



PROYECTO DE GRADO
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO
AMBIENTE

**MANUAL COMPARATIVO DE HIDROLOGÍA BÁSICA PARA
DRENAJE SUPERFICIAL**

NATALIA GARCÍA LÓPEZ
JIOBANNY ANTONIO CORAL FLOREZ

BOGOTÁ ABRIL DE 2015



**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

NATALIA GARCÍA LÓPEZ
JIOBANNY ANTONIO CORAL FLOREZ

DIRECTOR
DR. GERMAN SANTOS

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

**ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO
AMBIENTE**

BOGOTÁ, ABRIL DE 2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado “**MANUAL COMPARATIVO DE HIDROLOGÍA BÁSICA PARA DRENAJE SUPERFICIAL**” presentado por **NATALIA GARCÍA LÓPEZ** y **JIOBANNY ANTONIO CORAL FLOREZ**, en cumplimiento del requisito parcial para optar el título de **ESPECIALISTA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**, fue aprobado por el director del trabajo **DR. GERMAN SANTOS**.

Firma Director

Nota:

Bogotá, Abril de 2015.

TABLA DE CONTENIDO

1. PREFACIO.....	4
2. DEFINICIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MORFOMÉTRICOS.....	5
2.1. DELIMITACIÓN CUENCA HIDROGRÁFICA.....	5
2.1.1. CARTOGRAFÍA DIGITAL.....	5
2.1.2. ARCGIS.....	11
2.1.2.1. obtención de información cartográfica satelital.....	11
2.1.2.1. geoprocésamiento delimitación de cuencas en arc hydro tool.....	22
2.2. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS (ÁREA- LONGITUD -PENDIENTE)	
35	
2.2.1. CARTOGRAFÍA DIGITAL – AUTOCAD.....	35
2.2.1. ARCGIS – HEC GEO HMS.....	36
2.2.1.1. PREPROCESAMIENTO HEC GEO HMS.....	36
2.2.1.2. PREPROCESAMIENTO.....	36
2.2.1.3. CONFIGURACIÓN DE PROYECTO.....	38
2.2.1.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	40
3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS HIDROCLIMATOLÓGICOS.....	45
3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	45
3.2. EXCEL.....	48
3.3. HYFRAN.....	50
4. CURVAS DE INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA.....	54
4.1. CURVAS IDF DATOS HISTORICOS DE PRECIPITACIÓN (IDEAM).....	54
4.2. CURVAS IDF SINTÉTICAS (VARGAS RODRIGO – 1998).....	56
5. OBTENCIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO.....	63
5.1. MÉTODO RACIONAL.....	63
5.1.1. FACTOR DE REDUCCIÓN.....	63
5.1.1.1. ECUACIÓN DE FRÜHLING.....	64
5.1.1.2. ECUACIÓN TOMADA DEL INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, PROCEEDINGS, 2ND PART, “FLOOD STUDIES REPORT”, VOLUME 65.....	64
5.1.2. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	64
5.1.2.1. BRANSBY.....	64

5.1.2.2.	KIRPICH	64
5.1.3.	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA.....	65
5.2.	MÉTODO LLUVIA – ESCORRENTÍA SCS	66
5.3.	GEO - HMS	69
5.3.1.	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	71
5.3.2.	NUMERO DE CURVA.....	73
5.3.3.	MODELO ESQUEMÁTICO Y EXPORTACIÓN A HEC HMS.....	76
6.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	89
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	94
8.	BIBLIOGRAFÍA.	97

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Ubicación Tramo de Vía Ejemplo	4
Figura 2. Referencias Externas – AutoCAD	6
Figura 3. Referencias Externas JPG – AutoCAD.....	7
Figura 4. Plancha IGAC – AutoCAD.....	8
Figura 5. Planchas IGAC Geo referenciadas – AutoCAD	8
Figura 6. Vía Ejemplo Planchas – AutoCAD.....	9
Figura 7. Cuencas Delimitadas – AutoCAD.....	10
Figura 8. Cuencas Delimitadas – AutoCAD.....	10
Figura 9. Definición de Cuencas y Cauces – AutoCAD	11
Figura 10. Página autorizada de la NASA	12
Figura 11. Registro de Usuarios – NASA.	12
Figura 12. Clasificación de Información Objeto de Estudio – NASA.	13
Figura 13. Descarga de Información – NASA.....	14
Figura 14. Descarga de Información – NASA.....	14
Figura 15. Divisiones de Cuadrantes para Colombia de Información Satelital ASTER.	15
Figura 16. Descarga de Información – NASA.....	16
Figura 17. Descarga de Información – NASA.....	16
Figura 18. Descarga de Información – NASA.....	17
Figura 19. Descarga de Información – NASA.....	17
Figura 20. Creación Feature-shapefile	18
Figura 21 – Georeferenciacion feature shapefile.....	18
Figura 22 – Creación rectángulo Feature shapefile.....	19
Figura 23 – Proyección Raster a un Nuevo Sistema de Coordenadas	20
Figura 24 Raster DEM ASTER para la Zona de Estudio.	20
Figura 25 Creación mosaico Raster zona de estudio	21
Figura 26 –DEM Zona de Estudio – ARCGIS.....	22
Figura 27 – Herramienta Extensión Arc Hydro Tools ARCGIS 10.2	23
Figura 28 – Preprocesamiento Fill ARCGIS	24
Figura 29 – Preprocesamiento Flow Direction.....	25
Figura 30 – Preprocesamiento Flow Accumulation	26
Figura 31 – Preprocesamiento Stream Definition.	27
Figura 32 – Preprocesamiento Stream Segmentation.	28
Figura 33 – Preprocesamiento Catchment grid delineation	29
Figura 34 – Preprocesamiento Catchment Polygon Processing	29
Figura 35 – Preprocesamiento Drainage line processing	30
Figura 36 – Preprocesamiento Adjoint Catchment Delineation.....	31
Figura 37 – Preprocesamiento Slope	32
Figura 38 – Definición puntos de escurrimiento.....	33
Figura 39 – Delimitación de cuencas Arc Hydro Tools	34
Figura 40 – Resultado de delimitación de cuencas en Arc Hydro Tools	34
Figura 41 - Preprocesamiento Stream Segmentation.....	37

Figura 42 – Delimitación de Cuencas Hec GeoHMS	37
Figura 43 – Data Management.....	38
Figura 44 – Delimitación de cuencas Hec GeoHMS.....	39
Figura 45 – Delimitación cuencas punto de escurrimiento - Hec GeoHMS	39
Figura 46 – Modelo Topológico - Hec GeoHMS	40
Figura 47 – Data Management.....	40
Figura 48 – Characteristics River Length - Hec GeoHMS.....	41
Figura 49 – Characteristics Basin Slope - Hec GeoHMS.....	42
Figura 50 – Creación Grilla Pendientes – Hec GeoHMS	42
Figura 51 – Characteristics Basin Slope - Hec GeoHMS Slope - Hec GeoHMS	43
Figura 52 – Characteristics Basin - Hec GeoHMS.....	44
Figura 53. Localización de Estaciones Climatológicas	46
Figura 54. Ajuste a Distribuciones – Estación Guayabito	49
Figura 55. Nuevo Documento - Hyfran.....	50
Figura 56. Parámetros Estadísticos - Hyfran.....	51
Figura 57. Datos - Hyfran.....	51
Figura 58. Estadística de base - Hyfran	52
Figura 59. Estadística de base - Hyfran	53
Figura 60. Curvas IDF Estación CO Guayabito – IDEAM.....	55
Figura 61. Regiones en Colombia – Parámetros de Regresión	57
Figura 62. Curvas Sintéticas IDF Estación CO Guayabito.....	58
Figura 63. Curvas Sintéticas IDF Estación PM San Roque	59
Figura 64. Curvas Sintéticas IDF Estación CP Granja Exploratoria San José del Nus.....	61
Figura 65. Tabla 15.1.1 Coeficientes de Escorrentía para ser usados en el Método Racional.....	65
Figura 66 – Data Management.....	69
Figura 67 – Parameters Processes HMS - Hec GeoHMS	70
Figura 68 – Parameters River Auto Name- Hec GeoHMS.....	70
Figura 69 – Tiempos de concentración- Hec GeoHMS.....	71
Figura 70 – TR55 Export- Hec GeoHMS.....	72
Figura 71 – Macro de cálculo Tiempos de Concentración - Hec GeoHMS	73
Figura 72 – Cobertura de Suelos y Numero de Curva.....	74
Figura 73 – integración número de curva al geoprocetamiento - Hec GeoHMS.....	75
Figura 74 – Verificación de Numero de Curva tabla de Atributos	75
Figura 75 – Data Management.....	76
Figura 76 – Modelo Esquemático - Hec GeoHMS	76
Figura 77 – Check Data - Hec GeoHMS	77
Figura 78 – Edición de Errores - Hec GeoHMS.....	77
Figura 79 – Datos Completos de Exportación - Hec GeoHMS	78
Figura 80 – Modelo Esquemático - Hec GeoHMS	78
Figura 81 – Data Model Export - Hec GeoHMS.....	79
Figura 82 – Export Model Basin File y Met File - Hec GeoHMS	79
Figura 83 – Creación Modelo HMS - Hec GeoHMS	80
Figura 84 – Modelo Hidrológico Exportado al HMS.....	80
Figura 85 – Modelo Hidrológico Exportado al HEC - HMS	81
Figura 86 – Hietograma de entrada modelo meteorológico HEC HMS.....	82

Figura 87 – Creación Met Model - HEC HMS.....	83
Figura 88 – Hietograma de entrada modelo meteorológico HEC HMS.....	83
Figura 89 – Entradas de datos GAGES – HEC -HMS.....	84
Figura 90 – Especificaciones de Control – HEC - HMS.....	85
Figura 91 – Demarcación influencia de Estaciones meteorológicas.....	85
Figura 92 – Relación de cuencas a los modelos meteorológicos – HEC-HMS.....	86
Figura 93 – Creación de Simulaciones – HEC – HMS.....	87
Figura 94 – Corridas de modelo Hidrológico- HEC HMS.....	87
Figura 95 – Visualización de Resultados – HEC HMS.....	88
Figura 96 – Delimitación Número de Cuencas.....	89
Figura 97 – Grafica de Diferencia Porcentual Áreas.....	90
Figura 98 – Grafica de Diferencia Porcentual Longitud de Cauces.....	91
Figura 99 – Grafica de Diferencia Porcentual Pendientes.....	92
Figura 100 – Grafica de Diferencia Porcentual Caudales de Diseño.....	93

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Clasificación Cuencas Tamaño.....	35
Tabla 2. Estaciones IDEAM registradoras de Precipitación.....	45
Tabla 3. Lluvia Máx. 24 h – Estación Guayabito.....	46
Tabla 4. Calculo estadística base – Estación Guayabito.....	48
Tabla 5. Ajuste Estadístico a Distribuciones – Estación Guayabito.....	49
Tabla 6. Relaciones IDF – Estación Guayabito IDEAM.....	55
Tabla 7. Valores Parámetros de Regresión en Colombia.....	56
Tabla 8. Relaciones IDF – Estación CO Guayabito.....	58
Tabla 9. Relaciones IDF – Estación PM San Roque.....	60
Tabla 10. Relaciones IDF – Estación CP Granja Exploratoria San José del Nus.....	61
Tabla 11. Hietograma – Estación Guayabito.....	81

ÍNDICE DE ANEXOS.

ANEXO 1. Planos AutoCAD

ANEXO 2. Modelo ArcGIS – GeoHMS

ANEXO 3. Cuadro de Resultados

ANEXO 3.1. Análisis Parámetros Morfométricos

ANEXO 3.2 Resultados Método Tradicional - AutoCAD

ANEXO 3.3. Resultado ArcGIS - GeoHMS

ANEXO 3.4 Comparación de Resultados

ANEXO 4. Información IDEAM

ANEXO 5. Memoria de Calculo

ANEXO 5.1. Memoria de Calculo Método Taylor

ANEXO 5.2 Memoria de Calculo Análisis Estadístico Excel

ANEXO 5.3. Memoria de Calculo Análisis Estadístico Hyfran

ANEXO 5.4: Curvas IDF Sintéticas Guayabito

ANEXO 5.5: Curvas IDF Sintéticas San Roque

ANEXO 5.6: Curvas IDF Sintéticas Granja Exploratoria San José del Nus

ANEXO 5.7: Memoria de Calculo Hietogramas de Precipitación

ANEXO 5.8: Memoria de Calculo Caudales SCS

INTRODUCCIÓN.

El siguiente proyecto de grado está dirigido a presentar de manera sencilla y clara un manual comparativo de hidrología básica para drenaje superficial que mediante una recopilación bibliográfica y la elaboración de ejemplos, permita analizar y comparar diferentes metodologías para realizar un estudio hidrológico relacionado con el drenaje superficial, haciendo énfasis, principalmente, en cotejar las metodologías tradicionales con las sistematizadas gracias a nuevas herramientas computacionales.

Aunque en la actualidad existen diferentes documentos de fácil acceso y que son muy útiles en el momento de realizar estudios hidrológicos de drenaje superficial, los sistemas de información y los programas computacionales han sistematizado las metodologías que facilitan la elaboración de los mismos. Los aspectos que se consideran para la elaboración de un estudio hidrológico pueden analizarse de diferentes maneras, dependiendo de la información disponible (hidroclimatología, cartografía, imágenes satelitales, topografía, uso del suelo, cobertura vegetal) de la zona en estudio y de la región del país. Hoy en día, debido al desarrollo herramientas computacionales, las metodologías tradicionales no se usan tan frecuentemente y muchas veces los resultados que se obtienen con las metodologías que han surgido, pueden no ser tan verídicos, Por lo que son necesarios el criterio y la experiencia para determinar si los resultados que se obtienen son representativos de la zona que se está estudiando.

Con base en lo anterior se pretende analizar las principales metodologías tradicionales y las metodologías recientemente desarrolladas, con el fin de compararlas los resultados que se obtienen al emplearlas en casos reales. Este documento además de ser una recopilación bibliográfica, es un compendio de las experiencias adquiridas por los autores durante su última etapa laboral, teniendo como base principal los conocimientos recibidos en las cátedras de hidrología computacional e hidrología básica aplicada dentro del programa regular del postgrado y la aplicación y empleo de estos en diferentes proyectos en que se ha venido participando. Uno de los objetivos buscados, es dejar plasmadas estas experiencias de manera académica, para ser usadas y/o consultadas por ingenieros interesados en este tipo de temas.

Este proyecto de grado consta de 7 capítulos. En el primero se presenta un marco teórico donde se exponen los criterios, ecuaciones y postulados básicos que se emplearán de una manera muy general. El segundo capítulo está orientado a establecer y comparar las principales metodologías para la definición de cuencas hidrográficas, así como la estimación de parámetros físicos y

morfométricos más relevantes. En el capítulo 3 se presentan las herramientas a emplear para el análisis estadístico de datos hidroclimatológicos.

En el capítulo 4, se analizan algunas metodologías para la obtención de las Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF).

En el capítulo 5 se estudian las metodologías y herramientas para la obtención de caudales de diseño, se analizan y se comparan las metodologías en función del tamaño de la cuenca. Cabe aclarar que para cada método se deben analizar distintos parámetros como tiempos de concentración, intensidades, factores de reducción, coeficientes de escorrentía, entre otros y cada parámetro se analiza de distinta forma.

Finalmente en el capítulo 6 se realiza la comparación de los resultados obtenidos y en el capítulo 7 se presenta un conjunto de conclusiones de las metodologías y herramientas utilizadas, según lo obtenido en los ejemplos, así como la bibliografía utilizada para el desarrollo del proyecto.

Se incluyen anexos con planos, memorias de cálculo, información recolectada y archivos de herramientas computacionales de cada ejemplo realizado.

OBJETIVOS.

OBJETIVOS GENERALES.

- Mediante una recopilación bibliográfica y la elaboración de ejemplos, analizar y comparar las metodologías existentes para realizar un estudio hidrológico relacionado con el drenaje superficial, haciendo énfasis, principalmente, en estudiar las metodologías tradicionales versus las que se han sistematizado gracias al uso de nuevas herramientas computacionales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

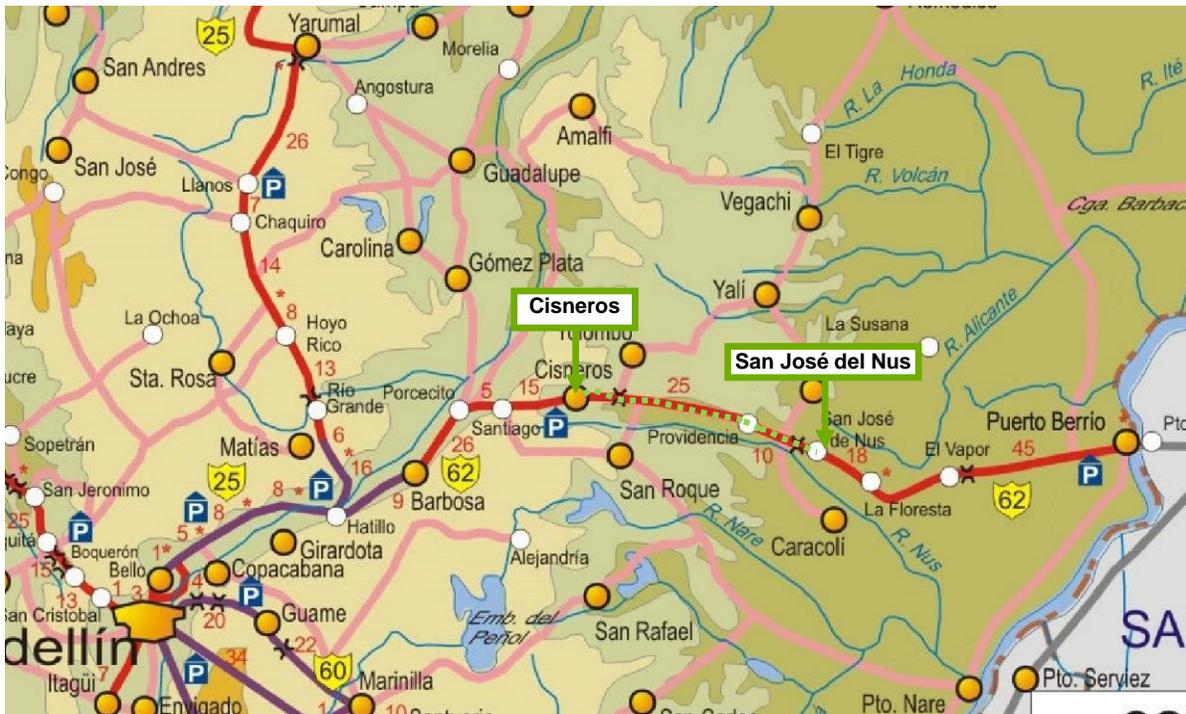
- Recopilar la información y la bibliografía existente que permita analizar los aspectos principales para la elaboración de estudios hidrológicos encaminados a la obtención de caudales para diseños de drenaje superficial.
- Establecer y comparar las principales metodologías para la definición de cuencas hidrográficas, así como la estimación de parámetros físicos y morfométricos más relevantes.
- Analizar y comparar las principales metodologías para el análisis estadístico de datos hidroclimatológicos.
- Analizar y comparar las metodologías para el diseño de Curvas de Intensidad – Duración y Frecuencia (IDF).
- Comparar y estudiar las principales metodologías para la estimación de caudales de diseño.
- Analizar y concluir sobre la conveniencia de la utilización de cada uno de los métodos y compilar los análisis y resultados en un documento que permita al lector entender fácilmente el procedimiento de cada metodología y las recomendaciones para el uso de cada una de ellas.

1. RESUMEN.

Con el objetivo de ilustrar por medio de ejemplos cada una de las metodologías y comparar los resultados que se obtengan, se va a emplear el mismo corredor de vial durante todo el Manual. Se eligió un tramo de vía que además de cruzar cauces importantes durante su recorrido, disponga de cartografía oficial del IGAC en escala 1:25.000, que se considera, por el distanciamiento de las curvas de nivel, es la más adecuada para este tipo de trabajos, además se evaluó que en el sitio donde se localiza el corredor vial se disponga de una buena red hidroclimatológica, con periodos de registro extensos y confiables. Se trabajara con el corredor que conduce del Municipio de Cisneros a San José de Nus, en el Departamento de Antioquia.

En la siguiente figura se muestra la ubicación general del tramo de vía que se va a analizar en los ejemplos, la imagen es tomada de la página oficial del Instituto Nacional de Vías, INVIAS.

Figura 1. Ubicación Tramo de Vía Ejemplo



Fuente: www.invias.gov.co

2. DEFINICIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MORFOMÉTRICOS

La Cuenca Hidrográfica se define como la unidad territorial natural que capta la precipitación, y es por donde transita el escurrimiento hasta un punto de salida en el cauce principal o sea es un área delimitada por una divisoria topográfica denominada parte-agua que drena a un cauce común (Brooks ,1985).

La hoya hidrográfica es el ente físico natural de todo cálculo en hidrología. Se define como un área limitada topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple, localizada en el punto más bajo de la misma. El límite topográfico es la divisoria, la cual se define como la línea que separa las precipitaciones que caen en hoyas inmediatamente vecinas, y que encaminan la escorrentía resultante para uno u otro sistema fluvial (Manual de Drenaje de Carreteras INVIAS, 2009).

2.1. DELIMITACIÓN CUENCA HIDROGRÁFICA

Consiste en definir la línea de divisoria de aguas, la cual marca el límite entre una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas. La delimitación de una cuenca o la definición de la línea divisoria de aguas, puede realizarse de diferentes maneras.

2.1.1.CARTOGRAFÍA DIGITAL

Para realizar el estudio con Cartografía digital deben obtenerse las planchas en formato digital JPG y puede emplearse el programa AutoCAD. La forma de insertar las planchas en AutoCAD se hace mediante referencias externas. A continuación se explica paso a paso el procedimiento para delimitar las cuencas hidrográficas con cartografía digital, analizando el tramo de vía Cisneros – San José del Nus.

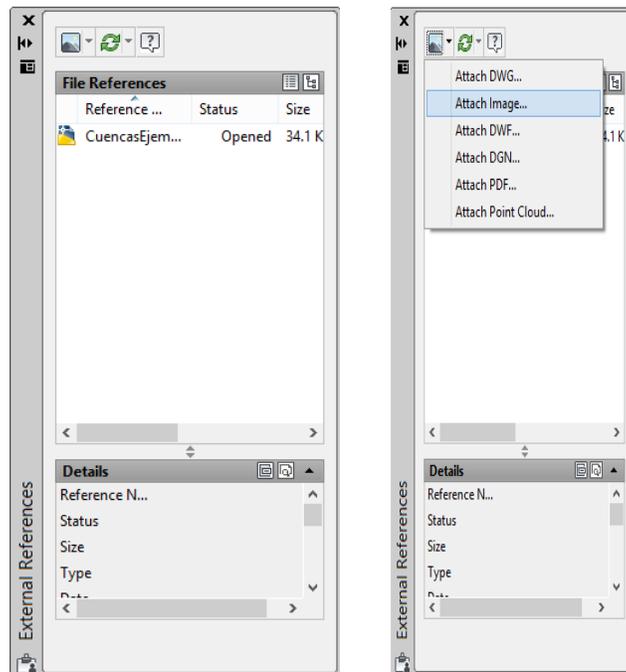
- Debe crearse una carpeta en la que se van a guardar las planchas en formato JPG y un archivo en formato dwg que se va a crear en AutoCAD.

- Las planchas del IGAC vienen georeferenciadas en coordenadas planas, las planchas deben insertarse en el programa en las coordenadas exactas y en escala 1:1. Para este paso deben tomarse las coordenadas de dos esquinas opuestas de cada plancha y ubicar estos dos puntos en

AutoCAD. La manera más práctica de hacerlo es por medio de un rectángulo. En la cinta de comandos se escribe REC. El programa pregunta el punto de la primera esquina del rectángulo, debe escribirse la primera pareja de coordenadas, colocando primero el este (y) y luego la norte (x) separadas por una coma. Luego pide que se especifique el siguiente punto, de la misma manera se introducen las coordenadas de la esquina opuesta de la plancha.

- Teniendo los puntos exactos de la Plancha, con el comando XR, aparece una ventana llamada External References, se selecciona el icono Attach Image, como se muestra en las siguientes figuras y se busca la plancha que se va emplear.

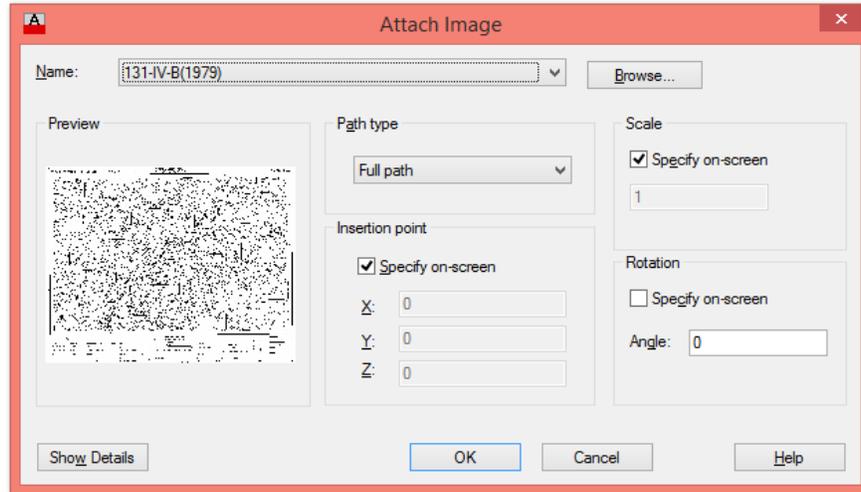
Figura 2. Referencias Externas – AutoCAD



Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

- Luego de seleccionar la plancha, en la siguiente ventana, se da OK, para dejar los parámetros por defecto del AutoCAD.

Figura 3. Referencias Externas JPG – AutoCAD



Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

- El programa pide que se inserte el punto donde se va ubicar la plancha, debe picarse cualquier punto, preferiblemente dentro del rectángulo que se creó con las coordenadas de la plancha, luego el programa pregunta en que escala inserta la imagen, por defecto se deja <1>.

- El siguiente paso consiste en escalar y georeferenciar la plancha. Se escribe ALIGN en la cinta de comandos y el programa pide que se seleccione el objeto que se desea alinear. Se pica la imagen de la plancha y se da ENTER, luego pide que se especifique el primer punto, se pica la esquina de plancha que corresponde a las coordenadas del primer punto del rectángulo que se creó, luego se debe especificar el punto de destino que es el punto en el rectángulo. El programa pide que se especifique el segundo punto a alinear y se repite el mismo procedimiento de la primera esquina, ahora con la esquina opuesta y se da ENTER, el AutoCAD pregunta si escala la imagen y debe escribirse YES y dar ENTER.

- Para que sólo se vea la imagen de la plancha sin el rotulo de IGAC, se emplea el comando CLIP. Se selecciona la imagen de la plancha, y se da ENTER, el AutoCAD pide que se escoja una opción de lo que se desea hacer con la imagen, por defecto se deja la opción New Boundary y se da ENTER, luego pide que se escoja con base a que se va a realizar el CLIP, en este caso es el rectángulo que creamos, se escoge la opción Select Polyline, se da ENTER y se selecciona el rectángulo. En la siguiente imagen se muestra la plancha luego del proceso realizado.

Figura 4. Plancha IGAC – AutoCAD

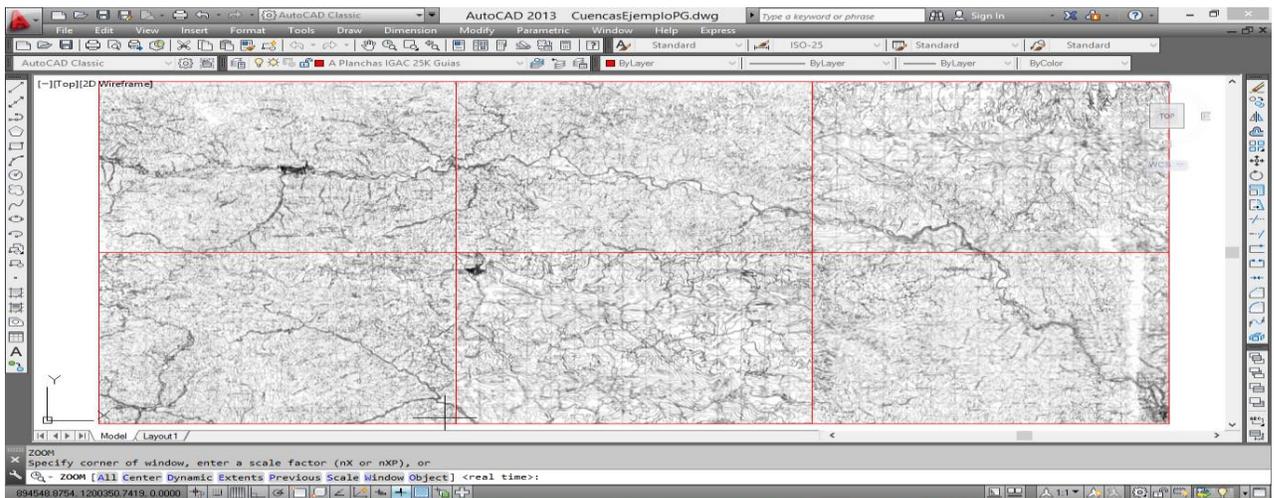


Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

- El mismo proceso se repite con cada una de las planchas que sea necesario insertar para cubrir completamente el área de estudio del proyecto.

- Para que el trabajo en AutoCAD vaya siendo más organizado, es importante crear capas para las guías de los rectángulos y para las planchas insertadas por medio de referencias externas. En la siguiente imagen se presentan todas las planchas georeferenciadas y escaladas que se van a emplear en el ejemplo.

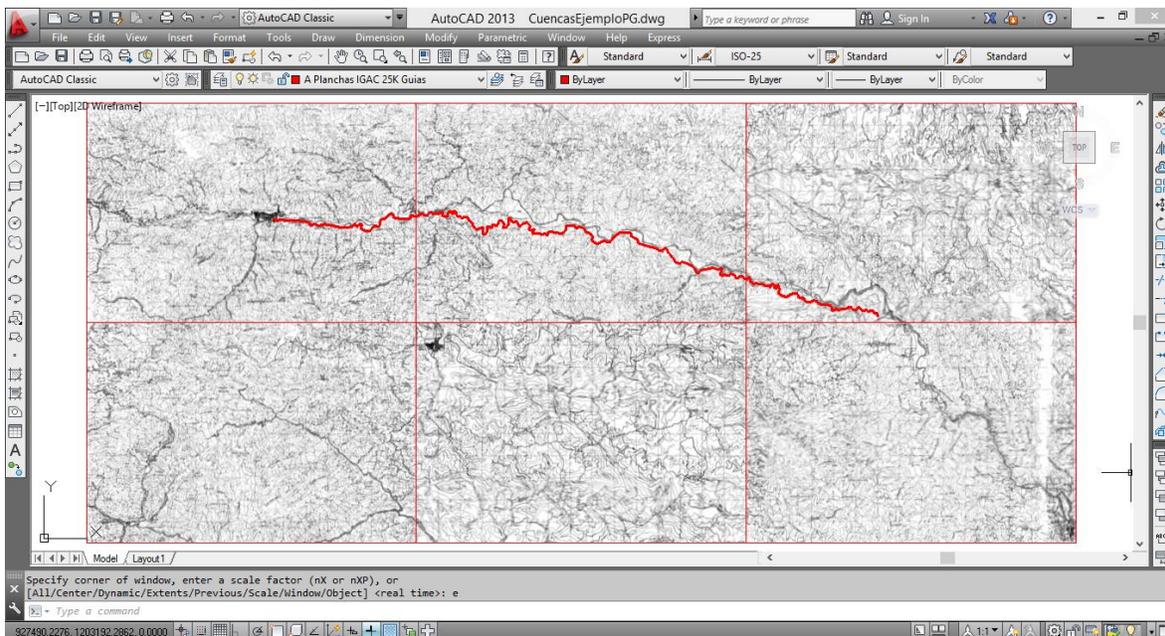
Figura 5. Planchas IGAC Geo referenciadas – AutoCAD



Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

- Posterior a insertar todas las planchas utilizando el comando Polyline (PL) se procede a iluminar el tramo de vía que se va a analizar.

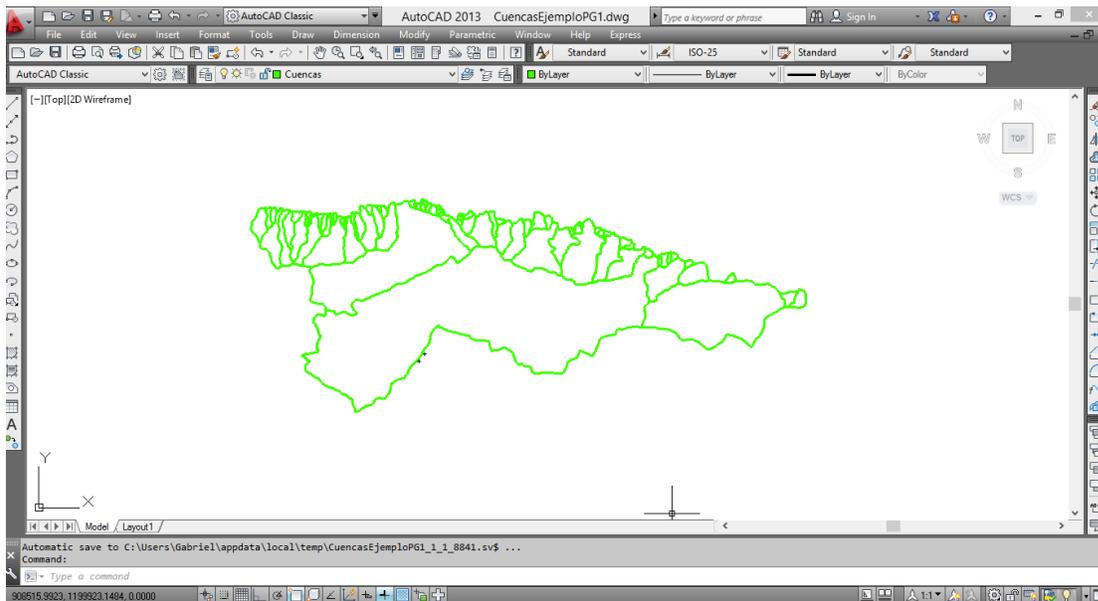
Figura 6. Vía Ejemplo Planchas – AutoCAD



Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

- De igual manera y en otro Layer se ilumina cada cauce que cruce la vía y se traza la cuenca aferente a cada sitio donde la vía es interceptada por un río, quebrada, brazo, etc.
- Es importante que cada cuenca quede trazada en una única polilínea con el fin de que cuando se requiera medir el área en AutoCAD se facilite el procedimiento. Para esto se puede crear la cuenca por segmentos asegurándose que aunque no sea una única polilínea, los segmentos estén perfectamente unidos. Cuando se hayan trazado todas las cuencas mediante el comando LAYISO se selecciona la capa que se quiere aislar. Se pica la capa (layer) en la que se trazaron las cuencas y en el modelo solo se tendrán los objetos o líneas que corresponden a esta capa.

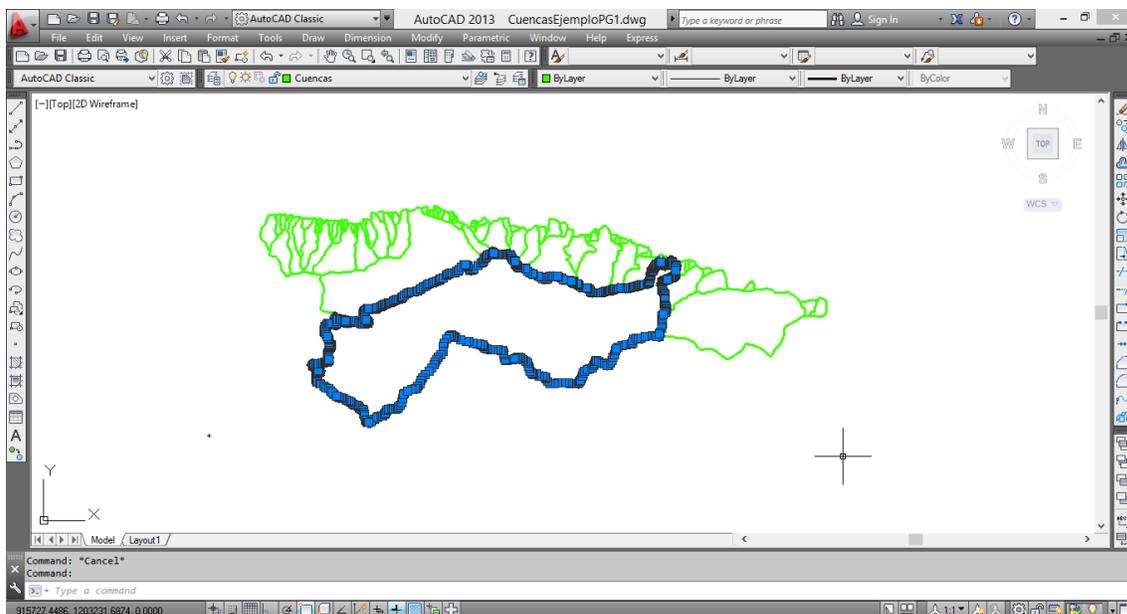
Figura 7. Cuencas Delimitadas – AutoCAD



Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

- Ahora es necesario utilizar el comando BPOLY, se desplegara la siguiente ventana y se da clic en pick Points, teniendo activada la opción Island Detection, se debe dar clic en algún punto dentro de cada cuenca y se da ENTER, generando una polilinea de cada cuenca.

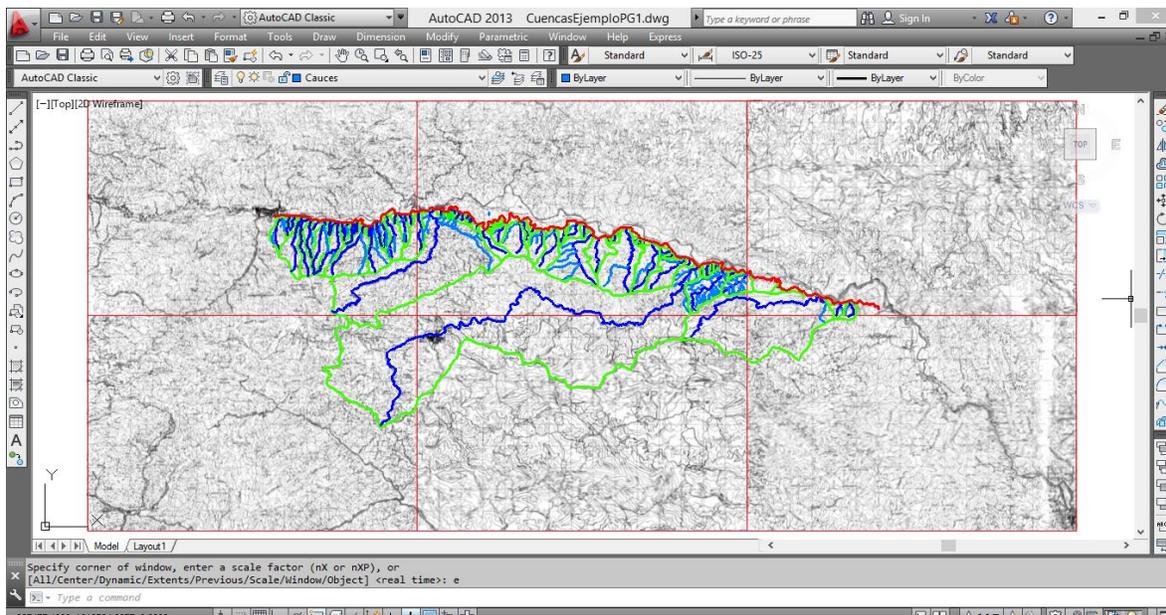
Figura 8. Cuencas Delimitadas – AutoCAD



Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

Finalmente obtenemos todas las cuencas aferentes a la vía que se presentan en el **Anexo 1** y en la siguiente imagen.

Figura 9. Definición de Cuencas y Cauces – AutoCAD



Fuente: Elaboración propia - AutoCAD 2013

2.1.2. ARCGIS

Una alternativa usual para realizar la delimitación de las cuencas con cartografía, sea física o digital, consiste en el uso de Sistema de Información Geográfica, para este caso se va emplear el programa ARCGIS. A continuación se explica el procedimiento para delimitar las cuencas aferentes al tramo de vía Cisneros – San José del Nus.

El empleo de datos en un proyecto SIG requiere de elementos vectoriales y de tipo raster que combinados permiten definir múltiples niveles de asociación, incluso con reglas topológicas para la definición precisa del comportamiento entre las diferentes capas de información.

2.1.2.1. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA SATELITAL

Inicialmente se necesita un modelo de elevación digital (DEM) del área que se desee estudiar, si no se cuenta con esta información es posible descargarla en el servicio Web de la Nasa, ingresando a la página <http://reverb.echo.nasa.gov>.

Figura 10. Página autorizada de la NASA



Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

Se requiere el ingreso de usuario, si se tiene uno, o registrar un nuevo usuario para acceder a la información. (Ver Figura 11)

Figura 11. Registro de Usuarios – NASA.



Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

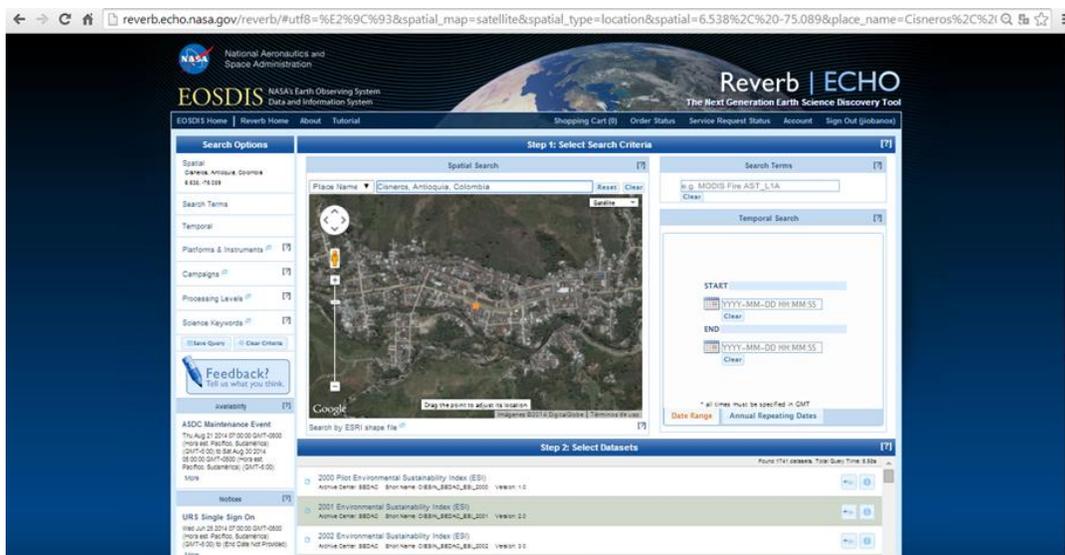
La página de la NASA permite descargar las imágenes de acuerdo a las necesidades del usuario en diferentes métodos de limitación de zonas.

Luego de registrar el usuario, se tiene acceso a la información y se procede con el Paso 1: Seleccionar criterio de búsqueda (Step 1: Select Search Criteria). La búsqueda se puede realizar empleando cualquiera de las siguientes opciones:

- Bounding box o límites de marco de pantalla: se indican las 4 coordenadas en grados decimales referenciados en el sistema de proyección de coordenadas WGS84, que formarán el rectángulo y en el orden Sur, Este, Norte y Oeste.
- Point o coordenada de un punto: se debe especificar la latitud y longitud en grados decimales referenciados en el sistema de proyección de coordenadas WGS84
- Polygon o coordenadas para componer un polígono: se indican de forma consecutiva la latitud y longitud de cada uno de sus puntos.
- 2D coordinate: que permite ingresar las coordenadas de localización de descarga en un sistema diferente al nativo WGS84. Por ejemplo WRS1.
- Place Name: para indicar el nombre de la ciudad o zona a descargar.

Para el ejemplo que se ha desarrollado en las anteriores metodologías, se empleará la opción Place Name, indicando el nombre del municipio de Cisneros, Antioquia, Colombia.

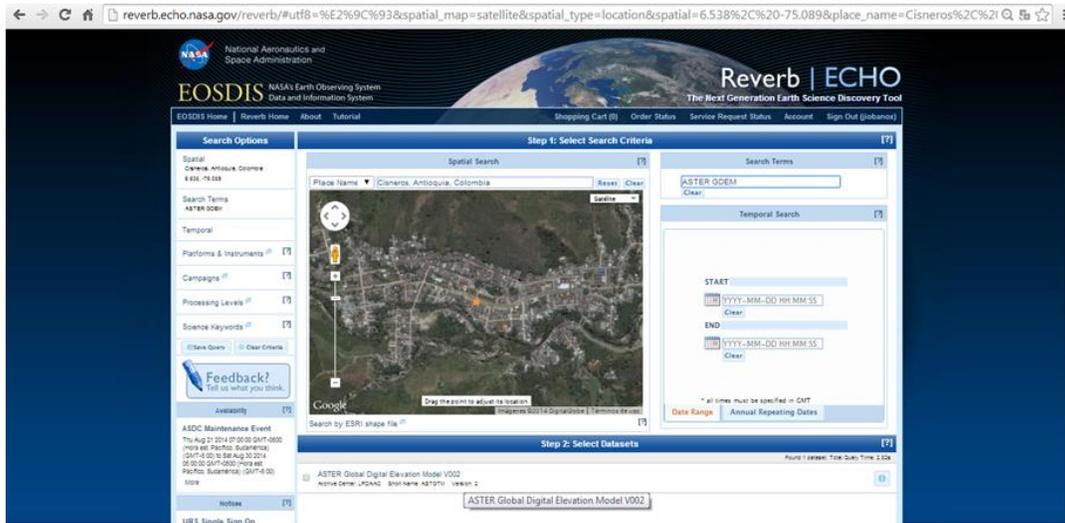
Figura 12. Clasificación de Información Objeto de Estudio – NASA.



Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

Luego de especificar el sitio para el cual se requiere descargar la información, se procede al Paso 2: Seleccione el Conjunto de Datos (Step 2: Select Datasets) para la descarga de la información satelital contenida en el servidor de la Nasa. En este caso se requiere descargar modelos de elevación, en la cinta de términos de búsqueda (Search Terms) se debe buscar ASTER GDEM, la búsqueda genera el conjunto de datos ASTER Global Digital Elevation Model V002 y se selecciona este resultado.

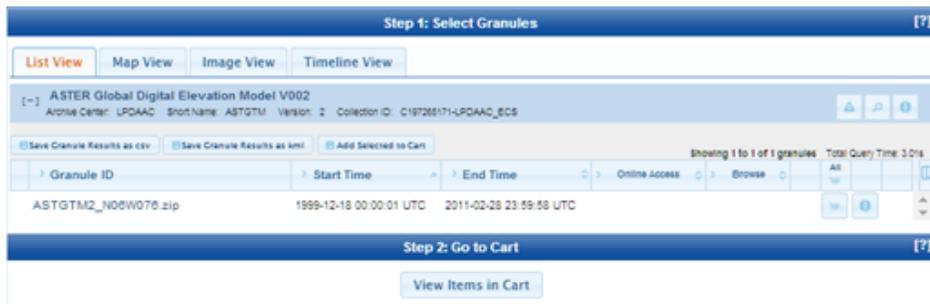
Figura 13. Descarga de Información – NASA.



Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

En el paso 3 (Step 3 – Discover Granules) se da clic en Search for Granules.

Figura 14. Descarga de Información – NASA.

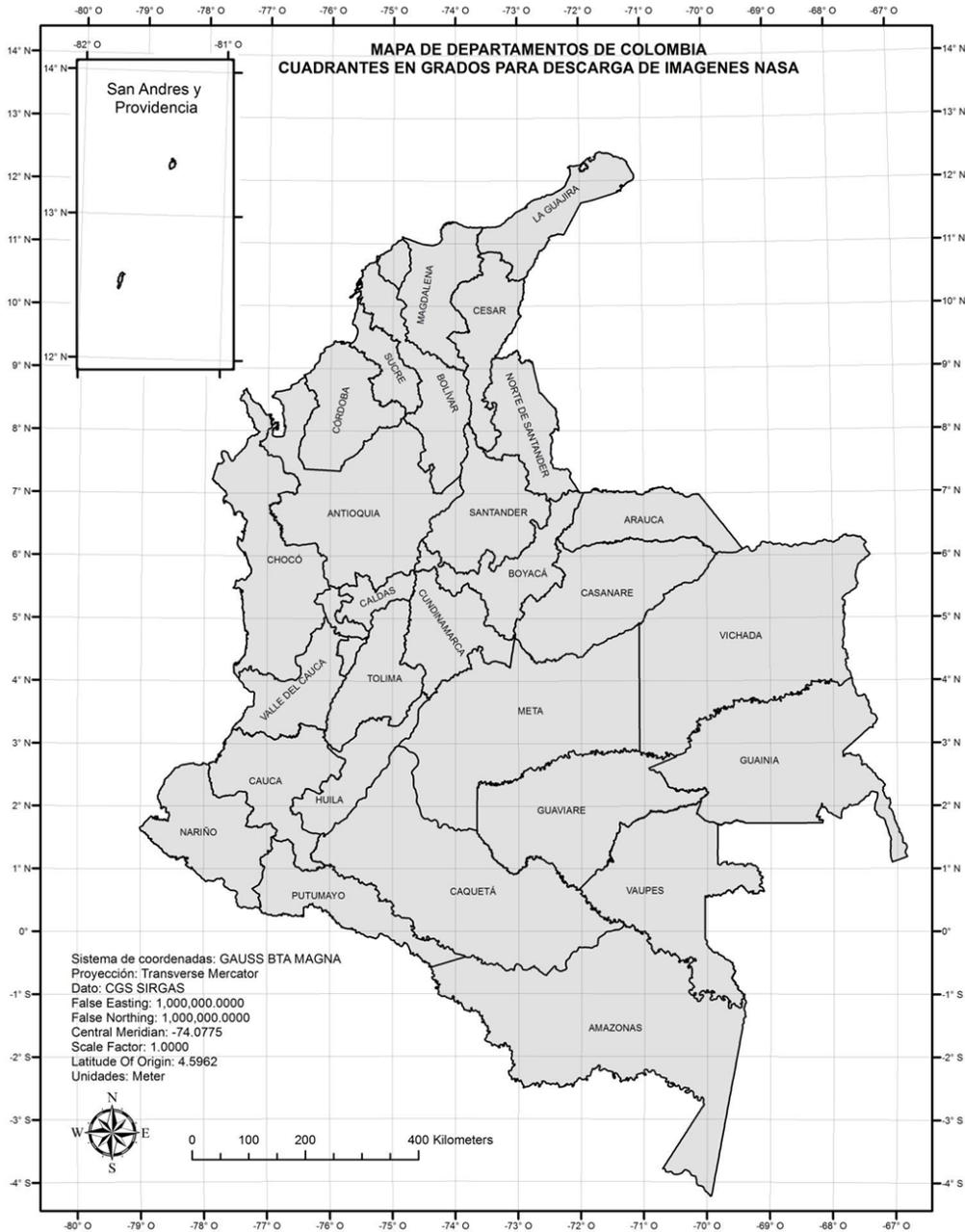


Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

Aparecerá un nuevo contenido indicando los ítems encontrados para la zona seleccionada, se procede a agregarlos al carro de compras (Add to cart). El archivo seleccionado será uno de los 22600 cuadrados de la superficie terrestre que han sido divididos en grados de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ que cubren

aproximadamente 111.11km x 111.11km de área. En caso de que la zona seleccionada se encuentre espacialmente en más de una de las cuadrículas de 1°, se descargarán todas las secciones necesarias para cubrir el área indicada en pantalla. En la siguiente ilustración se pueden observar todas las cuadrículas de Colombia con subdivisiones cada grado.

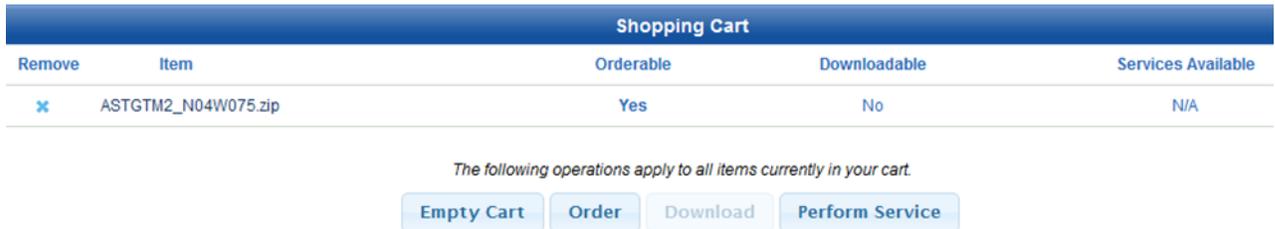
Figura 15. Divisiones de Cuadrantes para Colombia de Información Satelital ASTER.



Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

El siguiente paso es ver los ítems en el carro de compras dando clic en View ítems in Cart. Se desplegará el archivo comprimido con los datos requeridos. Luego se debe dar clic en Order para iniciar la compra.

Figura 16. Descarga de Información – NASA.



Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

Se debe actualizar y verificar la información de contacto que será equivalente a la información del registro. En la parte inferior dar clic en Proceed. En la nueva ventana establecer las opciones adicionales de compra, y se debe dar clic oprimir en la opción Set.

Figura 17. Descarga de Información – NASA.

Contact Information [7]

Contact Information > Order Options > Review Order > Order Receipt

required fields*

Order Contact

First name* jjobanny

Middle initial j

Last name* coral

Email* jjobacco_11@hotmail.com

Receive order notifications When orders reach a final state

Organization name Escuela colombiana de ingenier

Phone

Phone number* 3136307068

Fax number

Address

Street* 205

City* bogota

Country* Colombia

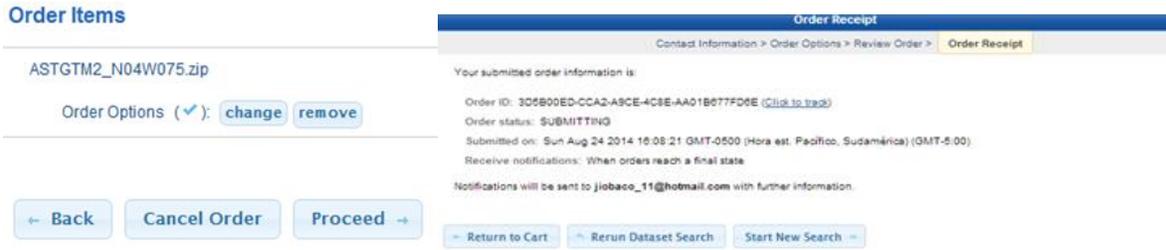
Zip 67

Shipping Contact

Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

Se procede a dar clic en Proceed para ver el resumen completo de la compra y posteriormente a dar clic en submit order. En la bandeja de correo con la que se registró el usuario recibirá un mensaje con el detalle de la compra realizada y otro mensaje con los links de descarga de la información requerida.

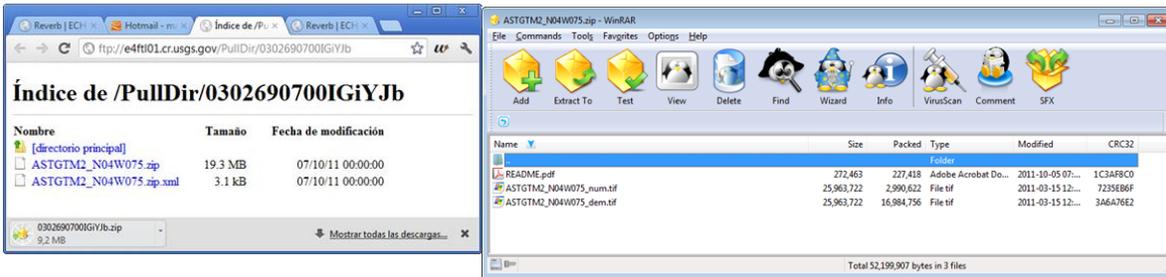
Figura 18. Descarga de Información – NASA.



Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

Se debe descargar y descomprimir las imágenes tiff recibidas

Figura 19. Descarga de Información – NASA.

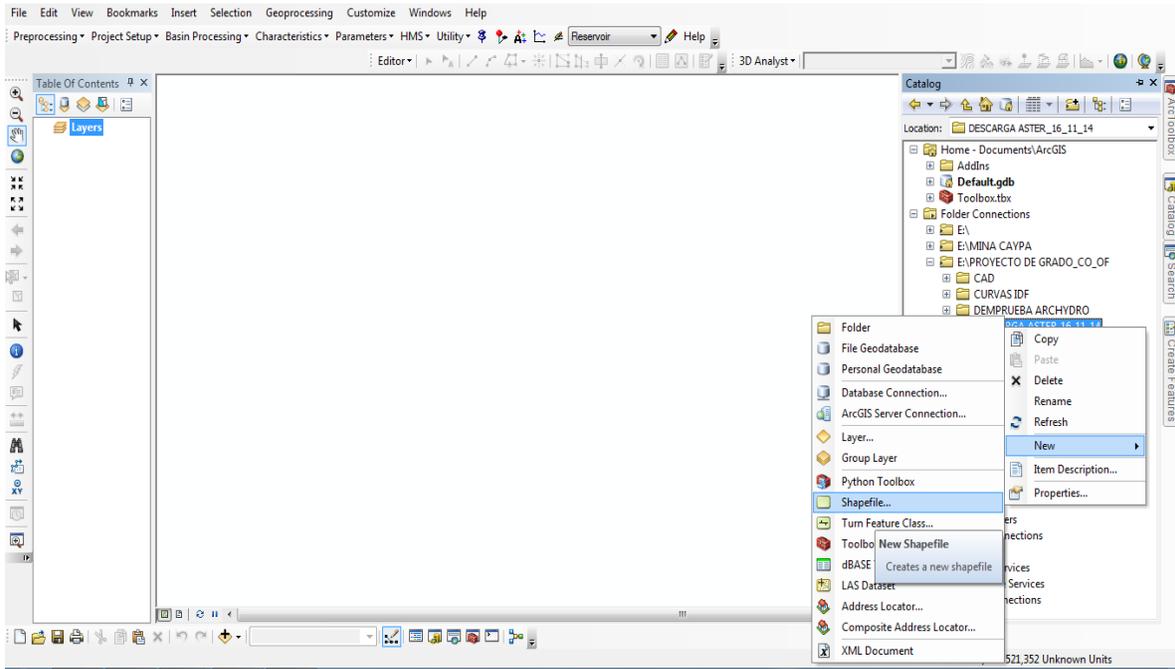


Fuente: www.reverb.echo.nasa.gov

Luego de descargar la información se debe abrir el Software ArcMAP y georeferenciarlo al sistema de coordenadas de interés (Magna Colombia Bogotá), para ello se puede utilizar una capa (feature), ya referenciada en formato shape, en caso de no tener una capa en el sistema de coordenadas se debe crear uno.

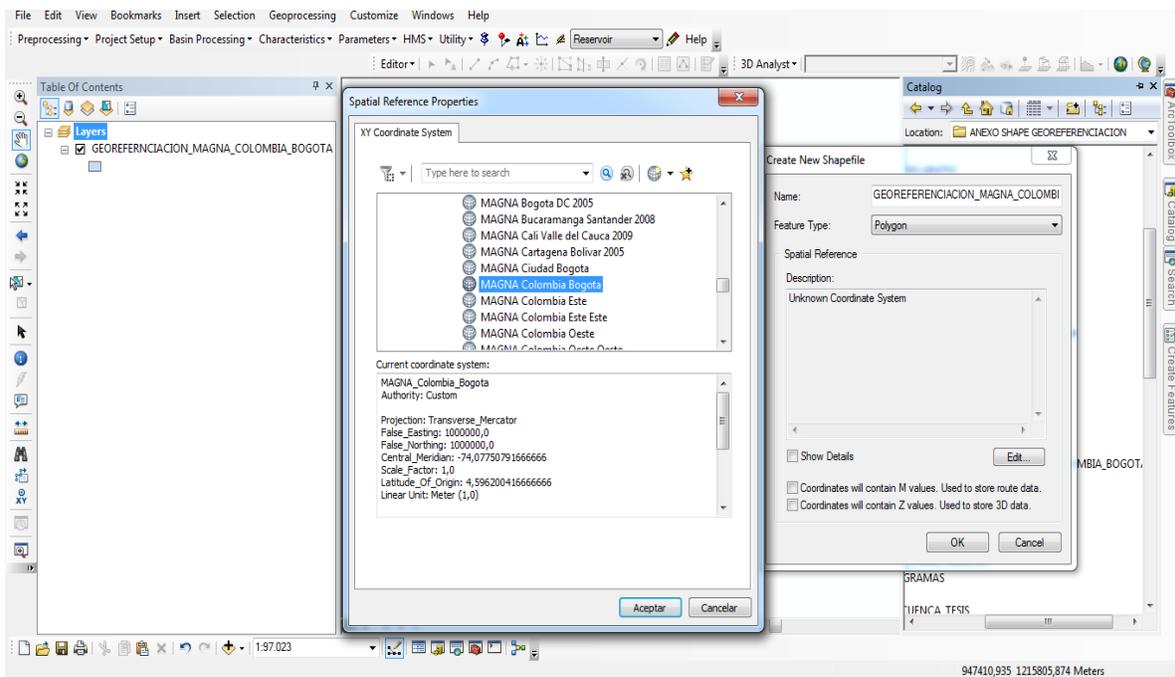
Para crear la capa se debe abrir el arc catálogo con el icono , buscar la carpeta donde se guardara la capa en formato shape, luego dar click derecho y buscar - New/shapefile (Ver Figura 20) se desplegara una nueva ventana donde solicita el nombre de la capa (Name: GEOREFERENCIA_MAGNA_COLOMBIA_BOGOTÁ), posteriormente se debe escoger el tipo de capa (polygon) y el sistema de georeferencia, para este último se debe dar clic en Edit, se abrirá una nueva ventana donde se remite el sistema de coordenadas a trabajar, para ello sobre esta ventana se busca Projected Coordinate Systems/National Grids/Colombia/Magna Colombia Bogotá finalmente dar clic en aceptar. (Ver Figura 21)

Figura 20. Creación Feature-shapefile



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

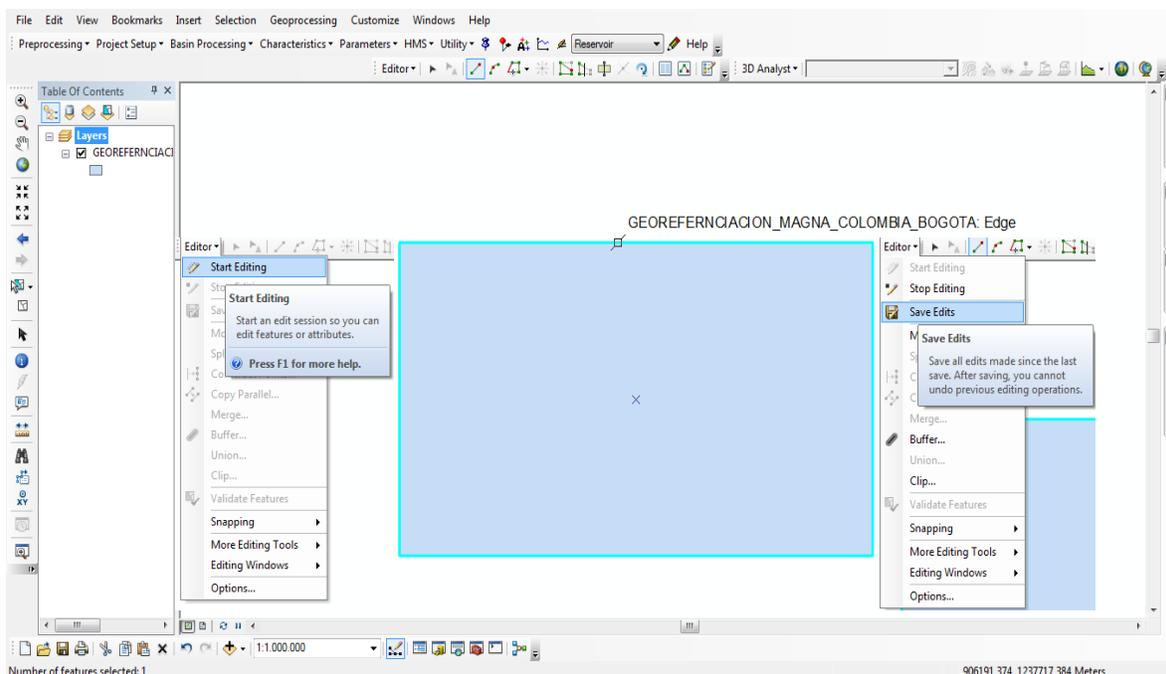
Figura 21 – Georeferenciación feature shapefile



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Una vez creada y georeferenciada la capa (feature) se debe realizar el trazado de la capa, en este caso se trazara un rectángulo, para ello se debe activar el Editor, una vez habilitada la edición con el mouse se traza la figura (rectángulo); al finalizar se debe ir al editor y salvar los cambios. (Ver Figura 22). En el **Anexo 2. Shape georeferenciacion** se presenta la capa geo referenciada en formato shape para efectos de este ejemplo.

Figura 22 – Creación rectángulo Feature shapefile



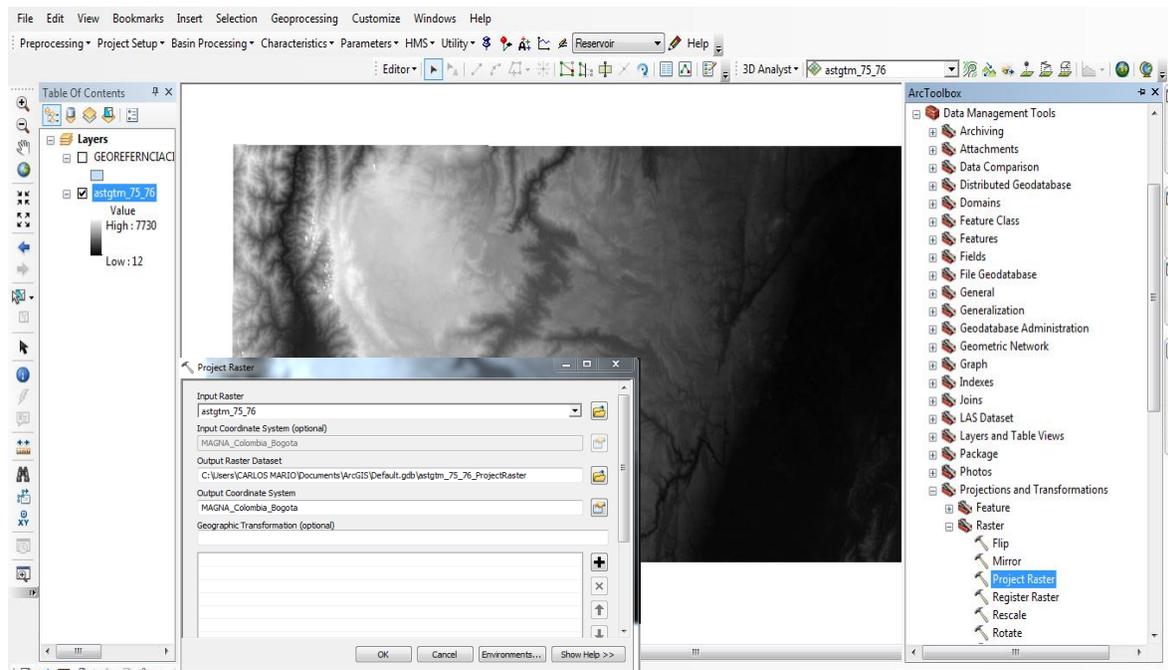
Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Posteriormente se debe abrir un nuevo Arc Map y cargar la capa formato shape, para ello se debe dar clic al icono  y buscar en la carpeta la capa formato shape anteriormente georeferenciado (GEOREFERENCIACIÓN_MAGNA_COLOMBIA BOGOTÁ), el software automáticamente se georeferencia al sistema de coordenadas de interés, para el caso particular Magna Colombia Bogotá.

Sobre este nuevo ArcMAP, y con el sistema georeferenciado se debe cargar las imágenes tiff descargadas de la página de la NASA con la extensión dem, de manera similar como se cargó la capa formato shape georeferenciada anteriormente. Es importante mencionar que la NASA esta georeferenciada en el sistema GCS_WGS_1984, por tal razón se debe georeferenciar al sistema de interés (Magna Colombia Bogotá), para ello se debe ir al Arc Toolbox y buscar Data Management tolos/Projections and Transformations/Project Raster aparecerá una ventana solicitando el raster a proyectar (Input Raster), la carpeta donde se guardará la nueva imagen Raster georeferenciada

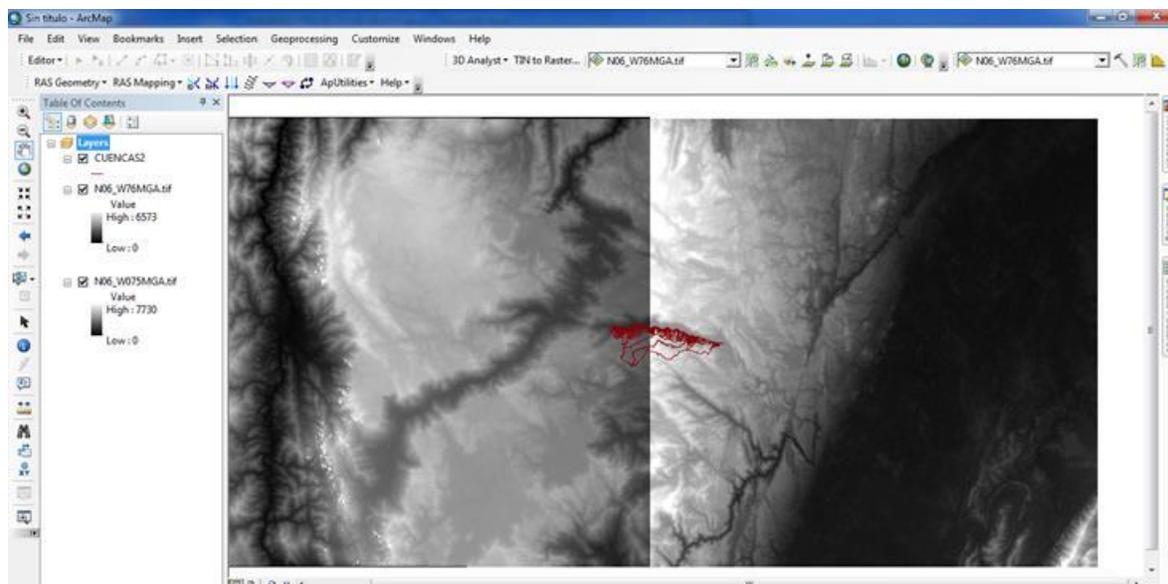
(Output Raster Dataset) y el sistema de coordenadas objetivo (Output Raster dataset), para el caso particular buscamos Magna Colombia Bogotá. (Ver Figura 23)

Figura 23 – Proyección Raster a un Nuevo Sistema de Coordenadas



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

Figura 24 Raster DEM ASTER para la Zona de Estudio.

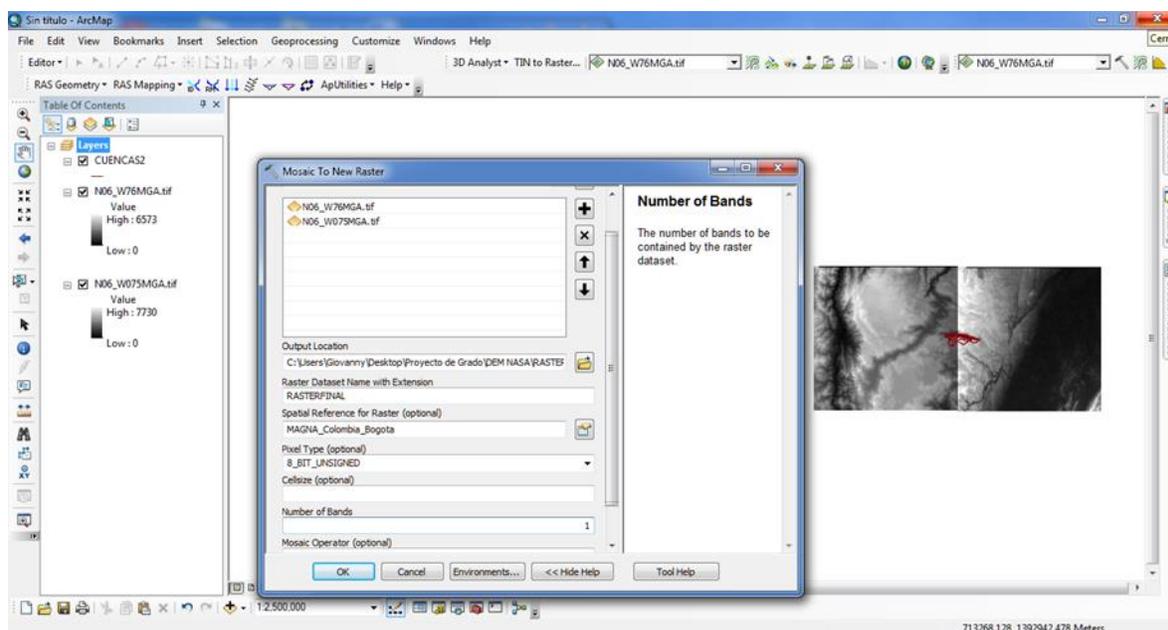


Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Como la ubicación geográfica de la cuenca no permite abarcar el área total con un cuadrante DEM, es necesario pegar dos cuadrantes como se observa en la Figura 25. Para la unión de 2 imágenes raster para cubrir el área de estudio, se procede de la siguiente manera:

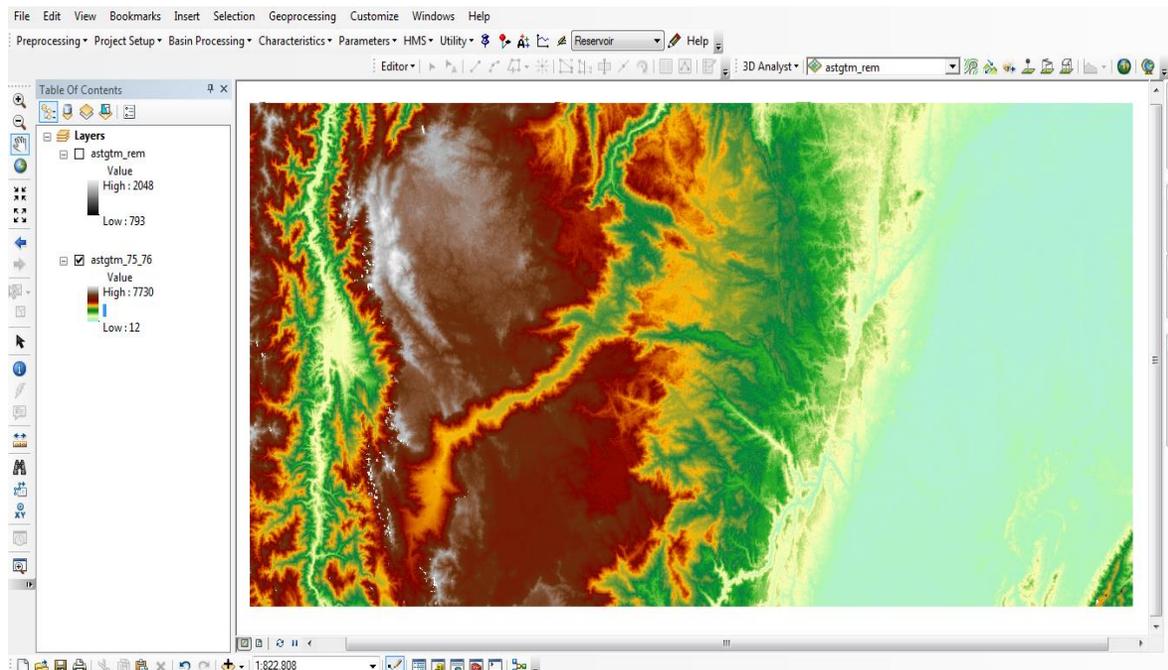
En ArcToolBox ir a Herramientas de Administración de Datos – Ráster – Dataset de Raster y seleccionar la opción Mosaico a Nuevo Raster. Tenga en cuenta que el número de bandas de las imágenes Aster dem obtenidas de la Nasa para modelos topográficos es de 1 y para imágenes de color compuesta es 3 (RGB).

Figura 25 Creación mosaico Raster zona de estudio



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Figura 26 –DEM Zona de Estudio – ARCGIS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

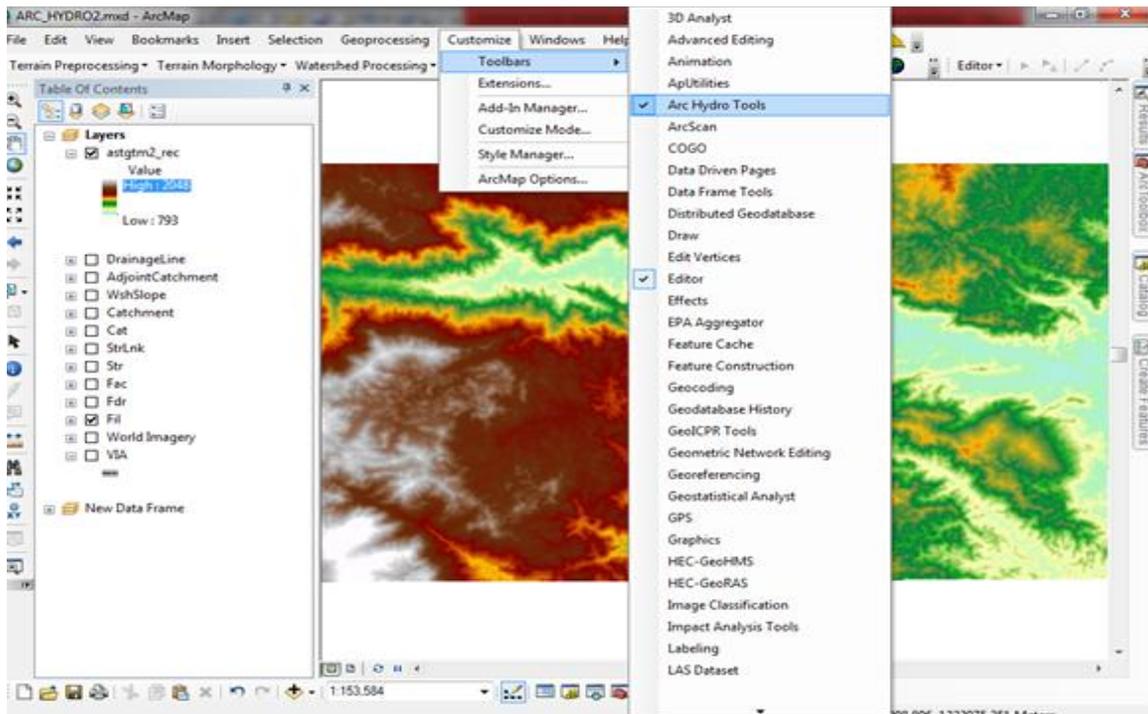
El ARCGIS puede procesar la información para delimitar cuencas de diferentes maneras, aquí se muestra la herramienta más frecuente que es Hydrology, contenida en Arctoolbox – Spatial Analyst Tools o en la extensión de Arc Hydro tools.

2.1.2.1. GEOPROCESAMIENTO DELIMITACIÓN DE CUENCAS EN ARC HYDRO TOOL

A partir de la información en formato Raster, es posible, mediante geo procesamiento, la delimitación de la divisoria de aguas de las cuencas, los drenajes o cauces de cada una de las cuencas y subcuencas en una topografía objeto de estudio. A continuación se presenta el procesamiento con la extensión Arc Hydro Tools para el software ArcGis 10.2.

La extensión del Arc Hydro Tools se obtiene en diferentes páginas de internet de manera gratuita, para la activación de esta herramienta se accede al panel principal Customize donde se despliega una ventana con todas las herramientas y se activa la herramienta en mención (Ver Figura 27).

Figura 27 – Herramienta Extensión Arc Hydro Tools ARCGIS 10.2



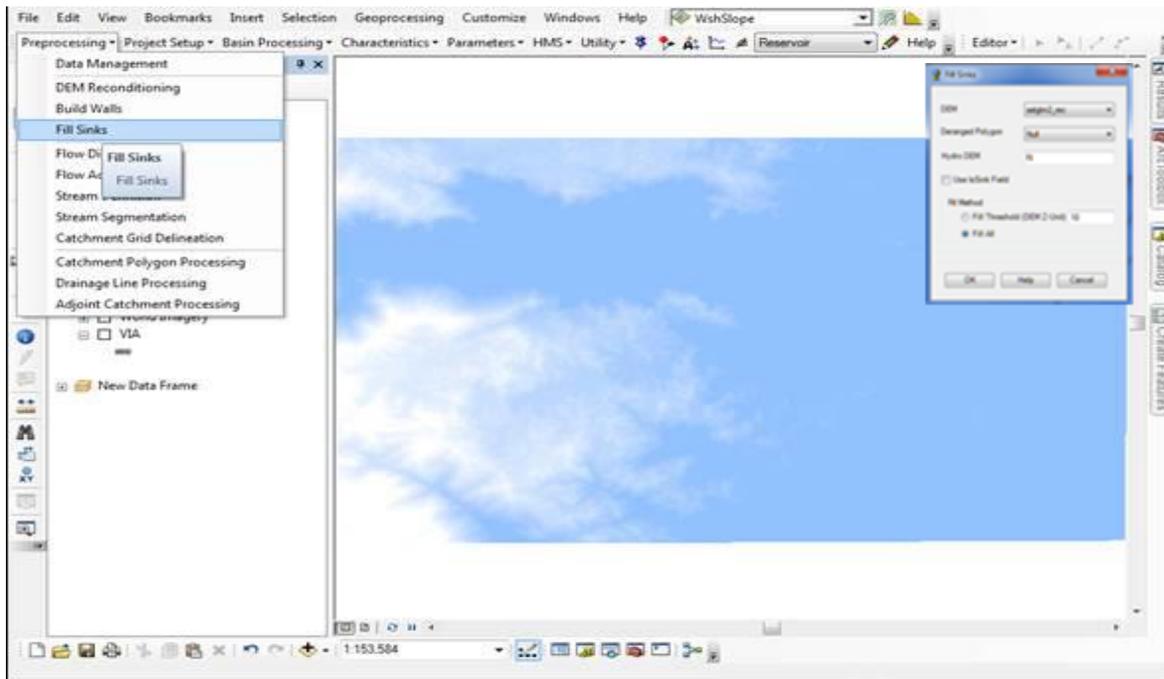
Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Automáticamente se agrega una nueva barra con todas las herramientas del Arc Hydro tools. Para un mejor entendimiento, las figuras contienen los resultados del geoprocesamiento, la activación de la herramienta a utilizar en la margen izquierda y la ventana de solicitud de información por parte del sistema en la margen derecha.

- Preprocesamiento

El procesamiento inicia con el relleno de sumideros, este proceso es necesario debido a que algunas de las celdas se encuentran rodeadas de celdas con mayor elevación y por ende la escorrentía es almacenada y no fluye. Esta función eleva estas celdas utilizando como referencia los valores de altura en celdas laterales. Se da clic en Terrain preprocessing/DEM Manipulation/Fill Sinks (Ver Figura 28).

Figura 28 – Preprocesamiento Fill ARCGIS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Input surface Raster: Se selecciona el modelo de elevación o las curvas de nivel procesadas que se van a utilizar, en este caso es el ASTER DEM formato raster.

Output surface Raster: Se selecciona la ruta y el nombre del archivo de salida, por defecto se colocará el nombre Fill.

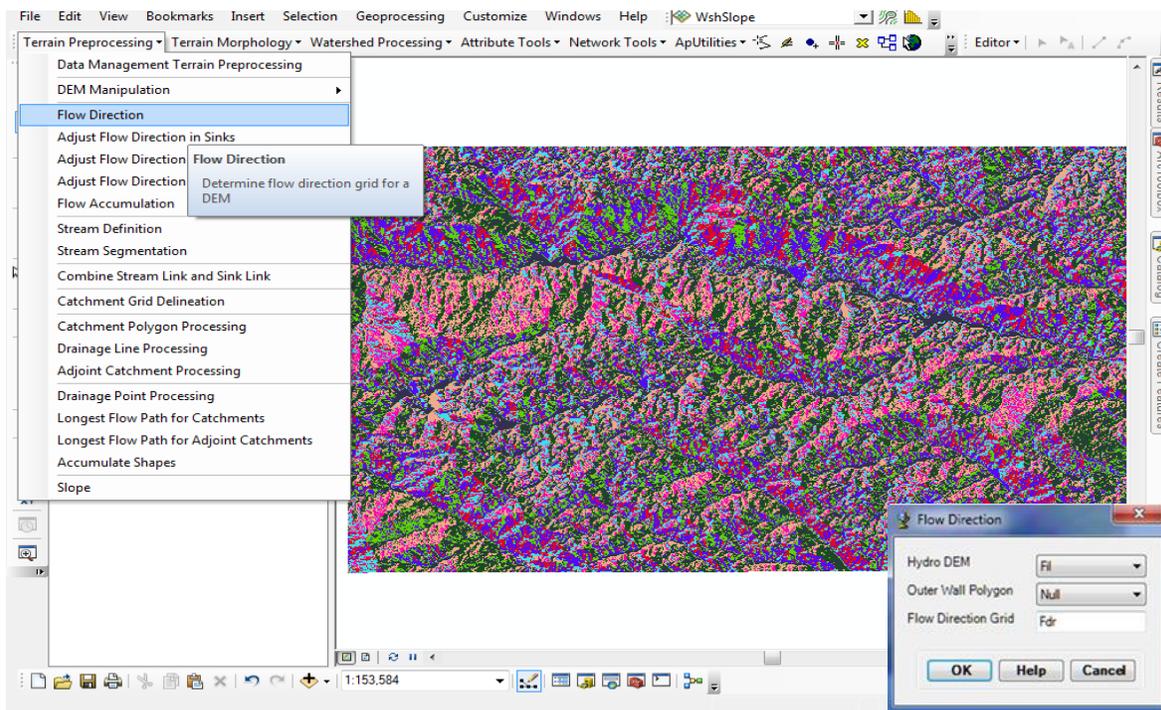
Z limit (optional): Indica la máxima profundidad de los espacios que se van rellenar o corregir. Las profundidades de imperfecciones mayores al valor colocado en este campo no se rellenaran. En caso de dejar el campo en blanco, el programa tomará por defecto rellenar todos los espacios, independientemente de la profundidad. Para el caso del ejemplo se dejara en blanco.

Con la corrección de las celdas y logrando la uniformidad de las mismas el sistema define las direcciones de flujo - Flow Direction, teniendo en cuenta la pendiente máxima del terreno para cada celda utilizando el algoritmo fill, este algoritmo calcula las ocho direcciones posibles.

Input surface Raster: se selecciona el Raster creado en el paso anterior que se denomina Fill.

Output drop Raster (optional): Es una salida opcional. El drop Raster muestra la relación entre el cambio máximo en la elevación de cada celda a lo largo de la dirección del flujo, expresada en porcentajes. Para el ejemplo no es necesario escribir nada en este espacio. (Ver Figura 29).

Figura 29 – Preprocesamiento Flow Direction

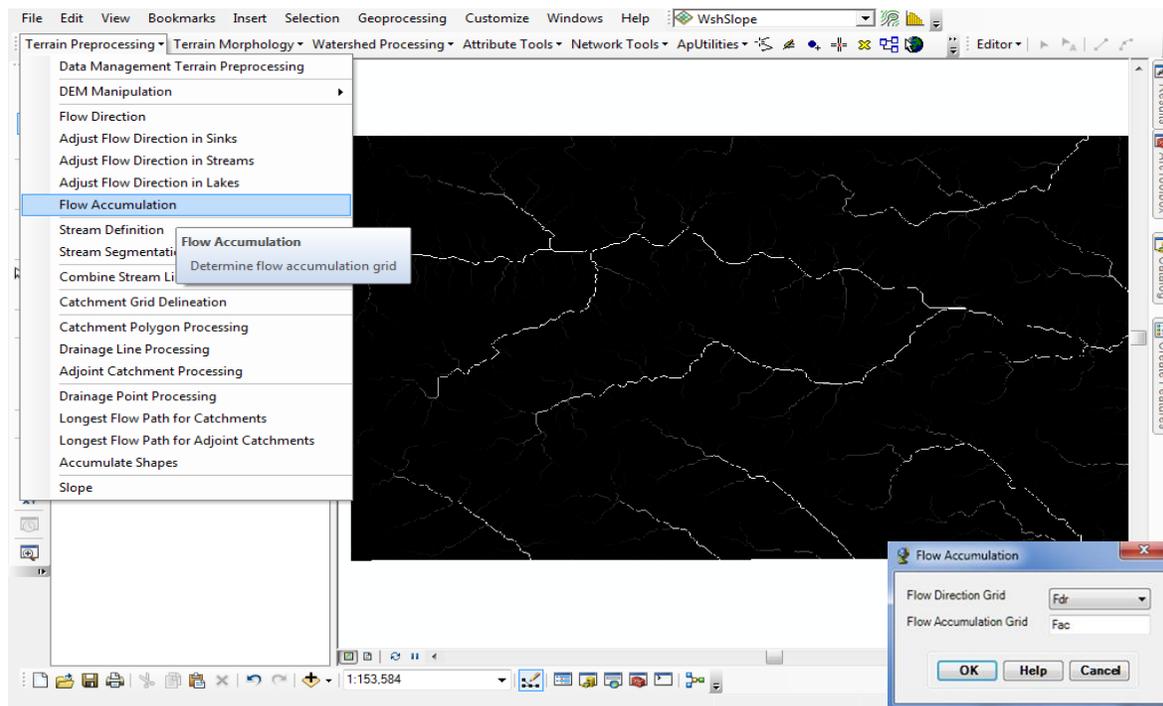


Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

El área de drenaje aguas arriba en una celda dada, puede calcularse multiplicando el valor de acumulación contenido por el área de una celda, por lo tanto calcula para una celda dada el número de celdas de drenaje aguas arriba de dicha celda. Este procedimiento es realizado por la acumulación de flujo – Flow Accumulation. Clic Terrain preprocessing/Flow acumulation.

- Input flow direction Raster: Se selecciona el Raster creado en el paso anterior que se ha denominado "Fdr".
- Output accumulation Raster: Se selecciona la ruta y el nombre del archivo de salida, por defecto se le colocará el nombre "Fac".
- Input weight Raster (optional): Es una salida opcional. (Ver Figura 30)

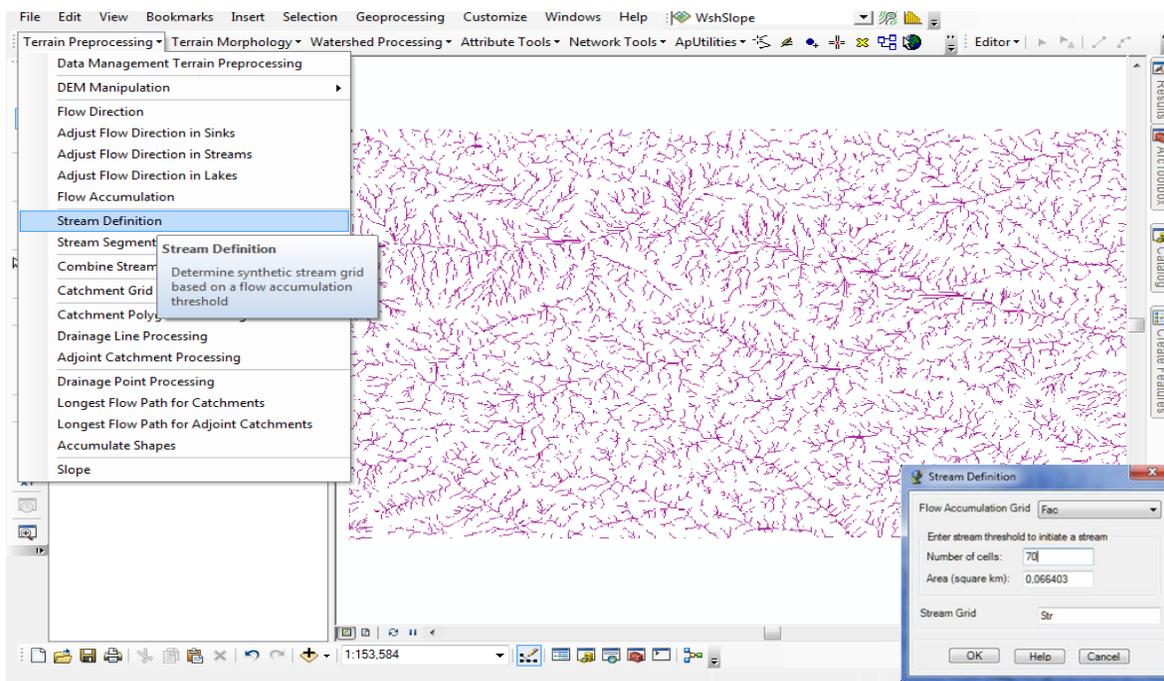
Figura 30 – Preprocesamiento Flow Accumulation



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Aunque el pre procesamiento, ya cuenta con información de celda de drenaje aún no se define cuáles de ellas pertenecen a una corriente. Dentro de este concepto la definición de la escorrentía se realiza por el parámetro del usuario en extensión de superficie en kilómetros cuadrados, de acuerdo a las necesidades de estudio y acercamiento a la red de drenaje real del sistema de la cuenca. Para este caso se tomó un abarcamiento de celda de 0.06 km². (Ver Figura 31). Se da Clic en Terrain preprocessing/Stream Definition.

Figura 31 – Preprocesamiento Stream Definition.



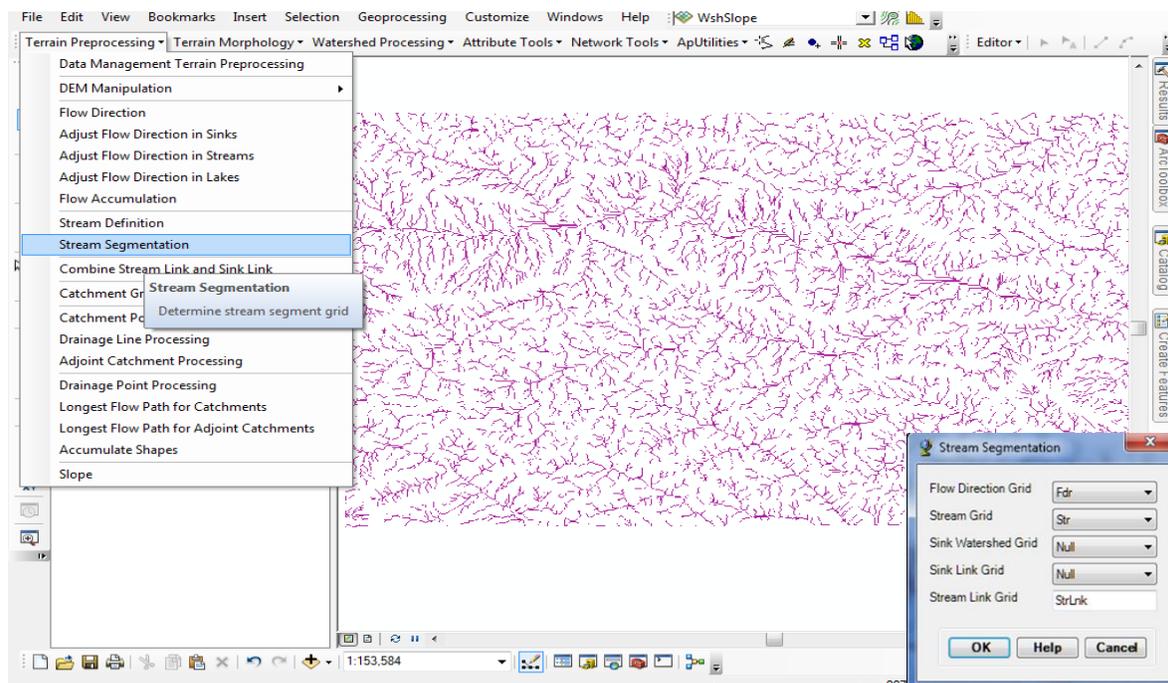
Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Con el fin de crear una red de drenaje, se tendrá que especificar un umbral para la cantidad de píxeles adyacentes que constituyen una corriente. Se debe especificar un valor límite de 20000 píxeles de acumulación (si hay más de 20000 píxeles que desembocan en él se parte de la red de corriente). En la calculadora Raster se escribe la expresión siguiente: $\text{stream_Red} = \text{con}([\text{FlowAcc_flow1}] > 20000, 1)$

El procedimiento general para la definición de drenajes incluye la creación de una grilla con celdas identificadas como celdas de drenaje, la identificación de estas celdas con valores únicos para cada tramo y la creación de las entidades vectoriales tipo arco con los drenajes. A las celdas de drenaje se les asigna 1 como valor de píxel.

Conocida la red de drenaje, el preprocesamiento permite conocer los cauces en relación a la procedencia de sus cuencas aportantes por lo que es necesaria la segmentación del drenaje por tramos, para ello el sistema asigna un único valor numérico de identificación para su posterior vectorización. En la simbolización aparecerá el número de tramos de drenajes independientes identificados. Segmentación de tramos de drenaje – Stream segmentation, nuevamente se da Clic en Terrain preprocessing/Stream Segmentation. (Ver Figura 32)

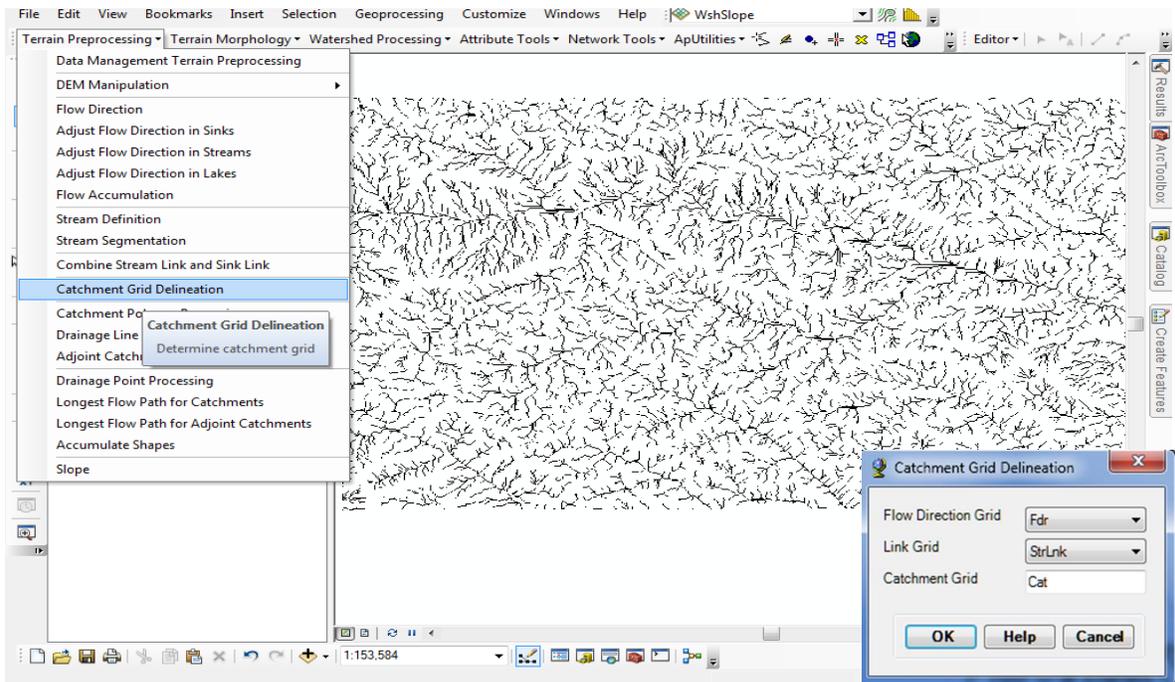
Figura 32 – Preprocesamiento Stream Segmentation.



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

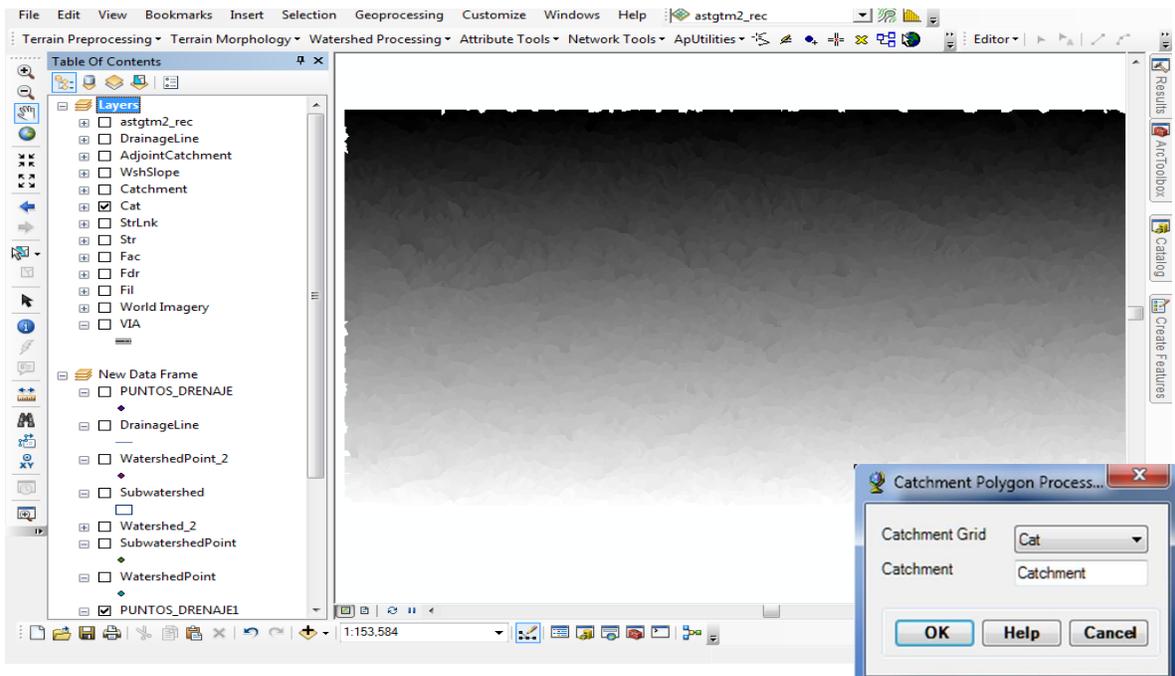
Una vez vectorizados los tramos y segmentados según su procedencia de cuencas se delimitan sus cuencas utilizando un mapa de flujos y drenajes identificados de acuerdo a las celdas aportantes a cada cauce, se da Clic en Terrain preprocessing/ Catchment grid delineation (ver Figura 33). Además el sistema permite la exportación de información a formato shape de polígono - Catchment Polygon Processing. (Ver Figura 34)

Figura 33 – Preprocesamiento Catchment grid delineation



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

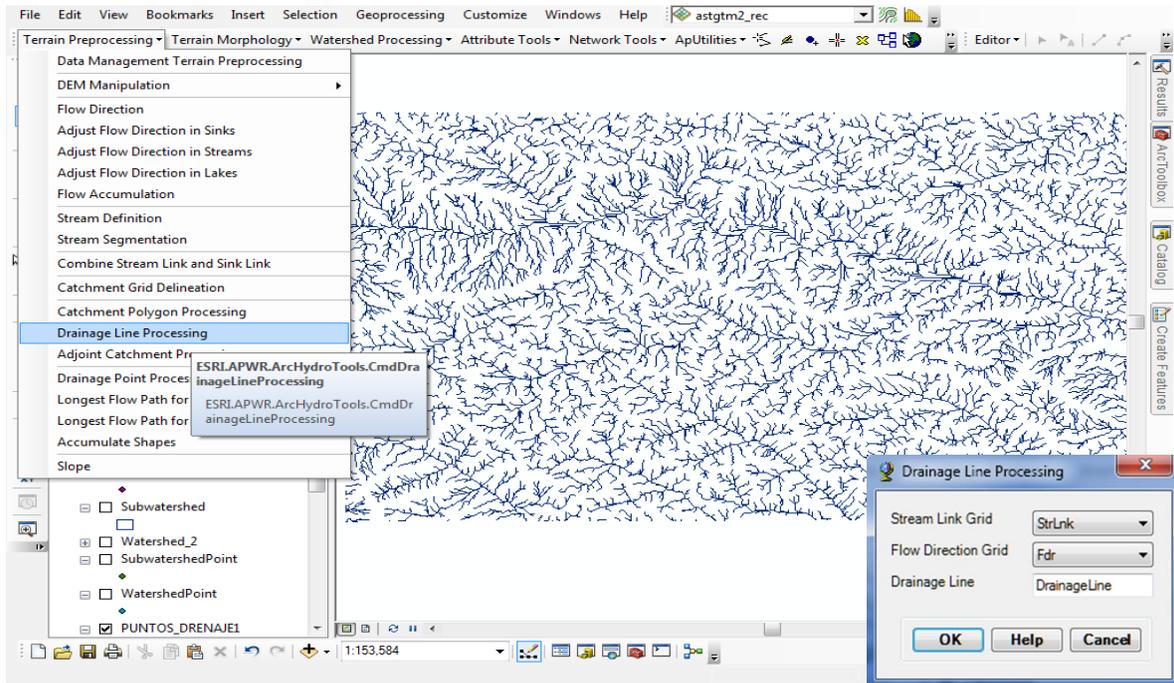
Figura 34 – Preprocesamiento Catchment Polygon Processing



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Con la información vectorial en formato shape de la geodatabase de cuencas se procede a la extracción de información de drenajes desde la grilla raster Fdr a polilíneas - Drainage line Processing. Se da Clic en Terrain preprocessing/Drainage line processing (Ver Figura 35)

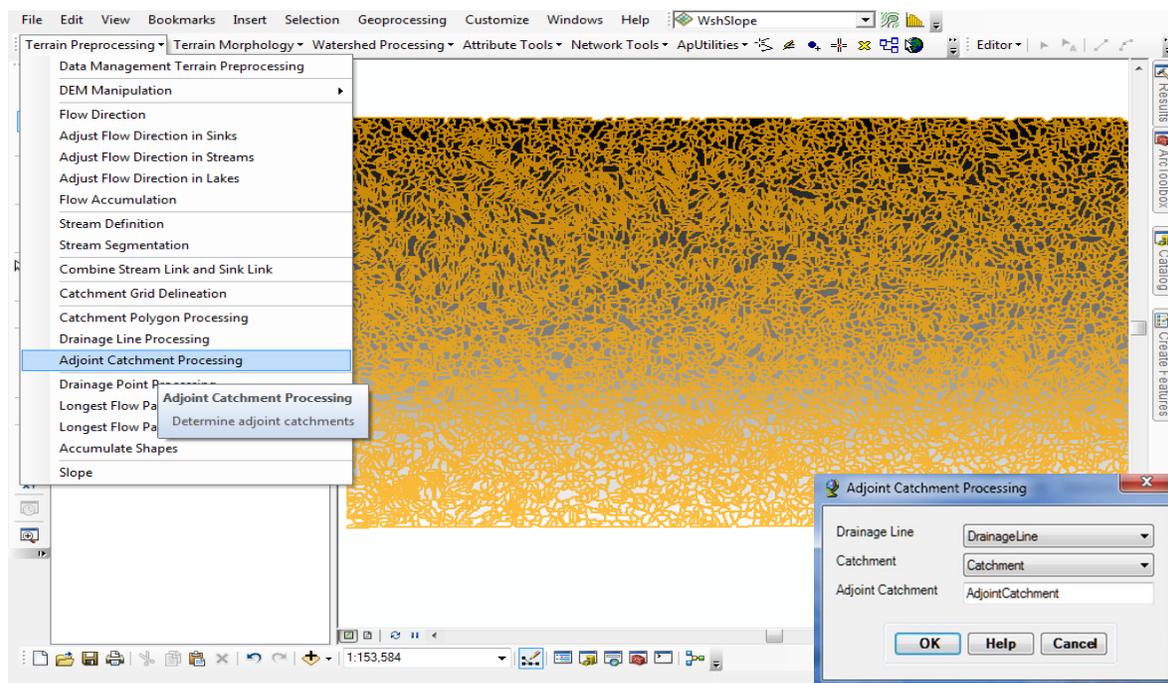
Figura 35 – Preprocesamiento Drainage line processing



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

La información de cuencas y drenajes se encuentran por separado, teniendo en cuenta que el sistema debe considerar dentro del proceso hidrológico la cuenca con su respectivo drenaje, estos deben fusionarse en polígonos - Adjoint Catchment Delineation, las subcuencas aguas arriba de la confluencia del drenaje esto permite la extracción de datos para el sistema. Se da Clic Terrain preprocessing/ Adjoint Catchment Delineation (Ver Figura 36)

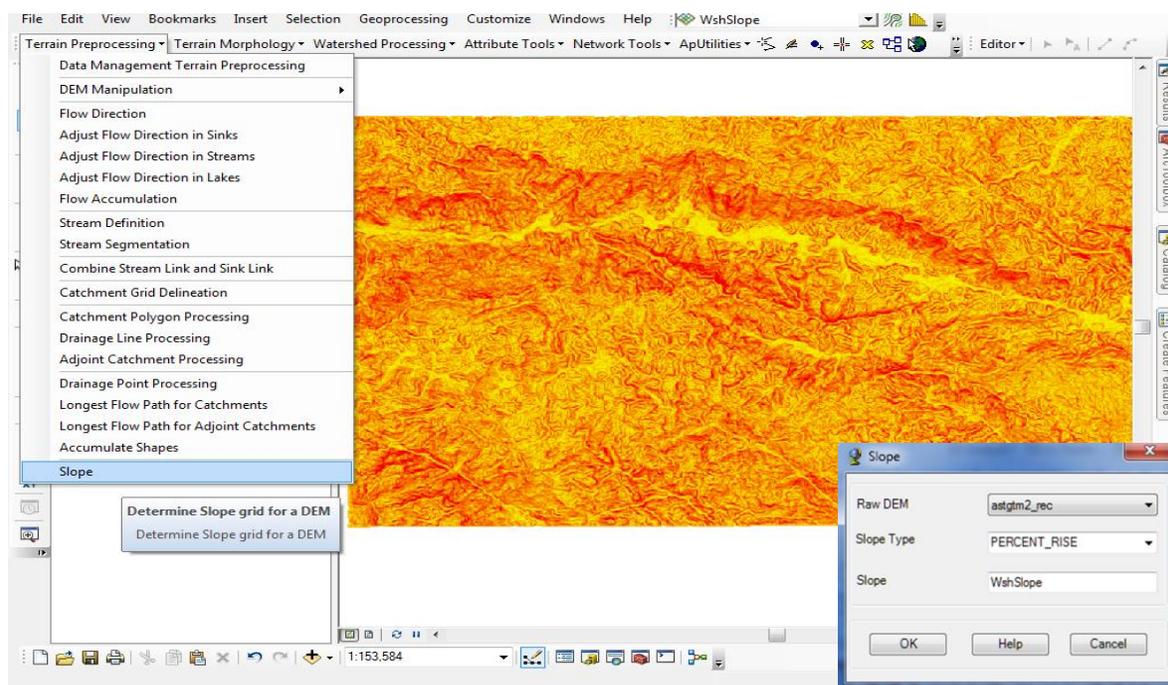
Figura 36 – Preprocesamiento Adjoint Catchment Delineation



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Ahora cada una de las cuencas se encuentra relacionada a su drenaje, sin embargo una de las variables incidentes en el comportamiento del flujo es la pendiente, la extensión permite la extracción de información de la pendiente en relación al DEM formato Raster inicial por la información contenida en sus píxeles, para ello se da Clic Terrain preprocessing/Slope (Ver Figura 37)

Figura 37 – Preprocesamiento Slope

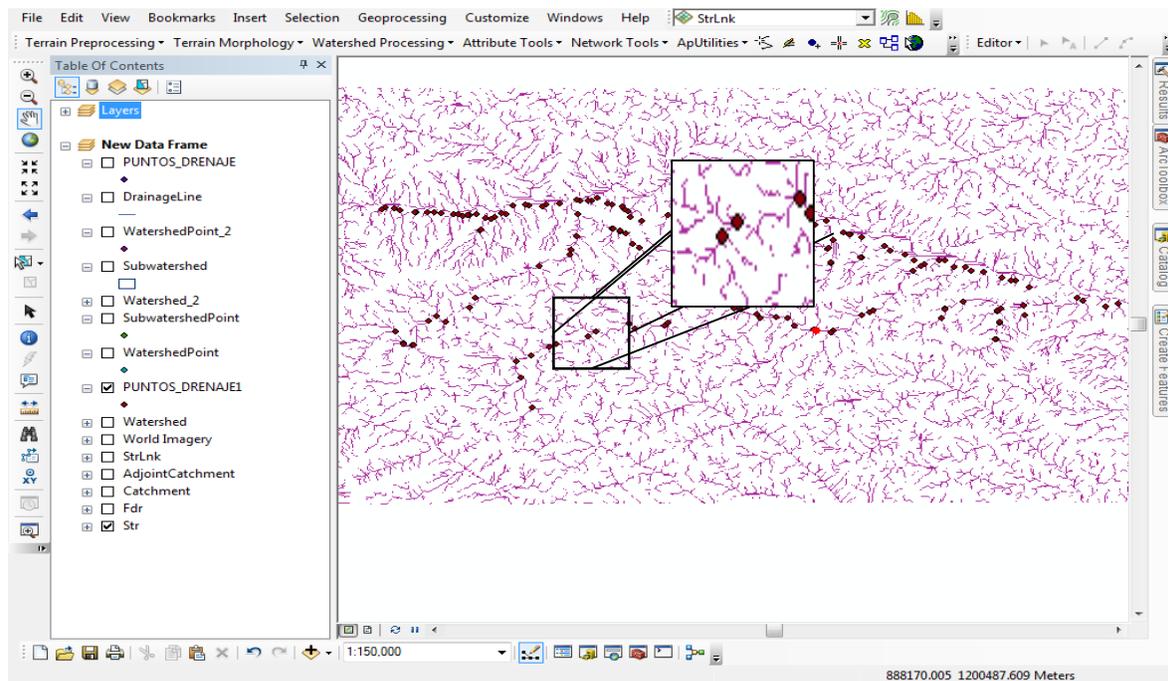


Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Con la información de drenajes y división de cuencas en formatos Raster y Shape de polígonos (Cathment) y drenaje (line drainage) la herramienta Arc Hydro permite la delimitación de las cuencas de acuerdo a las necesidades y contexto del proyecto, para el caso en particular se requiere delimitar las cuencas aferentes a la vía Cisneros – San José del Nus, para determinar la efectividad del sistema de procesamiento del SIG en el software ArcGIS 10.2 en la delimitación de cuencas, con respecto al uso de cartografía en el AutoCAD. Para dicho proceso es necesario definirle al sistema los puntos de escurrimiento sobre los drenajes relacionados, para ello se establecieron puntos de escurrimiento sobre la vía, además de considerar afluentes de tamaño considerable para la obtención de subcuencas.

Para la definición de los puntos de escurrimiento es necesario ir a la barra de herramientas y activar el botón  y fijar los puntos sobre la vía. (Ver Figura 38)

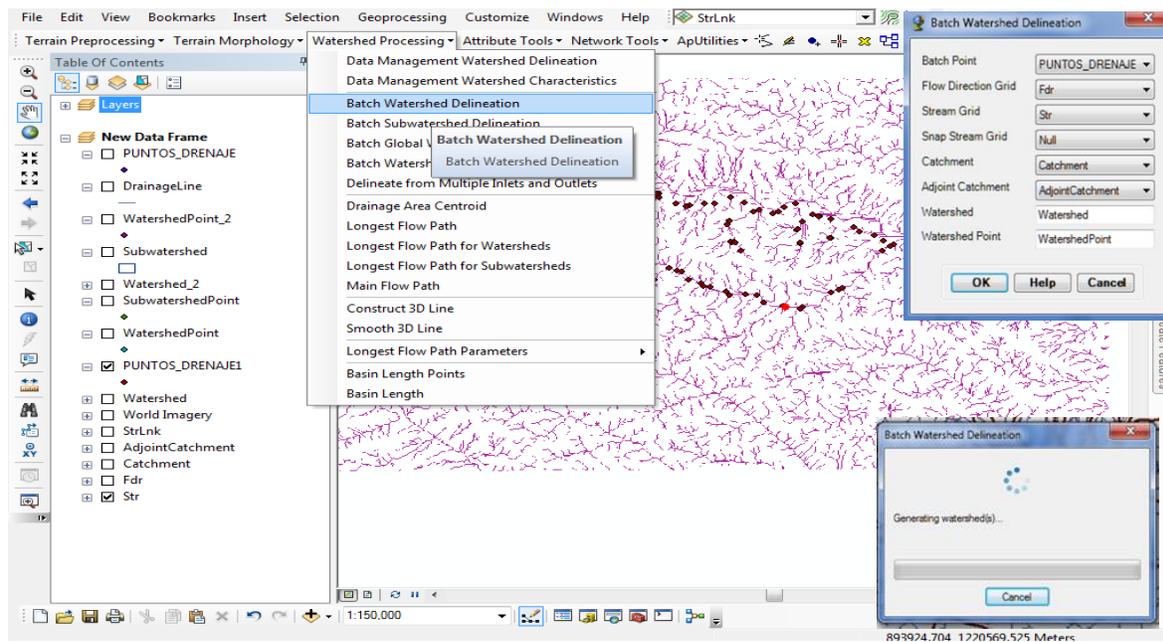
Figura 38 – Definición puntos de escurrimiento



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Una vez fijados los puntos de escurrimientos de las cuencas se procede a correr el modelo de delimitación de cuencas para ello se debe dar Clic en Watershed processing/Batch Watershed Delineation. Aparecerá una ventana solicitando la información necesaria, se debe verificar la información solicitada y dar clic en OK, automáticamente el sistema delimita las cuencas. (Ver Figura 39)

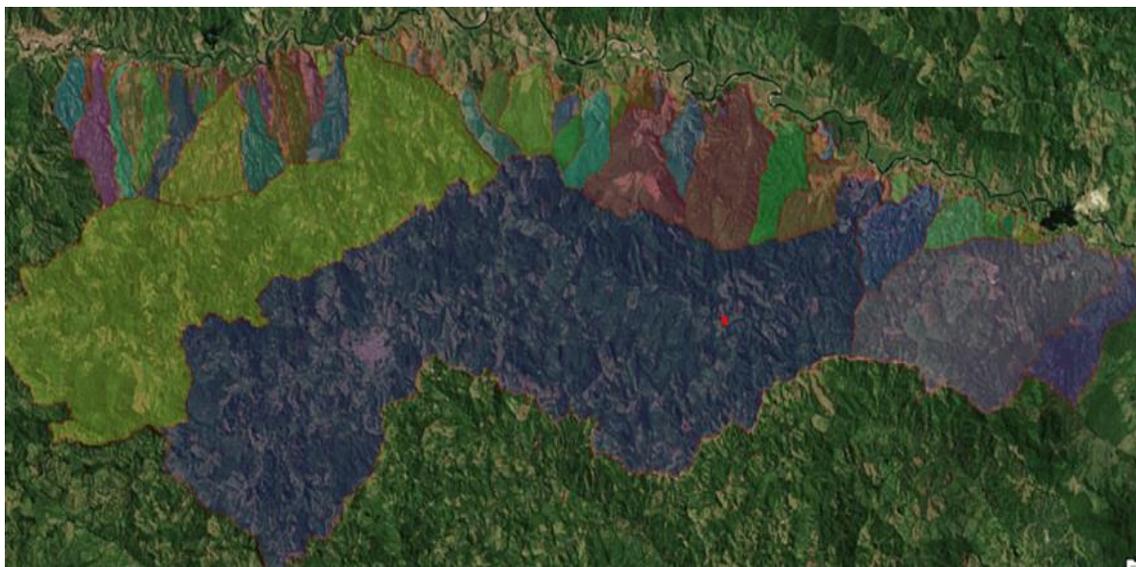
Figura 39 – Delimitación de cuencas Arc Hydro Tools



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

El polígono en formato shape, presenta información de área e información de su drenaje contenido en ella. El resultado de la delimitación de las cuencas por la extensión Arc Hydro Tools se puede apreciar en la Figura 40 y en el **Anexo 2**.

Figura 40 – Resultado de delimitación de cuencas en Arc Hydro Tools



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

2.2. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS (ÁREA- LONGITUD - PENDIENTE)

2.2.1. CARTOGRAFÍA DIGITAL – AUTOCAD

Luego de delimitar cada una de las cuencas, se procede a obtener los parámetros morfométricos más importantes: Área, Longitud y Pendiente, estos parámetros pueden obtenerse de diferentes maneras, con el fin de comparar y analizar los resultados obtenidos se elaboró una tabla que se presenta en el **Anexo 3.1**.

A criterio de los autores y teniendo en cuenta el tamaño de las cuencas, se clasificaran de la siguiente manera:

Tabla 1. Clasificación Cuencas Tamaño.

Clasificación	Tamaño
Cuencas Pequeñas	< 2.5 km ²
Cuencas Menores	2.5 km ² - 25 km ²
Cuencas Medianas	25 km ² - 100 km ²
Cuencas Grandes	> 100 km ²

Fuente: Elaboración Propia.

El área de la cuenca y la longitud del cauce se obtienen directamente, no es necesario realizar ningún cálculo, a diferencia de la obtención de la Pendiente.

Para la obtención de la pendiente se consideró utilizar el método de Taylor, la pendiente media se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$s = \left[\frac{L_T}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2$$

Dónde:

LT: Longitud total del cauce principal

Li: Longitud del tramo en que se subdivide el cauce.

Si: Pendiente de cada uno de los tramos en que se subdivide la longitud del cauce

Para el tramo de vía de Cisneros – San José del Nus que se está estudiando como ejemplo y teniendo como base las cuencas delimitadas sobre la cartografía digital usando el Software AutoCAD, se emplea el comando LIST, se selecciona el elemento que se quiere medir mediante Enter, así se despliega un listado con el área y el perímetro cuando el objeto es una cuenca y la longitud para los cauces. Se calcula la pendiente por el método de Taylor, los resultados se presentan en el **Anexo 3.1** y la Memoria de Cálculo se presenta en el **Anexo 5.1**.

2.2.1. ARCGIS – HEC GEO HMS

La extensión en ArcGIS HEC GEO HMS permite estimar los parámetros morfométricos de una cuenca con información digital de terreno DEM de imágenes satelitales LAND SAT (ASTER DEM) las cuales contienen valores numéricos de píxeles que pueden utilizarse para calcular pendientes y alturas de terreno, delimitar cuencas y obtener las formas y direcciones de flujo de una topografía real.

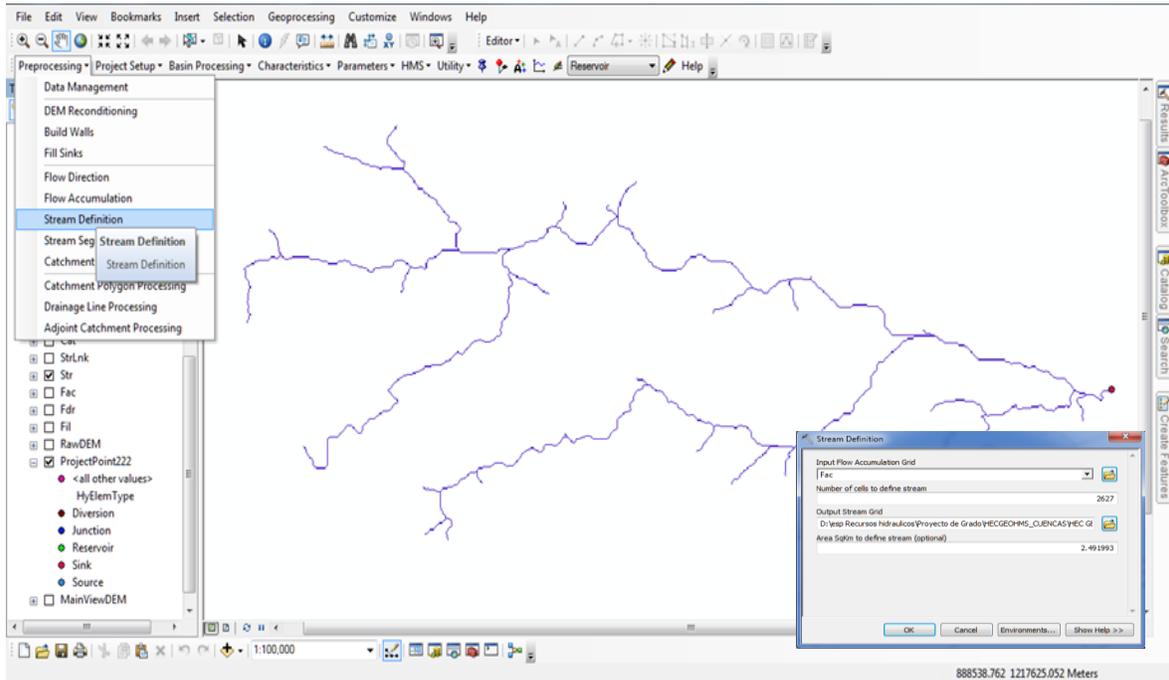
2.2.1.1. PREPROCESAMIENTO HEC GEO HMS

La extensión Hec GeoHMS al igual que Arc Hydro utiliza el mismo preprocesamiento con base en una imagen satelital tipo ASTER DEM. Por lo cual, las tres primeras etapas (Fill, Flow Direction, Flow Accumulation) tendrán los mismos resultados; en estos términos, para el presente apartado y por motivos prácticos no se presentaran estas tres primeras etapas para el Hec Geo HMS, teniendo en cuenta que es el mismo procedimiento que el Arc Hydro, por lo tanto se seguirá con el preprocesamiento relacionado con la delimitación por área estándar que ofrece el sistema (Stream Definition), donde se define el área a abarcar por el sistema ArcGIS10.2, posteriormente se continuará con el procesamiento para la obtención de los parámetros morfométricos de las cuencas y exportación del modelo hidrológico al software HEC HMS, para la obtención de caudales.

2.2.1.2. PREPROCESAMIENTO

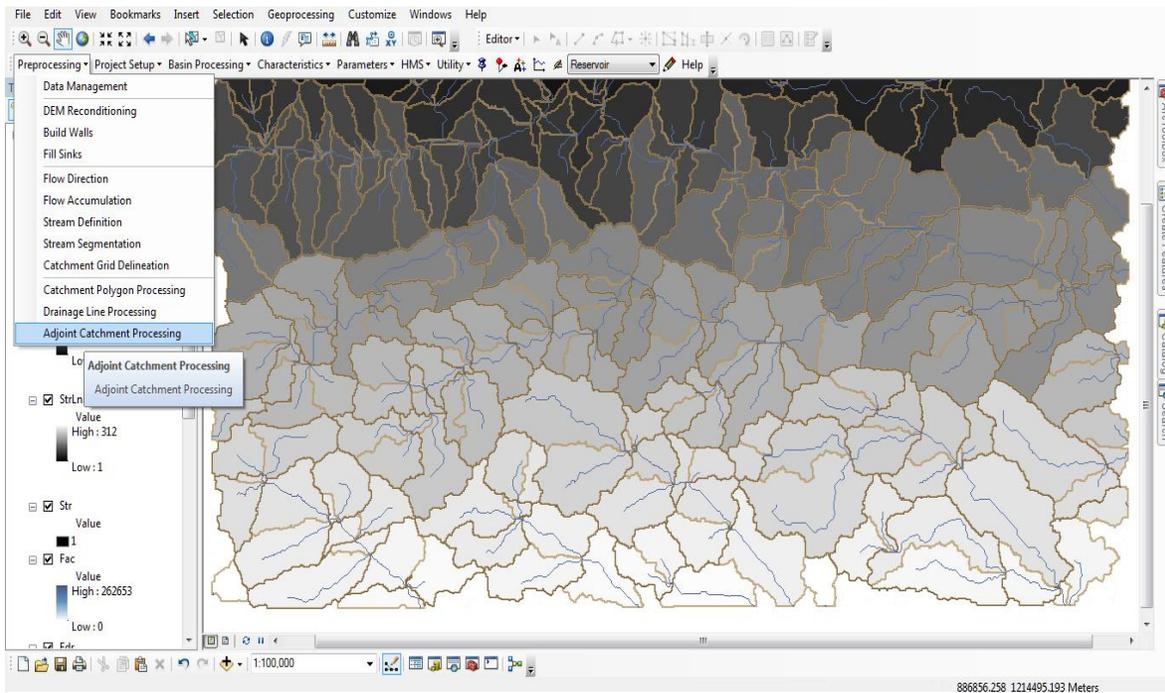
Como se menciona anteriormente se iniciará el preprocesamiento desde la definición de cuencas Stream Definition, con el estándar ofrecido por el sistema ArcGIS 10.2, con un área de definición de 2.49 km² y una pixelación de 2627. (Ver Figura 41), posteriormente el preprocesamiento se repite como se explicó en el capítulo correspondiente a la delimitación de las cuencas en Arc Hydro tools. El resultado de la limitación se aprecia en la Figura 42.

Figura 41 - Preprocesamiento Stream Segmentation.



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Figura 42 – Delimitación de Cuencas Hec GeoHMS



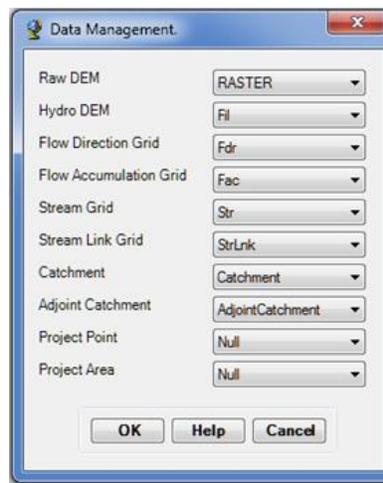
Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

El resultado con el ArcGIS10.2 muestra una delimitación casi uniforme de las cuencas en relación a su tamaño.

2.2.1.3. CONFIGURACIÓN DE PROYECTO

Al inicio de la configuración del proyecto el sistema permite definir y revisar la información del proceso anterior, en el Data Management.

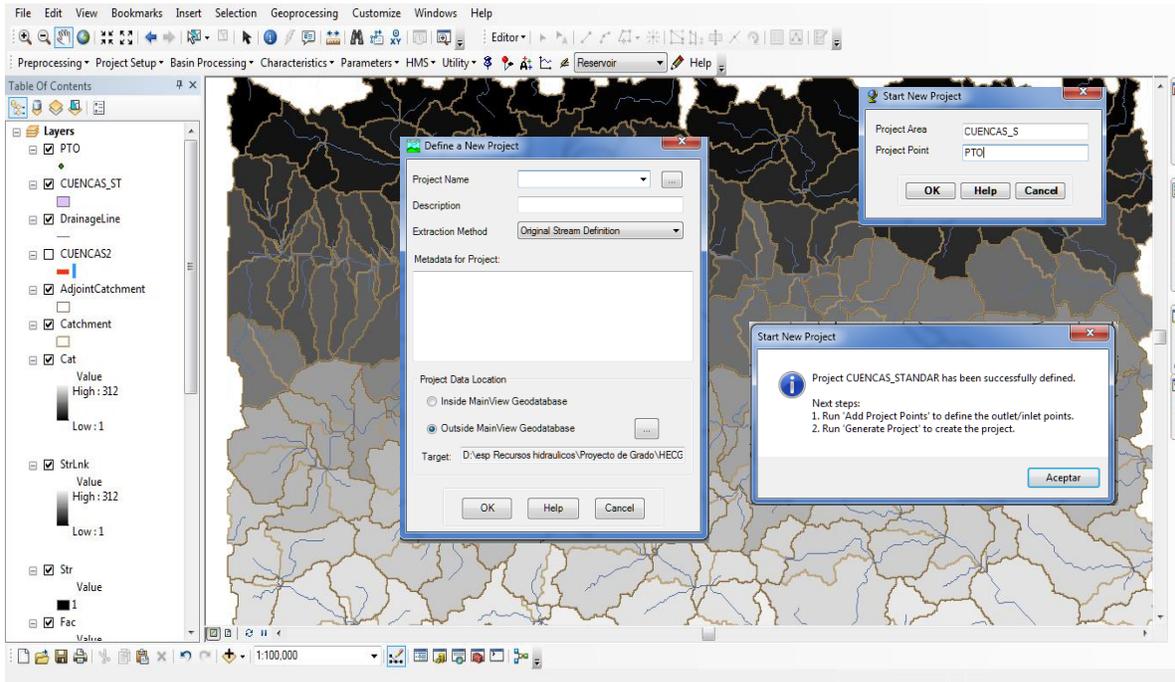
Figura 43 – Data Management.



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

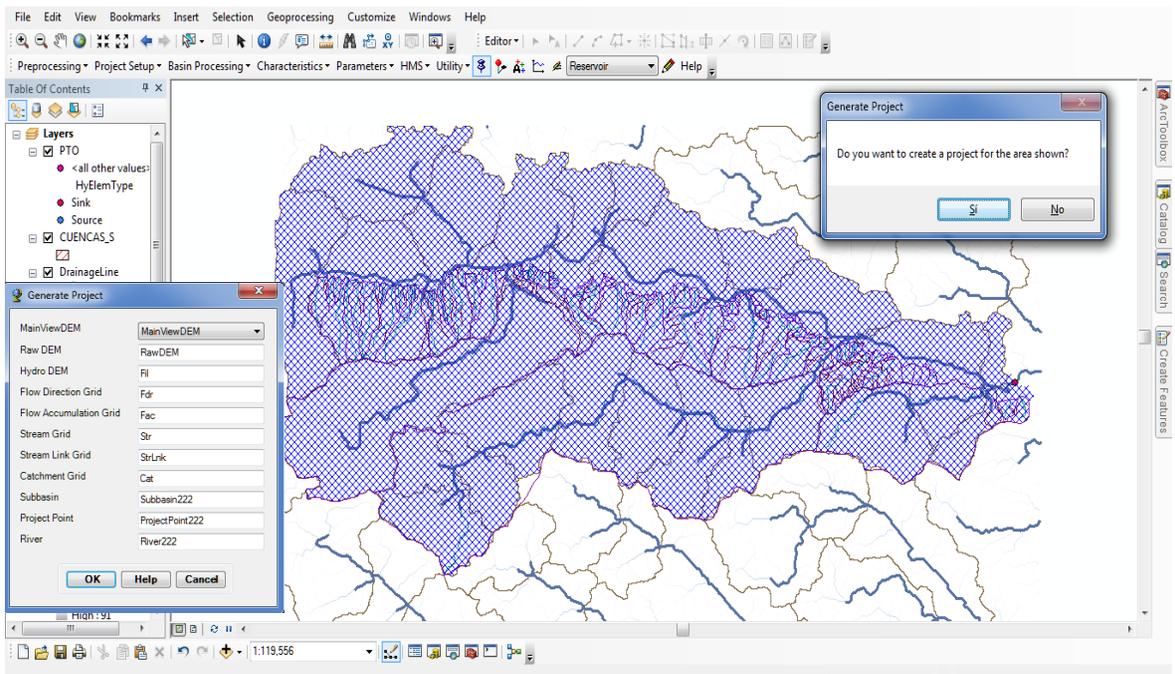
Una vez revisada la información en el Data Management se define el proyecto – Start New Project el cual es la base de datos para la generación del modelo HMS. Se define el nombre del proyecto, la descripción y el punto final de escurrimiento de la cuenca, donde el sistema clasifica las subcuencas aportantes hasta el punto escogido, utilizando la herramienta  de la barra de herramientas de HEC GeoHMS donde se concreta el nombre del punto de escurrimiento. (Ver Figura 44 y Figura 45)

Figura 44 – Delimitación de cuencas Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

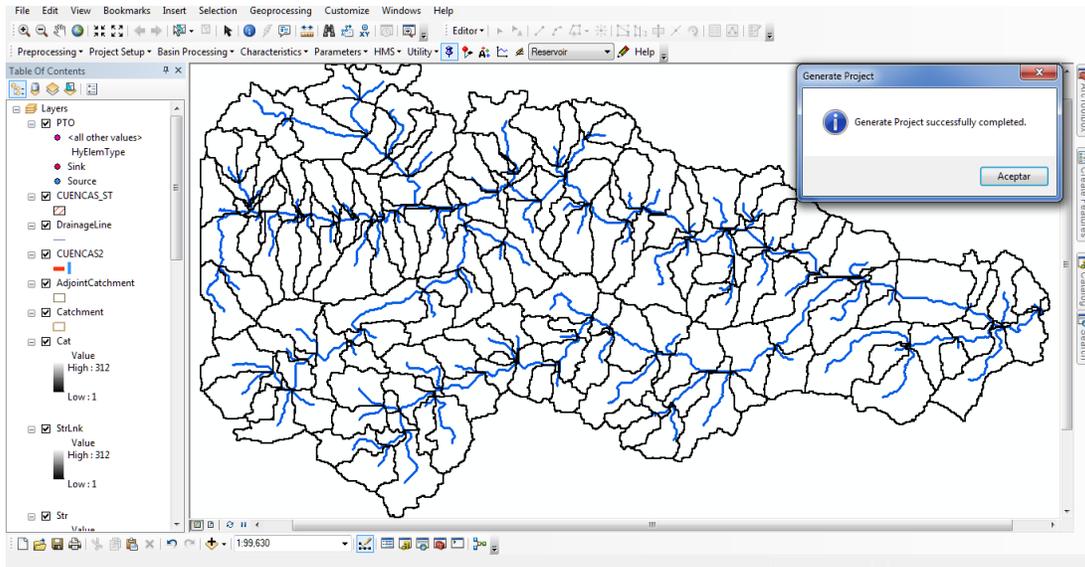
Figura 45 – Delimitación cuencas punto de escurrimiento - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Se selecciona Sí para iniciar el proceso de extracción de información para la zona a modelar. Aparecerá la tabla de configuración de proyecto en donde se podrán indicar los nombres de las nuevas capas a generar. Se deben usar los nombres predeterminados y dar clic en OK, cuando el proceso se determina con éxito aparecerá una pantalla con el modelo topológico de la cuenca. (Ver Figura 46)

Figura 46 – Modelo Topológico - Hec GeoHMS

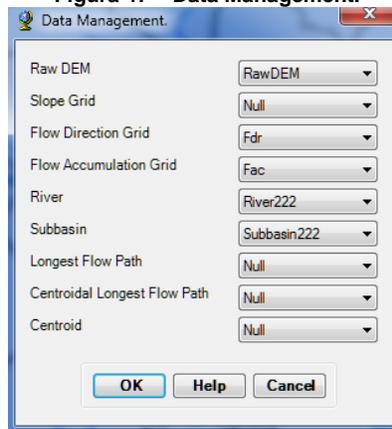


Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

2.2.1.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

El proceso se inicia con una verificación de información en el Data Management

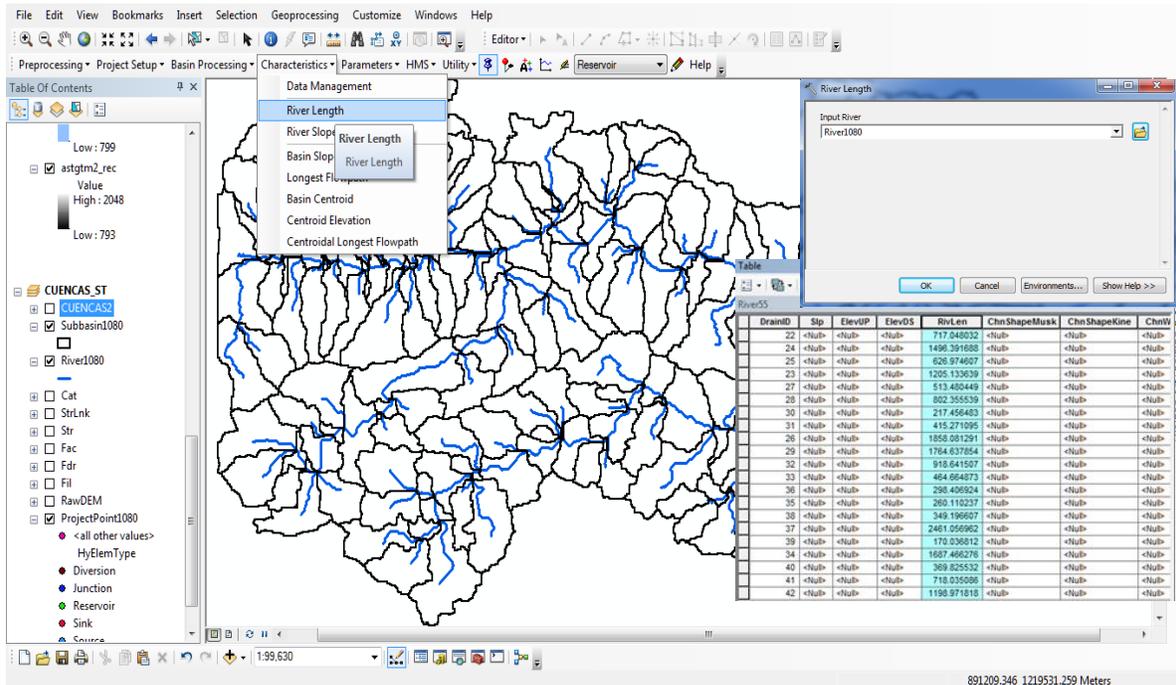
Figura 47 – Data Management.



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Se extraen las longitudes características de cada una de las subcuencas: En Characteristics - River Length. Es necesario revisar que las longitudes de las cuencas sean mayores al valor de 0. (Ver Figura 48)

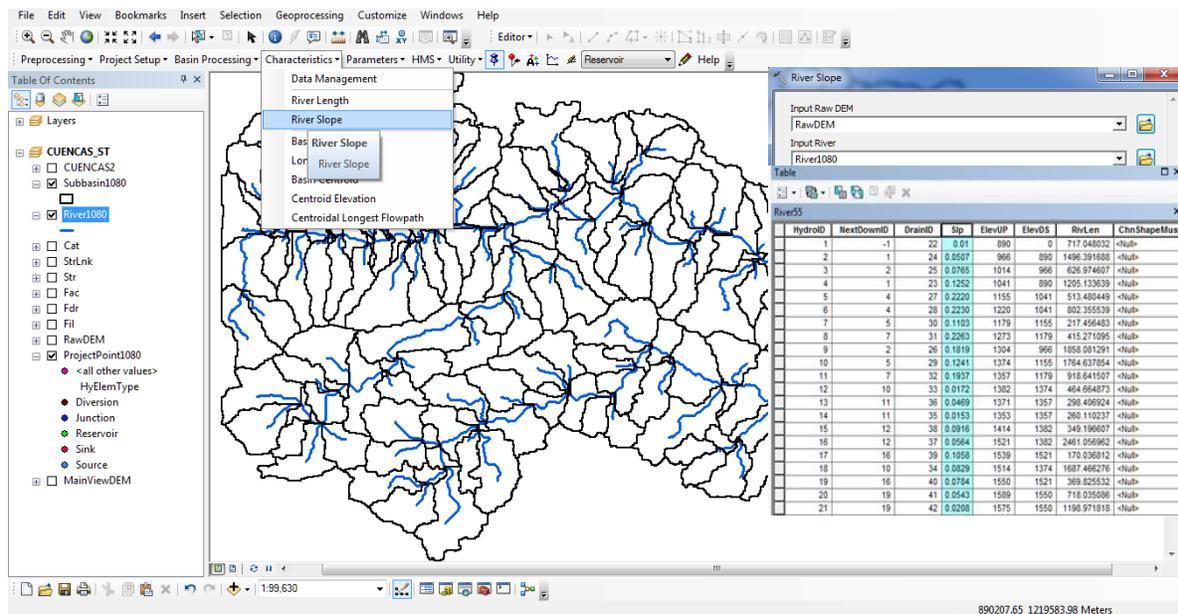
Figura 48 – Characteristics River Length - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Para el cálculo del escurrimiento y los tiempos de concentración de las subcuencas es necesario la extracción de información de las pendientes de los canales de circulación de los drenajes - Characterist/ River Slope. En caso de detectar pendientes negativas, se deben corregir de manera manual e ingresarlos a la tabla de atributos hasta completar la información. (Ver Figura 49)

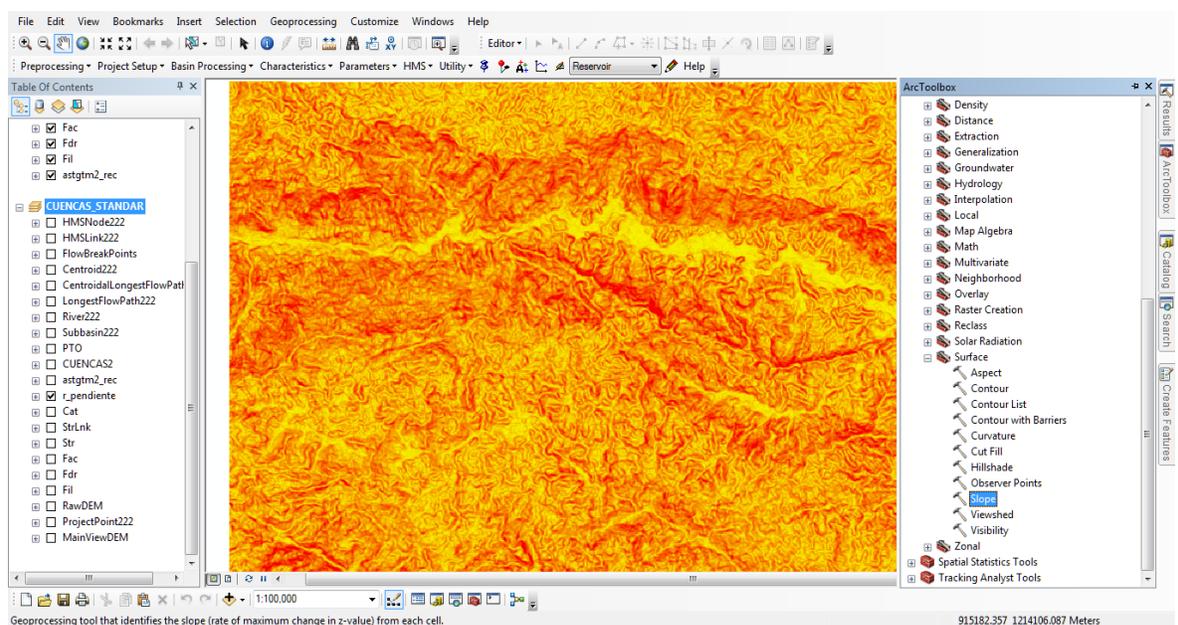
Figura 49 – Characteristics Basin Slope - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

De igual manera es necesario conocer las pendientes media de las subcuencas, para ello se debe definir una grilla de pendientes desde el ArcCatalog – Spatial Analyst – Superficie – Pendiente. (Ver Figura 50)

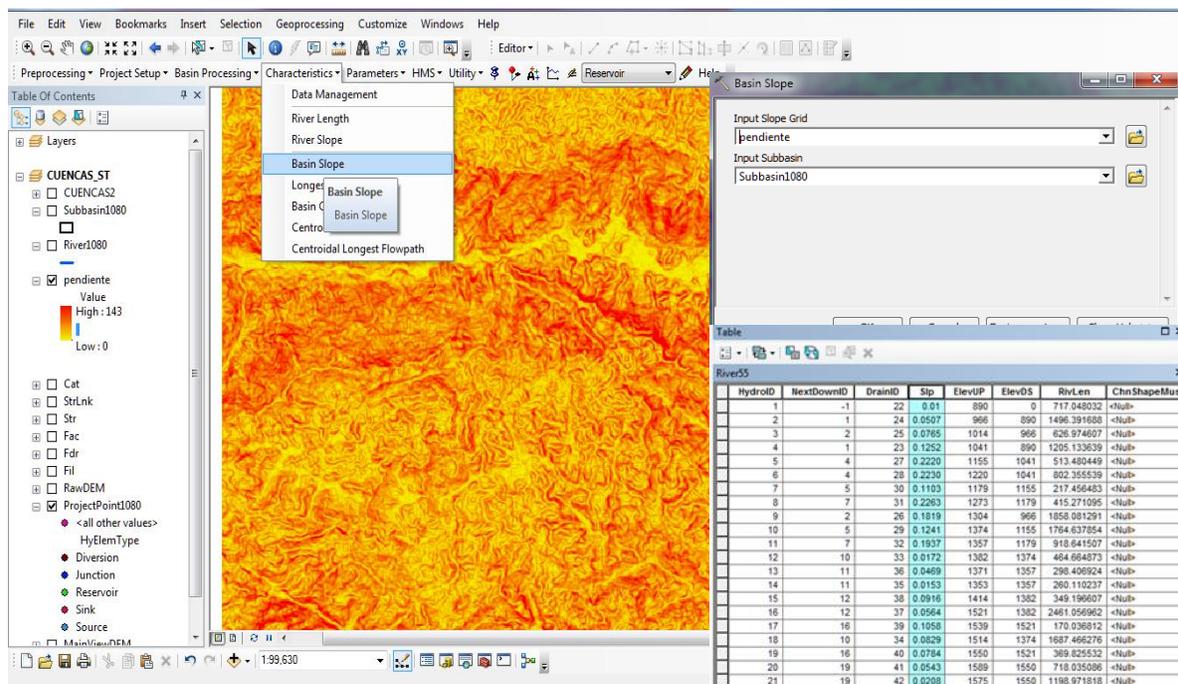
Figura 50 – Creación Grilla Pendientes – Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

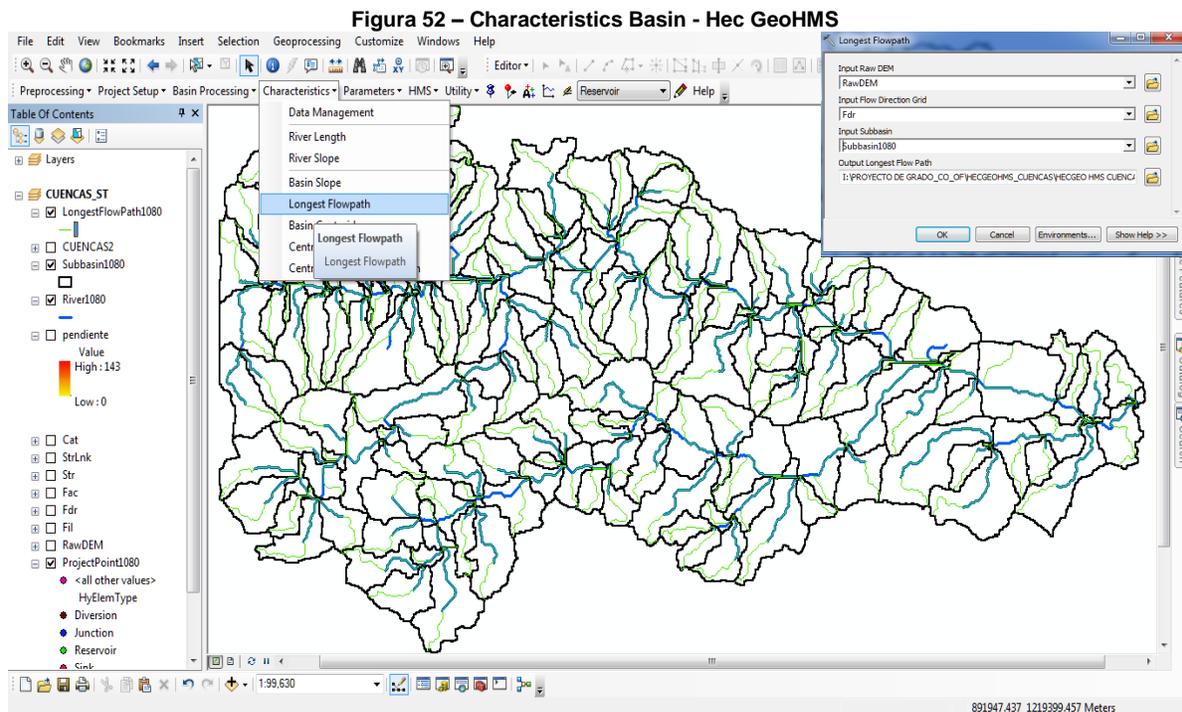
Una vez creada la grilla de pendientes, se ingresa en el Basin Slope para para la verificación de que los valores sean mayores a 0 en la tabla de atributos. (Ver Figura 51)

Figura 51 – Characteristics Basin Slope - Hec GeoHMS Slope - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

A partir de este punto se inicia la extracción de información característica del modelo hidrológico HMS, Ruta más larga de viaje en el flujo – Longest flowpath, Centroides de cuencas – Basin Centroid, Elevación de centroides – Centroid Elevation, Ruta más larga del flujo hasta el centroide – Centroidal Longest Flowpath, el resultado final se observa en la Figura 52



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

En el **Anexo 2** se presenta el modelo elaborado en Arc GIS para la obtención de parámetros morfométricos y en el **Anexo 3.1** se presentan los resultados obtenidos.

3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

Los análisis hidrológicos incorporan el empleo de datos hidroclimatológicos, con el fin de realizar estimativos con propósitos específicos, según el objetivo del proyecto o estudio que se esté realizando, incluyendo el análisis hidrológico de drenaje superficial en vías y/o obras lineales.

Existen diferentes técnicas estandarizadas, abarcando modelos de regresión y análisis de frecuencia, para estimar una gama completa de parámetros hidrológicos para cuencas de drenaje en distintos lugares del mundo con el fin de realizar el análisis por medio de un ejemplo práctico, se empleó el tramo de vía que se ha venido estudiando en los numerales anteriores

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El primer paso consiste en revisar los planos de redes de hidrometeorología de las entidades que tengan cobertura en la zona que se requiera analizar, en este caso, la entidad que tiene cobertura en la vía que conduce de Cisneros a San José de Nus es el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Para revisar la información existente en la zona se puede acceder a la página del IDEAM: www.ideam.gov.co y solicitar la información en medio digital.

El objetivo del análisis de hidrología básica para drenaje superficial consiste en la obtención de caudales de cada uno de los cauces que cruzan la vía. Es importante tener buena calidad de datos hidrológicos y que la información analizada sea extensa y confiable.

Luego de revisar la red hidrometeorológica de IDEAM se recopilaron los datos de precipitación máxima en 24 h de las estaciones que se encuentran en la Figura 53 y en la siguiente Tabla.

Tabla 2. Estaciones IDEAM registradoras de Precipitación

Entidad	Código	Tipo	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación msnm
IDEAM	2701519	CO	Guayabito	Santo Domingo	6° 32'	75° 08'	1700
IDEAM	2308076	PM	San Roque	San Roque	6° 29'	75° 01'	1455
IDEAM	2308508	CP	Granja Ex. San José del Nus	San Roque	6° 29'	74° 50'	835

Fuente: Elaboración Propia.

Para escoger las estaciones que se consideran representativas de la zona en estudio, se observa, además de la cercanía de la estación, que esta se encuentre a una altitud similar al sitio que se está estudiando, ya que el régimen hidroclimatológico debe ser semejante.

Figura 53. Localización de Estaciones Climatológicas



Fuente: Elaboración Propia.

La información proporcionada por el IDEAM se presenta en el **Anexo 4**. El IDEAM generalmente entrega los datos en un formato de PDF o txt, la forma más práctica de manejarlos es a partir de un archivo txt, ya que puede importarse a un archivo xlsx y organizar los datos en tablas. Para el análisis de lluvias máximas en 24 h se requiere tener una columna con el registro de cada año y otra columna con el año al que corresponde el dato.

A continuación se presenta la tabla que se realizó para posteriormente analizar los datos:

Tabla 3. Lluvia Máx. 24 h – Estación Guayabito

Lluvia máx. 24 h (mm)	Año
124	1970
99.2	1971
138.3	1972
100.3	1973

93.5	1974
91.5	1975
100.5	1976
149.7	1977
132	1978
110	1979
141.9	1980
98.3	1981
92.4	1982
96	1983
127	1984
99	1985
83.7	1986
143	1987
118	1988
120	1989
117	1990
98.3	1991
88	1992
100	1993
20	1994
175	1995
83	1996
84	1997
83	1998
120	1999
136.2	2000
137	2001
120	2002
114	2003
91	2004
98	2005
174	2006
126	2007
119	2008
110	2009
117	2010
111.2	2011
105.6	2012

Fuente: Elaboración Propia.

Cuando se analizan eventos máximos no es necesario complementar datos, ya que se toma la lluvia máxima que se presentó durante todo un año y generalmente las metodologías para complementar registros emplean valores promedios. Sin embargo es necesario revisar si alguno de los datos que se presentan corresponde a un dato atípico.

En los siguientes numerales se realiza el análisis de precipitaciones máximas en 24 h de las estaciones que se consideran representativas de la vía de Cisneros a San José del Nus empleando diferentes programas.

3.2. EXCEL

El sistema EXCEL ofrece la manera más sencilla del análisis de datos, y depende de los criterios de cada persona, con la formulación directa para cada celda, para caso particular de ejemplo se tomaron los datos de lluvias máximas en 24 horas de la estación Guayabito para los ajustes realizados para la distribución de Gumbel, Log Normal y Log Pearson III.

Normalmente en el procedimiento se organizan los datos de las precipitaciones a criterio personal y se calcula la estadística básica, (media, coeficiente de variación, desviación etc.) en la se pueden apreciar la organización de los datos y la estadística base de los datos de la estación Guayabito.

Tabla 4. Calculo estadística base – Estación Guayabito

N Datos	42
Media	111.157
Desviación	26.937
Máximo	175

Fuente: Elaboración Propia

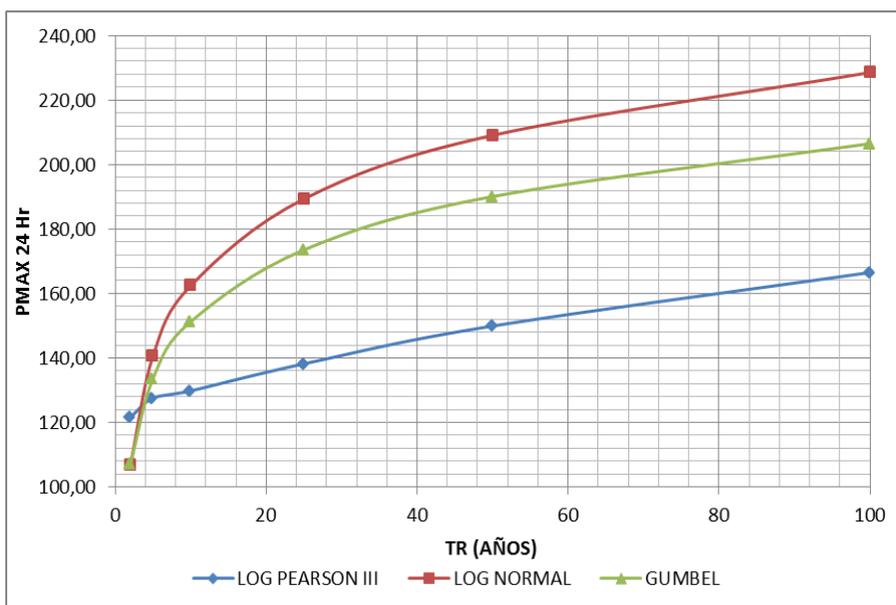
Con la estadística base se pueden programar en la hoja de cálculo de acuerdo a las formulaciones de cada distribución para el caso particular las distribuciones Gumbel, Log Normal y Log Pearson III. En la Tabla 5 y Figura 54 se pueden observar los resultados de los ajustes de probabilidad.

Tabla 5. Ajuste Estadístico a Distribuciones – Estación Guayabito

AJUSTE A DISTRIBUCIONES					
Tr(años)	$P \geq 1/Tr$	$F(x) = 1-P$	LOG PEARSON III	LOG NORMAL	GUMBEL
2	0,5	0,5	121,57	106,80	106,97
5	0,2	0,8	127,56	140,64	133,61
10	0,1	0,9	129,82	162,40	151,25
25	0,04	0,96	138,20	189,33	173,55
50	0,02	0,98	149,92	209,06	190,08
100	0,01	0,99	166,51	228,55	206,50

Fuente: Elaboración Propia

Figura 54. Ajuste a Distribuciones – Estación Guayabito



Fuente: Elaboración Propia

En el **Anexo 5.2** se presenta la memoria de cálculo de los ajustes que se realizaron para las tres estaciones que se están empleando en el corredor vial analizado como ejemplo.

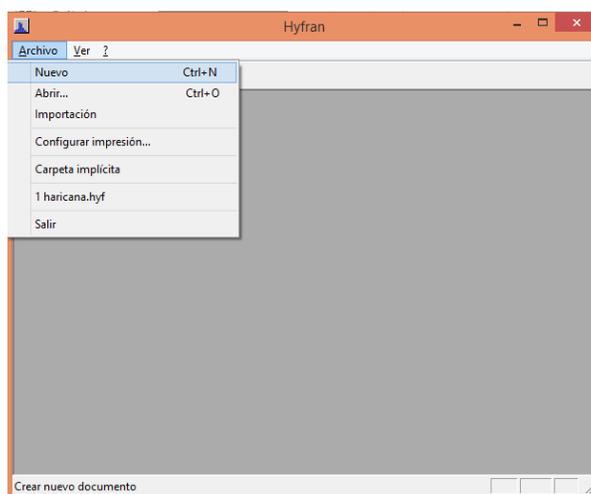
3.3. HYFRAN

HYFRAN es un software que permite ajustar datos a leyes estadísticas. Incluye un conjunto de instrumentos que permiten en particular el análisis estadístico de eventos extremos y de manera más general el análisis estadístico de una serie de datos.

A continuación se realiza el análisis de lluvias máximas en 24 h de la estación Guayabito y se explica paso a paso.

- Debe ingresarse al programa Hyfran y crearse un nuevo documento

Figura 55. Nuevo Documento - Hyfran



Fuente: Elaboración Propia - Hyfran.

- Se despliega la siguiente ventana: donde se debe ingresar el título del proyecto, la variable que se va a analizar, en este caso: Lluvia máx. 24 h, la unidad (mm) y el número de cifras significativas con que se requiera trabajar; como en este caso se van a analizar eventos de lluvias máximas se define el periodo de retorno para crecidas y para la fórmula de probabilidad empírica se decidió trabajar con la fórmula de Weibull.

Figura 56. Parámetros Estadísticos - Hyfran

Descripción | Datos | Estadística de base | Verificación de hipótesis | Gráfico

Título del proyecto
Manual de Hidrología - Estación Guayabito 2701519

Comentarios

Tipo de variable
Nombre : Lluvia máx 24 h
Unidad : mm
Números significativos : 4

Definición del periodo de regreso
 $T = 1/q = 1 / p$ (crecida)
 $T = 1/q = 1 / (1 - p)$ (sequía)
 $q = F(x)$: probabilidad de no-excedencia
 $p = 1 - F(x)$: probabilidad de excedencia

Formula de probabilidad empírica :
 $F[k(k)] = (k - a) / (n - 2a + 1), 0 < a <= 0.5$
 a = 0.00 (Formula de Weibull)

Fuente: Elaboración Propia - Hyfran.

- Posteriormente se ingresan los datos, copiando de Excel la columna de la observación y el año al que corresponde el registro, se inserta en el Hyfran usando el icono pegar.

Figura 57. Datos - Hyfran

Hyfran - haricana.hyf

Archivo | Edición | Muestra | Ajuste | Gráfico | Ver | Ventana ?

Pegar haricana.hyf

Descripción | Datos | Estadística de base | Verificación de hipótesis | Gráfico

	Observación	Identificador	Probabilidad empírica	Código
1	124	1970	0.7273	
2	99.2	1971	0.3636	
3	138.3	1972	0.8636	
4	100.3	1973	0.4091	
5	93.5	1974	0.2273	
6	91.5	1975	0.1818	
7	100.5	1976	0.4318	
8	149.7	1977	0.9318	
9	132	1978	0.7955	
10	110	1979	0.4773	
11	141.9	1980	0.8864	
12	98.3	1981	0.2955	
13	92.4	1982	0.2045	
14	96	1983	0.7500	

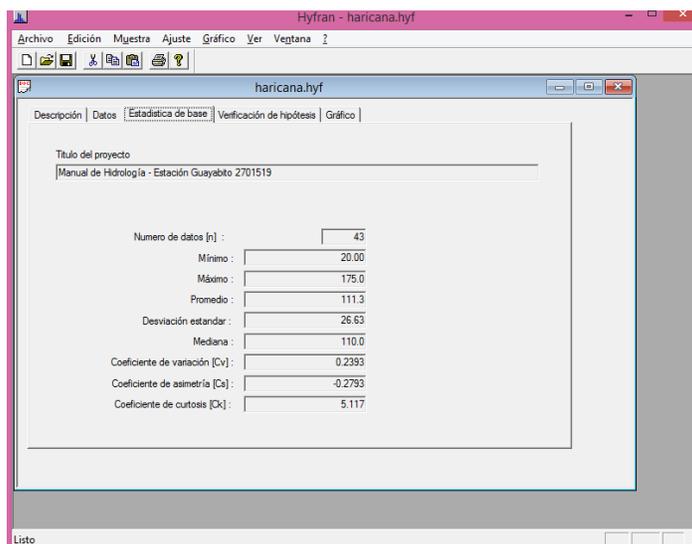
Incluye los datos desactivados en el calculo de la probabilidad empírica

Insertar contenido de la papelera

Fuente: Elaboración Propia - Hyfran.

- En la siguiente pestaña se pueden observar, los resultados de la estadística de base:

Figura 58. Estadística de base - Hyfran

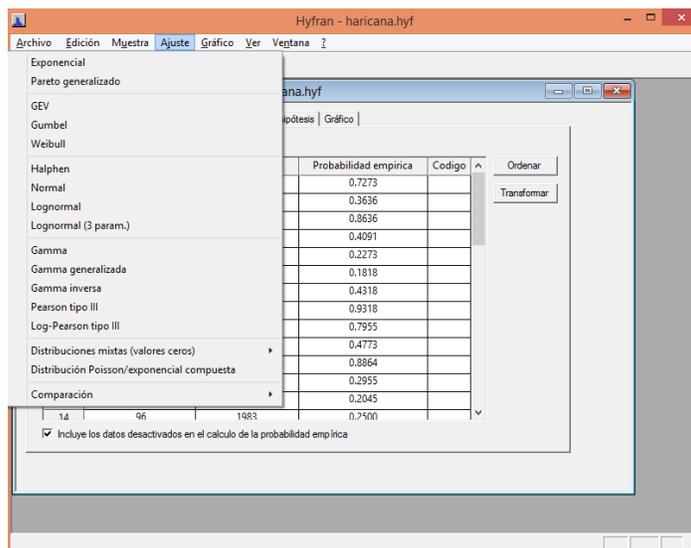


Fuente: Elaboración Propia - Hyfran.

- En la pestaña Verificación de hipótesis se puede verificar si las observaciones son independientes y en la pestaña Gráfico se puede observar la distribución de los datos, sea en un histograma o en una curva.

- El siguiente paso consiste ajustar la serie de lluvias máximas en 24 h a diferentes distribuciones estadísticas y evaluar cual distribución se ajusta mejor a los datos analizados, este criterio depende del valor de chi cuadrado que se obtenga. Para esto se da clic en la pestaña ajustes, donde se despliegan las distribuciones que se pueden adoptar, con el fin de realizar el ejemplo y en la memoria de cálculo se presentan los ajustes realizados para la distribución de Gumbel, Log Normal y Log Pearson III.

Figura 59. Estadística de base - Hyfran



Fuente: Elaboración Propia - Hyfran.

Para realizar la memoria de cálculo se da clic en el icono copiar y en un archivo de Word se pega la información y se organiza en un documento. La cual se presenta en el **Anexo 5.3**, para las tres estaciones que se están empleando en el corredor vial analizado como ejemplo.

4. CURVAS DE INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA.

Se pueden definir como patrones de conductas pluviométricas que registran sobre un área o región específica y que resultan de unir los puntos más representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno, representando las duraciones en abscisas y las intensidades en las ordenadas.

Intensidad (I): Se puede definir como el volumen de precipitación por unidad de área o altura equivalente de precipitación por unidad de tiempo (mm/ hora) y se expresa como $I = P / T_d$ (Ven Te Chow, 1994), donde P = Lámina de agua lluvia (mm) y T_d = Duración (horas).

Duración (T_d): Es el tiempo comprendido entre el comienzo y el final de la precipitación considerado como evento.

Frecuencia (F): Se considera como una medida de la probabilidad de ocurrencia de que un evento sea igualado o excedido por lo menos una vez al año, expresada en función del periodo de retorno.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, proporciona las Curvas IDF elaboradas por el instituto mediante la metodología de Distribución de Valores Extremos. Actualmente y debido a que no en todas las zonas del país el IDEAM cuentan con curvas IDF, se ha dado amplio uso a la metodología de “Curvas sintéticas de Intensidad – Duración – Frecuencia para Colombia” de Vargas Rodrigo – 1998. En este capítulo se desarrollarán las dos metodologías.

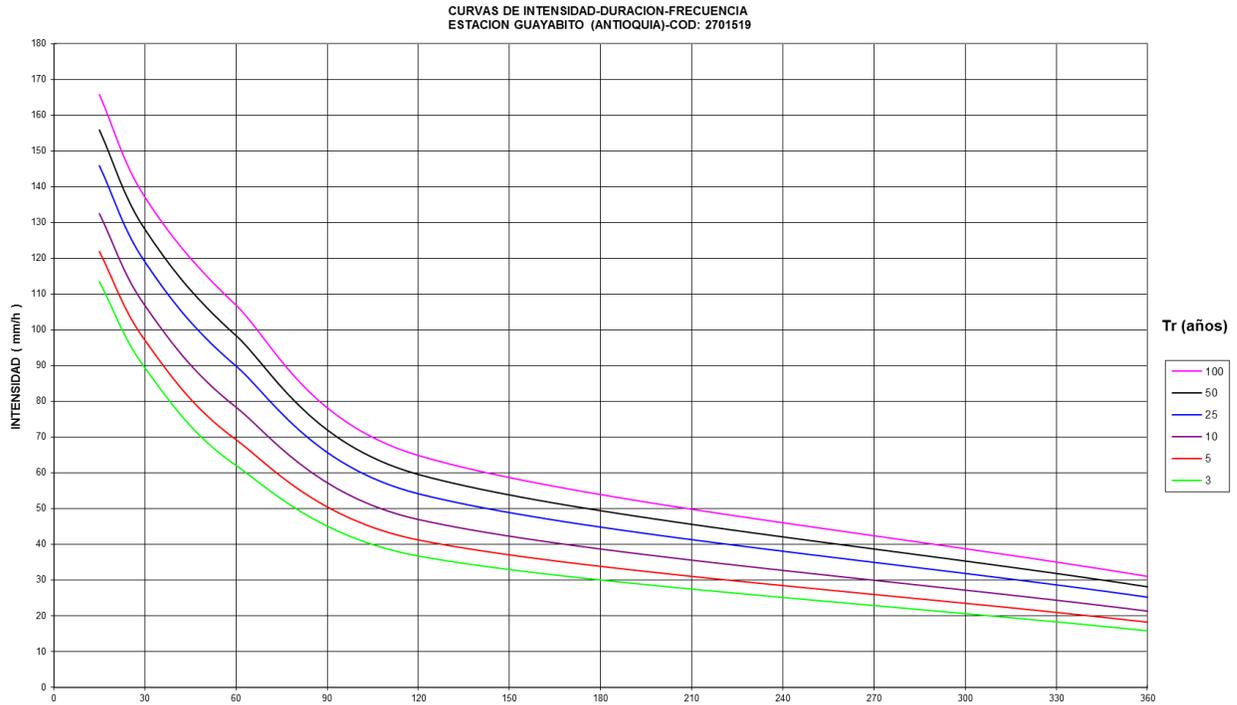
4.1. CURVAS IDF DATOS HISTORICOS DE PRECIPITACIÓN (IDEAM)

Para el cálculo de Curvas con datos históricos de precipitación de una estación provista de Pluviógrafo, se seleccionan los aguaceros de corta duración más intensos, para una duración específica, iniciando con 10 min. Para cada año del registro se encuentra la precipitación máxima de 10 minutos de todos los aguaceros de este año. Estos datos se ajustan a una distribución probabilística conocida, calculando los valores de precipitación para periodos de retorno de 2,5, 20, 25, 50 y 100 años.

Este mismo procedimiento se realiza para duraciones de lluvia de 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos, luego se calculan curvas de mejor ajuste de los datos resultantes.

El Instituto IDEAM elabora Curvas siguiendo esta metodología, para el caso del estudio, se obtuvieron las Curvas IDF de la Estación 2701519 CO Guayabito que se presentan en la Figura 56 y en el **Anexo 4**.

Figura 60. Curvas IDF Estación CO Guayabito – IDEAM



Fuente: IDEAM.

En la siguiente Tabla se presentan las Relaciones de Intensidad – Duración – Frecuencia, a partir de las cuales se generaron las Curvas IDF de la anterior Figura.

Tabla 6. Relaciones IDF – Estación Guayabito IDEAM

Estación 2701519 CO Guayabito						
Número de años analizado: 29						
Duración (Minutos)	Periodo de Retorno (años)					
	3	5	10	25	50	100
15	113.5	121.9	132.5	145.9	155.9	165.8
30	89.4	97.1	106.8	119.0	128.1	137.1
60	62.1	69.3	78.4	89.9	98.4	106.9
120	36.8	41.3	47.0	54.2	59.6	64.9
360	15.9	18.3	21.4	25.3	28.2	31.1

Fuente: IDEAM.

4.2. CURVAS IDF SINTÉTICAS (VARGAS RODRIGO – 1998)

Esta metodología es conocida como el método simplificado, se realiza a partir de una correlación de la Precipitación Máxima en 24 h, el Número promedio de Días de Lluvia al año y la Precipitación Total Anual. El método propone varias formulaciones, dependiendo de los datos que se tengan. Una ecuación emplea únicamente las Lluvias Máximas en 24 h, otra ecuación que correlaciona las Lluvias Máximas en 24 h y el Número de Días de Lluvia y otra formulación que correlaciona los tres parámetros, la cual se considera más precisa, la fórmula es la siguiente:

$$I_m = a \cdot \frac{T^b}{t^c} \cdot M^d \cdot N^e \cdot PT^f$$

Dónde:

- I_m : Intensidad media en mm/hr.
- T: Periodo de retorno en años.
- t: Duración de la lluvia en horas.
- N: Promedio del número de días con lluvia al año.
- PT: Precipitación Media anual en mm.
- M: Promedio del valor máximo anual de precipitación diaria en mm.

Para Colombia, se han establecido diferentes valores de a, b, c, d, e y f (Parámetros de regresión) según la región del país, los cuales se presenta en la siguiente Tabla y en la Figura 61.

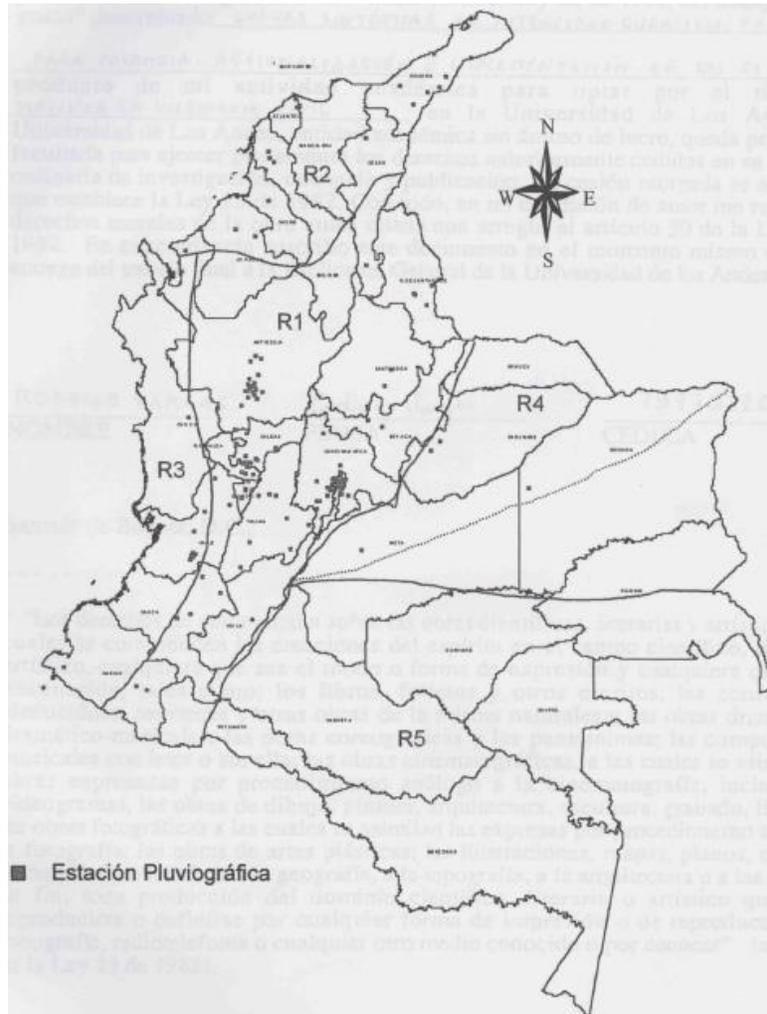
Tabla 7. Valores Parámetros de Regresión en Colombia

Región	A	b	c	d	e	f
Andina (R1)	1.61	0.19	0.65	0.75	-0.15	0.08
Caribe (R2)	8.51	0.21	0.50	-0.01	-0.08	0.28
Pacífico (R3)	2.31	0.19	0.58	-0.20	0.12	0.400

Fuente: Curvas Sintéticas de IDF para Colombia – Vargas Rodrigo 1998.

Para las regiones Orinoquia y Amazonia, no se sugiere emplear este método, ya que la red de estaciones no es muy densa y no se asegura que los resultados que se obtengan sean precisos.

Figura 61. Regiones en Colombia – Parámetros de Regresión



Fuente: Curvas Sintéticas de IDF para Colombia – Vargas Rodrigo 1998.

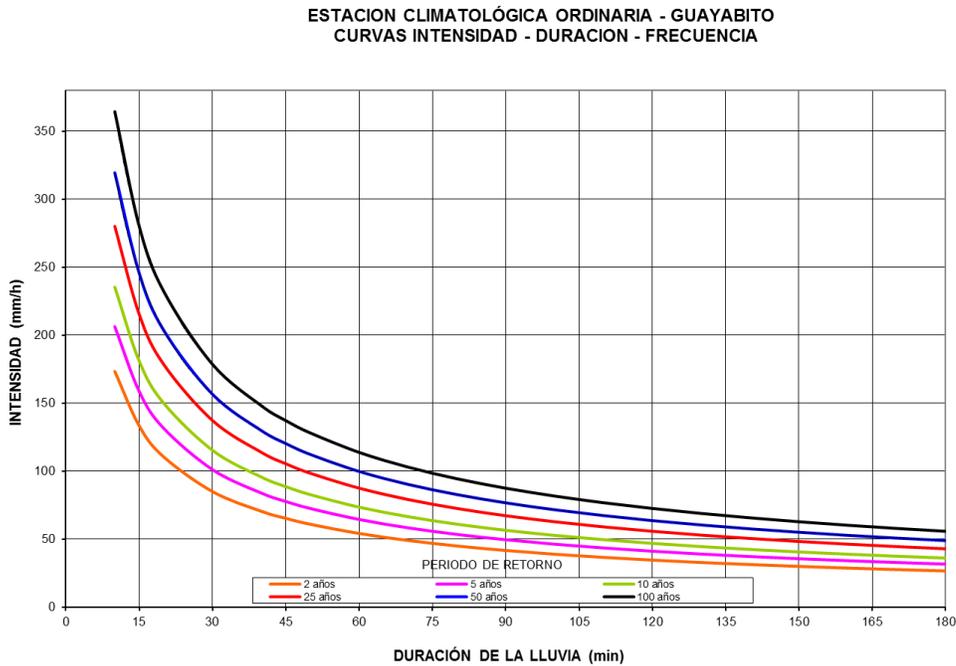
Para el caso del estudio realizado como ejemplo, el tramo de vía de Cisneros – San José del Nus se encuentra en el Departamento de Antioquia - Región 1 (Andina), cuyos parámetros a, b, c, d, e y f son iguales respectivamente a: 1.61, 0.19, 0.65, 0.75, -0.15 y 0.08. Aplicando estos valores, la ecuación anterior queda:

$$I_m = 1.61 \cdot \frac{T^{0.19}}{t^{0.65}} \cdot M^{0.75} \cdot N^{-0.15} \cdot pT^{0.08}$$

A continuación se presentan las curvas IDF obtenidas para las Estaciones CO Guayabito, PM San Roque y CP Granja Ex. San José del Nus.

Teniendo en cuenta los datos históricos, el promedio del valor máximo anual de precipitación en 24 horas en la estación CO Guayabito es de 113.50 mm, el número promedio de días con lluvia es de 251. La precipitación promedio anual es de 3958 mm. En la Figura 63 y en el **Anexo 5.4** Memorias de Cálculo se presentan las curvas IDF obtenidas.

Figura 62. Curvas Sintéticas IDF Estación CO Guayabito



En la Tabla 8 se presentan las Relaciones de Intensidad – Duración – Frecuencia, a partir de las cuales se generaron las Curvas IDF de la Figura 58.

Tabla 8. Relaciones IDF – Estación CO Guayabito

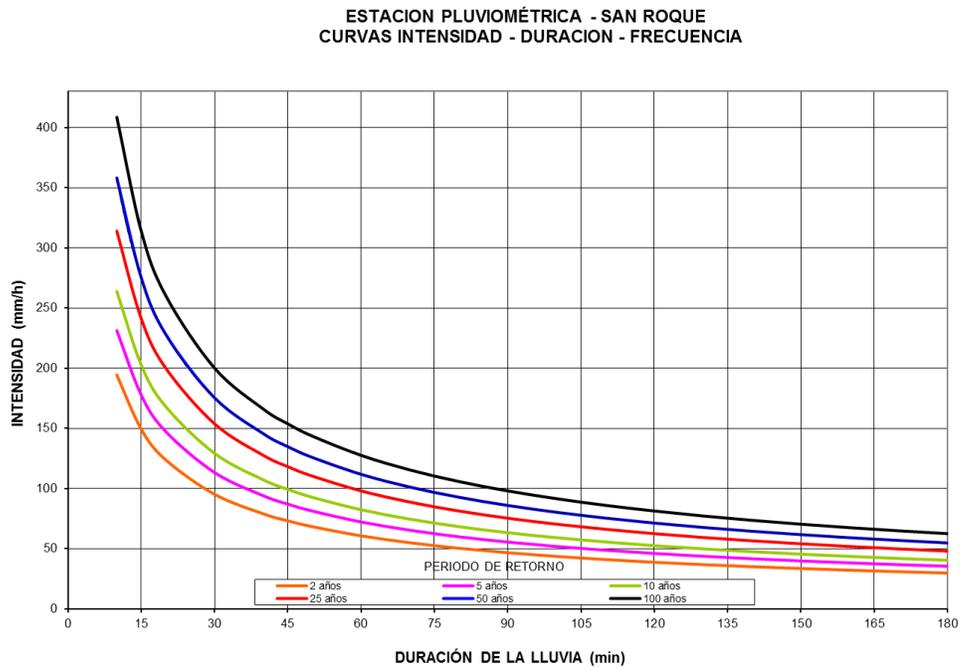
TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	25	50	100
10	173.3	206.3	235.4	280.1	319.5	364.5
15	133.2	158.5	180.8	215.2	245.5	280.1
20	110.5	131.5	150.0	178.5	203.6	232.3
30	84.9	101.0	115.2	137.2	156.5	178.5
40	70.4	83.8	95.6	113.8	129.8	148.0
45	65.2	77.6	88.5	105.4	120.2	137.1
50	60.9	72.5	82.7	98.4	112.3	128.1

60	54.1	64.4	73.4	87.4	99.7	113.7
70	48.9	58.2	66.4	79.1	90.2	102.9
80	44.9	53.4	60.9	72.5	82.7	94.3
90	41.6	49.5	56.4	67.2	76.6	87.4
100	38.8	46.2	52.7	62.7	71.5	81.6
110	36.5	43.4	49.5	58.9	67.2	76.7
120	34.5	41.0	46.8	55.7	63.5	72.5
130	32.7	38.9	44.4	52.9	60.3	68.8
140	31.2	37.1	42.3	50.4	57.5	65.6
150	29.8	35.5	40.5	48.2	55.0	62.7
160	28.6	34.0	38.8	46.2	52.7	60.1
170	27.5	32.7	37.3	44.4	50.7	57.8
180	26.5	31.5	36.0	42.8	48.8	55.7

Fuente: Elaboración Propia.

Teniendo en cuenta los datos históricos, el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria en la estación PM San Roque es de 124.2 mm y el número de días de lluvia es 191. La precipitación promedio anual es de 4252 mm. En la Figura 63 y en el **Anexo 5.5** Memorias de Cálculo se presentan las curvas IDF obtenidas.

Figura 63. Curvas Sintéticas IDF Estación PM San Roque



Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 9 se presentan las Relaciones de Intensidad – Duración – Frecuencia, a partir de las cuales se generaron las Curvas IDF de la Figura 59.

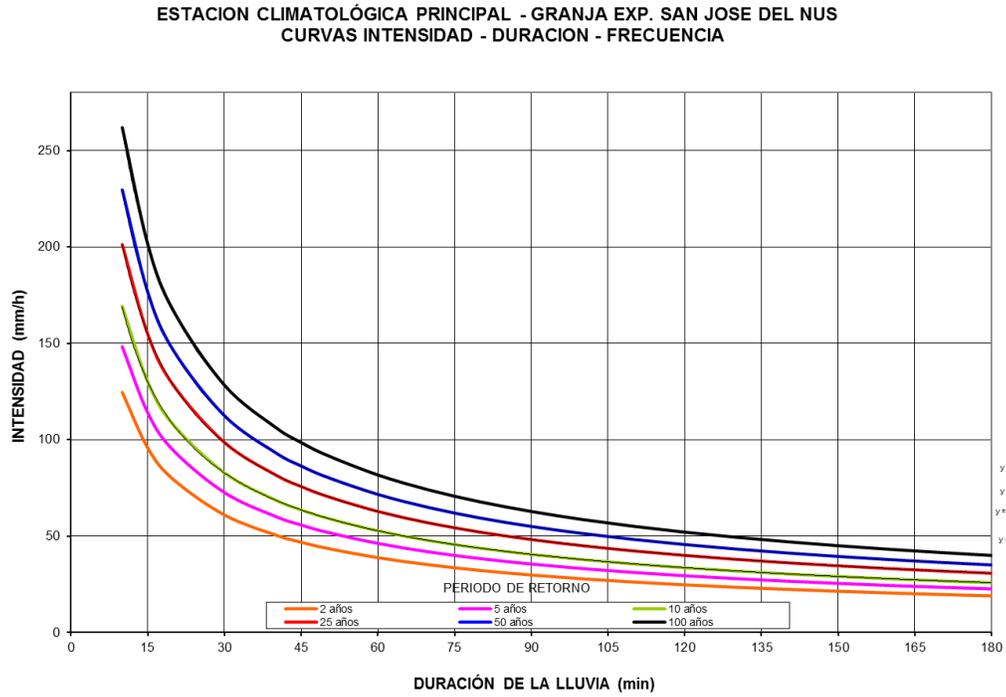
Tabla 9. Relaciones IDF – Estación PM San Roque

TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	25	50	100
10	194.3	231.3	263.8	314.0	358.2	408.6
15	149.3	177.7	202.7	241.3	275.2	314.0
20	123.8	147.4	168.1	200.1	228.3	260.4
30	95.2	113.2	129.2	153.8	175.4	200.1
40	78.9	93.9	107.2	127.5	145.5	166.0
45	73.1	87.0	99.3	118.1	134.8	153.7
50	68.3	81.3	92.7	110.3	125.8	143.6
60	60.6	72.2	82.3	98.0	111.8	127.5
70	54.9	65.3	74.5	88.6	101.1	115.4
80	50.3	59.9	68.3	81.3	92.7	105.8
90	46.6	55.4	63.3	75.3	85.9	98.0
100	43.5	51.8	59.1	70.3	80.2	91.5
110	40.9	48.7	55.5	66.1	75.4	86.0
120	38.6	46.0	52.5	62.4	71.2	81.3
130	36.7	43.7	49.8	59.3	67.6	77.1
140	35.0	41.6	47.5	56.5	64.4	73.5
150	33.4	39.8	45.4	54.0	61.6	70.3
160	32.1	38.1	43.5	51.8	59.1	67.4
170	30.8	36.7	41.8	49.8	56.8	64.8
180	29.7	35.3	40.3	48.0	54.7	62.4

Fuente: Elaboración Propia.

Teniendo en cuenta los datos históricos, el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria en la estación CP San José del Nus es de 75.67 mm y el número de días de lluvia es 220. La precipitación promedio anual es de 2225 mm. En la Figura 63 y en el **Anexo 5.6** Memorias de Cálculo se presentan las curvas IDF obtenidas.

Figura 64. Curvas Sintéticas IDF Estación CP Granja Exploratoria San José del Nus



Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 10 se presentan las Relaciones de Intensidad – Duración – Frecuencia, a partir de las cuales se generaron las Curvas IDF de la anterior Figura.

Tabla 10. Relaciones IDF – Estación CP Granja Exploratoria San José del Nus

TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	25	50	100
10	124.6	148.3	169.1	201.3	229.6	262.0
15	95.7	113.9	130.0	154.7	176.4	201.3
20	79.4	94.5	107.8	128.3	146.3	166.9
30	61.0	72.6	82.8	98.6	112.4	128.3
40	50.6	60.2	68.7	81.8	93.3	106.4
45	46.9	55.8	63.6	75.7	86.4	98.5
50	43.8	52.1	59.4	70.7	80.7	92.0
60	38.9	46.3	52.8	62.8	71.7	81.7
70	35.2	41.9	47.7	56.8	64.8	73.9
80	32.2	38.4	43.8	52.1	59.4	67.8
90	29.9	35.5	40.5	48.3	55.1	62.8
100	27.9	33.2	37.9	45.1	51.4	58.6
110	26.2	31.2	35.6	42.4	48.3	55.1
120	24.8	29.5	33.6	40.0	45.7	52.1

130	23.5	28.0	31.9	38.0	43.3	49.5
140	22.4	26.7	30.4	36.2	41.3	47.1
150	21.4	25.5	29.1	34.6	39.5	45.1
160	20.5	24.5	27.9	33.2	37.9	43.2
170	19.8	23.5	26.8	31.9	36.4	41.5
180	19.0	22.7	25.8	30.8	35.1	40.0

Fuente: Elaboración Propia.

5. OBTENCIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO.

5.1. MÉTODO RACIONAL

Para determinar los caudales de diseño de cuencas menores o iguales a 2.5 km² se puede emplear el método racional. Este método permite calcular los caudales máximos para diferentes períodos de retorno, utilizando las características hidrológicas y morfométricas de cada cuenca y la precipitación máxima que cae sobre la cuenca.

El método racional propone la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{F * C * I * A}{3.6}$$

Dónde:

- Q: Caudal máximo, (m³/s)
- F: Factor de reducción de la lluvia puntual por área de drenaje, valor adimensional.
- C: Coeficiente de escorrentía.
- I: Intensidad de la lluvia, (mm/h)
- A: Área de Drenaje, (Km²)

Los resultados obtenidos al emplear esta metodología y los parámetros empleados en la ecuación del método racional se presentan en el **Anexo 3.2**

5.1.1. FACTOR DE REDUCCIÓN

Para el Factor de Reducción de la Lluvia Puntual por Área de Drenaje, se tiene en cuenta que en general, la precipitación para una duración determinada (es decir, la intensidad promedio) decrece desde el centro de las tormentas, a medida que se incrementa la distancia a partir de este punto. La precipitación máxima es representativa del centro de las tormentas, por lo cual la precipitación promedio en la totalidad del área de drenaje deberá ser menor, dependiendo del tamaño y forma de la cuenca, de las tormentas históricas registradas y de la localización del centro de precipitación máxima. Para el cálculo de este parámetro en el ejemplo que se ha venido desarrollando, se decidió emplear el Factor de Reducción calculado mediante la formulación de Fruhling y la ecuación tomada

del Institution of Civil Engineers, Proceedings, 2nd Part, "Flood Studies Report", Volume 65. Las ecuaciones se presentan a continuación y los cálculos se presentan en el **Anexo 3.2**

5.1.1.1.ECUACIÓN DE FRÜHLING

$$F(A) = 1.0 - 0.0054 * A^{0.25}$$

A: Área de drenaje de la hoya, en metros cuadrados (m²).

5.1.1.2.ECUACIÓN TOMADA DEL INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, PROCEEDINGS, 2ND PART, "FLOOD STUDIES REPORT", VOLUME 65

$$F(A) = 1.0 - 0.0268 * t_c^{-0.261} * A^{0.387}$$

A: Área de drenaje de la hoya, en kilómetros cuadrados (km²).

t_c: Tiempo de concentración de la hoya, en horas (h).

5.1.2. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración se define como el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que el agua llegue a la salida de la cuenca desde los límites más extremos de la misma. Se consideró calcular el Tiempo de Concentración mediante las formulaciones de Bransby y Kirpich, que son las que más se utilizan en las metodologías tradicionales. Para tiempos de concentración inferiores a 15 minutos se utilizó la intensidad correspondiente a tiempo de concentración de 15 minutos.

5.1.2.1.BRANSBY

$$T_c = 14.6 * L * A^{-0.1} * S^{-0.2}$$

t_c: Tiempo de concentración de la hoya, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

A: Área de drenaje de la hoya, en kilómetros cuadrados (km²).

S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

5.1.2.2.KIRPICH

$$T_c = 3.9756 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

t_c: Tiempo de concentración de la hoya, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

5.1.3. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

El coeficiente de escorrentía (C), es la relación del total del agua precipitada en una cuenca, con el volumen real de la escorrentía después de descontar las pérdidas por almacenamiento, retención e infiltración. Dependen del uso y tipo de suelo, de la cobertura vegetal y de la condición de humedad antecedente.

Para los diferentes tramos de la vía que se analizando como ejemplo se estimaron los coeficientes de escorrentía para el área de influencia de cada estación, empelando la 'Tabla 15.1.1 Coeficientes de escorrentía para ser usados en el método racional' del libro Ven Te Chow, Hidrología Aplicada Hydrology, Mc Graw Hill, 1994. La tabla en mención se muestra en la siguiente Figura.

Figura 65. Tabla 15.1.1 Coeficientes de Escorrentía para ser usados en el Método Racional

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
<i>Condición pobre</i> (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio</i> (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena</i> (cubierta de pasto mayor del 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente: Ven Te Chow, Hidrología Aplicada.

Los Coeficientes de escorrentía empleados se presentan en el **Anexo 3.2**, se tomó la condición de áreas no desarrolladas - área de cultivos – Pendiente superior a 7%.

5.2. MÉTODO LLUVIA – ESCORRENTÍA SCS

Para estimar los caudales de diseño de las cuencas que tienen un área mayor a 2.5 km², se empleó el Software HEC-HMS utilizando la metodología del U.S. Soil Conservation Service, el cual estima la escorrentía producida por una tormenta en una cuenca. Tiene en cuenta las abstracciones, con base en la humedad antecedente, el tipo hidrológico del suelo, su uso y las condiciones del terreno y el complejo suelo -cobertura vegetal, y la transformación lluvia neta escorrentía directa mediante un hidrograma sintético desarrollado a partir de observaciones en cuencas naturales. Es de amplio uso en nuestro medio y es adecuado para ser aplicado directamente en cuencas con áreas hasta 250 km².

Para el cálculo de las abstracciones, este método se basa en la siguiente relación fundamental:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{Pe}$$

Dónde:

F = Infiltración real, en pulgadas

S = Infiltración potencial, en pulgadas

Q = Escorrentía real, en pulgadas

Pe = Escorrentía potencial o exceso de precipitación, en pulgadas

Esta relación tiene validez a partir del momento en que se inicia la escorrentía. Toda la precipitación ocurrida antes del comienzo de la escorrentía se considera como pérdida (intercepción, la cual no contribuye al flujo superficial). Las pérdidas iniciales de la precipitación se denominan abstracciones iniciales (Ia), las cuales se calculan con la siguiente relación empírica:

$$Ia = 0.2 \cdot S$$

Se tiene entonces que:

$$Pe = P - Ia \quad \gamma \quad F = Pe - Q$$

En donde: l y P , están en pulgadas. Sustituyendo en la relación inicial y despejando el valor de Q se obtiene la expresión:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

En donde P y S están en pulgadas El S.C.S. luego de analizar gran cantidad de hidrogramas de cuencas, encontró un procedimiento para calcular el valor de S con base en un parámetro llamado Número de Curva (CN), mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

En donde S esta expresado en pulgadas.

El valor de (CN) para cada condición de humedad antecedente es propio de cada cuenca y se obtiene con base en el tipo de suelo y la condición hidrológica, que es un indicador de la cobertura vegetal y de la capacidad de infiltración del suelo. El método establece que los suelos de la cuenca en estudio deben clasificarse dentro de los siguientes grupos:

- A = (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta rata de infiltración. Arenas y gravas profundas.
- B = (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con ratas de infiltración moderadas, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas.
- C = (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos de infiltración lenta, con bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de arcilla, arenas arcillosas poco profundas y arcillas.
- D = (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta. Suelos arcillosos con alto potencial expansivo, suelos salinos con nivel freático alto permanente.

Según las características del tipo de suelo y de cobertura vegetal de las cuencas se determinó el número de escurrimiento CN, correspondiente a una condición de humedad antecedente II, un grupo de suelo B, según el estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Antioquia, se tiene que son suelos muy bien a bien drenados, moderadamente profundos a superficiales. La cobertura vegetal que se observó en la zona es predominante de cultivos y pastos, con algunos relictos de bosque con buena condición hidrológica.

Para estimar la escorrentía máxima, se aplicó utilizó el hidrograma unitario sintético curvilíneo propuesto por el S.C.S., cuya forma está definida por las siguientes ecuaciones:

$$q_p = \frac{0.2083 \cdot A \cdot E}{T_p}$$

$$T_p = \frac{D}{2} + T_L$$

Dónde:

- q_p = Caudal pico unitario, en m³/s por cada milímetro de escorrentía.
- A = Área de drenaje, en km².
- T_p = Tiempo al pico, en horas.
- D = Duración de la lluvia efectiva o duración del hidrograma unitario en horas.
- T_L = Tiempo de retardo de la cuenca, en horas.
- T_c = Tiempo de concentración de la cuenca, en horas, calculado con la expresión de Kirpich.
- T_b = Tiempo base del hidrograma unitario, en horas
- E = Escurrimiento unitario, en este estudio E = 1 mm.
- Y = Pendiente promedio del terreno

Para el cálculo del tiempo de retraso, el SCS propone la siguiente expresión para hoyas menores a 8 km² y números de curva entre 50 y 95.

$$T_L = \frac{L^{0.8} (2540 - 22.86 CN)^{0.7}}{14104 CN^{0.7} Y^{0.5}}$$

El segundo método, se basa en el tiempo de concentración calculado con base en la velocidad promedio de tramos de la corriente principal. En este caso, $T_L = 0.6 T_c$

Los caudales obtenidos se presentan en el **Anexo 3.2** y la memoria de cálculo se presenta en el **Anexo 5.8**

5.3. GEO - HMS

El paquete HMS - Hec GeoHMS permite realizar un modelamiento hidrológico para obtener caudales de diseño a partir del modelo desarrollado mediante el ArcGIS, en este numeral se realiza el análisis paso a paso y los resultados obtenidos se presentan en el **Anexo 3.3**

El proceso da inicio con la verificación de la información obtenida del proceso previo de caracterización – Characterist.

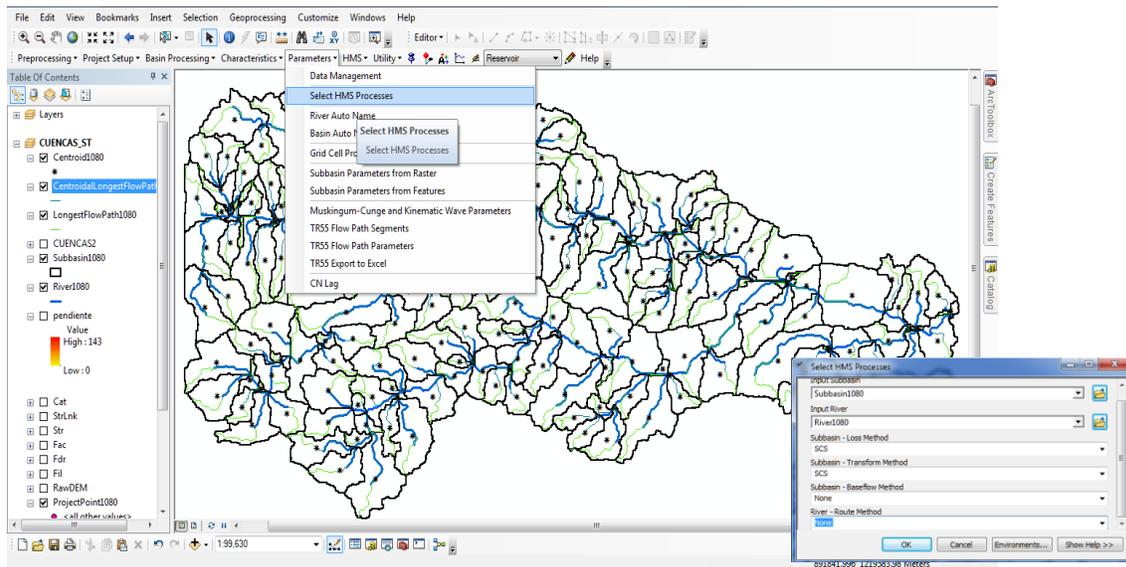
Figura 66 – Data Management.



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

Dentro del proceso se definen las metodologías a emplear en el modelo así como los parámetros para su cálculo. Se optó por las propuestas por el SCS como ejemplo. El análisis de las metodologías empleadas se realizará posteriormente, teniendo como base la esquematización resultante de este proceso. (Ver Figura 67)

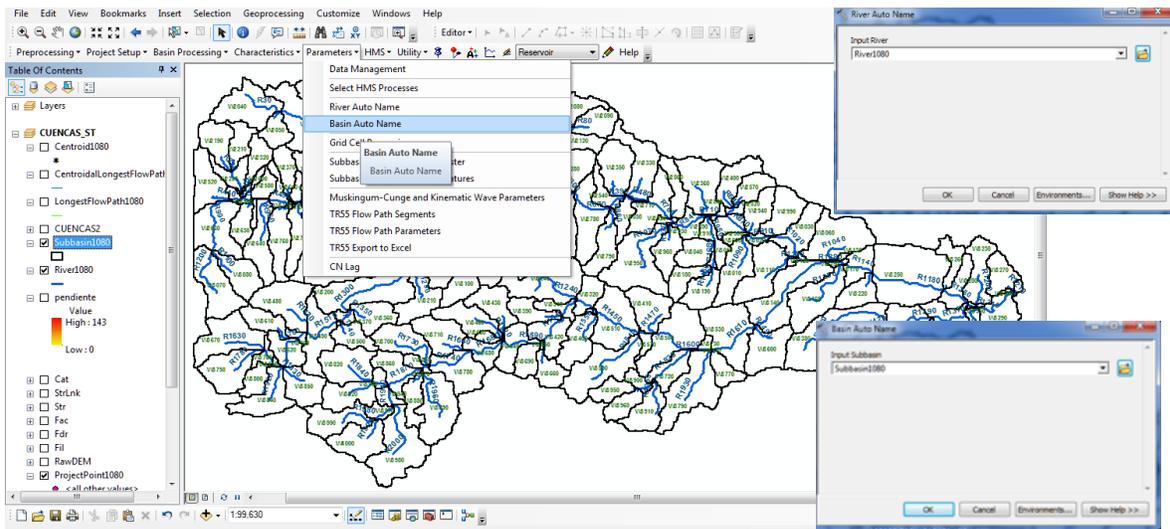
Figura 67 – Parameters Processes HMS - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

El sistema autodenomina cada una de las subcuencas – Basin Auto Name y la red de drenaje – River Auto Name seleccionando Parameters/River Auto Name y Basin Auto Name. (Figura 68)

Figura 68 – Parameters River Auto Name- Hec GeoHMS

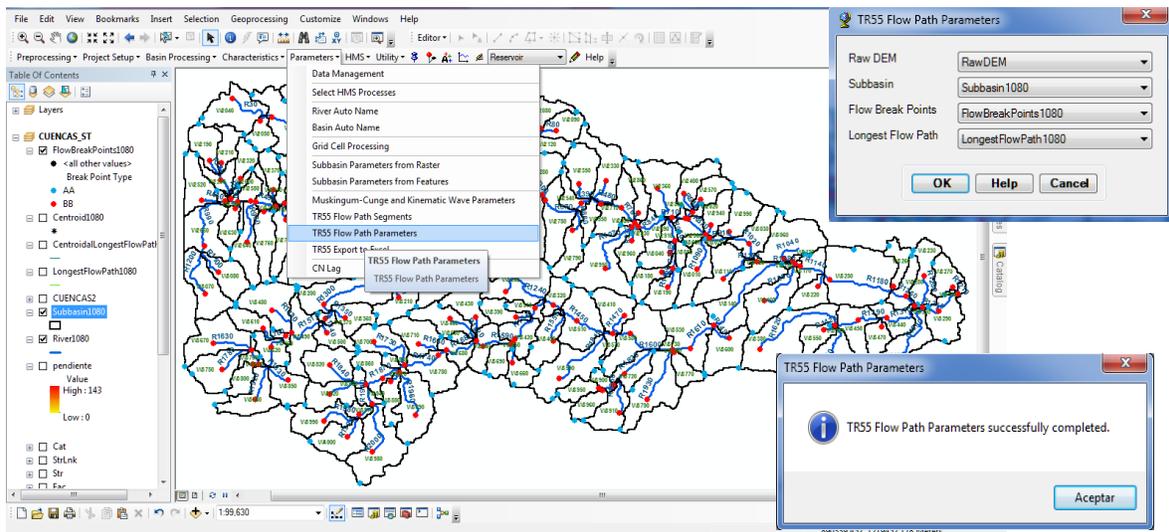


Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

5.3.1. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El sistema permite el cálculo de los tiempos de concentración por la metodología del TR55, con la extracción de la información de los parámetros morfométricos de las cuencas, para ello se selecciona Parameter/TR55 Path segments y posteriormente Parameters/TR55 Path Parameters. El sistema despliega una ventana donde verifica que las características de flujo de las cuencas han sido cargadas por el sistema. (Ver Figura 69)

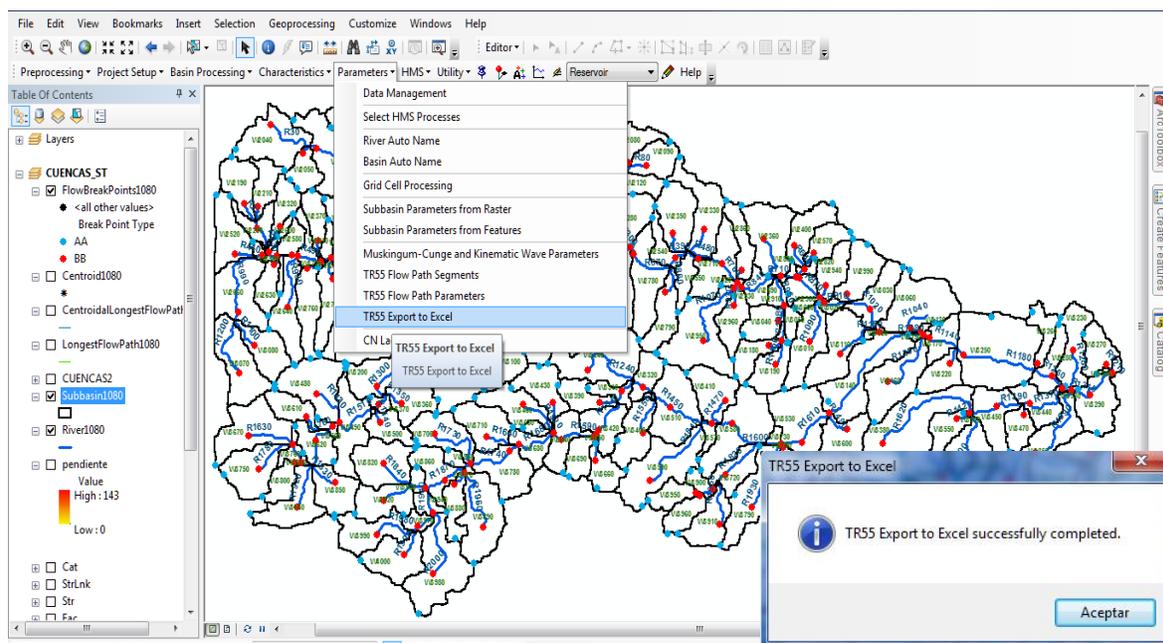
Figura 69 – Tiempos de concentración- Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

El sistema posee una interfaz con una macro de Excel donde se muestran los cálculos de tiempo de concentración con la metodología TR55, donde se pueden manipular y corregir errores, e integrarlos nuevamente al sistema de geoprocresamiento ARCGIS 10.2, seleccionando Parameters/TR55 Export to Excel. (Ver Figura 70)

Figura 70 – TR55 Export- Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Para efectos de este estudio la macro de Excel será manipulada para integrar la ecuación de tiempo de concentración desarrollada por Temez, de acuerdo con la expresión:

$$T_c = 0.3 * \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$$

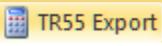
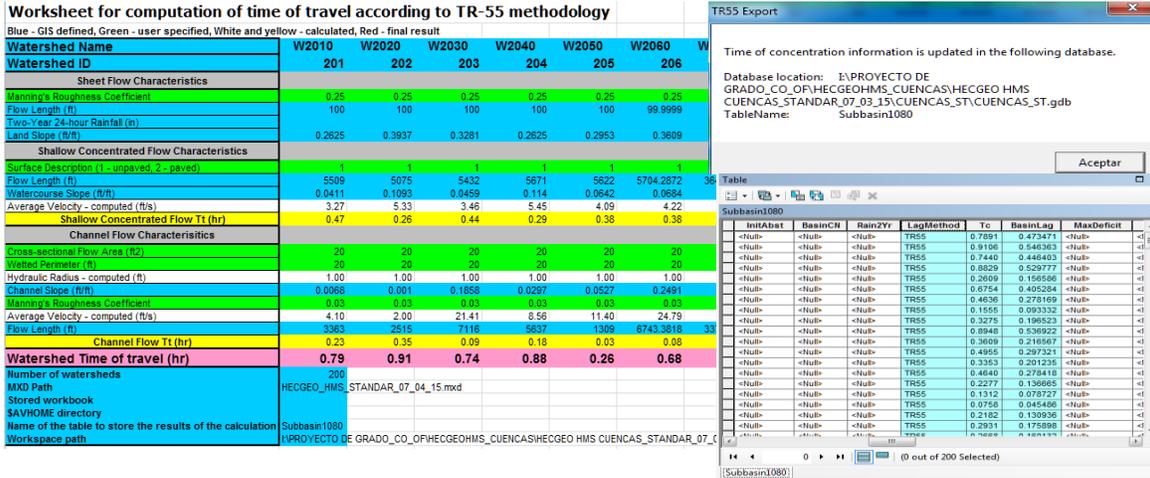
La anterior ecuación debe integrarse en la casilla de la macro Excel denominada Watershed Time of travel, relacionando la longitud de flujo Flow length y la pendiente Chanel Slope; posteriormente se deben revisar que no hayan errores por uso de comas o pendientes de 0. Una vez terminado de adecuar la macro Excel, se exporta al sistema Hec Geo HMS. Para ello en la hoja de Excel se debe ir a Complementos y seleccionar el icono  y el sistema integra los datos de tiempos de concentración en la geodatabase. (Ver Figura 71)

Figura 71 – Macro de cálculo Tiempos de Concentración - Hec GeoHMS

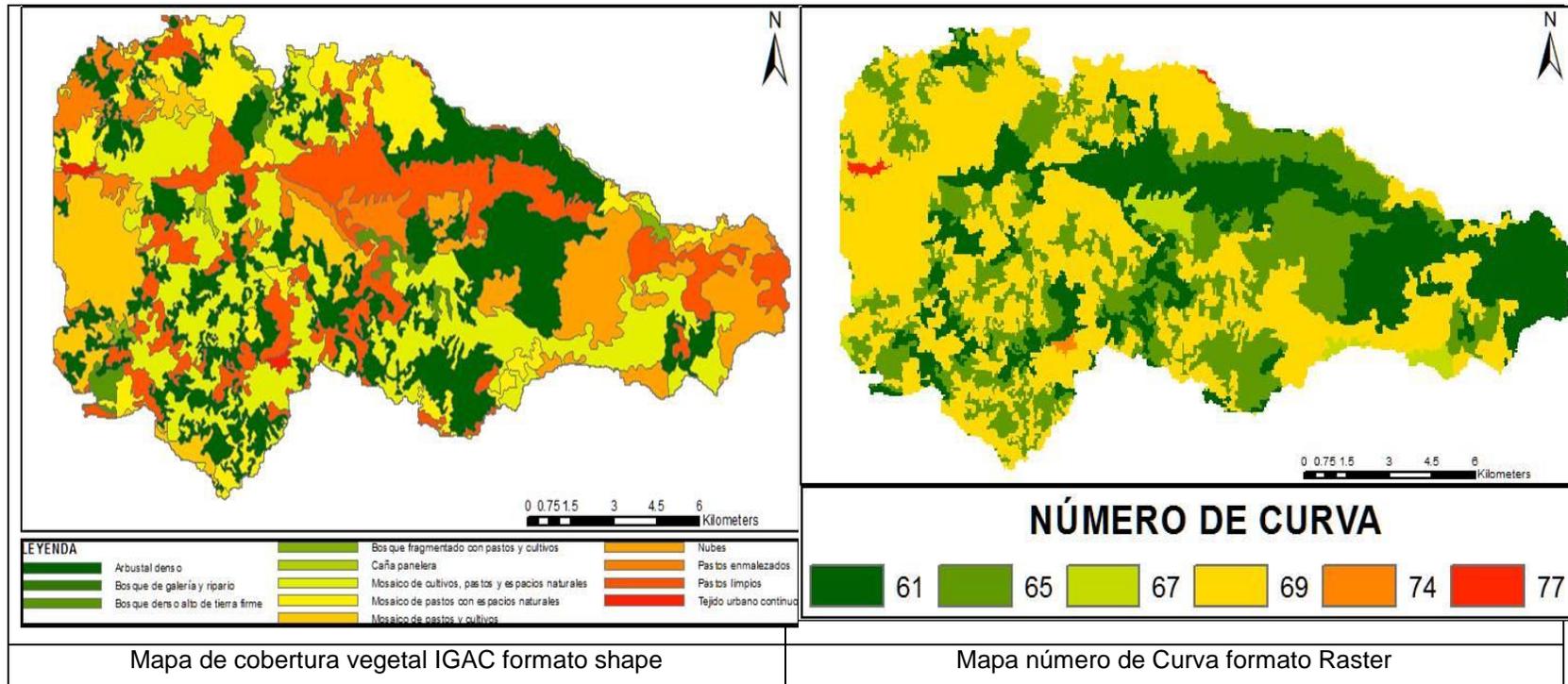


Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

5.3.2. NÚMERO DE CURVA

El sistema de geoprocresamiento del Hec geo HMS permite el cálculo del número de curva para cada una de las cuencas delimitadas, para ello se debe contar con información en formato RASTER; por consiguiente, se solicitó información concerniente a coberturas vegetales al Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, en formato shape, al cual se le asignó un nuevo campo con el número de curva para cada tipo de cobertura y se hizo la conversión de formato shape a formato raster en el sistema de geoprocresamiento ARCGIS 10.2, los resultados del proceso se muestran en la Figura 72.

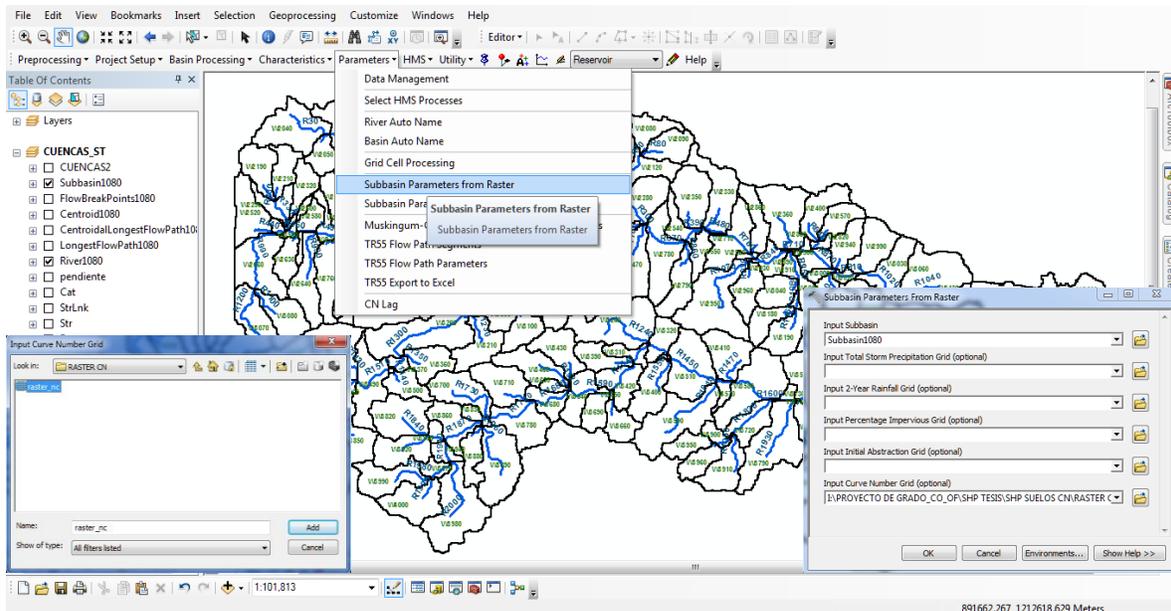
Figura 72 – Cobertura de Suelos y Numero de Curva



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2005

De la grilla en Formato Raster del número de curva se ingresa la información al sistema HecGeo HMS. Para ello se selecciona en PARAMETERS, la opción Subbasin Parameters From Raster, lo que despliega una ventana, se busca la opción Input Curve Number. Aparecerá otra ventana donde se ingresa el archivo de número de curva en formato Raster. (Ver Figura 73)

Figura 73 – integración número de curva al geoprocesamiento - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

Terminado el proceso en la tabla de atributos se debe verificar que todas las cuencas tengan el número de curva calculado. (Ver Figura 74)

Figura 74 – Verificación de Numero de Curva tabla de Atributos

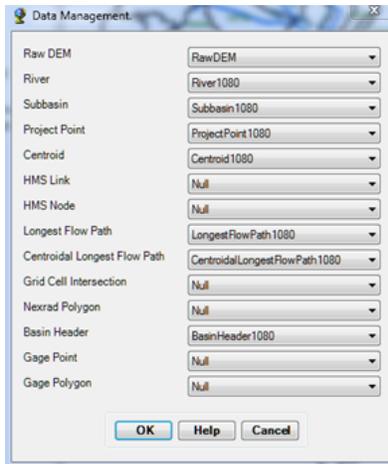
InitAbst	Rain2Yr	BasinCN	LagMethod	Tc	BasinLag
<Null>	<Null>	68.205074	TR55	0.7891	0.473471
<Null>	<Null>	63.211765	TR55	0.9106	0.546363
<Null>	<Null>	68.358491	TR55	0.7440	0.446403
<Null>	<Null>	67.00578	TR55	0.8829	0.529777
<Null>	<Null>	68.417004	TR55	0.2609	0.156586
<Null>	<Null>	67.48478	TR55	0.6754	0.405284
<Null>	<Null>	66.034483	TR55	0.4636	0.278169
<Null>	<Null>	69.338983	TR55	0.1555	0.093332
<Null>	<Null>	69.208092	TR55	0.3275	0.196523
<Null>	<Null>	68.391934	TR55	0.8948	0.536922
<Null>	<Null>	68.907757	TR55	0.3609	0.216567
<Null>	<Null>	68.597403	TR55	0.4955	0.297321
<Null>	<Null>	68.122302	TR55	0.3353	0.201235
<Null>	<Null>	65.974713	TR55	0.4640	0.278418
<Null>	<Null>	67.656934	TR55	0.2277	0.136665
<Null>	<Null>	68.027027	TR55	0.1312	0.078727

Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

5.3.3. MODELO ESQUEMÁTICO Y EXPORTACIÓN A HEC HMS

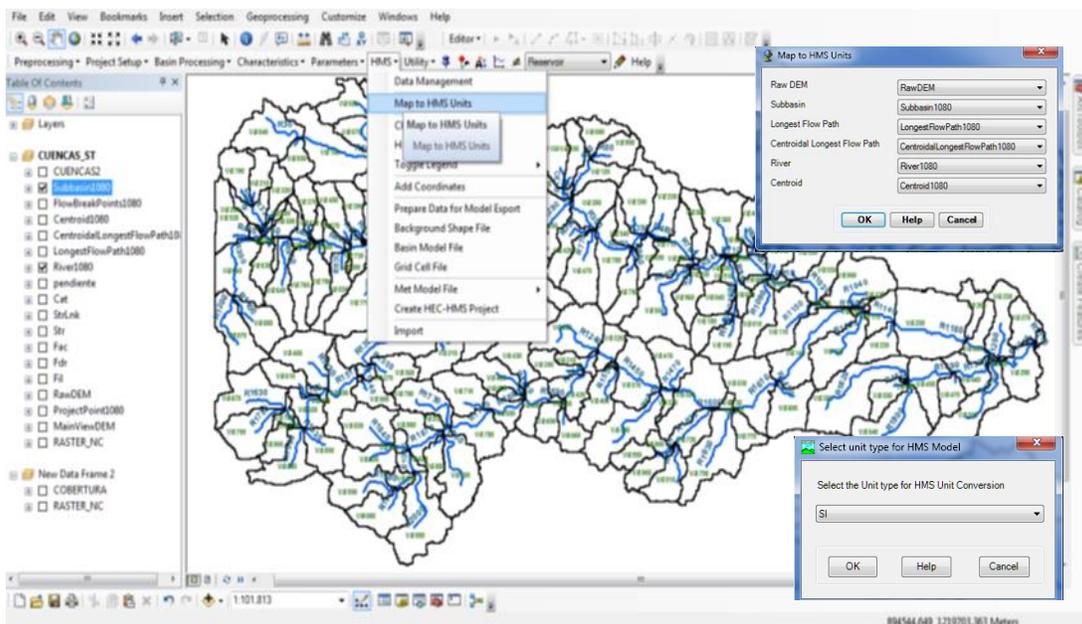
Como en todos los procesos anteriores se inicia con la verificación de información Data Management. Y se selecciona las unidades de trabajo en este caso el sistema internacional. (Ver Figura 75)

Figura 75 – Data Management.



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

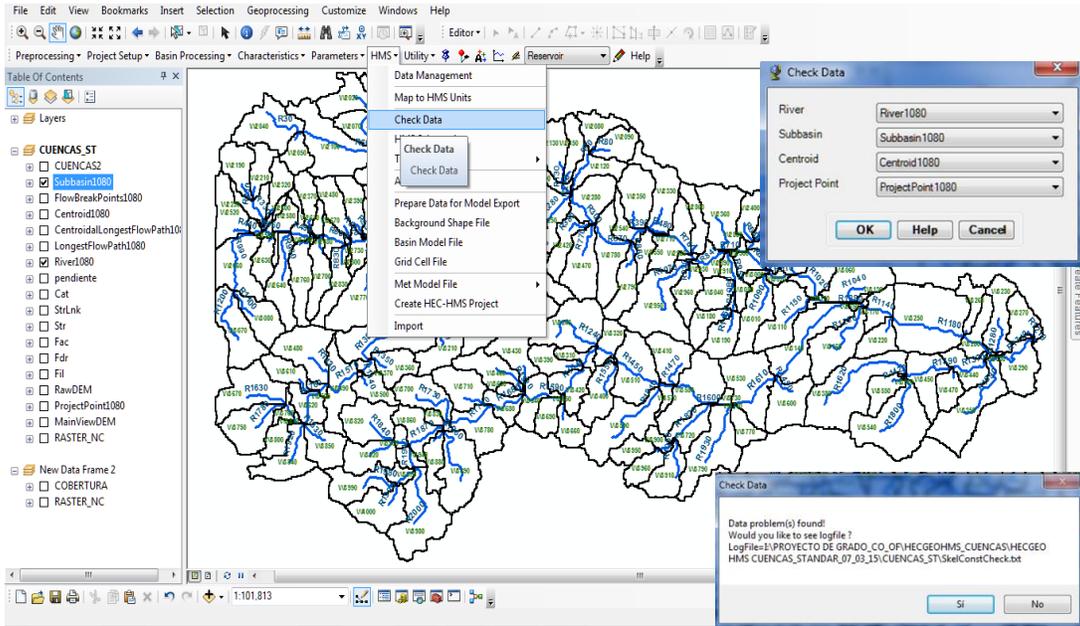
Figura 76 – Modelo Esquemático - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

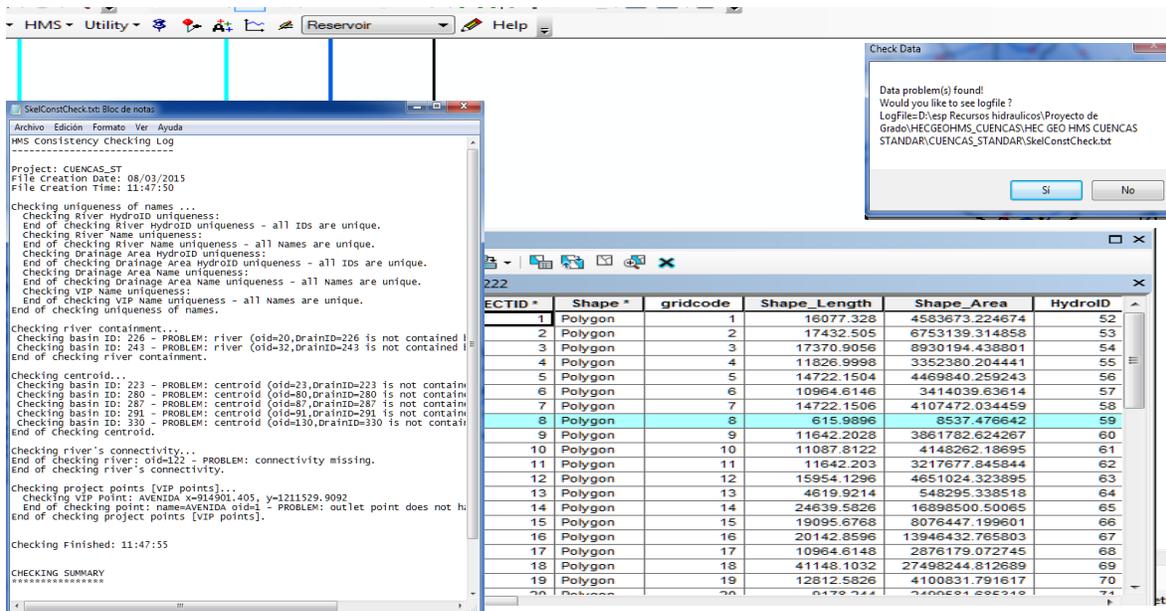
El proceso continúa con el chequeo de información topológica del modelo, en caso de generar errores se deben editar desde el editor/features hasta adecuarlas teniendo en cuenta el archivo en formato TXT que emite el sistema para la verificación. (Ver Figura 77 y Figura 78)

Figura 77 – Check Data - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

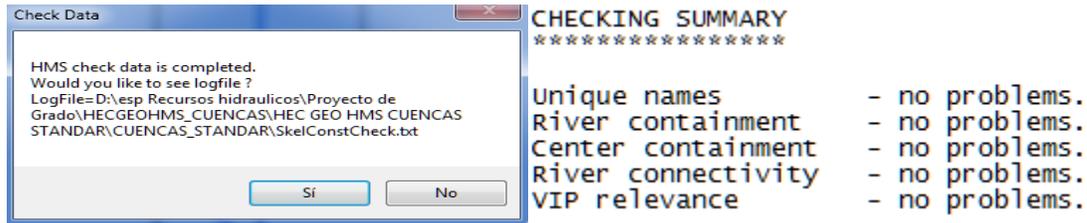
Figura 78 – Edición de Errores - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Cuando el chequeo ha finalizado, el sistema emite un archivo en formato TXT donde informa que este proceso ha sido completado y que no hay problemas. (Ver Figura 79)

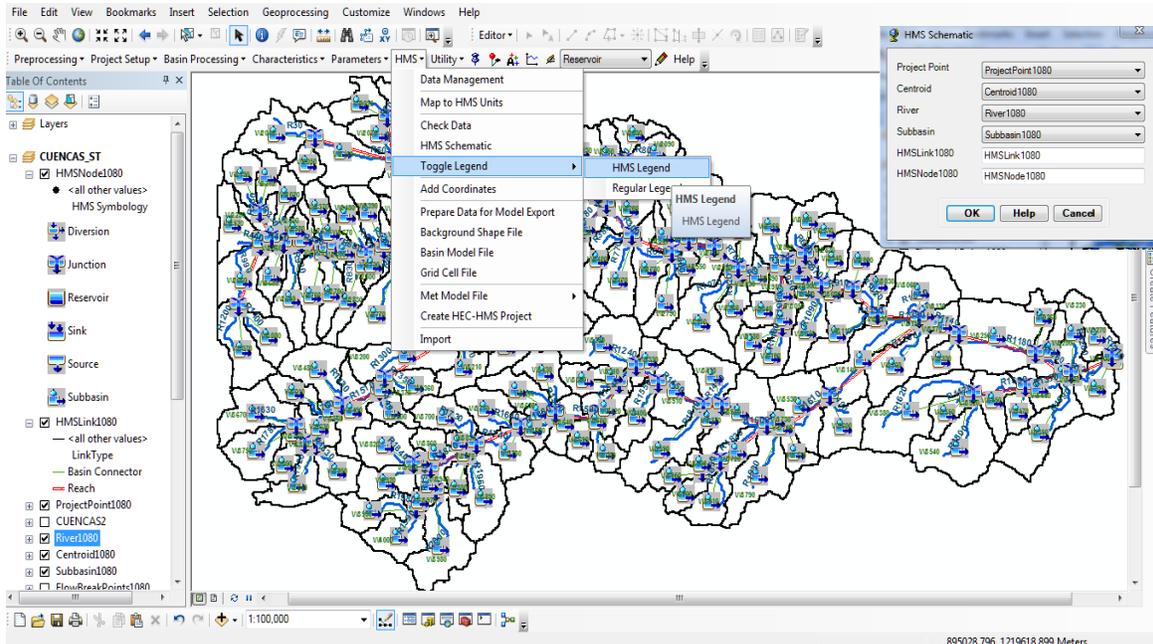
Figura 79 – Datos Completos de Exportación - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Posteriormente se genera el modelo esquemático del modelo hidrológico, seleccionando en HMS/taggle legend/HMS legend, y de igual forma se agrega la información de georeferenciación al agregar coordenadas al esquema obtenido mediante HMS/Add Coordinates. (Ver Figura 80)

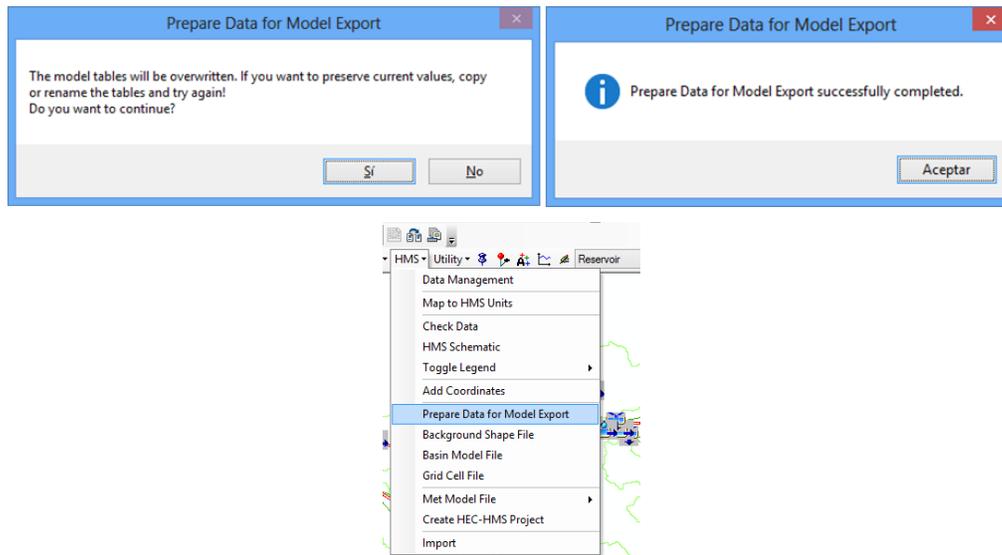
Figura 80 – Modelo Esquemático - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Una vez obtenida y georeferenciada toda la información del modelo HMS, se prepara dicha información para su respectiva exportación al sistema HEC HMS. (Ver Figura 81)

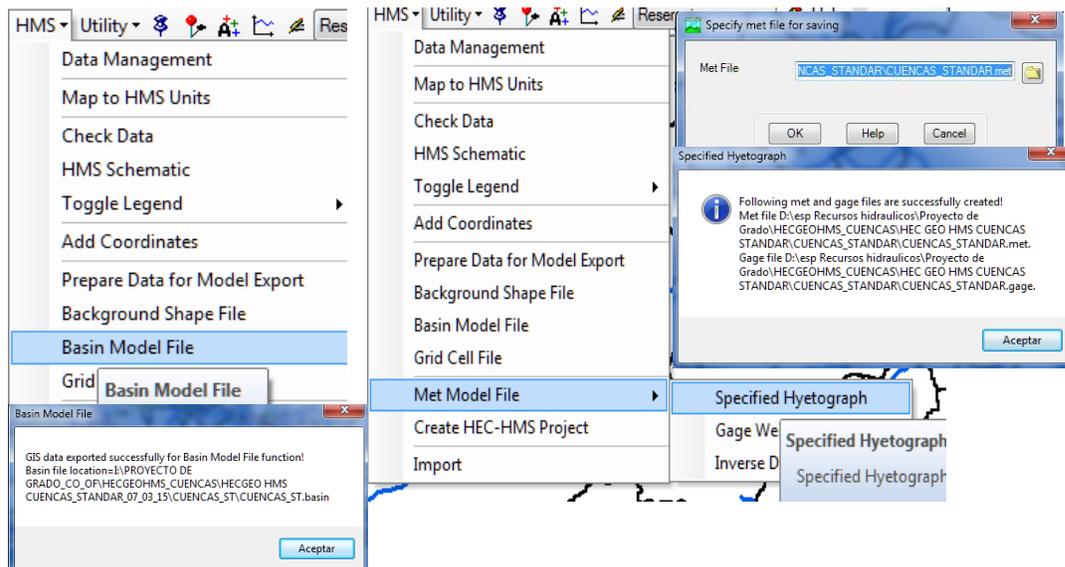
Figura 81 – Data Model Export - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS

Se exportan los archivos del modelo de cuenca – Basin model y el archivo meteorológico Met Model. (Ver Figura 82).

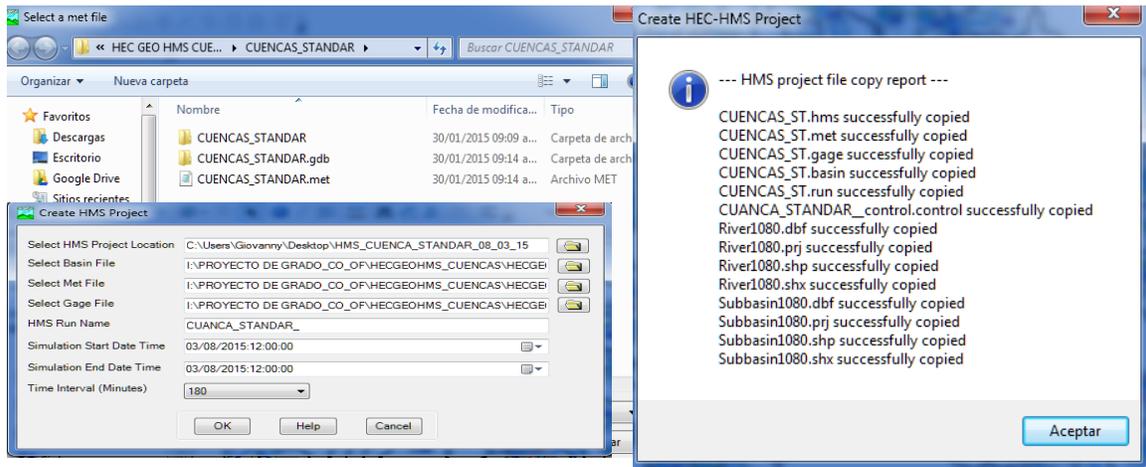
Figura 82 – Export Model Basin File y Met File - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Ahora se puede crear el proyecto HEC HMS con los nombres establecidos de la cuenca de interés. (Ver Figura 83)

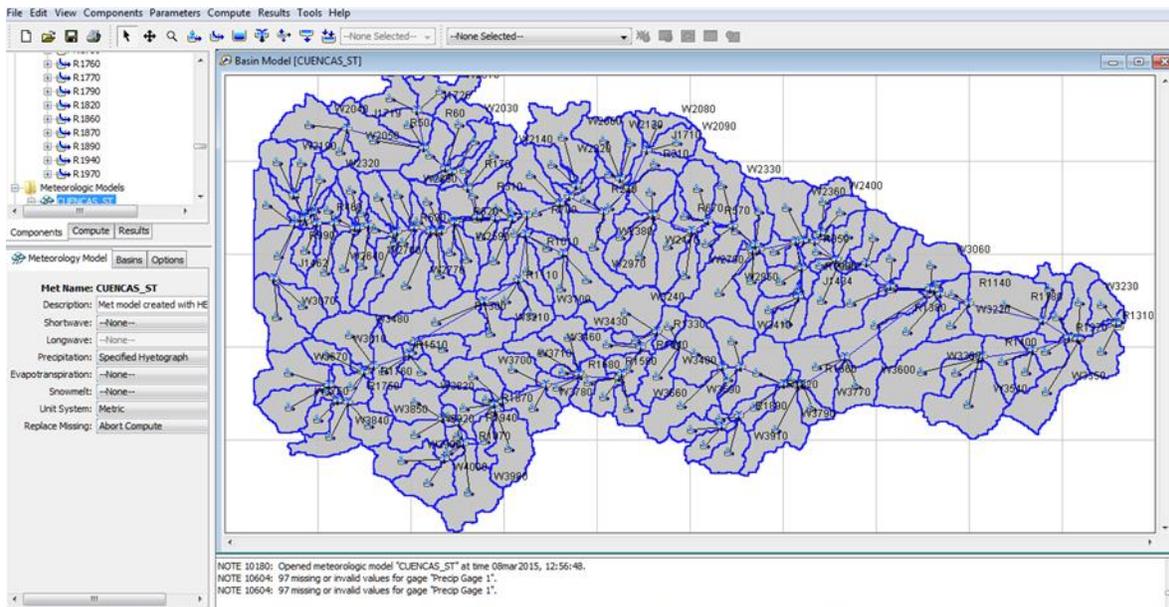
Figura 83 – Creación Modelo HMS - Hec GeoHMS



Fuente: Elaboración Propia - ArcGIS

Finalmente se obtiene el modelo hidrológico exportado abriendo el HEC HMS 4.0 de la cuenca de interés, para su posterior uso dentro de las metodologías hidrológicas a utilizar posteriormente. (Ver Figura 84)

Figura 84 – Modelo Hidrológico Exportado al HMS

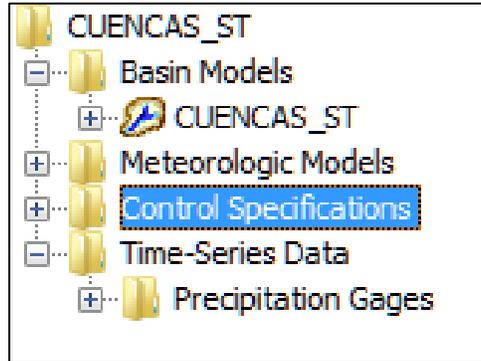


Fuente: Elaboración Propia – HMS 4.

El modelo hidrológico exportado al software HEC – HMS contiene toda la información morfológica, (pendientes, áreas, longitudes de flujo), además de las condiciones de perdidas (número de curva),

para cada uno de los componentes del modelo, En la Figura 85 se aprecia los componentes exportados al HEC – HMS.

Figura 85 – Modelo Hidrológico Exportado al HEC - HMS



Fuente: Elaboración Propia – HMS 4.

Aunque el sistema exporta la información de los parámetros, es necesario ingresar la información meteorológica para la construcción de hietogramas de aguaceros espaciales los cuales se derivan de las curvas IDF, descritas en el numeral 4. En la Tabla 11 se muestra el hietograma de entrada al modelo meteorológico de la estación Guayabito, para el sistema HEC – HMS y en el **Anexo 5.7** se presentan los cálculos de los hietogramas para cada una de las estaciones de referencia y para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 11. Hietograma – Estación Guayabito

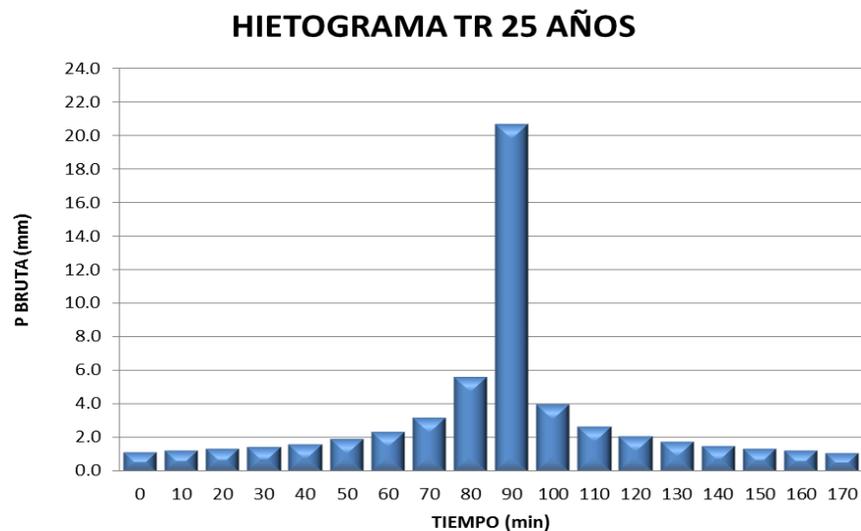
CONVERSIÓN LLUVIA PUNTUAL A LLUVIA ESPACIAL						
ESTACIÓN GUAYABITO						
CURVAS IDF - DISCRIMINADAS PARA UN TIEMPO (t)						
TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO Tr (Años)					
	2	5	10	25	50	100
0-10	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5
10-20	0.8	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7
20-30	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
30-40	0.9	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9
40-50	1.0	1.2	1.4	1.7	1.9	2.2
50-60	1.2	1.4	1.6	2.0	2.2	2.5
60-70	1.5	1.8	2.0	2.4	2.7	3.1
70-80	2.0	2.4	2.7	3.2	3.7	4.2
80-90	3.5	4.2	4.8	5.7	6.5	7.4
90-100	12.8	15.2	17.4	20.7	23.6	26.9

100-110	2.5	3.0	3.4	4.0	4.6	5.2
110-120	1.7	2.0	2.3	2.7	3.1	3.5
120-130	1.3	1.6	1.8	2.1	2.4	2.8
130-140	1.1	1.3	1.5	1.8	2.1	2.3
140-150	1.0	1.2	1.3	1.6	1.8	2.0
150-160	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
160-170	0.8	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7
170-180	0.7	0.8	0.9	1.1	1.3	1.5

Fuente: Elaboración Propia

A manera de ejemplo, el hietograma de entrada para un periodo de retorno de 25 años de la estación de Guayabito se puede apreciar en la Figura 86

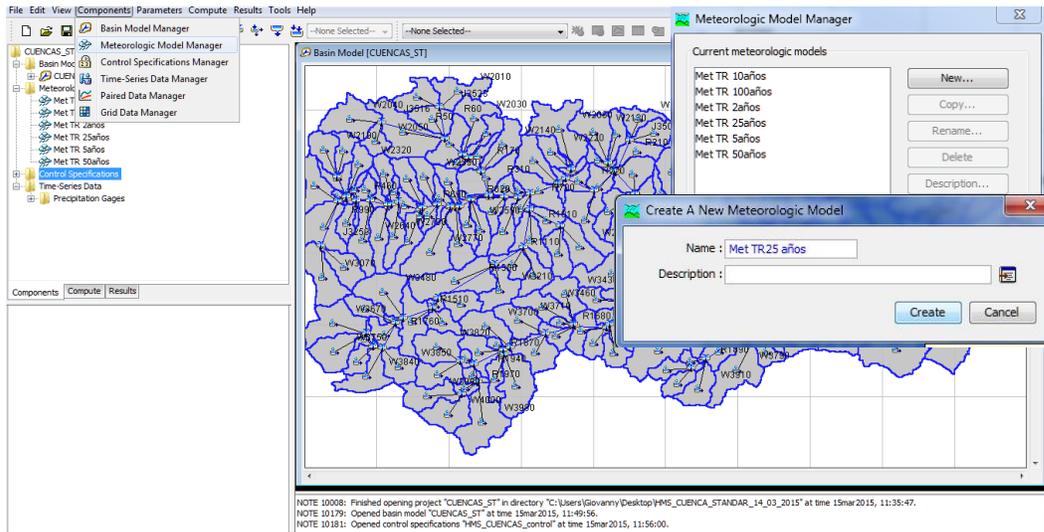
Figura 86 – Hietograma de entrada modelo meteorológico HEC HMS.



Fuente: Elaboración Propia

Para considerar los diferentes hietogramas de cada estación y periodo de retorno se vio la necesidad de crear un modelo meteorológico (met model file), para cada periodo de retorno. De componentes/Meteorological Model Manager en la barra superior del HEC HMS, se despliega una ventana donde, se ingresa el nombre (TR 25 años) del modelo meteorológico. (Ver Figura 87)

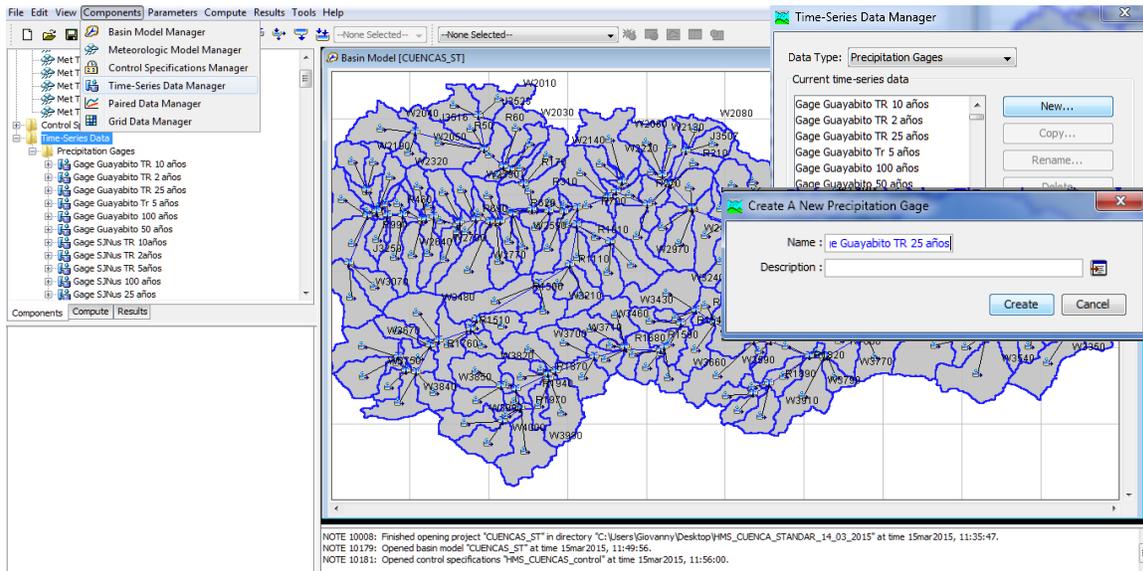
Figura 87 – Creación Met Model - HEC HMS.



Fuente: Elaboración Propia – HMS 4.

Una vez creados los modelos meteorológicos para cada periodo de retorno, se deben relacionar con las series de tiempo (Hietogramas) gages para cada estación y para cada periodo de retorno. Se deben crear los gages para cada estación y periodo de retorno mediante components/Time Series Data Manager (Ver Figura 88)

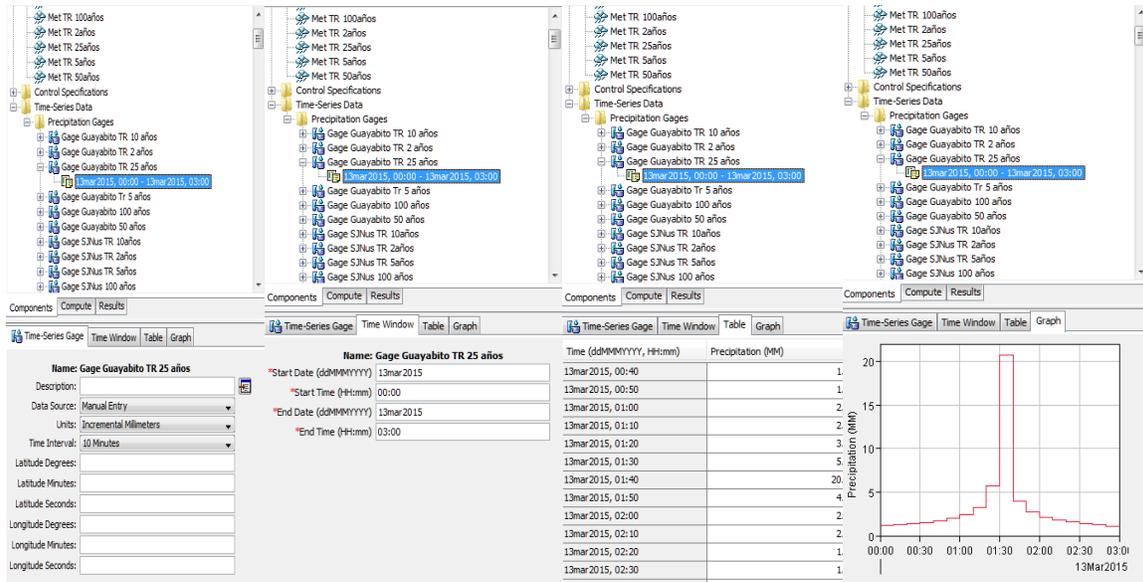
Figura 88 – Hietograma de entrada modelo meteorológico HEC HMS.



Fuente: Elaboración Propia – HMS 4.

Creados todos los gages para cada estación y periodo de retorno, se pueden ingresar los datos de los hietogramas en la ventana de visualización margen izquierda sobre el gage de interés (Gage Guayabito TR 25 años). En la Figura 89 se puede apreciar las opciones de entrada para la modelación.

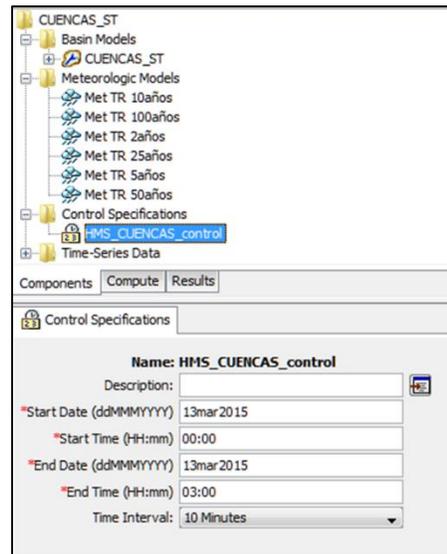
Figura 89 – Entradas de datos GAGES – HEC -HMS.



Fuente: Elaboración Propia – HMS 4.

Los datos mostrados en la Figura 89 corresponden a un evento de lluvia en forma incremental, para un intervalo de 10 minutos con una duración de 180 minutos (3 horas) y con un hietograma de la estación guayabito para un periodo de retorno de 25 años. Estos tiempos deben estar contemplados en el archivo de control donde se especifica los tiempos de evento para la simulación. (Ver Figura 90)

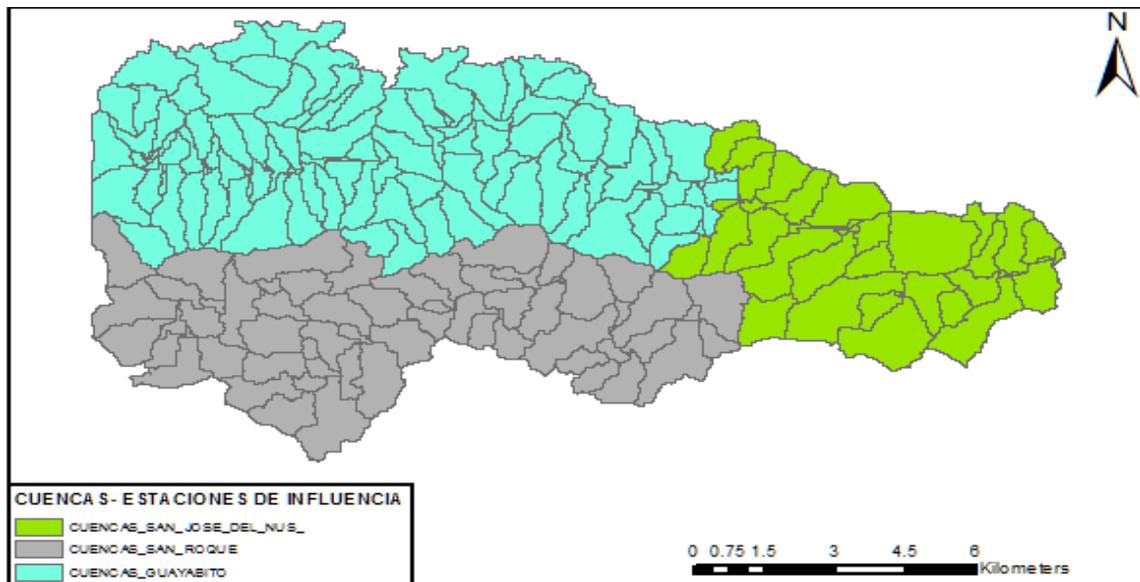
Figura 90 – Especificaciones de Control – HEC - HMS.



Fuente: Elaboración Propia – HMS 4.

Los modelos meteorológicos permiten darle pesos a los hietograma de las estaciones más próximas para cada una de las cuencas. Para ello, se encontró el área de influencia de las estaciones presentes en el área de estudio. Este proceso se realizó haciendo uso del sistema ArcGIS 10.2, los resultados se muestran en la Figura 91.

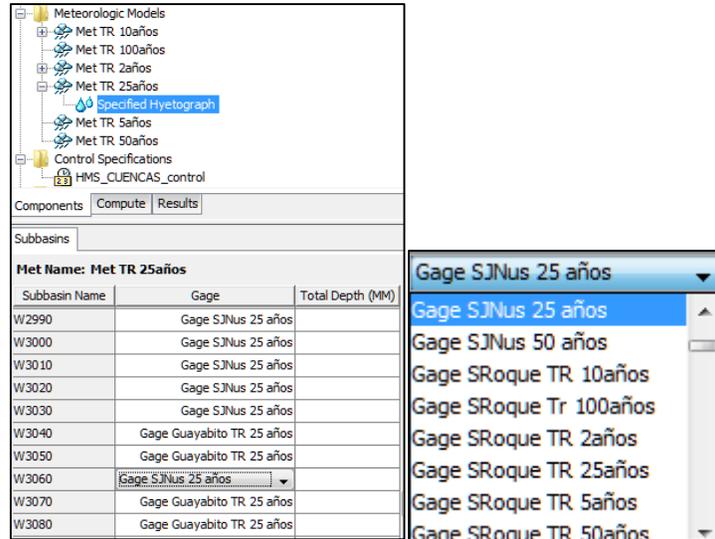
Figura 91 – Demarcación influencia de Estaciones meteorológicas



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS 10.2

Discriminado la influencia de las estaciones para cada cuenca ahora se pueden relacionar los modelos meteorológicos creados anteriormente. Este proceso se logra abriendo el archivo meteorológico de interés (Met TR 25 años), y buscando en las opciones desplegadas de cada cuenca el Gage correspondiente a la estación y periodo de retorno. (Ver Figura 92)

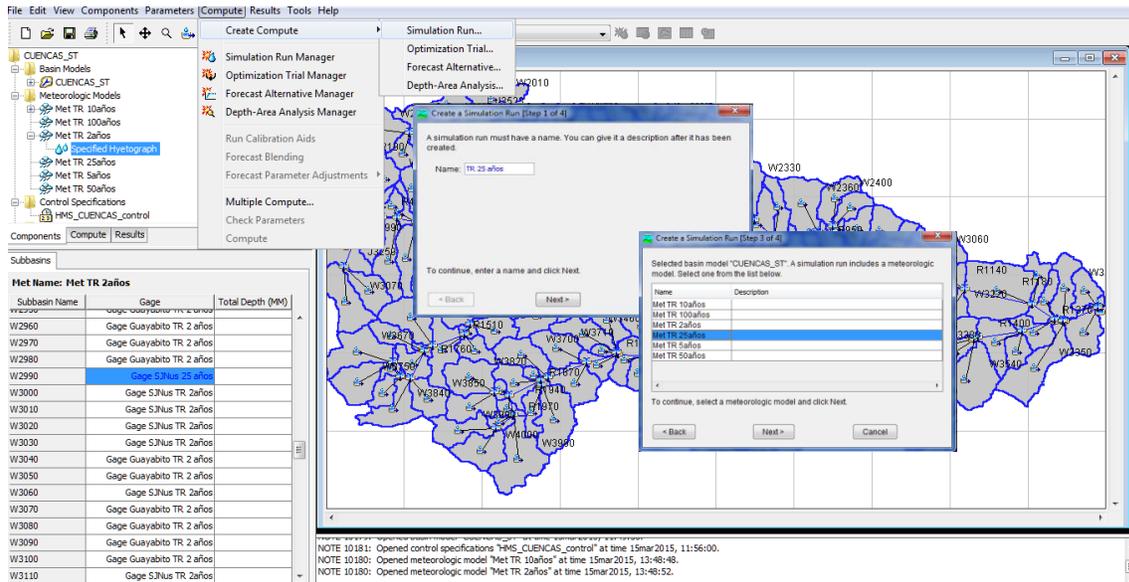
Figura 92 – Relación de cuencas a los modelos meteorológicos – HEC-HMS.



Fuente: Elaboración Propia – HEC - HMS

El anterior procedimiento se estableció para los diferentes modelos meteorológicos de cada periodo de retorno, ahora el modelo está listo para las simulaciones. Las simulaciones o corridas se crean con cada modelo meteorológico. En la opción Compute/creáte compute/Simulation Run, se despliega una ventana solicitando el nombre de la simulación (TR 25 años), posteriormente aparece otra ventana donde se requiere relacionar el modelo meteorológico (Met TR 25 años), este procedimiento se repite para todos los periodos de retorno. (Ver Figura 93)

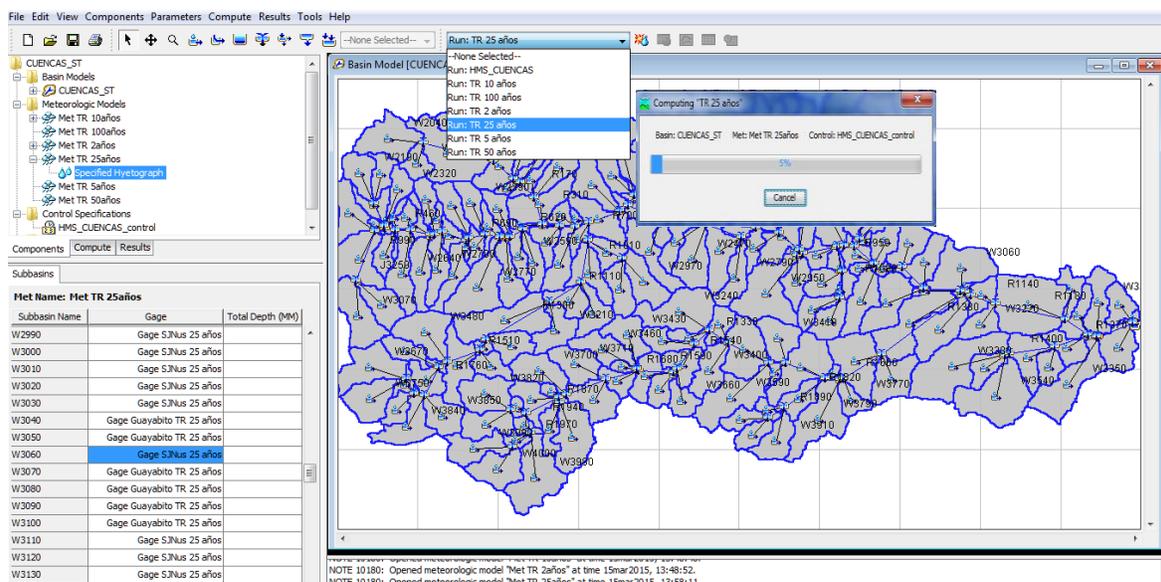
Figura 93 – Creación de Simulaciones – HEC – HMS.



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS 10.2

Para las simulaciones se busca en la barra superior, buscamos la simulación deseada (TR 25 años) y finalmente damos seleccionamos el icono . Si los datos están correctos la simulación terminara exitosamente el proceso de cálculo. (Ver Figura 94)

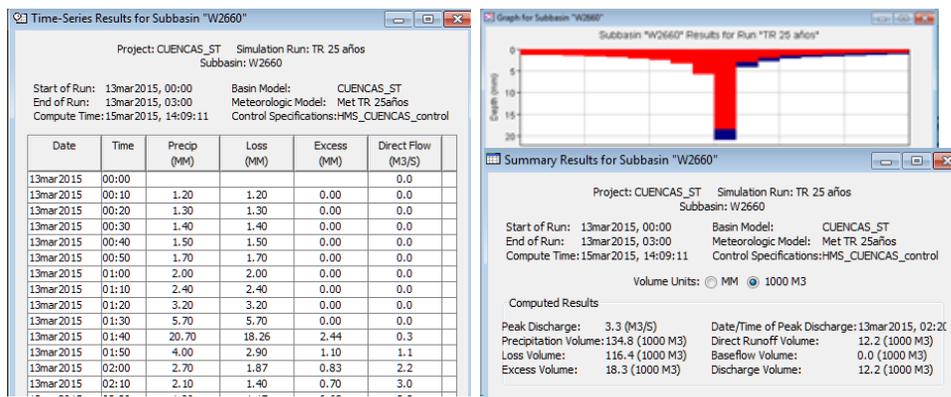
Figura 94 – Corridos de modelo Hidrológico- HEC HMS



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS 10.2

Los resultados se pueden observar seleccionando la cuenca deseada en forma gráfica, tabular o series de flujo, tal como lo muestra la Figura 95.

Figura 95 – Visualización de Resultados – HEC HMS



Fuente: Elaboración Propia – ArcGIS 10.2

Los resultados para los caudales obtenidos se presentan en el **Anexo 3.3** y finalmente la comparación de los caudales de diseño obtenidos se presenta en el **Anexo 3.4**

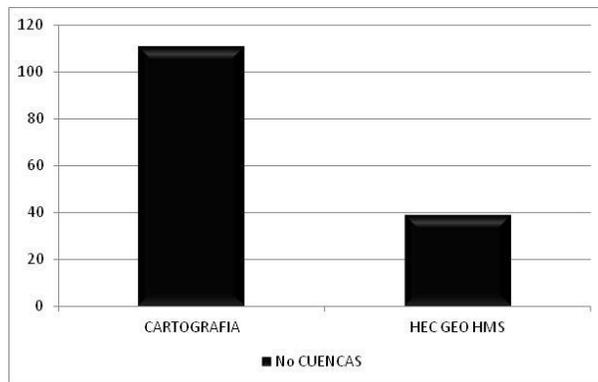
6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos al emplear las metodologías desarrolladas en el manual, se compararon los resultados haciendo énfasis en los parámetros morfométricos y los caudales de diseño, analizando por medio de diferencias porcentuales las variaciones de los resultados obtenidos, estos valores se presentan en el **Anexo 3**.

Con el fin de presentar gráficamente el margen de error de las metodologías empleadas, se analizó la frecuencia del error y se graficó contra el número de cuencas. Es importante mencionar que los errores de valor negativo denotan que los parámetros obtenidos en la metodología tradicional son mayores en comparación a los parámetros resultado del geoprocesamiento del sistema Arc Gis 10.2 .A continuación se presentan los comparativos de margen de error entre las metodologías objeto de estudio para cada uno de los parámetros morfométricos y de los caudales obtenidos.

El sistema de geoprocesamiento del Arc Gis 10.2, delimita el área de las cuencas con la información suministrada a partir de un ASTER DEM, el cual cuenta con información en formato raster con un límite de pixel de 30 m, por el contrario la metodología tradicional cartográfica permite la delimitación de cuencas por el uso de curvas de nivel, a una menor distancia topográfica. En la figura se puede apreciar el número de cuencas obtenidas con las dos metodologías.

Figura 96 – Delimitación Número de Cuencas

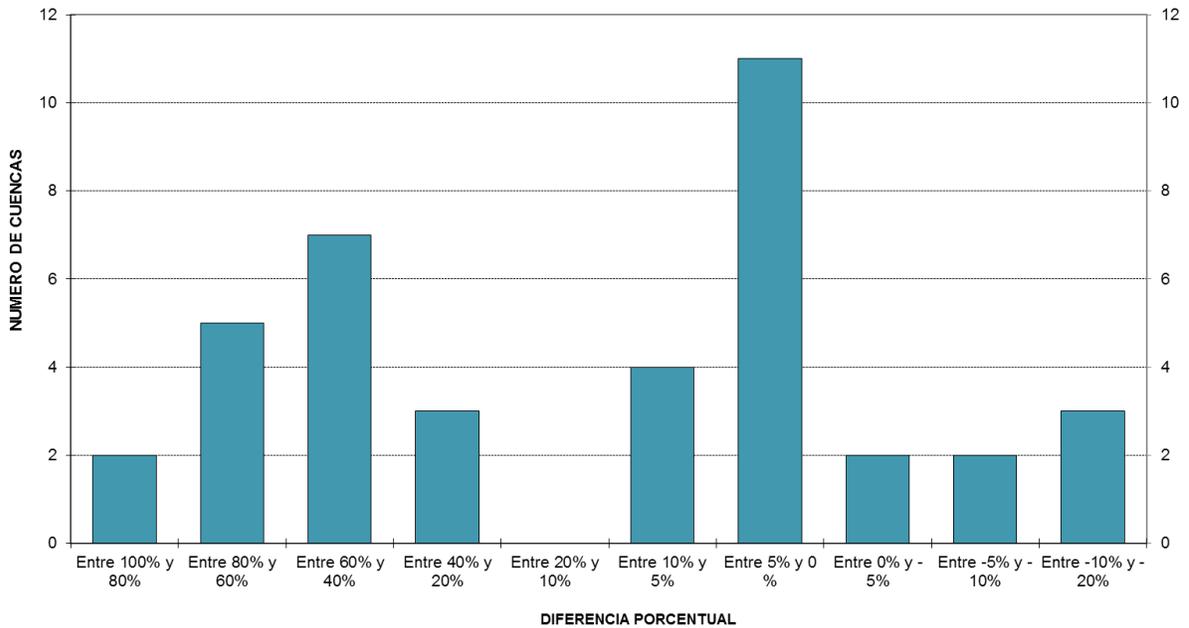


Fuente: Elaboración Propia

Se observa que al realizar la delimitación de cuencas empleando el método tradicional se obtuvieron 111 cuencas con áreas entre 0.01 km² y 64.54 km². Con el uso del sistema de geoprocesamiento del ArcGis 10.2 a partir del suministro de información de ASTER DEM de la NASA, se permitió la

delimitación de 39 cuencas con un área estándar de 2.49 km². En la figura 93 se puede observar la diferencia porcentual de áreas.

Figura 97 – Grafica de Diferencia Porcentual Áreas

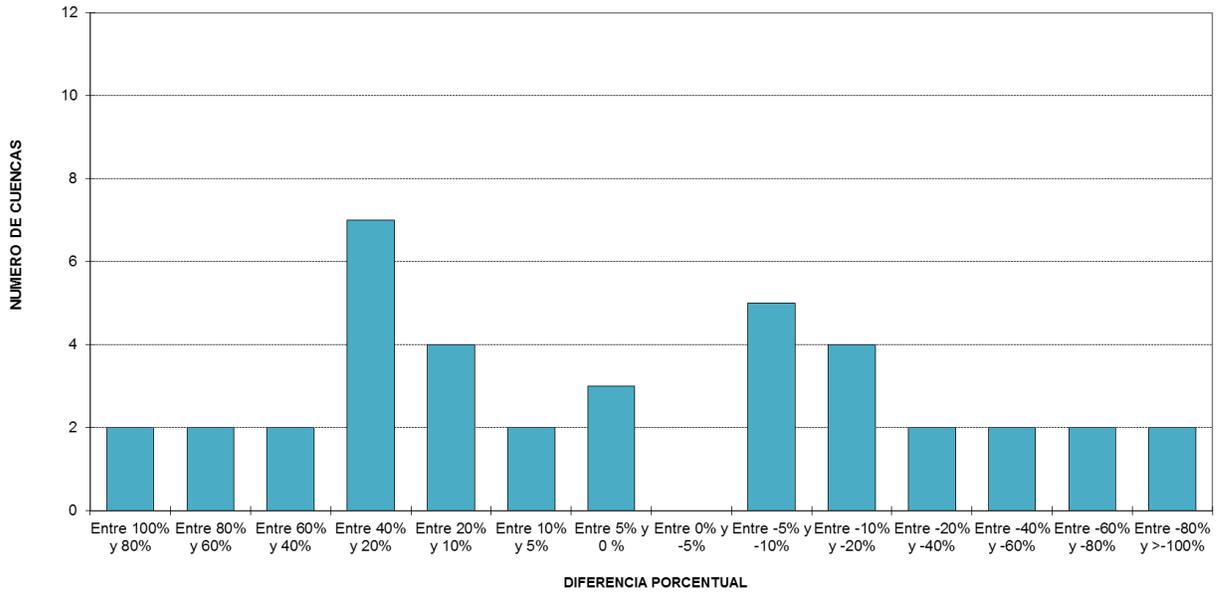


Fuente: Elaboración Propia.

El siguiente parámetro morfométrico que se analizó es el área de las cuencas. En la gráfica se puede observar que de las 39 cuencas que se compararon, 11 cuencas presentaron una diferencia porcentual entre 5% y 0%, 4 cuencas diferencias porcentuales entre el 10% y 5%, 7 cuencas presentan menor valor al ser delimitadas con el ArcGIS que con el AutoCAD hasta una diferencia porcentual del -20%. Se observa que diferencias porcentuales mayores al $|20\%|$, son diferencias significativas que pueden afectar considerablemente los resultados de los caudales de diseño y por ende el dimensionamiento de las obras que se requieran para el adecuado drenaje de una vía en general.

Se consideró importante analizar gráficamente la longitud de los cauces, el cual define el curso de escorrentía. El sistema de geoprocresamiento define el curso del cauce en ocho direcciones posibles, de acuerdo con la información suministrada por el ASTER DEM. Por otro lado con el uso de la cartografía digital se define el cauce según la forma convexa de las curvas de nivel y por la información dada en la misma carta cartográfica, donde la mayoría de los cauces están demarcados. En la siguiente figura se puede apreciar gráficamente la diferencia porcentual para el parámetro de longitud.

Figura 98 – Grafica de Diferencia Porcentual Longitud de Cauces

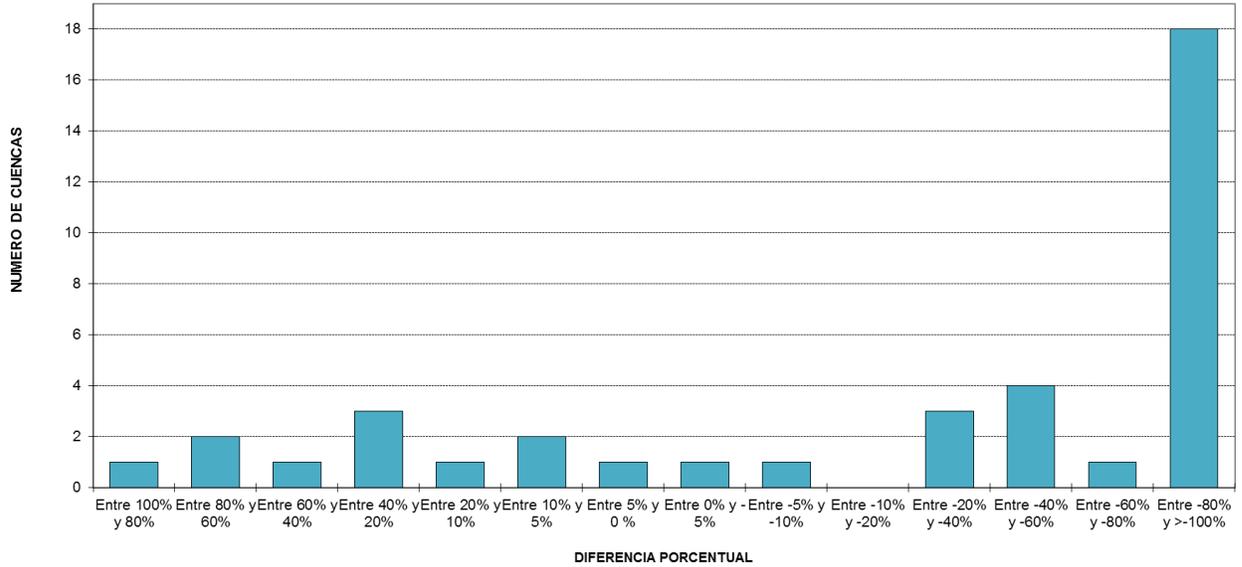


Fuente: Elaboración Propia.

La mayor diferencia porcentual se encuentra entre 40% y 20% con una representación de 7 cuencas, seguido de una diferencia porcentual de -5% y -10% para 5 cuencas respectivamente. Para este parámetro se observó mayor variación en los resultados obtenidos, debido a que en el ArcGIS no se define una única dirección del flujo, ni se demarca el punto exacto de cruce de cauce en la vía la diferencia porcentual entre los resultados es mayor. 25 cuencas presentan diferencias porcentuales al |20%|, las cuales se consideran significativas y pueden derivarse del tamaño de la cuenca.

De la misma manera se analizó la pendiente del cauce, esta define el tiempo de escurrimiento del flujo a lo largo de una cuenca hasta el punto de cruce sobre la vía. La pendiente en el sistema de geoprocésamiento ArcGIS 10.2 está dada por los algoritmos de cálculo a partir de una imagen Raster. Al emplear la cartografía digital se estimó la pendiente por medio del método de Taylor. En la siguiente figura se puede apreciar las diferencias porcentuales de las pendientes obtenidas.

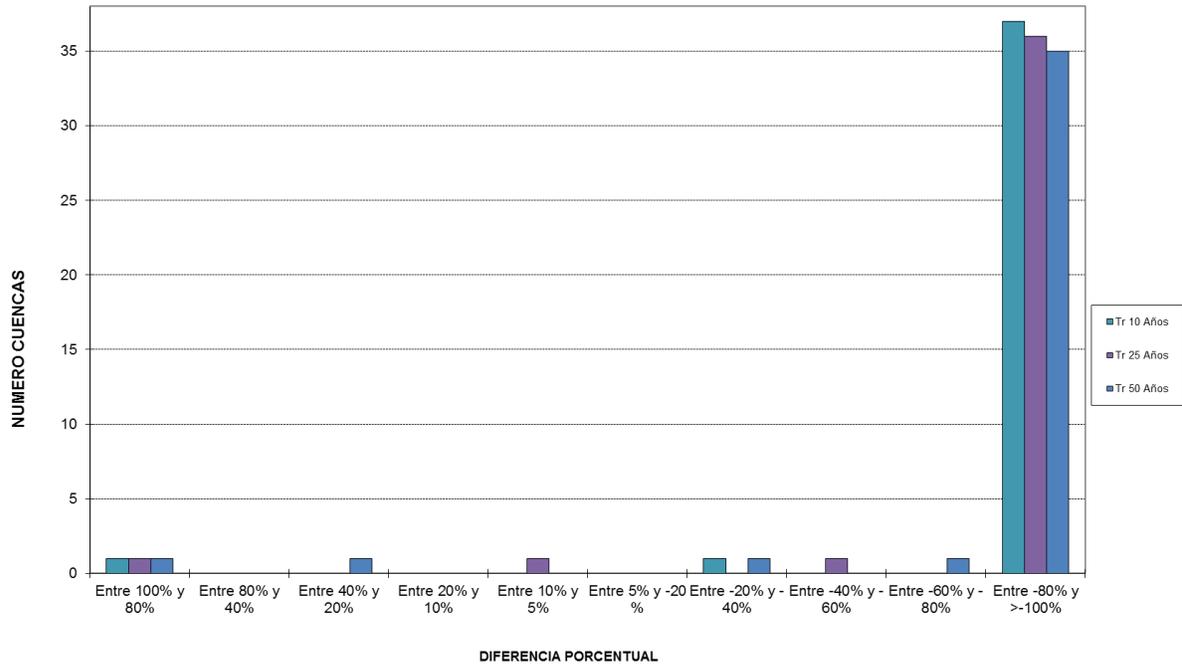
Figura 99 – Grafica de Diferencia Porcentual Pendientes



Fuente: Elaboración Propia.

Para este parámetro se observa el mayor error o diferencia porcentual entre los resultados, la gráfica muestra que 19 cuencas tiene una diferencia porcentual $> |80\%|$, las cuencas restantes, entre 1 y 4 tienen diferencias porcentuales en casi toda la escala. Este parámetro es el que mayor error presenta, ya que depende de la longitud del cauce, en el cual también se presentaron variaciones porcentuales significativas.

Figura 100 – Grafica de Diferencia Porcentual Caudales de Diseño



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente para la obtención de caudales de diseño se observa una diferencia porcentual de más del $|100\%|$, estos resultados son los esperados ya que las diferencias en los parámetros morfométricos son significativas y evidentemente afecta los resultados del análisis de caudales.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

- **Delimitación de Cuencas:** El sistema de geoprocésamiento del software Arc Gis 10.2 permitió la delimitación de 39 cuencas sobre la zona de estudio con un área estándar de 2.49 km², lo cual limita la exactitud en la delimitación hacia el punto de salida específico de escurrimiento sobre la vía en estudio, esto demuestra que el sistema es limitado en cuanto a la manipulación de información para la adecuación de cuencas a las necesidades de un proyecto específico; en contraste con la delimitación cartográfica, donde se obtuvieron 111 cuencas con un abarcamiento de áreas entre 0.01 km² y 64.54 km² hasta los puntos de cruce de cauces sobre la vía, lo cual denota una mayor facilidad para la manipulación de información en el contexto de adecuación de cuencas a las necesidades de un proyecto específico.
- **Obtención de Parámetros Morfométricos:** La obtención de parámetros morfométricos en el sistema de geoprocésamiento del Arc Gis 10.2, parte de la información en formato ASTER DEM con un margen de pixel de 30 m, lo cual da origen a diferencias significativas con respecto a la cartografía digital. Esta condición se presenta por el rango espacial en la digitalización, además de la limitación del usuario para la manipulación de la información del formato Raster que maneja el sistema.
- **Análisis estadístico de datos:** Las diferencias presentadas en el resultado de los dos sistemas informáticos HYFRAN y EXCEL para el ajuste de datos meteorológicos a las distribuciones estadísticas, son producto del grado de inexactitud del sistema EXCEL en la estimación de la variable reducida U, en la distribución Log Pearson III, Z en la distribución Normal y λ en la distribución de Gumbel, ya que se realiza de tablas con tres dígitos de precisión, las tablas se presentan en el **Anexo 5.2**; por su parte el software HYFRAN realiza el cálculo de la variable reducida automáticamente, con un mayor grado de precisión disminuyendo el error dado por la observación de tablas tradicionales.
- **Curvas IDF:** Para la obtención de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia, se emplearon las Curvas IDF que se obtuvieron en el IDEAM, donde se analizan los aguaceros de corta duración más intensos que se hayan presentado. El IDEAM procesa estos datos ajustándolos a una distribución probabilística conocida, calculando los valores de precipitación para periodos de retorno de 2,5, 20, 25, 50 y 100 años. Por otro lado se elaboraron las Curvas IDF mediante el método sintético a partir de una correlación de amplio

uso que tiene en cuenta la Precipitación Máxima en 24 h, el Número promedio de Días de Lluvia al año y la Precipitación Total Anual.

Solo fue posible comparar los resultados en la estación Guayabito, ya que es la única estación que dispone de Curvas IDF en el IDEAM. Se observó que los resultados de intensidad obtenidos al emplear las curvas IDF Sintéticas (Vargas – Rodrigo) son ligeramente mayores. Se considera que este método arroja valores que a criterio de los autores tienen un orden de magnitud que se encuentra dentro el rango de intensidades esperadas para las cuencas analizadas y en general para la zona de estudio. Aunque son ligeramente mayores, están del lado de dar mayor seguridad al análisis de caudales.

En general se recomienda que para las regiones Caribe, Andina y Pacifico sean empleadas las Curvas IDF Sintéticas, ya que la red de estaciones es densa y permite obtener resultados precisos. Para regiones como la Orinoquia y Amazonia no se recomienda el uso de esta metodología y se sugiere que en lo posible se empleen las curvas IDF obtenidas mediante datos históricos de precipitación elaboradas por el IDEAM.

- Para las metodologías tradicionales de obtención de caudales se empleó el método racional para cuencas menores a 2.5 km² y para cuencas mayores se empleó el método de lluvia – escorrentía mediante el uso del Software HEC-HMS con el componente del Método del U.S. Soil Conservation Service, donde se analizaron los siguientes parámetros:

Factor de Reducción: Este factor se emplea en casos donde se cuente con precipitaciones puntuales y depende del área de la cuenca. Se emplearon las expresiones propuestas por Fruhling y “Flood Studies Report, Volume 65”. Al realizar los cálculos se observó que los resultados obtenidos mediante la formulación propuesta por el Flood Studies Report presentan valores mayores a los obtenidos empleando Fruhling. Con base en los resultados, los autores proponen que en zonas donde el suelo presente condiciones áridas o con suelos que sean arenosos y que la cobertura vegetal sea regular, se emplee la formulación propuesta por Flood Studies Report, ya que reduce la lluvia y por lo tanto es acorde a las condiciones del terreno donde se permite que la escorrentía superficial sea drenada más rápidamente. Por otro lado en terrenos limo arcillosos (muy poco permeables) y que presentan bosques, cultivos y/o pastizales se propone usar la formulación propuesta por Fruhling. Para el caso del ejemplo se empleó la formulación propuesta por Fruhling.

Tiempos de Concentración: De las diversas expresiones que se tienen para determinar este tiempo, se realizó el cálculo con la fórmula propuesta por Kirpich (U.S. Bureau of

Reclamation "Design of Small Dams") y la fórmula de Bransby-Williams. Luego de realizar los estimativos, se considera que la fórmula de Kirpich arroja resultados muy conservadores y se considera que los tiempos de concentración son excesivamente cortos. Se recomienda emplear la formulación propuesta por Bransby cuando se realicen estimativos de caudales empleando el método racional o el método de lluvia escorrentía.

- **Caudales de Diseño:** En las dos metodologías se presenta gran diferencia en el número de cuencas analizadas, por esta razón, los caudales obtenidos se evaluaron revisando el rendimiento hídrico de cada cuenca con respecto al área, observando que los resultados de la metodología tradicional están dentro de un rango esperado y acorde a la zona en estudio, a diferencia de los resultados obtenidos mediante el ArcGIS donde se presentan en la mayoría de los casos valores por debajo de lo esperado, se tuvo como referencia los rendimientos hídricos para caudales máximos de cuencas similares que han sido instrumentadas.
- Se considera que aunque las herramientas sistematizadas como el ArcGIS, permiten elaborar modelos para el análisis de caudales más ágilmente y de una manera más práctica, no permiten que la delimitación de cuencas sea precisa ya que se trabaja con un modelo estándar que delimita cuencas dentro de un rango de tamaños y dependiendo de la grilla, no es posible delimitar cuencas de menor tamaño, donde dependiendo del caudal obtenido sería necesario dimensionar obras de menor tamaño para garantizar el adecuado drenaje de cualquier vía que se esté estudiando. Aunque delimitar cuencas empleando la metodología tradicional puede ser más dispendioso, se obtienen resultados más precisos, donde es posible verificar puntualmente la delimitación de cada cuenca, lo cual es el punto de partida para cualquier estudio hidrológico.
- Como resultado final se recomienda que para cualquier estudio, la delimitación de cuencas y el análisis de parámetros morfométricos se realice empleando las metodologías tradicionales, para alguna cuenca puntual que presente gran tamaño (>100 km²) puede realizarse la delimitación mediante el empleo del ArcGIS, pero siempre revisando que los resultados estén dentro de un rango esperado y sean representativos de la zona en estudio.

8. BIBLIOGRAFÍA.

A continuación se relaciona la bibliografía utilizada en desarrollo del manual:

American Iron and Steel Institute. (1983) *Handbook of Steel Drainage and Highway Construction products*. U.S.. Editorial, American Iron and Steel Institute 3 Edition.

Chow V. T, (1959). *Channel Hydraulics*, U.S..Mc Graw Hill.

Chow V. T, (1964). *Handbook of Applied Hydrology*, U.S. Editorial Mc Graw Hill.

Heras, R. (1978). *Hidrología General y Aplicada*. Madrid España.

Hidrology Soil Conservation Service. (1972). U.S. Departament of Agriculture.

Linsley, R. Kohler, M & Paulhus, J. (1988). *Hidrología para ingenieros*, Bogotá D.C... Editorial Mc. Graw Hill Latinoamericana, S.A. 2 Edición.

Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías. *Manual de drenaje para carreteras, 2009*. Recuperado <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>. 4 de Noviembre 2014.

Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*, Bogotá D.C...Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Pieter J, (1982). *Principles of River Engineering*. U.S... Editorial Board.

United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation. (1982). *Diseño de Presas Pequeñas: Una Publicación Técnica de Recursos Hidráulicos*, U.S. Editorial Continental.

Vargas R, (1998). *Curvas sintéticas de Intensidad – Duración – Frecuencia para Colombia, regionalización e implementación de un SIG (Tesis de Maestría)*.Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C.

Watkins, L & Fiddes, D. (1984). *Highway and Urban Hydrology in The Tropics*. U.S. Edition Illustrated, Watkinss Pentech Press.