo numérica o texto. Esta información puede ser combinada mediante la operación matemática entre las celdas de diferentes archivos tipo *raster* y generar una nueva capa de información cuyas celdas albergarán valores productos de la integración. El sistema de información geográfica permite alojar en el mismo entorno las capas de datos que se desean combinar. En este caso, las capas mencionadas corresponden a los archivos *raster* que contienen el MDE y la clasificación vegetal.

El primer paso en la elaboración del SIG, consiste integrar los archivos en formato *Raster Dataset* generados en los numerales anteriores al mismo ambiente SIG en ArcGIS. Para esto, se cargan los archivos del MDE, la clasificación vegetal y el mapa de pendiente (Anexo A7) al mismo archivo **.Mxd*, el cual es el formato utilizado por ArcGIS para la generación de proyectos SIG.

Para que la integración sea exitosa y el SIG permita la operación entre mapas, es muy importante que la distribución de la grilla, es decir, la matriz regular de pixel, sea igual en todas las capas de información. Esto permite que cada celda que compone el MDE esté ubicada exactamente sobre la celda homóloga de la grilla correspondiente al mapa de clasificación vegetal.

Para lograr la unificación de la grilla de trabajo, deben cumplirse tres requisitos principales. El primero consiste en cerciorarse que el tamaño del pixel en todas

las capas de información sea exactamente igual. El segundo requisito exige la equivalencia entre el sistema coordinado de referencia, el cual corresponde al sistema coordinado MAGNA – SIRGAS. El tercer requisito implica que los límites del área de trabajo o *Data Frame* sea el mismo. Estos requisitos se aseguraron mediante la metodología aplicada en los numerales 4.2.1 y 4.2.2 en la migración de los modelos al entorno SIG.

El producto final consiste en un archivo **.Mxd* que contiene un SIG con información de elevación, tipo de vegetación y porcentaje de elevación (pendiente), para cualquier punto en la Cuenca superior del Río Lebrija a una resolución de 30 metros, enmarcado en el mismo sistema de referencia coordinado.

Capítulo 5

5. PRODUCTOS FINALES Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se describen los resultados obtenidos a partir de las metodologías descritas para la obtención del Modelo Digital de Elevaciones y del mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del Río Lebrija, así como la integración de éstos a un Sistema de Información Geográfico.

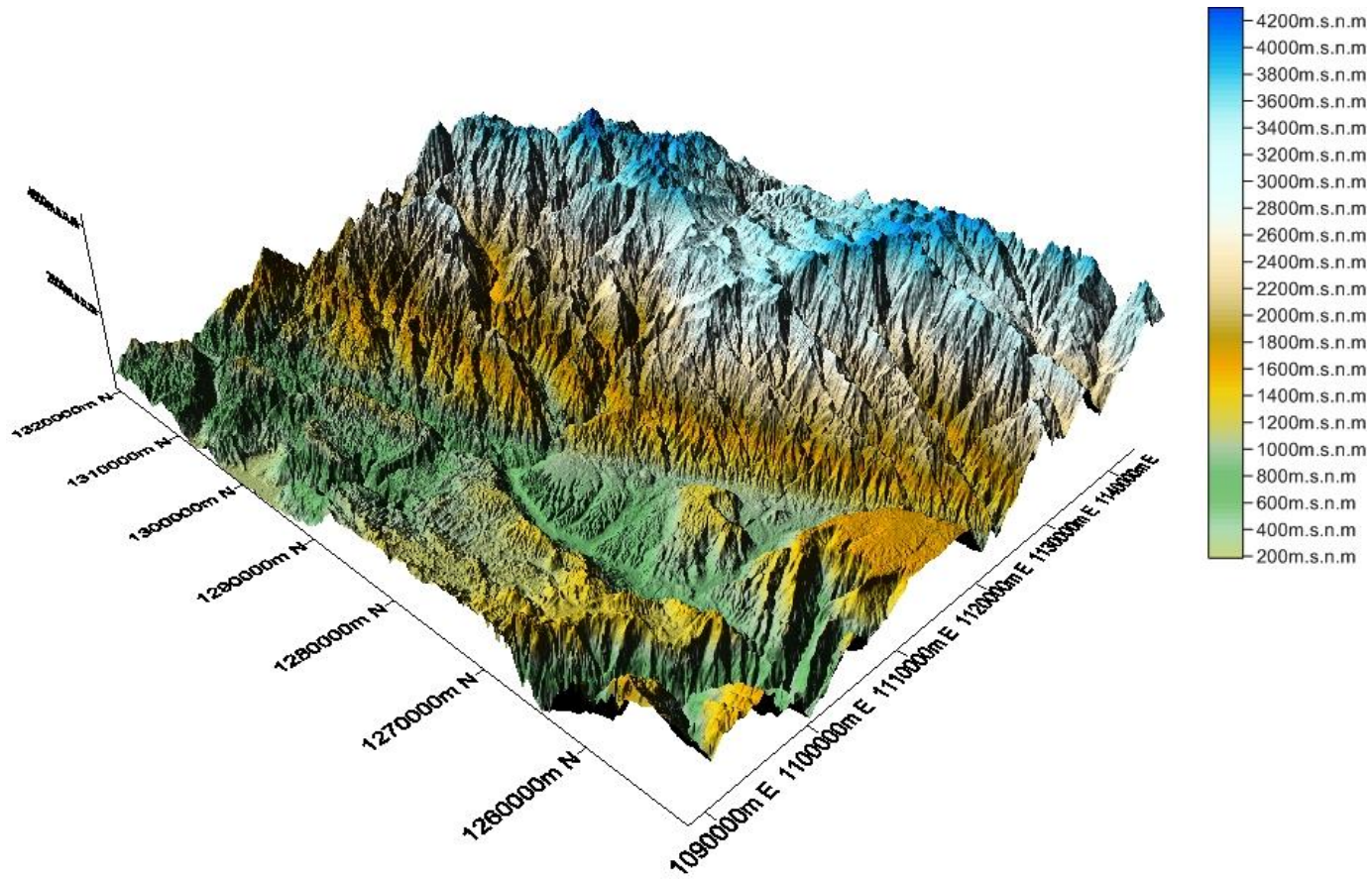
Debido a que los productos finales consisten en modelos, se presentarán además, los análisis respectivos a cada uno de ellos, con el fin de validar la fidelidad con la que éstos modelos se ajustan a la realidad, así como sus aplicaciones, sus ventajas y sus limitaciones.

5.1 MODELO DIGITAL DE ELAVACIONES DE LA CSRL

La Figura 9 muestra el Modelo Digital de Elevaciones definitivo para la Cuenca Superior del Río Lebrija con una estructura tipo *Raster* con celdas de 30x30 metros y un error promedio de 4.158 metros para una desviación estándar de 7.50, generado a partir de imágenes de radar SRTM correspondiente al territorio colombiano con resolución espacial de 1 segundo de arco y suministrada por el Instituto geográfico Agustín Codazzi.

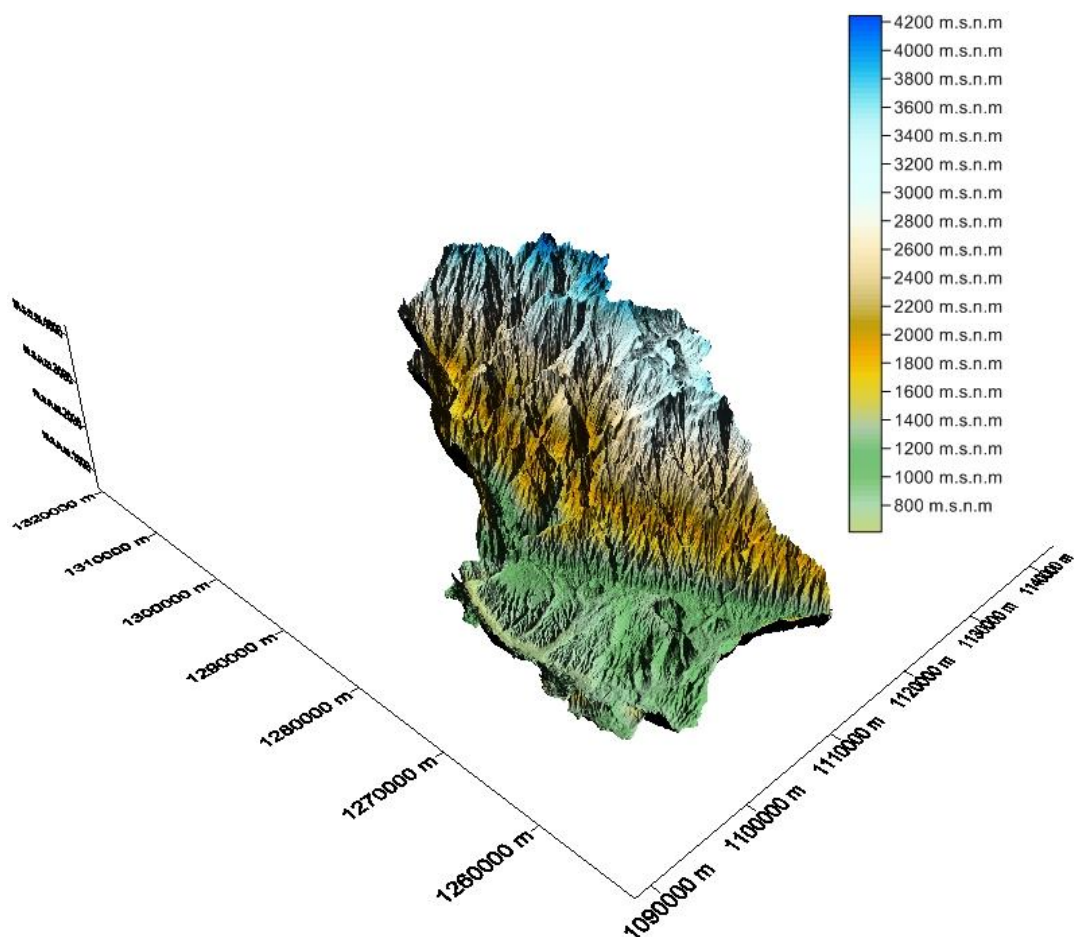
El MDE fue georreferenciado al sistema coordinado MAGNA-SIRGAS, para lo cual se realizo la transformación de coordenadas geográficas referidas al sistema WGS84, a coordenadas planas referidas al sistema MAGNA_Colombia _Bogotá. Esto se realizo con ayuda del software ArcGIS 9.3.1, que cuenta con una herramienta para conversión de coordenadas dentro de las que se encuentra el sistema de referencia utilizado en Colombia.

Figura 8: MDE en 3D de la región que contiene la CSRL en Surfer



Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por el autor

Figura 9: MDE en 3D de la Cuenca Superior del Río Lebrija en Surfer



Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por el autor

El proceso de validación del MDE se realizó comparando las elevaciones de 40 puntos reales con elevaciones extraídas del MDE y aplicado herramientas estadísticas (Numeral 2.2.3.3). Este proceso demostró una correspondencia con las exigencias de calidad de dos entidades internacionales NMAS y USGS, de las cuales se concluye que:

- Según **National Map Accuracy Standards**, el error vertical de las muestras, en nuestro caso, no debe exceder 15 metros, en un 90% de los puntos (Numeral 2.2.3.3). El MDE generado cumple esta exigencia para el 92.5% de los puntos, lo cual valida el modelo para éste estándar de calidad.

- Según la clasificación de la **United States Geological Survey** para Modelos Digitales de Elevación, el MDE generado para la CSRL se clasificó como de nivel 3 (Numeral 2.2.3.3). En función de esta clasificación, desviación típica no debe ser mayor a 7.50 y la muestra no debe contener puntos para los cuales el error vertical sea superior al intervalo de la fuente de más precisión.

El MDE generado posee una desviación típica calculada de 7.50 metros y la discrepancia máxima de los puntos de la muestra no supera los 30 metros (Tabla 6).

El MDE obtenido en este proyecto tiene información suficiente para definir propiedades de la red de drenaje superficial para la Cuenca Superior del Río Lebrija, delimitación de Subcuencas, pendientes y superposición de mapas. El Anexo A 5 muestra el mapa de pendientes de la CSRL, generado a partir del MDE.

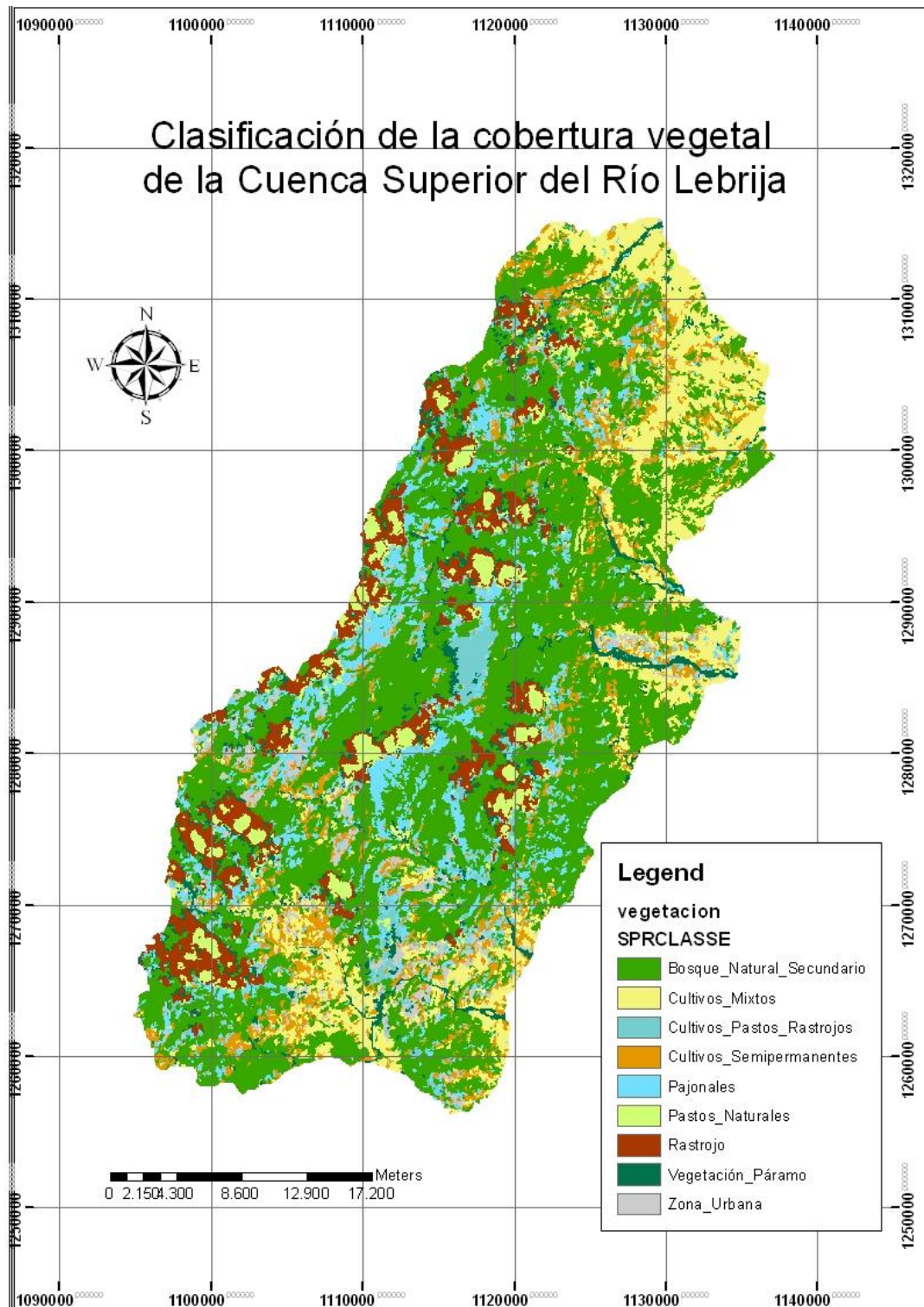
El MDE generado en formato *raster* está limitado al tamaño del pixel, es decir, la información de elevación por cada pixel en el mapa es confiable para un área máxima de 30x30 m².

5.2 MAPA DE CLASIFICACIÓN VEGETAL

La Figura 10 muestra el mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del Río Lebrija, en formato vectorial, generado a partir de imágenes satelitales Landsat ETM+ de Junio de 2008 mediante la metodología de Clasificación Supervisada aportada por el software *Spring* con una confiabilidad de 71.53% en la clasificación (Numeral 3.3.4.1). Se generó, además el mapa de clasificación vegetal de la CSRL en formato raster con celdas de 30x30 metros, el cual, al integrarse a un Sistema de Información Geográfico, puede brindar los insumos para el cálculo de parámetros necesarios para la determinación de variables hidrológicas, específicamente el coeficiente de cultivo K_c y el coeficiente de estrés hídrico K_s , para la aplicación de la ecuación FAO Penman – Monteith para Evapotranspiración Real.

El mapa de clasificación vegetal en formato raster está limitado al tamaño del pixel, es decir, la información de vegetación por cada pixel en el mapa es confiable para un área máxima de 30x30 m². La validación del modelo está limitada a la apreciación cualitativa por medio de fotografías, ya que no se cuenta con parámetro cuantitativo para comparar la clasificación generada por la metodología de Clasificación Supervisada y las condiciones reales de vegetación en la cuenca.

Figura 10: Mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del Río Lebrija



Fuente: Software ArcGIS 9.3 y modificado por el autor

5.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO INTEGRANDO EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y EL MAPA DE CLASIFICACIÓN VEGETAL

El producto final consiste en un archivo con extensión *.Mxd, el cual es el formato utilizado para proyectos SIG de ArcGIS y que contiene un Sistema de Información Geográfico que integra información de elevación, tipo de vegetación y porcentaje de elevación (pendiente), con una estructura de datos tipo *raster* para cualquier punto en la Cuenca superior del Río Lebrija con una resolución de 30 metros enmarcado en el sistema de referencia coordinado MAGNA - SIRGAS.

La importancia del Sistema de Información Geográfico generado en éste proyecto, enmarcado en el contexto hidrológico, radica en la posibilidad de combinar factores propios de una o varias características asociadas a cada uno de los grupos temáticos integrados al SIG por medio de la operación entre las celdas o pixeles que componen cada capa de información. Esto hace posible, por ejemplo, la generación de mapas de clasificación vegetal de acuerdo a la pendiente y al clima, la clasificación del grupo de orden de los ríos principales, la división por Subcuencas del tipo de vegetación, la determinación del coeficiente de cultivo (K_c) por cada pixel y combinado con un mapa de clasificación de texturas de suelo, es posible la aproximación al coeficiente de estrés hídrico (K_s) para Evapotranspiración Real (FAO Penman-Monteith).

La realización exitosa de la integración del Modelo Digital de Elevaciones, el mapa de Clasificación Vegetal y el mapa de Pendiente, se hizo posible gracias a la uniformidad del tamaño de pixel de cada capa de información, a la homogeneidad del *Data Frame* (Numeral 4.2.1) y a la correspondencia del sistema coordinado de referencia.

El SIG generado se encuentra abierto a la incorporación de nuevos grupos temáticos que aporten factores y permitan la generación de diversos modelos hidrológicos, como por ejemplo modelos de vulnerabilidad, amenaza y riesgo, siempre y cuando cumplan con los requisitos mencionados en el numeral 4.2.3 para la operación entre celdas e integración de mapas.

CONCLUSIONES

Se generó el MDE definitivo para la Cuenca Superior del Río Lebrija con una estructura de datos tipo *Raster* con un tamaño de pixel de 30 metros, con un error promedio de 4.158 metros en la validación y una desviación estándar de 7.50. El MDE fue generado a partir de imágenes de radar SRTM tipo *raster* con celdas de 1 segundo de arco con la ayuda del software *Surfer*, y a través de técnicas de geoprocésamiento, fue referenciado al sistema coordinado MAGNA-SIRGAS, utilizado actualmente como el sistema coordinado oficial de Colombia.

Mediante herramientas estadísticas, se realizó el filtrado y análisis de las diferencias en elevación durante el proceso de validación entre 40 puntos reales tomados en campo con puntos del MDE, y se compararon los resultados con los estándares de calidad para exactitud vertical de las entidades internacionales NMAS (National Map Accuracy Standards) y USGS (U.S. Geological Survey). Los resultados demostraron que el MDE generado en este estudio cumple con los requerimientos de calidad exigidos por las dos entidades internacionales citadas.

Se generó el mapa de clasificación de la cobertura vegetal de la CSRL en formatos vectorial y raster con celdas de 30x30 metros a partir de la combinación de las bandas 3, 4 y 5 de las imágenes satelitales Landsat ETM+ ubicadas en el path/row 7/55. La clasificación se realizó por medio de la técnica Clasificación Supervisada incluida en el software *Spring* utilizando como información base los Planes de Ordenamiento Ambiental de las microcuencas de Rio de Oro (2004), Tona (2002) y Suratá Bajo (2002) realizados y suministrados por la CDMB.

La Clasificación Supervisada se realizó mediante el clasificador Maxver 100%, debido a que éste presenta el mayor desempeño medio (71.53%), el cual se

considera aceptable considerando que las características espectrales de las clases son muy parecidas. Se efectuó una validación cualitativa con 25 fotografías tomadas en campo el 11 de Abril de 2010, comparando los puntos de control muestrales con las clasificaciones generadas por el mapa, lo que corroboró la eficacia del mismo y los umbrales de error o confusión mostrados por el clasificador Maxver (28.47%).

Se Elaboró un Sistema de Información Geográfico (SIG), que integra el MDE, la clasificación vegetal y el drenaje de la CSRL, con una estructura de datos tipo *raster* en celdas de 30x30 metros y con un enmallado homólogo que permitirá la operación entre celdas, lo cual es fundamental al momento de crear modelos hidrológicos y superposición de mapas en formato *raster*.

RECOMENDACIONES

Con el fin de obtener un MDE con mejor representación visual, se recomienda utilizar imágenes de radar con mayor resolución espacial y con una mejor unión entre límites, debido a que deficiencias en la costura entre imágenes pueden ocasionar deformaciones en la representación del modelo. Adicional a esto, es aconsejable mejorar el modelo, integrando a la información base, una gran cantidad de puntos, que pueden sacarse de cartografía, siempre y cuando el origen de los puntos esté referenciado al mismo sistema coordinado y la calidad de la cartografía sea de igual o mayor que la fuente primaria.

Se recomienda tomar la mayor cantidad de puntos de control para la validación del MDE como sea posible, con el fin de obtener un modelo con una validación sólida y de mayor confianza. Por otro lado, se aconseja que los puntos de control se encuentren distribuidos en toda el área de trabajo, debido a que un muestreo parcializado puede viciar la validación y obviar zonas que podrían necesitar un tratamiento adicional.

Se recomienda que la información base para la realización de la etapa de entrenamiento, sea de excelente calidad y provenga de una fuente primaria o un muestreo en campo, ya que estos datos mejoran la calidad y la confiabilidad en el proceso de Clasificación Supervisada. Se recomienda, además, el reconocimiento del área de estudio con el fin de ahorrar tiempo en la etapa de entrenamiento y descartar muestras que no correspondan con las condiciones de campo.

A la hora de validar la clasificación y el mapa generado, es aconsejable tomar la mayor cantidad de puntos de control y que éstos cobren la mayor parte del área de trabajo como sea posible. Es recomendable que el proceso de comparación en la validación sea realizado (o en su defecto, bajo la

supervisión) por un agrónomo o una persona capacitada en la clasificación vegetal.

Para la generación de un SIG en formato raster, es recomendable dar formato a las capas que estarán involucradas antes de realizar la integración, es decir, establecer los límites del proyecto, unificar el tamaño del pixel y clasificar la capa según la leyenda deseada. Es aconsejable, también, utilizar la versión del software ArcGIS 9.3 o mayor, ya esta tiene incluidos en su base de datos, los parámetros necesarios para migrar los sistemas coordenados utilizados en Colombia a MAGNA-SIRGAS.

BIBLIOGRAFIA

AGUILAR, F, Evaluación de Diferentes Técnicas de Interpolación Espacial para la Generación de Modelos Digitales de Terreno Agrícola. Proyecto del Departamento de Ingeniería Rural, Universidad de Almería, España, 2001.

ARIZA, Francisco; ATKINSON, Alan. Metodologías de control posicional: Vision general y análisis crítico [Online]. Grupo de Investigacion en Ingeniería Cartográfica [Jaén, España]: Universidad de Jaén, Noviembre de 2006. [Citado 13 Abril 2010]. Disponible en internet:

http://coello.ujaen.es/investigacion/web_giic/SubWeb_Giic_PNCPos/Ficheros_WebPNCpos/INFORME_AENOR_MCP_VisionGenral_ACritico.pdf

BOSQUE, Joaquin. Modelo Digital de Terreno [Online]. Noviembre 1995 [Citado 22 Enero 2010]. Disponible en internet:

http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1318

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

CASTELLANOS, Rafael y TORRES, Disson. Elaboración de un modelo digital de elevaciones y delimitación del tipo de suelo presente en la Cuenca Superior del Rio de Oro. Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2009.

CDMB. Estudio de Desarrollo Integral de la Cuenca Superior del Río Lebrija [Online]. Bucaramanga (CO), 1981 [Citado 22 Enero 2010]. Disponible en internet:

http://www.contratos.gov.co/archivospuc1/2009/DA/132010002/09-15-221333/DA_PROCESO_09-15-221333_132010002_1176751.pdf

CHUVIECO, Emilio. 1996. *Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ª Edición revisada. Madrid, España.*

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA, CDMB. (2002) Estudio Plan de Ordenamiento Ambiental de la microcuenca del río Charta, área de jurisdicción de la C.D.M.B. Bucaramanga.

-----Estudio Plan de Ordenamiento Ambiental de la microcuenca del río Suratá Bajo, área de jurisdicción de la C.D.M.B. Bucaramanga, 2002.

-----Plan de Ordenamiento Ambiental Territorial microcuenca río Tona. Bucaramanga, 2002.

-----Plan de Ordenamiento Territorial y Ambiental de la cuenca del río de Oro. Bucaramanga, 2004.

DREWES, Hector. Time Evolution of the SIRGAS reference frame Springer; IAG Symposia; Vol. 118: 174-179.

FELICÍSIMO, Ángel. Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales [Online]. Cáceres (ES), 1994 [Citado 22 Enero 2010]. Disponible en internet:

<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>. 118p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, (Allen et al., 1998). Crop evapotranspiration –Guidelines for computing crop water requirements –FAO Irrigation and drainage paper 56”

GOLDEN SOFTWARE, Inc. “Users’ manual of Surfer for Windows (version 8.0)”. Golden (USA): Golden Software Inc., 2007.

GOOGLE. Google Earth User Guide [Online]. 2007. [Citado 15 Abril 2010]. Disponible en internet:

http://static.googleusercontent.com/external_content/untrusted_dlcp/earth.google.com/es//intl/es_ALL/userguide/v5/google_earth_user_guide.pdf

GUZMAN Jorge A., ANAYA Ángel, NIÑO Edward, GOMEZ Sully, COLEGIAL Juan D. Cuenca Experimental Rio Sucio, Municipio de Tona, Santander, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005

IBÁÑEZ, Enric. Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado: Aplicación a La Marisma Del Parque Nacional de Doñana. Tesis de Doctorado Ingeniería de Terreno. Barcelona (ES): Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008.

MARQUEZ, Eduardo. Control de la exactitud posicional vertical de la cartografía digital como base gráfica de un GIS. San Juan (AR): Universidad Nacional de San Juan. Facultad de Ingeniería. 2007

MUÑOZ, R y LEON, J. Intensidad extractiva del Uso Actual del Suelo y Cobertura Vegetal de la Subcuenca Rio Tona basada en Sensores Remotos, Universidad Industrial de Santander, 2003.

Pinto J., Interpretación Digital. En: Pinto J. Teledetección. Bucaramanga; pp 1-28.

PUSINERI, Graciela; *PEDRAZA*, Raul; *LOZECO*, Cristobal. Uso de modelos digitales de elevación y de SIGs en la modelación hidrológica. Santa Fé, Argentina, Universidad del Litoral. 2007

ROLDAN, I. Mapa De Coberturas del Suelo de la estación experimental forestal San Juan Tetla y sus alrededores elaborado con base en diferentes métodos de Clasificación Supervisada, Tesis, 2003.

SANCHEZ, Laura. Adopción del Marco Nacional de Referencia MAGNA – SIRGAS como datum oficial de Colombia [Online]. División de Geodesia de la Subdirección de Geografía y Cartografía [Bogotá, Colombia]: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004. Disponible en internet: http://webigac.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/MAGNAWEB_final/documentos/adopcion.pdf

SERRANO, Adriana y BALAGUERA, Giovanni. Separación de flujo base en la estación Café Madrid (C.S.R.L.). Proyecto de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2006.

TREMEL, H.; Sánchez, L. y Drewes, H. *Procesamiento de la red GPS básica de Colombia - Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, -MAGNA-*. En: Revista Cartográfica, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No. 73 (7-23). México. (2001)

VANÍČEK, P. and R.R.Steeves, 1996. Transformation of coordinates between two horizontal geodetic datums. *Journal of Geodesy*, 70(11), pp.740-745.

VILLAMIZAR, José Luis. Generación Del Modelo Digital De Elevaciones (MDE) Correspondiente A La Mesa De Barichara Limitada Por Los Rios Fonce, Suarez Y Chicamocha. Tesis de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, 2006.

ANEXOS

Anexo A

Anexo A 1: Coordenadas MAGNA-SIRGAS de los orígenes de las zonas de proyección plana Gauss-Krüger en Colombia

Origen	Coordenadas Elipsoidales		Coordenadas Gauss-Krüger	
	Latitud (N)	Longitud (W)	Norte [m]	Este [m]
Bogotá-MAGNA	4° 35' 46,3215"	74° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Central - MAGNA	4° 35' 46,3215"	71° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Este - MAGNA	4° 35' 46,3215"	68° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste - MAGNA	4° 35' 46,3215"	77° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste Oeste - MAGNA	4° 35' 46,3215"	80° 04' 39,0285"	1 000 000,0	1 000 000,0

Anexo A 2: Coordenadas en Datum BOGOTÁ de los orígenes de las zonas de proyección plana Gauss-Krüger en Colombia

Origen	Coordenadas Elipsoidales		Coordenadas gauss-Krüger	
	Latitud (N)	Longitud (W)	Norte [m]	Este [m]
Bogotá - BOGOTÁ	4° 35' 56,57"	74° 04' 51,30"	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Central - BOGOTÁ	4° 35' 56,57"	71° 04' 51,30"	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Este - BOGOTÁ	4° 35' 56,57"	68° 04' 51,30"	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste - BOGOTÁ	4° 35' 56,57"	77° 04' 51,30"	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste Oeste - BOGOTÁ	4° 35' 56,57"	80° 04' 51,30"	1 000 000,0	1 000 000,0

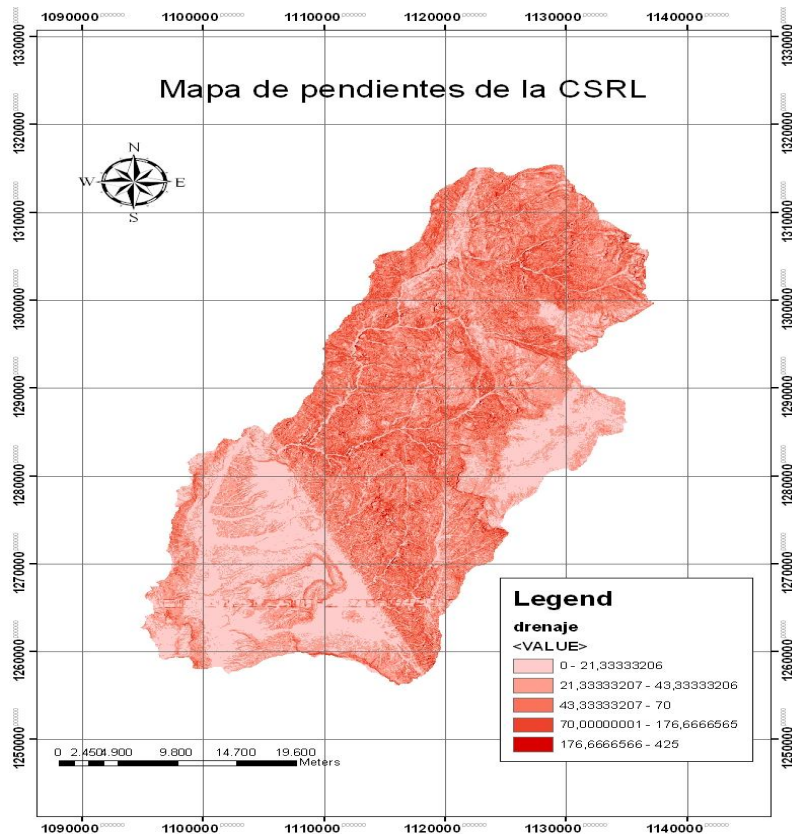
Anexo A 3: Constantes del elipsoide GRS80 asociado a MAGNA-SIRGAS para conversión de coordenadas

Constante	Relación matemática	Valor
Semieje mayor (a)	Constante definida	$a = 6\,378\,137,000$ m
Constante gravitacional geocéntrica (GM)	Constante definida	$GM = 3\,896\,005 \cdot 10^8$ m ³ s ⁻²
Factor de aplanamiento dinámico (J_2)	Constante definida	$J_2 = 108\,263 \cdot 10^{-8}$
Velocidad angular de rotación (ω)	Constante definida	$\omega = 7\,292\,115 \cdot 10^{11}$ rad s ⁻¹
Primera excentricidad (e^2)	Cálculo iterativo a partir de a , GM , J_2 , ω	$e^2 = 6,694\,380\,022\,90 \cdot 10^{-3}$
Segunda excentricidad (e'^2)	$e'^2 = \frac{e^2}{1-e^2}$	$e'^2 = 6,739\,496\,775\,48 \cdot 10^{-3}$
Semieje menor (b)	$b = a\sqrt{1-e^2}$	$b = 6\,356\,752,314\,14$ m
Aplanamiento recíproco ($1/f$)	$f = \frac{a-b}{a}$	$1/f = 298,257\,222\,101$

Anexo A 4: Parámetros regionales de transformación, según el modelo Molodensky-Badekas, para migrar información georreferencia en Datum BOGOTÁ al sistema MAGNA-SIRGAS

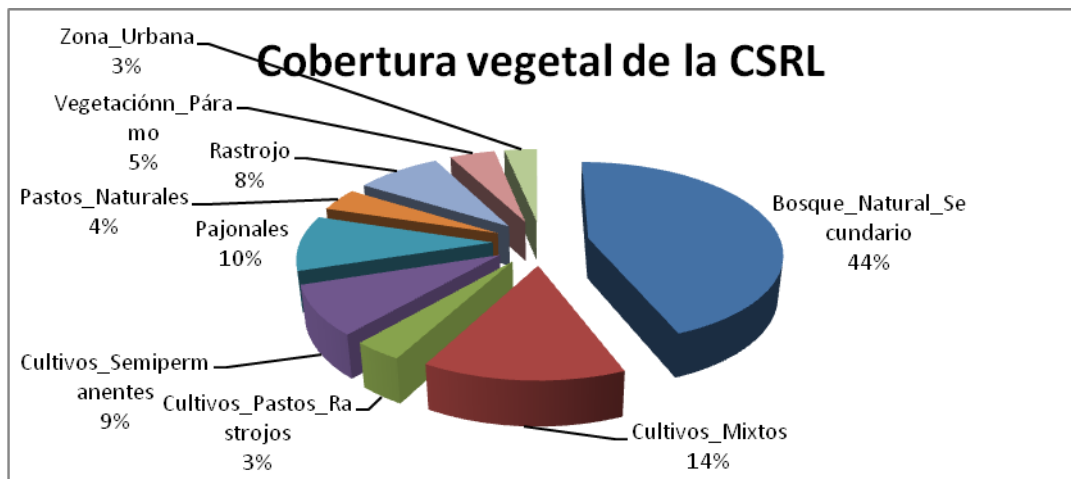
Parámetro	Región			
	I $\varphi = 10,0 \dots 13,0$ N $\lambda = 73,0 \dots 71,0$ W	II $\varphi = 9,4 \dots 11,6$ N $\lambda = 76,0 \dots 73,0$ W	III $\varphi = 8,0 \dots 9,4$ N $\lambda = 77,6 \dots 74,4$ W	IV $\varphi = 5,0 \dots 9,4$ N $\lambda = 74,4 \dots 72,0$ W
ΔX [m]	300,449	308,833	311,118	306,666
ΔY [m]	293,757	282,519	289,167	315,063
ΔZ [m]	-317,306	-314,571	-310,641	-318,837
λ	-2,081 615 E-05	-1,356 561 E-05	-5,771 882 E-06	-1,389 912 E-05
Rx [rad]	6,018 581 E-05	-4,471 845 E-05	-8,358 815 E-05	-7,992 173 E-05
Ry [rad]	-1,450 002 E-05	1,175 087 E-05	-3,057 474 E-05	-8,090 698 E-06
Rz [rad]	-1,892 455 E-04	-4,027 981 E-05	7,573 043 E-06	1,051 699 E-04
Xo [m]	1 891 881,173	1 625 036,590	1 555 622,801	1 845 222,398
Yo [m]	-5 961 263,267	-6 054 644,061	-6 105 353,313	-6 058 604,495
Zo [m]	1 248 403,057	1 172 969,151	991 255,656	769 132,398

Anexo A 5: Mapa de pendientes generado a partir del MDE



Anexo B

Anexo B 1: Porcentaje representativo en cada tema en la clasificación supervisada con clasificador Maxver



Anexo B 2: Matriz de confusión para las muestras de los temas Bosque Natural Secundario y Cultivos Mixtos

BNS				M			
Tema	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Tema	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
BNS	95.68	80.38	72.22	BNS	12.75	2.04	6.43
ZU	0.93	0.00	4.58	ZU	3.50	1.02	15.00
M	1.93	3.62	2.61	M	77.17	94.39	57.14
CSP	2.99	6.86	2.94	CSP	6.16	1.53	20.41
P	0.00	0.00	0.00	P	0.00	0.00	0.00
R	0.00	0.00	0.00	R	0.00	0.00	0.00
VEPJ	7.05	9.14	10.13	VEPJ	0.14	0.00	0.71
CPR	1.53	0.00	7.52	CPR	0.00	0.00	0.00
VP	0.00	0.00	0.00	VP	0.28	1.02	0.00

Anexo B 3: Matriz de confusión para las muestra del tema Zona Urbana

ZU				
Tema	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
BNS	10.00	2.86	0.00	0.00
ZU	44.29	55.71	42.35	52.86
M	12.86	5.00	9.41	0.00
CSP	2.86	20.71	41.76	35.71
P	0.00	0.00	0.00	0.00
R	0.00	0.00	0.00	0.00
VEPJ	10.00	14.29	1.18	11.43
CPR	0.00	0.00	0.59	0.00
VP	20.00	1.43	4.71	0.00

Anexo B 4: Matriz de confusión para las muestras de los temas Cultivos Semipermanentes y Pastos Naturales

CSP		
Tema	Muestra 1	Muestra 2
BNS	19.00	1.18
ZU	7.24	25.88
M	5.88	4.12
CSP	52.49	64.12
P	0.00	0.00
R	0.00	0.00
VEPJ	14.93	4.71
CPR	0.00	0.00
VP	0.45	0.00

P		
Tema	Muestra 1	Muestra 2
BNS	21.33	0.00
ZU	0.00	0.00
M	0.00	0.00
CSP	0.00	0.00
P	46.43	96.92
R	14.68	3.08
VEPJ	3.17	0.00
CPR	2.38	0.00
VP	12.30	0.00

Anexo B 5: Matriz de confusión para las muestras de los temas Rastrojos y Pajonales

R			
Tema	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
BNS	0.00	0.00	5.67
ZU	0.00	0.00	0.00
M	0.00	0.00	0.00
CSP	0.00	0.00	0.00
P	4.55	14.68	2.04
R	83.12	75.40	80.05
VEPJ	0.00	0.00	0.00
CPR	0.00	0.00	4.31
VP	12.34	9.92	7.94

VEPJ		
Tema	Muestra 1	Muestra 2
BNS	16.81	6.48
ZU	0.84	0.00
M	0.00	0.00
CSP	3.36	3.70
P	0.00	0.00
R	0.00	0.00
VEPJ	78.99	81.48
CPR	0.00	7.41
VP	0.00	0.93

Anexo B 6: Matriz de confusión para las muestras de los temas Cultivos, Pastos Rastrojos y Vegetación de Páramo

CPR			VP		
Tema	Muestra 1	Muestra 2	Tema	Muestra 1	Muestra 2
BNS	0.00	0.00	BNS	4.32	57.56
ZU	0.82	0.00	ZU	7.04	0.67
M	0.00	0.00	M	8.96	0.67
CSP	0.00	0.00	CSP	7.68	1.56
P	0.20	0.51	P	0.00	0.00
R	0.00	0.00	R	0.64	8.22
VEPJ	0.61	0.00	VEPJ	9.92	4.67
CPR	96.73	95.41	CPR	1.44	2.22
VP	1.63	4.08	VP	60.00	24.44

Anexo B 7: Puntos de control para georreferenciación de las imágenes satelitales

PC	Coordenadas		Observaciones
	Lat.	Long	
1	7°10'0.55" N	73°08'37.15" O	Unión Ríos Oro y Suratá
2	7°0'54.19" N	73°06'12.58" O	Mesa de Ruitoque
3	7°08'11.97" N	73°06'59.87" O	Estadio Alfonso López
4	7°4'3.62" N	73°10'9.99" O	Parque Girón
5	7°3'44.95" N	73°5'8.38" O	Iglesia de Floridablanca
6	6°59'7.78" N	73°3'1.82" O	Parque de Piedecuesta
7	7°19'21.57" N	73°0'52.83" O	Parque de Matanza
8	7°21'24.79" N	72°59'0.36" O	Unión Ríos Suratá y Vetas
9	7°16'47.20" N	73°1'34.06" O	Unión Ríos Suratá y Charta
10	7°4'40.53" N	73°10'14.06" O	Unión Ríos Oro y Frio

Anexo B 8: Matriz de confusión para el clasificador Distancia Mínima Euclidiana

Tema	BNS	ZU	M	CSP	P	R	VEPJ	CPR	VP
BNS	74,45	0,73	0,53	1,26	0,00	0,00	22,42	0,27	0,33
ZU	4,22	18,44	11,11	51,33	0,00	0,00	9,11	2,89	2,89
M	15,83	10,64	58,26	3,64	0,00	0,00	8,26	1,82	1,54
CSP	4,35	10,23	2,81	55,75	0,00	0,00	26,09	0,77	0,00
P	11,00	0,00	0,00	0,00	67,00	12,81	1,64	5,91	1,64
R	8,05	0,00	0,00	0,00	26,49	38,27	0,00	14,11	13,07
VEPJ	4,41	4,41	0,88	5,29	0,00	0,00	83,26	1,76	0,00
CPR	1,43	4,29	9,18	0,00	0,00	1,02	0,00	73,47	10,61
VP	31,53	1,40	6,42	3,35	0,19	2,98	13,12	17,49	23,53

Anexo B 9: Registro fotográfico de la zona del estudio

Estación 6



Estación 7



Estación 10



Estación 11



Estación 13



Estación 22



Estación 24



Estación 14



Estación 15



Estación 9



Estación 23



Estación 16



Estación 8



Estación 12



Estación 20



Estación 25



Estación 2



Estación 3



Estación 4



Estación 18



Estación 17



Estación 19



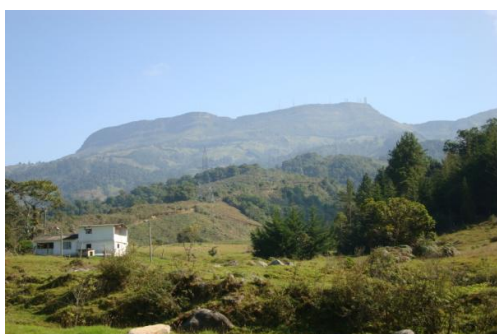
Estación 21



Estación 1

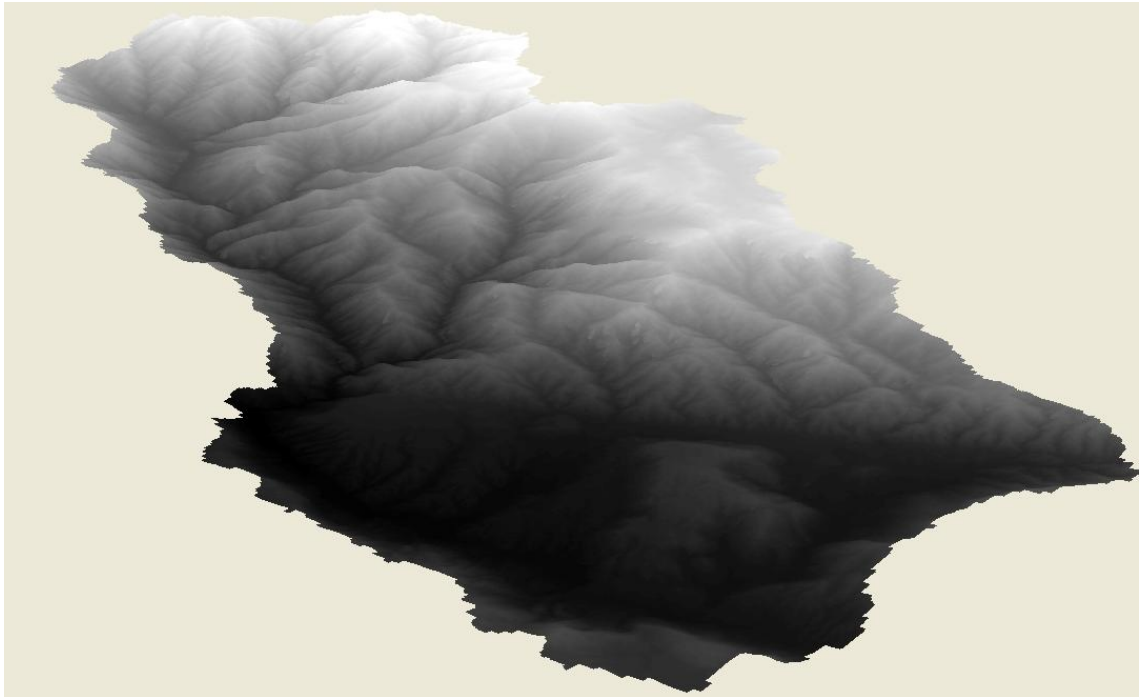


Estación 5

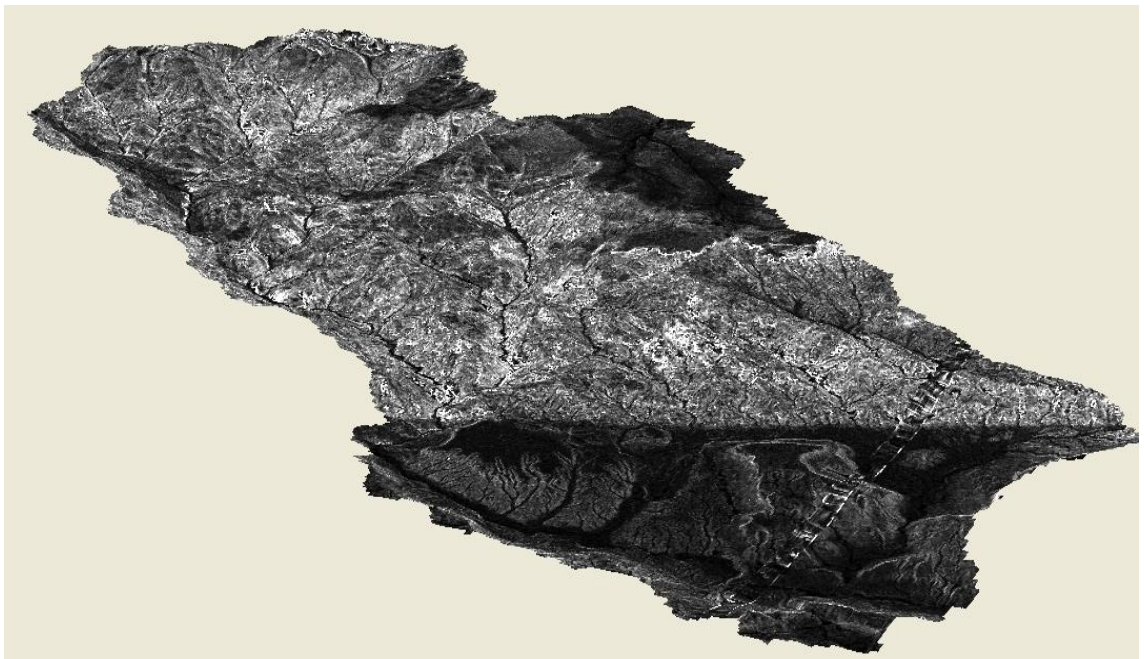


Anexo C

Anexo C 1: Vista 3D del MDE de la CSRL



Anexo C 2: Mapa de pendiente combinado con las elevaciones del MDE



Anexo C 3: Mapa de clasificación vegetal combinado con las elevaciones del MDE

