

**EVOLUCION DE LOS MODELOS ANALOGOS (MA) A MDT
PARA EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER SOPORTADO
SOBRE UN SID “APLICADO A LAS CUENCAS DE LOS RIOS
OPON Y CARARE”.**

ANA MILENA JOYA CAMACHO

WILBER OSWALDO MARTINEZ REMOLINA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2004

**EVOLUCION DE LOS MODELOS ANALOGOS (MA) A MDT
PARA EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER SOPORTADO
SOBRE UN SID “APLICADO A LAS CUENCAS DE LOS RIOS
OPON Y CARARE”.**

ANA MILENA JOYA CAMACHO

WILBER OSWALDO MARTINEZ REMOLINA

Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil

Director de proyecto:

GERMAN EDUARDO GAVILAN LEON

Ing. Civil, M.Sc. Ph.D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2004

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quisiera agradecer a Dios por haberme permitido desarrollar satisfactoriamente éste proyecto. A mis padres, al Padre Ramiro y a mi hermano por haber tenido la paciencia y esperar por un buen resultado, a mis profesores, especialmente al Ing. Germán Eduardo Gavilán por sus asesorías en el desarrollo del mismo y finalmente al gordis por estar conmigo en todos los momentos buenos y malos que se me presentaron a lo largo de éste trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Cartografía en proyectos de Ingeniería	5
1.2 Sistemas de Información Geográfica	9
1.3 Modelos digitales del terreno (MDT)	13
2. MARCO TEORICO	15
2.1 Modelos digitales del terreno – MDT	16
2.1.1 Conceptos básicos	16
2.1.2 Concepto y propiedades del MDT	17
2.1.3 Estructura de datos en el MDT	19
2.1.3.1 Estructura de datos Vector	21
2.1.3.2 Estructura de datos raster	26
2.1.3.3 Ventajas y desventajas de los modelos vectorial y raster	29
2.1.4 Tipos y aplicaciones	30
2.2 Modelos digitales de elevación – MDE	33
2.2.1 Definición y estructura del MDE	34
2.2.2 Elaboración o construcción del MDE	34
2.2.2.1 Obtención de la información	35

2.2.2.2 Métodos de construcción del MDE	37
2.2.3 Aplicaciones	38
 3. DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO	 42
3.1 Introducción	42
3.2 Objetivos	43
3.2.1 Objetivo general	43
3.2.2 Objetivos específicos	44
3.3 Alcance	44
3.4 Entidades interesadas	52
 4. METODOLOGIA	 53
4.1 Recopilación de la información	53
4.2 Control de calidad de la información	68
4.3 Procesamiento de la información	79
4.3.1 Unión de planos	79
4.3.2 División hidrológica de la cuenca	84
4.3.3 Preparación de los archivos en el software	93
4.3.4 Descripción del proceso de cálculo desde Arcview	97
 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	 105
5.1 Localización y extensión	105
5.2 Caracterización física de cuencas hidrográficas a partir de un MDE	110

5.2.1 Elevación	111
5.2.1.1 Elevación media	112
5.2.1.2 Elevación máxima	112
5.2.1.3 Elevación mínima	112
5.2.1.4 Elevación mediana	112
5.2.1.5 Método de la curva hipsométrica para definir elevación mediana	112
5.2.2 Pendiente	113
5.2.3 Parámetros de forma	114
5.2.3.1 Coeficiente de forma	115
5.2.3.2 Coeficiente de compacidad	116
5.2.3.3 Coeficiente de masividad	117
5.2.4 Parámetros de la red de drenaje	118
5.2.4.1 Recorrido máximo	119
5.2.4.2 Orden	120
5.2.4.3 Orientación	121
5.2.4.4 Densidad de drenaje	122
5.2.4.5 Pendiente del cauce principal	123
5.2.5 Parámetros morfométricos adicionales	124
5.2.5.1 Relación de circularidad	124
5.2.5.2 Radio o relación de elongación	124
5.2.5.3 Índice de alargamiento	125
5.2.5.4 Rectángulo equivalente	125
5.2.5.5 Índice asimétrico	126

5.2.5.6 Alejamiento medio	127
5.2.5.7 Sinuosidad	127
5.2.5.8 Tiempo de concentración	127
5.3 Obtención de parámetros a partir del MDE	130
5.3.1 Sumideros	132
5.3.2 Dirección de flujo	133
5.3.3 Flujo acumulado	140
5.3.4 Delimitación del área subsidiaria	142
5.3.5 Red de drenaje	144
5.4 Observaciones, problemas y soluciones	147
5.4.1 Error por no llenado de sumideros	148
5.4.2 Error debido a las curvas de nivel	149
5.4.3 Error por la no continuidad de los ríos	150
5.4.4 Error por la no colocación de puntos en la red de drenaje	151
5.4.5 Error por topografía irregular	152
5.4.6 Error en el trazado del parteaguas	153
 6. RESULTADOS	 156
6.1 Resultados obtenidos a partir del ejemplo de aplicación	157
6.2 Caracterización general de las cuencas	160
6.2.1 Cuenca del río Opón	163
6.2.2 Cuenca del río Carare	170
6.3 Interpretación de resultados	177

6.3.1 Cuenca del río Opón	177
6.3.2 Cuenca del río Carare	184
6.4 Construcción de la base de datos	192
6.4.1 Conceptos básicos	193
6.4.2 Diseño de la base de datos	194
6.4.3 Creación de la base de datos	198
6.5 Diseño y creación del sitio Web	198
6.5.1 Uso de PHP y MySQL	199
6.5.2 Descripción del sitio Web	200
6.5.3 Distribución, edición y mantenimiento	201
7. OBSERVACIONES	203
8. CONCLUSIONES	205
BIBLIOGRAFIA	207
ANEXOS	210

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de la información inicial y la trabajada a nivel de planchas IGAC para cada una de las cuencas y clasificada según el formato.	56
Tabla 2. Distribución de las planchas para la cuenca del río Opón en cuanto a localización.	57
Tabla 3. Distribución de las planchas para la cuenca del río Carare en cuanto a localización.	59
Tabla 4. Listado de las planchas IGAC con su localización y formato para la cuenca del río Opón.	61
Tabla 5. Listado de las planchas IGAC con su localización y formato para la cuenca del río Carare.	62
Tabla 6. Distribución de las planchas utilizadas en la zona de estudio de la cuenca del río Carare.	64
Tabla 7. Listado de las planchas reales trabajadas para la zona de estudio de la cuenca del río Carare.	66
Tabla 8. Listado donde se relacionan las planchas con su fuente de adquisición.	68
Tabla 9. Planchas con restitución cartográfica en la zona de estudio de la cuenca del río Opón.	77
Tabla 10. Planchas con restitución cartográfica en la zona de estudio de la cuenca del río Carare.	77
Tabla 11. Listado donde se mencionan las cuencas de primera y segunda división de la cuenca del río Opón.	86

Tabla 12. Listado donde se mencionan las cuencas de primera y segunda división de la cuenca del río Carare.	87
Tabla 13. Codificación de la primera y segunda división de la cuenca del río Opón.	89
Tabla 14. Codificación de la primera y segunda división de la cuenca del río Carare.	90
Tabla 15. Características de los valores de K_f .	116
Tabla 16. Forma de la cuenca según valores de K_c .	117
Tabla 17. Resumen de los parámetros de forma.	118
Tabla 18. Otras fórmulas para calcular el tiempo de concentración.	129
Tabla 19. Resumen de los parámetros morfométricos según su método de cálculo.	130
Tabla 20. Ficha técnica de las planchas.	157
Tabla 21. Ficha técnica de la cuenca del río Opón.	158
Tabla 22. Ficha técnica de la subcuenca río Dibita.	159
Tabla 23. Ficha técnica de la Microcuenca Quebrada Aurora.	160
Tabla 24. Cuencas de primera y segunda división para el río Opón.	169
Tabla 25. Cuencas de primera y segunda división para el río Carare.	176

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de componentes básicos de un Sistema de Información Geográfico.	10
Figura 2. Modelo Vectorial.	20
Figura 3. Modelo Raster.	21
Figura 4. Modelo de contornos utilizado para describir la superficie de la Microcuenca Río Manso perteneciente a la cuenca del río Opón.	22
Figura 5. Vista de la triangulación proveniente de una estructura TIN aplicado a la topografía de la Microcuenca Río Manso perteneciente a la cuenca del río Opón (Santander) donde la variable es la elevación.	24
Figura 6. Vista de la superficie del terreno proveniente de una estructura TIN aplicado a la topografía de la Microcuenca río Manso perteneciente a la cuenca del río Opón (Santander) donde la variable es la elevación.	25
Figura 7. Ejemplo de representación de un plano a formato raster y codificación de la información de cada celda o pixel.	27
Figura 8. Representación gráfica de la técnica de subdivisión utilizado por el modelo raster de las matrices jerárquicas o Quadtrees.	29
Figura 9. Vista 3D de un volcán antes y después de su erupción.	32
Figura 10. División hidrológica del Departamento de Santander.	43
Figura 11. Área real trabajada para la cuenca del río Opón.	46
Figura 12. Área real trabajada para la cuenca del río Carare.	47
Figura 13. Distribución de planchas IGAC para la cuenca del río Opón.	48
Figura 14. Distribución de planchas IGAC para la cuenca del río Carare.	50

Figura 15. Distribución inicial de las planchas para las cuencas de los principales afluentes del departamento de Santander.	54
Figura 16. Distribución de las planchas para las cuencas trabajadas del departamento de Santander.	55
Figura 17. Distribución de las planchas del río Opón de acuerdo a su localización.	58
Figura 18. Distribución de las planchas del río Carare de acuerdo a su localización.	60
Figura 19. Planchas utilizadas en el estudio de la cuenca baja del río Carare.	65
Figura 20. Planchas encontradas en formato digital y planchas digitalizadas.	67
Figura 21. Curva de nivel no continua. Caso 1.	70
Figura 22. Curva de nivel no continua. Caso 2.	71
Figura 23. Nodo final de la línea que no coincide con el nodo al que debería llegar.	72
Figura 24. Nodo final de la línea que se pasa del nodo al que debería llegar.	72
Figura 25. Ejemplo de una laguna que no es un polígono cerrado.	73
Figura 26. Ejemplo donde otros elementos diferentes de las curvas de nivel tenían elevación.	74
Figura 27. Ejemplo de reconstrucción de la información cartográfica.	76
Figura 28. Ejemplo de restitución de la información cartográfica.	76
Figura 29. Ejemplo caso 1 - unión de planos.	80
Figura 30. Ejemplo caso 2 - unión de planos.	81

Figura 31. Ejemplo caso 3 - unión de planos.	82
Figura 32. Codificación de las cuencas principales del Departamento de Santander.	84
Figura 33. Esquema de la organización de los archivos de Autocad.	91
Figura 34. Estructura de la organización de los archivos dxf y dwg.	93
Figura 35. Esquema de la organización de los archivos.	95
Figura 36. Estructura de las carpetas con la información necesaria para la utilización de Arcview.	97
Figura 37. Estructura de las carpetas, finalizado el modelamiento de la cuenca principal y las de primera y segunda división.	102
Figura 38. Vistas y temas que se visualizan al finalizar la aplicación.	104
Figura 39. Localización de la cuenca del río Opón.	106
Figura 40. Localización de la cuenca del río Carare.	107
Figura 41. Límites geográficos de la cuenca del río Opón.	108
Figura 42. Límites geográficos de la cuenca del río Carare.	109
Figura 43. Ejemplo de curva hipsométrica.	113
Figura 44. Ejemplo de una red de drenaje.	119
Figura 45. Orden de drenaje.	121
Figura 46. Ejemplo de llenado de un sumidero.	133
Figura 47. Código de direcciones de flujo.	134
Figura 48. Asignación de la dirección de flujo para una celda teniendo en cuenta la elevación de las celdas adyacentes.	135
Figura 49. Distribución de direcciones de flujo para todas las celdas del modelo.	136

Figura 50. Ejemplo de flujo normal.	137
Figura 51. Ejemplo de dirección de flujo forzado.	139
Figura 52. Mapa de flujo acumulado con ejemplo de celdas después de un punto.	141
Figura 53. Ejemplo de comparación entre los dos parteaguas.	144
Figura 54. Comparación de la red de drenaje de Autocad con la Arcview.	147
Figura 55. Ejemplo de error en el flujo normal por no utilizar el raster_llenado.	149
Figura 56. Ejemplo de error en flujo forzado debido a errores en los ríos.	151
Figura 57. Ejemplo de error en la red de drenaje debido a puntos olvidados.	152
Figura 58. Ejemplo de error por ríos sinuosos.	153
Figura 59. Ejemplo de error en el cálculo del parteaguas en el programa cuando es necesario agregarle ríos.	154
Figura 60. Ejemplo parteaguas arreglado agregándole ríos.	155
Figura 61. Municipios que cubren el área de la cuenca del río Opón.	166
Figura 62. Cuencas de primera división para la cuenca del río Opón.	168
Figura 63. Municipios que cubren el área de la cuenca del río Carare.	173
Figura 64. Cuencas de primera división para la cuenca del río Carare.	175
Figura 65. Distribución de la elevación media en la cuenca del río Opón.	178
Figura 66. Distribución de la pendiente media en la cuenca del río Opón.	179

Figura 67. Distribución del coeficiente de forma en la cuenca del río	
Opón.	180
Figura 68. Distribución del coeficiente de compacidad en la cuenca del río	
Opón.	181
Figura 69. Distribución del coeficiente de masividad en la cuenca del río	
Opón.	182
Figura 70. Distribución de la densidad de drenaje en la cuenca del río	
Opón.	183
Figura 71. Distribución del tiempo de concentración en la cuenca del río	
Opón.	184
Figura 72. Distribución de la elevación media en la cuenca del río	
Carare.	186
Figura 73. Distribución de la pendiente media en la cuenca del río	
Carare.	187
Figura 74. Distribución del coeficiente de forma en la cuenca del río	
Carare.	188
Figura 75. Distribución del coeficiente de compacidad en la cuenca del río	
Carare.	189
Figura 76. Distribución del coeficiente de masividad en la cuenca del río	
Carare.	190
Figura 77. Distribución de la densidad de drenaje en la cuenca del río	
Carare.	191
Figura 78. Distribución del tiempo de concentración en la cuenca del río	
Carare.	192
Figura 79. Modelo entidad relación de la base de datos aplicada al	

proyecto.	195
Figura 80. Mapa del sitio web “Hidroatlas – Departamento de Santander”.	201

GLOSARIO

ALEJAMIENTO MEDIO: la relación del curso de agua más largo con la superficie de la cuenca.

BASE DE DATOS: es una colección de datos representados mediante una estructura que permite interrelacionarlos entre sí.

CARTOGRAFÍA: arte y ciencia de trazar mapas.

CARTOGRAFÍA BÁSICA O CONVENCIONAL: constituye la representación de las características, propiedades y objetos presentes en una zona mediante símbolos y convenciones gráficas. La información corresponde a elementos como puntos de control, catastro, transporte, vegetación, hidrografía, relieve y delimitación de áreas importantes.

CARTOGRAFÍA TEMÁTICA: constituye la representación de una propiedad presente en una zona mediante una distribución espacial dividida en intervalos o franjas. Por ejemplo, se tienen mapas temáticos de población, profundidad, elevación, pisos térmicos, amenaza sísmica, etc.

CATASTRO: Conjunto de operaciones topográficas necesarias para el levantamiento de planos, en el que se señalan los límites de las propiedades rurales y urbanas.

COEFICIENTE DE FORMA: cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de su longitud.

COEFICIENTE DE MASIVIDAD: cociente entre la elevación media de la cuenca y su respectiva área.

CONFLUENCIA: Lugar en el cuál un río tributario o afluente se une al curso fluvial principal.

CUENCA: se denomina cuenca hidrográfica, o cuenca de drenaje de un río o corriente de agua al área topográfica limitada por un contorno al interior del cual las aguas lluvias que caen drenan hacia el mismo punto, ya sea de salida o de interés particular.

DBMS: Data Base Management System - Sistema de Administración de Base de Datos. Es el programa que facilita la interacción de la base de datos con el administrador.

DEPURAR: detectar, localizar y corregir una avería o arreglar un sistema que no funciona.

DIRECCIÓN DE FLUJO: camino de descenso que tomaría el agua precipitada para cada celda en función de la máxima pendiente de descenso.

ELEVACIÓN: variación altitudinal de la cuenca hidrográfica e incide directamente sobre el clima y por tanto sobre el régimen hidrológico.

ELEVACIÓN MÁXIMA: es aquella altitud correspondiente al punto más alto de la cuenca hidrográfica.

ELEVACIÓN MEDIA: es el promedio aritmético de los valores de elevación de diferentes puntos que pertenecen a la superficie de la cuenca.

ELEVACIÓN MEDIANA: Es aquella altitud correspondiente al 50% del área total de la cuenca y está determinada por el método de la curva hipsométrica.

ELEVACIÓN MÍNIMA: es aquella altitud correspondiente al punto más bajo de la cuenca hidrográfica.

ENTIDAD: es una unidad de almacenamiento de información en una base de datos, con nombre y contenido definidos.

ESTRUCTURA RASTER: estructura de datos donde las características físicas del terreno se representan por medio de una matriz que contiene celdas rectangulares o cuadradas llamadas píxeles.

ESTRUCTURA VECTORIAL: estructura de datos donde las características geográficas del terreno son representadas por puntos, líneas y polígonos.

FLUJO ACUMULADO: proceso consistente en analizar en sentido horizontal de la matriz de datos, cada una de las celdas con respecto a sus ocho celdas vecinas, procesando cuantas celdas aportan a una celda determinada y procediendo a contabilizar y almacenar el número de celdas portantes.

FOTOGRAMETRÍA: ciencia desarrollada para obtener medidas reales a partir de fotografías, tanto terrestres como aéreas, para realizar mapas topográficos.

ÍNDICE DE COMPACIDAD: relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca.

MATRIZ JERÁRQUICA: tipo de estructura de datos raster que se basa en la técnica de dividir un plano en cuadrantes y si los objetos que se desean modelar aparecen en una determinada celda, ésta continúa subdividiéndose en cierta cantidad de cuadrantes hasta llegar a una resolución determinada.

MATRIZ REGULAR: tipo de estructura de datos raster que es el resultado de dividir cualquier superficie en pequeñas celdas que pueden ser cuadradas o rectangulares, las cuales toman valores numéricos representando objetos geográficos del terreno.

MODELO: es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades.

MODELO ANALÓGICO: es un modelo físico en el que las características de los objetos se representan por medio de convenciones gráficas que facilitan la lectura e interpretación de sus propiedades. Ejemplo: mapas impresos.

MODELO DE CONTORNOS: tipo de dato vectorial formado por vectores de n – pares de puntos utilizados para enmarcar la forma o contorno de líneas que tienen un mismo valor (líneas isométricas).

MODELO DE ISOHIPSAS: llamado también modelo de contornos. Ver definición de modelo de contornos.

MODELOS ICÓNICOS: es un modelo donde se hace una reducción a escala conservando las propiedades morfométricas del objeto real bajo la limitación de no poder representar todas sus propiedades en algunos casos. Ejemplo: maquetas.

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN MDE: es una estructura de datos que representa la distribución espacial de la elevación de la superficie en forma cualitativa y continua.

MODELO DIGITAL DEL TERRENO MDT: es una estructura de datos que representa la distribución espacial de una variable cualitativa y continua.

MODELO ENTIDAD-RELACIÓN: el esquema conceptual que constituye la esencia lógica de una base de datos en el que se definen las entidades y su relación entre sí.

MORFOMETRÍA: Sistema de mediciones de los rasgos fundamentales externos del relieve. (Pendientes, cursos fluviales, cuencas etc.)

MySQL: es un programa que interpreta el lenguaje estructurado de consultas SQL y permite la administración y edición de la base de datos.

PENDIENTE: es el indicador del grado de inclinación de la cuenca hidrográfica.

PENDIENTE MEDIA: ponderado de las pendientes medias de áreas entre curvas de nivel.

PHP: es un lenguaje de programación de lado del servidor que facilita la creación de código html, conexión con la base de datos, generación de gráficos e imágenes, e impresión de documentos en formato pdf, entre muchas otras funciones.

QUADTREES: llamada también matriz jerárquica. Ver definición de matriz jerárquica.

SCRIPT: es un conjunto de archivos que contienen, en un lenguaje más o menos parecido a C, unos comandos y/o eventos programados por alguien.

SERVIDOR: es un programa de aplicación alojado en un ordenador que satisface las solicitudes HTTP realizadas por navegadores de internet.

SISTEMA DE INFORMACIÓN DISTRIBUIDO SID: es un sistema de información en el cual se integra una base de datos a un sitio Web orientado a operaciones de búsqueda y consulta.

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA SIG: es un sistema integrado de hardware, software, datos, recurso humano y un conjunto de procedimientos que permiten la captura, administración, almacenamiento, manipulación, análisis y despliegue de datos referenciados espacialmente para dar solución a propósitos específicos.

SQL: Structured Query Language – Lenguaje Estructurado de Consultas. Es un lenguaje estándar de comunicación con bases de datos.

SUMIDERO: celdas bajas con respecto a sus ocho celdas vecinas que se pueden encontrar distribuidas en cualquier parte del área de la cuenca.

TABLETA DIGITALIZADORA: rectángulo plano de plástico con componentes electrónicos bajo su superficie, que se utiliza junto con un dispositivo señalador en muchas aplicaciones de ingeniería y diseño y en trabajos de ilustración.

TIN: Red Irregular de Triángulos, estructura de datos de tipo vectorial formada por un conjunto de triángulos unidos que caracterizan la superficie terrestre, quedando de esta manera la topografía representada por una red completa de caras planas.

RESUMEN

TÍTULO: EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS ANALOGOS (MA) A MDT PARA EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER SOPORTADO SOBRE UN SID “APLICADO A LAS CUENCAS DE LOS OPON Y CARARE”. *

AUTORES: JOYA CAMACHO ANA MILENA, MARTINEZ REMOLINA WILBER OSWALDO.

PALABRAS CLAVES: Sistema de Información Distribuido (SID), Modelo Digital del Terreno (MDT), Modelo Análogo (MA), Modelo Digital de Elevación (MDE), Modelo raster, Modelo vector, Base de datos, Parámetros morfométricos.

DESCRIPCIÓN: Los Modelos Digitales del Terreno (MDT) son una herramienta práctica que tienen gran aplicabilidad en diversas áreas del saber, (medicina, biología, comunicaciones, etc), en lo referente a la ingeniería se ha evolucionado de manera considerable en la optimización y el manejo de datos a gran escala, esta capacidad permite reemplazar el manejo tradicional de los planos en ingeniería a través de Modelos Análogos (MA) con MDT.

En el presente proyecto se desarrolló el MDT de Santander y a partir de este se efectuó una caracterización hidrológica del departamento, para lo cual fue necesario dividir el área total del departamento (30537 Km²) en siete cuencas: Carare, Chicamocha, Fonce, Opón, Sogamoso, Suárez y Lebrija (no se trabajó por logística). Este proceso exigió la manipulación (digitalización, restitución y depuración) de 233 planchas cartográficas del IGAC a escala 1:25000. Los resultados de la caracterización hidrológica fueron los referentes a elevación, pendiente, tiempo de concentración, forma y sistema de drenaje de las cuencas. La magnitud del proyecto y la valiosa información obtenida exigió la estructuración de una base de datos, que permitiera el fácil manejo y acceso a la misma a través de un Sistema de Información Distribuido (SID).

El MDT generado en el presente trabajo abre las puertas para que se puedan desarrollar estudios en diversas áreas que requieran información codificada, que facilite, agilice y optimice la obtención de resultados.

* Tesis de grado

ABSTRACT

TITLE: EVOLUTION FROM AM TO DTM FOR THE STATE OF SANTANDER BASED ON A DIS
APPLIED TO THE FONCE AND SOGAMOSO WATERSHEDS.

AUTHORS: JOYA CAMACHO ANA MILENA, MARTINEZ REMOLINA WILBER OSWALDO.

KEY WORDS: Distributed Information System (DIS), Digital Terrain Model (DTM), Analog Model (AM), Digital Elevation Model (DEM), Raster Model, Vector Model, Distributed Database, Morphometric Parameters.

DESCRIPTION: Digital Terrain Models (DTM) are tools with great applicability in different areas (medicine, biology, communications), in the Engineering area it has gone through a lot of new developments optimizing the way great scale problems are handled. This capacity allows the replacement with DTM of the traditional way analog drawings are handled..

On this project a DTM of Santander was developed and a hydrologic characterization from this DTM was done. The state of Santander area (30537 Km²) was divided in seven watersheds: Carare, Chicamocha, Fonce, Opón, Sogamoso, Suárez and Lebrija (this one was not worked out due to the fact of logistic problems). During this process a total of 233, 1:25000 cartographic drawing from the IGAC were digitalized, restituted and depurated. Results from the hydrologic characterization were: elevation, slope, concentration time, and drainage system. The quality and magnitude of the project required the design of a database for handling and accessing the information through a Distributed Information System (DIS).

The DTMs generated on this project open the doors for the development of new research on diverse areas that require coded information to make easier and optimize the way results are obtained.

INTRODUCCIÓN

Con el transcurrir del tiempo el hombre ha buscado la manera de agilizar y perfeccionar su trabajo, esta necesidad lo ha llevado a estar en continua experimentación de sistemas y métodos sin importar en ocasiones los costos que éstas conllevan. La aparición de las computadoras ha sido en este sentido un invento de gran relevancia por todos los beneficios que han traído. Motivados por la nueva máquina aparecieron los científicos ansiosos de optimizar el tiempo y el manejo de la información y con ellos los Modelo Digital del Terreno (MDT), que han servido en la solución de problemas tecnológicos, científicos y militares. Hoy los MDT se han popularizado y sus aplicaciones van en aumento ya que facilitan y soportan investigaciones en muchos campos (medicina, comunicaciones, geología, economía, etc.).

De igual manera el continuo desarrollo de herramientas computacionales (ofimática y especializadas) permiten el manejo, manipulación y acceso de gran cantidad de datos en formato digital. El uso de estas herramientas permite integrar grandes extensiones de cartografía con la información alfanumérica temática de la zona de estudio, de gran utilidad en diferentes sectores (académicos, institucionales, y particulares).

Las ingenierías y dentro de ellas la hidrología, se caracterizan por manejar grandes volúmenes de información, lo cual las obliga a estar al día en el desarrollo tecnológico y el manejo de software especializado para obtener resultados de excelente calidad en los diferentes análisis realizados en dichas áreas. Bajo los conceptos expuestos anteriormente se tomó el departamento de Santander para aplicar y enriquecer los conocimientos que se tienen en esos temas, para ello se elaboró el MDT para las diferentes cuencas de la región (Carare, Chicamocha, Fonce, Opón, Sogamoso, Suárez

y la cuenca del río Lebrija que no se trabajó por inconvenientes logísticos), este modelo facilitó la caracterización hidrológica de cada una de ellas. El proceso y los resultados obtenidos del MDT y de su aplicación en el área de la hidrología se consignan en el presente documento como se explica a continuación.

En el capítulo uno (planteamiento del problema) se describe la necesidad del hombre por simular los procesos físicos, los problemas derivados del uso de cartografía análoga, la necesidad de manejar de manera eficiente grandes volúmenes de información, el uso de la cartografía digital y se hace una introducción a los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El capítulo dos presenta en la primera parte los conceptos relacionados con el MDT, sus propiedades, la estructura de datos que utiliza los tipos y aplicaciones. En la segunda parte se habla de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), que son un derivado del MDT, de la manera de obtener la información de los métodos de construcción de los mismos y de sus aplicaciones.

La explicación general del proyecto, los objetivos (general y específicos), el alcance y las entidades interesadas en el desarrollo del mismo se encuentran consignadas en el capítulo tres.

La metodología seguida para el desarrollo del MDT de Santander y su posterior aplicación en el área de hidrología que se fundamentó en tres etapas (recopilación de la información, evaluación y control de calidad de la información, y procesamiento de la información) se pueden consultar en el capítulo cuatro.

La localización y extensión de la región estudiada, la caracterización física de cuencas hidrográficas a partir de MDE y la obtención de parámetros morfométricos, están descrito en el capítulo cinco.

En el capítulo seis, se presenta el esquema de los resultados obtenidos de las cuencas y planchas IGAC, la construcción del Sistema de Información Distribuido (SID), y el diseño y creación del sitio Web.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A través del tiempo el hombre en el intento de modelar los procesos físicos que suceden en su entorno, se ha visto limitado por el número de variables relacionadas y su grado de complejidad. Esto ha constituido siempre un reto para el hombre y su conocimiento, llevándolo a buscar solución en el uso de todos los medios disponibles a su alcance sin encontrar una respuesta satisfactoria. Por ejemplo, para dar solución a problemas relacionados con la ubicación de los elementos geográficos, inicialmente se han utilizado mapas descriptivos con escasa información, pero la evolución del hombre ha dado lugar a un mejoramiento completo en ciencias como la cartografía, convirtiendo a los mapas impresos en una buena herramienta para almacenar y consultar datos geográficos así como para dar respuesta a problemas donde el manejo práctico de la información sea uno de sus requerimientos.

Aunque el manejo de la información en formato impreso sea de gran ayuda para problemas específicos, no siempre en todos los casos se logra una respuesta satisfactoria al problema planteado. Los inconvenientes se derivan propiamente de su naturaleza impresa, no se puede lograr un manejo práctico de la información si los proyectos son de gran magnitud, ya que el volumen de información necesaria para desarrollarlo sería inmanejable en esas circunstancias. Así mismo no puede hablarse de estudios con cierto grado de dificultad, teniendo en cuenta que los planos impresos son funcionales en procedimientos de lectura o inspección visual, medición aproximada de algunos de sus elementos, pero en ningún caso permite una

manipulación de la información de tal forma que pueda generarse cualquier resultado de forma ágil y exacta.

Los inconvenientes que presenta la utilización de planos impresos, descartan su uso en algunos problemas de ingeniería. Es evidente que en estos casos, la información debe manejarse en forma rápida y eficiente con el fin de obtener los resultados esperados en menos tiempo y con la seguridad de que son los más cercanos y fieles a la realidad. En éste capítulo se hace una recopilación de las formas en que se ha manejado la información a través del tiempo, la manera cómo se ha dado respuesta al creciente número de requerimientos y se han superado limitaciones que impiden el desarrollo óptimo de cualquier proyecto de ingeniería.

1.1 CARTOGRAFÍA EN PROYECTOS DE INGENIERÍA

Tradicionalmente la información, en especial la información geográfica, ha sido representada en modelos analógicos para su análisis y manipulación. Un ejemplo de un modelo análogo es un mapa impreso, en el que se representan las características de los objetos por medio de convenciones gráficas que facilitan la lectura e interpretación de sus propiedades. Estos mapas hacen parte de lo que se conoce como cartografía convencional.

La posibilidad de obtener la información impresa de una forma rápida y sencilla y el manejo práctico que se le puede dar a la misma, hace de la información cartográfica una fuente efectiva para la interpretación visual, medición u otro procedimiento manual en el desarrollo de proyectos de ingeniería.

A pesar de todos los beneficios por los cuales se han empleado tradicionalmente los formatos impresos, existen desventajas al momento de trabajar proyectos a gran escala. Dichas desventajas son:

- La información geográfica que maneja la cartografía impresa es estática, es decir, no permite la actualización, duplicación, edición y generación de nueva información.
- La dificultad de manipular la información en forma directa.
- La imposibilidad de realizar procesos de análisis complejos.
- La incapacidad de obtener resultados complejos sobre un elemento en particular y de generar nueva información mediante el análisis o la combinación de varios tipos de información.

Considerando las desventajas que se derivan del uso de la cartografía análoga, y en especial de los mapas convencionales, se ve la necesidad de encontrar la forma de traducir esta información a un formato que posibilite su tratamiento numérico, con el fin de realizar operaciones con los datos de una manera más ágil, procesos de manipulación más organizados y eficaces, y combinar dos o más tipos de información, a través de herramientas o algoritmos matemáticos soportados en programas de computador. El formato que se caracteriza por tener una estructura de datos numérica, donde la codificación de los elementos no obedece sólo a la representación gráfica sino a relaciones internas y puede manejarse a través de medios informáticos, es el formato digital.

La información geográfica representada en un formato digital posee gran cantidad de ventajas que se derivan propiamente de su naturaleza numérica. Se pueden mencionar las siguientes:

- Debido a su proceso de codificación, la información puede representarse virtualmente a través de cualquier medio informático.
- Cada uno de los elementos tiene propiedades y valores específicos.
- Su estructura permite desarrollar una gran capacidad de almacenamiento de la información.
- Permite generar nueva información mediante el análisis y manipulación de los datos, o mediante la combinación o superposición de la dos o más tipos de información.
- La capacidad de obtener resultados sobre un elemento en particular de una manera más ágil que la convencional.
- Se facilitan los procesos de edición, duplicación, actualización y creación de nueva información.

Aunque los beneficios son evidentes y parece ser el formato más útil y recomendable para la solución de proyectos de gran envergadura, el formato

digital tiene sus limitaciones. Primero, el software utilizado para procesarla, no siempre es el más adecuado para cumplir con los objetivos que se pretende alcanzar. Segundo, el hardware o equipo, está limitado por su capacidad de memoria necesaria para manejar grandes volúmenes de información. Tercero, la información se ve limitada principalmente por su tamaño y calidad; la información geográfica tradicional se traduce al formato digital mediante diferentes procedimientos de captura de datos, entre ellos la digitalización manual; al efectuar este proceso, el tamaño en disco de cualquier archivo puede ser exagerado si las necesidades de calidad y resolución son altas, así mismo, la calidad y exactitud de la información depende tanto de la naturaleza del mapa impreso como del proceso manual como tal. Y cuarto, el costo. Cuando se realiza cualquier estudio, adquirir las licencias de software necesarias y obtener información digital implica un costo muy elevado, y se requiere de equipos de altas especificaciones técnicas y personal altamente calificado.

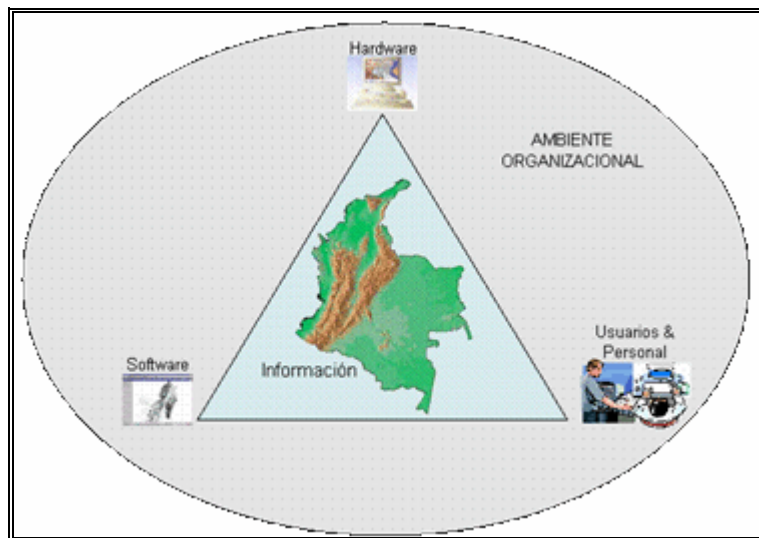
Teniendo en cuenta que para la ejecución de un proyecto en particular, el manejo de la información no sólo involucra la representación gráfica de los datos, sino que además considera las propiedades asociadas a los mismos, se ve la necesidad de desarrollar una herramienta que integre estos dos o más tipos de información cuando sea necesario. Como respuesta a esta necesidad nacen los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales se caracterizan por ser capaces de asociar diferentes formatos digitales, realizar y facilitar los procesos de análisis y permitir la integración de nuevas herramientas para optimizar y agilizar los resultados.

1.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Un SIG es un sistema integrado de hardware, software, datos, recurso humano y un conjunto de procedimientos que permiten la captura, administración, almacenamiento, manipulación, análisis y despliegue de datos referenciados espacialmente para dar solución a propósitos específicos. (Ver figura 1).

El hardware es el equipo o componente físico del sistema con el cual opera el SIG, se compone tanto de una estación o PC como de una serie de dispositivos para la entrada y salida de datos. El software de un SIG proporciona las herramientas y funciones necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica. Los datos son el componente más importante de un SIG y su obtención es la base para su implementación y posterior funcionamiento. El recurso humano en un SIG está compuesto por el personal especializado y los usuarios, los primeros trabajan en la implementación del SIG (introducción de datos, programación, actualización, análisis, administración, corrección, etc.) y los segundos son aquellos que en algún momento requieren la información una vez el sistema se encuentra en operación. Y por último, el conjunto de procedimientos o métodos que se refieren a reglas o normas específicas que permiten un buen desarrollo del SIG.

Figura 1. Esquema de componentes básicos de un Sistema de Información Geográfica



Tomado de UNISIG. Unidad de sistemas de información geográfica [online]. <URL:<http://www.humboldt.org.co/sig/queesunsig.html>>

Aunque en los años cincuenta hayan existido una serie de antecedentes, es en los años 1960 y 1970 donde surgieron nuevas tendencias en la forma de usar mapas para la valoración de recursos y planificación. En esa época se desarrolla por primera vez un sistema informático que trabaja con datos geográficos orientado principalmente a la evaluación y planificación del uso de la tierra. Este constituye uno de los primeros avances en la carrera tecnológica del SIG, aún así considerando que en esa época los procesos más complejos se reducían a la simple superposición de mapas.

A finales de la década de 1970, se empieza a aplicar la tecnología del computador al desarrollo de programas dirigidos hacia la automatización del trabajo cartográfico. Esta producción automática del dibujo se basa en el diseño asistido por computador (CAD), el cual maneja la información espacial

por medio de entidades gráficas organizadas en capas de visualización. Al mismo tiempo se inicia un desarrollo paralelo de las disciplinas para la captura, el análisis y la representación de los datos en áreas como catastro, topografía, ingeniería civil, geografía, planeación urbana y rural, implicando la duplicidad de esfuerzos pero aumentado también la posibilidad de generar sistemas de información más integrales.

En los 80's se ve la expansión del uso de los SIG, facilitado por la comercialización de un gran número de herramientas de dibujo y de diseño, una generalización de las bases de datos relacionales como soporte al análisis y manipulación de la información, y la aplicación en cualquier disciplina que necesite la integración de planos cartográficos y las bases de datos con sus atributos y características de cada uno de los elementos. Los años 90 se caracterizan por la aceptación en el uso de nuevas tecnologías y la expansión a nuevos campos de acción; el uso de ordenadores de gran capacidad y accesibles a un costo no muy elevado, los avances en las telecomunicaciones, en especial en Internet, el avance en la captura de la información, fotografías digitales, imágenes satelitales con resoluciones óptimas, todo con el fin de llegar a la consolidación de los SIG, y a su popularización como la herramienta mejor utilizada en el manejo de datos geográficos.

Las limitaciones propias de un SIG están relacionadas con sus principales componentes. Primero, no se puede implementar un SIG si no se cuenta con soporte físico o hardware con las especificaciones apropiadas; segundo, no se debe seleccionar el software hasta no tener claras las necesidades y los objetivos que se pretenden alcanzar; tercero, la captura de la información requiere especial cuidado ya que es el proceso más susceptible a las fuentes de error. Este procedimiento requiere un alto nivel de precisión ya que de él

depende la calidad de los resultados; y cuarto, el personal especializado, si este no es lo suficientemente idóneo no se puede esperar resultados satisfactorios.

Aunque estas son las limitaciones propias de un SIG, existen otras que se relacionan con la necesidad de mejorar la descripción aproximada del problema y su cercanía a la realidad, como son:

- No posee un conjunto de métodos de representación de la realidad y de simulación de los procesos propios de cada problema de ingeniería.
- No tienen la capacidad de realizar análisis distribuidos de una variable en particular ya que la información que se maneja es puntual.
- No se contempla una estructura de datos donde se puedan vincular los datos entre si y se representen de alguna manera las relaciones espaciales entre ellos.

Conociendo que la falencia principal de los SIG radica en su incapacidad de construir modelos y representaciones cercanas a la realidad, existen nuevas herramientas que suplen estas necesidades, ayudadas por la modernización de los medios informáticos. Es así como surgen los Modelos Digitales del Terreno (MDT) como una respuesta al creciente número de requerimientos del usuario y a la necesidad de simular procesos sobre un determinado escenario.

1.3 MODELOS DIGITALES DEL TERRENO (MDT)

Un MDT es un modelo simbólico donde los objetos reales se representan mediante una codificación matemática lo que permite realizar procesos de simulación o modelamiento de un problema en particular.

Los MDT nacen en la década de los 50's, en el laboratorio de fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT), en 1958 Miller y Laflamme utilizan los MDT para fines militares, tecnológicos y científicos. El objeto fundamental de estos modelos, era en ese entonces, trazar vías a partir de información tomada del terreno por medios fotogramétricos, que con el apoyo de algoritmos permitían la determinación de la pendiente, el área y otras características del terreno.

En los primeros años de utilización de los MDT, el almacenamiento y manipulación de la información se veía limitada por los ordenadores de la época, debido a sus deficientes propiedades en hardware, no estaban en capacidad de manejar una estructura de datos de considerables dimensiones, la cual es característica inherente de los MDT. Con el paso de los años han surgido aplicaciones informáticas capaces de minimizar este problema y lograr un manejo eficaz de los MDT, igualmente los grandes avances en el área tecnológica han permitido el desarrollo de hardware especializado lo que consolidó el manejo de los MDT.

La utilización de los MDT en la solución de problemas de ingeniería se fundamenta en el amplio rango de aplicaciones que pueden derivarse de su particular manejo de la información. Su importancia radica en que los MDT, gracias a su estructura de datos permiten modelar variables distribuidas espacialmente obteniendo así visualizaciones más cercanas a la realidad.

Permite además, un manejo eficiente de la información facilitando una obtención más rápida de los resultados. Adicionalmente los MDT se consideran un medio de investigación de gran potencialidad porque a través de ellos pueden generarse nuevas herramientas o complementarse con otras para lograr descripciones más complejas y dar solución a los problemas de una forma más exacta.

Atendiendo a los beneficios que presenta el uso de los MDT, se entiende porque en la actualidad son los más utilizados a la hora de analizar procesos espaciales y ambientales. Los MDT superan funcionalmente a cualquier otra estructura de datos, facilitan junto con otras tecnologías el manejo de la información cartográfica para la solución de problemas de ingeniería, especialmente cuando estos requieren modelar y distribuir espacialmente una variable.

A través de un MDT, puede obtenerse resultados sobre la variabilidad de una propiedad en estudio, por ejemplo, la pendiente media, la presión y contaminación del aire, la temperatura, la reflectancia, la elevación media, o características morfométricas de una cuenca, son algunas de las tantas aplicaciones que pueden desarrollarse. En particular, el MDT se presenta como la solución más adecuada al problema del presente estudio, es decir, se aprovecha las potencialidades del mismo para realizar la caracterización física y geográfica del Departamento de Santander.

2. MARCO TEÓRICO

Con el transcurrir del tiempo el hombre ha buscado la manera de agilizar y perfeccionar su trabajo, esta necesidad lo ha llevado a estar en continua experimentación de sistemas y métodos para lograrlo sin importar en ocasiones los costos que estas experimentaciones conllevan. La aparición de las computadoras ha sido en este sentido un invento de gran relevancia por todos los beneficios que han traído.

Motivados por la nueva máquina aparecieron los científicos ansiosos de optimizar el tiempo y el manejo de la información, así, en los años 50 el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachussets presentó los primeros indicios de uso de un Modelo Digital del Terreno (MDT) para la solución de problemas tecnológicos, científicos y militares. Hoy los MDT se han popularizado y sus aplicaciones van en aumento ya que facilitan y soportan investigaciones en muchos campos.

En el presente capítulo se presenta en la primera parte los conceptos relacionados con el MDT, sus propiedades, la estructura de datos que utiliza los tipos y aplicaciones. En la segunda parte se habla de los Modelos Digitales de Elevación MDE, que son un derivado del MDT, de la manera de obtener la información de los métodos de construcción de los mismos y de sus aplicaciones.

2.1 MODELOS DIGITALES DEL TERRENO – MDT

En el desarrollo de este numeral se presenta una introducción a los MDT con el fin que el lector a medida que va consultando esta investigación pueda tener claridad de forma sencilla y puntual en los fundamentos de un MDT, sus propiedades, su estructura, tipos y aplicaciones.

Teniendo en cuenta la complejidad y extensión del tema, la intención es dar a conocer los conceptos básicos, con el objetivo de entender de manera global todo lo concerniente a los MDT.

2.1.1 Conceptos básicos. Antes de llegar a la definición formal del MDT es necesario enunciar algunos conceptos básicos para tener claridad en su fundamento.

Un modelo es “una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades”¹ y se construye para conocer o predecir sus características y permitir obtener e interpretar resultados coherentes. Su función y utilidad se basa principalmente en la definición adecuada de sus variables que dependen del problema a estudiar y de los resultados esperados cuya calidad está sujeta a la cantidad y veracidad de la información obtenida del objeto real.

Existen diferentes tipos de modelos los cuales reúnen diferentes características. En función de su construcción, se tienen los modelos icónicos que conservan mediante una reducción a escala las propiedades morfométricas del objeto real bajo la limitación de no poder representar todas

¹JOLY, F. La Cartografía. En: FELICÍSIMO, Ángel Manuel. Modelos digitales del terreno: curso de introducción [online]. Cáceres: 1999. p. 5

sus propiedades en algunos casos. Este tipo de modelos se ve representado por las maquetas o réplicas a escala de un objeto en particular.

Otro tipo de modelos son los análogos, que por el contrario, no se basan estrictamente en la morfometría del objeto, y lo representan mediante un conjunto de convenciones que ayudan a interpretar sus características y propiedades. Dentro de este caso se tienen por ejemplo los mapas impresos que muestran mediante una nomenclatura especial la información contenida en ellos.

Los modelos simbólicos obedecen a una nomenclatura más definida que representa el objeto a través de una codificación matemática. Una representación de una máquina y de sus elementos como modelo simbólico, permite determinar una estructura geométrica que identifique cada una de sus partes y facilite su visualización para su diseño y optimización.

Por otro lado, se tiene una clasificación de los modelos en función de su manejo y representación, los modelos analógicos que corresponden directamente a los modelos físicos y los modelos digitales que requieren que la información se encuentre codificada para facilitar operaciones informáticas. Un mapa cartográfico en formato analógico, por ejemplo, obedece simplemente a un mapa impreso con determinadas características. El mismo mapa en versión digital necesita de un conjunto informático que reúne equipos, programas y personal capacitado.

2.1.2 Concepto y propiedades del MDT. Un MDT de acuerdo con la definición del autor Ángel M. Felicísimo es: “una estructura numérica de

datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”²

A partir de la interpretación del concepto anterior pueden enunciarse las siguientes propiedades de los MDT:

- Son manejables en operaciones informáticas.
- Adoptan una estructura de datos que controla el almacenamiento y el esquema interno y lógico de la información conservando su relación espacial.
- Distribuyen espacialmente una variable, lo que le permite evaluar su comportamiento ante un evento de tipo geográfico.
- Representa las variables en forma cuantitativa y las distribuye continuamente.

En general, los MDT reúnen dos tipos de información: información explícita que contiene los datos de la variable o atributo del modelo, e información implícita que contiene la relación espacial de los datos.

La diferencia fundamental entre los MDT y los mapas temáticos está en la distribución espacial de la variable representada. Los mapas temáticos son equivalentes a versiones analógicas de los MDT donde la información se muestra a partir de un sistema de convenciones gráficas. En ellos, la variable

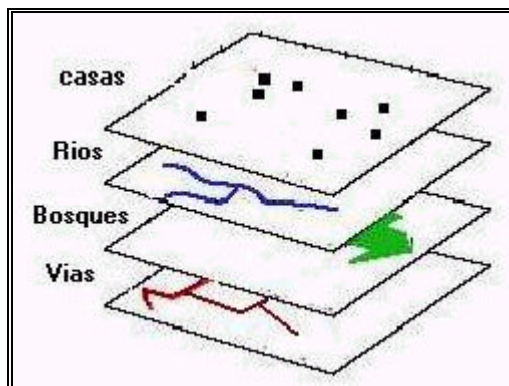
² FELICÍSIMO, Ángel Manuel. Modelos digitales del terreno: curso de introducción [online].

representada no se distribuye espacialmente al ser precisamente un medio físico en donde la información se extrae directamente a partir de inspección visual. Ambos modelos presentan múltiples ventajas y desventajas en su manejo práctico e interpretación. Los MDT, al ser digitales, pueden ser aplicados en diferentes herramientas informáticas, lo cual facilita el proceso matemático de los datos, el análisis de la información representada, la implementación de datos adicionales, la combinación con otros MDT que reúnan características compatibles y coherentes, y la realización de modelos de simulación dinámica que representen fenómenos físicos reales. Así mismo, el acceso a la información de los MDT requiere de un equipo informático que incluya programas especiales y operadores capacitados. Los mapas temáticos, por el contrario, exigen conocimientos cartográficos relativamente profundos y no son tan versátiles en el sentido de manejo de la información, pero la cualidad de tenerlos en formato impreso permite manejar rápidamente la información que contengan.

2.1.3 Estructura de datos en el MDT. En la cartografía convencional, la descripción de la superficie terrestre se realiza por medio de objetos geométricos (puntos, líneas), en donde las elevaciones del terreno son representadas por las curvas de nivel. En lo que respecta a los MDT, la información geográfica y la descripción morfológica del terreno en un modelo digital, se puede hacer de dos formas, cuya clasificación es producto de cómo se lleva a cabo la representación de los datos: vectorial o raster. En el modelo vectorial, cada rasgo o entidad geográfica se realiza por medio de objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) como se puede observar en la figura 2.

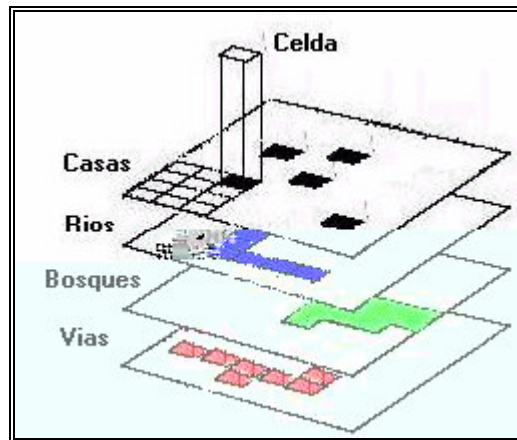
En el modelo raster, las características topográficas y geográficas se realizan por medio de un único elemento básico que es la celda o píxel. (Ver figura 3).

Figura 2. Modelo Vectorial. En el modelo vectorial los atributos del terreno son representados por puntos, líneas y polígonos.



Tomado de FRANCO, Rodolfo. Curso de sistemas de información geográfica [online].
<URL:http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/vector_raster>

Figura 3. Modelo Raster. En el modelo raster los objetos del terreno se representan por la celda o píxel



Tomado de FRANCO, Rodolfo. Curso de sistemas de información geográfica [online].

<URL:http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/vector_raster>

2.1.3.1 Estructura de datos vector. En el modelo vectorial, los rasgos del terreno y los objetos geográficos se representan por medio de tres elementos geométricos: puntos, líneas y polígonos, definidos o ubicados espacialmente por medio de las coordenadas en sus nodos. Las propiedades inherentes de cada uno de los objetos geométricos constituye la base para diferenciarlos de los demás atributos del terreno. Por ejemplo, los datos correspondientes a las planchas cartográficas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en formato digital son de tipo vectorial, en donde la información consignada en cada plancha es separada en diversas capas temáticas o layers como curvas de nivel, ríos, caminos, etc.

Existen diferentes maneras de representar un modelo de acuerdo a las distintas estructuras de datos que existen. La escogencia de una

determinada estructura de datos va supeditada de la información accesible, de la calidad, de la cantidad (referido a cantidad si la información está o no completa) y de la disponibilidad tanto a equipos, software y personal idóneo.

Según Felicísimo³, de todas las estructuras vectoriales existentes, las más utilizadas para construir MDT son dos:

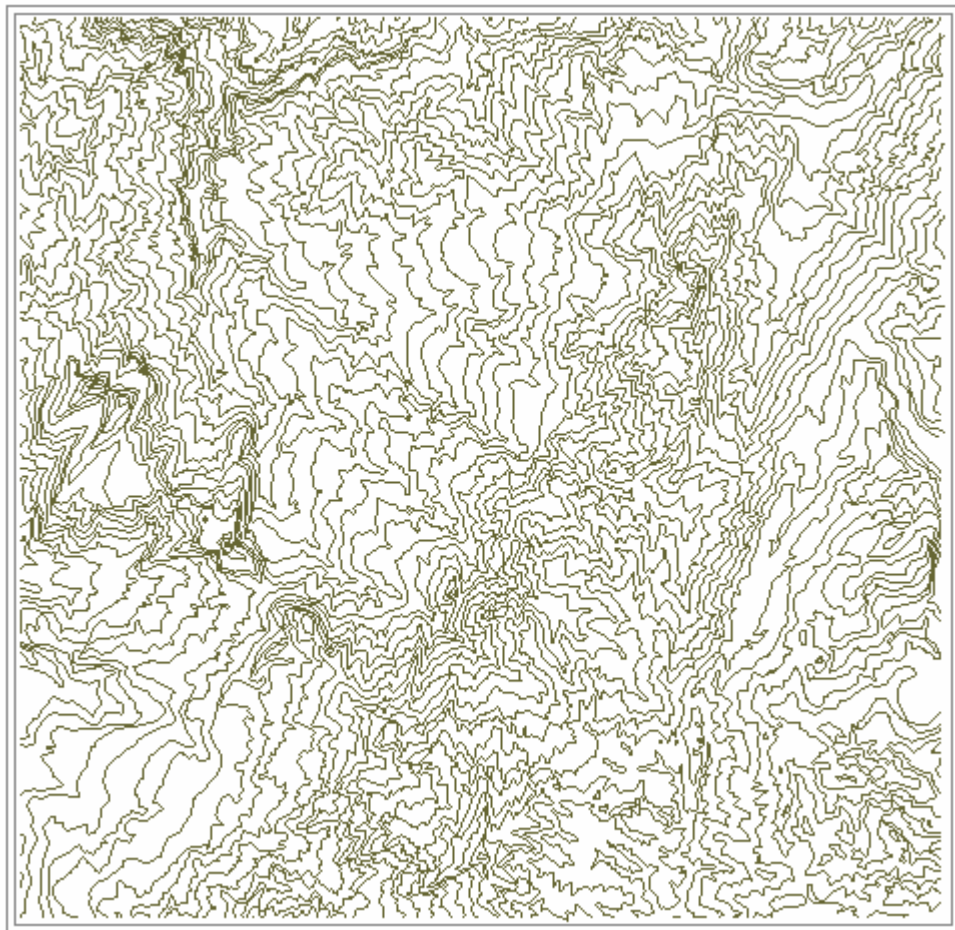
- Las isohipsas o contornos
- Los TIN.

El modelo vectorial de contornos está conformado por vectores en donde estos a su vez están formados por un conjunto de n - pares de puntos que se encuentran definidos y georeferenciados de acuerdo a un sistema de coordenadas. El número de puntos de cada vector es variable al igual que la separación entre los propios puntos que forman el vector. Cabe destacar que un vector se define con 2 puntos y un conjunto de vectores constituye una línea.

Los vectores se utilizan para enmarcar la forma o contorno de líneas que tienen un mismo valor (líneas isométricas). Por ejemplo, este modelo se puede utilizar para describir la forma de las curvas de nivel de un determinado plano topográfico. (Ver figura 4).

³Ibíd., p.18.

Figura 4. Modelo de contornos utilizado para describir la superficie de la Microcuenca Río Manso perteneciente a la cuenca del Río Opón (Santander). El modelo de contornos o isohipsas es el utilizado frecuentemente en los planos topográficos.



La estructura de datos TIN (Triangulated Irregular Network) que en español quiere decir Red Irregular de Triángulos está formada como su sigla lo indica por un conjunto de triángulos unidos que caracterizan la superficie terrestre, quedando de esta manera la topografía representada por una red completa de caras planas. (Ver figura 5 y 6). Las superficies TIN se crean a partir de puntos no colineales sucesivos distribuidos irregularmente en donde cada

punto se localiza espacialmente por un par de coordenadas x e y , y cada punto tiene asociada la propiedad en estudio (coordenada z).

Figura 5. Vista de la triangulación proveniente de una estructura TIN aplicado a la topografía de la Microcuenca Río Manso perteneciente a la cuenca del Río Opón (Santander) donde la variable estudiada es la elevación.

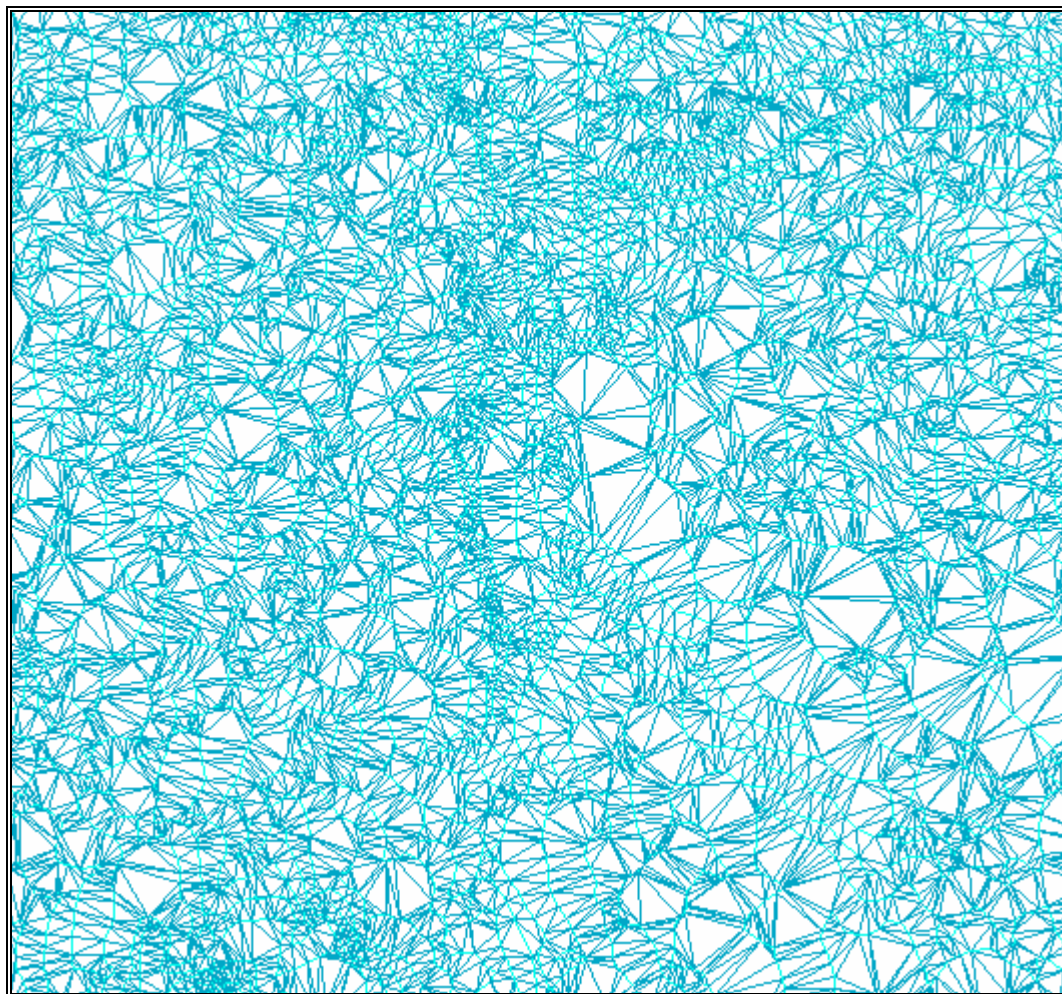
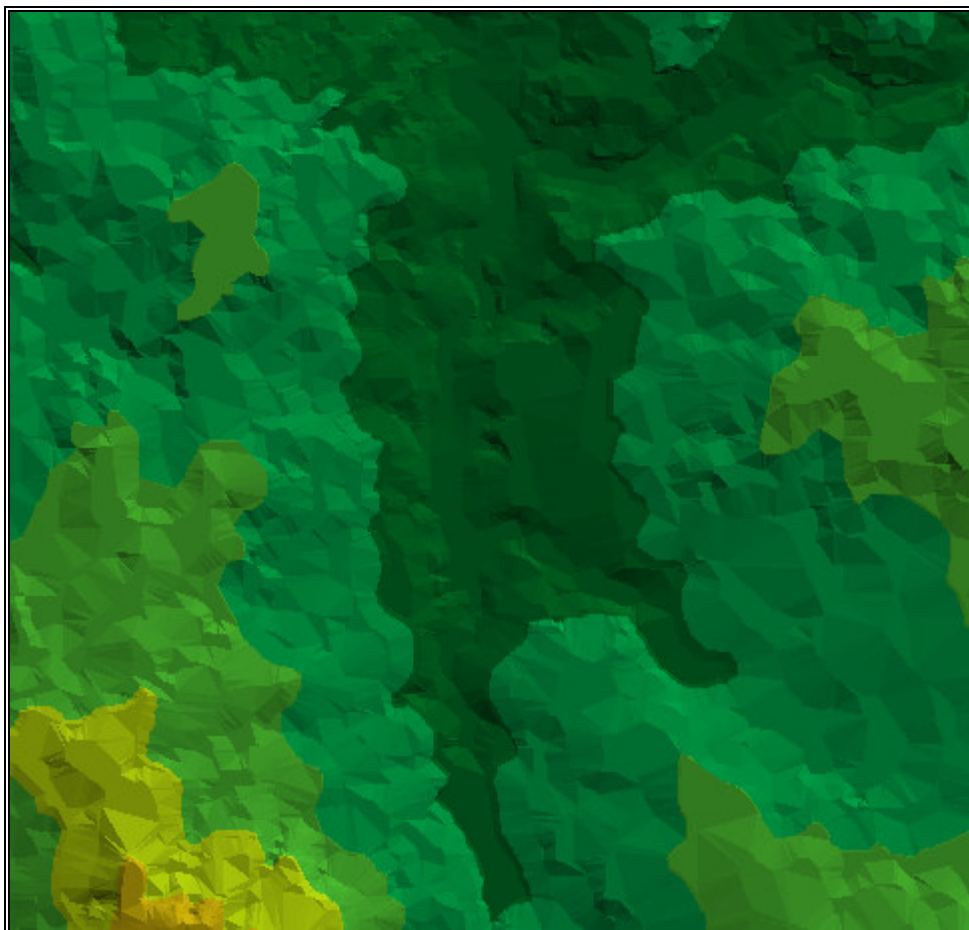


Figura 6. Vista de la superficie del terreno proveniente de una estructura TIN aplicado a la topografía de la Microcuenca Río Manso perteneciente a la cuenca del Río Opón (Santander) donde la variable estudiada es la elevación.



El método más común en los SIG utilizado para construir los triángulos es de la triangulación de Delauney que se basa en el principio de que un círculo que pasa por tres nodos o puntos no debe contener otro nodo. Cada lado del triángulo se forma a partir de un arco de círculo definido por dos nodos. Los vértices del triángulo y en general los nodos de la red de los TIN son los valores o datos originales introducidos. La triangulación de Delauney genera

triángulos con ángulos aproximados de 60° , es decir, se construyen triángulos casi equiláteros.

Una de las ventajas de los TIN es que se puede variar la utilización de los nodos en función de la variable que se encuentra en estudio, eliminando de esta manera datos redundantes que no aportan información trascendente. Por otro lado, otra ventaja de los TINs es que existe una buena calidad en la interpolación de los datos porque cada punto toma el valor de la variable en estudio de los puntos más cercanos a éste.

2.1.3.2 Estructura de datos raster. En el modelo raster las características físicas del terreno se representan por medio de una matriz que contiene celdas rectangulares o cuadradas, de forma tal que cada celda contiene un atributo cualquiera (como por ejemplo reflectancia o altura). El tamaño de cada celda es fundamental y determina su resolución. En el modelo raster la precisión de la localización de cualquier objeto geográfico (georeferenciación) se encuentra limitado por el tamaño del píxel debido a que éste único elemento de dibujo es la mínima unidad de longitud y de superficie.

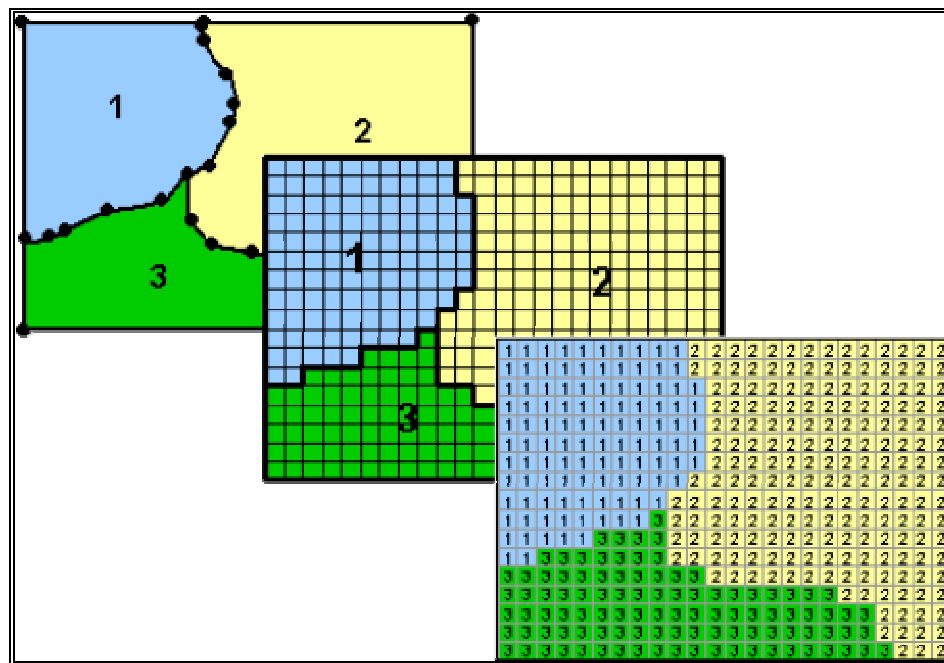
Según Felicísimo⁴, de las estructuras raster existentes y las más utilizadas se pueden destacar dos:

- Las matrices regulares.
- Las matrices jerárquicas, Quadtrees.

⁴ Ibíd., p. 18.

Las matrices regulares son el resultado de dividir cualquier superficie en pequeñas celdas que pueden ser cuadradas o rectangulares, las cuales toman valores numéricos representando de esta manera objetos geográficos (Ver figura 7). El resultado final consiste en que la superficie terrestre es descrita por una malla de puntos de forma cuadrada o rectangular. El número de celdas que conforman la malla define la resolución, siendo mejor cuantas más pequeñas sean éstas. Es por ello que las matrices regulares se encuentran sesgadas en cuanto a la precisión en la georeferenciación de los objetos con un margen de error equivalente a la mitad de la base y de la altura de la celda o píxel

Figura 7. Ejemplo de representación de un plano a formato raster y codificación de la información de cada celda o píxel.



Tomado de FAO, Sistemas de información geográfica [online].

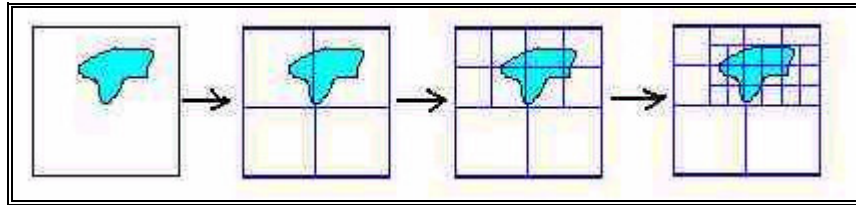
<URL:<http://www.fao.org/sd/frdirect/gis/chat3>>

La ventaja del modelo raster de la matriz regular es su facilidad de organización de los datos permitiendo realizar procesos de análisis, operaciones y algoritmos computacionales entre matrices, superposición de planos, y simulaciones de cualquier evento, entre otros, logrando de esta manera poder simular un fenómeno cualquiera de la naturaleza con las limitaciones implicadas de acuerdo al evento modelado.

Una de las grandes desventajas del modelo raster de las matrices regulares es el volumen de almacenamiento de los datos asociado con cada celda, es por ello que entre más grande sea la matriz, mayor será el volumen de información limitando de esta forma el tiempo de procesamiento de los datos.

Es por ello que el tipo de modelo raster Quadtrees corrige el inconveniente en mención y se basa en la técnica de dividir un plano en cuadrantes y si los objetos que se desean modelar aparecen en una determinada celda, ésta continúa subdividiéndose en cierta cantidad de cuadrantes hasta llegar a una resolución que es función de la escala del plano cartográfico modelado. Este método de división jerárquica permite utilizar celdas de distintos tamaños y también recibe el nombre de árboles cuaternarios.

Figura 8. Representación gráfica de la técnica de subdivisión utilizado por el modelo raster de las matrices jerárquicas o Quadtrees.



Tomado de FRANCO, Rodolfo. Curso de sistemas de información geográfica [online].

<URL:http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/vector_raster>

2.1.3.3 Ventajas y desventajas de los modelos vectorial y raster. En el momento de ejecutar un determinado proyecto de ingeniería o de modelar un fenómeno terrestre, ha existido el problema de escoger cuál será la manera más adecuada de representar los datos de tal manera que faciliten las operaciones, arroje buenos resultados y sobre todo que sea lo más cercano posible a la realidad. Hoy en día, la rivalidad vector-raster está técnicamente superada o minimizada debido a que la gran mayoría de los SIG actuales están empleando los atributos más destacados de cada estructura de datos y las han integrado en sus programas.

El modelo raster tiene como ventajas que es una estructura simple de datos, tiene compatibilidad con información proveniente de imágenes de satélite, se puede hacer análisis poligonal permitiendo realizar la superposición de mapas temáticos, análisis estadístico y gráfico. En general, la gran mayoría de las simulaciones físicas en los SIG necesita de una estructura raster. Por otro lado, tiene como desventajas en que el tamaño de la celda limita la resolución de los objetos geográficos y por lo tanto no es viable representar

entidades lineales cuando el tamaño de la celda es grande. También requiere de una gran cantidad de espacio para el almacenamiento de la información de cada celda donde el volumen de los datos es proporcional a la resolución del modelo.

La estructura de datos vectorial tiene como puntos a favor que los atributos del terreno son representados en su forma y escala original, permite formar buenas relaciones topológicas, es por esto que es la estructura adecuada para realizar análisis de redes y proximidad, ocupa poco volumen de almacenamiento de datos con respecto al raster y esta estructura es la más acorde para construir mapas cartográficos. El modelo vectorial tiene inconvenientes como los algoritmos de programación y manejo de la información son bastante complejos resultando imposible realizar simulaciones de procesos físicos. Para grandes cantidades de información no es posible visualizarla por completo en una misma capa temática y se vuelve inmanejable.

2.1.4 Tipos y Aplicaciones. Los usos de los MDT son múltiples de acuerdo con la variable representada. Existe diversidad de aplicaciones y disciplinas que encuentran en ellos la solución más adecuada para el manejo de información distribuida espacialmente. Pueden obtenerse modelos de utilidad en diferentes áreas de ingeniería, salud, geología, meteorología, biología, economía, y comunicaciones, entre muchas otras.

La posibilidad de usar los MDT como herramienta para realizar procesos de simulación dinámica, amplía grandemente su aplicación mediante el diseño de algoritmos numéricos que ayudan a resolver situaciones determinadas y a obtener nuevos MDT denominados modelos digitales derivados. Los MDT

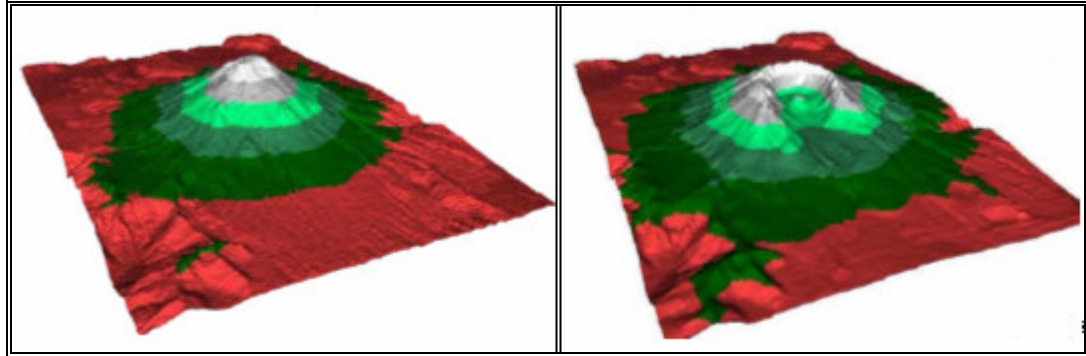
pueden representar todo tipo de variables, los cuales adoptan un nuevo nombre en función de la variable representada. Un modelo digital de temperatura indicará precisamente la distribución espacial y cuantitativa de la temperatura en un lugar determinado. Así mismo, pueden existir los modelos digitales de presión, humedad, precipitación, movimiento de vientos, propagación de incendios y enfermedades, elevación y pendientes del terreno, profundidades, suelos y formaciones geológicas, cultivos, en fin, la cantidad de variables es ilimitada en todas las áreas, lo que concluye respecto a los MDT la versatilidad que representa su uso para obtener información a partir de todo tipo de datos.

A continuación se enuncian algunas aplicaciones directas de los MDT:

- En ingeniería de suelos y geotecnia pueden ayudar a señalar tipos y uso de suelo y facilitar la simulación de fenómenos de avalanchas de sedimentos, inundaciones, erosión, deslizamientos, etc.
- En ingeniería de vías permiten obtener perfiles del terreno, y mediante algoritmos especiales calcular variables topográficas, realizar explanaciones viales, simular movimientos de tierra, proponer y previsualizar alternativas de diseño y construcción de carreteras, puentes, y túneles.
- En climatología constituyen la base para el modelamiento del comportamiento meteorológico de vientos, presiones, precipitaciones, radiación y exposición solar, entre otros fenómenos climáticos.

- En geología pueden ayudar a indicar la presencia de formaciones geológicas, canteras, pliegues, fallas, zonas amenazadas o devastadas por efectos volcánicos o sísmicos (ver figura 9).

Figura 9. Vista 3D de un volcán antes y después de su erupción.



Tomado de

http://geouabcs.tripod.com/clases_geologia/materiales/sig_clase_12.pdf

- En hidrología permiten realizar la caracterización física de cuencas hidrográficas, definición de redes de drenaje, estimación de caudales, y simulación de modelos hidrológicos.
- En el campo de salud, ayudan a visualizar y predecir la dispersión de enfermedades en zonas vulnerables e indicar la presencia de servicios públicos básicos y de asistencia médica en un área determinada.
- En biología, permiten representar la variación de especies de flora y fauna, caracterizar climas y ambientes idóneos para la conservación de las especies, determinar zonas de reservas naturales, reforestación y

deforestación controlada, aprovechamiento de recursos naturales renovables y no renovables, y riesgos de contaminación ambiental.

- En economía, pueden indicar la variación espacial de factores asociados con calidad de vida, desempleo, ingreso per cápita, crecimiento de población, oferta y demanda de productos.
- En la industria de las comunicaciones y electricidad, facilitan la realización de modelos de interferencia visual para redes, estaciones, torres, y otros tipos de estructuras.

Uno de los MDT más utilizados es el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), que es la representación de la variabilidad espacial de la cota del terreno. Este modelo es en general el punto de partida para la obtención de otros modelos derivados que modelan procesos físicos en diferentes áreas de la ingeniería.

2.2 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN – MDE

La relación existente entre el MDT y el MDE es muy estrecha lo cual obliga a tener plena claridad del concepto y los alcances que cada uno de los mencionados modelos encierra. Sin embargo, el MDE tiene gran importancia dentro de los MDT ya que estos pueden ser la base para generar modelos que permitan un mejor y rápido entendimiento de la situación que se esté analizando.

Los siguientes párrafos presentan el concepto, las características, los métodos de generación de un MDE, los alcances y aplicaciones de los

mismos, lo cual tiene como propósito marcar la diferencia entre estos y los MDT.

2.2.1 Definición y estructura del MDE. El modelo digital de elevación (MDE) es un modelo derivado del MDT donde se involucra específicamente la elevación del terreno como atributo, siendo así, se define el MDE como la estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un MDE tiene un dominio espacial y una localización geográfica concreta.

El MDE es un MDT cuyo atributo es la elevación. La unidad básica de información de un MDE es un punto de coordenadas x, y, z (z es la elevación) que puede organizarse de la misma forma que en un MDT, en forma vectorial o forma raster con las mismas ventajas y desventajas que las descritas para el almacenamiento de un MDT (...ver Literal 2.1.3.3...).

2.2.2 Elaboración o construcción del MDE. La fase de obtención o captura de datos es, por sí misma, uno de los pilares en los que se basa la calidad y confiabilidad de un MDE y por extensión, toda aplicación científica, industrial o comercial que éste pueda tener. Se debe estar al tanto que esta etapa constituye la transformación de la realidad física, motivo de análisis, en una estructura de datos manipulable tanto por el programador como por el usuario. Teniendo en cuenta estos puntos, debe hacerse una selección adecuada del método de captura de datos que se utilizará, conociendo tanto sus puntos fuertes como sus falencias.

El paso siguiente es la construcción del MDE el cual puede ofrecer buenos resultados y grandes utilidades dependiendo de la calidad de los datos

capturados. Por esta razón se debe tener especial cuidado en la manera y los equipos que se utilicen para tal fin.

2.2.2.1 Obtención de la información. La captura de datos es básica en la realización de cualquier análisis, esto lleva a que se tenga especial cuidado en dicho proceso, por lo cual resulta dispendioso y requiere mucho tiempo durante una investigación. Para la captura de datos necesarios para la realización de un MDE se tienen varios métodos como son: los métodos directos (altimetría, GPS y levantamientos topográficos) y los métodos indirectos (restitución y digitalización).

Se consideran métodos directos cuando las altitudes y datos que requiera el MDE se toman directamente sobre el campo para lo cual se pueden utilizar altímetros, GPS o estaciones topográficas. Es un método que implica grandes costos y mayor inversión de tiempo, siendo éstas sus principales desventajas.

Los altímetros son instrumentos de alta precisión que se han incorporado a los satélites y permiten el registro directo de las altitudes del terreno en formato digital. Los GPS (Sistema Global de Localización) utilizan un conjunto de satélites de referencia para obtener coordenadas espaciales (x, y, z) de un lugar determinado en la superficie, es un método de alta precisión. El levantamiento topográfico es el método directo de captura de datos más antiguo (de los expuestos aquí), su precisión es menor que los anteriores y al igual que los GPS requiere de la presencia física en el terreno convirtiéndose en su gran desventaja.

Los métodos indirectos se caracterizan por utilizar documentos analógicos o digitales previamente elaborados con lo cual se agiliza el acceso a la información y se evita la presencia física en el terreno convirtiéndose por tanto, en el más utilizado en la generación de modelos digitales de elevación.

Dentro de los métodos indirectos se cuenta con la restitución fotogramétrica, la cual utiliza pares de imágenes (fotografías aéreas, imágenes de satélite y de radar) tomados desde puntos de vista diferentes con el fin de deducir de su paralelaje las cotas de referencia necesarias para reconstruir la superficie del terreno. La digitalización, ya sea automática o manual es el otro método indirecto de captura de datos que se realiza a través de escáner o mediante un tablero digitalizador. El proceso de digitalización es más lento y genera mayores errores ya sea porque los originales son muy densos y al escanear se dificulta el proceso porque no se puede seleccionar sólo la información requerida o porque el operario obvia datos o los digitaliza erróneamente.

La digitalización manual es un proceso muy sencillo que se realiza con un tablero digitalizador sobre el cual se coloca un mapa para que un operador siga uno a uno, con un cursor los datos contenidos en él para ser almacenados directamente en formato digital. La digitalización manual es muy utilizada a pesar de la calidad irregular de la información que ofrece, ya que esta depende directamente de las capacidades de la persona encargada de transcribir los datos. Sin embargo, y con el propósito de limitar los errores se han establecido algunas normas como: usar originales en buen estado, no introducir excesivo número de puntos dentro de las curvas de nivel, digitalizar los ríos desde su nacimiento hasta su desembocadura, registrar la referencia espacial del mapa con precisión mediante puntos de control, valorar el método de digitalización a utilizar en función de la calidad de los resultados.

2.2.2.2 Métodos de construcción del MDE. La construcción de un MDE se puede realizar de dos formas:

- A partir de una serie de puntos georeferenciados y con el valor de atributo conocido (modelo vectorial) y utilizando técnicas de interpolación se puede obtener una red regular de puntos (modelo raster) con su respectivo atributo.
- A partir de la serie de puntos de campo construir un modelo vectorial del atributo (TIN) y a partir de este generar un modelo raster de elevaciones.

En el primer caso, la generación de un MDE matricial (raster) se convierte en un problema de interpolación. Existen muchos métodos de interpolación, de los cuales se escoge aquel que es capaz de representar la superficie del terreno con la mayor semejanza o realidad posible, es decir, el método de interpolación debe asignar los valores adecuados de altitud a los nuevos puntos (malla regular de puntos – modelo raster) de acuerdo a los datos contenidos en el modelo vectorial de puntos. Como todo método tiene su debilidad o falencia, los métodos de interpolación no son la excepción. El problema se presenta cuando en el relieve hay cambios bruscos de pendiente o existen discontinuidades, dichos métodos no son capaces de representarlos debido a que siguen una tendencia o variaciones con distribuciones suaves.

Para solucionar los inconvenientes anteriores se proponen los métodos de interpolación basados en triangulaciones como lo es la Red Irregular de

Triángulos TIN, que es una estructura vectorial especial que mediante triángulos caracteriza la topografía. (Para ver la definición completa ver el literal...2.1.3.1...). Este método tiene como fortaleza en que la superficie de terreno a representar puede tener cambios bruscos de pendiente o discontinuidades en su morfología, es decir, se adapta a las complejidades del terreno.

El TIN es la estructura más adecuada para la generación de un MDE porque representa de una manera más precisa la topografía de un sector, sin embargo, genera una estructura más compleja que la matriz regular

Debido a las dificultades presentadas en este sentido se opta por crear inicialmente un TIN y posteriormente generar un MDE raster (matricial) mediante un proceso de interpolación específico. De esta manera a cada nodo del MDE matricial se da un valor de altitud estimado a partir del TIN. Con el MDE raster matricial no se pueden representar todas las estructuras lineales como lo hace el TIN, pero permite la distribución de la variable altitud en forma continua y además se logran incluir las discontinuidades que presenta el terreno.

2.2.3 Aplicaciones. Para hablar de las aplicaciones de los MDE en los diferentes campos del saber humano, se debe analizar en primer lugar cómo la información topográfica en tres dimensiones ayuda a entender el ambiente, la naturaleza, el comportamiento del ser humano y de sus intervenciones en ella y cómo se puede garantizar un medio ambiente sostenible y un óptimo uso de los recursos naturales sin que sufran graves cambios.

Debe hacerse enfoque en los puntos fuertes de los MDE para de esta manera reflejarlos en otros campos de acción de la naturaleza. Así mismo, debe tenerse en cuenta que es fundamental, para una explotación completa

de las utilidades de los MDE, estar seguros de la calidad y precisión de ellos mismos, y asegurar con esto que las proyecciones que se hagan a partir de estos modelos puedan brindar confianza a los usuarios.

La tecnología de información geográfica y el procesamiento de imágenes digitales se han convertido rápidamente en un campo en expansión especialmente en las áreas científica, comercial y operacional. Es así, como sus principales aplicaciones se encuentran en estos tres dominios.

La información exacta acerca de la superficie de la tierra es de gran importancia en las llamadas geociencias. La topografía controla procesos de la superficie terrestre tales como evaporación, flujo de agua, movimiento; todos ellos importantes en el intercambio de energía en el sistema climático en la atmósfera. La ecología investiga la dependencia entre todas las formas de vida y su ambiente como la tierra, el clima y el paisaje. La climatología investiga los flujos de temperatura, la humedad, las partículas aéreas, todos estos influenciados por la topografía. En meteorología y modelamiento climático, los modelos de procesos de conversión entre la tierra y la atmósfera así como de los movimientos en los estratos atmosféricos más bajos también están relacionados con los MDE.

Es así como en el campo científico se emplean los MDE para investigaciones en estudios de impacto climático, manejo de agua, modelamiento geológico, tecnología de información geográfica, análisis geomorfológicos y de laderas, mapas temáticos y programas educativos.

- Vías: Un MDE permiten obtener perfiles del terreno, calcular variables topográficas, realizar explanaciones viales, simular movimientos de tierra,

lo cual facilita el diseño y localización no sólo de vías sino de caminos, vías de ferrocarriles, oleoductos, gasoductos, entre otros, sin tener siquiera que trasladarse hasta el sitio de estudio.

- **Geología:** El avance en lo concerniente a imágenes tomadas desde el espacio y su respectivo análisis mediante instrumentos computacionales ha beneficiado muchos campos de estudio, entre ellos puede contarse el geológico. Es así como a través de imágenes satelitales pueden llevarse a cabo exploraciones geológicas con sus correspondientes ventajas en el aspecto económico y mostrando niveles de precisión aceptables. Sin embargo, este tipo de estudios requiere inevitablemente mayor inversión de horas-hombre en reconocimiento de campo, pero esta labor debe realizarse en cualquier tipo de estudio geológico. El modelo digital de elevación permite, en este caso, visualizar de mejor forma las estructuras y relieves terrestres y junto con otras herramientas puede converger a aplicaciones en áreas como geología estructural, tectónica de placas, mapeo de unidades geológicas, etc.
- **Obras hidráulicas:** La hidráulica es una rama de la ingeniería que está ampliamente ligada con el desarrollo económico de una región, debido a este hecho es frecuente encontrar obras de este tipo en cualquier lugar sobre la superficie terrestre. El avance de la tecnología y sobre todo, la implementación de los MDE ha colaborado para que esta tarea sea cada vez más efectiva ya que antes de realizar una obra de este tipo y basados en estos modelos se pueden tomar decisiones respecto a la funcionalidad, conveniencia y ubicación de las estructuras hidráulicas requeridas en la zona de estudio.

- Hidrología: La investigación de la utilidad de los MDE en la solución de problemas asociados a la modelación hidrológica y la administración del recurso hídrico ha llevado a la construcción de modelos lluvia-escorrentía, estimación de transporte de sedimentos, estimación de regímenes de caudales, cálculo de parámetros geomorfométricos, gestión del recurso hídrico, entre otras. Todas estas aplicaciones parten de la cuantificación de la distribución y el flujo del agua sobre el paisaje, en donde se inicia realizando una representación de la topografía del terreno, para posteriormente utilizar metodologías de modelación numérica, regionalización de parámetros, acumulación de variables distribuidas o alguna otra metodología hidrológica.

Para el modelamiento hidrológico de cuencas, es necesario contar con un MDE muy preciso. Sólo a través de la combinación de los datos topográficos, la información de uso de tierra, la precipitación y almacenamiento de agua, puede realizarse un pronóstico acertado de eventos futuros. Un MDE contiene información suficiente para definir variables hidrológicas como la red de drenaje superficial y por consiguiente el área de captación y el flujo acumulado; así mismo, la pendiente del terreno y áreas tributarias. Además, un análisis hidrológico continuo puede llegar a ser importante para las actividades agrícolas, definición de la dirección de irrigación, etc.

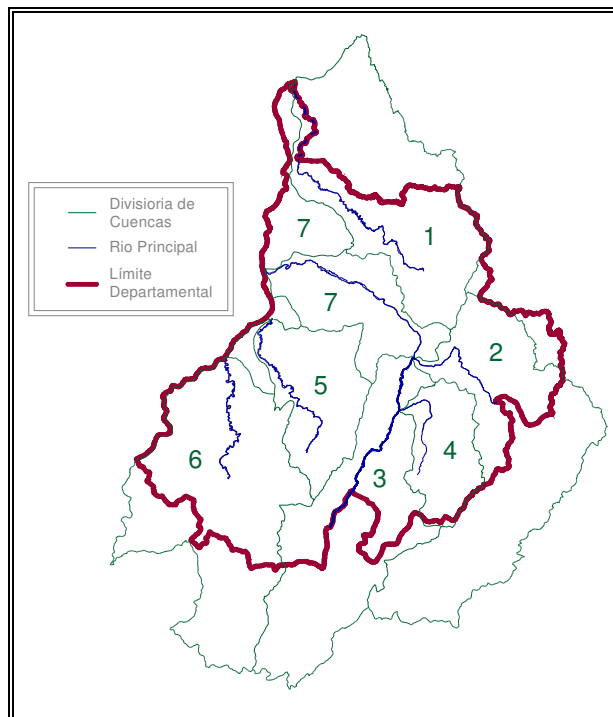
En el ejemplo de aplicación que se presenta en el capítulo 5 se explica con detalle la manera como se utilizaron los MDE para la caracterización física de una cuenca hidrográfica, cuál es el proceso para calcular los parámetros morfométricos y cuáles se pueden obtener a partir del modelo. También se habla de la calidad de los resultados que se obtienen de éste.

3. DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO

3.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto consiste en mostrar la aplicabilidad de los MDE en la ingeniería mediante su aplicación al problema del estudio físico e hidrológico de las principales cuencas hidrográficas del departamento de Santander a partir de la cartografía básica escala 1:25000. Para ello se propone dividir el departamento (ver figura 10) en 7 cuencas representativas correspondientes a los ríos Lebrija (1), Chicamocha (2), Suárez (3), Fonce (4), Opón (5), Carare (6), y Sogamoso incluyendo algunos otros afluentes al Río Magdalena (7), cuya extensión comprende adicionalmente parte del Departamento de Boyacá.

Figura 10. División hidrológica del Departamento de Santander



De manera particular éste proyecto comprende el estudio de las cuencas de los ríos Opón y Carare, que incluye la recopilación y adecuación de la información cartográfica, la realización de los modelos digitales de elevación y la caracterización física de las cuencas hidrográficas que componen sus principales afluentes y la publicación de los resultados soportados sobre una base de datos mediante un sistema de información en Internet.

3.2 OBJETIVOS

3.2.1 Objetivo General.

Elaborar el modelo digital de elevación de las cuencas de los ríos Opón y Carare con aplicación en su caracterización física, geográfica, e hidrológica.

3.2.2 Objetivos Específicos.

- Estructurar y adecuar la cartografía básica del IGAC en formato digital, escala 1:25000, de las cuencas de los ríos Opón y Carare en el departamento de Santander.
- Realizar una división hidrológica de los principales afluentes de los ríos Opón y Carare.
- Generar el modelo digital de elevación de las cuencas de los ríos Opón y Carare y sus principales afluentes.
- Calcular los parámetros morfométricos de las diferentes cuencas estudiadas.
- Establecer conclusiones a partir de la interpretación y evaluación de los resultados obtenidos.
- Presentar la información utilizada en un sistema de base de datos mediante la creación de un sitio web que facilite operaciones de búsqueda y consulta.

3.3 ALCANCE

Las cuencas en estudio para éste proyecto son: La Cuenca del Río Opón, con un área total de 3871,68 Km² de los cuales se estudiaron un 67.10%

dentro del Departamento de Santander y con topografía regular, y La Cuenca del Río Carare, con un área total de 10041,70 Km² de los cuales un 45,32% corresponden al Departamento de Santander y se trabajaron un 23,76% ya que se presentan irregularidades en la topografía. Estas zonas de topografía irregular no se trabajan debido a la necesidad de utilizar planchas a una escala por lo menos 1:10000 (escala que no es la trabajada en el proyecto), y así facilitar un estudio mas detallado.

En las Figuras 11 y 12 se muestran las áreas reales trabajadas para las cuencas de los ríos Opón y Carare.

Figura 11. Área real trabajada para la Cuenca del Río Opón.

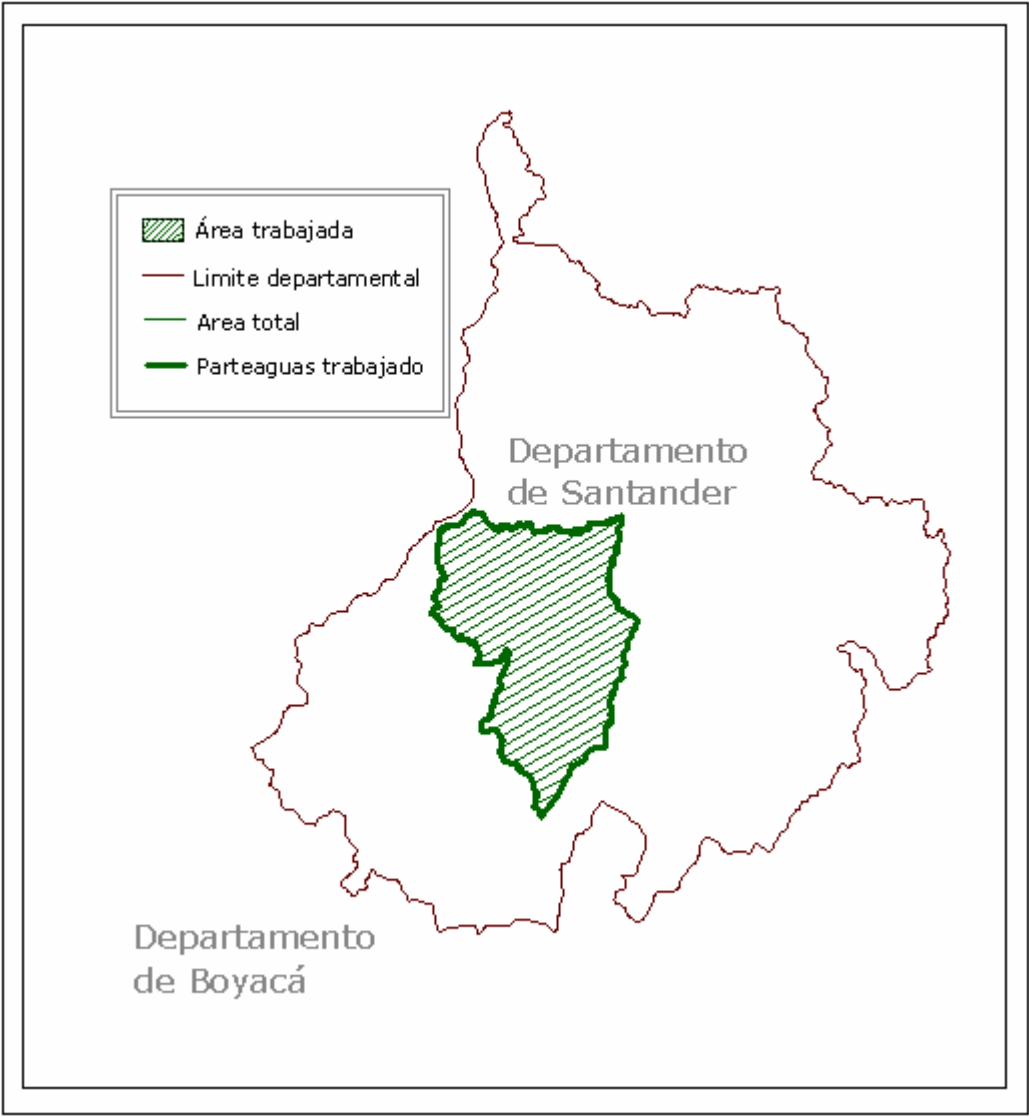
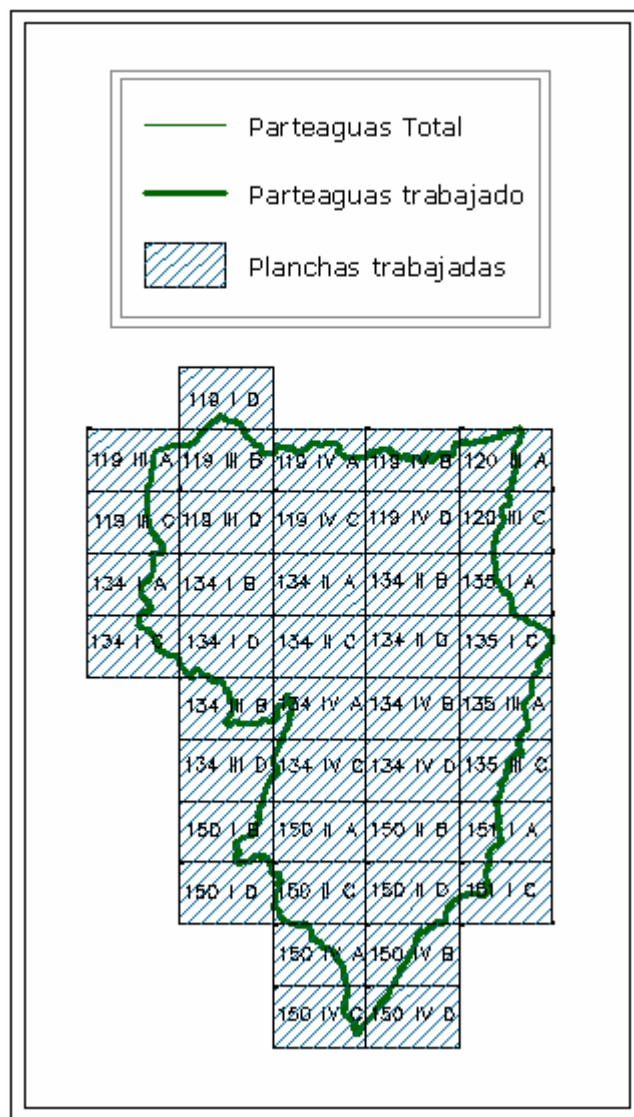


Figura 12. Área real trabajada para la Cuenca del Río Carare.



De las 41 planchas IGAC que cubren en su totalidad la cuenca del río Opón (Ver Figura 13), se trabajan 41. Todas se obtienen en formato digital, las cuales se someten a una estricta revisión y corrección de su contenido.

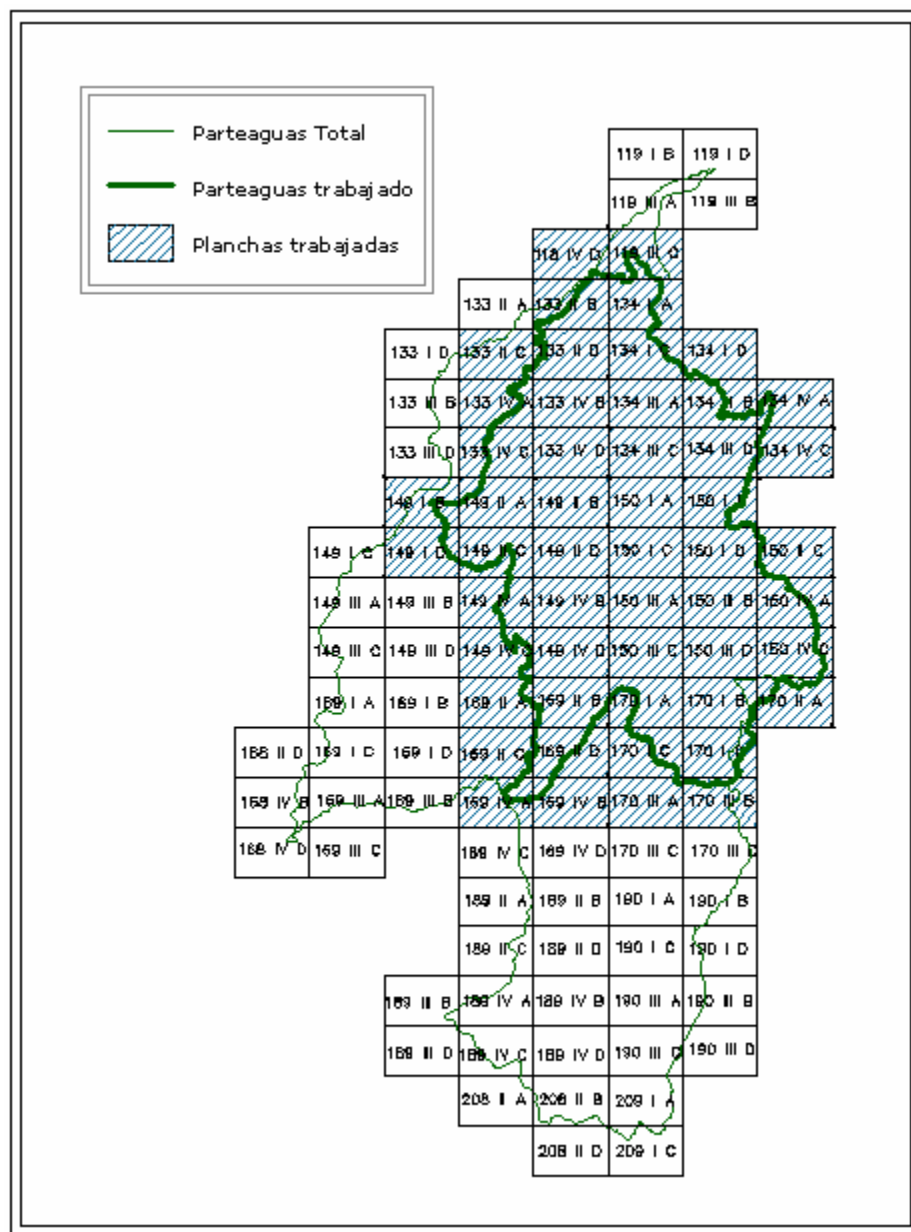
Figura 13. Distribución de planchas IGAC para la cuenca del Río Opón.



De las 102 planchas IGAC que cubren en su totalidad la cuenca del río Carare (Ver Figura 14), se trabajan 52. De estas planchas se obtienen 51 en formato digital, las cuales se someten a una estricta revisión y corrección de su contenido, la restante se adquiere por medio de una copia heliográfica de la original del IGAC, y se traduce al formato digital mediante el procedimiento de digitalización manual. Se realiza para cada una de ellas una recopilación

de información básica como fecha de publicación, tipo de carta, disponibilidad en medio impreso, cobertura de municipios del departamento de Santander, cobertura de otros departamentos, cobertura de cuencas principales, presencia de nubes o zonas sin información y observaciones generales a nivel del proceso de digitalización.

Figura 14. Distribución de planchas IGAC para la cuenca del Río Carare.



Para cada una de las cuencas hidrográficas que componen los principales afluentes de los ríos Opón y Carare se tienen una serie de datos que ayudan a evaluar la caracterización física, geográfica e hidrológica. La siguiente información corresponde a los datos más importantes:

- Nombre de la cuenca (nombre del río o quebrada que representa).
- Desembocadura (nombre del río o quebrada en la cual desemboca la cuenca).
- Orientación.
- Área subsidiaria.
- Perímetro.
- Tipo de cuenca (clasificación de acuerdo con el área subsidiaria).
- Longitud y pendiente del cauce principal.
- Longitud del tramo más alejado.
- Elevación máxima, media, y mínima.
- Pendiente media.
- Factor de forma.
- Coeficiente de compacidad.
- Coeficiente de masividad.
- Pendiente.
- Orden.
- Longitud de la red de drenaje.
- Densidad de drenaje.
- Tiempo de concentración.

Se incluye además, aparte de la información de tipo hidrológico, la cobertura a nivel de las planchas IGAC y de los municipios del Departamento de Santander, y los límites con otras cuencas.

La información manejada y obtenida a nivel de las planchas IGAC y de las diferentes cuencas estudiadas se organiza y se publica en Internet en un entorno gráfico sencillo y adecuado acompañado de un sistema de base de datos que facilite su navegación, las operaciones de búsqueda, consulta, actualización, y el acceso a planos, figuras, tablas, enlaces y otros tipos de documentación. El sitio web cuenta con el espacio en el servidor “albatros” de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander en la siguiente dirección: <http://albatros.uis.edu.co/hidroatlas>.

3.4 ENTIDADES INTERESADAS

Los entes que pueden beneficiarse directamente de esta investigación son: Gobernación del departamento, Corporaciones Autónomas Regionales, IDEAM, Alcaldías, Ministerio del Medio Ambiente, Empresas de servicios públicos, Constructoras, Universidades, Oficinas de prevención y atención de desastres; e indirectamente los centros de educación básica primaria y secundaria entre otros.

La implementación de un estudio que recopile la caracterización física, geográfica e hidrológica de las cuencas hidrográficas del Departamento de Santander contribuye a la promoción y motivación de diferentes entes particulares y académicos a mejorar los estudios existentes y a continuar con el desarrollo de nuevas tecnologías aplicables.

4. METODOLOGÍA

En la caracterización física y geográfica de las cuencas hidrográficas del departamento de Santander con ayuda de los MDE se distinguen tres etapas:

- Recopilación de la información.
- Evaluación y control de calidad de la información.
- Procesamiento de la información.

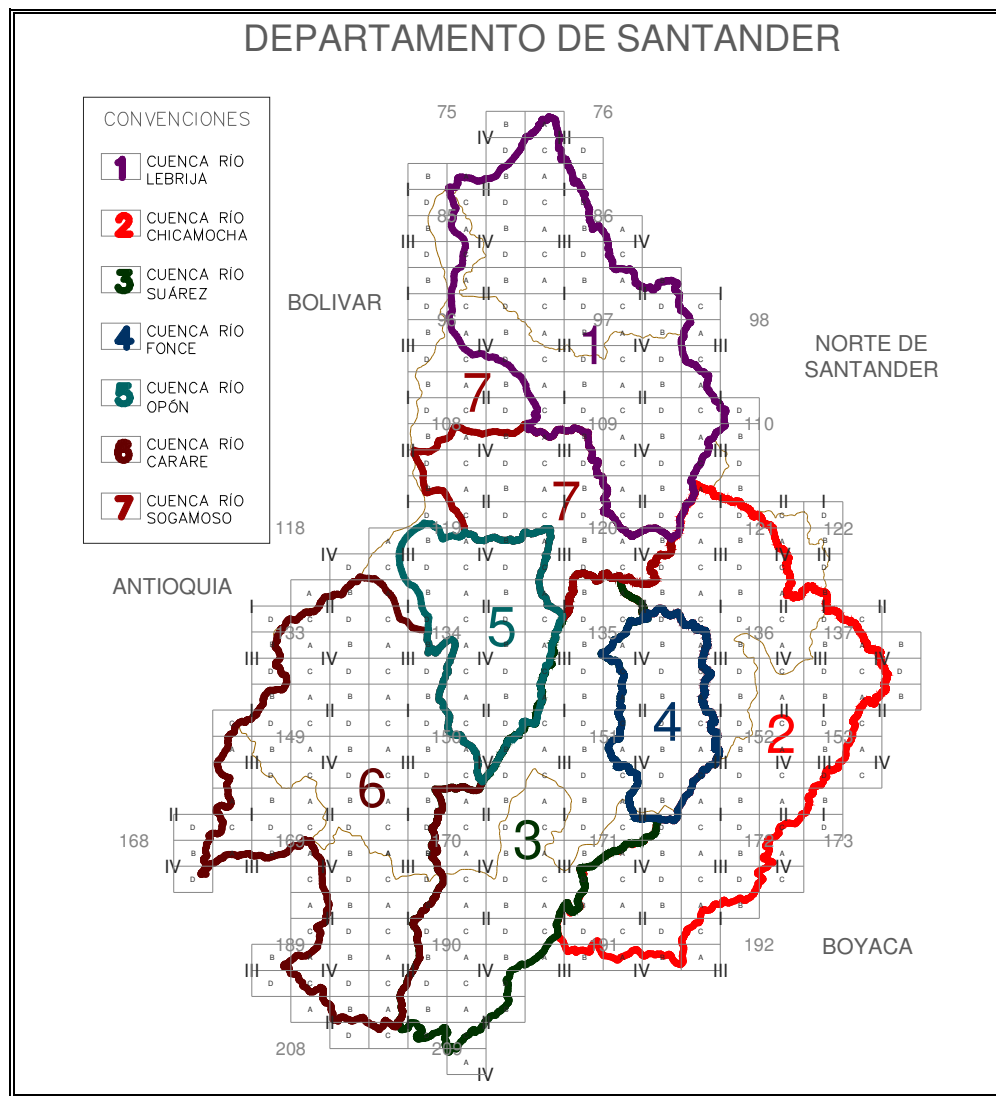
Debido a la importancia que tienen estas fases se considera necesario hacer una descripción detallada de cada una de ellas, con el objeto de presentar en forma clara el procedimiento realizado.

4.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información cartográfica básica que se ha utilizado en el desarrollo del presente trabajo, se encuentra representada en las planchas cartográficas a escala 1:25000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Esta información fue suministrada por el Grupo de Investigación en Geomática Gestión y Optimización de Sistemas adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

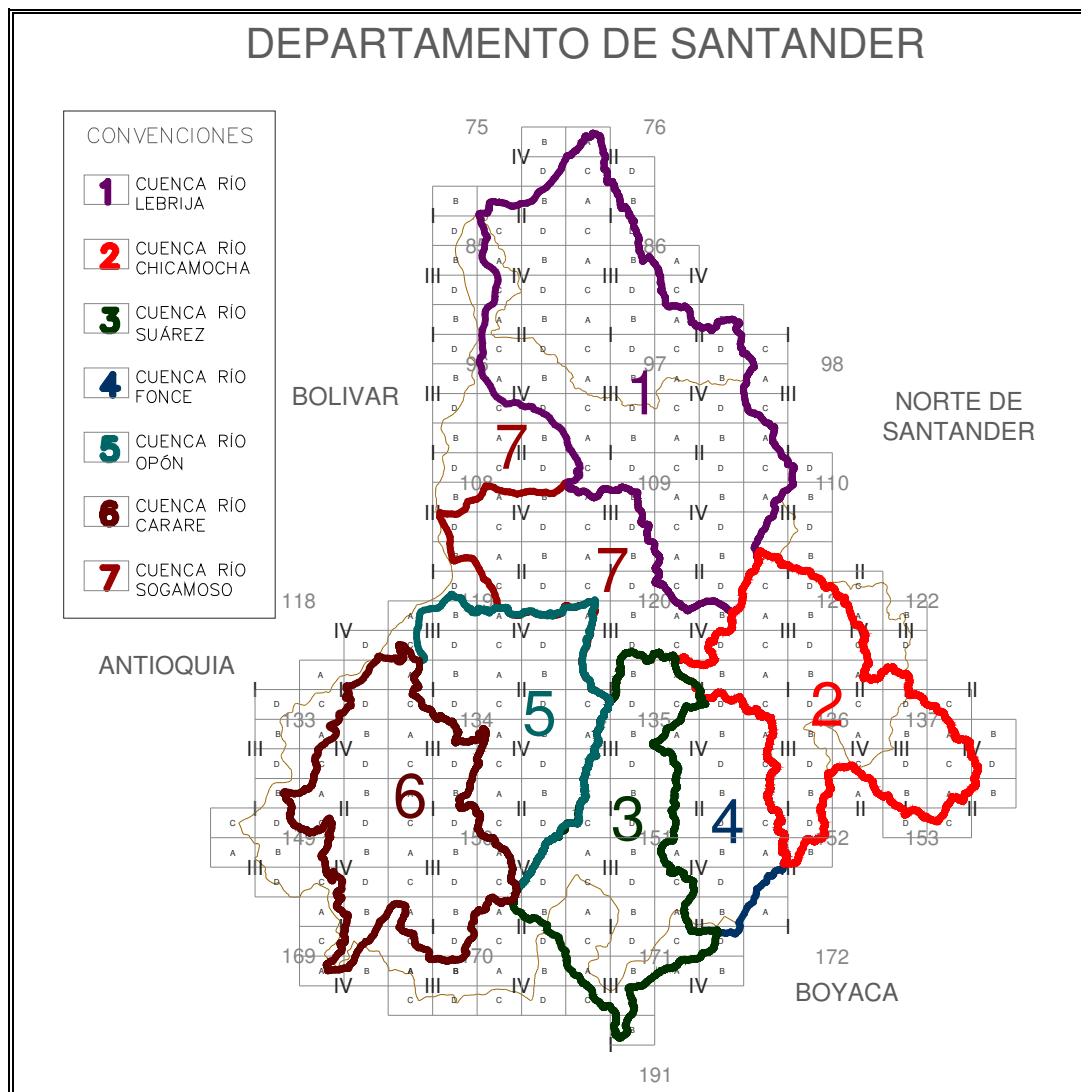
Para realizar un estudio completo de las cuencas de los principales afluentes del departamento de Santander se requerían inicialmente un total de 387 planchas cartográficas IGAC (Ver Figura 15).

Figura 15. Distribución inicial de las planchas para las cuencas de los principales afluentes del departamento de Santander



Teniendo en cuenta que en algunas cuencas su extensión cubría otros departamentos limítrofes a Santander y que en otras, la escala en la que se encontraba la información no permitía un nivel de detalle suficiente para desarrollar el presente trabajo, se tomó la decisión de realizar una reubicación de las divisorias de aguas disminuyendo así el área de trabajo y el número de planchas que se necesitaban en un principio (Ver Figura 16).

Figura 16. Distribución de las planchas para las cuencas trabajadas del departamento de Santander



En la Tabla 1 se muestra la relación del número de planchas asignadas para cada una de las cuencas, para el estudio completo de cada una de ellas y para la zona trabajada finalmente. La información está clasificada de acuerdo al formato en que se encontró.

Tabla 1. Relación de la información inicial y la trabajada a nivel de planchas IGAC para cada una de las cuencas y clasificada según el formato.

No.	Nombre Cuenca	Información inicial				Información trabajada			
		Análogo Papel	Formato digital	Planchas Faltantes	Planchas Total	Análogo Papel	Formato digital	Planchas Faltantes	Planchas Total
1	Río Lebrija	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Río Chicamocha	38	39	54	93	33	33	14	47
3	Río Suarez	38	49	33	82	38	43	6	49
4	Río Fonce	2	9	0	9	2	9	0	9
5	Río Opón	25	41	0	41	25	32	0	32
6	Río Carare	39	52	50	102	27	37	1	38
7	Río Sogamoso	25	38	10	48	25	38	10	48
TOTALES		167	228	147	375	150	192	31	223

De la tabla anterior se puede deducir que se utilizaron un total de 223 planchas cartográficas IGAC, de las cuales 192 estaban en formato digital. Esta información fue sometida inicialmente a un proceso de inspección y evaluación de cada uno de los elementos cartográficos, obteniendo deficientes resultados en cuanto al nivel de calidad requerido para cumplir con los objetivos del presente proyecto.

Las 31 planchas faltantes para todas las cuencas se adquirieron por medio de copias heliográficas de las originales provenientes del IGAC y se distribuyeron entre los integrantes del grupo de manera equitativa, correspondiendo a cada persona un total de 3.1 planchas para ser sometidas a un proceso de digitalización manual.

El proceso de digitalización manual consta de dos partes, la primera es la digitalización de los elementos cartográficos con la ayuda de una tableta digitalizadora y la segunda corresponde a la revisión, mejoramiento y adecuación de la información con ayuda de la plancha cartográfica impresa.

En la primera parte del proceso de digitalización una persona gasta en promedio 24 horas o más dependiendo de las características propias de la plancha. Este proceso comprende la digitalización de curvas de nivel, drenajes, caminos y carreteras, casas, municipios, límites y demás elementos cartográficos; cada uno de estos debe ser digitalizado en la capa correspondiente según la nomenclatura estándar del IGAC (ver anexo A). La segunda parte del proceso corresponde a la inserción de los textos, propiedades de elevación, color, estilo de línea, espesor de la línea y la revisión de todos los elementos para corregir los errores que se podían presentar en la primera parte. Este proceso requiere aproximadamente un promedio de 10 horas por plancha.

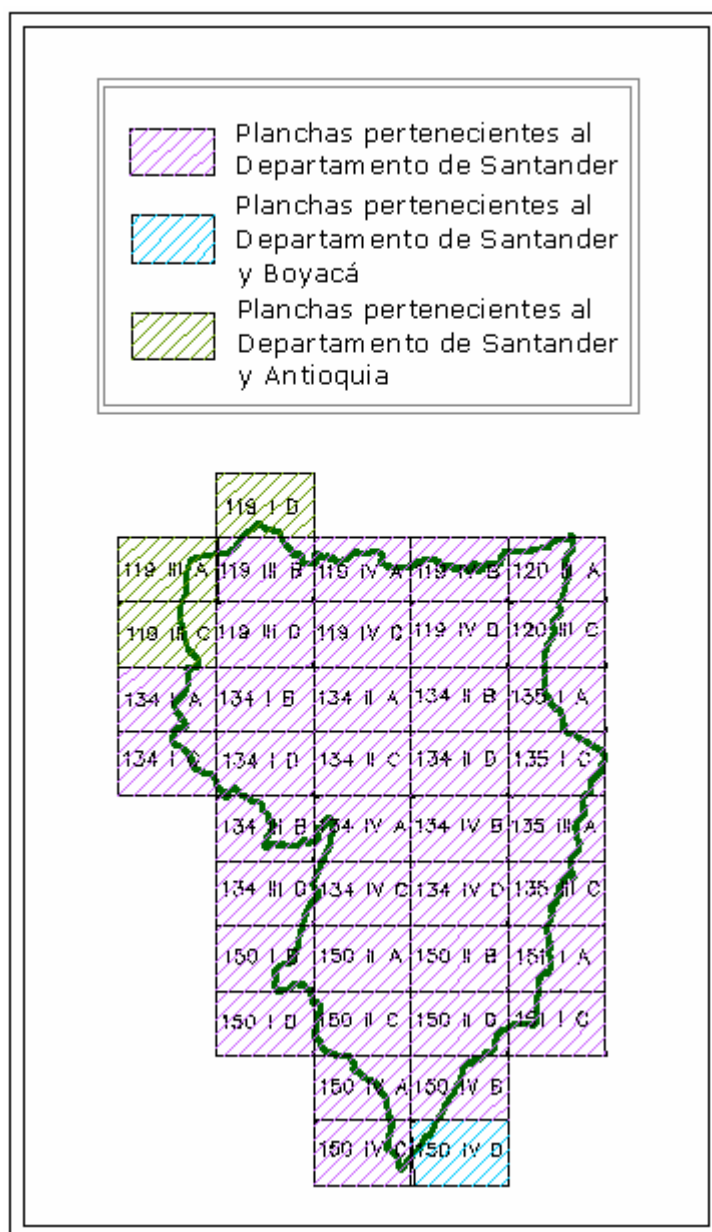
Considerando que para digitalizar completamente una plancha se requieren 34 horas-hombre, el tiempo utilizado en la digitalización de las 31 planchas faltantes fue de 1054 horas-hombre.

En el estudio de la cuenca del Río Opón (5) se requirieron cuarenta y un (41) planchas IGAC en el Departamento de Santander, Antioquia y Boyacá (ver figura 17) de acuerdo a la tabla. 2:

Tabla 2. Distribución de las planchas para la cuenca del río Opón en cuanto a localización

Localización	No. Planchas
Santander	37
Santander - Antioquia	3
Santander - Boyacá	1
Total	41

Figura 17. Distribución de las planchas del río Opón de acuerdo a su localización

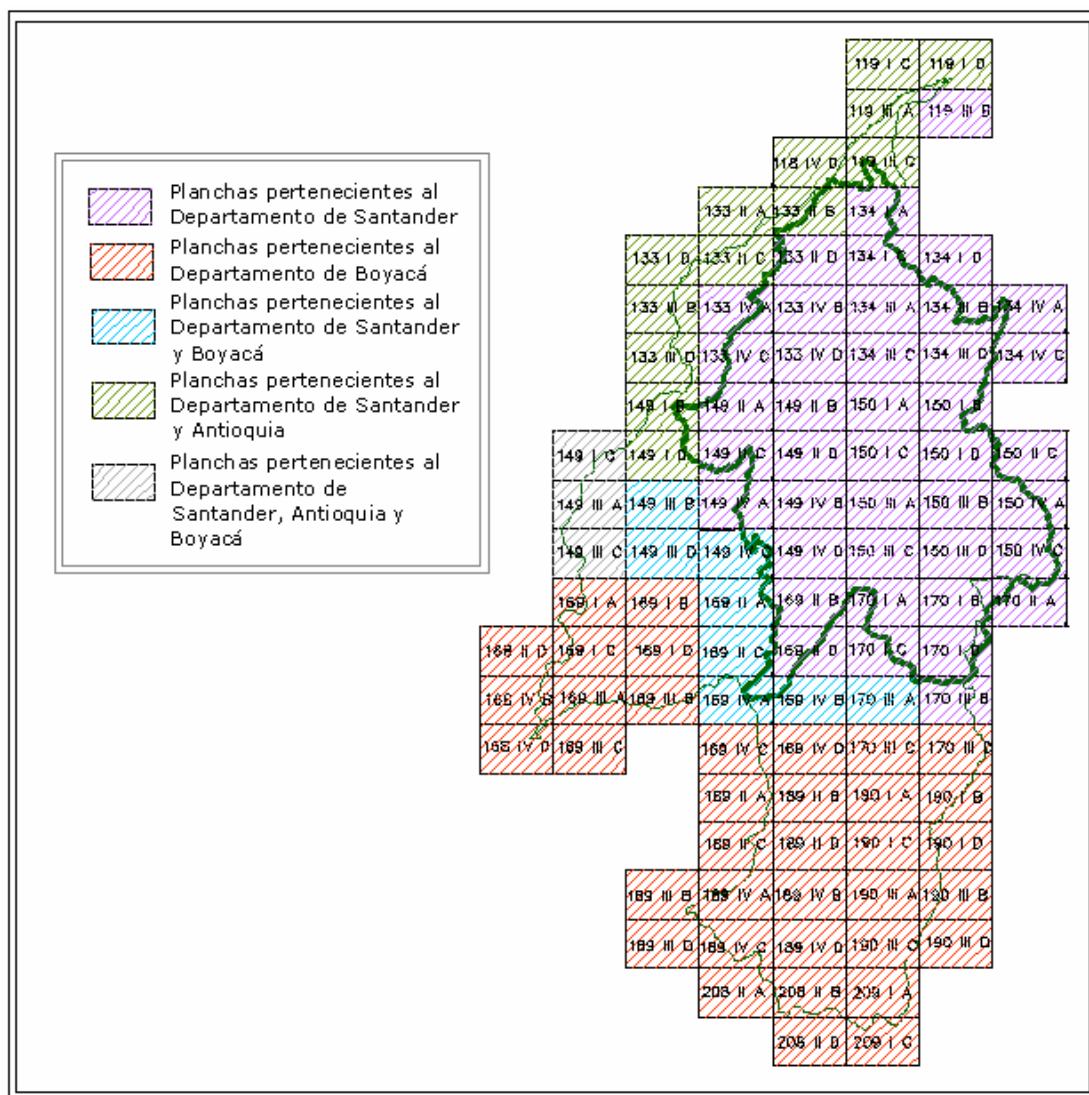


En el estudio de la cuenca del Río Carare (6) se requirieron ciento dos (102) planchas IGAC en el Departamento de Santander, Antioquia y Boyacá (ver figura 18) de acuerdo a la tabla. 3:

Tabla 3. Distribución de las planchas para la cuenca del río Carare en cuanto a localización

Localización	No. Planchas
Santander	41
Boyacá	37
Santander - Antioquia	13
Santander - Boyacá	8
Santander - Boyacá - Antioquia	3
Total	102

Figura 18. Distribución de las planchas del río Carare de acuerdo a su localización



La relación de las planchas con la información correspondiente a su localización y formato se muestra en las tablas 4 y 5 correspondientes a los ríos Opón y Carare respectivamente.

Tabla 4. Listado de las planchas IGAC con su localización y formato para la cuenca del Río Opón

Plancha No.	Departamento	Existe Formato Impreso	Plancha No.	Departamento	Existe Formato Impreso
119 I D	Sder/Antioquia	No	134 III D	Santander	Si
119 III A	Sder/Antioquia	Si	134 IV A	Santander	Si
119 III B	Santander	Si	134 IV B	Santander	Si
119 III C	Sder/Antioquia	Si	134 IV C	Santander	Si
119 III D	Santander	Si	134 IV D	Santander	Si
119 IV A	Santander	No	135 I A	Santander	No
119 IV B	Santander	Si	135 I C	Santander	No
119 IV C	Santander	Si	135 III A	Santander	Si
119 IV D	Santander	Si	135 III C	Santander	Si
120 III A	Santander	Si	150 I B	Santander	Si
120 III C	Santander	No	150 I D	Santander	Si
134 I A	Santander	Si	150 II A	Santander	Si
134 I B	Santander	Si	150 II B	Santander	Si
134 I C	Santander	Si	150 II C	Santander	Si
134 I D	Santander	Si	150 II D	Santander	Si
134 II A	Santander	Si	150 IV A	Santander	Si
134 II B	Santander	Si	150 IV B	Santander	No
134 II C	Santander	Si	150 IV C	Santander	No
134 II D	Santander	Si	150 IV D	Sder/Boyacá	Si
134 III B	Santander	Si	151 I A	Santander	No
			151 I C	Santander	No

Tabla 5. Listado de las planchas IGAC con su localización y formato para la cuenca del Río Carare

Plancha No.	Departamento	Existe Formato Impreso	Plancha No.	Departamento	Existe Formato Impreso
118 IV D	Sder/Antioquia	No	150 IV C	Santander	No
119 I C	Sder/Antioquia	No	168 II D	Boyacá	No
119 I D	Sder/Antioquia	No	168 IV B	Boyacá	No
119 III A	Sder/Antioquia	Si	168 IV D	Boyacá	No
119 III B	Santander	Si	169 I A	Boyacá	No
119 III C	Sder/Antioquia	Si	169 I B	Boyacá	No
133 I D	Sder/Antioquia	No	169 I C	Boyacá	No
133 II A	Sder/Antioquia	No	169 I D	Boyacá	No
133 II B	Sder/Antioquia	Si	169 II A	Sder/Boyacá	Si
133 II C	Sder/Antioquia	Si	169 II B	Santander	Si
133 II D	Santander	No	169 II C	Sder/Boyacá	No
133 III B	Sder/Antioquia	No	169 II D	Santander	No
133 III D	Sder/Antioquia	No	169 III A	Boyacá	No
133 IV A	Santander	Si	169 III B	Boyacá	No
133 IV B	Santander	Si	169 III C	Boyacá	No
133 IV C	Santander	Si	169 IV A	Sder/Boyacá	No
133 IV D	Santander	Si	169 IV B	Sder/Boyacá	No
134 I A	Santander	Si	169 IV C	Boyacá	No
134 I C	Santander	Si	169 IV D	Boyacá	No
134 I D	Santander	Si	170 I A	Santander	No
134 III A	Santander	Si	170 I B	Santander	Si
134 III B	Santander	Si	170 I C	Santander	No
134 III C	Santander	Si	170 I D	Santander	No
134 III D	Santander	Si	170 II A	Santander	No
134 IV A	Santander	Si	170 III A	Sder/Boyacá	No
134 IV C	Santander	Si	170 III B	Santander	No

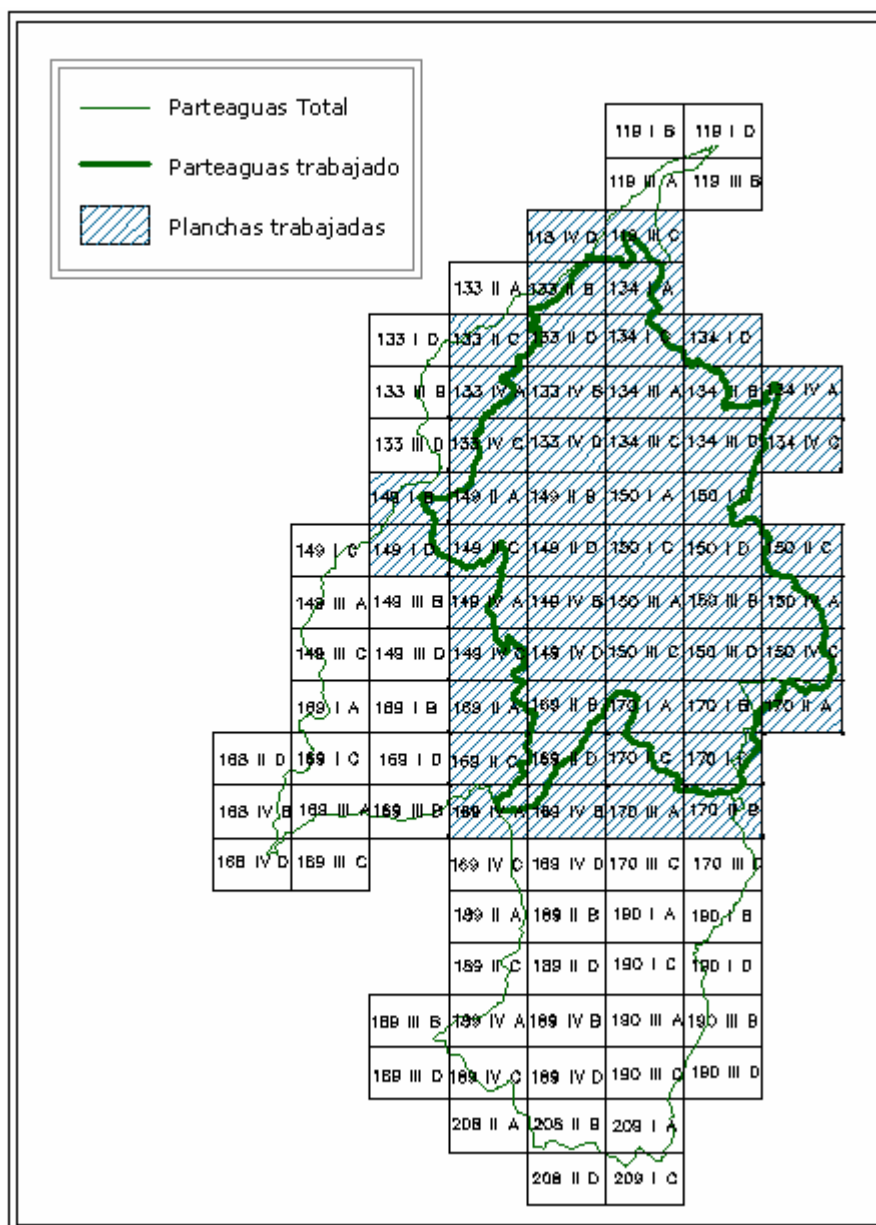
Plancha No.	Departamento	Existe Formato Impreso	Plancha No.	Departamento	Existe Formato Impreso
149 I B	Sder/Antioquia	Si	170 III C	Boyacá	No
149 I C	Sder/Antioquia/Boyacá	No	170 III D	Boyacá	No
149 I D	Sder/Antioquia	Si	189 II A	Boyacá	No
149 II A	Santander	Si	189 II B	Boyacá	No
149 II B	Santander	Si	189 II C	Boyacá	No
149 II C	Santander	Si	189 II D	Boyacá	No
149 II D	Santander	Si	189 III B	Boyacá	No
149 III A	Sder/Antioquia/Boyacá	No	189 III D	Boyacá	No
149 III B	Sder/Boyacá	No	189 IV A	Boyacá	No
149 III C	Sder/Antioquia/Boyacá	No	189 IV B	Boyacá	No
149 III D	Sder/Boyacá	No	189 IV C	Boyacá	No
149 IV A	Santander	Si	189 IV D	Boyacá	No
149 IV B	Santander	Si	190 I A	Boyacá	No
149 IV C	Sder/Boyacá	Si	190 I B	Boyacá	No
149 IV D	Santander	Si	190 I C	Boyacá	No
150 I A	Santander	Si	190 I D	Boyacá	No
150 I B	Santander	No	190 III A	Boyacá	No
150 I C	Santander	Si	190 III B	Boyacá	No
150 I D	Santander	No	190 III C	Boyacá	No
150 II C	Santander	No	190 III D	Boyacá	No
150 III A	Santander	Si	208 II A	Boyacá	No
150 III B	Santander	Si	208 II B	Boyacá	No
150 III C	Santander	Si	208 II D	Boyacá	No
150 III D	Santander	Si	209 I A	Boyacá	No
150 IV A	Santander	No	209 I C	Boyacá	No

Considerando el alcance del proyecto, la disponibilidad de información a nivel de planchas cartográficas IGAC, y teniendo en cuenta que sólo se va a estudiar la cuenca baja del Río Carare, en total se requirieron cincuenta y dos (52) planchas cartográficas (ver figura 19) distribuidas de acuerdo a la tabla 6 y la cuenca del río Opón se estudia en su totalidad.

Tabla 6. Distribución de las planchas utilizadas en la zona de estudio de la Cuenca del río Carare.

Localización	No. Planchas
Santander	40
Santander - Antioquia	6
Santander - Boyacá	6
Total	52

Figura 19. Planchas utilizadas en el estudio de la Cuenca Baja del Río Carare.



En la tabla 7 se presenta un listado de las planchas trabajadas para la zona de estudio de la cuenca del Río Carare.

Tabla 7. Listado de las planchas reales trabajadas para la zona de estudio de la Cuenca del Río Carare

Numeración	Plancha	Numeración	Plancha
1	118 IV D	27	149 IV C
2	119 III C	28	149 IV D
3	133 II B	29	150 I A
4	133 II C	30	150 I B
5	133 II D	31	150 I C
6	133 IV A	32	150 I D
7	133 IV B	33	150 II C
8	133 IV C	34	150 III A
9	133 IV D	35	150 III B
10	134 I A	36	150 III C
11	134 I C	37	150 III D
12	134 I D	38	150 IV A
13	134 III A	39	150 IV C
14	134 III B	40	169 II A
15	134 III C	41	169 II B
16	134 III D	42	169 II C
17	134 IV A	43	169 II D
18	134 IV C	44	169 IV A
19	149 I B	45	169 IV B
20	149 I D	46	170 I A
21	149 II A	47	170 I B
22	149 II B	48	170 I C
23	149 II C	49	170 I D
24	149 II D	50	170 II A
25	149 IV A	51	170 III A
26	149 IV B	52	170 III B

Las cuarenta y un (41) planchas utilizadas en el estudio de la cuenca del Río Opón todas se encontraban en formato digital y de las Cincuenta y dos (52) planchas que requiere el estudio de la cuenca baja del Río Carare, cincuenta y una (51) se encontraron en formato digital. Esta información fue suministrada por el grupo de Investigación en Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas; la plancha restante se adquirió por medio de una copia heliográfica del original del IGAC para ser digitalizada siguiendo los lineamientos de digitalización de dicho instituto y siguiendo el mismo procedimiento enunciado anteriormente (ver figura 20 y tabla 8).

Figura 20. Planchas encontradas en formato digital y planchas digitalizadas

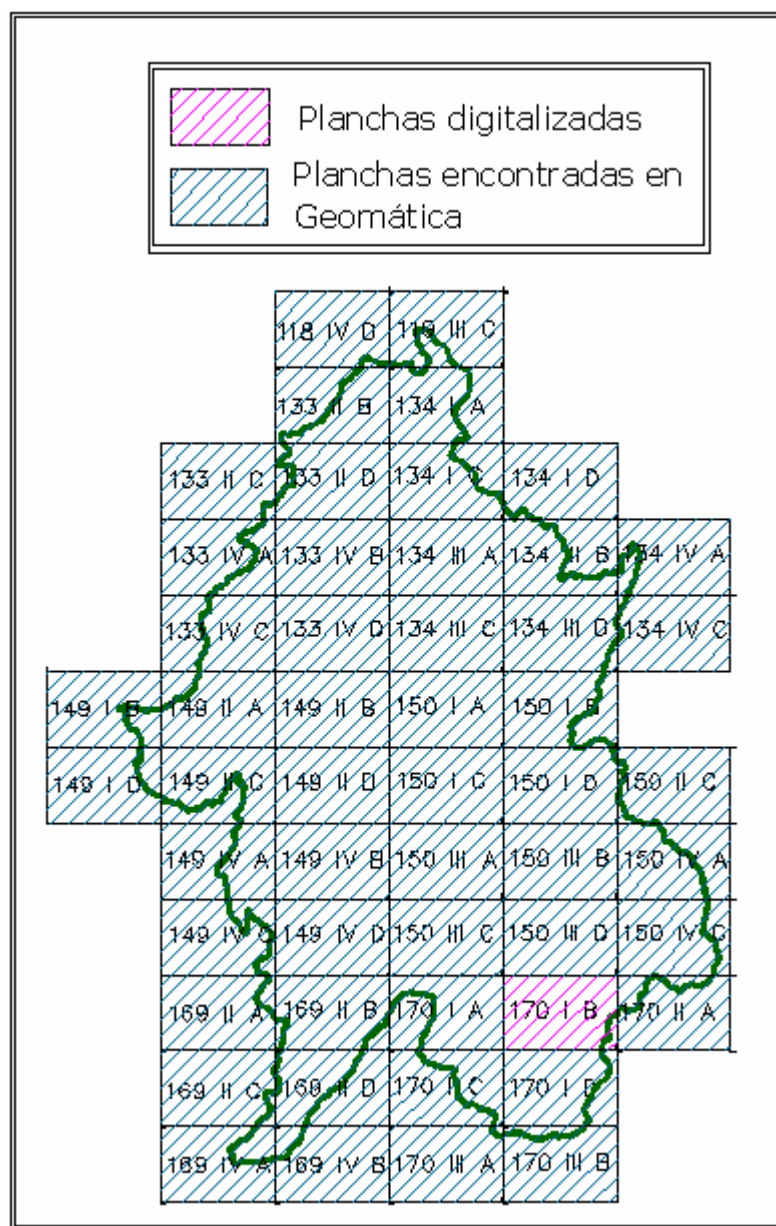


Tabla 8. Listado donde se relacionan las planchas con su fuente de adquisición

Plancha No.	Fuente	Plancha No.	Fuente
118 IV D	Geomática	149 IV C	Geomática
119 III C	Geomática	149 IV D	Geomática
133 II B	Geomática	150 I A	Geomática
133 II C	Geomática	150 I B	Geomática
133 II D	Geomática	150 I C	Geomática
133 IV A	Geomática	150 I D	Geomática
133 IV B	Geomática	150 II C	Geomática
133 IV C	Geomática	150 III A	Geomática
133 IV D	Geomática	150 III B	Geomática
134 I A	Geomática	150 III C	Geomática
134 I C	Geomática	150 III D	Geomática
134 I D	Geomática	150 IV A	Geomática
134 III A	Geomática	150 IV C	Geomática
134 III B	Geomática	169 II A	Geomática
134 III C	Geomática	169 II B	Geomática
134 III D	Geomática	169 II C	Geomática
134 IV A	Geomática	169 II D	Geomática
134 IV C	Geomática	169 IV A	Geomática
149 I B	Geomática	169 IV B	Geomática
149 I D	Geomática	170 I A	Geomática
149 II A	Geomática	170 I B	Digitalizado
149 II B	Geomática	170 I C	Geomática
149 II C	Geomática	170 I D	Geomática
149 II D	Geomática	170 II A	Geomática
149 IV A	Geomática	170 III A	Geomática
149 IV B	Geomática	170 III B	Geomática

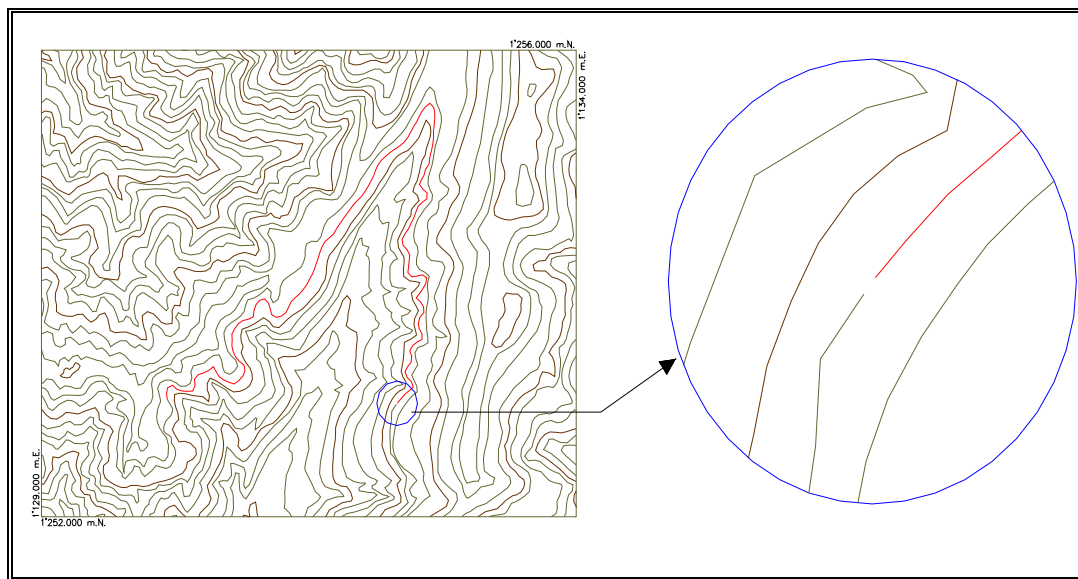
4.2 CONTROL DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

El proceso de inspección y evaluación consistía en una revisión detallada de cada uno de los elementos, es decir, se seleccionaba uno por uno y se examinaba su continuidad, correspondencia con la capa indicada según la nomenclatura avalada por el IGAC (ver anexo A) y propiedades tales como elevación, color, estilo de línea, espesor de la línea, ubicación de los textos, estilo y tamaño de texto, etc.

Considerando las bajas condiciones de calidad en que se encontraba la información y teniendo en cuenta que no cumplía con los requerimientos establecidos por el IGAC, se sometió a un proceso de depuración y mejoramiento, resumido en los siguientes ítems:

1. Si el elemento seleccionado no era continuo a lo largo de la plancha, con la ayuda de un comando que permite la edición y unión de líneas se procedía a pegar las partes, al ejecutar este comando se podían presentar dos situaciones, primero, que se pegaran las líneas y segundo que se diera el caso contrario. Esto último se podía presentar por dos causas.
- Caso 1: Cuando los extremos de las líneas no coincidían en un nodo (ver figura 21).

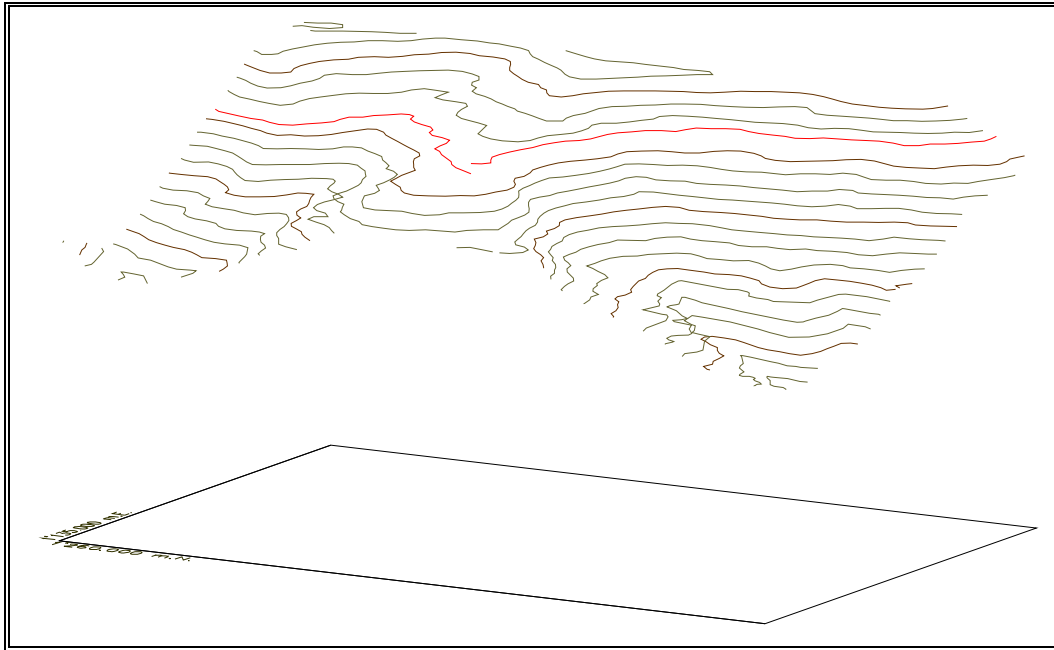
Figura 21. Curva de nivel no continua, a la izquierda se observa resaltada la curva de nivel y a la derecha el detalle del motivo por el cual no se ejecutaría correctamente el comando.



Tomado de la plancha 121-III-A

- Caso 2: Cuando las elevaciones de los elementos a unir son diferentes (ver figura 22).

Figura 22. Curva de nivel no continua. Los elementos resaltados muestran la diferencia de nivel, motivo por el cual no se ejecutaría correctamente el comando



2. Cuando el nodo final de un elemento no coincidía con el nodo del elemento al cual debería llegar. Por ejemplo, un río drenando a otro como en los casos de las figuras 23 y 24, se debía usar un comando que permitiera extender o acortar la línea de tal forma que se lograra la coincidencia de los nodos. En la figura 23 se observa que el extremo del elemento no llega al nodo del elemento al que debería llegar y en la figura 24 el nodo final se pasa del nodo. Este caso se puede presentar además en caminos, carreteras y coordenadas.

Figura 23. Nodo final de la línea que no coincide con el nodo al que debería llegar, a la izquierda se muestra el problema y a la derecha el detalle de este

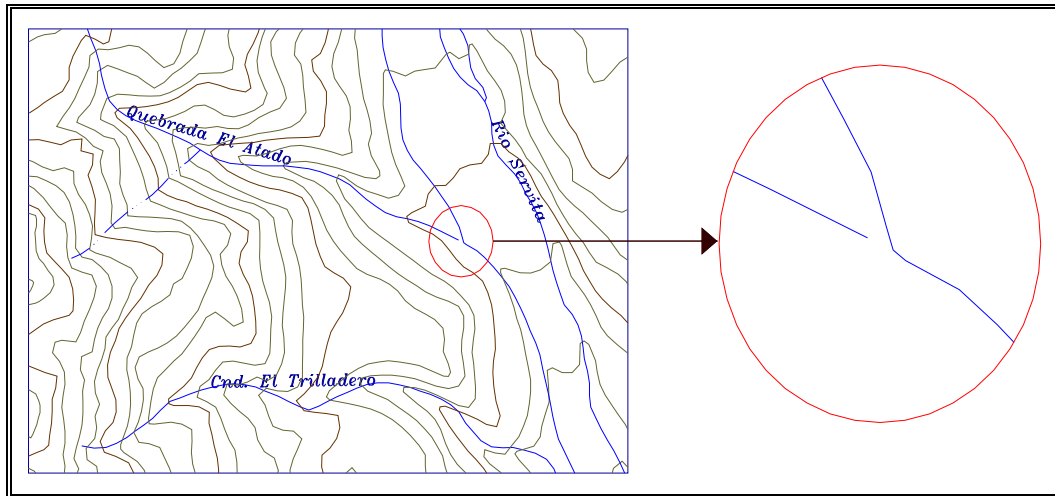
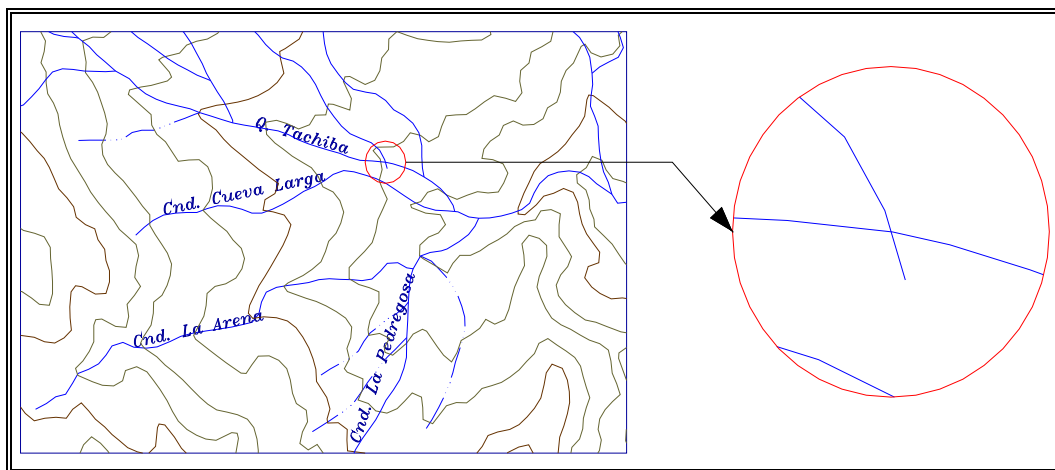


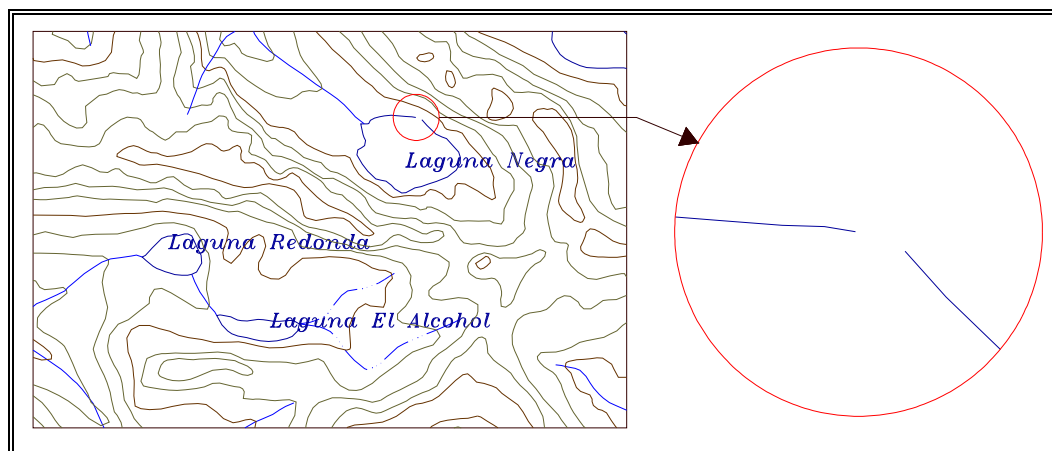
Figura 24. Nodo final de la línea que se pasa del nodo al que debería llegar. A la izquierda se muestra el problema y a la derecha el detalle de este



3. Cuando los elementos cerrados que denotaban áreas como lagunas, lagos, ciénagas, islas, áreas de inundación, bancos de arena, curvas

de nivel, etc. no constituían un polígono sino una línea esta se debía cerrar para que lo fuera (ver figura 25).

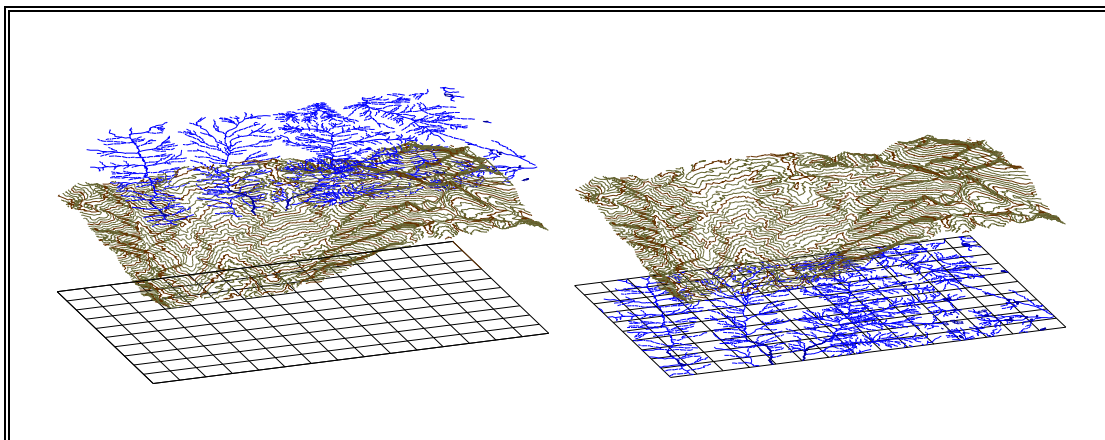
Figura 25. Ejemplo de una laguna que no es un polígono cerrado.



Tomado de la plancha 152-III-C

4. Atendiendo a los lineamientos de digitalización los únicos elementos que deben tener la propiedad de elevación son las curvas de nivel, por tal motivo, se debían revisar cada uno de los elementos cartográficos para comprobar que tuvieran elevación cero. Así mismo las curvas de nivel debían obedecer a una secuencia lógica en cuanto a elevación considerando que debían presentarse cada 50 m según la escala en que se trabaja (ver figura 26).

Figura 26. Ejemplo donde otros elementos diferentes de las curvas de nivel tenían elevación.



Tomado de la plancha 121-I-D

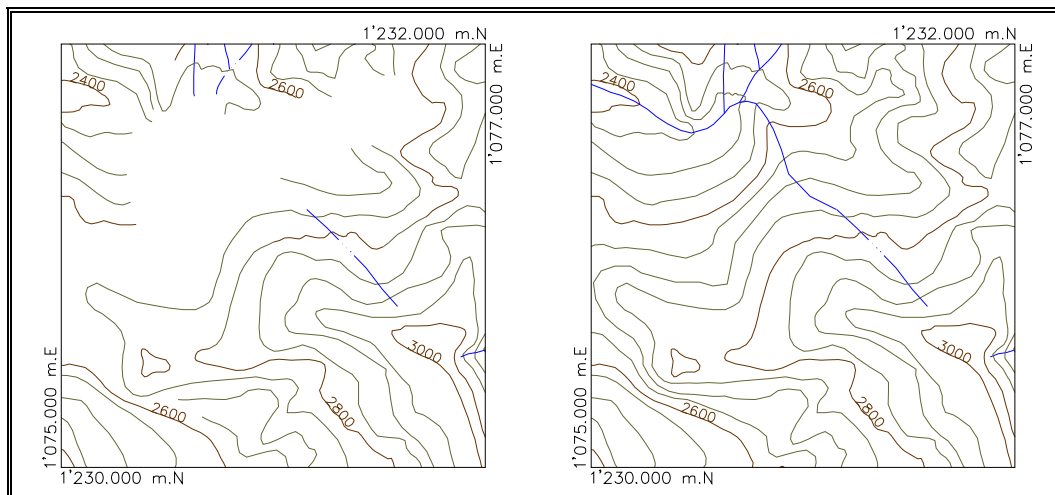
Con ayuda de la plancha en formato impreso se verifica que toda la información presente en esta se encuentre en el formato digital, si no debe insertarse todo lo que haga falta. Los elementos que comúnmente hacían falta en las planchas cartográficas eran las casas, caseríos, veredas, municipios, nombres de estos, textos de carreteras, elementos hipsográficos como lomas y picos y textos de las curvas de nivel.

En cada plancha cartográfica se revisaron en promedio 1000 elementos, logrando así en la mayoría de estas un nivel de calidad apropiado para el desarrollo del presente trabajo. Sin embargo existían algunas donde la falta de información en formato impreso no permitía garantizar la veracidad de los elementos contenidos en el formato digital y en otros casos la escasez de información a causa de una nube hacía casi imposible trabajar con ella.

La presencia de una nube en una plancha cartográfica surge en una de las etapas del proceso cartográfico adelantado por el IGAC para elaborar la carta del territorio nacional. Esta etapa se conoce como restitución o elaboración del mapa a partir de la fotografía aérea. En algunas ocasiones suele suceder que ésta no cumple con las normas técnicas o que en el momento de la toma de la fotografía, las condiciones climáticas no hayan sido las más favorables y existan zonas que no tuvieran la suficiente visibilidad dando lugar a las nubes presentes en las planchas convencionales. Cuando esto sucede, es necesario realizar una evaluación crítica de la información existente, realizar un análisis de todos los elementos vecinos y determinar cuáles y cuántos elementos cartográficos no son continuos en el área de interés con el fin de iniciar un proceso de restauración de los mismos, garantizando su continuidad. De esta forma las curvas de nivel, los drenajes y demás elementos de importancia son reconstruidos en la zona de la nube de manera lógica y secuencial.

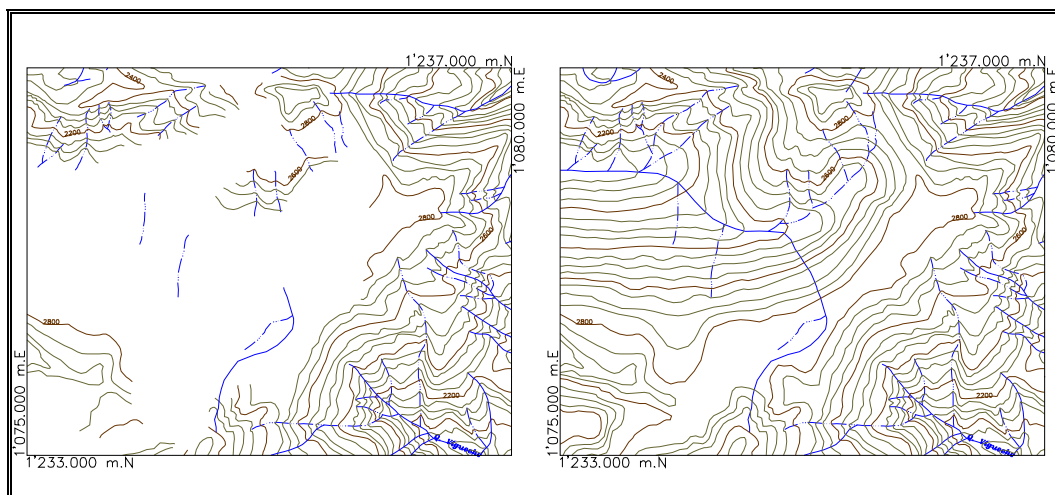
En algunas planchas involucradas en la zona de estudio se presentan problemas con nubes de gran extensión, lo cual impide la restauración total de la información. La necesidad de manejar la información cartográfica lo mas completa posible para efectos de este proyecto, implica tomar la decisión de restituir y reconstruir las zonas con un grado de complejidad bajo. (Ver figura 27 y 28).

Figura 27. Ejemplo de Reconstrucción de la Información Cartográfica.



Tomada de la plancha 135-I-B

Figura 28. Ejemplo de Restitución de la Información Cartográfica.



Tomada de la plancha 135-I-B

En la tabla 9 se muestran las planchas que presentaron nubes en la cuenca del río Opón, el porcentaje de ellas y el porcentaje de restitución con respecto al área total de la plancha que es 150 Km².

Tabla 9. Planchas con restitución cartográfica en la zona de estudio de la Cuenca del Río Opón.

Plancha	Porcentaje nubes (%)	Porcentaje restituido (%)
120 III A	3.39	3.39
120 III C	5.67	5.67
134 I D	47.2	47.2
134 II B	1.35	1.35
134 IV B	13.15	13.15
134 IV C	2.97	2.97
134 IV D	1.56	1.56
135 I A	14.25	14.25
150 I B	10.73	10.73
150 I D	0.67	0.67
150 II A	2.19	2.19
150 II B	3.18	3.18
150 IV A	1.45	1.45

En la tabla 10 se muestran las planchas que presentaron nubes en la cuenca del río Carare, el porcentaje de ellas y el porcentaje de restitución con respecto al área total de la plancha que es 150 Km².

Tabla 10. Planchas con restitución cartográfica en la zona de estudio de la Cuenca del Río Carare.

Plancha	Porcentaje nubes (%)	Porcentaje restituido (%)
149 IV B	3.03	3.03
149 IV C	1.27	1.27
150 III A	3.96	3.96
150 III C	14.98	14.98
150 III D	5.64	5.64
169 II D	1.47	1.47
169 IV A	14.73	14.73
170 I A	15.31	15.31
170 I B	20.91	20.91

Terminado el proceso de revisión y restitución de las planchas que presentaban discontinuidades en su topografía (incluidas aquellas en las que no se pudo restituir ninguna nube y en las que la restitución fue parcial), se procede a evaluar la calidad de las mismas. Debido a que las planchas IGAC pueden ser utilizadas en diferentes proyectos de ingeniería y dependiendo de la cantidad y calidad (referido a calidad en cuanto al porcentaje de nubes restituidas), estas planchas pueden ser importantes en determinados estudios. Es por ello que se ha tomado la decisión que el usuario que acceda a la información consignada en las planchas es quien determine la calidad de las mismas, en otras palabras, por citar un ejemplo, si una determinada plancha sólo tiene la topografía del lugar incluyendo los ríos, sin tener digitalizados los caminos, la plancha en mención será de una calidad excelente en cuanto a estudios de tipo hídricos e hidráulicos. Sin embargo en cuanto a estudios viales, será de una calidad reprobable ya que no va a existir georeferenciación ni forma de continuar una carretera ni están las vías en el plano. Teniendo en cuenta lo anterior, se decide establecer un indicativo en el que se evalúe el estado de la información para cada una de las capas de la versión digital con respecto a la versión en papel. Para ello, existen cuatro niveles en los que se puede clasificar la información:

- La información se encuentra totalmente digitalizada con respecto a la versión en papel.
- La información se encuentra parcialmente digitalizada con respecto a la versión en papel.
- La información no se encuentra digitalizada con respecto a la versión en papel.

- La información no se encuentra en la versión en papel.

4.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El procesamiento de la información constituye una de las etapas fundamentales en el desarrollo de la metodología de trabajo. Su objeto consiste en adaptar y organizar la información con el fin de facilitar los procesos de manejo y manipulación de la misma.

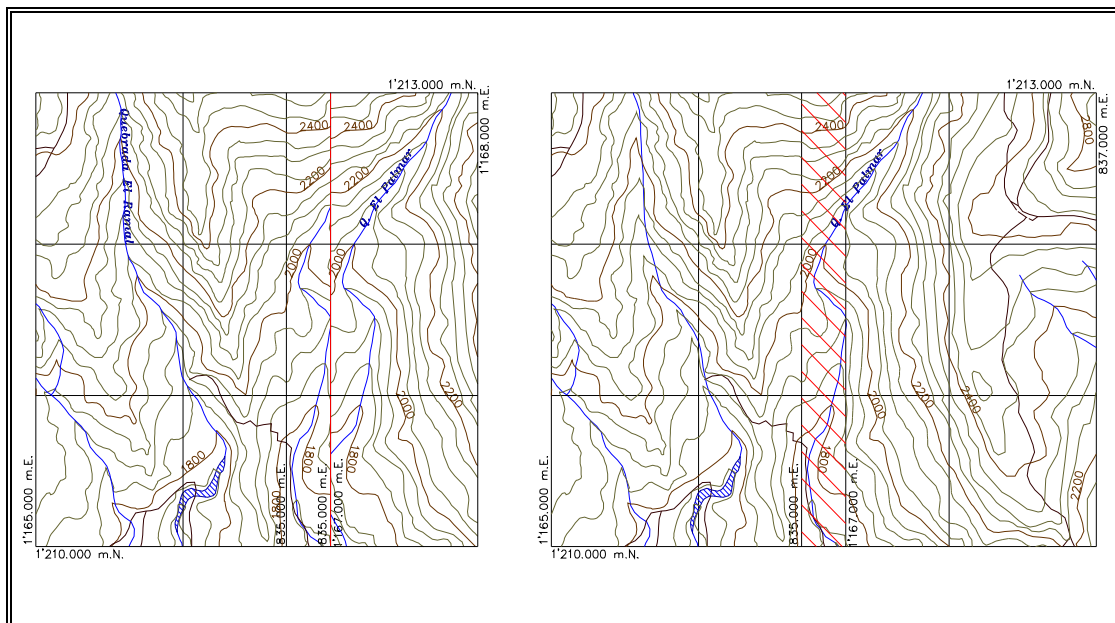
A continuación se describe de manera particular cada una de las etapas de adecuación de la información con el fin de realizar un procesamiento óptimo de esta y adaptarla a la estructura de datos necesaria para la visualización de la misma (ver más en el capítulo 6).

4.3.1 Unión de planos. Finalizados los procesos de revisión, organización, comprobación y corrección de los elementos cartográficos representados en las planchas, se deben colocar los planos contiguos y verificar los empalmes con los adyacentes detallando la continuidad de elementos tales como, curvas de nivel, drenajes, caminos, vías, límites municipales, departamentales, consistencia en las coordenadas, en los valores de acotamiento de las curvas de nivel y demás elementos representados en las planchas. En caso de que existan dos elementos que no coincidan en el empalme, estos deben ser modificados moviendo sus extremos hasta hacerlos coincidir. A continuación se ilustran las diferentes situaciones que se presentaron en el momento de unir los planos y como fueron solucionados.

- Caso 1: Cuando las coordenadas no coinciden

En algunas planchas, especialmente cuando éstas no pertenecían al departamento de Santander, se encontró un problema de coordenadas al unir los planos. Por ejemplo, la cartografía básica de Boyacá, tiene una coordenada en el Este diferente a la que tienen las planchas de Santander, por lo tanto, al unir los planos no siempre coincidían en el empalme (línea roja). Las planchas de Santander involucradas presentaban una línea con la coordenada de las planchas de Boyacá, haciendo referencia que desde allí los elementos coincidían. Se tomó entonces la decisión de superponer las planchas en una coordenada específica y en esa zona (achurada) hacer los elementos coincidir, mover los puntos de las líneas hasta hacerlos continuos totalmente. (Ver figura 29).

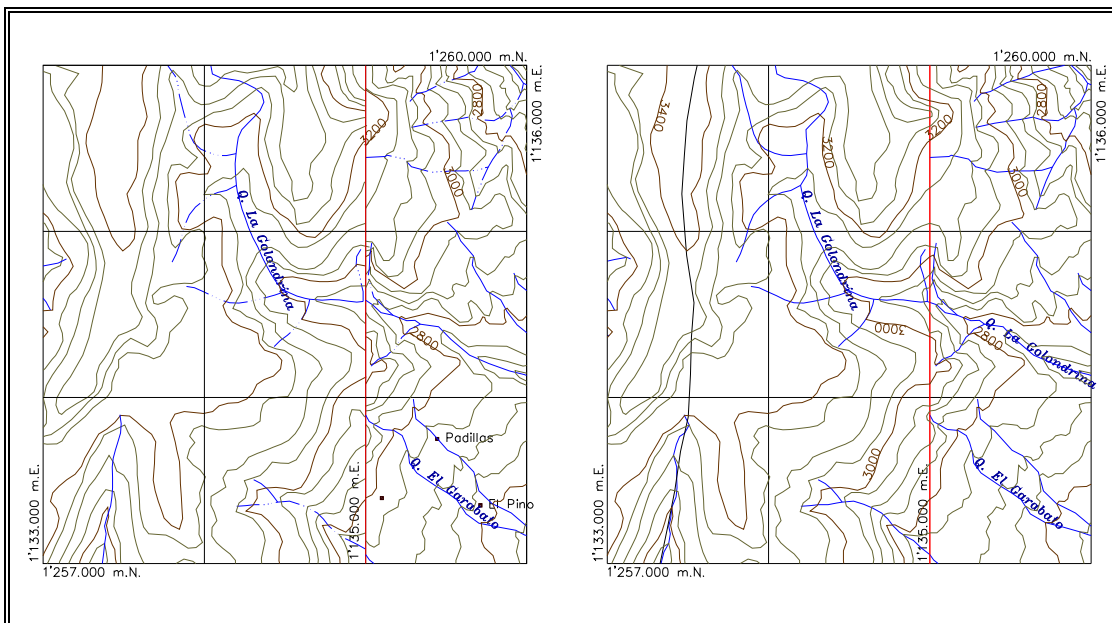
Figura 29. Ejemplo caso 1: unión de los planos 136-IV-A y 137-III-B. A la izquierda se observa que en el empalme (línea roja) los elementos no coinciden y a la derecha la solución por la que se optó para hacer coincidir los elementos



- Caso 2: Cuando los elementos no coinciden

En el momento de unir las planchas, elementos como curvas de nivel, drenajes, vías no coinciden. En el empalme deben moverse los puntos extremos hasta hacerlos coincidir, con el criterio de la continuidad lógica de los elementos. (Ver figura 30).

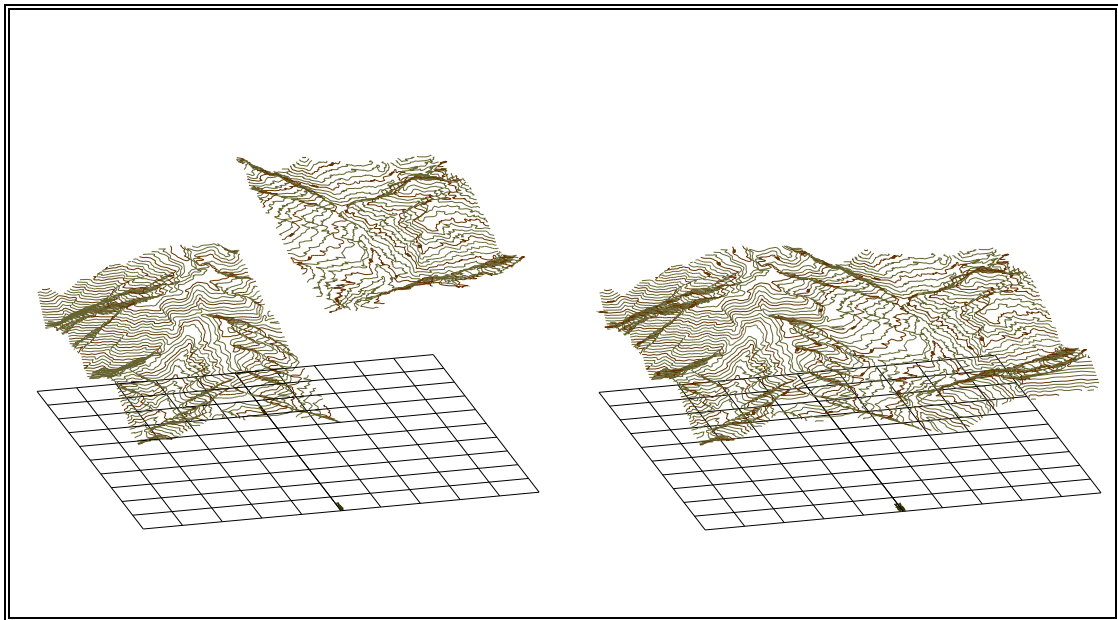
Figura 30. Ejemplo Caso 2: Unión de las planchas 121-III-A y 121-III-B. A la izquierda se visualiza que los elementos no coinciden y a la derecha la solución que se dio



- Caso 3: Este caso se presenta cuando las elevaciones de los elementos no coinciden en el empalme de las planchas. Esto sucede por dos motivos: primero cuando las elevaciones de los elementos son erróneas y segundo cuando por errores de digitalización se han desplazado todos los elementos por no establecer el nivel de referencia en las coordenadas (0, 0, 0) sino que se le ha dado un valor a la coordenada en Z. Para dar solución al

primer caso, debe hacerse una inspección de todas las planchas contiguas para conocer la verdadera elevación de los elementos y después si proceder a unirlas y para el segundo caso, toda la información debe desplazarse al nivel de referencia correcto. En la figura 31 se muestra un ejemplo del último caso para curvas de nivel.

Figura 31. Ejemplo Caso 3: Unión las planchas 121-III-A y 121-III-B. A la izquierda se observa que existe un desfase en la elevación de las curvas de nivel en el empalme de las planchas y a la derecha las curvas de nivel empalmadas después de desplazarlas a la elevación correcta



Una vez realizadas las modificaciones pertinentes, se inicia la unión de los elementos garantizando así su continuidad.

Finalizada la etapa de unión de los planos se procede a la nomenclatura y estandarización de la información, el archivo que contiene las planchas

unidas que conforman la cuenca principal del Río Opón lleva por nombre 050000.dwg, y el que conforma la cuenca principal del Río Carare lleva por nombre 060000.dwg, en éstos códigos los dos primeros dígitos corresponden al número de la cuenca en el departamento de Santander (ver figura 32). Estos dígitos identificarán todos los archivos derivados de la cuenca principal. Los elementos cartográficos presentes en el archivo de la cuenca principal están representados en las capas correspondientes de acuerdo con la nomenclatura y tablas de distribución de capas establecidas por el IGAC (ver anexo A). Adicionalmente se crearon nuevas capas que permiten la identificación de las planchas y las zonas que fueron restituidas:

- Nubes: contiene la polilínea cerrada del área restituida de la plancha.
- Planchas: contiene el texto y el marco de las planchas asociadas.

La nomenclatura de los archivos de las planchas en formato digital siguen el mismo patrón de la nomenclatura del IGAC de la siguiente forma: la plancha 170-I-A se denomina 170-I-A.dwg. La información presente en las planchas cartográficas está representada en las capas con la nomenclatura avalada por el IGAC. Al igual que en el archivo de la cuenca principal se hizo necesario adicionar la capa nubes y una capa identificada como nombre que contenía la nomenclatura de la plancha, por ejemplo 170-I-B

Figura 32. Codificación de las cuencas principales del departamento de Santander



5.3.2 División hidrológica de la cuenca. El trazado preliminar del parteaguas de una cuenca consiste en un proceso visual que delimita la cuenca a partir de los puntos de mayor elevación y de la red de drenaje. La división hidrológica aplicada a este proyecto obedece a la metodología de

Horton y se desarrolla en tres partes teniendo en cuenta la gran extensión de la cuenca principal y la necesidad de hacer más específico el estudio:

- El trazado de la cuenca principal limitado por el área geográfica del departamento de Santander.
- El trazado de cuencas de primera división correspondientes a los afluentes del cauce principal y en algunos casos a secciones del tramo principal (Ríos Opón y Carare).
- El trazado de cuencas de segunda división correspondientes a los afluentes de las cuencas de primera división teniendo que en la gran mayoría de los casos se hace necesario la subdivisión por la extensión de la cuenca o por las características de la red de drenaje.

En casos particulares, cuando las cuencas de primera división no poseen subdivisiones, se asume como cuenca de segunda división la misma cuenca.

Siguiendo el proceso descrito anteriormente se obtiene lo siguiente: cuenca principal, y cuencas de primera y de segunda división, como se muestra en la tabla 11 para la cuenca del río Opón y en la tabla 12 para la cuenca del Río Carare:

Tabla 11. Listado donde se mencionan las cuencas de primera y segunda división de la cuenca del Río Opón.

CUENCA RÍO OPÓN	
PRIMERA DIVISIÓN	SEGUNDA DIVISIÓN
Río Dibita	Quebrada Chucureña Quebrada Aurora Quebrada El Oso
Río Opón	Quebrada Colorada Quebrada La Campana Río La Verde Río Opón Bajo
Río Cascajales	Quebrada Playitas Quebrada la Sardina Quebrada Villaquirá
Río Colorada	Quebrada Agua Clara Caño Babillo Río Colorada Medio Quebrada la Mugrosa
Río Oponcito	Quebrada El Consuelo Quebrada La India Caño Arenoso
Río Oponcito Alto	Río Manso Quebrada las Flores
Río Fuego	Caño Inesita Caño el Santuario
Río Sucio	Quebrada Bolales Quebrada del Salto Caño los Cauchos
Quebrada Negra de Armas	Quebrada la Pava Quebrada Bombal
Río Quiratá	Quebrada del Pedregal Quebrada la Merinaque Quebrada la Hermosura
Río Blanco	Río Blanco Alto Río Blanco Medio Quebrada Larga
Río Vergelano	Río Honduras Río Vergelano Alto Quebrada la Azufrada Quebrada la Honda

Tabla 12. Listado donde se mencionan las cuencas de primera y segunda división de la cuenca del Río Carare.

CUENCA RÍO CARARE	
PRIMERA DIVISIÓN	SEGUNDA DIVISIÓN
Río Carare	Quebrada la Corcovada Quebrada la Chisposa Caño la Guinea Quebrada la Torova Quebrada la Parra
Río San Juan	Río San Juancito Caño Cocuy
Río Guayabito	Quebrada la Grande Quebrada Santa Inés Quebrada la Natividad
Río Oponcito	Quebrada la Perdida Quebrada Amarilla Quebrada Campo Escondido
Río Horta	Quebrada la Luja Río Negro Quebrada la Ballena Quebrada el Muerto
Río Blanco	Río la Pradera Río la Granja Quebrada San Cristóbal Río Blanco Bajo
Quebrada El Aventadero	Quebrada García Quebrada de Juana Quebrada Grande
Río Minero	Quebrada San Antonio Quebrada Campo Obando Quebrada la Guinea Quebrada la Clavellina

Trazados e identificados los parteaguas principal, primera y segunda división, se hace necesaria la codificación de cada una de los archivos en formato dwg que contienen las cuencas. A la cuenca principal del Río Opón le corresponde el código 050000 y a la cuenca principal del Río Carare le corresponde el código 060000. Las cuencas de primera división se identifican por los dos segundos dígitos del código, estos van desde el 050100 hasta el 051200 para la cuenca del Río Opón y desde el 060100 hasta el 060800 para

la cuenca del Río Carare. Identificadas las primeras divisiones, si fue necesaria su discretización; se codifican las segundas divisiones con los dos últimos dígitos. En las tablas 13 y 14 se presentan los nombres de las divisiones con sus respectivos códigos para las cuencas de los Ríos Opón y Carare respectivamente:

Tabla 13. Codificación de la primera y segunda división de la cuenca del Río Opón.

CODIGO CUENCA			NOMBRE DE LA CUENCA
PRINCIPAL	PRIMERA DIV.	SEGUNDA DIV.	
050000			Río Opón
	050100	050101 050102 050103	Río Dibita Quebrada Chucureña Quebrada Aurora Quebrada El Oso
	050200	050201 050202 050203 050204	Río Opón Quebrada Colorada Quebrada La Campana Río La Verde Río Opón Bajo
	050300	050301 050302 050303	Río Cascajales Quebrada Playitas Quebrada la Sardina Quebrada Villaquirá
	050400	050401 050402 050403 050404	Río Colorada Quebrada Agua Clara Caño Babillo Río Colorada Medio Quebrada la Mugrosa
	050500	050501 050502 050503	Río Oponcito Quebrada El Consuelo Quebrada La India Caño Arenoso
	050600	050601 050602	Río Oponcito Alto Río Manso Quebrada las Flores
	050700	050701 050702	Río Fuego Caño Inesita Caño el Santuario
	050800	050801 050802 050803	Río Sucio Quebrada Bolales Quebrada del Salto Caño los Cauchos
	050900	050901 050902	Quebrada Negra de Armas Quebrada la Pava Quebrada Bombal
	051000	051001 051002 051003	Río Quiratá Quebrada del Pedregal Quebrada la Merinaque Quebrada la Hermosura
	051100	051101 051102 051103	Río Blanco Río Blanco Alto Río Blanco Medio Quebrada Larga
	051200	051201 051202 051203 051204	Río Vergelano Río Honduras Río Vergelano Alto Quebrada la Azufrada Quebrada la Honda

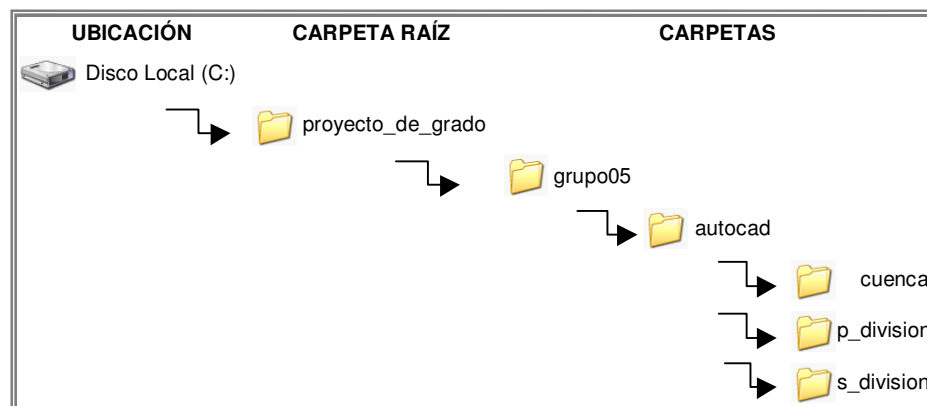
Tabla 14. Codificación de la primera y segunda división de la cuenca del Río Carare.

CODIGO CUENCA			NOMBRE DE LA CUENCA
PRINCIPAL	PRIMERA DIV.	SEGUNDA DIV.	
60000			Río Carare
	60100	60101 60102 60103 60104 60105	Río Carare Quebrada la Corcovada Quebrada la Chisposa Caño la Guinea Quebrada la Torova Quebrada la Parra
	60200	60201 60202	Río San Juan Río San Juancito Caño Cocuy
	60300	60301 60302 60303	Río Guayabito Quebrada la Grande Quebrada Santa Inés Quebrada la Natividad
	60400	60401 60402 60403	Río Oponcito Quebrada la Perdida Quebrada Amarilla Quebrada Campo Escondido
	60500	60501 60502 60503 60504	Río Horta Quebrada la Luja Río Negro Quebrada la Ballena Quebrada el Muerto
	60600	60601 60602 60603 60604	Río Blanco Río la Pradera Río la Granja Quebrada San Cristóbal Río Blanco Bajo
	60700	60701 60702 60703	Quebrada El Aventadero Quebrada García Quebrada de Juana Quebrada Grande
	60800	60801 60802 60803 60804	Río Minero Quebrada San Antonio Quebrada Campo Obando Quebrada la Guinea Quebrada la Clavellina

En la presentación de los archivos dwg de las cuencas de primera y segunda división no solo se muestra el área subsidiaria demarcada por el parteaguas sino que además se visualiza una extensión con el objeto de cuestionar la delimitación efectuada. Para cumplir con este propósito se realiza un corte de forma rectangular donde se mantienen las capas que contengan elementos cartográficos y la información necesaria para localizar la cuenca. Se debe tener en cuenta que los archivos de primera división pueden tener adicionalmente una capa que corresponde al parteaguas de segunda división, en caso de haber sido necesaria la discretización.

Debido al gran numero de cuencas de primera y segunda división que surgían al realizar el proceso de división hidrológica de una cuenca principal se vio la necesidad de organizar esta información en una estructura de datos apropiada para su posterior visualización y publicación (ver más capítulo 6) como se muestra en la figura 33.

Figura 33. Esquema de la organización de los archivos de AutoCAD

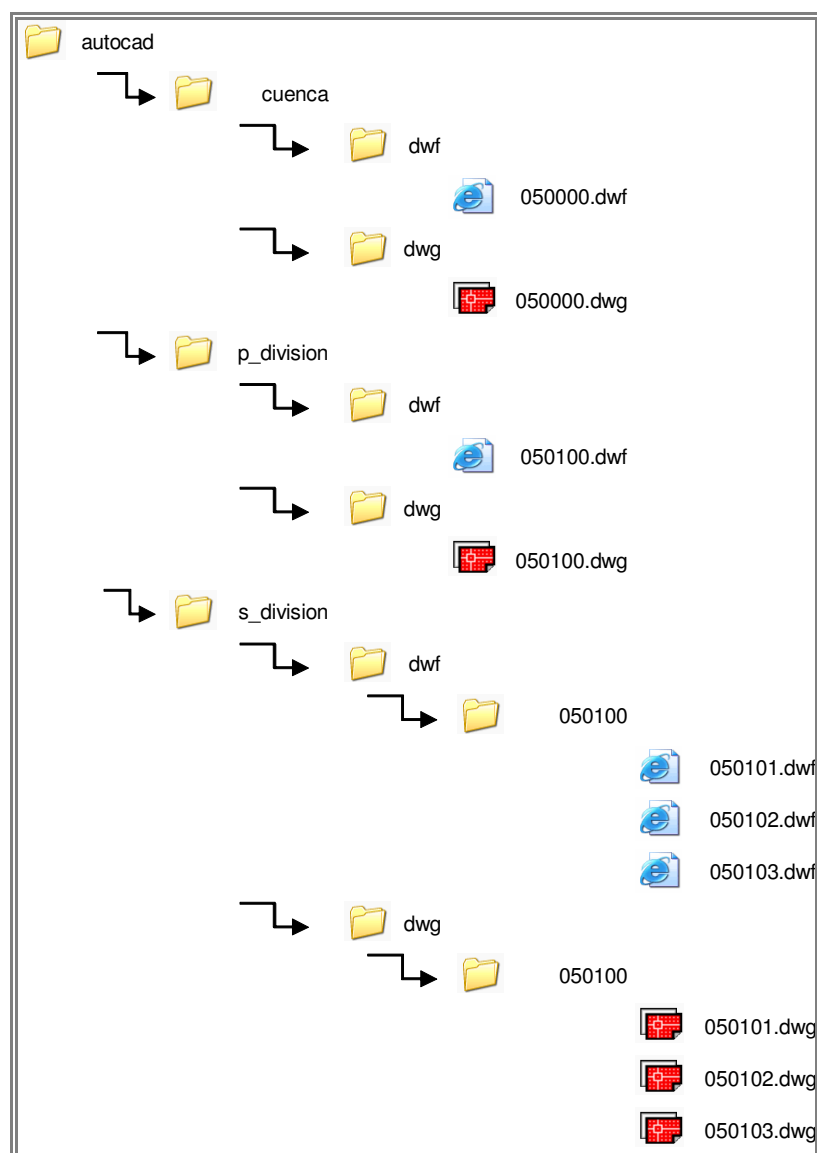


Las carpetas cuenca, p_division y s_division dentro de la carpeta autocad, contienen los archivos de cuenca principal, y los archivos de las cuencas de

primera y segunda división respectivamente. Dentro de cada una de ellas existen otras dos carpetas identificadas como dwf y edit. En la primera se encuentran los archivos que sólo permiten la visualización e impresión de la información y en la segunda se encuentran los archivos editables de AutoCAD. En la figura 34 se muestra la estructura para la organización de estos archivos.

Para las cuencas de segunda división debió crearse un nivel adicional de carpetas que mostraba las cuencas de primera división a las cuales pertenecían para lograr una mejor organización, como se muestra en el ejemplo de la figura 34 para la cuenca 050101.

Figura 34. Estructura de la organización de los archivos dwf y dwg



4.3.3 Preparación de archivos para el software. Los archivos en formato dwg de las cuencas contienen toda la información cartográfica presente en una plancha IGAC. Considerando que no toda esta información era necesaria para desarrollar una aplicación en hidrología con ayuda de un software, en este caso ArcView; se requería segregar la información básica para tal fin,

como son curvas de nivel, ríos, parteaguas y puntos altos de la red de drenaje. Esta información debía ser guardada en archivos separados y traducida a un formato que pudiera ser asimilado por ArcView. Para la versión del software con la que se trabajó la aplicación, el formato que se debía utilizar para los archivos era autoCAD R14 / DXF (*.dxf), ya que permitía un fácil reconocimiento de las entidades geográficas como puntos, líneas y polígonos y una visualización adecuada en el entorno gráfico de ArcView.

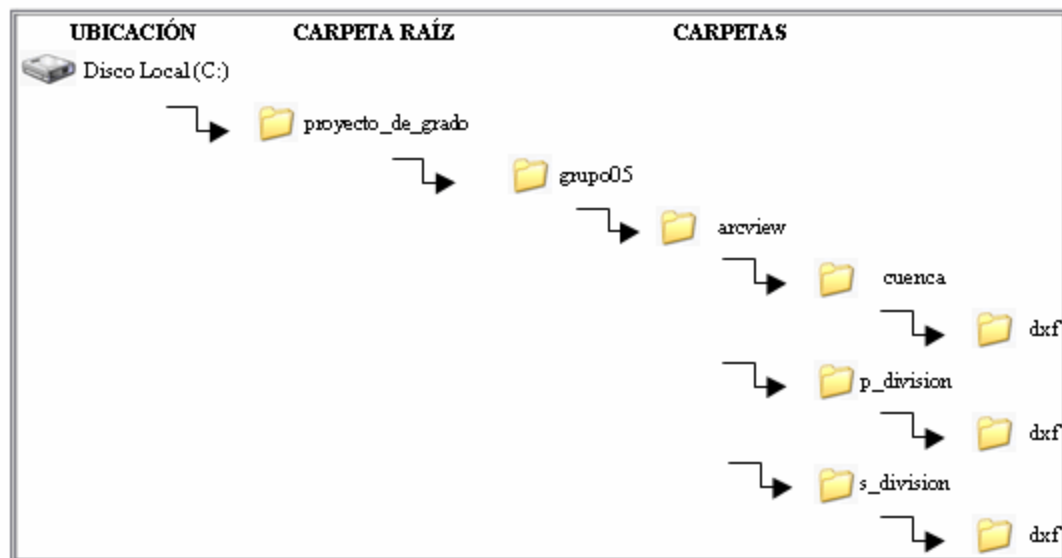
Sabiendo que el formato dxf (Drawing Exchange Format) es el más conveniente para introducir información proveniente de AutoCAD a ArcView y conociendo claramente los resultados que se querían obtener para las cuencas de primera y segunda división, se podían definir cuáles eran los archivos necesarios para el desarrollo de la aplicación en cada una de ellas. Por ejemplo, para la cuenca principal y las cuencas de primera división el resultado que se deseaba obtener era su visualización con la respectiva red de drenaje sobre un MDE en formato raster; para ello sólo se hacía necesario crear los archivos individuales dxf de curvas de nivel, drenajes y parteaguas.

Para las cuencas de segunda división se desarrolló la caracterización física de la cuenca hidrográfica con la ayuda de un Script para ArcView. La información requerida era la misma que se utilizaba para el modelamiento de la primera división y adicionalmente se debía crear un archivo que tuviera los puntos altos de cada uno de los elementos que conformaban la red de drenaje para poder realizar uno de los pasos del procedimiento expuesto en el numeral 4.3.4. En la construcción de cada uno de los archivos dxf nombrados anteriormente, la información contenida en ellos debía ser la estrictamente necesaria, ya que podían presentarse los siguientes inconvenientes: un tamaño exagerado del archivo y la combinación de dos

tipos de información no permitía ejecutar correctamente uno de los pasos del procedimiento (ver más información en el numeral...4.3.4...). Así por ejemplo, si se deseaba hacer el archivo dxf para las curvas de nivel, este sólo debía presentar los elementos cartográficos que tengan como atributo la elevación.

Al igual que para los archivos en formato dwg y dwf, se creó una estructura para que pudiera ser manipulada la información fácilmente. Para los archivos dxf también se vio la necesidad de hacerlo. En el esquema de la figura 35 se muestra la organización de las carpetas en las cuales va la información en formato dxf.

Figura 35. Esquema de la organización de los archivos



En las carpetas cuenca, p_division y s_division se copió un archivo ejecutable *.apr que es la extensión que utiliza ArcView para guardar los proyectos y se crearon dos carpetas identificadas con los nombres: shp y dxf. La primera de estas se creó con el fin de guardar información con la cual trabaja ArcView ya que es el formato que permite tanto la visualización de la

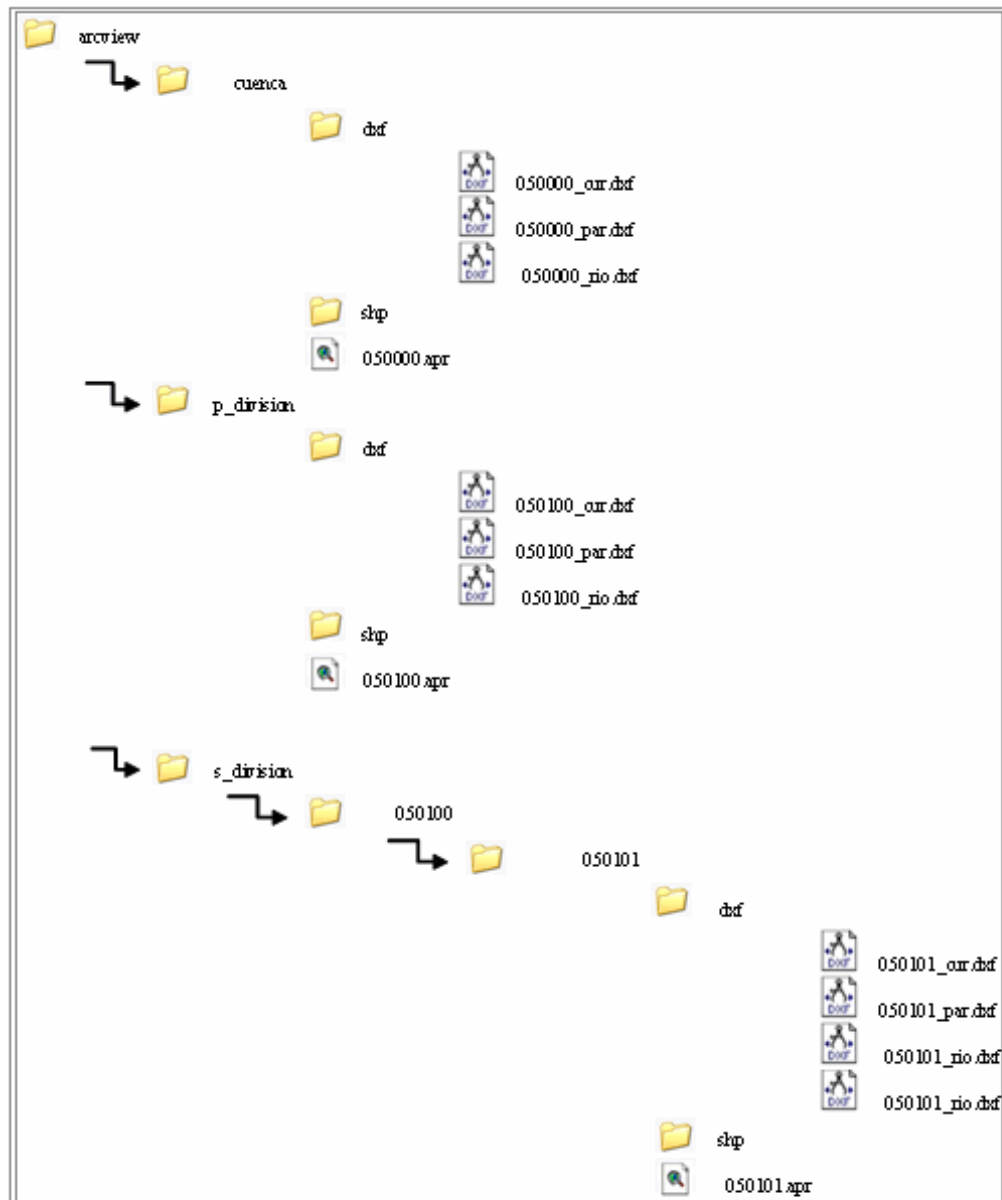
información gráfica como la lectura de información alfanumérica y la segunda para guardar los archivos de entrada en formato dxf para cada cuenca en particular, sea principal, de primera o de segunda división como se explicó anteriormente. Con el fin de saber a que cuenca correspondía y que tipo de información guardaba cada archivo dxf se creó la siguiente nomenclatura:

- Cada uno de los archivos dxf debían llamarse con el nombre de la cuenca a la que correspondían.
- Según la información que contenía el archivo se le adicionaba una extensión, _cur.dxf para las curvas de nivel, _rio.dxf para ríos, _par.dxf para el parteaguas y _pun.dxf para los puntos altos de la red de drenaje de la cuenca.

Por ejemplo la carpeta dxf correspondiente a la cuenca con nomenclatura 050101 debe tener los siguientes archivos con la información estrictamente necesaria: 050101_cur.dxf para curvas de nivel, 050101_rio.dxf para ríos, 050101_pun.dxf para los puntos que ayudan a definir la red de drenaje, y 050101_par.dxf para el parteaguas preliminar de la cuenca. La nomenclatura anteriormente mostrada corresponde a un ejemplo en particular de una cuenca de segunda división.

En la figura 36 se observan las carpetas cuenca, p_division y s_division con la información inicial necesaria para el desarrollo de la aplicación en las cuencas 050000, 050100 y 050101 con la ayuda de ArcView y la respectiva organización de los dxf en la carpeta correspondiente.

Figura 36. Estructura de las carpetas con la información necesaria para la utilización de ArcView



4.3.4 Descripción del proceso de cálculo desde ArcView. El procedimiento que se siguió para el modelamiento de la cuenca principal y las cuencas de primera división con ayuda del Script desarrollado por el Ingeniero Luis A. Capacho en su tesis de maestría es el siguiente:

- Seleccionar el directorio de trabajo donde se va a guardar la información generada por los procesos de análisis y manipulación de la información.
- Introducir los archivos dxf en ArcView.
- Cambiar los archivos en formato dxf a formato shape para así iniciar su procesamiento,
- conservando la misma nomenclatura pero cambiando la extensión .dxf por .shp.
- A partir del archivo shape de las curvas de nivel se crea el modelo de alturas TIN o red de triángulos irregulares. Este modelo de datos es vectorial. La información creada por la herramienta al generar este modelo se guarda automáticamente en una carpeta que crea el Script con el nombre de mde_vector.
- El modelo digital de elevación vectorial generado en el punto anterior debe ser convertido a una grilla o modelo digital en formato raster. La información generada se guarda automáticamente en una carpeta que crea el Script con el nombre de mde_raster.
- Determinar las celdas bajas o sumideros. Esta información generada se guarda automáticamente en una carpeta que crea el Script con el nombre de sumideros.

- Llenar las depresiones, al igual que en los pasos anteriores se genera automáticamente una carpeta llamada llenado que contiene la información.

Para las cuencas de segunda división se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente y dado que el objetivo es realizar la caracterización morfométrica de estas cuencas, se deben desarrollar los siguientes procedimientos programados en el Script:

- Una vez llenadas las depresiones, a cada celda se le debe asignar una dirección de flujo tomando como base el mapa raster de llenado y generando un mapa raster de direcciones de flujo, el cual se guarda en una carpeta llamada dirflnormal que se crea mecánicamente.
- Teniendo en cuenta que el mapa de dirección de flujo normal tenía en cuenta solo la pendiente del terreno, no era suficiente para determinar una línea divisoria similar a la de la cuenca y por lo tanto debía forzarse incluyendo la red de drenaje de la misma. De esta forma se generan las direcciones de flujo forzado que se guarda en una carpeta llamada dirforzado.
- Con ayuda del mapa de direcciones de flujo forzado se genera el mapa de flujo acumulado que determina la orientación de la red de drenaje de la cuenca y cuya información se guarda en una carpeta llamada f_acumulado.

- Se debe crear un nuevo tema llamado punto_drenaje que se guarda en la carpeta shp y que contiene el punto donde se concentra el mayor valor de flujo acumulado.
- Con ayuda del shape punto_drenaje y el mapa de flujo acumulado se genera el trazado del parteaguas de la cuenca y se guarda con el nombre de cuenca.shp en la carpeta shp.
- Se define la red de drenaje a partir de los puntos que se encuentran en el archivo con la extensión _pun.shp y teniendo activo el tema de las direcciones de flujo forzado. La red de drenaje generada por la aplicación se guardaba en la carpeta shp con el nombre de red_dr1.shp.

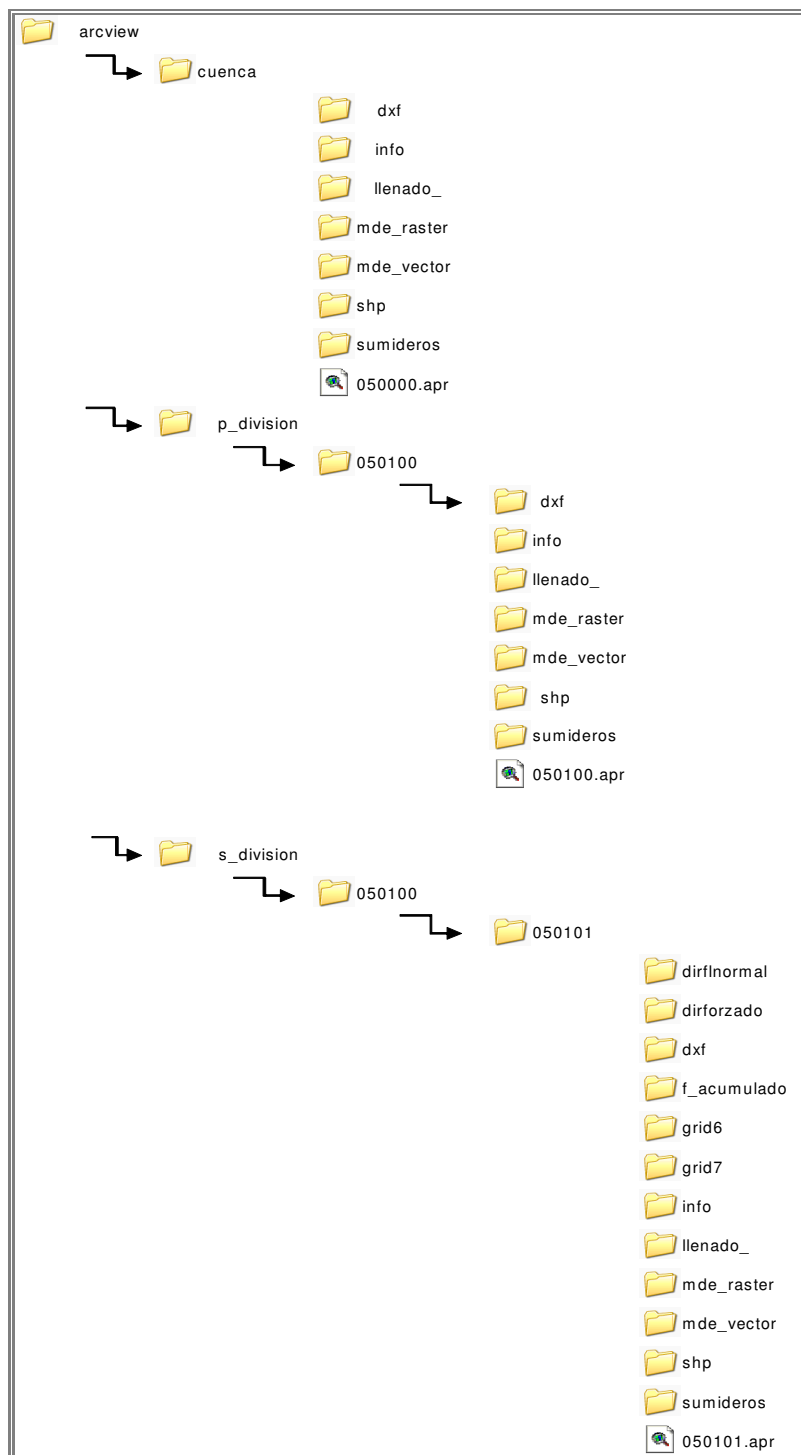
Teniendo el shape del parteaguas generado por la herramienta para la cuenca en estudio se procedía a calcular lo siguiente:

- Camino de flujo más largo con el tema cuenca.shp resaltado y luego convertido a un formato vectorial.
- Propiedades morfométricas con ayuda del tema cuenca.shp y el mde_raster.
- Curva hipsométrica con ayuda del tema cuenca.shp y el mde_raster.
- Pendiente por el método de Alvord utilizando solo las curvas que se encuentran dentro del límite de la cuenca.

En cada uno de los pasos listados en este numeral se generan archivos *.dbf con la información numérica correspondiente.

Las carpetas que el Script generaba automáticamente debían hacer parte de la estructura que se había establecido inicialmente. Esto se lograba al efectuar el primero de los pasos enunciados en el proceso anterior. En la figura 37 se observa la estructura final de las carpetas resultado del modelamiento de las cuencas en ArcView.

Figura 37. Estructura de las carpetas finalizado el modelamiento de la cuenca principal y las de primera y segunda división

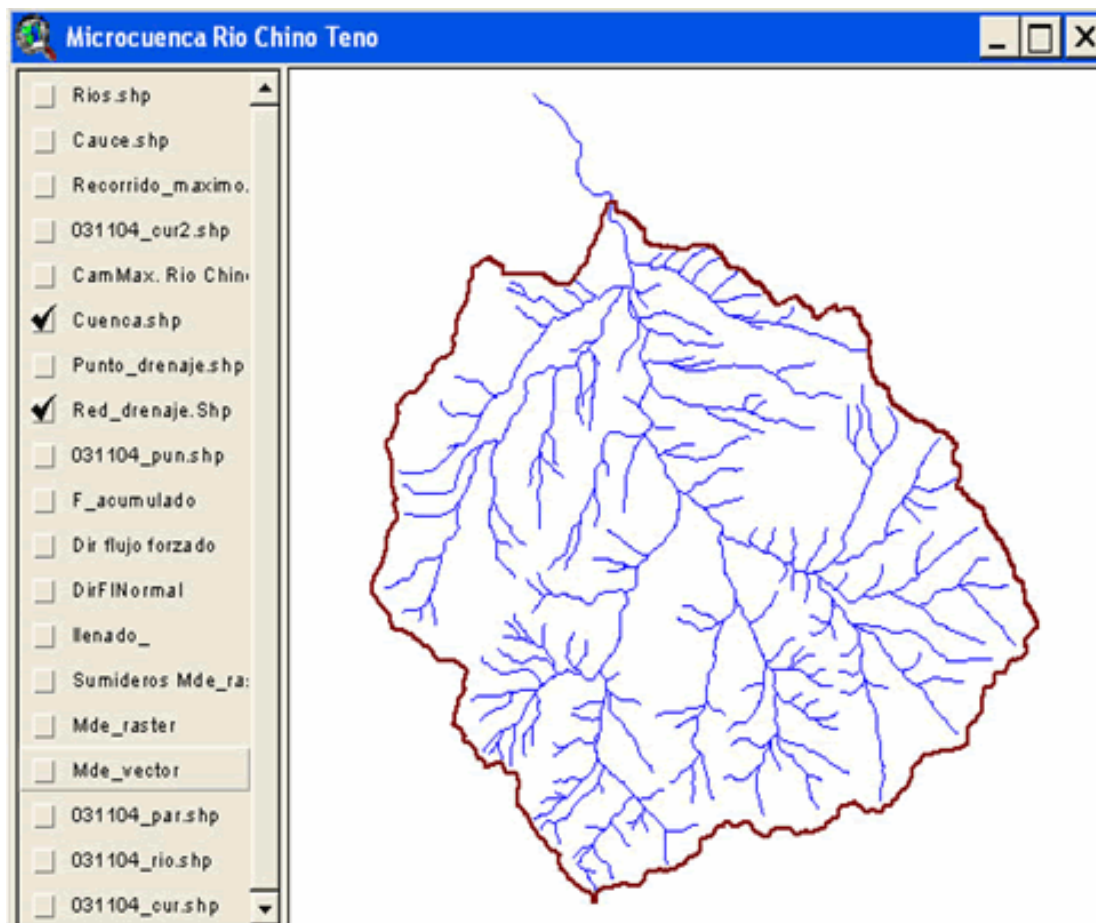


Finalizado el proceso se pueden visualizar en la vista de la cuenca en estudio los siguientes temas como se observa en la figura 38:

- Recorrido máximo
- Parteaguas generado por la herramienta
- La red de drenaje
- El flujo a cumulado
- Punto de drenaje
- Dirección de flujo forzado
- Dirección de flujo normal
- El MDE raster llenado
- Celdas bajas
- MDE raster
- TIN o MDE vector

Y los archivos de entrada como las curvas de nivel, drenajes, parteaguas y puntos. Cada uno siguiendo la nomenclatura específica.

Figura 38. Vistas y temas que se visualizan al finalizar la aplicación



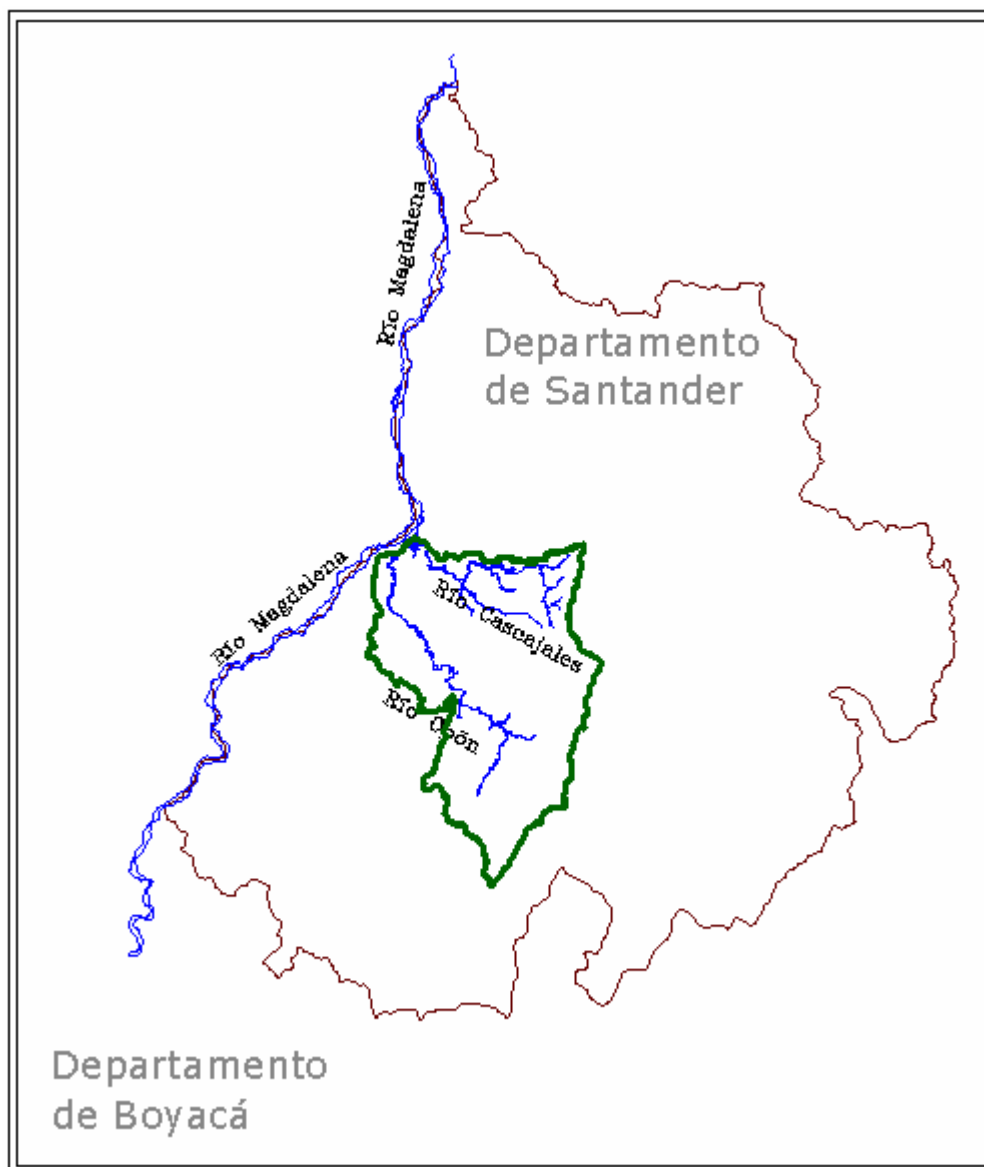
5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Los MDE constituyen una plataforma para la realización y aplicación de algoritmos especiales que permiten realizar cálculos a partir de datos de entrada y obtener resultados generados por el mismo. A continuación se presenta una aplicación de los MDE en el área de la hidrología, particularmente en la caracterización física de cuencas hidrográficas. Es necesario para empezar, enunciar algunos conceptos básicos de la hidrología, específicamente, lo concerniente a los parámetros morfométricos con sus respectivas ecuaciones, limitaciones en cuanto a la aplicación de cada una de ellas y la importancia que cada resultado tiene en las cuencas a estudiar. Por último se definen algunos conceptos relacionados con los MDE y sus aplicaciones en la hidrología, conceptos como flujo normal, flujo forzado, flujo acumulado entre otros, especificando los parámetros morfométricos calculados a partir del MDE y enunciando los errores, problemas y soluciones que se tuvieron en la realización de los mismos.

5.1 LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN

La Cuenca del Río Opón, es una de las más importantes del sistema hidrográfico de Santander cuya corriente nace en la Serranía de los Cobardes y desemboca en el Río Magdalena, recibe los aportes de los ríos La Colorada, Oponcito, Cascajales y Quiratá, además de corrientes menores como las quebradas Arrugas, Dorada y los Indios.(Ver Figura 39).

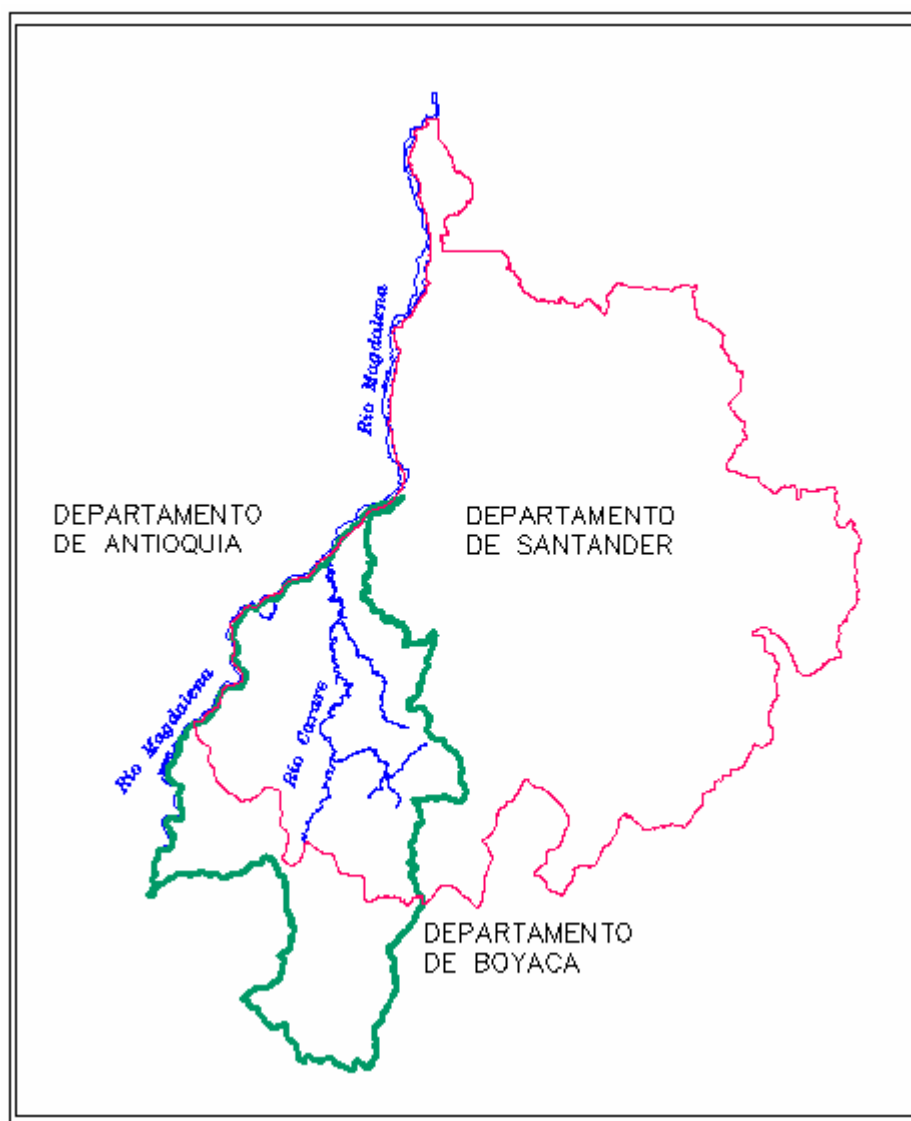
Figura 39. Localización de la cuenca del Río Opón.



El Río Carare nace como el Río Minero en el Departamento de Cundinamarca en las Cabeceras del Páramo el Ratón, para luego atravesar los departamentos de Boyacá y Santander hasta desembocar en el Río Magdalena por la margen oriental. A su entrada al Departamento de Santander, tras recibir las aguas del Río Horta, el nombre de Río Minero

cambia por el de Carare y lo conserva hasta su desembocadura. (Ver figura 40).

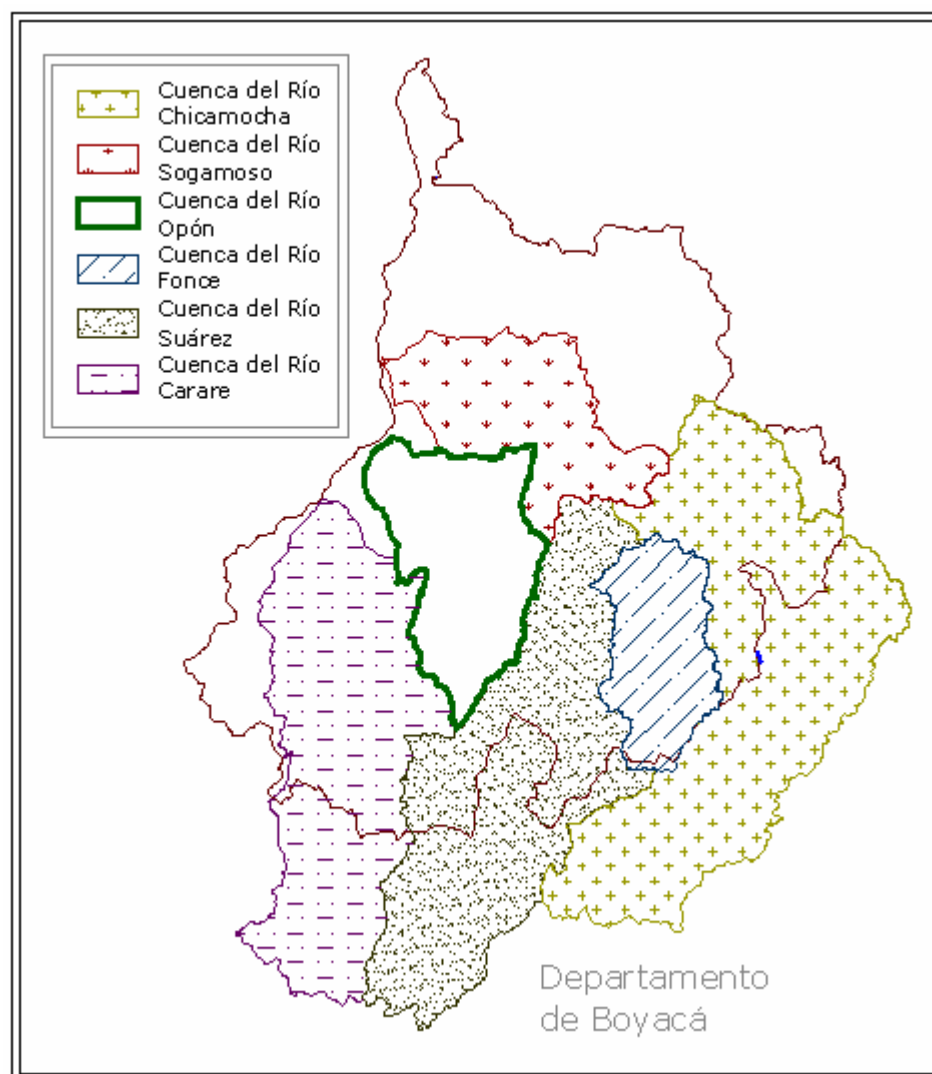
Figura 40. Localización de la cuenca del Río Carare.



La Cuenca del Río Opón Limita al norte con la cuenca del Río Fonce, al sur con la Cuenca del Río Carare, al este con la Cuenca del Río Suárez y al oeste con el Departamento de Antioquia, abarcando de las coordenadas

1162359.4984,1043544.9602 NE a las 1262153.1143,1021495.0248 NE.
(Ver figura 41).

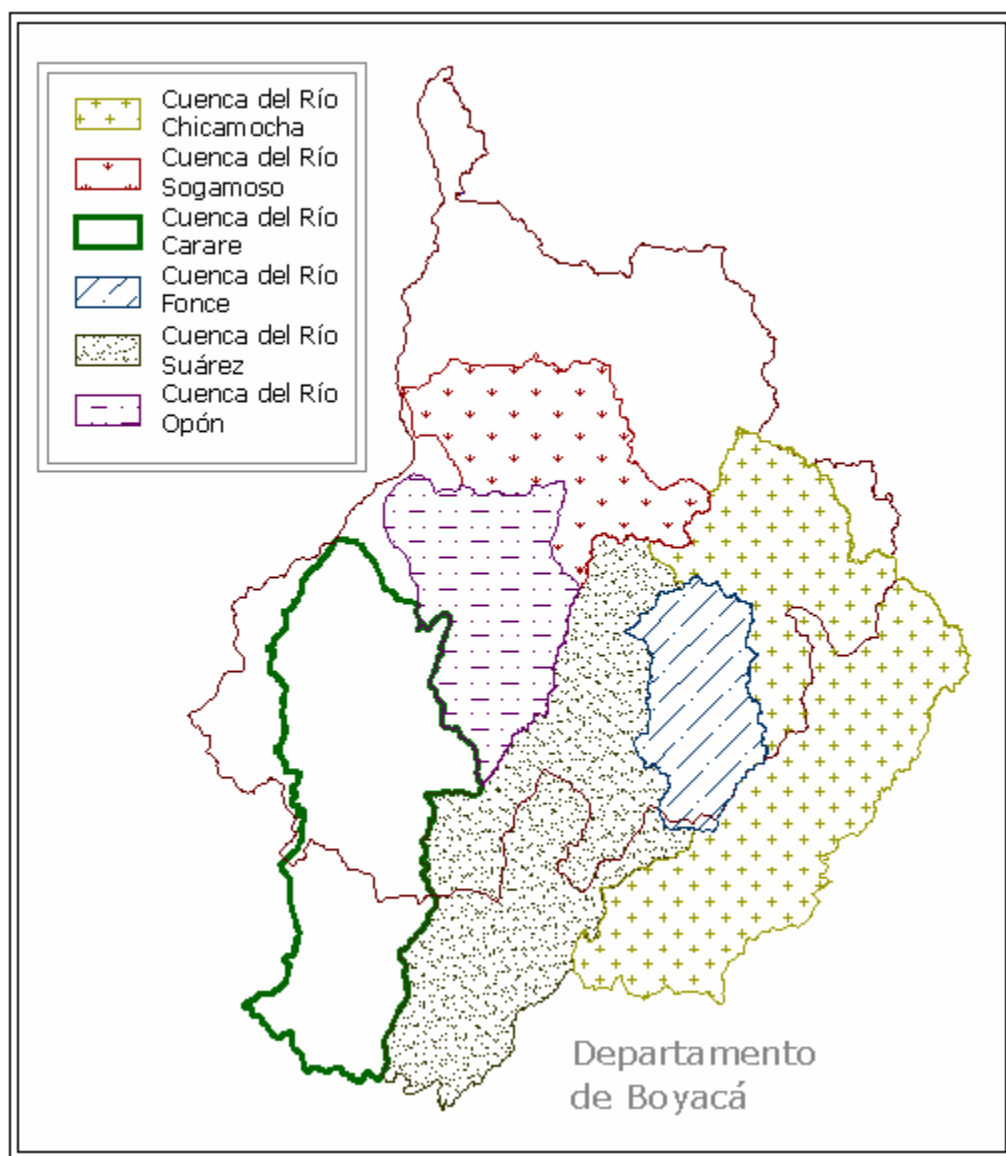
Figura 41. Límites geográficos de la Cuenca del Río Opón.



La Cuenca del Río Carare limita al norte con la cuenca del Río Opón, al sur con el Departamento de Boyacá, al este con la cuenca del Río Suárez y al oeste con el Departamento de Antioquia, abarcando de las coordenadas

1135050.0248,979566.0712 NE a las 1245109.7626,1003522.4071 NE. (Ver figura 42).

Figura 42. Límites geográficos de la Cuenca del Río Carare.



La Cuenca del Opón abarca los municipios de Barrancabermeja, Simacota, San Vicente de Chucurí, Puerto Parra, El Carmen, Chima, Santa Helena del

Opón, Contratación, Landázuri, La Paz, El Guacamayo, Vélez, Chipatá y Bolívar, la del Carare abarca los municipios de Albania, Florián, Jesús María, La Belleza, Sucre, El Peñón, Bolívar, Landázuri, Cimitarra, La Paz, Puerto Parra y Barrancabermeja en el Departamento de Santander.

5.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE UN MDE

Tradicionalmente los parámetros morfométricos se han calculado con la ayuda de mapas en papel, utilizando métodos muy arcaicos y extensos que llevan a cometer errores durante el proceso de cálculo difíciles de detectar y por ende de corregir, mientras que en mapas en formato digital, se hace un poco más sencillo el cálculo pero con cierto grado de precisión dependiendo de la información y de la herramienta utilizada para procesarla.

El uso de los mapas análogos como unidad de medida de variables hidrológicas es tedioso, el consumo de tiempo en el análisis en éstos se incrementa, son propensos a errores acumulativos, etc. Sin embargo, la mayor parte de la información morfométrica y parámetros hidrológicos pueden obtenerse con la ayuda de los SIG porque tienen la capacidad de integrar, visualizar y analizar los datos espacialmente.

Mapas raster de tamaño regular son las estructuras más comunes en la construcción y estudio de un MDE. Para el análisis de parámetros hidrológicos en una cuenca, los MDE de estructura raster se adaptan mejor a la representación espacial de variables continuas, porque el terreno es subdividido en pequeñas celdas de igual tamaño almacenadas en una matriz. Cada celda se encuentra georeferenciada y tiene un atributo que se puede utilizar en el análisis espacial del mapa digital o matriz, como por ejemplo:

elevación, pendiente, dirección de flujo, etc. Las estructuras raster son ideales para el modelamiento hidrológico distribuido porque facilitan la labor para determinar la localización, el estado o comportamiento de una celda específica, como por ejemplo, se puede determinar la dirección de flujo en una celda de acuerdo a la diferencia de nivel respecto a sus ocho celdas vecinas.

A continuación se describen cada una de las variables que inciden en la caracterización de cuencas hidrográficas, entre ellas la elevación, pendiente y forma, con sus respectivos métodos de cálculo y aplicaciones para cada cuenca en particular, además de describir las implicaciones que tienen los resultados de cada una de ellas y su significado en la cuenca hidrográfica.

5.2.1 Elevación. La elevación señala la variación altitudinal de la cuenca hidrográfica, es de suma importancia ya que ella incide directamente sobre el clima y sobre el régimen hidrológico, además contribuye a la caracterización de zonas climatológicas y ecológicas dentro de una misma cuenca.

La orografía de una zona ofrece una vasta idea de aspectos tan importantes como la temperatura, precipitación, humedad, radiación solar, viento, fauna y flora entre otros. Las diferencias de altitud son determinantes al momento de caracterizar un lugar ya que éstas establecen en nuestro medio: pisos térmicos, aprovechamiento y estado de los recursos hídricos, energéticos y de la biota en general y además afectan el comportamiento de las corrientes de agua que drenan a la cuenca. Es por la necesidad de conocer éste parámetro y su importancia al momento de establecer semejanzas y diferencias entre cuencas hidrográficas que se introducen los conceptos de elevación media, elevación máxima, elevación mínima, elevación mediana y

la descripción del método de la curva hipsométrica para la determinación de la elevación mediana en una cuenca hidrográfica.

5.2.1.1 Elevación media. Es el promedio aritmético de los valores de elevación de diferentes puntos que pertenecen a la superficie de la cuenca.

5.2.1.2 Elevación máxima. Es aquella altitud correspondiente al punto más alto de la cuenca hidrográfica.

5.2.1.3 Elevación mínima. Es aquella altitud correspondiente al punto más bajo de la cuenca hidrográfica.

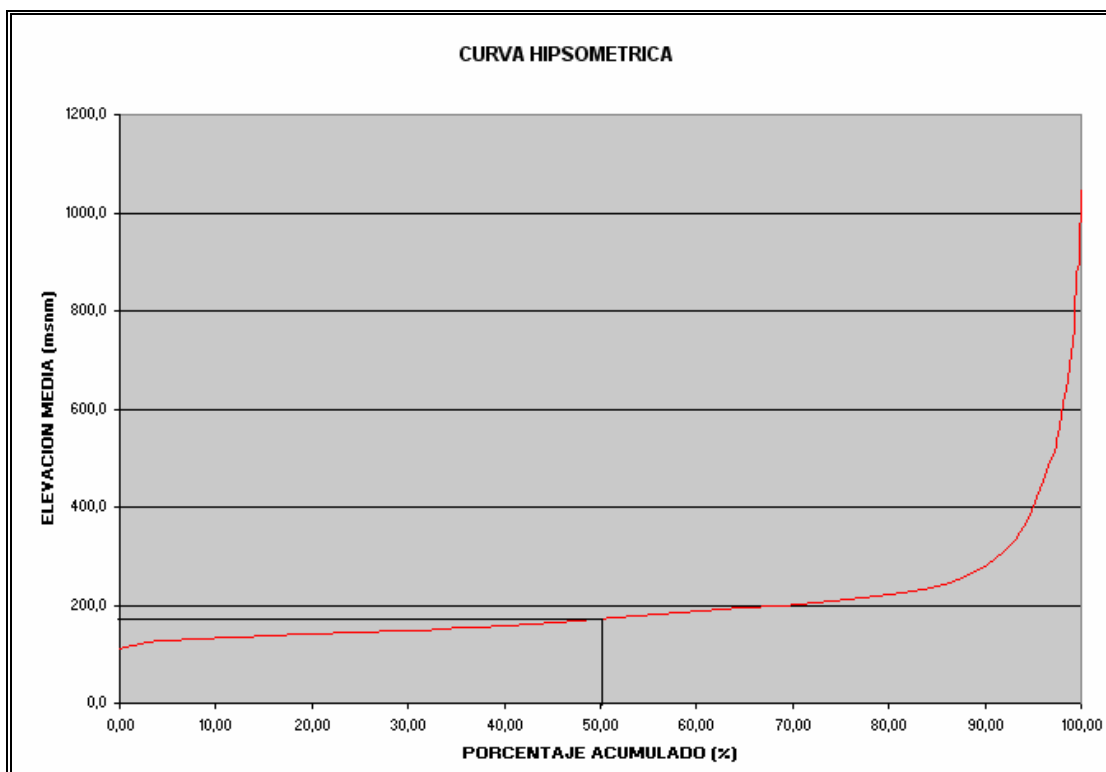
5.2.1.4 Elevación Mediana. Es aquella altitud correspondiente al 50% del área total de la cuenca y está determinada por el método de la curva hipsométrica. Este método consiste en un gráfico del Porcentaje de Área acumulada de la cuenca Vs. Elevación

5.2.1.5 Método de la curva hipsométrica para definir elevación mediana.

La curva hipsométrica proporciona una base para la caracterización de zonas climatológicas y ecológicas de la cuenca ya que representa gráficamente el relieve de la misma en función de la superficie correspondiente. Para graficarla se tiene en las abscisas el porcentaje de área acumulada y en las ordenadas la cota correspondiente a la elevación.

En la figura 43 se ve un ejemplo claro de la realización de una curva hipsométrica en donde el valor correspondiente al 50%, es decir, la elevación mediana es aproximadamente igual a 180m.

Figura 43. Ejemplo de curva hipsométrica, Microcuenca Caño Arenoso – Cuenca del Río Opón.



5.2.2 Pendiente. La pendiente es el indicador del grado de inclinación de la cuenca hidrográfica. Por otra parte es uno de los factores que determina la velocidad del flujo del agua, así como de fenómenos de erosión del suelo y arrastre de sedimentos. Igualmente influye en el tiempo de respuesta de la cuenca ante crecidas. A continuación se enuncia el concepto de pendiente media y se menciona el método de Alvord, usado en éste proyecto para el cálculo de la pendiente de la cuenca.

La pendiente media de una cuenca, se define como el ponderado de las pendientes medias de áreas entre curvas de nivel. Cabe anotar que el

cálculo de la pendiente media puede resultar en la mayoría de los casos un parámetro poco significativo por si solo, pues pueden existir cuencas con igual valor de pendiente media pero con curvas hipsométricas distintas.

Uno de los métodos usados para realizar el cálculo de la pendiente de la cuenca es el método de Alvord, que considera la cuenca dividida en una serie de franjas de terreno delimitadas por curvas de nivel consecutivas y de igual desnivel entre ellas y cuya formulación se presenta a continuación:

$$S_m = \frac{D * L}{A}$$

Siendo:

S_m : Pendiente media de la cuenca

D: Desnivel entre las curvas de nivel que se toma como constante

A: Área total de la cuenca

L: Sumatoria de las longitudes de todas las curvas de nivel consideradas

5.2.3 Parámetros de forma. La forma de una cuenca afecta notablemente la respuesta de ésta a un evento de lluvia al influir en la longitud y la pendiente de los ríos que drenan la cuenca. Ríos de gran longitud facilitan el amortiguamiento o reducción del efecto de una creciente al aumentar el tiempo de la formación de la avenida y reducir el caudal máximo. Caso contrario ocurre, cuando la forma de la cuenca permite la presencia de ríos de poca longitud pues hay susceptibilidad a la formación de avenidas ante eventos de precipitación no muy altos.

Los parámetros de forma permiten establecer diferencias importantes en los regímenes de flujo de dos cuencas que se someten a condiciones climáticas similares. Esta diferencia se debe principalmente a las diversas características físicas de ambas cuencas. La fisiografía puede ser importante en la respuesta de la cuenca a las precipitaciones. A continuación se hace una presentación de las características fisiográficas más importantes.

5.2.3.1 Coeficiente de forma. El factor de forma está definido como el cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de su longitud, comparando la forma de la cuenca con un cuadrado de lado L. Su valor numérico se interpreta como el grado de achatamiento o alargamiento de la cuenca. Esto último se traduce en una longitud del cauce principal corta o larga, según corresponda. La forma de la cuenca tiene influencia en el tiempo de concentración de las aguas al punto de salida y por lo tanto modifica la configuración del hidrograma. Para una misma superficie y una misma tormenta el hidrograma de salida de una cuenca redondeada es muy diferente al de una cuenca alargada. La característica de los valores del coeficiente de forma se pueden ver en la tabla 15 El cálculo se realiza con la siguiente ecuación propuesta por Gravelius:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Siendo:

K_f : Factor de Forma de la cuenca

A: Área total de la cuenca

L: Longitud de la cuenca medida desde el punto más alejado de ella hasta la salida.

Tabla 15. Características de los valores de K_f .

VALOR DE K_f	CARACTERÍSTICAS
<1	Cuenca más larga que ancha, cauce principal largo
1	Cuenca cuadrada
>1	Cuenca más ancha que larga, cauce principal corto

5.2.3.2 Coeficiente de compacidad. El índice de compacidad K_c se debe a Gravelius, y se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca. Los valores para K_c nunca serán menores a 1, su cercanía con la unidad indica la tendencia a una forma circular y valores altos indican cuencas más alargadas e hidrogramas más achatados. En la tabla 16 se encuentran la forma de la cuenca según su índice de compacidad.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \times A}}$$

Donde:

K_c : Índice de compacidad

P: Perímetro de la cuenca

A: Área de la cuenca

Tabla 16. Forma de la cuenca, según valores de K_c .

VALORES DE K_c	FORMA
1,00 a 1,25	Redonda a oval redonda
1,25 a 1,50	De oval redonda a oval oblonga
1,50 a 1,75	De oval oblonga a rectangular oblonga

5.2.3.3 Coeficiente de masividad. Esta dado por el cociente entre la elevación media de la cuenca y su respectiva área. Este valor tiende a ser alto cuando las cuencas son muy montañosas y poseen un área de drenaje pequeña, un valor alto de coeficiente de masividad indica que la cuenca drena más rápido ante un evento de lluvia que una con un coeficiente de masividad cuyo valor es bajo.

$$K_m = \frac{H_m}{A}$$

Siendo:

K_m : Coeficiente de masividad

H_m : Altura media de la cuenca en metros.

A: Área de la cuenca en Kilómetros cuadrados

En la tabla 17 se resumen los parámetros de forma descritos en este numeral.

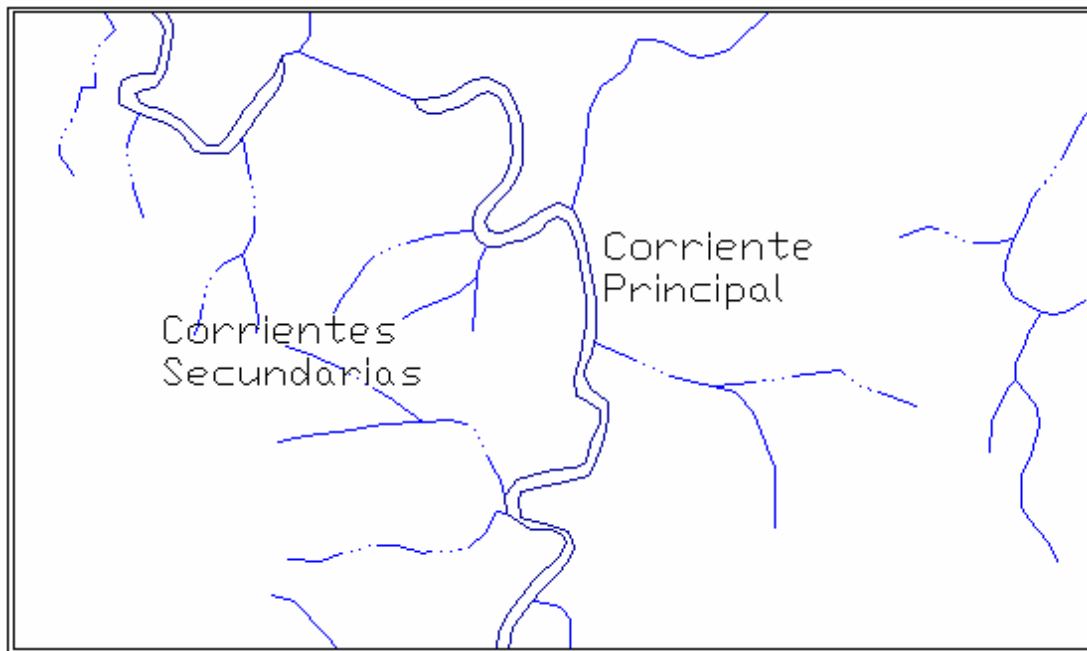
Tabla 17. Resumen de los parámetros de forma.

PARÁMETRO	ECUACIÓN	VARIABLES
Coeficiente de forma K_f	$K_f = \frac{A}{L^2}$	K_f = Factor de forma de la cuenca. A = Área total de la cuenca. L = Longitud de la cuenca medida desde el punto más alejado de ella hasta la salida.
Coeficiente de compacidad K_c	$K_c = \frac{P}{2\pi\sqrt{A}}$	K_c = Coeficiente de compacidad. P = Perímetro de la cuenca. A = Área de la cuenca.
Coeficiente de masividad K_m	$K_m = \frac{H_m}{A}$	K_m = Coeficiente de pasividad. H_m = Altura media de la cuenca en m. A = Área de la cuenca en Km^2 .

5.2.4 Parámetros de la red de drenaje. La red de drenaje puede ser modelada como un árbol cuyas ramas representan las vertientes secundarias (ya sean efímeras, intermitentes o permanentes) y que confluyen al cauce principal. A manera de ilustración la figura 44 nos muestra una red de drenaje con vertientes principales y secundarias.

Del estudio de la red de drenaje se pueden establecer algunas conclusiones con respecto a la velocidad de respuesta de la cuenca ante una crecida, a la capacidad de infiltración del suelo, a la forma del hidrograma resultante en el desagüe de la cuenca, a la estabilidad de la red hidrográfica, a la cantidad de vegetación y al tipo de escorrentía de superficie.

Figura 44. Ejemplo de una red de drenaje, parte de la Microcuenca Quebrada Amarilla perteneciente al Río Carare.



5.2.4.1 Recorrido Máximo. Un parámetro muy importante que se tiene en cuenta al estudiar la red de drenaje es la longitud del recorrido máximo, definido como la longitud del cauce principal de la cuenca en estudio medida desde la divisoria del parteaguas, teniendo en cuenta desde el flujo en ladera, hasta el flujo encausado en el punto de drenaje. Este parámetro afecta directamente la respuesta de la cuenca ante un evento de lluvia dado.

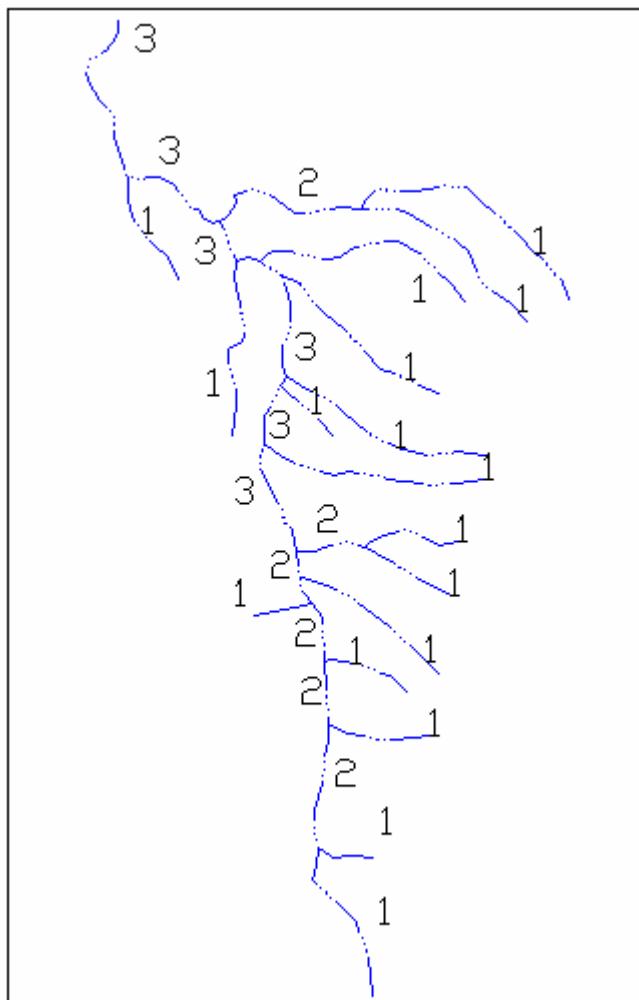
El perfil del cauce principal se define como el gráfico que representa la longitud total del cauce principal abscisado unas distancias uniformes con la elevación correspondiente a cada abscisa en las ordenadas, éste perfil es de suma importancia en el cálculo de la pendiente del cauce porque influye notablemente en la respuesta de ésta a un evento de lluvia intensa ya que si la pendiente del perfil del cauce principal es alto, el agua drena con mayor rapidez que uno con pendiente baja.

5.2.4.2 Orden. La red de drenaje es una conjunción de nodos, unidos unos a otros por líneas de tal forma que cada nodo tiene sólo un camino hacia la salida. Los nodos que están unidos a un solo tramo se llaman fuentes y los que llegan a más de uno se llaman uniones. Los tramos que se conectan a una fuente y a una unión se llaman tramos externos y los que se conectan a dos uniones se llaman internos.

Las corrientes se ordenan así: Los segmentos originados en un nudo exterior son llamados de primer orden, es decir, no tiene tramos tributarios. Cuando dos tramos del mismo orden i , se unen en un nudo interior dan lugar a un tramo de orden $i+1$, cuando se unen dos tramos de distinto orden en un nudo interior originan un tramo que conserva el mayor de los órdenes y finalmente el orden de la cuenca es el de la corriente de mayor orden. Ver ejemplo del cálculo del orden en la figura 45.

La importancia del orden de la cuenca radica en que ésta responde más rápidamente a una crecida en proporción al grado de bifurcación de la red drenaje.

Figura 45. Orden de drenaje



Tomado de: Microcuenca Río Blanco, perteneciente a la Cuenca Río Opón.

5.2.4.3 Orientación. La orientación de la cuenca está determinada por la posición del cauce principal con respecto al Norte, y su influencia está dada de acuerdo al movimiento del sol y a las cadenas montañosas que la rodean y actúan como barrera.

Esta orientación también está íntimamente relacionada con la pendiente general de la cuenca y la pendiente del cauce. La latitud de la cuenca incide

en el número de horas de sol sobre la cuenca, que afecta directamente los cálculos de la evaporación y de la evapotranspiración al igual que es determinante en la dirección de los vientos, los frentes de lluvia y los flujos de humedad entre otros.

5.2.4.4 Densidad de drenaje. La densidad de drenaje está definida como el cociente entre la longitud total de los canales de flujo pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca, permite tener un conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca.

$$D = \frac{L_T}{A}$$

Donde:

D: Densidad de drenaje

L_T : Longitud total de las corrientes de la cuenca

A: Área total de la cuenca

La densidad de drenaje refleja en una medida la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red hidrográfica, el tipo de escorrentía superficial, al igual que la respuesta de la cuenca a una crecida. Cuanto mayor sea la densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. Igualmente esta relacionada con aspectos hidrológicos de la red de drenaje como la transmisividad del suelo, el flujo base, el caudal medio anual por unidad de área y la recarga.

5.2.4.5 Pendiente del cauce principal. La pendiente del cauce principal está definida como una variación de la elevación del cauce a través de su recorrido por la cuenca. La pendiente determina la velocidad de escurrimiento del agua, a mayor pendiente, mayor velocidad.

La pendiente media se puede estimar por el método de Taylor que ajusta una rasante al perfil del río, los proponentes de éste método sugieren dividir el río en tramos de igual longitud, cada uno con pendiente uniforme.

$$V_i = k\sqrt{S_i} = \frac{\Delta x}{t_i}$$

Donde,

K: Depende de la rugosidad y la forma de la sección transversal

S_i : Pendiente del tramo i.

Δx : Longitud del tramo i

t_i : Tiempo recorrido en ese tramo

$$S = \left[\frac{\sum \Delta x}{\sum \frac{\Delta x}{S_i^{1/2}}} \right]^2 = \left(\frac{L}{\frac{L_1}{S_1^{1/2}} + \frac{L_2}{S_2^{1/2}} + \dots + \frac{L_n}{S_n^{1/2}}} \right)^2$$

Siendo,

S: Pendiente media del cauce principal

L: Longitud total del cauce

5.2.5 Parámetros morfométricos adicionales. Además de los parámetros mencionados anteriormente, se pueden formular algunos que proporcionan

también una idea física de la cuenca. Algunos de éstos no se calcularon en las cuencas del presente proyecto, ellos son la relación de circularidad, la relación de elongación, el índice de alargamiento, el rectángulo equivalente, el índice asimétrico y la sinuosidad. Estos parámetros son importantes en la realización de estudios regionales de cuencas cuando falta información de precipitación, evaporación, caudales entre otros.

5.2.5.1 Relación de circularidad. La relación de circularidad, (R_{ci}), es el cociente entre el área de la cuenca (A) y la del círculo cuyo perímetro (P) es igual al de la cuenca:

$$R_{ci} = 4\pi A / P^2$$

Donde,

R_{ci} : Relación de circularidad.

A: Área de la cuenca

P: Perímetro de la cuenca

5.2.5.2 Radio o relación de elongación. El radio o la relación de elongación es la relación entre el diámetro de un círculo de área igual a la cuenca y la longitud de la cuenca. Expresando el diámetro en función del área de la cuenca su ecuación nos queda:

$$R_e = 1.128 * \frac{\sqrt{A}}{L}$$

Siendo,

R_e : Radio de elongación

A : Área de la cuenca

L : Longitud de la cuenca

5.2.5.3 Índice de alargamiento. El índice de alargamiento es el cociente entre la longitud máxima de la cuenca en la dirección del flujo principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente.

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

Siendo,

I_a : Índice de alargamiento

L_m : Longitud máxima de la cuenca en la dirección del flujo principal

L : Ancho máximo de la cuenca medido perpendicularmente a L_m

5.2.5.4 Rectángulo equivalente. Es usado para comparar el comportamiento hidrológico de dos cuencas. Para dicho efecto se supone la cuenca como un rectángulo con el mismo perímetro y superficie de la cuenca original, y, por tanto, con igual coeficiente de compacidad, K_c .

Si el lado menor y mayor del rectángulo son, respectivamente, L_1 y L_2 , entonces se tiene:

$$P = 2(L_1 + L_2) = \frac{K_c \sqrt{A}}{0.28}$$

$$L_1 * L_2 = A$$

$$L_1 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$L_2 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca

K_c : Coeficiente de compacidad

L_1 : Longitud menor del rectángulo equivalente

L_2 : Longitud mayor del rectángulo equivalente

5.2.5.5 Índice Asimétrico. Propuesto por M. Terns, es la relación del área de las vertientes mayor (A_{may}) y menor (A_{men}), las cuales son separadas por el cauce principal.

$$I_{as} = \frac{A_{may}}{A_{men}}$$

Este índice evalúa la homogeneidad en la distribución de la red de drenajes, pues si se tiene un índice mucho mayor a 1 se observará sobre la cuenca que el río principal está bastante recargado a una de las vertientes.

5.2.5.6 Alejamiento medio. Es la relación del curso de agua más largo con la superficie de la cuenca.

$$a = \frac{L}{\sqrt{A}}$$

Donde:

A: Alejamiento medio

L: Longitud del curso de agua más largo (Km.)

A: Superficie de la cuenca (Km²)

5.2.5.7 Sinuosidad. Es la relación entre la longitud total del cauce principal (L), considerando sus curvas y recodos, y la longitud del valle del cauce principal medida sobre un trazado suave del cauce (L_s).

$$Sin = \frac{L}{L_s}$$

Este índice es un indicativo del régimen del cauce principal. En cuencas planas este valor será alto, a causa de la presencia de meandros y curvas que se presentan y siendo baja la velocidad de la corriente de agua.

5.2.5.8 Tiempo de concentración. Conocido de otra manera como tiempo de respuesta o de equilibrio. Se define como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que la cuenca contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe. Se atribuye muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una partícula de agua caída en el punto de la cuenca hidráulicamente más alejado del desagüe, en llegar a éste. El Tiempo de concentración definido por el método de Kirpich se representa así:

$$T_c = 0.01947 L^{0.77} S^{-0.385}$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración en minutos.

L : Longitud del cauce principal de la cuenca, en metros

S : Pendiente del cauce principal según Taylor, en m/m

La fórmula de Kirpich fue desarrollada a partir de la información del SCS en siete cuencas rurales en Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3-10%), ésta es una de las razones por la que es usado en las cuencas de Santander, la otra es por la facilidad de sus parámetros que dependen directamente de la longitud del cauce principal y de su pendiente.

Otras fórmulas para el cálculo de los tiempos de concentración se pueden observar en la tabla 18.

En la tabla 19 se realiza un resumen de los parámetros morfométricos y el método de cálculo utilizado.

Tabla 18. Otras formulas para calcular el tiempo de concentración.

METODO	FORMULA	CONSIDERACIONES
Fórmula Californiana (USBR).	$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{J^{1/2}} \right)^{0.77}$	Tc=Tiempo de concentración [hr] L=Longitud del cauce ppal. [Km] J=Pte prom del cauce ppal. [m/m]
Fórmula de Giandotti	$T_c = \frac{4 \sqrt{A} + 1.5 L}{25.3 \sqrt{J L}}$	Tc=Tiempo de concentración [hr] L=Longitud del cauce ppal. [Km] J=Pte prom del cauce ppal. [m/m] A=Área de la cuenca [Km²]
Fórmula de Ventura-Heras	$T_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{J} \quad 0.04 \leq \alpha \leq 0.13$	Tc=Tiempo de concentración [hr] J=Pte prom del cauce ppal. [m/m] A=Área de la cuenca [Km²]
Fórmula de Témez	$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76}$	Tc=Tiempo de concentración [hr] L=Longitud del cauce ppal. [Km] J=Pte prom del cauce ppal. [m/m]
Fórmula California Culvert Practice	$T_c = 60 \left(\frac{11.9 L^3}{H} \right)$	Tc=Tiempo de concentración [min] L=Longitud del curso de agua más largo [mil] H=Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y el desagüe de la cuenca [ft]
Izzard	$T_c = \frac{41.025(0.0007i + c)L^{1/3}}{S^{1/3}i^{2/3}}$	Tc=Tiempo de concentración [hr] i=Intensidad de la lluvia [in/hr] c=Coeficiente de retardo L=Longitud de la trayectoria del flujo [ft] S=Pte de la trayectoria del flujo [ft/ft]
Federal Aviation Administration	$T_c = \frac{1.81(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{1/3}}$	Tc=Tiempo de concentración [hr] L=Longitud del flujo superficial [ft] C=Coeficiente de escorrentía del metodo racional S=Pte de la superficie [%]

Tabla 19. Resumen de los parámetros morfométricos, según su método de calculo.

PARAMETROS		CALCULADO A PARTIR DEL MDE	CALCULADAS CON EL MODELO TRADICIONAL
ELEVACION	Elevación máxima	SI	NO
	Elevación mínima	SI	NO
	Elevación mediana (Curva hipsométrica)	SI	NO
PENDIENTE	Pendiente media	SI	NO
	Pendiente media (Método de Alvord)	SI	NO
PARAMETROS DE FORMA	Coeficiente de forma	SI	NO
	Coeficiente de compacidad	SI	NO
	Coeficiente de masividad	SI	NO
PARAMETROS DE LA RED DE DRENAJE	Recorrido máximo	SI	NO
	Orden	NO	SI
	Orientación	NO	SI
	Densidad de drenaje	NO	SI
	Pendiente del cauce principal (Método de Taylor)	NO	SI
OTROS PARAMETROS	Radio o relación de circularidad	NO	NO
	Radio o relación de elongación	NO	NO
	Sinuosidad	NO	NO
	Índice de alargamiento	NO	NO
	Rectángulo equivalente	NO	NO
	Índice asimétrico	NO	NO
	Alejamiento medio	NO	SI
	Tiempo de concentración	NO	SI

5.3 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS A PARTIR DEL MDE

Los rasgos topográficos del MDE determinan en primera instancia la dirección de flujo, es decir en una celda del modelo se puede conocer en qué dirección se desplaza el agua precipitada. Con las direcciones de flujo se puede construir un modelo derivado para determinar el flujo acumulado para cada celda del terreno. La distribución de flujo acumulado es el soporte para la construcción de la red de drenaje de una cuenca, el cual permite delimitar la cuenca o subcuencas de un sistema hidrológico a partir de puntos de drenaje de interés por el usuario.

Los datos y resultados obtenidos a partir del MDE son datos confiables siempre y cuando se tengan unos planos con buena calidad y una resolución adecuada para el estudio, éste trabajo contempla planos que han sido revisados, arreglados y restituidos con el cuidado requerido según las normas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y están a una escala 1:25000, escala que permite obtener resultados representativos de las cuencas en estudio.

El MDE contiene información implícita y explícita o atributos. Para lograr el máximo aprovechamiento de ésta propiedad es necesario construir una serie de algoritmos a fin de interactuar con el modelo digital del terreno y extraer los datos necesarios para procesos hidrológicos de una cuenca, por tal razón se utiliza el Script realizado por el Ing. Luis A. Capacho⁵ para el cálculo de los parámetros morfométricos de las cuencas. Los resultados son generalmente mapas derivados los cuales se denominan en la literatura con las siglas MDT.

A continuación se enuncian conceptos básicos que se utilizan en la realización del MDT, como sumideros, flujo forzado, flujo normal, flujo acumulado, direcciones de flujo; se describe el concepto y la construcción del área subsidiaria de las cuencas así como de la red de drenaje de la misma y para finalizar se describen errores que se cometen frecuentemente en la realización de éste proceso y se muestran las soluciones a los mismos.

⁵Tesis de maestría "Modelamiento espacialmente distribuido de cuencas hidrográficas soportado sobre SIG", UIS, 2003

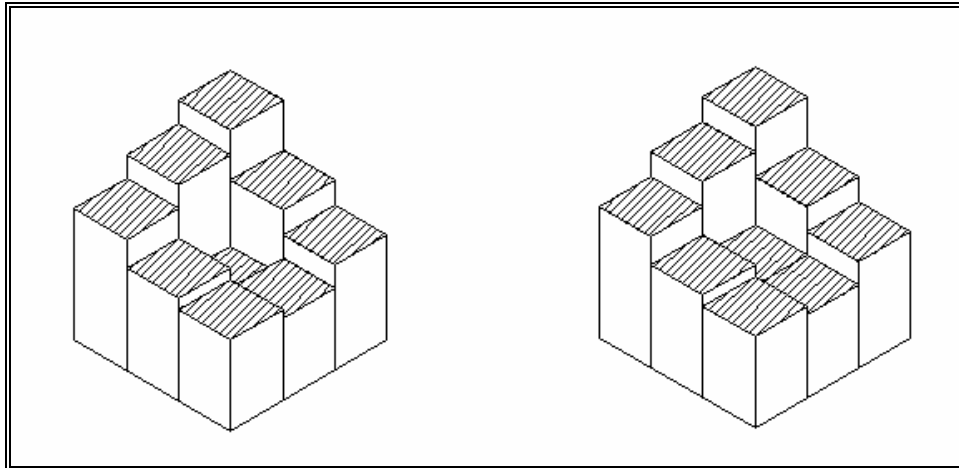
5.3.1 Sumideros. Cuando se va a dar inicio al cálculo de parámetros morfométricos a partir de la información contenida en el MDE, no siempre se pueden efectuar las operaciones, ya que errores en la topografía obligan a modificar el modelo de alguna forma con el fin de adecuarlo para el posterior procesamiento y tener la certeza de obtener datos fiables. Las posibles modificaciones pretenden un acercamiento del MDE con la realidad, por lo que está cargado de imprecisiones debido a la naturaleza del proceso de construcción, que frecuentemente introduce numerosos artificios en el relieve del MDE impropios de una formación natural, los cuales son llamados por la literatura como sumideros.

Los sumideros que generalmente se encuentran en la superficie de un MDE raster pueden ser una celda o varias celdas continuas comúnmente llamadas zonas planas. Estos sumideros pueden generarse a partir de errores derivados de los procesos de interpolación, corrección, etc., que tienen lugar en la conversión de las fuentes primarias (ortofotos, cartografía clásica), una mala asociación de la escala de la información y el tamaño de celda, etc. Los sumideros son celdas bajas con respecto a sus ocho celdas vecinas que se pueden encontrar distribuidas en cualquier parte del área de la cuenca.

Los sumideros dificultan o impiden el correcto cálculo de parámetros y a nivel de programación no podría haber una continuidad en el proceso del algoritmo, ya que frenan el correcto avance del agua a lo largo de las laderas, afectando plenamente los cálculos posteriores, como por ejemplo el mapa de direcciones de flujo que determina un virtual avance del escurrimiento del agua precipitada en una celda hacia las direcciones de máxima pendiente.

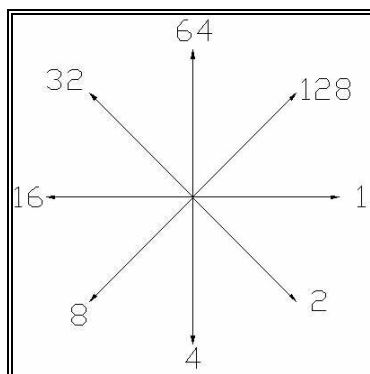
Frente a este problema la solución clásica y más extendida consiste en el relleno de las depresiones, proceso conocido en la literatura como “pit-filling” que genera superficies planas; primero es necesario localizarlos para posteriormente realizar el proceso de llenado de estos sumideros hasta el nivel de la celda más baja del perímetro, es decir la que contiene el dato de elevación más bajo de sus ocho celdas alrededor. A pesar de parecer un problema simple, este proceso es fuente actual de investigación y no existe una metodología exacta (ver Figura 46).

Figura 46. Ejemplo de llenado de un sumidero.



5.3.2 Dirección de flujo. La dirección de flujo es el camino de descenso que tomaría el agua precipitada para cada celda en función de la máxima pendiente de descenso. Este es codificado dependiendo a la orientación de alguna de las ocho celdas que rodean la celda central usando los valores binarios que se ven en la figura 47.

Figura 47. Código de direcciones de flujo.



Si el flujo de la celda central es hacia la derecha, a ésta se le asigna la dirección de flujo 1 o si el flujo de la celda central es ascendente en el sentido vertical, a esta celda se le asigna el valor de dirección de 64. Para éstos cálculos de dirección de flujo se desprecian todos los efectos debidos a la inercia, fricción e infiltración, asignando a cada celda una y sólo una dirección de flujo entre ocho posibles. Esta dirección se supone que representa la dirección de todos los puntos al interior de la celda, en sentido físico desde la celda fuente hasta la celda adyacente de llegada.

Para una celda a evaluar, el flujo del agua sigue la dirección del gradiente local de energía potencial, igual a la pendiente del terreno. La forma en que el modelo estima la pendiente del terreno es muy simple, primero dada una celda c del MDE, se ubican las ocho celdas adyacentes, se estiman las inclinaciones del terreno entre la celda estudiada y las adyacentes, finalmente la pendiente en la celda estudiada es la menor de todas las calculadas con las adyacentes. (Ver figuras 48 y 49)

Figura 48. Asignación de la dirección de flujo para una celda teniendo en cuenta la elevación de las celdas adyacentes.

3620	3622	3623		3620	3622	3623
3619	3618	3620		3619		3620
3621	3617	3616		3621	3617	3616

La distancia es determinada entre los centroides de cada celda; de ésta forma si el tamaño de una celda es 1, la distancia entre celdas ortogonales es 1 y la distancia entre dos celdas diagonales será de 1,414214. De esta manera el número de celdas vecinas contribuye a determinar a una y solamente una dirección de flujo en cada celda de los posibles valores de direcciones en las que corre el flujo.

El proceso de evaluación de direcciones de flujo se determina para todas las celdas (Ver figura 49) del modelo de cuenca, y al código de dirección de flujo generalmente se le asigna un color para la representación visual de la cuenca en los SIG, el cual se denomina dirección de flujo normal. (Ver figura 50).

Figura 49. Distribución de direcciones de flujo para todas las celdas del modelo.

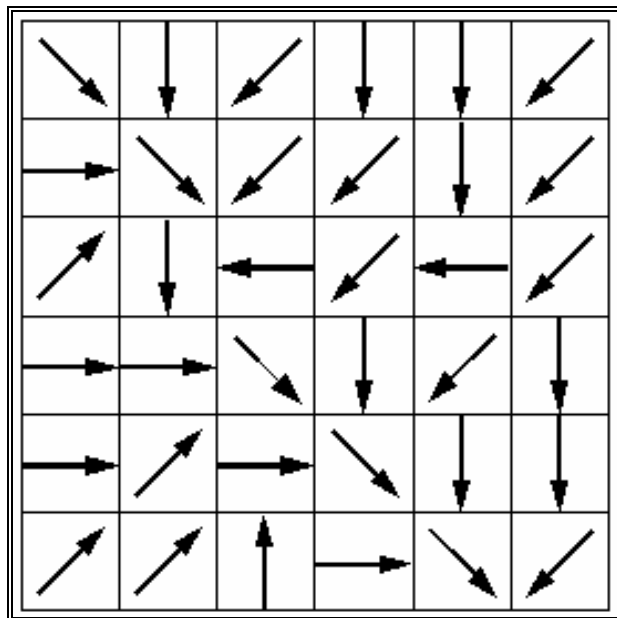
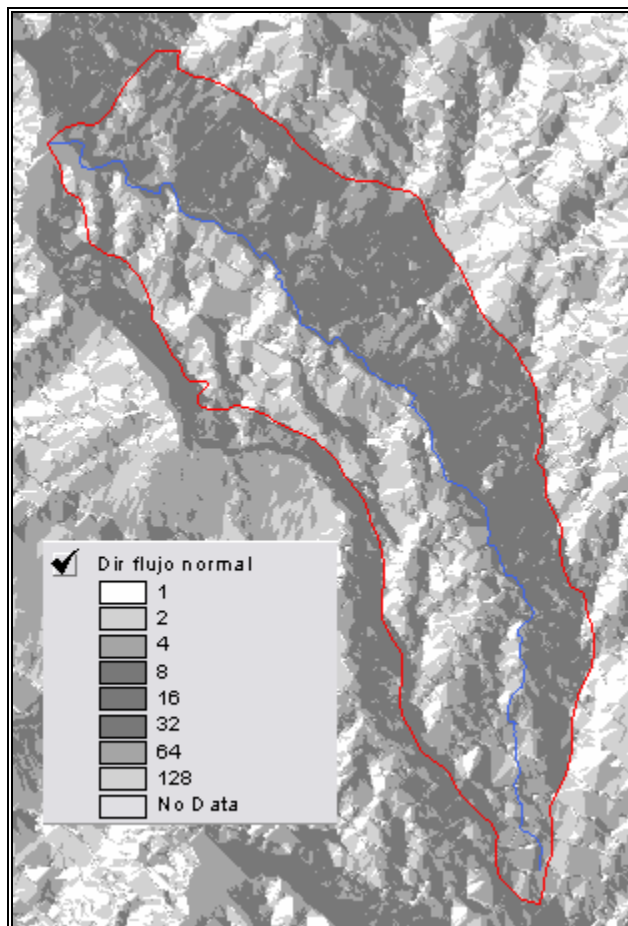


Figura 50. Ejemplo de flujo normal

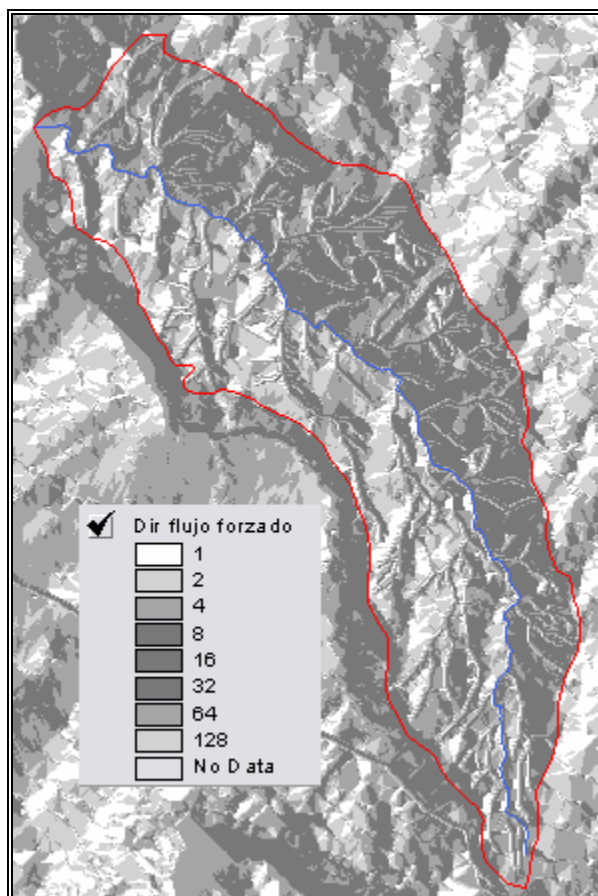


Tomado de: Microcuenca Río Negro, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

Con el propósito de modelar un mapa de direcciones de flujo más acorde con la realidad, se desarrolla un proceso que se denomina modelo de direcciones de flujo forzado. Consiste como su palabra lo dice, en forzar en el modelamiento las direcciones de flujo en dirección de los canales de la red de drenaje, teniendo como soporte la red de drenaje vectorial del área de estudio. Para éste proceso se necesita del MDE raster y de la red de drenaje vectorial traída desde Autocad.

El mapa de la red de drenaje se superpone sobre el MDE y se procede a eliminar los valores de altura de las celdas del MDE que se superponen con las celdas de la red, es decir se les asigna un valor de altura muy bajo, cero o uno; operación que se realiza desde el lenguaje de programación del SIG. Posteriormente sobre el MDE ya cortado se realiza el proceso de determinar el modelo de direcciones de flujo forzado, habiéndose corregido previamente los sumideros o hundimientos presentes en el MDE. La finalidad de reducir a un valor mínimo las celdas del MDE que contienen los canales de la red de drenaje es lograr el forzamiento de las direcciones de flujo en la dirección correcta, es decir a lo largo de los ríos contenidos en la información del mapa vectorial de la red de drenaje (ver figura 51).

Figura 51. Ejemplo de dirección de flujo forzado



Tomado de: Microcuenca Río Negro, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

Con la dirección del mapa de direcciones de flujo forzado se determina el mapa de flujo acumulado para posteriormente crear el mapa de la red de drenaje de la cuenca (procesos que se explicarán más adelante). El resultado de este procedimiento es importante ya que la estructura de la red de drenaje coincide con la información consignada en los planos cartográficos; además se trazan otros tramos que posiblemente pueden ser cauces efímeros que existen inmediatamente después de los eventos de

lluvia y transportan solo la escorrentía superficial o simplemente no fueron cartografiados previamente.

5.3.3 Flujo acumulado. Una vez procesado el MDE para determinar las direcciones de flujo, el modelamiento continúa en el cálculo del flujo acumulado para cada celda del modelo. El proceso consiste en analizar en sentido horizontal de la matriz de datos, cada una de las celdas con respecto a sus ocho celdas vecinas, procesando cuantas celdas aportan a una celda determinada y se procede a contabilizar y almacenar el número de celdas portantes. Para contabilizar las celdas es necesario como información base, el mapa raster de las direcciones de flujo; es importante resaltar que para cada celda se debe tener en cuenta la adición de las celdas acumuladas aguas arriba.

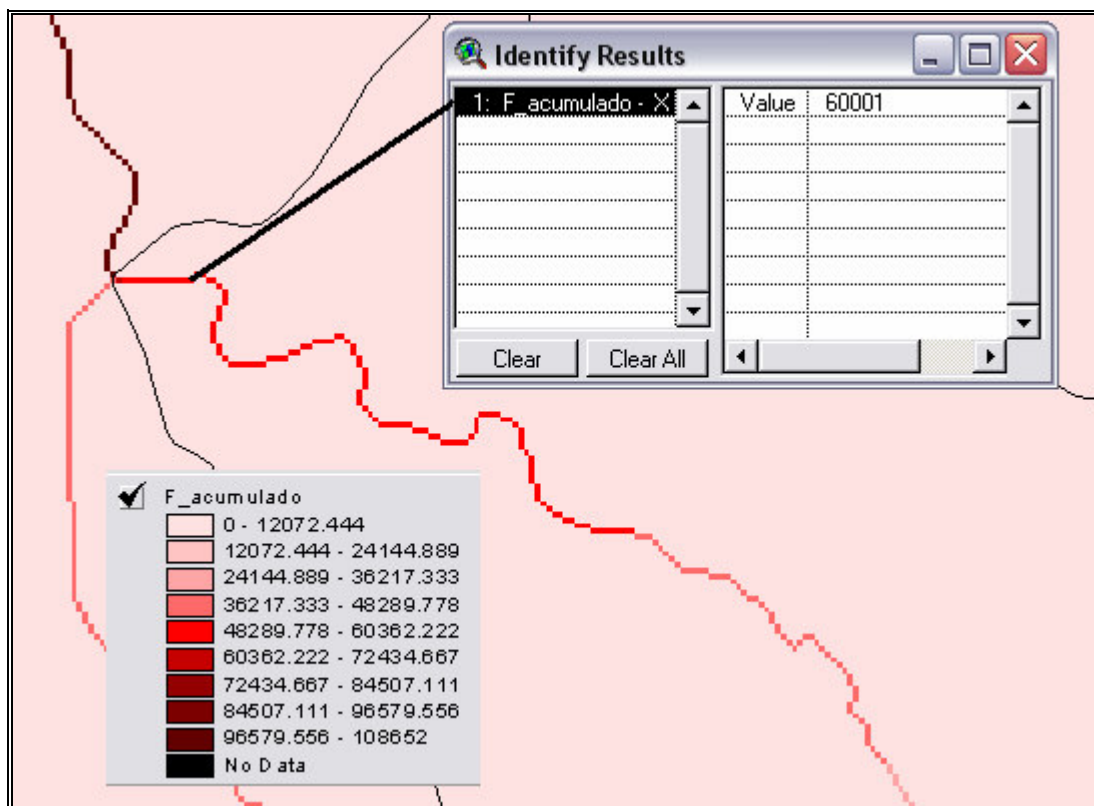
Cada uno de los datos del flujo acumulado se almacena en una matriz o mapa raster dentro del SIG el cual es utilizado para posteriores análisis. El mapa de flujo acumulado se define como la suma de lluvia que llega a cada una de las celdas desde aguas arriba, asumiendo que toda la lluvia se convierte en escorrentía y no hay intersección, evapotranspiración o pérdidas por el subsuelo. Las celdas con valores altos de flujo acumulado son áreas de concentración de flujo y pueden ser usadas posteriormente para determinar los canales de drenaje a partir de un valor de umbral para un subconjunto de celdas con flujo acumulado alto.

Las celdas con valor de flujo acumulado cero son puntos topográficos altos, usados posteriormente para determinar los bordes o el parteaguas de una subcuenca o subarea el valor de flujo acumulado está dado en números de celdas; que son las celdas del mapa que se localizan aguas arriba desde un

punto de drenaje o de interés por el usuario. El mapa de flujo acumulado permite conocer de forma rápida el área subsidiaria a una celda específica simplemente haciendo clic sobre la superficie del mapa; este valor se multiplica por el área de la celda del mapa.

En la figura 52 se puede observar un detalle en el punto de drenaje de la Microcuenca Río Negro, donde se analiza el valor de las celdas acumuladas en el punto de drenaje de la cuenca.

Figura 52. Mapa de flujo acumulado con ejemplo de celdas después de un punto



Tomado de: Microcuenca Río Negro, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

5.3.4 Delimitación del área subsidiaria. El área subsidiaria esta determinada por una línea imaginaria que encierra el área de confluencia. Esta línea que separa una subcuenca de las circundantes se denomina línea divisoria de aguas o parteaguas y en su trazado no debe portar ninguna corriente de agua, salvo a la salida de ella. El área subsidiaria tiene una gran influencia en la magnitud del caudal que de ella va a drenarse. Normalmente a medida que crece el área subsidiaria de la subcuenca así mismo lo harán los caudales promedio, mínimos o los máximos.

El trazado del parteaguas o la delimitación de subcuencas se puede determinar con dos metodologías generales: a partir de los tramos que conforman la red de drenaje, la cual es muy poco utilizada, o a partir de información de puntos de drenaje, estaciones de medición, etc. georeferenciados. Para el primer procedimiento, luego de tener los segmentos definidos de la red de drenaje de la cuenca, se procesa la delimitación del área de drenaje para cada segmento de río teniendo como soporte el mapa que contiene la información de direcciones de flujo.

El proceso comienza desde los puntos de salida o unión de cada tramo de río, buscando las celdas aguas arriba que confluyen a ese segmento de río a partir de la información contenida en el mapa de direcciones de flujo. Desde estos puntos de salida, mas las celdas aguas arriba de los segmentos de río, se les asigna un código o número de celda que es de igual valor al que contiene el segmento del río.

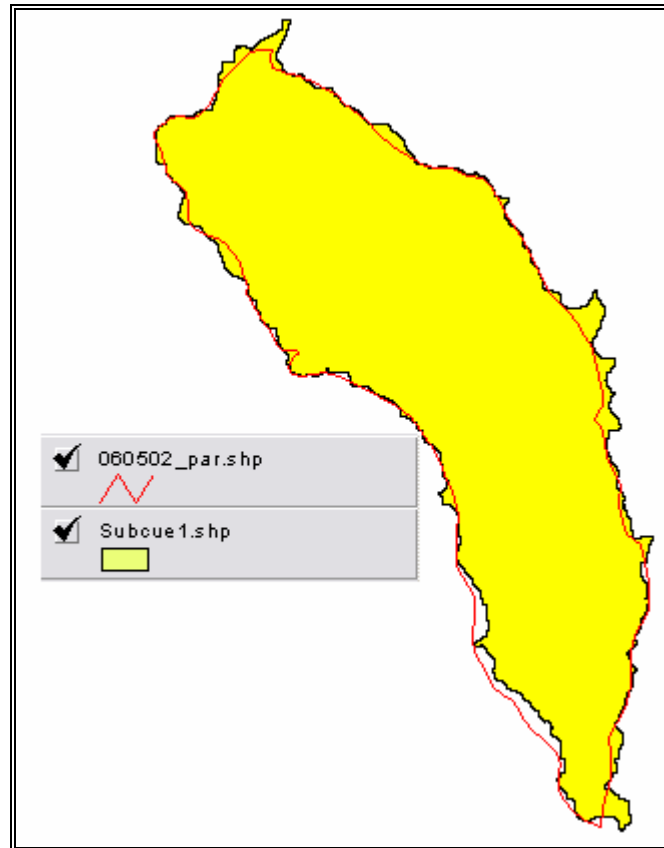
Cuando se procesa la delimitación de las cuencas a partir de puntos georeferenciados, el modelamiento necesita la información del mapa de flujo

acumulado y el mapa de las direcciones de flujo. Los puntos de salida o de drenaje son los puntos en los cuales los flujos de agua salen del área de la cuenca, por lo tanto cuando un punto es seleccionado por el usuario SIG sin ninguna referencia, puede ser que ocurra que ese punto no tenga un área de confluencia o ésta sea demasiada pequeña.

El resultado del mapa de área subsidiaria es una malla raster el cual es necesario transformar a un polígono vectorial. Este borde o límite obtenido a partir del proceso del MDE define en primera instancia el área de la cuenca y es utilizado para cortar uno de los mapas o modelos obtenidos previamente así como la información característica de la cuenca: mapas de vegetación, tipo y uso, pendiente, etc.

El parteaguas trazado por el programa generalmente no es el mismo trazado previamente en Autocad, sin embargo se debe procurar que la diferencia de áreas entre ellos no sea significativa para que los resultados obtenidos sean viables para la cuenca en cuestión (Ver figura 53); cuando los errores entre los dos trazados son significativos se hace necesario verificar en primera instancia el motivo de la discrepancia y luego corregir el parteaguas original.

Figura 53. Ejemplo de comparación entre los dos parteaguas, el amarillo es el trazado por el programa, el rojo es el trazado previamente en Autocad



Tomado de: Microcuenca Río Negro, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

5.3.5 Red de drenaje. Un canal es definido como la línea a lo largo del cual el sistema fluvial es dominado por el sistema de pendientes de la cuenca. Este concepto de dominios conduce a dos métodos básicos para definir la red de drenaje; uno se basa sobre la concavidad local de la superficie y otro sobre la información de flujo acumulado.

La red de drenaje de una cuenca la forma la precipitación cuando se transforma en caudal y que puede llegar a los canales naturales de la cuenca mediante las corrientes superficial, el flujo subsuperficial o ambos y esta se caracteriza por el río principal y sus afluentes. La red de drenaje puede definirse como los trayectos que a partir de un punto inicial sigue la línea de máxima pendiente; los afluentes finalizan al alcanzar un punto de unión con el río principal y el río finaliza al llegar al borde del modelo o al límite de la cuenca. El proceso de determinar la red de drenaje espacialmente es el soporte posterior para los cálculos del tiempo de concentración de la cuenca.

Con la información topográfica del MDE es posible identificar la forma y posición de los canales. A partir de un MDE y sus direcciones de flujo derivadas, es posible estimar las trayectorias del flujo sobre la superficie del terreno.

La mayor parte de los SIG con propósitos hidrológicos determinan la red de drenaje a partir de la información contenida en el mapa de flujo acumulado, aplicando una condición de umbral a todas aquellas celdas que reciban un número de celdas superior a dicho umbral; estas son consideradas como cauces. Mediante esta condición se establece una diferencia entre aquellas áreas cuyos escurrimientos no alcanzan un valor mínimo de umbral que se consideran como zonas con escorrentía no encauzada, y aquellas áreas que debido a su elevado valor de flujo acumulado han quedado transformadas en estructuras fluviales de importancia.

Aunque el valor de un umbral es predefinido a criterios del usuario; no existe mucha discusión con respecto a la formación de red de drenaje a partir del mapa raster del flujo acumulado.

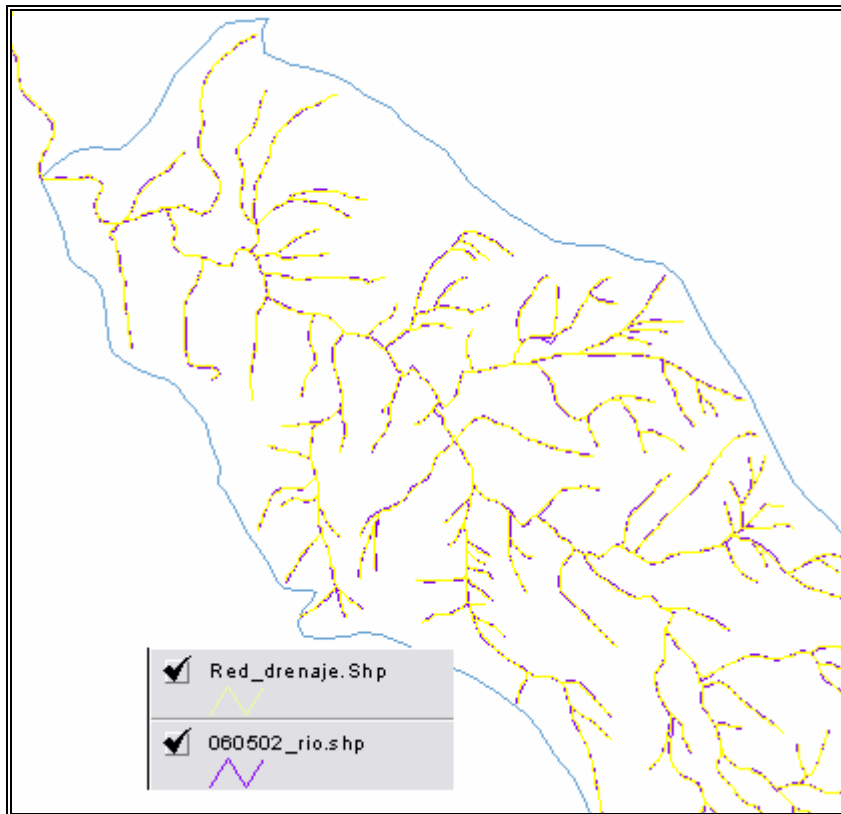
El trazado de la red de drenaje a partir de la información de flujo acumulado generalmente no es muy acorde con la realidad del terreno, por lo que la condición del umbral se le aplica a toda el área de la cuenca. No es cierto decir que el valor del umbral es el punto de inicio de la formación de las cabeceras de los canales para todo el área de la cuenca, la cabecera de un canal esta mas asociada a la forma de la cuenca y a la pendiente del terreno que en cierta forma determina la transición entre ladera y canal.

Para superar éste inconveniente se ha desarrollado en la herramienta SIG el trazado en la red de drenaje a partir de los puntos altos de las cabeceras de los ríos teniendo como información base el mapa raster de dirección de flujo. Esta información de puntos puede tenerse a partir de imágenes aéreas o satelitales de la cuenca de estudio, levantamiento con GPS o a través de la información cartográfica de la red de drenaje tomando desde Autocad la nube de puntos necesaria para el trazado. Para esto último es recomendable tener presente la calidad de la información digitalizada. El proceso consiste en trazar una línea para cada punto, el camino de máxima pendiente por donde viajaría el flujo, hasta llegar al límite de la cuenca o punto de drenaje. El algoritmo inicia desde cada punto de drenaje, analizando para cada celda cuál de sus ocho vecinas tiene la máxima pendiente para continuar con el recorrido de flujo trazando una línea entre los centroides de las celdas analizadas hasta alcanzar la salida de la cuenca.

Para éste estudio se obtuvo la red de drenaje a partir de la información cartográfica tomando desde Autocad la nube de puntos necesaria para el trazado; posteriormente se compara la red existente en dicha información cartográfica y se compara con la obtenida en el programa, igualmente se

estima si el error entre ellas es significativo para dar lugar a una corrección o a aceptarla como la red de drenaje a trabajar. (Ver Figura 54)

Figura 54. Comparación de la red de drenaje de AutoCAD con la de ArcView para la Microcuenca Río Negro perteneciente al Río Carare.



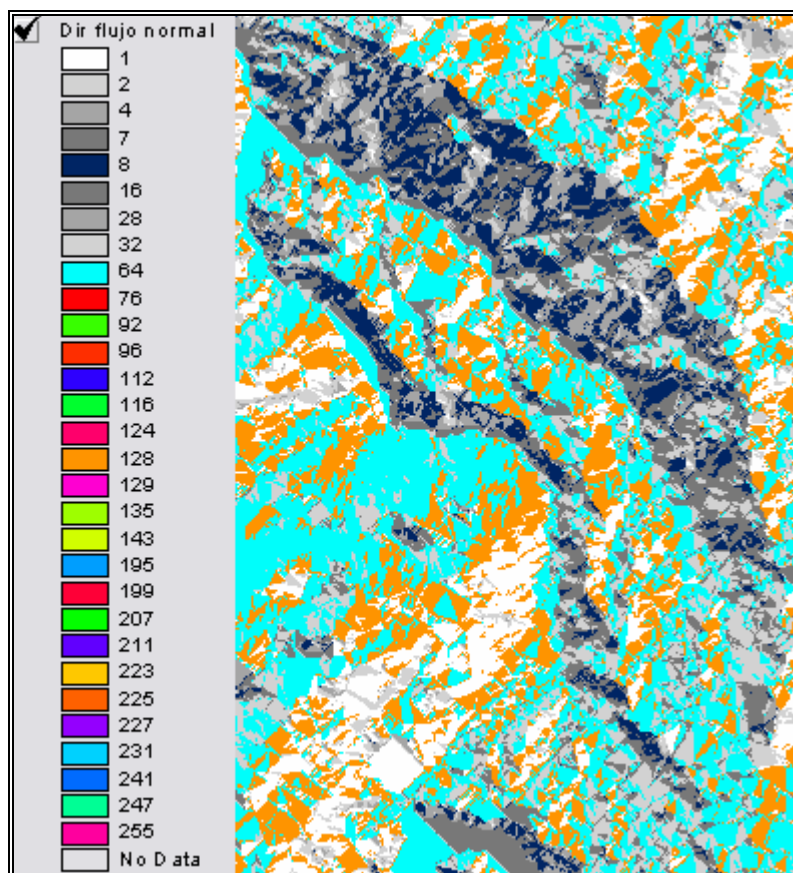
5.4 OBSERVACIONES, PROBLEMAS Y SOLUCIONES.

Los parámetros morfométricos anteriormente descritos se calcularon únicamente para las cuencas de segunda división, es decir, para treinta y seis en la Cuenca del Río Opón y veintiocho en la Cuenca del Río Carare. Estas cuencas se trabajaron en el Script limitándolas con un rectángulo que cubriera toda la cuenca y no con el parteaguas original para evitar la creación de elevaciones que no existen y que llevan a datos erróneos, en el momento

de la interpolación que realiza el TIN al crear el modelo digital de elevación (MDE). De las 64 cuencas que se simularon, 60 presentaron celdas bajas o sumideros en el momento de crear el MDE raster y se hizo necesario aplicar el proceso de llenado de éstas celdas para evitar que posteriormente los parámetros se calcularan de manera equivocada. A continuación se describen los errores que se presentaron en el proceso de modelamiento de las cuencas, con su respectiva solución y recomendación.

5.4.1 Error por no llenado de sumideros. Cuando existen celdas bajas o sumideros en la cuenca, no son llenadas y además se sigue trabajando con el MDE_raster, se genera en primera instancia un error en el cálculo del flujo normal ya que el modelo no puede calcular la pendiente máxima de descenso y por ello no se obtiene el código binario esperado sino uno muy diferente, éste error es muy visible y se soluciona simplemente aplicando el proceso de llenado a los sumideros y calculando el flujo normal con el raster_llenado (ver figura 55).

Figura 55. Ejemplo de error en el flujo normal por no utilizar el raster_llenado.



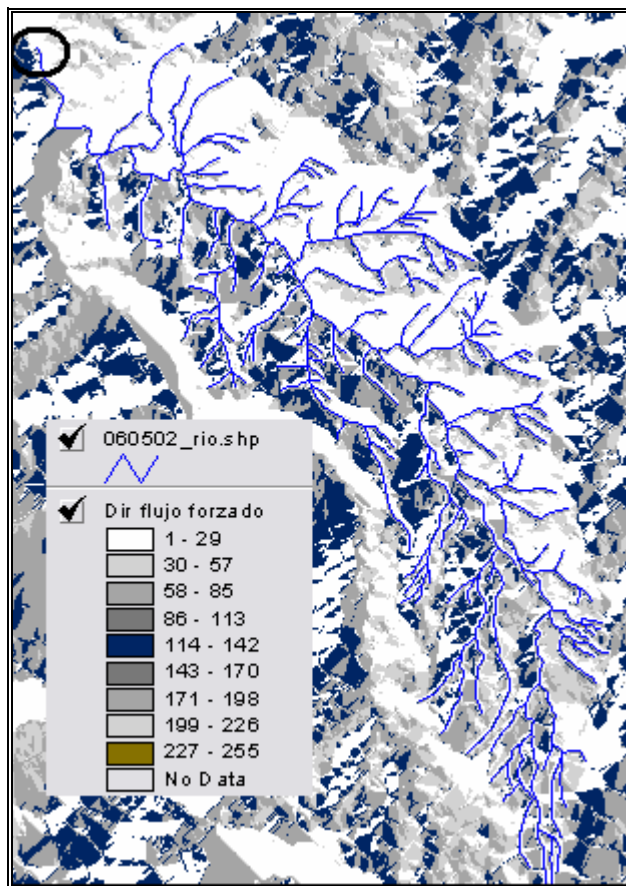
Tomado de: Microcuenca Río Negro, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

5.4.2 Error debido a las curvas de nivel. Otras veces cuando se pretende obtener la dirección de flujo normal no se obtiene la numeración convencional que garantiza que el flujo está bien hecho, y sí proporciona un intervalo para cada color representativo. Este error se debe generalmente a que aunque se hace una revisión minuciosa de todos los planos, cuenca, cuencas de primera división y de segunda división, se está sujeto a errores en las curvas de nivel, siendo más puntuales existen curvas de nivel que se

cruzan y éstas hacen que se genere un error en la construcción del flujo normal. Cuando se encuentra este error es necesario dirigirse a la información cartográfica contenida en Autocad y corregir dichas curvas para luego si obtener el flujo normal satisfactoriamente.

5.4.3 Error por la no continuidad de los ríos. En el caso del flujo forzado cuando no se obtiene la numeración convencional, se debe generalmente a un error existente en el archivo traído desde Autocad de ríos, muy posiblemente se debe a que los ríos no tienen un afluente al cual llegar, es decir, se encuentran sueltos y por lo tanto el programa no los reconoce; en éste caso es necesario dirigirse al archivo original desde Autocad y arreglar el río problema (ver figura 56).

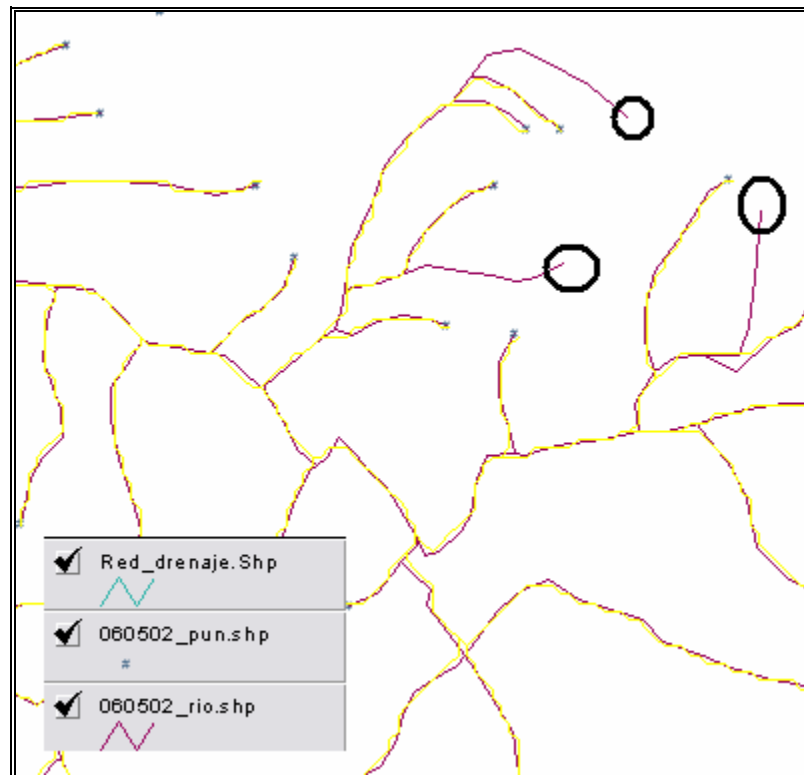
Figura 56. Ejemplo de error en flujo forzado debido a errores en los ríos.



Fuente: Microcuenca Río Negro, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

5.4.4 Error por la no colocación de puntos en la red de drenaje. Un error convencional es olvidar colocar algunos puntos en la red de drenaje desde Autocad, esto hace que la red calculada por el programa obvie los ríos que no tienen dichos puntos y no los tenga en cuenta en el cálculo de los parámetros en los que se requieran; en éste caso se debe volver al archivo que los contiene y agregar los olvidados para no generar futuros errores en los cálculos (ver figura 57).

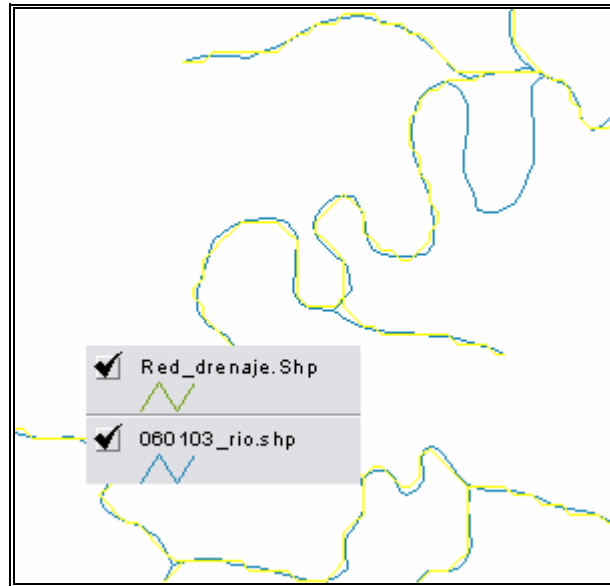
Figura 57. Ejemplo de error en la red de drenaje debido a puntos olvidados.



Tomado de: Microcuenca Río Negro, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

5.4.5 Error por topografía irregular. Cuando se presentan zonas con topografía irregular y cauces muy sinuosos; generalmente el programa no tiene en cuenta dicha sinuosidad y presenta un error en la red de drenaje alejándose de la red real; para éste problema la solución es mucho más compleja puesto que no es a nivel de archivos de Autocad sino a nivel de programación y de simulación de fenómenos que se aproximen mas a la realidad, por lo tanto en éstos casos se trabaja con la aproximación realizada por el programa asumiendo el error.(Ver figura 58).

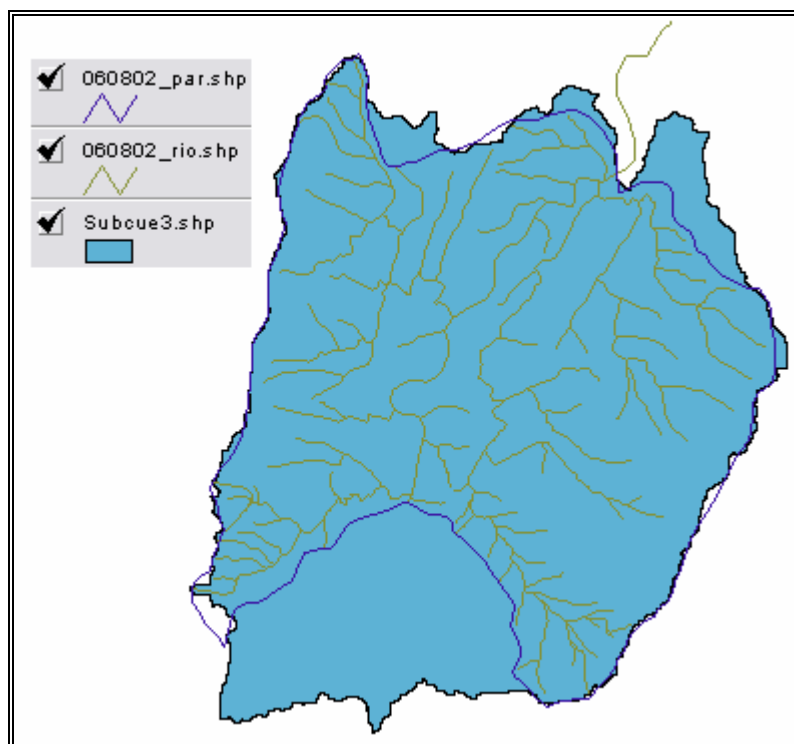
Figura 58. Ejemplo de error por ríos sinuosos.



Tomado de: la Cuenca Río Carare

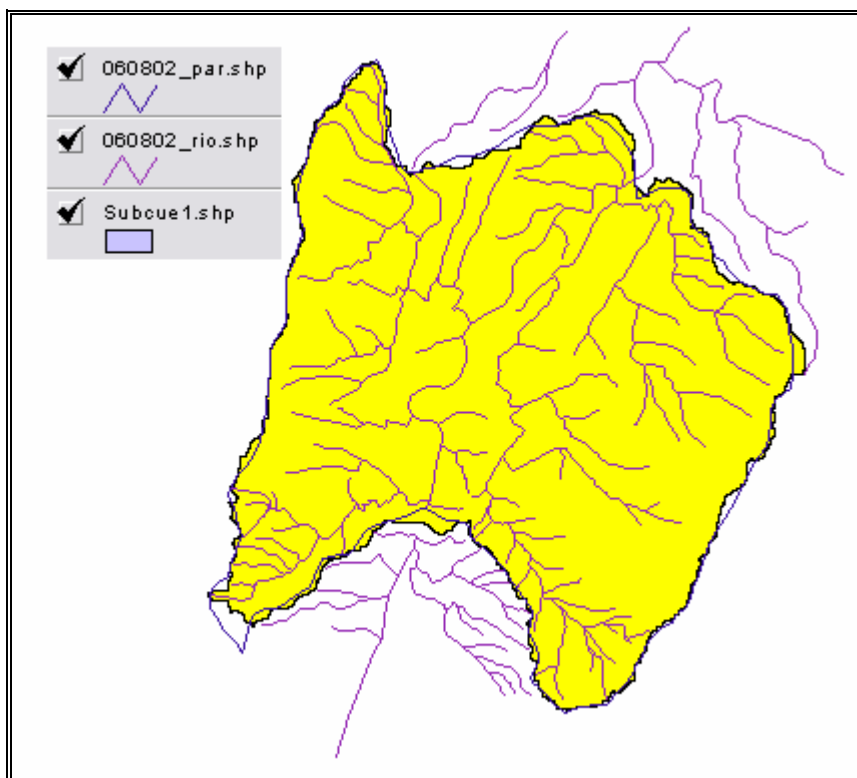
5.4.6 Error en el trazado del parteaguas. Un caso que se da muy a menudo es que el área del parteaguas original traído desde Autocad no coincida con el obtenido en el programa debido a que desde Autocad solo se traen los ríos que se encuentran dentro del parteaguas original y el programa solo los tiene en cuenta a ellos y olvida los ríos vecinos pertenecientes a otra cuenca; en éste caso es necesario agregar los ríos en donde se encuentra el error y así se obtiene un parteaguas más cercano al real (ver figuras 59 y 60).

Figura 59. Ejemplo de error en el cálculo del parteaguas en el programa, cuando es necesario agregarle ríos.



Tomado de: subcuenca Quebrada Campo Obando, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

Figura 60. Ejemplo parteaguas arreglado agregándole ríos.



Tomado de: subcuenca Quebrada Campo Obando, perteneciente a la Cuenca Río Carare.

6. RESULTADOS

La información obtenida para cada una de las cuencas estudiadas que incluyen la cuenca principal, y las cuencas de afluentes principales (primera división) y de afluentes secundarios (segunda división), representa su caracterización física, geográfica e hidrográfica y su ubicación con respecto a las planchas IGAC y los municipios del departamento de Santander. Por otro lado, la información recopilada de las planchas IGAC obedece a sus datos básicos, a la cobertura de municipios del departamento de Santander, cobertura de otros departamentos, cobertura de cuencas, presencia de zonas sin información, y observaciones generales.

La caracterización general de la cuenca principal corresponde a su ubicación y extensión, la división hidrológica realizada en este proyecto que incluyen los datos de los parámetros morfométricos y de la red de drenaje de cada una de las cuencas, y la interpretación de resultados mediante la observación directa de sus propiedades topográficas, su distribución hidrográfica, y la variación espacial de los parámetros obtenidos.

Teniendo en cuenta la necesidad de realizar operaciones de búsqueda y consulta, y la extensión y complejidad de los datos a nivel de cuencas y planchas, se resuelve organizar la información resultante en una base de datos y desarrollar un sitio Web que facilite su interacción con múltiples usuarios.

En este capítulo, se presenta el esquema de los resultados obtenidos de las cuencas y planchas IGAC, la caracterización general de la cuenca como interpretación de los resultados, la construcción de la base de datos, y el diseño y creación del sitio Web.

6.1 RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN

Los resultados obtenidos a nivel de planchas IGAC, cuenca principal, cuencas de primera división y cuencas de segunda división para las cuencas de los ríos Opón y Carare (a manera de ejemplo se colocan las del río Opón) corresponden a los mostrados en las tablas 20, 21, 22 y 23.

Tabla 20. Ficha técnica de las planchas.

FICHA TECNICA PLANCHAS	
INFORMACION GENERAL	
Nombre	134 III B
Escala	1:25.000
Año de Publicación	1975
Tipo de Carta	GENERAL
Versión digitalizada por	Grupo de Geomática
Medio Impreso	Disponible
Fotografías aéreas	Diciembre de 1971
Clasificación de Campo	Marzo - Diciembre de 1974
Restitución	Febrero de 1975
Revisión	Marzo de 1975
Porcentaje de Restitución (*) (**)	0%
Porcentaje de nubes (**)	0%
Municipios relacionados	Cimitarra, Landázuri
Cuencas relacionadas	Cuenca Opón, Cuenca Carare, Q. la Natividad, Q. la Perdida, Q. Amarilla, Q. Campo escondido, Río Guayabito, Río Oponcito.
(*) Restitución realizada por el proyecto HidroAtlas	
(**) Porcentaje con respecto al área de la plancha.	

Tabla 21. Ficha técnica de la cuenca del Río Opón.

CUENCA DEL RÍO OPON	
INFORMACION GENERAL	
Código	050000
Nombre	Río Opón
Orientación	Norte - Oeste
Río donde desemboca	Río Magdalena
Area total	3871.68 Km2
Area trabajada	2597,63 Km2
Perímetro total	357,7 Km.
Perímetro trabajado	136,93 Km.
Longitud del cauce principal trabajado	184.69 Km.
Elevación máxima trabajada	3400 msnm.
Elevación mínima trabajada	100 msnm.
Porcentaje modelado*	67.09%
Porcentaje trabajado**	67,09%
Municipios relacionados con la cuenca trabajada	Barrancabermeja, Bolívar, Chima, Cimitarra, Contratación, El Carmen, El Guacamayo, Hato, Landázuri, La Paz, Puerto Parra, Santa Helena del Opón, Chipata, San Vicente de Chucurí, Simacota, Vélez.
Total municipios	16
Municipios relacionados con el cauce principal	Barrancabermeja, Puerto Parra, Simacota, Velez, Santa Helena del Opón.
Planchas relacionadas a la cuenca trabajada	119 II D, 119 III A, 119 III B, 135 III C, 150 IV C, 150 IV D, 119 IV A, 119 IV B, 120 III A, 134 II B, 135 I A, 119 III C, 119 III D, 119 IV C, 134 I C, 134 I D, 119 IV D, 120 III C, 134 I A, 134 I B, 134 II A, 134 IV B, 135 III A, 134 III D, 134 IV C, 134 IV D, 150 I B, 150 II A, 150 II B, 151 I A, 150 I D, 150 II C, 150 II D, 151 I C, 150 IV A, 150 IV B, 134 II C, 134 II D, 135 I C, 134 III B, 134 IV A
Total planchas	41
Planchas relacionadas con el cauce principal	119 III A, 119 III B, 119 III C, 119 III D, 134 I B, 134 I D, 134 II C, 134 IV A, 134 IV C, 134 IV D, 150, II A, 150 II B.
Primeras divisiones	
No. de Cuencas	2
No. de Subcuencas	10
No. de Microcuencas	-
No, Total de Primeras	12
Segundas Divisiones	
No. de Subcuencas	6
No. de Microcuencas	30
No. de Sectores hidrológicos	-
No. de Unidades hidrológicas	-
No. de cuencas endorréicas	-
No, Total de segundas	36
* Porcentaje tomado con respecto al área trabajada de la cuenca	
** Porcentaje tomado con respecto al área total de la cuenca	

Tabla 22. Ficha Técnica de la Subcuenca del Río Dibita.

FICHA TECNICA CUENCAS DE PRIMERA DIVISION	
INFORMACION GENERAL	
Código	050100
Nombre	Río Dibita
Orientación	Este - Oeste
Río donde desemboca	Río Oponcito
Area	155.77 Km ²
Perímetro	57.01 Km.
Longitud del Cauce principal	25.64 Km.
Elevación máxima	3000 msnm.
Elevación mínima	500 msnm.
Municipios relacionados con la cuenca	Contratación, El Guacamayo, La Paz, Santa Helena del Opón
Municipios relacionados con el cauce principal	Contratación, El Guacamayo, Santa Helena del Opón
Planchas relacionadas con la cuenca	150 II B, 150 II D, 151 I A, 151 I C
No. planchas que comprende	4
Planchas relacionadas con el cauce principal	150 II B, 150 II D, 151 I A.
Límites geográficos	Norte - Río Opón, Sur - Río Oponcito, Oeste - Río Oponcito Alto.
Segunda división	
No. de Subcuencas	-
No. de Microcuencas	3
No. de Sectores hidrológicos	-
No. de Unidades hidrológicas	-
No. de Cuencas endorréicas	-
No. total de segundas divisiones	3

Tabla 23. Ficha Técnica de la Microcuenca Quebrada Aurora

FICHA TECNICA CUENCAS DE SEGUNDA DIVISION	
INFORMACION GENERAL	
Código	050102
Nombre	Quebrada Aurora
Tipo de cuenca	Microcuenca
Orientación	Norte - Este
Río donde desemboca	Río Dibita
Afluente principal relacionado	Río Dibita
Area	47,45 Km ²
Perímetro	31,62 Km.
Municipios relacionados con la cuenca	Contratación, El Guacamayo
Planchas IGAC relacionadas con la cuenca	150 II B, 150 II D, 151 I A, 151 I C.
Municipios relacionados con el cauce principal	Contratación.
Planchas IGAC relacionadas con el cauce principal	150 II D, 151 I C.
Parámetros morfométricos de la red de drenaje	
Longitud del cauce principal	13,90 Km.
Longitud del recorrido máximo	14,71 Km.
Orden	4
Longitud red de drenaje	160,45 Km.
Densidad de drenaje	3,38 Km / Km ²
Pendiente del cauce principal por el método de los extremos	0,12%
Pendiente del cauce principal por el método de Taylor	7,82%
Parámetros morfométricos de la cuenca	
Elevación máxima	3000 msnm
Elevación mínima	1200 msnm
Elevación mediana	2075,94 msnm
Elevación media	2031,5 msnm
Factor de forma (Kf)	0,25
Coefficiente de compacidad (Kc)	1,29
Coefficiente de masividad (Km)	41,68
Pendiente media de la cuenca	33,24%
Pendiente de la cuenca Alvord	41,60%
Indice de alejamiento medio (a)	2,02
Tiempo de concentración por el método de Kirpich	13,67 min.

6.2 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LAS CUENCAS

El Valle del río Magdalena, al cual pertenecen las cuencas de los ríos Opón y Carare, ubicado entre las cordilleras central y oriental, ha estado ligado estrechamente al desarrollo histórico de Santander no solo porque durante varios siglos fue la principal vía de comunicación sino también porque en sus márgenes se ha desarrollado un dinámico proceso de poblamiento, principalmente en los puertos de Barrancabermeja y Puerto Wilches. El valle

del Magdalena constituye una de las regiones productivas más dinámicas, donde se encuentra buena parte de las expectativas sobre el futuro económico del departamento.

A nivel hidrológico, dentro de sus importantes sistemas se encuentran las ciénagas que se localizan especialmente a lo largo del Valle del río Magdalena, entre los municipios de Barrancabermeja y Puerto Wilches y en las inmediaciones de los ríos Carare, Opón y Oponcito, donde son considerados como reservas y zonas de protección. Dentro de éstas ciénagas importantes se resaltan la Ciénaga del Opón, la Ciénaga Cachimbero, la Ciénaga río Viejo y la Ciénaga Chucurí.

Las ciénagas cumplen una función en el sistema hidrológico del departamento en la región del Magdalena medio, específicamente como reguladores del régimen de caudales. Estos sistemas hídricos admiten volúmenes considerables de agua en épocas de invierno, amortiguando los altos caudales y luego aportando el volumen almacenado en los ríos, en épocas de estiaje.

Aunque el río Opón tiene una superficie menor que los ríos Carare y Lebrija, pertenece a la región del Valle del Magdalena y tiene su nacimiento en las estribaciones de la cordillera de los Cobardes, la cual es una de las zonas de mayor precipitación en el departamento. Esto determina que se eleve la producción de agua por kilómetro cuadrado.

El río Carare presenta características similares, pues transita por el valle del río Magdalena, pero a diferencia del Opón su longitud es mayor y atraviesa por zonas de diferentes distribuciones de lluvia.

El brillo solar medido en horas sol año, tiene alta incidencia en los procesos de evaporación y evapotranspiración que se suceden en ésta región. El alto brillo solar en el Magdalena medio está asociado a la no existencia de obstáculos geográficos, lo cual permite la recepción por parte de la superficie terrestre de un mayor número de horas de sol al día a diferencia de las regiones que presentan relieves quebrados.

En las cuencas del río Opón y Carare se puede encontrar Carbón, mineral muy importante para la economía de la región, en la cuenca del Opón se puede apreciar el mineral cerca al río Cascajales mientras que en la del Carare se aprecia en las inmediaciones del municipio de Landázuri.

En las cuencas en estudio se puede apreciar una gran variedad de fauna en donde se encuentran peces migratorios del sistema magdalénico como Bocachico, Bagre pintado, Blanquillo, Capaz, Dorada, Doncella, Incurro, Picuda y Tolomba; peces de ambientes lenticos del sistema magdalénico como Pacara, Mojarra amarilla, Perro o Moncholo, Arenca, Cuatro ojos, Sardina y Cucho; pequeños reductos faunísticos terrestres intervenidos frecuentemente por el hombre, áreas de reproducción de peces migratorios, fauna terrestre introducida (Bovinos, porcinos, caprinos, aves, etc.) y criaderos de peces.

A nivel de flora, se encuentran bosques naturales localizados en las cuencas alta y media de los ríos Carare y Opón, en la llamada cordillera de los Cobardes, con algunos relictos en la zona plana del Magdalena medio.

En éstas cuencas predomina la ganadería, la explotación minera e hidrocarburos, el sorgo, maíz, yuca, plátano y cacao.

Los cultivos de cacao se localizan en inmediaciones de los municipios del Playón, Rionegro, San Vicente de Chucurí y en la provincia de Vélez hacia la región del Carare y el Opón. Merece especial mención la guayaba, producto que se cultiva en la región de la provincia de Vélez, en los municipios de Guabatá, Puente nacional, Barbosa, Vélez, Sucre y Jesús María.

A continuación se hace una breve caracterización de las cuencas de los ríos Opón y Carare por separado, para más adelante apreciar su comportamiento en el régimen hidrológico, con el estudio morformétrico realizado a cada una de ellas.

6.2.1 Cuenca del Río Opón. La Cuenca del Río Opón, es una de las más importantes del sistema hidrográfico de Santander cuya corriente nace en la Serranía de los Cobardes y desemboca en el Río Magdalena, después de haber recibido los aportes de los ríos La Colorada, Oponcito, Cascajales y Quiratá, además las corrientes menores como las quebradas Arrugas, Dorada y los Indios.

A nivel hidrológico, las precipitaciones generadas sobre ésta región son de origen convectivo, se observan dos centros de altas precipitaciones y uno está ubicado sobre la Ciénaga del Opón.

A nivel de flora encontramos bosque muy húmedo premontano, bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical.

Estudios recientes han permitido evaluar dos yacimientos importantes y diferentes en cuanto a la calidad del carbón. El primero denominado San Luis se encuentra en el valle medio del Magdalena en las primeras estribaciones de la cordillera oriental y pertenece a los municipios de San Vicente y El Carmen.

Existe una franja que muestra prospecto, y es la franja sur de San Luis, que se extiende desde el río Opón pasando por Landázuri y Cimitarra y al norte del primer municipio.

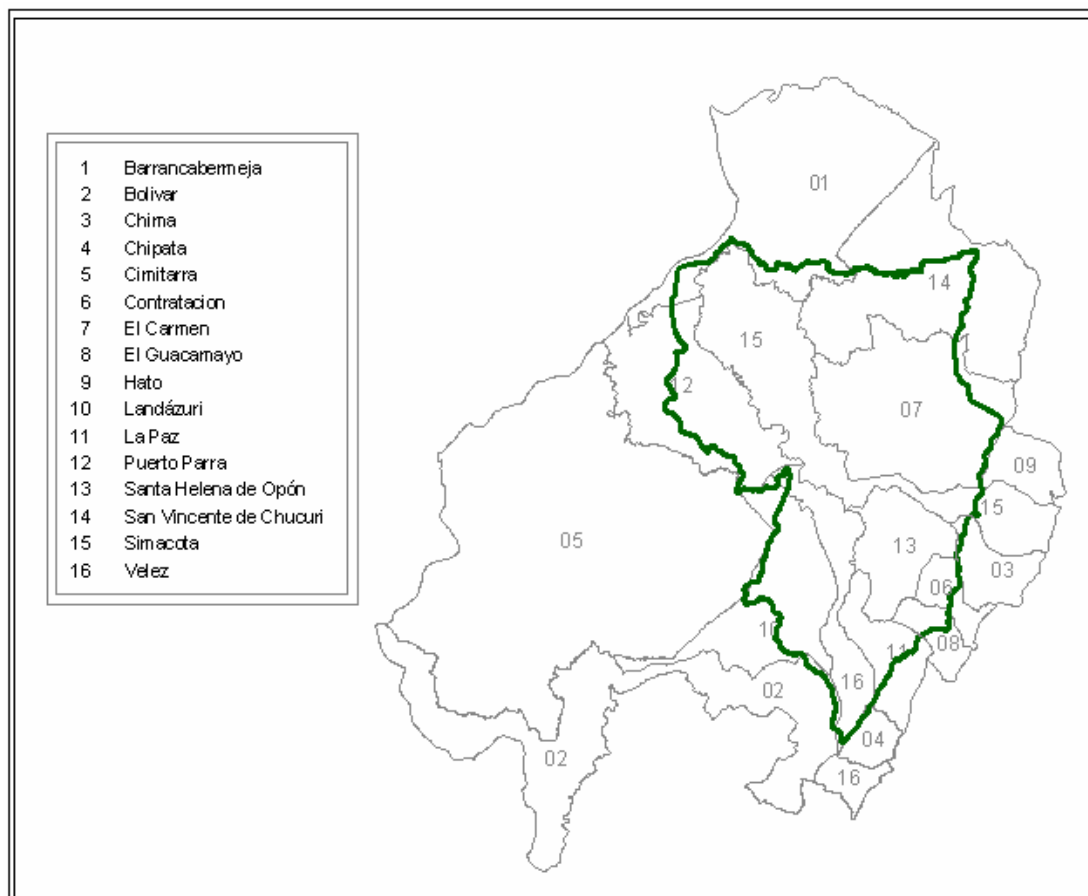
En la parte alta de la cuenca se encuentran rocas sedimentarias del terciario, Rocas de Paleoceno – Oligoceno que comprende formaciones de Lisama, La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorada, Valle medio y Barco, los Cuervos, Mirador y Carbonera de la cuenca de Maracaibo; y Rocas del Mioceno – Plioceno que comprende el Grupo real del Valle medio Magdalena.

En la parte media y baja de la cuenca se encuentran rocas sedimentarias del cuaternario, Aluviones y Formación de mesa como arcillas, arenas y gravas poco cementadas.

La cuenca del río Opón posee suelos Ch (suelos de clima húmedo, en relieve ondulado, moderadamente bien drenados, poco evolucionados y desaturados), Aa (suelos mal drenados, poco evolucionados, desarrollados en áreas depresionales e inundables) y Vc (suelos de clima cálido, húmedo y muy húmedo en relieve quebrado a muy quebrado, poco a moderadamente evolucionado y generalmente desaturados).

La cuenca se encuentra entre las provincias de Mares, Comunera y de Velez. Los municipios santandereanos que hacen parte de la cuenca del Opón son: Barrancabermeja, Bolivar, Chima, Chipatá, Cimitarra, Contratación, El Carmen, El Guacamayo, Hato, Landázuri, La Paz, Puerto Parra, Santa Helena del Opón, San Vicente de Chucurí, Simacota y Vélez. (Ver figura 61).

Figura 61. Municipios que cubren el área de la cuenca del río Opón.



Para lograr la caracterización física de la cuenca del río Opón se trabajaron 41 planos cartográficos en escala 1:25000 provenientes del IGAC y suministrados por el grupo de investigación en Geomática –Gestión y Optimización de Sistemas adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Los planos fueron sometidos a revisión depuración y en muchos casos se hizo necesario restituirlos teniendo cuidado de guardar las normas que para ello dicta el IGAC, este proceso se realizó con el fin de obtener buenos resultados en el cálculo de los parámetros morfométricos.

Con el propósito de facilitar la caracterización morfométrica y teniendo en cuenta el área que cubre la cuenca del Opón (3871.68 Km²) se hizo necesario dividirla en 12 sub-regiones de menor área llamadas subcuencas (Figura 62), dicha subdivisión se hizo teniendo en cuenta que a partir de la visualización de la topografía se identifica en primera instancia la distribución de la red de drenaje y se determina de manera previa una línea divisoria de aguas que encierra el área de confluencia; posteriormente con un análisis detallado de las curvas de nivel y ríos se traza la divisoria de aguas definitiva observando que el movimiento del agua sea a favor de las máximas pendientes, esta delimitación corresponde al primer parteaguas. A continuación se identifican los afluentes primarios que desembocan en el cauce principal de la red de drenaje y se sigue el mismo procedimiento para determinar la línea que encierra el área subsidiaria, siendo esta el segundo parteaguas que delimita la primera división; la suma de estas áreas subsidiarias debe totalizar el área de confluencia definida inicialmente. Si se ve la necesidad de discretizar esta última división se efectuará nuevamente el proceso siguiendo el mismo criterio, obteniendo así el tercer parteaguas que delimita la segunda división.

Esta división incluye 12 cuencas de primera división (ver figura 62), de las cuales se obtienen 36 cuencas de segunda división descritas en la tabla 24.

Figura 62. Cuencas de primera división para la cuenca del Río Opón.

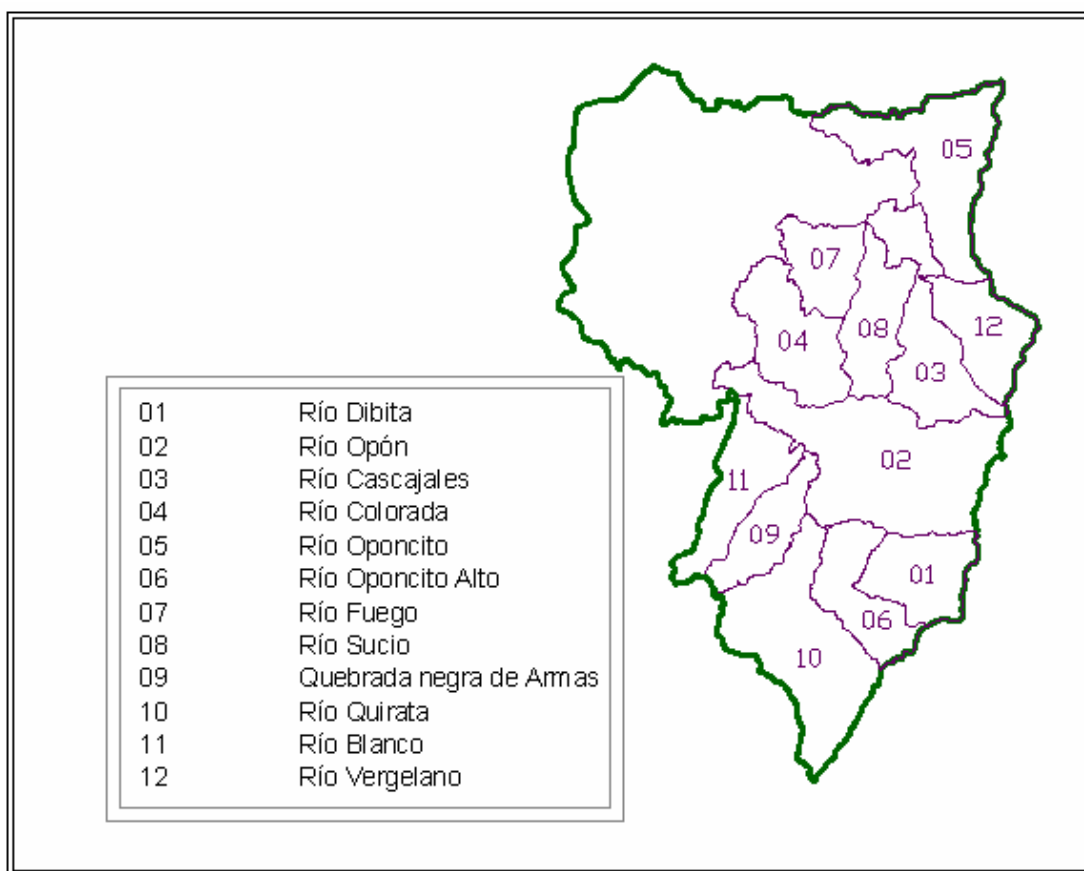


Tabla 24. Cuencas de primera y segunda división para el Río Opón.

CUENCA RÍO OPON	
PRIMERA DIVISIÓN	SEGUNDA DIVISIÓN
Río Dibita	Quebrada Chucureña Quebrada Aurora Quebrada El Oso
Río Opón	Quebrada Colorada Quebrada La Campana Río La Verde Río Opón Bajo
Río Cascajales	Quebrada Playitas Quebrada la Sardina Quebrada Villaquirá
Río Colorada	Quebrada Agua Clara Caño Babillo Río Colorada Medio Quebrada la Mugrosa
Río Oponcito	Quebrada El Consuelo Quebrada La India Caño Arenoso
Río Oponcito Alto	Río Manso Quebrada las Flores
Río Fuego	Caño Inesita Caño el Santuario
Río Sucio	Quebrada Bolales Quebrada del Salto Caño los Cauchos
Quebrada Negra de Armas	Quebrada la Pava Quebrada Bombal
Río Quiratá	Quebrada del Pedregal Quebrada la Merinaque Quebrada la Hermosura
Río Blanco	Río Blanco Alto Río Blanco Medio Quebrada Larga
Río Vergelano	Río Honduras Río Vergelano Alto Quebrada la Azufrada Quebrada la Honda

Las cuencas de segunda división son sometidas a un proceso en el que se obtienen los parámetros morfométricos y de la red de drenaje a partir de los MDE de cada una de las cuencas. Para la cuenca en estudio se modelaron

36 cuencas de segunda división. En el anexo B se observan los resultados referentes al área, perímetro, longitud, elevación, forma, pendiente del cauce principal, tiempo de concentración (tc), alejamiento, densidad, orden y longitud de red.

6.2.2 Cuenca del Río Carare. Las cabeceras del río Carare se hallan en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. el río desciende por zonas muy escarpadas de la cordillera oriental, siguiendo un rumbo nor-occidental, con el nombre de río Minero. Al unirse al río Horta, en la llanura aluvial del Piedemonte (200 m.s.n.m.) toma el nombre del río Carare.

El valle del Magdalena tiene la conformación geológica de una cuenca sedimentaria. El origen del valle tuvo lugar durante el terciario y su formación se efectuó más o menos en la época de la gran actividad neo-volcánica de la cordillera central. Se destaca además el aporte de los glaciares que con sus aguas formaron los depósitos diluviales que descansan sobre capas terciarias.

La cuenca alta del río Minero se caracteriza por la presencia de conjuntos de rocas del cretáceo. En las laderas de la montaña sobresalen lutitas y caliza; a medida que se desciende se observan formaciones más jóvenes pertenecientes al terciario. En colinas y niveles altos de terrazas, areniscas y limonitas alternas con las lutitas o las arcillas. La parte baja del río Carare hasta su desembocadura en el Magdalena corresponde a formaciones del cuaternario. en ésta área se presenta una mayor y reciente sedimentación, siendo los materiales básicos depositados arenas, limos y arcillas.

En las planicies aluviales, valles, terrazas y colinas bajas, predomina un clima cálido – húmedo con una biotemperatura media superior a 25°C y una

precipitación anual entre 2000 y 4000 mm. durante todo el año llueve pero con distinta intensidad según los meses. De acuerdo con el sistema de formaciones vegetales, el área comprende: bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo premontano. La región se puede clasificar dentro de los climas cálido, húmedo y muy húmedo del valle medio del río Magdalena.

Teniendo en cuenta las características físicas y químicas, la posición fisiográfica y el estado de evolución, es posible dividir los suelos de la región en dos grandes grupos. Por una parte los suelos de montaña, colinas y terrazas; son en general suelos desaturados y muy ácidos, en los cuales prima la evolución sobre la sedimentación, son propensos a la erosión y poseen baja fertilidad.

Por otra parte se destacan los suelos de planicie de inundación. Estos son suelos jóvenes, saturados, en los cuales prima la sedimentación sobre la evolución. Tienen problema de humedad y drenaje.

La cuenca del río Carare se trata de la mayor reserva boscosa del centro del país. En las últimas décadas con la llegada de carreteras y ferrocarril, la tala de bosques ha sido indiscriminada. Las famosas selvas del Carare – Opón se transforman aceleradamente en extensos potreros dedicados a la ganadería.

Son innumerables las especies arbóreas, arbustivas y herbáceas nativas e introducidas, que se encuentran en la zona. Se destacan excelentes especies maderables que han atraído a numerosos aserradores no obstante las dificultades de penetración. Algunas especies características son: abarco, ají, coco cristal, guayacán, sangre toro, ceiba bonga, balso, caimito, cedro y guamo.

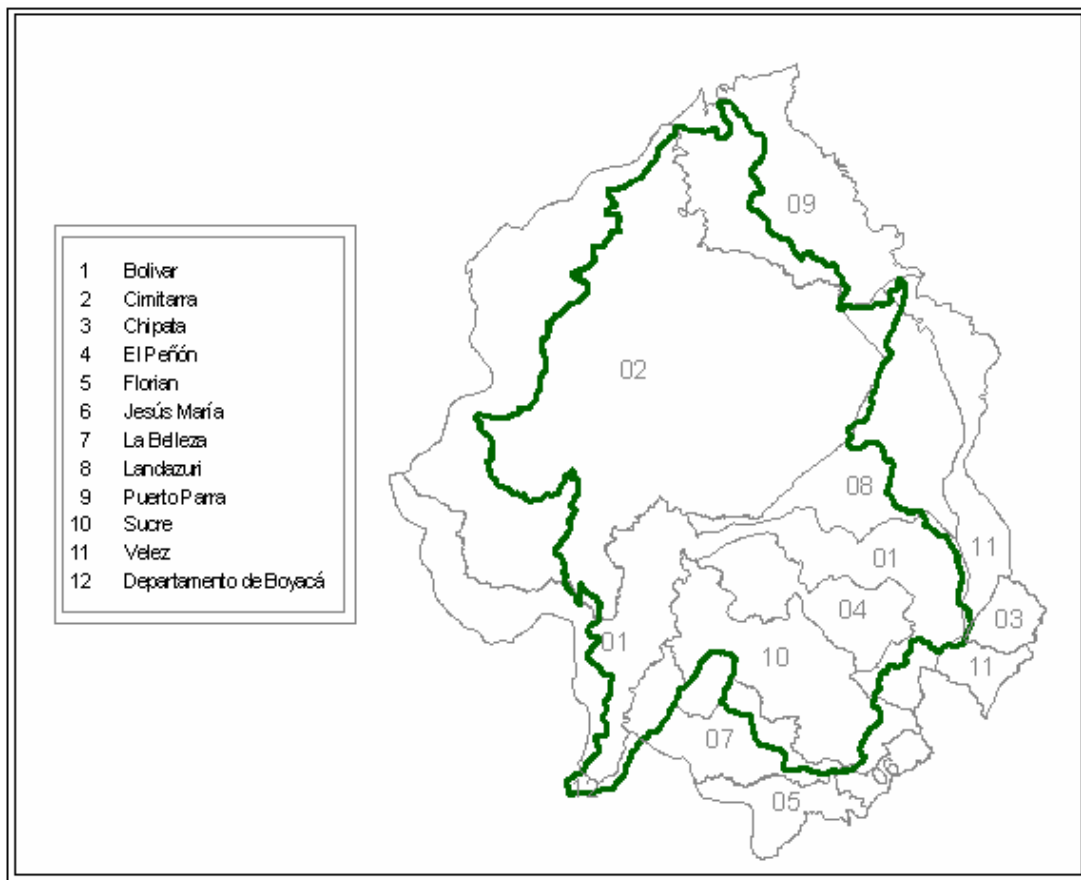
Navegando actualmente por los ríos Carare y Minero, aún es posible encontrar algunos caimanes y tortugas asoleándose en las playas. Sin embargo, la extrema reducción de las áreas boscosas así como la cacería incontrolada han afectado la heterogeneidad y abundancia de la fauna silvestre. No obstante aún se encuentra inmensa variedad de insectos, aves, reptiles y mamíferos así como distintos tipos de peces en las quebradas y en los ríos. Se destacan entre otros: tinajo, guatinaja, zaíno, conejo, entre los peces sobresalen: bocachico, bagre blanco, barbudo y nícuro.

Los conquistadores y cronistas españoles mencionan la presencia de grupos indígenas con características caribes poblando las riberas selváticas del río Magdalena y sus ríos tributarios. Los Yariguíes y Carares fueron muy temidos por la utilización de flechas y dardos envenenados y por sus continuos ataques a mercaderes y poblaciones españolas. Nunca se dejaron someter y sus asaltos fueron tan frecuentes que llegaron a comprometer seriamente el comercio por el río Magdalena.

Los campos petrolíficos de Santander están localizados en el valle medio del Magdalena, al norte del río Carare y hasta los límites con el norte de Santander.

La cuenca se encuentra entre la provincia de Vélez en Santander y los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Los municipios santandereanos que hacen parte de la cuenca del Carare son: Albania, Florián, Jesús María, La Belleza, Sucre, El Peñón, Bolívar, Landázuri, Cimitarra, La Paz, Puerto Parra y Barrancabermeja. (Ver figura 63).

Figura 63. Municipios que cubren el área de la cuenca del río Carare.



Para lograr la caracterización física de la cuenca del río Carare se trabajaron 52 planos cartográficos en escala 1:25000 provenientes del IGAC y suministrados por el grupo de investigación en Geomática –Gestión y Optimización de Sistemas adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Los planos fueron sometidos a revisión depuración y en muchos casos se hizo necesario restituirlos teniendo cuidado de guardar las normas que para ello dicta el IGAC, este proceso se realizó con el fin de obtener buenos resultados en el cálculo de los parámetros morfométricos.

Con el propósito de facilitar la caracterización morfométrica y teniendo en cuenta el área estudiada que cubre la cuenca del Carare (4550.90 Km²) se hizo necesario dividirla en 8 sub-regiones de menor área llamadas subcuencas (Figura 64), dicha subdivisión se hizo teniendo en cuenta que a partir de la visualización de la topografía se identifica en primera instancia la distribución de la red de drenaje y se determina de manera previa una línea divisoria de aguas que encierra el área de confluencia; posteriormente con un análisis detallado de las curvas de nivel y ríos se traza la divisoria de aguas definitiva observando que el movimiento del agua sea a favor de las máximas pendientes, esta delimitación corresponde al primer parteaguas. A continuación se identifican los afluentes primarios que desembocan en el cauce principal de la red de drenaje y se sigue el mismo procedimiento para determinar la línea que encierra el área subsidiaria, siendo esta el segundo parteaguas que delimita la primera división; la suma de estas áreas subsidiarias debe totalizar el área de confluencia definida inicialmente. Si se ve la necesidad de discretizar esta última división se efectuará nuevamente el proceso siguiendo el mismo criterio, obteniendo así el tercer parteaguas que delimita la segunda división.

Esta división incluye 8 cuencas de primera división (ver figura 64), de las cuales se obtienen 28 cuencas de segunda división descritas en la tabla 25.

Figura 64. Cuencas de primera división para la cuenca del Río Carare.

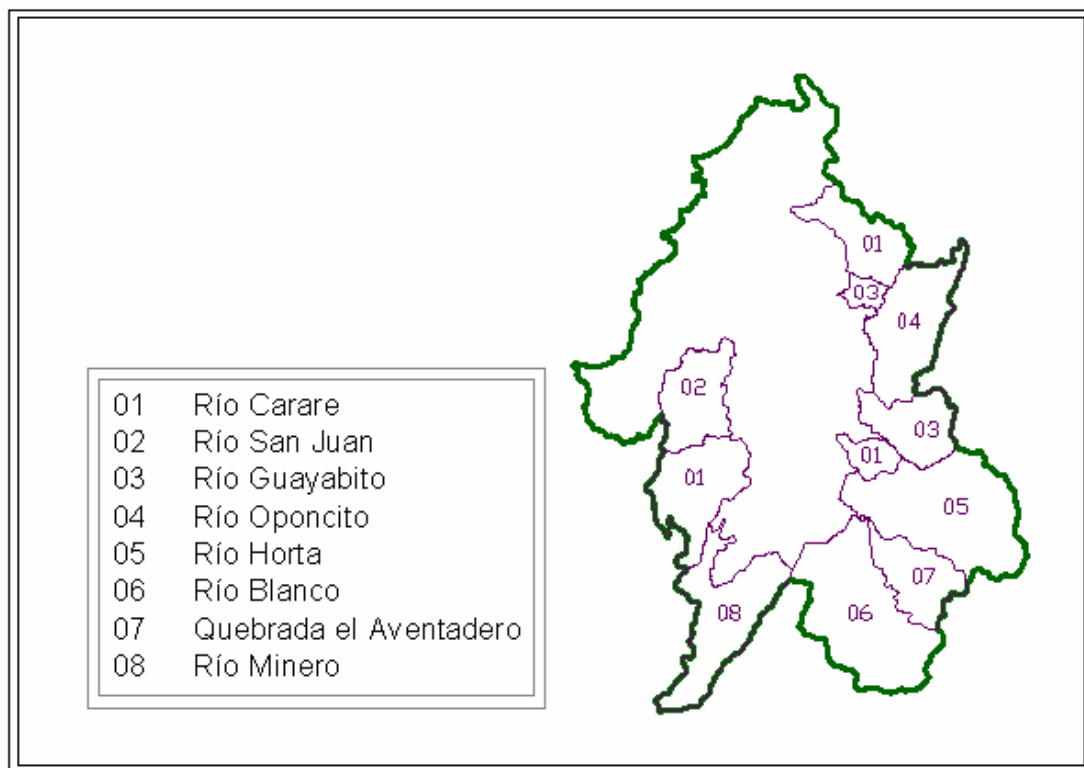


Tabla 25. Cuencas de primera y segunda división para el Río Carare.

DIVISIONES DEL RÍO CARARE	
PRIMERAS DIVISIONES	SEGUNDAS DIVISIONES
Río Carare	Quebrada la Corcovada Quebrada la Chisposa Caño la Guinea Quebrada la Torova Quebrada la Parra
Río San Juan	Río Sanjuancito Caño Cocuy
Río Guayabito	Quebrada la Grande Quebrada Santa Inés Quebrada la Natividad
Río Oponcito	Quebrada la Perdida Quebrada Amarilla Quebrada Campo Escondido
Río Horta	Quebrada la Luja Río Negro Quebrada la Ballena Quebrada el Muerto
Río Blanco	Río la Pradera Río la Granja Quebrada San Cristobal Río Blanco Bajo
Quebrada el Aventadero	Quebrada García Quebrada de Juana Quebrada Grande
Río Minero	Quebrada San Antonio Quebrada Campo Obando Quebrada la Guinea Quebrada la Clavellina

Las cuencas de segunda división son sometidas a un proceso en el que se obtienen los parámetros morfométricos y de la red de drenaje a partir de los MDE de cada una de las cuencas. Para la cuenca en estudio se modelaron 36 cuencas de segunda división. En el anexo B se observan los resultados referentes al área, perímetro, longitud, elevación, forma, pendiente del cauce principal, tiempo de concentración (tc), alejamiento, densidad, orden y longitud de red.

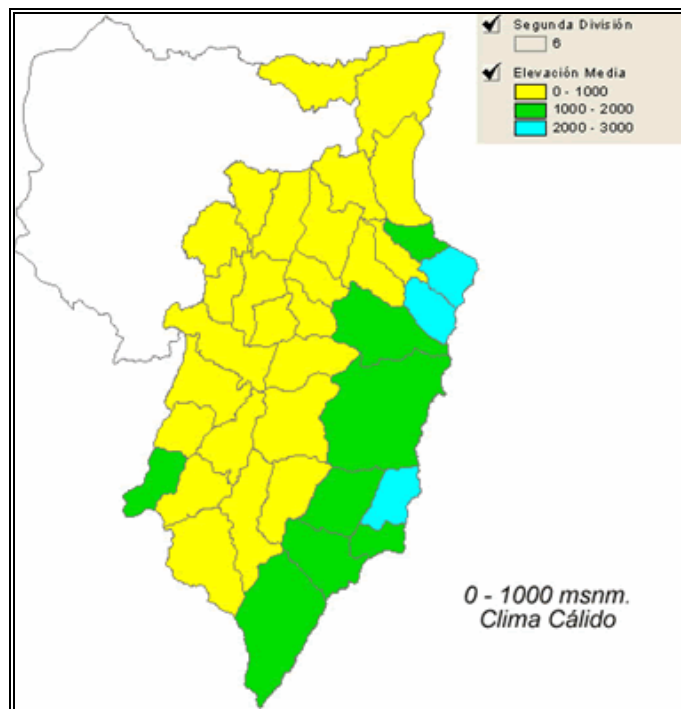
6.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.3.1 Cuenca del Río Opón. A partir de la observación directa de la topografía y de la red de drenaje de la cuenca trabajada del río Opón se afirma lo siguiente:

- El cauce principal del río e dentro el departamento de Santander es un tramo que se extiende desde los 1600 msnm hasta los 100 msnm con una longitud de 184.69 Km., lo cual representa una pendiente aproximada de 0.81%. Se puede observar que en ésta cuenca sus drenajes poseen velocidades media a alta.
- Existe una gran superficie de la cuenca concentrada hacia el este del cauce principal, lo cual representa un mayor aporte hidrológico desde esta zona.
- La orientación sur-norte de la cuenca, hace que los niveles de evaporación sean más altos debido a que la exposición solar es más grande en las cuencas que drenan hacia el norte respecto a las que poseen otra orientación.
- La cuenca cubre un alto rango de valores de elevación que van desde los 3400 msnm hasta los 100 msnm, lo cual ofrece una gran variedad de vegetación, fauna, flora, tipos de suelo, pisos térmicos, tipos de climas y fenómenos meteorológicos.

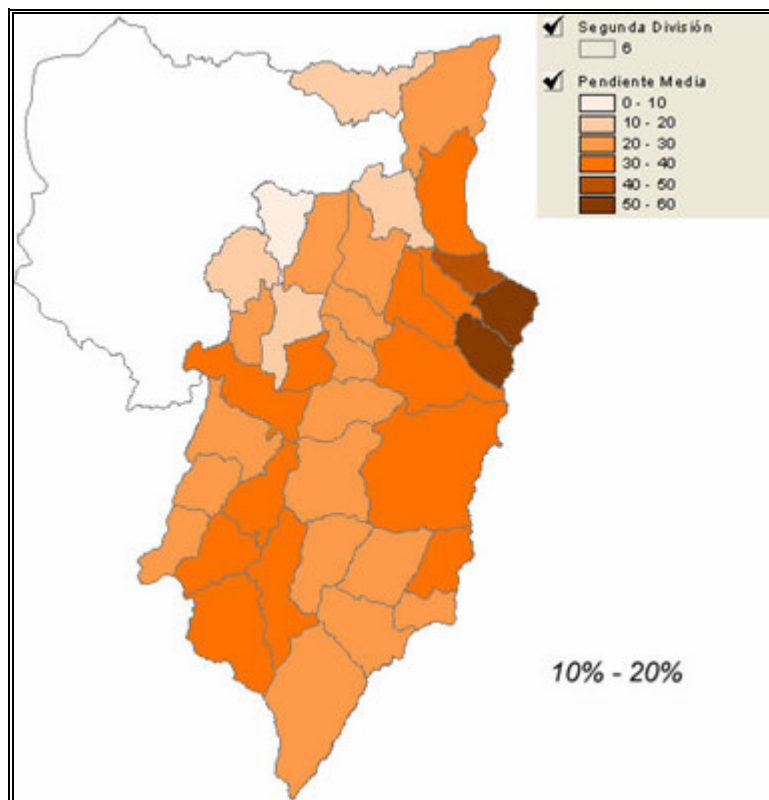
Los valores de elevación máxima se concentran al sur-este de la cuenca. Existen 4 cuencas con elevación máxima superior a los 3000 msnm, 7 entre los 3000 y los 2000 msnm, 17 entre los 2000 y 1000 msnm y 8 menores de 1000 msnm. En cuanto a los valores de elevación media (ver figura 65) se tiene que el intervalo de mayor área corresponde entre los 0 y los 1000 msnm.

Figura 65. Distribución de la elevación media en la cuenca del Río Opón.



Se tiene una distribución de alta pendiente en general para la cuenca (ver figura 66), en donde la zona este se caracteriza por presentar valores de pendiente media entre el 30% y 60%. Esto representa la respuesta rápida la cuenca en estas zonas ante eventos de lluvia.

Figura 66. Distribución de la pendiente media de la cuenca, en la cuenca del Río Opón.



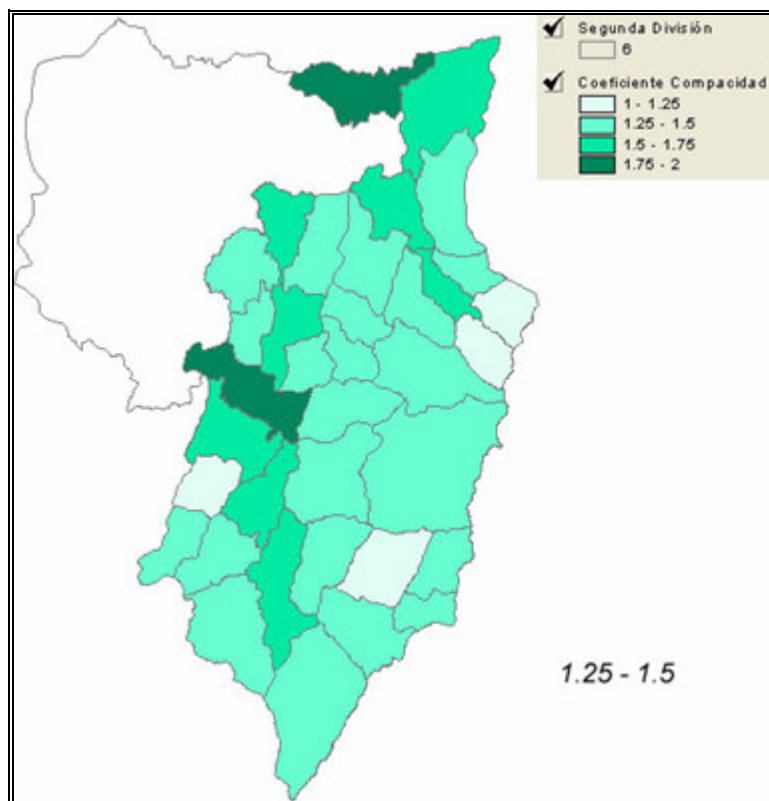
En la figura 67 se observa que para el valor de coeficiente de forma, la gran mayoría de las cuencas que conforman la cuenca principal presentan valores menores que 1, lo que indica que son cuencas alargadas con baja susceptibilidad de avenidas.

Figura 67. Distribución del coeficiente de forma en la cuenca del Río Opón.



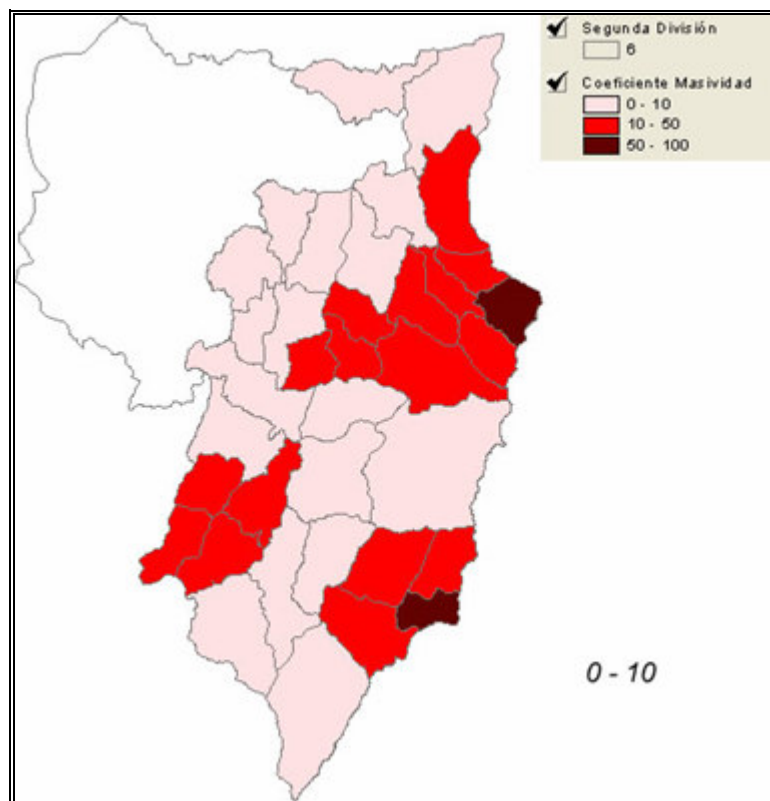
La mayor tendencia respecto al valor del coeficiente de compacidad se concentra en valores entre 1.25 y 1.5 con características de forma oval redonda a oval oblonga (ver figura 68). Esto significa que entre más alejados sean los valores de K_c a 1, es decir, entre menos se acerque la forma de las cuencas a una circunferencia, se tendrá menos riesgo de concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento.

Figura 68. Distribución del coeficiente de compacidad en la cuenca del Río Opón.



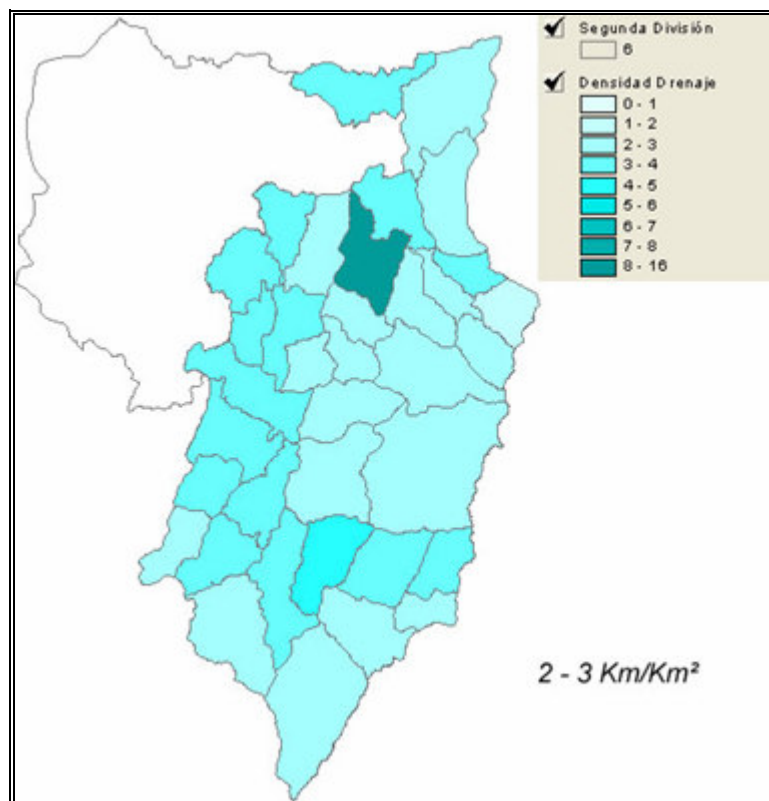
El coeficiente de masividad representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. En la figura 69 se muestra la distribución de este valor concentrado en valores que se encuentran en el intervalo de 0 a 10. Sin embargo también se encuentran valores que se encuentran entre 50 y 100, esto indica que la cuenca en su mayoría es plana pero que también tiene cuencas de alta montaña.

Figura 69. Distribución del coeficiente de masividad en la cuenca del Río Opón.



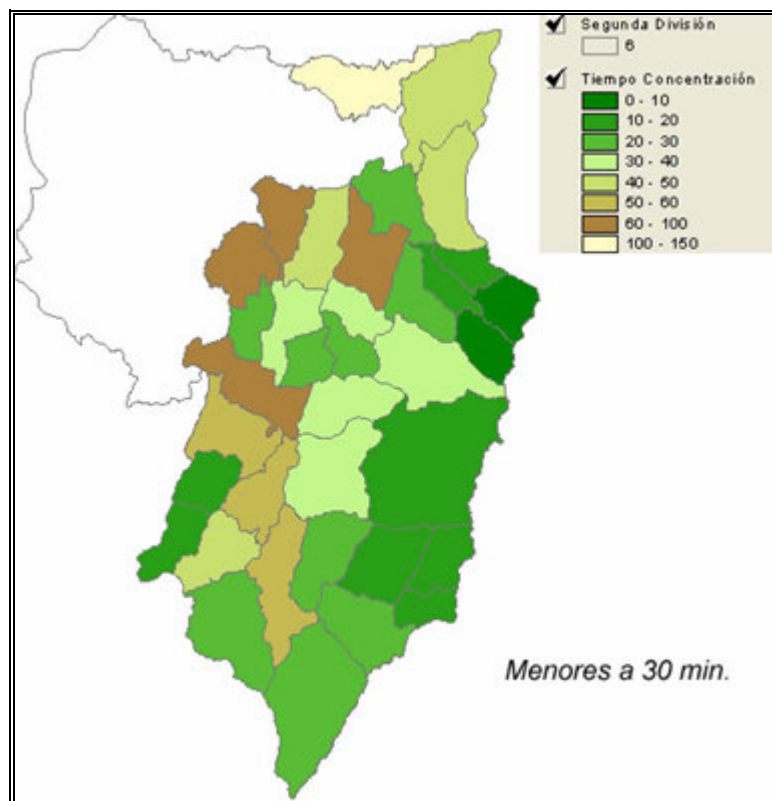
En términos de densidad de drenaje (ver figura 70) se observa que más de la mitad de las cuencas presenta valores superiores a los 2 Km / Km². Esto significa a nivel general que la cuenca del río Opón es una extensión altamente drenada.

Figura 70. Distribución de la densidad de drenaje en la cuenca del Río Opón.



Los tiempos de concentración de las cuencas, calculados por el método de Kirpich, se ven representados por duraciones menores de 30 minutos en la zona este y en la zona oeste se presentan duraciones mayores a una hora. Este valor incide, entre más bajo sea, en una respuesta rápida de evacuación de las aguas lluvia. (Ver figura 71).

Figura 71. Distribución del tiempo de concentración por el método de Kirpich en la cuenca del Río Opón.



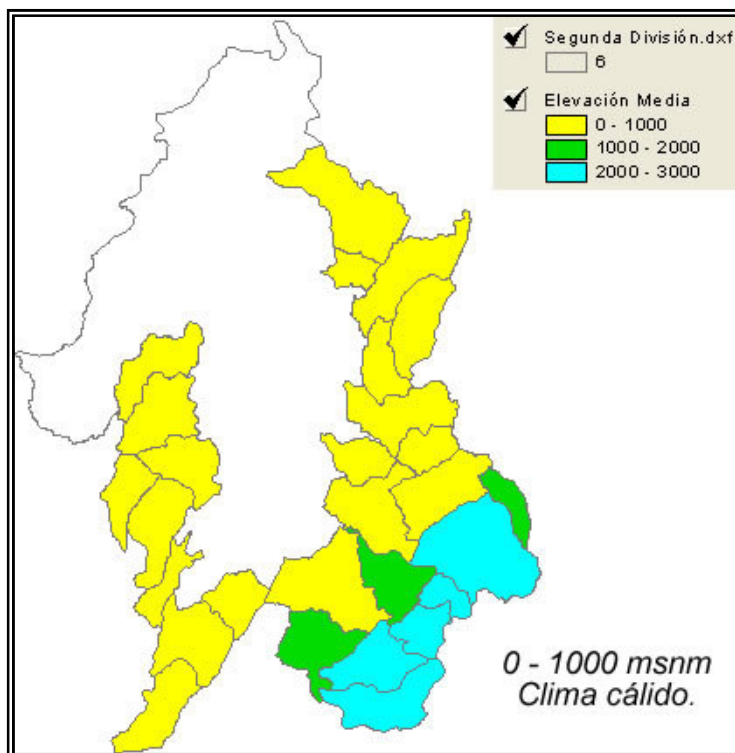
6.3.2 Cuenca del Río Carare. A partir de la observación directa de la topografía y de la red de drenaje de la cuenca trabajada del río Carare se afirma lo siguiente:

- El cauce principal del río dentro el departamento de Santander es un tramo que se extiende desde los 900 msnm hasta los 100 msnm con una longitud de 184.11 Km., lo cual representa una pendiente aproximada de 0.43%. Se puede observar que en ésta cuenca sus drenajes poseen velocidades medias.

- Existe una gran superficie de la cuenca concentrada hacia el este del cauce principal, lo cual representa un mayor aporte hidrológico desde esta zona.
- La orientación sur-norte de la cuenca, hace que los niveles de evaporación sean más altos debido a que la exposición solar es más grande en las cuencas que drenan hacia el norte respecto a las que poseen otra orientación.
- La cuenca cubre un alto rango de valores de elevación que van desde los 3150 msnm hasta los 100 msnm, lo cual ofrece una gran variedad de vegetación, fauna, flora, tipos de suelo, pisos térmicos, tipos de climas y fenómenos meteorológicos.

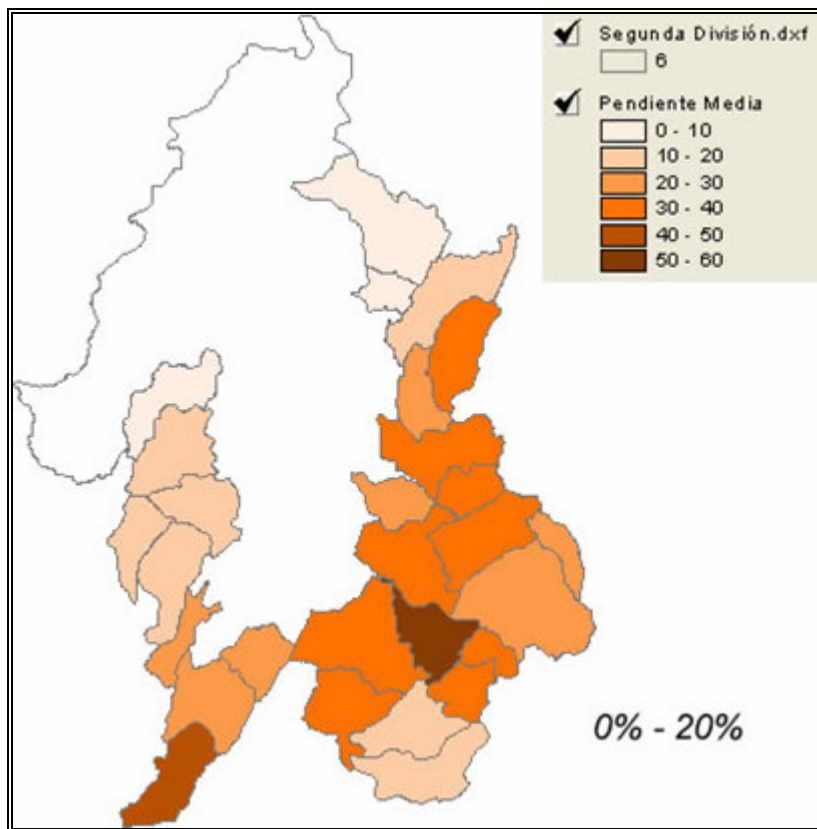
Los valores de elevación máxima se concentran al sur-este de la cuenca. Existen 5 cuencas con elevación máxima superior a los 3000 msnm, 6 entre los 3000 y los 2000 msnm, 8 entre los 2000 y 1000 msnm y 9 menores de 1000 msnm. En cuanto a los valores de elevación media (ver figura 72) se tiene que el intervalo de mayor área corresponde entre los 0 y los 1000 msnm, predominando el clima cálido.

Figura 72. Distribución de la elevación media en la cuenca del Río Carare.



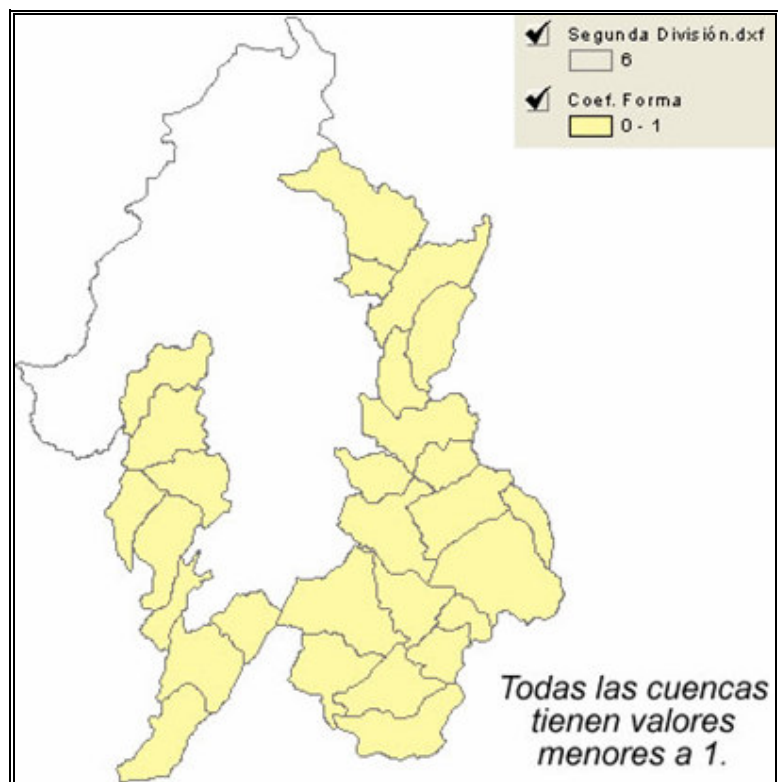
Se tiene una distribución de pendientes medias en general para la cuenca (ver figura 73), en donde la zona este se caracteriza por presentar valores de pendiente media entre el 0% y 20%. Se puede observar que en la zona este de la cuenca se encuentran pendiente mayores a 20% hasta del orden de 60% haciendo que en la parte alta de la cuenca se tenga una mejor respuesta ante eventos de lluvia.

Figura 73. Distribución de la pendiente media de la cuenca, en la cuenca del Río Carare.



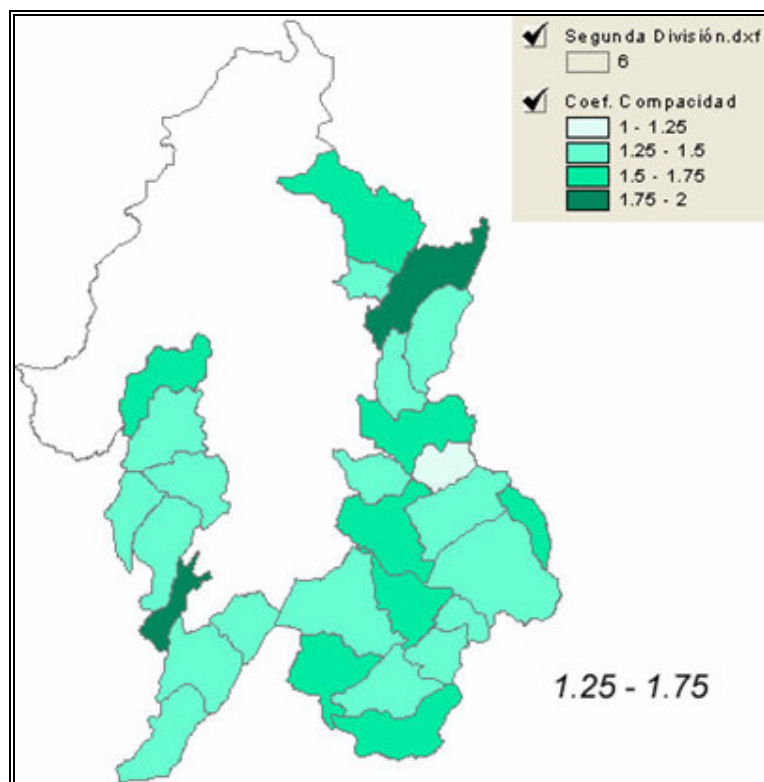
En la figura 74 se observa que para el valor de coeficiente de forma, la gran mayoría de las cuencas que conforman la cuenca principal presentan valores menores que 1, lo que indica que son cuencas alargadas con baja susceptibilidad de avenidas.

Figura 74. Distribución del coeficiente de forma en la cuenca del Río Carare.



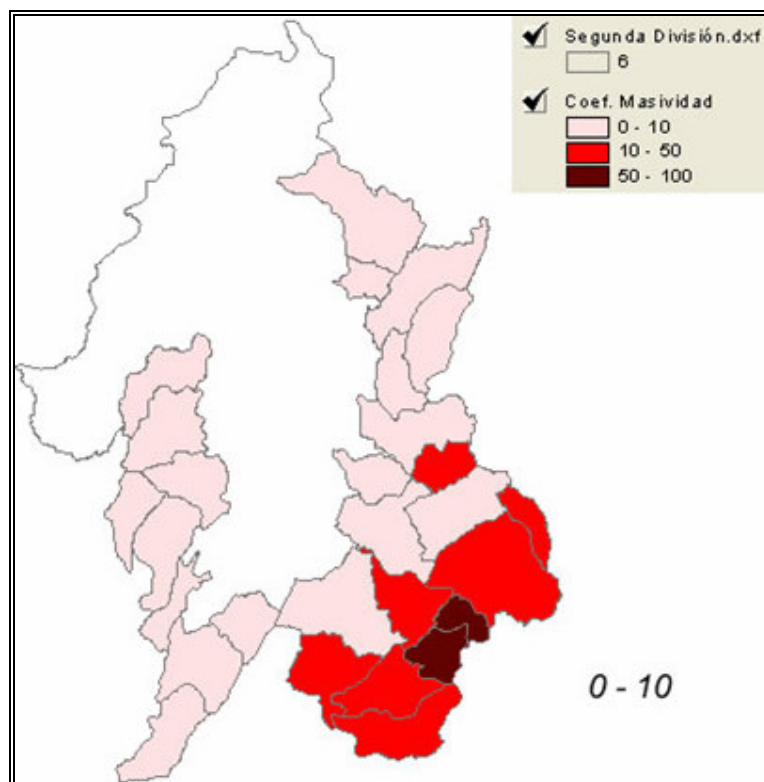
La mayor tendencia respecto al valor del coeficiente de compacidad se concentra en valores entre 1.25 y 1.75 con características de forma oval redonda a oval oblonga y cuencas de oval oblonga a rectangular oblonga (ver figura 75). Esto significa que entre más alejados sean los valores de K_c a 1, es decir, entre menos se acerque la forma de las cuencas a una circunferencia, se tendrá menos riesgo de concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento.

Figura 75. Distribución del coeficiente de compacidad en la cuenca del Río Carare.



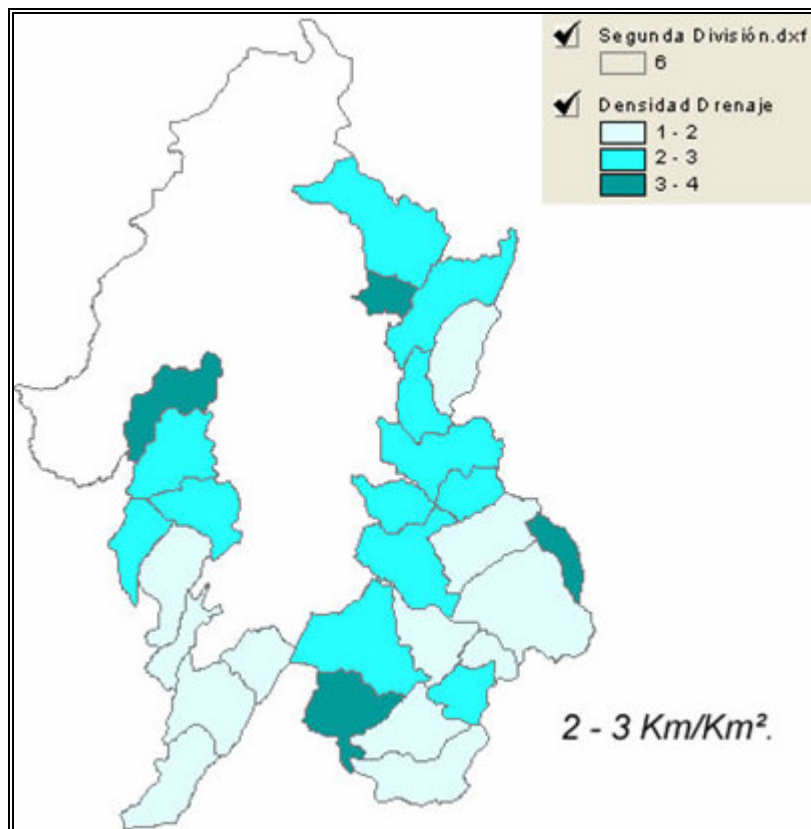
El coeficiente de masividad representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. En la figura 76 se muestra la distribución de este valor concentrado en valores que se encuentran en el intervalo de 0 a 10. Sin embargo también se encuentran valores que se encuentran entre 50 y 100, esto indica que la cuenca en su mayoría es plana pero que también tiene cuencas de alta montaña ubicadas en la zona este de la misma.

Figura 76. Distribución del coeficiente de masividad en la cuenca del Río Carare.



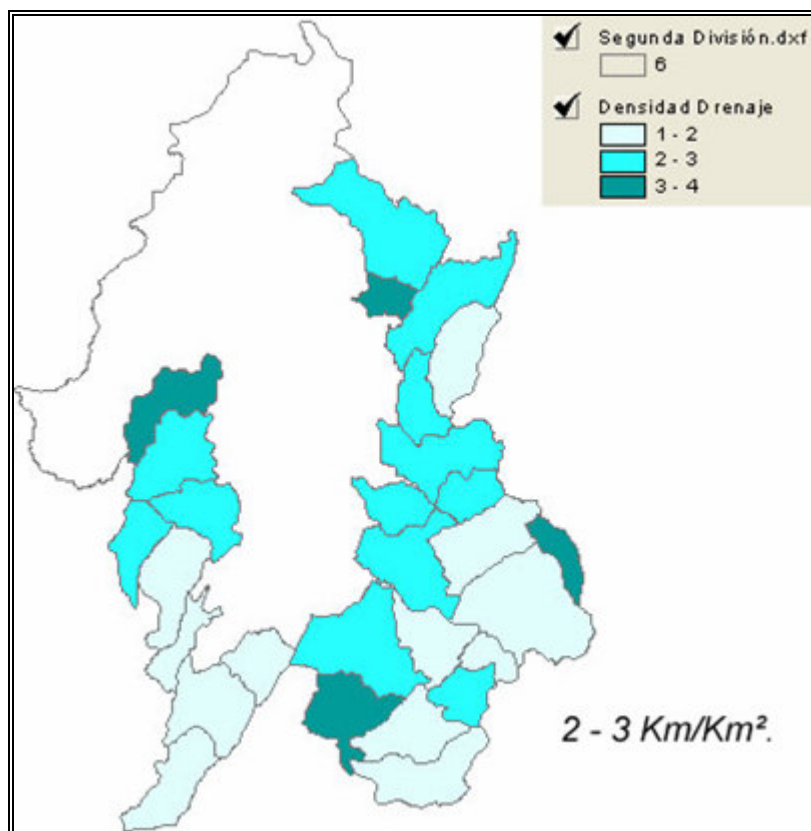
En términos de densidad de drenaje (ver figura 77) se observa que más de la mitad de las cuencas presenta valores entre los 2 Km / Km² y 3 Km / Km². Esto significa a nivel general que la cuenca del río Carare es una extensión altamente drenada.

Figura 77. Distribución de la densidad de drenaje en la cuenca del Río Carare.



Los tiempos de concentración de las cuencas, calculados por el método de Kirpich, se ven representados por duraciones entre 10 y 30 minutos en la zona este y en la zona oeste se presentan duraciones mayores a una hora. Este valor incide, entre más bajo sea, en una respuesta rápida de evacuación de las aguas lluvia. (Ver figura 78).

Figura 78. Distribución del tiempo de concentración por el método de Kirpich en la cuenca del Río Carare.



6.4 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS

La información obtenida requiere de una organización especial que facilite su inventario, administración, edición y publicación, teniendo en cuenta la gran cantidad de datos para las cuencas principales, cuencas de primera división y cuencas de segunda división, y su relación entre si. Esta organización es posible mediante un sistema de base de datos, que garantiza además de un manejo rápido y eficiente, la seguridad, integridad, y funcionalidad de la información.

A continuación se describe el proceso de construcción de la base de datos aplicada al desarrollo de este proyecto. Para ello, se considera necesario

enunciar en primer lugar algunos conceptos básicos relacionados. Como observación particular, se aclara al lector la intención de usar un lenguaje moderadamente técnico con el fin de facilitar la lectura y comprensión del tema.

6.4.1 Conceptos básicos. Una base de datos es una “colección o depósito de datos integrados, con redundancia controlada y con una estructura que refleje las interrelaciones y restricciones existentes en el mundo real; los datos, que han de ser compartidos por diferentes usuarios y aplicaciones, deben mantenerse independientes de éstas, y su definición y descripción, únicas para cada tipo de datos, han de estar almacenadas junto con los mismos. Los procedimientos de actualización y recuperación, comunes y bien determinados, habrán de ser capaces de conservar la integridad, seguridad y confidencialidad del conjunto de datos.”⁶

De acuerdo con la definición anterior, una base de datos se caracteriza por tener independencia de los datos sin redundancia lógica, resultados coherentes, mejor acceso y administración y mayor organización y seguridad de la información, mayor capacidad de entrega de resultados y flexibilidad para hacer cambios en su contenido sin alterar su estructura lógica y/o física.

Por otro lado, un sistema de gestión de la base de datos o SGBD corresponde a un “conjunto coordinado de programas, procedimientos, lenguajes, etc. que suministra, tanto a los usuarios no informáticos como a los analistas, programadores o al administrador, los medios necesarios para

⁶ CASTAÑO, Miguel y PIATTINI Mario Gerardo. Concepción y diseño de base de datos del modelo E/R al modelo relacional.

describir, recuperar y manipular los datos almacenados en la base, manteniendo su integridad, seguridad y confidencialidad.”⁷

6.4.2 Diseño de la base de datos. El diseño de una base de datos requiere de dos partes indispensables: el nivel conceptual en el que se que se obtiene la estructura lógica sin implementarla en el SGBD, que consiste en describir la base de datos en un lenguaje natural, construir el modelo entidad relación y elegir el modelo de datos; y el nivel físico en el que se realiza la implementación y comprende la conversión del modelo entidad relación al modelo relacional (creación de las tablas), la eliminación de defectos propios del diseño, y la optimización de acuerdo a su manejo y almacenamiento interno.

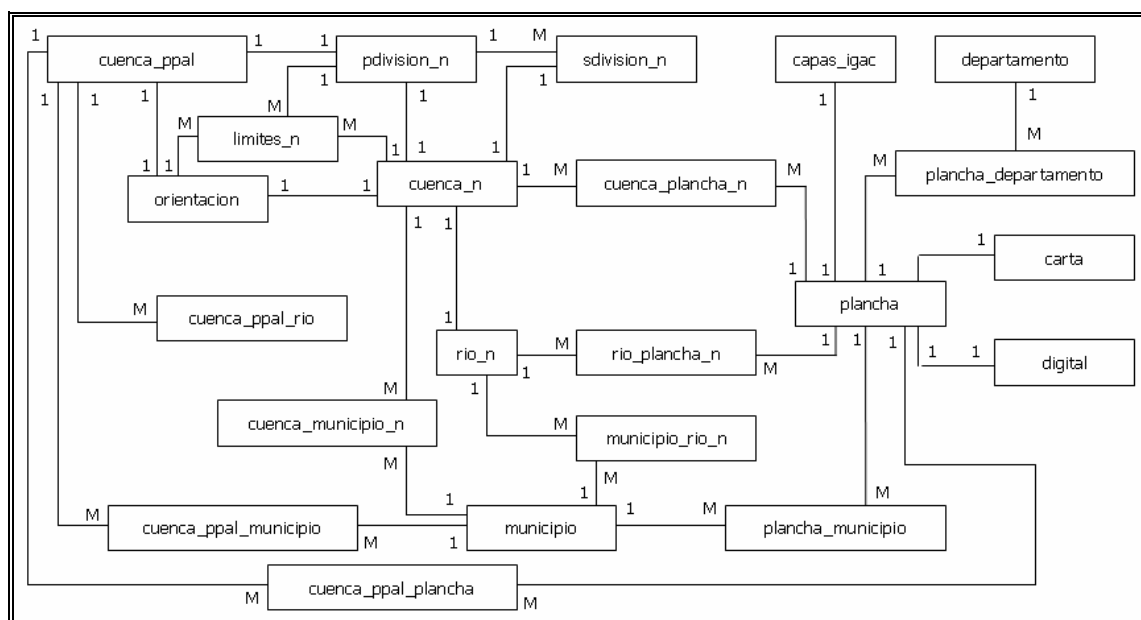
El modelo entidad relación constituye la esencia lógica de una base de datos. Sus elementos fundamentales son las entidades y las relaciones. Una entidad es una unidad de almacenamiento de información, con nombre y contenido definidos. Una relación es una asociación entre dos entidades que obedece a una cardinalidad, es decir, la cantidad recíproca de elementos que pueden relacionarse entre entidades, la cual se puede representar en cuatro formas diferentes: uno a uno (1 a 1), uno a muchos (1 a M), muchos a uno (M a 1), y muchos a muchos (M a M). Todas las entidades de una base de datos se identifican a partir de una llave principal o primaria que hace parte del conjunto de atributos que contienen y es la que permite que las entidades se relacionen entre si. Cuando varias entidades se relacionan de la forma M a M, es necesario crear una entidad intermedia representada por dos o más llaves primarias, las cuales reciben simultáneamente el nombre de llaves

⁷ CASTAÑO, Miguel y PIATTINI Mario Gerardo. Concepción y diseño de base de datos del modelo E/R al modelo relacional.

foráneas. Las entidades en un modelo entidad relación pueden ser fuertes cuando no dependen de ninguna otra entidad o débiles cuando dependen de una o varias entidades.

El modelo entidad relación de la base de datos de este proyecto (ver Figura 79) obedece estrictamente a la relación que guardan entre si las planchas IGAC y las cuencas hidrográficas, y a las condiciones y restricciones de la información.

Figura 79. Modelo entidad relación de la base de datos aplicada al proyecto.



A continuación se describen cada una de las entidades propuestas. El indicador n representa el número que identifica las diferentes cuencas principales.

- Capas_igac: guarda el registro las capas digitalizadas a nivel de planchas IGAC.
- Carta: contiene los tipos de carta existentes para las planchas IGAC.
- Cuenca_n: contiene el inventario de las cuencas de primera y segunda división con información de orientación, río o quebrada que representa y en la cual desemboca, división asignada, atributo o característica particular de la cuenca, y código de referencia de acuerdo con el IDEAM.
- Cuenca_municipio_n: relaciona la entidad cuenca con la entidad municipio.
- Cuenca_plancha_n: relaciona la entidad cuenca con la entidad plancha.
- Cuenca_ppal: contiene información general sobre todas las cuenca principales.
- Cuenca_ppal_municipio: relaciona la cobertura de municipios del departamento de Santander con las cuencas principales.
- Cuenca_ppal_plancha: relaciona la cobertura de planchas IGAC con las cuencas principales.
- Cuenca_ppal_rio: contiene los ríos relacionados de una cuenca principal.
- Departamento: contiene el listado de los departamentos relacionados con las planchas IGAC registradas.
- Digital: contiene diferentes opciones sobre la obtención de la versión digital de las planchas IGAC.
- Limites_n: relaciona entre si las cuencas de primera división con las cuatro direcciones norte, sur, este, oeste.
- Modelo: contiene las características y observaciones del modelo digital de elevación de cada una de las cuencas.
- Municipio: contiene la lista de los 87 municipios del Departamento de Santander.

- Municipio_rio_n: relaciona los municipios del departamento de Santander con los ríos de una cuenca principal.
- Orientación: contiene las cuatro direcciones principales y ocho adicionales en otros sentidos (n, s, e, w, ns, ne, nw, sn, se, sw, ew, we).
- Pdivision_n: contiene información de las cuencas de primera división para una cuenca principal determinada.
- Plancha: contiene información de las planchas IGAC.
- Plancha_departamento: relaciona las planchas IGAC con los departamentos registrados.
- Plancha_municipio: relaciona las planchas IGAC con los municipios del departamento de Santander.
- Rio_n: contiene el inventario ordenado alfabéticamente de los principales ríos de la cuenca principal.
- Rio_plancha_n: relaciona los ríos de una cuenca principal determinada con las planchas IGAC.
- Sdivision_n: contiene información de las cuencas de segunda división para una cuenca principal determinada.
- Tipo_cuenca: almacena información relacionada con la clasificación de cuencas según su area subsidiaria.

Existen otras dos entidades que no se relacionan directamente con la información anterior. Estas corresponden a las entidades “seguridad” que almacena el nombre de usuario y contraseña del administrador de la base de datos y “vinculo” que guarda el código html de algunos enlaces importantes del sitio web.

6.4.3 Creación de la base de datos. La implementación del nivel físico de la base de datos en un SGBD requiere del uso del lenguaje SQL (Structured Query Language – Lenguaje Estructurado de Consultas) para manejar las instrucciones de creación de la base de datos, creación, llenado y edición de las tablas (representadas por las entidades), y consultas a la información, mediante un sistema de administración de base de datos (DBMS). El DBMS es el programa que facilita la interacción de la base de datos con el administrador que corresponde, para este proyecto, al servidor MySQL.

Una vez la información se encuentre totalmente lista y organizada para cada uno de los grupos que representan las cuencas principales, se dispone a crear y actualizar la base de datos, y hacer diferentes pruebas que ayuden a detectar errores de diseño y facilitar tareas de optimización.

La base de datos lleva el nombre de “hidroatlas” y contiene en su interior 80 tablas instaladas en un servidor web bajo la edición y administración final del grupo de investigación en Geomática.

6.5 DISEÑO Y CREACIÓN DEL SITIO WEB.

El diseño de sitios web dinámicos orientados a la publicación de grandes cantidades de información mediante los sistemas tradicionales estáticos soportados en el uso de códigos html se ve representado en la construcción de numerosas páginas sometidas a restricciones y limitaciones en su edición y actualización. La necesidad de manejar y consultar la información de manera practica y sencilla implica el uso de lenguajes de programación en Internet adecuados para realizar diferentes tareas y desarrollar diferentes instrucciones que permitan tener comunicación con bases de datos y

desenvolver todo tipo de información en un medio de amplia navegabilidad, reduciendo considerablemente su tiempo de construcción.

Los sitios web dinámicos son ampliamente aceptados por su versatilidad debido a que están sujetos a adoptar cualquier necesidad por parte del webmaster o del administrador mediante la variación automática de imágenes, texto, animaciones, formularios, vínculos, colores, etc., y resumen ampliamente el número de páginas a comparación de los sitios web estáticos.

Las bases de datos conectadas a sitios web dinámicos representan una ayuda de gran importancia para las tareas de edición y mantenimiento. En operaciones de agregar, eliminar y modificar de la información, la conexión permite actualizar instantáneamente el sitio web sin necesidad de editar directamente los datos contenidos en las páginas.

En conclusión, los lenguajes de programación en Internet y las bases de datos son herramientas altamente capaces de desarrollar múltiples funciones dirigidas a todo tipo de aplicaciones, las cuales hacen de los sitios web dinámicos la mejor opción para crear sistemas de información masiva.

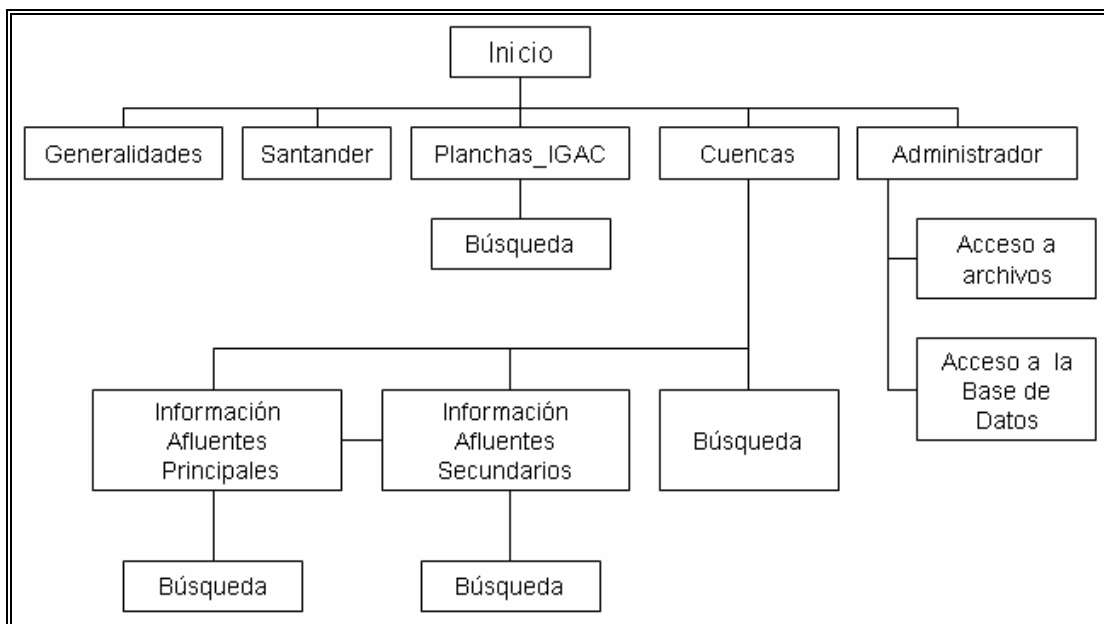
6.5.1 Uso de PHP y MySQL. Existen diferentes lenguajes de programación aplicables como PHP, CGI, ASP, y JSP, y sistemas de gestión de bases de datos como Oracle, Informix, MySQL, y Postgresql. Para la construcción del sitio web de este proyecto se han empleado las herramientas PHP y MySQL, ya que son las más reconocidas y utilizadas.

PHP es un lenguaje de programación de hipertexto que facilita la creación de código html, la conexión con la base de datos, la generación de gráficos e imágenes, y la impresión de documentos en formato pdf, entre muchas otras funciones. MySQL es un programa que interpreta el lenguaje estructurado de consultas SQL y permite la administración y edición de la base de datos.

El ejercicio de estas dos herramientas requiere de un servidor de Internet que interprete el código PHP y lo vincule con la base de datos. El sitio web de este proyecto utilizó el servidor “apache”, de distribución libre, en el cual se simuló el sitio mediante una red local, y el servidor “albatros” de propiedad de la escuela de ingeniería civil, en el que se implementó finalmente el sitio una vez terminado. La construcción del sitio fue realizada con el editor de páginas web Macromedia Dreamweaver MX junto con el editor de bases de datos Phpmysql soportado en MySQL.

6.5.2 Descripción del sitio web. El sitio web de este proyecto recibe el nombre de “HidroAtlas – Departamento de Santander” y se divide en dos partes fundamentales correspondientes a información y administración. La información está distribuida en cuatro partes: planchas IGAC, cuencas principales, y cuencas de afluentes principales y secundarios, cada una de ellas con opciones de búsqueda y consulta. La administración consiste en el acceso a archivos restringidos y a la edición de la base de datos. Además, se incluye información sobre generalidades del proyecto y la descripción geográfica, topográfica, climatológica, hidrográfica, política del departamento de Santander. En la Figura 80 se muestra el mapa del sitio que contiene la distribución de las páginas y su relación entre si.

Figura 80. Mapa del sitio Web “Hidroatlas – Departamento de Santander”.



El sitio destaca por la distribución de la información en cada una de sus partes, la presencia de mapas e imágenes de planchas IGAC y cuencas, el uso de formularios como herramienta práctica para aumentar su navegabilidad en operaciones de búsqueda y consulta, los enlaces a otras páginas Web y a software libre necesario para visualizar los mapas, y la opción de enviar comentarios y sugerencias.

6.5.3 Distribución, edición y mantenimiento. La información general a nivel de planchas IGAC y cuencas es de libre distribución para todo tipo de usuarios, los mapas disponibles corresponden a archivos en extensión dwf de carácter no editable, y los archivos editables con extensión dwg de AutoCAD quedan finalmente a disposición del administrador con acceso mediante nombre de usuario y contraseña.

Una vez terminado el sitio en su totalidad durante la realización de este proyecto se entrega toda la información correspondiente a archivos relacionados con la base de datos, mapas de planchas IGAC y cuencas, figuras, y las paginas Web editables al grupo de investigación en Geomática – Gestión y optimización en sistemas, quien asume los derechos de edición y mantenimiento para lo cual el sitio Web cuenta con la capacidad de recibir posteriores actualizaciones que incluyan la inserción de nueva información y la expansión hacia otras zonas de estudio.

7. OBSERVACIONES

- El proceso realizado de estructuración y adecuación de la cartografía básica del IGAC escala 1:25.000, es exigente debido a la cantidad de información contenida en cada una de las planchas y a la digitalización de 31 de 223 planchas utilizadas.
- De acuerdo con la información obtenida y teniendo en cuenta la extensión del departamento de Santander, las cuencas de los ríos Fonce y Opón fueron cubiertas en un 100% con respecto al área real, a diferencia de las cuencas de los ríos Chicamocha (47.6%), Suárez (52.8%), Carare (45.3%) y Sogamoso (89.5%).
- La información cartográfica en formato digital constituye una gran ventaja para su manejo, edición, reproducción, e interacción con otros sistemas informáticos.
- La división hidrológica de las cuencas principales se basa en el trazado de afluentes principales y secundarios, lo cual exige una codificación especial para su inventario, tratamiento y organización.
- A partir de la división hidrológica del departamento de Santander realizada en 6 cuencas principales, se tienen 79 cuencas de afluentes principales y 264 cuencas de afluentes secundarios.

- Los MDT, implementados en SIG y representados mediante estructuras de datos vectorial y raster, son una herramienta fundamental para la generación de nueva información mediante la aplicación de algoritmos numéricos.
- La creación de los MDE parte de los datos del relieve de la superficie cuya calidad y precisión depende de la escala de la información.
- Los MDT constituyen una representación parcial de la realidad que facilitan la simulación y observación de diferentes procesos físicos mediante la distribución espacial de todo tipo de variables, convirtiéndose en la versión moderna de la cartografía temática.
- La diversidad de información y resultados obtenidos permite realizar finalmente una caracterización general de la cuenca principal en función de sus parámetros físicos e hidrográficos más importantes.
- Dada la gran cantidad de información recolectada al nivel de planchas IGAC y cuencas es necesario almacenarla en un sistema de base de datos para facilitar su organización, edición y administración.

8. CONCLUSIONES

- El proceso de digitalización manual forma parte de una de las etapas más importantes para la adecuación de la cartografía básica digital y la creación de los MDE, ya que exige la mayor coherencia posible de la información con respecto a las versiones originales impresas, el cumplimiento de las normas y lineamientos del IGAC, y personal capacitado que minimice los errores inherentes a este proceso.
- Los MDT son un gran adelanto para la representación de cartografía temática en formato digital en la que se desee mostrar la distribución espacial de cualquier propiedad o variable física. La ventaja de ser manejados con interfaz gráfica facilita su interpretación y la posibilidad de poderlos integrar con diferentes herramientas informáticas permite generar información que resultaría difícil de obtener a través de otros métodos y sistemas.
- El uso de los SIG es un concepto que debe hacer parte de la formación básica en ingeniería e induce a ir de los programas reconocidos y aplicaciones comunes a estudiar campos de acción que enfrenten nuevas situaciones y vincular otras tecnologías relacionadas.
- El diseño y construcción de sitios Web dinámicos constituyen la tendencia moderna de diferentes aplicaciones en Internet que rompen la cultura tradicional de los sitios estáticos. Su versatilidad, rapidez de construcción, y actualización automática hacen de esta alternativa una buena opción para

crear sistemas de información masiva. Además requiere de herramientas sencillas de distribución libre y de fácil acceso y manejo, lo cual estimula la promoción y extensión de su uso en todo tipo de disciplinas.

- La información obtenida unida al sistema de información en Internet está dirigida a servir como herramienta básica de consulta y como plataforma para realizar estudios posteriores en los que se evalúen nuevos conceptos y tecnologías, y se apliquen a otras áreas de desempeño en ingeniería.
- Con el presente estudio se llama la atención de las personas y entes interesados en continuar y ampliar esta investigación y en extender el uso de los MDT, de los SIG, y de los sitios Web dinámicos en otras aplicaciones.
- Como experiencia personal del proyecto sobresale la adquisición de conocimientos adicionales no adquiridos durante la etapa de pregrado, representada como un valor agregado del saber en el uso de nuevos sistemas informáticos, en el cambio conceptual de teorías y aplicaciones, en la experimentación de producción y calidad, y en la dirección y coordinación de grupo.

BIBLIOGRAFIA

CALLAGHAN, J.F. y MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics and Image Processing 28:323-344 .1984.

CARMONA, Alvaro y MONSALVE, Jhon Jairo. Sistemas de Información Geográfica [online]. Nov. 2003. Disponible en internet: <URL: <http://www.monografias.com/trabajos/gis/gis.shtml> >.

CASTAÑO, Miguel y PIATTINI VELTHIUS, Mario Gerardo. Concepción y diseño de base de datos del modelo E/R al modelo relacional. Barcelona : RA-MA, 1993.

CLAS-CROMIC. Programa de Manejo Integral de Cuencas. [online]. Disponible en Internet <URL: <http://www.zeon.com.tw/> >.

COMELLAS ANGELES, Nuri. Servicios de información geográfica en una biblioteca digital [online]. Puebla (México), ene. 2003. Disponible en Internet <URL: http://mail.udlap.mx/~tesis/msp/comellas_a_n/capitulo1.pdf >.

CORPES - Gobernación de Santander. Atlas ambiental del departamento de Santander. Bucaramanga: 1991.

FELICÍSIMO, Angel Manuel. Modelos Digitales del Terreno-Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales. [online] Asturias(España), Mar. 1994, p.12-90. Disponible en internet <URL: <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/>>.

FRANCO, Rodolfo. Curso de Sistemas de Información Geográfica [online]. Santa Fe de Bogotá, sep. 2003. Disponible en Internet. <URL: [http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/vector raster](http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/vector%20raster)>.

GAVILÁN LEÓN, Germán Eduardo Especialización en Asfaltos y Pavimentos, Curso de Drenaje y Subdrenaje. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Abril de 2001, p.8-37.

GÓMEZ GÓMEZ, Jorge. Introducción a los SIG. Bucaramanga: 1998. 104 p.

JENSON, S. K. y DOMINGUE, O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 54, No. 11, November 1988, pp. 1593-1600.

OLAYA FERRERO, Víctor y ROBREDO SANCHEZ, José Carlos. Integración de modelos computacionales, geomorfológicos, hidrológicos y selvícolas para el desarrollo de soluciones SIG específicas en hidrología forestal de pequeñas y medianas cuencas vertientes españolas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, Madrid, 2002 p.194.

OLIVERA, Francisco, REED, Sean y MAIDMENT David. Hec-Prepro v.2.0 An ArcView Pre-Processor for HEC's Hydrologic Modeling System. [Online] University of Texas at Austin Center for Research in Water Resources. ESRI User's Conference, 1998. Disponible en Internet <URL: <http://www.ce.utexas.edu/prof/olivera/esri98/p400.htm>>.

RAMÍREZ OSORIO, Jorge Mario. Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de terreno. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas Medellín septiembre – 2002 Director Jaime Ignacio Vélez Upegui. I.C., M. Sc, Ph. D.

SOPDE. Área de Sistemas de Información Geográfica [online]. Andalucía (España), oct. 2003. Disponible en Internet: <URL: <http://gis.sopde.es/cursosgis/DHTML/home.html>>.

UNISIG. Unidad de Sistemas de Información Geográfica [online]. Bogotá, nov. 2003. Disponible en Internet < URL: <http://araneus.humboldt.org.co/sig/index.html>>

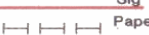
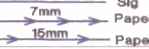
ANEXO A

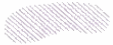
Tabla N 4 TABLA DE DISTRIBUCION DE CAPAS

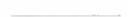
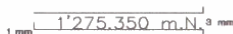
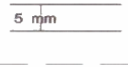
layer	Nombre del objeto	Representacion Grafica del objeto	Tipo de linea	Color layer		Calibre Grafica	Estilo de texto utilizado	Representacion texto	Color texto		Calibre texto
				Cad	Salida				Cad	Salida	
1101	Punto Geodésico			7	7	0.13	News05	3N-T-14	7	7	0.13
1102	Punto Nivelación			7	7	0.13	News05	2195	7	7	0.13
1999	Elem hipsograficos Otros en Mayus Otros en Mayu/Min			48	7	0.2	STYM06/08 CENT06/08 CENT06	<i>Flo / Flo</i> LLANO / LLANO Terreno sujeto a inundacion	48	7	0.2
2108	Sector			48	7		Cent06/08	SECTOR SECTOR	48	7	0.20
2108	Región			48	7		Cent06/08	REGION REGION	48	7	0.20
2108	Parcelación			48	7		Cent06/08	PARCELACION PARCELACION	48	7	0.20
2108	Comunidad			48	7		Cent06/08	COMUNIDAD COMUNIDAD	48	7	0.20
2108	Sabanas			48	7		Cent06/08	SABANA SABANA	48	7	0.20
2109	Vereda			48	7		Cent06/08	MIRAFLORES MIRAFLORES	48	7	0.20
2120_2121	Capital de Pais			29	7		Cent08/10	CARACAS CARACAS	29	7	0.25
2120_2122	Capital de Departamento			29	7		Cent08/10	BUCARAMANGA BUCARAMANGA	29	7	0.25
2120_2123	Municipio (Cabecera Municipal)		Continuous	48	7	0.20	Cent06/08	LA PAZ LA PAZ	48	7	0.20
2120_2123 hatch	Achurado		Patrón ANSI31 Esc. 198 Ang. 0	7	7	Hatch 0.13					
2120_2124	Corregimiento		Continuous	48	7	0.20	Cent06/08	Pelaya Pelaya	48	7	0.20
2120_2124 hatch	Achurado		Patrón ANSI31 Esc. 198 Ang. 0	7	7	Hatch 0.13					

layer	Nombre del objeto	Representacion Grafica del objeto	Tipo de linea	Color layer		Calibre Grafica	Estilo de texto utilizado	Representacion texto	Color texto		Calibre texto
				Cad	Salida				Cad	Salida	
2120_2125	Inspección de Policía		Continuous	48	7	0.20	Cent06	El Diamante	48	7	0.20
2120_2125 hatch	Achurado		Patrón ANSI31 Esc. 198 Ang. 0	7	7	Hatch 0.13					
2120_2126	Caserio		Continuous	48	7	0.20	Cent06	Santa Inés	48	7	0.20
2120_2126 hatch	Achurado		Patrón ANSI31 Esc. 198 Ang. 0	7	7	Hatch 0.13					
2120_2127	Sitio			48	7		Cent06	Fortuna	48	7	0.20
2120_2128	Barrio			48	7		Cent06	VALENCIA	48	7	0.20
2301	Edificacion hasta de 5 pisos	▪		18	7	0.18	News06	Primavera	7	7	0.13
2301	Bodega	▪		18	7	0.18	News06	El Palmar	7	7	0.13
2301	Escuela o Colegio			18	7	0.18	News06	La Cachama	7	7	0.13
2301	Hospital			18	7	0.18	News06	San Luis	7	7	0.13
2301	Iglesia	†	2301_4129	18	7	0.18	News06	Torcoroma	7	7	0.13
2301	Industria	▪		18	7	0.18	News06	Coltejer	7	7	0.13
2301	Cementerio		2301_3686	7	7	0.13	News06	Los Olivos	7	7	0.13
2302	Instalaciones para Minería			18	7	0.18	News06	San Jose	7	7	0.13
2303	Refinería			18	7	0.18	News06	Cartagena	7	7	0.13
2304	Central de Energía			7	7	0.13	News06	Rio Zulia	7	7	0.13

layer	Nombre del objeto	Representacion Grafica del objeto	Tipo de linea	Color layer		Calibre Grafica	Estilo de texto utilizado	Representacion texto	Color texto		Calibre texto
				Cad	Salida				Cad	Salida	
2322	Silos	•		7	7	0.13	News06	Santa Rosa	7	7	0.13
2322	Tanque	•		7	7	0.13	News06	La Iglesia	7	7	0.13
2322	Pozo	•		7	7	0.13	News06	Cantaclara	7	7	0.13
3101_1302	Vía en Construcción	-----	3101_1302	250	7	0.35	Copp06 Copp04	LA SUPERVIA a Vanegas*	48	7	0.20
3101_2381	Vía Pavimentada, 2 o mas vías	=====	Continuous	19	7	0.80	Copp06 Copp04	INTER ANDINA a Bucaramanga*	48	7	0.20
3101_2382	Vía Sin Pavimentar 2 o mas vías	-----	3101_2382	19	7	0.80	Copp06 Copp04	VIA LEBRIJA a Patio Bonito*	48	7	0.20
3101_2383	Vía Pavimentada, Angosta	=====	Continuous	28	7	0.55	Copp06 Copp04	VIA SAN ROQUE a Tolimaida*	48	7	0.20
3101_2384	Vía Sin Pavimentar, Angosta	-----	3101_2384	28	7	0.55	Copp06 Copp04	VIA SABANA a San Roque*	48	7	0.20
3101_3600	Vía Transitable en tiempo Seco	=====	Continuous	250	7	0.35	Copp06 Copp04	VIA LA TIGRA a Guaca*	48	7	0.20
3102	Camino de herradura	-----	3102_2410	18	7	0.18	Copp06 Copp04	VANEGAS a El Cerrito*	48	7	0.20
3103	Vía Férrea	+++++	3103	7	7	0.13	Copp06 Copp04	FERROCARILES NACIONALES a San Alberto*	48	7	0.20
3201	Aeropuerto	✈		18	7	0.18	News06	Palo Negro	7	7	0.13
3202	Pista de Aterrizaje	▬	Continuous	7	7	0.13	News06	Pista de aterrizaje	7	7	0.13
3203	Helipuerto	⊗		7	7	0.13	News06	Helipuerto	7	7	0.13
3301	Puerto	•		7	7	0.13	News06	Buenaventura	7	7	0.13
3402	Peaje	↑		7	7	0.13	News06	Morrinson	7	7	0.13

layer	Nombre del objeto	Representacion Grafica del objeto	Tipo de linea	Color layer		Calibre Grafica	Estilo de texto utilizado	Representacion texto	Color texto		Calibre texto
				Cad	Salida				Cad	Salida	
3410	Túnel	 Sig Papel	3410	7	7	0.13	News06	El Oscuro	7	7	0.13
3411	Puente Peatonal			7	7	0.13	News06	La Flora	7	7	0.13
3411	Puente Férreo			7	7	0.13	News06	La Flora	7	7	0.13
3411	Puente Vehicular			7	7	0.13	News06	La Flora	7	7	0.13
3413	Faro			7	7	0.13	News06	Faro	7	7	0.13
3414	Cable		3414	7	7	0.13	Copp06	ALTA TENSION	7	7	0.13
3415	Tubería	 Sig Papel	Continuous	1	1	0.5	Copp06	TRASANDINO	48	7	0.20
3417	Torre			7	7	0.13	News06	Torre del Cambio	7	7	0.13
3419	Otros ductos	 Sig Papel	Continuous	48	7	0.2	Copp06	Oleoducto	48	7	0.20
5101	Drenaje Doble Ancho Dre Doble Estrecho		Continuous	172	5	Borde 0.18	Clear08/10 Clear06	<i>RIO N. RIO N. RIO NEGRO</i>	172	5	0.18
5101_hatch	Achurado		Patron Ansi31 Esc. 198 Ang. 90	5	5	Hatch 0.13					
5102	Canal Doble		Continuous	172	5	Borde 0.18	Clear06	<i>Canal del Norte</i>	172	5	0.18
5102_hatch	Achurado		Patron Ansi31 Esc. 198 Ang. 90	5	5	Hatch 0.13					
5103	Canal Sencillo Acequia	 Sig Papel 7mm 15mm Papel	Continuous	170	5	0.25	Clear06	<i>Acequia Cantina</i>	172	5	0.18
5105	Manantial			5	5	0.13	Clear06	<i>Manantial</i>	172	5	0.18
5112	Laguna		Continuous	172	5	Borde 0.18	Clear08/10	<i>Laguna Laguna</i>	172	5	0.18

layer	Nombre del objeto	Representacion Grafica del objeto	Tipo de linea	Color layer		Calibre Grafica	Estilo de texto utilizado	Representacion texto	Color texto		Calibre texto
				Cad	Salida				Cad	Salida	
5112_hatch	Achurado		Patrón Ansi31 Esc. 120 Ang. 90	5	5	Hatch 0.13					
5113	Embalse		Continuous	172	5	Borde 0.18	Clear06/08/10	<i>Embalse Embalse</i>	172	5	0.18
5113_hatch	Achurado		Patrón Ansi31 Esc. 120 Ang. 90	5	5	Hatch 0.13					
5114_4121	Ciénaga		Continuous	172	5	Borde 0.18	Clear06/08/10	<i>Ciénaga Ciénaga</i>	172	5	0.18
5114_4121_hatch	Achurado		Patrón Ansi31 Esc. 120 Ang. 90	5	5	Hatch 0.13					
5114_4122	Pantano		5114_4122	172	5	Borde 0.18	Clear06/08/10	<i>Pantano Pantano</i>	172	5	0.18
5114_4122_hatch	Achurado		Patrón Grass Esc. 120 Ang. 0	5	5	Hatch 0.13					
5116	Jagüey / Pozo		Continuous	172	5	Borde 0.18	Clear06	<i>Jagüey Pozo</i>	172	5	0.18
5116_hatch	Achurado		Patrón Ansi31 Esc. 120 Ang. 90	5	5	Hatch 0.13					
5124_4123	Drenaje Sencillo Permanente		Continuous	170	5	0.25	Clear06	<i>Drenaje permanente</i>	172	5	0.18
5124_4124	Drenaje Sencillo Intermitente		5124_4124	170	5	0.25	Clear06	<i>Drenaje intermitente</i>	172	5	0.18
5201	Banco de Arena		5201	7	7	Borde 0.13					
5201_hatch	Achurado		Ptn. ar_sand Esc. 20 Ang. 0	7	7	Hatch 0.13					
5205	Banco de Roca		5205	7	7	Borde 0.13					
5205_hatch	Achurado		P Dots E 400 A 0 E 300 P Cross	7	7	Hatch 0.13					
5206	Isla		Continuous	29	7	0.25	Clear06	<i>Isla del Encanto</i>	18	7	0.18

layer	Nombre del objeto	Representacion Grafica del objeto	Tipo de linea	Color layer		Calibre Grafica	Estilo de texto utilizado	Representacion texto	Color texto		Calibre texto
				Cad	Salida				Cad	Salida	
6101_1000	Curva de Nivel Indice		Continuous	34	34	0.35	News06	100	34	34	0.35
6101_1001	Curva de Nivel Indice Aproximada		6101_1001	34	34	0.35	News06	150	34	34	0.35
6101_1010	Curva de Nivel Intermedia		Continuous	35	34	0.13	News06	125	35	34	0.13
6101_1011	Curva de Nivel Intermedia Aprox.		6101_1011	35	34	0.13	News06	125	35	34	0.13
7150_1000	Límite de Nación		7150_1000	38	7	0.50	Cent12	COLOMBIA	29	7	0.25
7150_1060	Límite de Departamento		7150_1060	38	7	0.50	Cent10	SANTANDER	29	7	0.25
7150_1070	Límite de Municipio		7150_1070	250	7	0.35	Cent08	BARICHARA	48	7	0.20
7403	Area de Inundaciones		7403	18	7	Borde 0.18					
7403_hatch	Achurado		Patrón Dash Esc. 200 Ang. 0	7	7	Hatch 0.13					
Coordenadas	Cuadrícula		Continuous	7	7	0.13	Copp06		48	7	0.20
Restitucion	Lineas de Restitucion		Continuous 3101_2384	29	7	0.25					

• Nota: Para colocar en las vias
"a Coobos"



ABREVIATURAS

Ay	• Arroyo	Q	• Quebrada
Bzo	• Brazo	R	• Rio
Cnd	• Canada	Crr	• Cerro
Cn	• Cano	Clla	• Cuchilla
Cga	• Ciénaga	I	• Isla
Emb	• Embalse	Nev	• Nevado
Ens	• Ensenada	Pto	• Puerto
Lag	• Laguna	V	• Volcan

ANEXO B

PARAMETROS MORFOMETRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO OPON

CUENCA RÍO OPON										
SEGUNDA DIVISION	AREA (Km2)	PERIMETRO (Km)	ELEVACION (msnm)				Kf	Kc	Km	tc (min)
			MAXIMA	MINIMA	MEDIANA	MEDIA				
Quebrada Chucureña	31,97	26,64	2550	1200	1901,92	1868,78	0,37	1,3291	54,6800	11,25
Quebrada Aurora	47,45	31,62	3000	1200	2075,94	2031,5	0,25	1,2949	41,6800	13,67
Quebrada El Oso	76,35	37,56	2300	500	1198,29	1196,04	0,26	1,2126	15,7700	16,85
Quebrada Colorada	227,79	73,17	3400	375	1376,51	1459,73	0,4	1,3676	6,3700	19,53
Quebrada la Campana	107,27	49,47	1400	275	558,93	599,19	0,3237	1,3474	5,5154	38,52
Río La Verde	73,25	38,89	1850	275	587,34	657,04	0,2151	1,2818	8,7253	33,33
Río Opón Bajo	85,33	59,91	950	150	348,23	364,92	0,2691	1,8295	4,1163	69,4
Quebrada Playitas	108,12	52,11	3400	525	1453,17	1425,18	0,1484	1,4137	12,8407	31,56
Quebrada La Sardina	56,38	38,71	2200	375	950,87	919,35	0,1523	1,4543	16,3557	27,68
Quebrada Villaquirá	63,48	42,92	800	200	324,5	343,76	0,2538	1,5196	5,4807	27,99
Quebrada Agua Clara	36,56	27,89	950	175	507,44	489,95	0,258	1,3012	13,0726	21,22
Caño Babillo	57,2	42,83	994	150	300,31	325,77	0,3807	1,5975	5,5783	33,38
Río Colorada medio	37,73	31,37	575	125	222,62	228,68	0,3557	1,4407	6,0484	28,25
Quebrada la Mugrosa	64,79	40,75	400	100	166,59	161,61	0,3827	1,4281	2,4194	77,78
Quebrada el Consuelo	86,04	47,33	1850	325	817,06	887,40	0,2592	1,4394	10,1569	44,2
Quebrada la India	130,05	61,93	1250	150	468,26	492,13	0,2659	1,5319	3,6908	48,1
Caño Arenoso	81,76	56,28	1050	100	172,67	188,46	0,1769	1,7558	2,1807	116,34
Río Manso	78,76	42,93	2150	500	1199,78	1233,38	0,3188	1,3646	15,2896	20,32
Quebrada las Flores	74,26	40,47	1500	325	751,56	755,13	0,3336	1,3248	9,9107	25,79
Caño Inesita	69,06	40,35	1100	125	252,73	314,55	0,1989	1,3697	4,6302	47,62
Caño el Santuario	52,27	40,10	300	100	153,24	147,91	0,2547	1,5646	2,8055	74,19
Quebrada Bolales	35,75	29,92	950	325	608,98	589,12	0,2891	1,4116	16,6345	26,43
Quebrada del salto	39,06	30,02	1100	325	554,33	544,25	0,4314	1,3550	13,6698	35,76
Caño los Cauchos	76,07	46,45	1000	200	390,57	915,53	0,1496	1,5024	5,4467	64,76
Quebrada la Pava	60,84	38,82	1700	350	549,64	863,68	0,3523	1,4040	13,7990	47,22
Quebrada Bombal	62,42	43,01	1300	275	656,07	662,70	0,1478	1,5357	10,3513	52,3
Quebrada El pedregal	163,86	58,52	2750	500	1440,88	1457,44	0,2983	1,2896	8,7995	21,79
Quebrada Merinaque	110,25	50,47	1700	500	902,94	906,07	0,3939	1,3559	8,2887	24,36
Quebrada la Hermosura	87,47	56,58	1376,40	384,62	681,75	678,19	0,3884	1,7066	7,5619	54,67
Río Blanco alto	46,43	32,35	1450	437,78	1180,57	1126,05	0,6109	1,3393	22,5842	13,19
Río Blanco medio	46,25	28,20	1300	225	690,06	688,05	0,393	1,1697	14,8870	17,11
Quebrada larga	76,53	51,99	1150	188,64	349,64	369,39	0,171	1,6765	4,7139	56,86
Río Honduras	43,9	27,94	3300	1074,84	2094,16	2167,00	0,2629	1,1896	48,0548	10
Río Vergelano alto	44,22	28,26	3300	1000	2260,99	2222,27	0,3839	1,1988	50,2584	8,02
Quebrada la Azufrada	30,57	27,09	2539,72	450	1025,55	1129,35	0,2053	1,3822	35,8340	11,71
Quebrada la Honda	31,71	34,79	1950	375	936,93	949,67	0,1828	1,7428	29,4374	16,3

PARAMETROS DE LA RED DE DRENAJE DE LA CUENCA DEL RÍO OPON

CUENCA RÍO OPON										
SEGUNDA DIVISION	Long. (Km)	Recorrido máx. (Km)	Pendiente cuenca (%)		ORDEN	Longitud red (Km)	Densidad	Alejam.	Pendiente cauce (%)	
			Media	Alvord					Ext.	Taylor
Quebrada Chucureña	10,03	10,58	28,14	36,3	4	85,27	2,67	1,77	3,31	6,75
Quebrada Aurora	13,90	14,71	33,24	41,6	4	160,45	3,38	2,02	0,12	7,82
Quebrada El Oso	17,03	17,78	26,54	37,1	5	290,45	3,8	1,95	0,1	6,81
Quebrada Colorada	22,83	23,98	38,48	47,1	6	581,45	2,55	1,51	0,12	8,35
Quebrada la Campana	20,12	21,3	27,07	26,1	5	303,64	2,83	1,94	4,81	1,11
Río La Verde	19,32	21,91	26,70	24,6	4	157,04	2,14	2,26	6,49	1,49
Río Opón Bajo	29,00	30,85	30,83	37,2	5	298,03	3,49	3,14	1,77	0,5
Quebrada Playitas	27,74	28,72	37,01	45,9	5	276,11	2,55	2,67	9,84	3,54
Quebrada La Sardina	18,57	20,58	39,37	27,5	5	147,52	2,62	2,47	8,87	2,23
Quebrada Villalquirá	14,93	15,74	14,62	20,2	5	194,51	3,06	1,87	3,69	1,4
Quebrada Agua Clara	13,12	13,95	34,33	35	5	98,45	2,69	2,17	4,44	2,22
Caño Babillo	14,36	16,20	19,21	25,5	5	175,79	3,07	1,90	5,09	0,82
Río Colorada medio	12,64	13,05	21,34	31,6	5	149,64	3,97	2,06	3,45	0,98
Quebrada la Mugrosa	19,03	19,50	13,31	25,4	5	255,94	3,95	2,36	0,51	0,16
Quebrada el Consuelo	18,83	19,83	37,32	27,2	5	212,72	2,47	2,03	6,9	0,68
Quebrada la India	26,36	28,15	23,45	24,4	6	342,08	2,63	2,31	3,47	1,07
Caño Arenoso	34,04	36,51	12,04	21,3	5	316,16	3,87	3,76	2,51	0,18
Río Manso	18,68	19,87	27,19	36,8	5	191,94	2,44	2,10	7,8	5,04
Quebrada las Flores	15,38	16,63	25,84	23,3	6	309,48	4,17	1,78	4,66	1,84
Caño Inesita	21,49	23,57	20,74	21,4	4	150,85	2,18	2,59	3,81	0,73
Caño el Santuario	19,50	19,65	9,35	22,4	6	190,16	3,64	2,70	0,76	0,19
Quebrada Boleales	13,55	13,66	29,83	28	4	101,28	2,83	2,27	3,84	1,34
Quebrada del salto	10,83	11,31	29,93	28,4	5	84,02	2,15	1,73	5,52	0,39
Caño los Cauchos	28,80	28,88	22,17	25,1	5	1185,78	15,59	3,30	2,25	0,59
Quebrada la Pava	15,93	17,06	39,46	29,8	5	202,78	3,33	2,04	7,62	0,41
Quebrada Bombal	23,76	24,44	39,95	36,8	5	237,74	3,81	3,01	3,37	0,7
Quebrada El pedregal	23,27	24,75	23,50	31	6	459,12	2,8	1,82	9,09	6,52
Quebrada Merinaque	18,78	19,53	36,00	25,5	5	322,78	2,93	1,79	5,12	3,18
Quebrada la Hermosura	27,58	28,68	32,84	28,09	5	307,33	3,51	2,95	2,35	0,84
Río Blanco alto	12,65	14,66	23,78	21,8	5	97,12	2,09	1,86	6,52	7,1
Río Blanco medio	11,32	11,94	27,93	23,02	4	140,58	3,04	1,66	9	2,89
Quebrada larga	27,79	28,76	24,90	30,2	5	230,85	3,02	3,18	3,39	0,77
Río Honduras	12,03	13,89	53,16	60,4	4	91,05	2,07	1,82	0,16	13,18
Río Vergelano alto	9,99	11,37	51,63	56,9	4	82,01	1,85	1,50	0,2	16,12
Quebrada la Azufrada	11,45	12,40	40,27	52,7	5	96,73	3,16	2,07	0,15	7,91
Quebrada la Honda	14,69	15,77	36,37	25,4	4	95,20	3	2,61	9,88	5,52

PARAMETROS MORFOMETRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CARARE

CUENCA RÍO CARARE										
SEGUNDA DIVISION	AREA (Km2)	PERIMETRO (Km)	ELEVACION (msnm)				Kf	Kc	Km	tc (min)
			MAXIMA	MINIMA	MEDIANA	MEDIA				
Quebrada la Corcovada	92,43	47,45	600	150	233,89	258,46	0,1524	1,3923	2,7715	82,99
Quebrada la Chisposa	57,64	38,73	450	150	254,92	245,76	0,2810	1,4391	4,2539	16,01
Caño la Guinea	76,97	43,45	425	150	203,19	206,75	0,5570	1,3971	2,6866	40,60
Quebrada la Torova	52,10	33,16	1.200	188	435,82	483,49	0,2278	1,2960	8,8650	32,98
Quebrada la Parra	161,20	68,05	225	100	154,78	143,01	0,2345	1,5120	0,8888	137,59
Río Sanjuancito	95,54	47,26	400	125	231,94	213,44	0,3786	1,3639	2,1994	55,38
Caño Cocuy	82,21	52,61	275	125	174,86	165,85	0,3924	1,6368	1,9860	64,00
Quebrada la Grande	46,13	29,50	1.650	225	694,19	709,62	0,3451	1,2253	15,3038	18,77
Quebrada Santa Inés	106,29	58,25	1.750	150	584,12	636,41	0,1677	1,5938	5,7890	38,57
Quebrada la Natividad	32,80	28,29	250	125	148,99	139,75	0,5395	1,3934	4,1824	33,76
Quebrada la Perdida	55,16	37,04	1.400	125	277,93	380,35	0,1781	1,4069	6,8274	40,27
Quebrada Amarilla	87,52	42,37	1.400	125	331,40	414,09	0,5957	1,2776	4,5516	48,29
Quebrada Campo Escondido	117,44	68,45	500	125	201,58	189,58	0,2036	1,7818	1,5792	152,24
Quebrada la Luja	189,38	62,67	3.000	850	2.246,04	2.127,17	0,3585	1,2847	11,3501	19,61
Río Negro	36,79	32,67	2.250	700	1.199,90	1.243,58	0,1490	1,5194	32,7303	17,63
Quebrada la Ballena	107,66	50,26	2.400	500	880,16	926,14	0,2277	1,3664	8,0502	44,93
Quebrada el Muerto	110,39	59,71	2.550	250	682,55	775,02	0,1604	1,6032	6,8725	44,67
Río la Pradera	100,99	54,12	3.000	1.200	2.646,67	2.569,74	0,2030	1,5192	27,4186	27,71
Río la Granja	86,80	47,66	3.000	800	2.595,45	2.468,46	0,2904	1,4431	27,6446	20,48
Quebrada San Cristobal	90,02	53,32	2.450	730	1.075,25	1.124,48	0,2874	1,5853	12,0278	27,36
Río Blanco Bajo	150,93	62,10	2.800	375	797,89	982,03	0,2450	1,4259	6,4852	42,89
Quebrada García	49,38	32,38	3.150	1.350	2.756,32	2.677,31	0,4012	1,2999	60,9501	10,51
Quebrada de Juana	78,74	50,51	2.800	375	1.492,92	1.532,71	0,1786	1,6057	17,6710	20,78
Quebrada Grande	32,24	29,52	3.100	1.350	2.651,15	2.579,69	0,1878	1,4666	98,8837	9,80
Quebrada San Antonio	86,07	45,99	1.500	250	695,48	670,59	0,1283	1,3984	7,7792	52,79
Quebrada Campo Obando	102,41	50,85	1.350	200	406,07	487,78	0,4699	1,4175	4,7488	36,54
Quebrada la Guinea	43,69	45,89	800	200	328,44	344,47	0,2340	1,9585	6,7228	40,58
Quebrada la Clavellina	57,21	33,93	1.400	175	464,30	570,66	0,3488	1,2654	9,7698	38,48

PARAMETROS DE LA RED DE DRENAJE DE LA CUENCA DEL RÍO CARARE

CUENCA RÍO CARARE										
SEGUNDA DIVISION	Long. (Km)	Recorrido máx. (Km)	Pendiente cuenca (%)		ORDEN	Longitud red (Km)	Densidad	Alejam.	Pendiente cauce (%)	
			Media	Alvord					Ext.	Taylor
Quebrada la Corcovada	31,04	32,15	17,80	25,2	5	155,14	1,68	3,23	1,4	0,36
Quebrada la Chisposa	17,21	17,27	19,54	28,8	5	126,41	2,19	2,27	1,74	7,95
Caño la Guinea	22,67	22,67	14,92	22,9	4	159,40	2,07	2,58	0,99	1,23
Quebrada la Torova	19,87	20,17	25,13	25,5	4	136,08	2,61	2,75	5,02	1,62
Quebrada la Parra	33,09	33,78	3,88	14,7	5	476,33	2,95	2,61	0,22	0,11
Río Sanjuancito	19,35	19,44	16,33	24,5	5	237,50	2,49	1,98	1,03	0,4
Caño Cocuy	24,49	19,98	6,13	19,2	6	251,86	3,06	2,70	0,5	0,44
Quebrada la Grande	12,13	12,37	37,38	30,1	5	122,38	2,65	1,79	9,37	2,61
Quebrada Santa Inés	25,66	27,42	32,29	27,2	4	263,95	2,48	2,49	5,47	1,8
Quebrada la Natividad	12,67	12,86	4,01	18,5	5	115,05	3,51	2,21	0,57	0,62
Quebrada la Perdida	20,83	21,34	26,79	28,4	5	149,37	2,71	2,80	5,97	1,06
Quebrada Amarilla	15,37	15,84	32,64	32,4	5	154,66	1,77	1,64	3,95	0,36
Quebrada Campo Escondido	44,06	43,13	18,06	25,5	5	313,05	2,67	4,07	0,56	0,15
Quebrada la Luja	22,19	23,30	22,45	33,3	5	269,99	1,43	1,61	9,18	7,8
Río Negro	16,17	17,32	28,33	38,5	4	118,12	3,21	2,67	8,82	5,46
Quebrada la Ballena	23,55	24,77	31,78	42,6	5	205,82	1,91	2,27	2,42	1,02
Quebrada el Muerto	25,57	29,63	34,06	27,7	5	252,37	2,29	2,43	7,76	1,22
Río la Pradera	24,37	28,47	17,10	16,5	5	137,46	1,36	2,42	6,11	3,83
Río la Granja	16,43	18,68	15,58	28,7	4	103,88	1,20	1,76	0,11	3,82
Quebrada San Cristobal	18,00	18,75	32,70	44,5	5	273,29	3,04	1,90	7,47	2,16
Río Blanco Bajo	27,77	30,32	33,43	23,9	5	348,18	2,31	2,26	7,34	1,6
Quebrada García	9,51	11,44	30,68	38,6	4	100,69	2,04	1,35	0,15	7,25
Quebrada de Juana	18,73	20,21	57,69	66,2	4	138,98	1,77	2,11	0,12	4,78
Quebrada Grande	11,26	12,14	37,65	45,3	4	56,57	1,75	1,98	0,14	12,16
Quebrada San Antonio	28,75	29,66	40,50	32,4	4	164,13	1,91	3,10	4,05	1
Quebrada Campo Obando	17,38	18,33	26,34	26,2	5	161,35	1,58	1,72	3,82	0,95
Quebrada la Guinea	15,96	16,66	24,16	29,2	4	83,56	1,91	2,41	3,6	0,61
Quebrada la Clavellina	18,29	15,53	29,30	27	5	88,88	1,55	2,42	6,6	0,92