

**ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN MODELOS
HIDROLÓGICOS USANDO HEC - HMS**

HOLMAN VALCÁRCEL GÓMEZ

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRAULICOS
Y MEDIO AMBIENTE**

Bogotá, D.C.

2016

**ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN MODELOS
HIDROLÓGICOS USANDO HEC - HMS**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

Dr. German Ricardo Santos

Ingeniero Civil

Director

Bogotá, D.C.

2016

Nota de Aceptación

El Trabajo de Grado titulado ***Análisis de incertidumbre en modelos hidrológicos usando HEC - HMS***, presentada por *Holman Yesid Valcárcel Gómez*, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de *Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente*

Dr. German Ricardo Santos

Bogotá, D.C., Enero 2016

A mi esposa Diana

y mi hija Mariana

Agradecimientos

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por esta gran experiencia de crecimiento académico. Al Ingeniero German Santos por su paciencia y apoyo durante este trabajo.

Resumen

El cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos ha dado un paso más en el análisis hidrológico a través de su software de modelación HEC – HMS el cual cuenta ahora con un módulo de análisis de incertidumbre que permite trabajar sobre un modelo hidrológico definido previamente. Trabaja con el modelo Monte Carlo, el cual se basa en la selección de números de manera aleatoria siguiendo una Distribución de Probabilidad.

El análisis hecho en el presente documento es una primera aproximación a la utilización del módulo de incertidumbre del HEC – HMS ya que hasta el momento no se han realizado trabajos en la Escuela Colombiana de Ingeniería referentes al tema, dada su reciente aparición. Para llegar a estos análisis es necesario realizar una serie de pasos que permitan definir un modelo hidrológico lo más cercano posible a la realidad: recopilación y ajuste de información, montaje de un SIG, determinar tormentas de diseño, creación del modelo hidrológico, simulación y análisis de incertidumbre.

Índice general

1. RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	15
1.1 Caracterización de la cuenca	15
1.1.1 Características Hidrográficas.....	16
1.1.2 Características Fisiográficas.....	16
1.2 Información de Precipitación	17
1.3 Completado de datos faltantes.....	18
1.3.1 Ajuste por Razones Promedio	19
2. MONTAJE DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	20
2.1 ArcGis	20
2.1.1 Componentes principales	20
2.2 Información a Utilizar	21
2.2.1 Modelo Digital de Terreno (DEM).....	22
2.3 Ubicación de Estaciones	23
2.4 Mapa Uso de Suelo	24
2.5 Cuenca Río Balsillas.....	25
2.6 Caracterización Morfométrica de la Cuenca.....	32
2.6.1 Área.....	33
2.6.2 Perímetro.....	33
2.6.3 Pendiente media	34
3. MODELO LLUVIA-ESCORRENTÍA UTILIZANDO HEC – HMS	35
3.1 HEC - HMS (Hydrological Modeling System)	35
3.1.1 Conceptualización Proceso Lluvia – Escorrentía.....	36
3.1.2 Aplicaciones Modelo Lluvia - Escorrentía	38

3.1.3 Definición de Parámetros de Entrada.....	39
3.1.4 Número de Curva.....	39
3.1.5 Curvas I-D-F Sintéticas.....	44
3.2 Determinación de la Tormenta de Diseño.....	45
3.2.1 Método del bloque alternativo	45
3.2.2 Tiempo de Concentración.....	46
3.2.3 Modelo para el cálculo de pérdidas.....	49
3.2.4 Modelo de Escorrentía Directa	50
3.3 Modelo HEC - HMS	50
3.3.1 Modelo de la cuenca.....	50
3.3.2 Modelo meteorológico.....	53
3.3.3 Especificaciones de control	53
3.4 Análisis de Incertidumbre	57
3.4.1 Incertidumbre	57
3.4.2 Método de Monte Carlo	58
3.4.3 Descripción modulo Análisis de Incertidumbre	58
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	63
4.1 Simulación para $T_r = 100$ años	63
4.1.1 Unión U_2	63
4.1 Unión U_4.....	64
4.1 Tramo T_6	66
4.2 Sumidero.....	67
4.3 Análisis 1: Parámetro K.....	68
4.3.1 Unión 2	70
4.3.2 Unión 4	70
4.3.3 Tramo 6.....	71

4.3.4 Sumidero	71
4.4 Análisis 2: Parámetro X	72
4.4.1 Unión 2	72
4.4.2 Unión 4	73
4.4.3 Tramo 6	74
4.4.4 Sumidero	74
4.5 Análisis 3: Parámetro CN	75
4.5.1 Unión 2	76
4.5.2 Unión 4	77
4.5.3 Tramo 6	78
4.5.4 Sumidero	78
4.6 Análisis 4: Parámetro Lag Time	79
4.6.1 Unión 2	80
4.6.2 Unión 4	81
4.6.3 Tramo 6	82
4.6.4 Sumidero	82
4.7 Análisis para $X=0.5$	83
4.7.1 Resultados simulación	83
5. CONCLUSIONES.....	86
Bibliografía.....	88

Índice de tablas

Tabla 1.1 Estaciones Utilizadas	17
Tabla 2.1 Longitud de los principales ríos	29
Tabla 2.2 Áreas de las subcuencas definidas	33
Tabla 2.3 Perímetro de las subcuencas definidas	33
Tabla 2.4 Pendiente de las subcuencas definidas	34
Tabla 3.1 Grupos hidrológicos para cada subcuenca	41
Tabla 3.2 Usos de Suelo subcuencas	41
Tabla 3.3 Condición hidrológica de los suelos	42
Tabla 3.4 CN para cada subcuenca	43
Tabla 3.5 Parámetros para el modelo I-D-F	45
Tabla 3.6 Tiempo de concentración.....	49
Tabla 3.7 Parámetro <i>K</i> para cada tramo.....	56
Tabla 4.1 Valores del análisis <i>K</i>	68

Índice de figuras

Figura 1.1 Subcuenca Río Balsillas	15
Figura 1.2 Ubicación Estaciones utilizadas. Fuente: Elaboración propia mediante ArcGis	18
Figura 2.1 Modelo Digital de Terreno base. Fuente: Elaboración propia con ArcGis	23
Figura 2.2 Ubicación de la estaciones a utilizar. Fuente: Elaboración propia con ArcGis .	24
Figura 2.3 Mapa Uso de Suelo. Fuente: CAR	25
Figura 2.4 Delimitación de la Cuenca. Fuente: Elaboración propia con ArcGis	26
Figura 2.5 Direcciones de Flujo	27
Figura 2.6 Flujo Acumulado	28
Figura 2.7 Definición de Cauces	29
Figura 2.8 Isoyetas	30
Figura 2.9 Definición de subcuencas.....	31
Figura 2.10 Asignación a Subcuencas	32
Figura 3.1 Interfaz HEC-HMS	36
Figura 3.2 Conceptualización proceso lluvia – escorrentía. Fuente: Adaptado de (Chow, Hidrología Aplicada, 1994).....	37
Figura 3.3 Hietograma de entrada. Fuente: Elaboración propia	38
Figura 3.4 Hidrograma de Salida. Fuente: Elaboración propia	38
Figura 3.5 Uso por subcuenca	43
Figura 3.6 Hietograma por Bloque Alterno. Fuente: Elaboración propia usando Excel	46
Figura 3.7 Definición de la Cuenca en HMS. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 3.8 Definición de la subcuencas en HMS. Fuente: Elaboración propia con HMS...	52
Figura 3.9 Definición de los cauces. Fuente: Elaboración propia con HMS	52
Figura 3.10 Modelo hidrológico. Fuente: Elaboración propia con HMS.....	53
Figura 3.11 Asignación de parámetros – Método Muskingum.....	57
Figura 3.12 Creación rutina de Incertidumbre. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 3.13 Inclusión de la cuenca en la rutina de Incertidumbre.....	59
Figura 3.14 Selección del modelo hidrológico	60
Figura 3.15 Definición de análisis de Incertidumbre.....	61
Figura 3.16 Selección de resultados deseados	62
Figura 4.1 Hidrograma en la unión U_2.....	64
Figura 4.2 Resumen resultados unión 2	64

Figura 4.3 Hidrograma de salida en la unión U_4. Fuente: Resultado HMS.....	65
Figura 4.4 Resumen Resultado U_4. Fuente: Resultados HMS.....	65
Figura 4.5 Hidrograma a la salida de la cuenca. Fuente: Resultados HMS	66
Figura 4.6 Resumen resultados T_6. Fuente: Resultados HMS.....	67
Figura 4.7 Hidrograma de salida para el sumidero	67
Figura 4.8 Resumen resultados Sumidero	68
Figura 4.9 Valores de análisis K Tramo 1.....	69
Figura 4.10 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis K.....	70
Figura 4.11 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis K.....	70
Figura 4.12 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis K	71
Figura 4.13 Resultados Incertidumbre Sumidero, Análisis K.....	71
Figura 4.14 Valores de X para el análisis	72
Figura 4.15 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis X.....	73
Figura 4.16 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis X.....	73
Figura 4.17 Resultados Incertidumbre Tramo 6, Análisis X.....	74
Figura 4.18 Resultados Incertidumbre Sumidero, Análisis X.....	75
Figura 4.19 Número de curva utilizado para la subcuenca 1	76
Figura 4.20 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis CN	77
Figura 4.21 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis CN	77
Figura 4.22 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis CN	78
Figura 4.23 Resultados Incertidumbre Sumidero, Análisis CN	79
Figura 4.24 Valores e análisis Lag Time.....	80
Figura 4.25 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis <i>Lag Time</i>	81
Figura 4.26 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis <i>Lag Time</i>	81
Figura 4.27 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis <i>Lag Time</i>	82
Figura 4.28 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis <i>Lag Time</i>	82
Figura 4.29 Simulación U_2 con $X=0.5$	83
Figura 4.30 Simulación U_2 con $X=0.5$	84
Figura 4.31 Simulación U_2 con $X=0.5$	84
Figura 4.32 Simulación U_2 con $X=0.5$	85

Introducción

En el presente trabajo se realiza un análisis de incertidumbre sobre la cuenca del Río Balsillas determinando una tormenta de diseño a partir de registros de precipitación en la estaciones de la zona.

Se sabe que los modelos hidrológicos rara vez son capaces de simular perfectamente la respuesta de la cuenca. La diferencia entre la respuesta simulada y la respuesta observada real se denomina incertidumbre y puede oscilar desde muy pequeño a excesivamente grande.

En su última versión el HEC - HMS (*Hydrologic Modeling System*) ha incluido un módulo de análisis de incertidumbre (*Uncertainty Analysis*) que permite a partir de un modelo hidrológico evaluar la respuesta de una cuenca ante pequeños cambios en los parámetros de un modelo en particular. Es posible calcular un evento con determinado periodo de retorno o algún evento en particular observado para ser evaluado, sin embargo en la mayoría de los casos no se cuenta con información detallada.

La evaluación de incertidumbre determina el error total en la simulación de la cuenca con relación a algún parámetro de salida, por ejemplo el caudal pico. La incertidumbre se debe generalmente a una combinación de factores que incluyen datos meteorológicos erróneos, mala interpretación de las observaciones, inadecuada implementación de modelos matemáticos, entre otros.

Una evaluación cuantitativa de la incertidumbre del modelo es un componente clave para determinar la fiabilidad de las predicciones del modelo y crítica a la utilización de las predicciones con las metodologías de ingeniería basados en el riesgo.

Se debe hacer la representación gráfica de un modelo hidrológico de la cuenca de estudio. Para esto se utilizan diferentes herramientas informáticas que facilitan en manejo de la información, simplifican los cálculos y últimamente se presentan muy cómodos y versátiles. En general un modelo hidrológico busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca.

Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la unidad hidrológica bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas.

Se hace énfasis en el uso de un SIG (*Sistema de Información Geográfica*) con el fin de mostrar las ventajas que tiene en la gestión, planeación y prevención aplicado a los recursos hidráulicos.

La modelación hidrológica tiene un trasfondo teórico importante, ya sea teórica o experimental; sin embargo la mayoría de los modelos hidrológicos han sido determinados y evaluados a partir de observaciones realizadas, en algunos casos son aplicados en lugares diferentes en los que fueron construidos con buenos resultados. Lo importante es conocer y entender la aplicación de dichos modelos en un sistema, de esta manera se pueden detectar errores y posibles mejoras.

1. RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

La recopilación de información es el primer paso y sumamente importante para realizar cualquier análisis en el campo de la hidrología. Lamentablemente la recopilación de dicha información es muy complicada ya que se trata de conocer el comportamiento del régimen hidrológico en una zona determinada. Normalmente se realiza un proceso de análisis, ajuste y completado de datos basados en procesos estadísticos para obtener una serie de datos confiable.

En Colombia la fuente más importante de información hidrológica es el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Es en encargado de administrar, recopilar, almacenar y distribuir datos meteorológicos en todo el país, así como la implementación de nuevas estaciones en la zona que sea requerido. La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR tiene jurisdicción en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, también es una fuente importante de información en la zona.

1.1 Caracterización de la cuenca

La ubicación de la cuenca del Río Balsillas se muestra en la Figura 1.1 además de las cabeceras municipales y la de Bogotá D.C.



Figura 1.1 Subcuenca Río Balsillas

1.1.1 Características Hidrográficas

Hacen referencia a los parámetros hidrológicos calculados o determinados para una zona en estudio. A continuación se presentan los más relevantes y que serán utilizados posteriormente en el análisis.

- Histograma de precipitación media mensual a nivel multianual
- Histograma de precipitación máxima en 24 horas mensual a nivel multianual
- Histograma de caudales medios mensuales a nivel multianual

1.1.2 Características Fisiográficas

A continuación se presentan las características consideradas más importantes de las 22 presentadas por (Jenning, 1982), citado por (Chow, Hidrología Aplicada, 1994)}.

- Área total de drenaje
- Pendiente promedio de la cuenca, determinada promediando las pendientes del terreno en 50 o más puntos igualmente espaciados.
- Pendiente de la conducción principal, medida en puntos localizados al 10% y 85%
- Grupo hidrológico del suelo (A, B, C o D) de acuerdo con la metodología del *Soil Conservation Service*
- Uso del suelo
- Forma de la cuenca
 - Coeficiente de compacidad K_s
 - Factor de Forma
- Sistema de drenaje
 - Orden de las corrientes de agua
 - Densidad de drenaje
 - Extensión media de la escorrentía superficial

1.2 Información de Precipitación

Los registros de precipitación fueron obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. La Tabla 1.1 muestra las estaciones utilizadas con registros totales mensuales de precipitación para el desarrollo del trabajo.

Tabla 1.1 Estaciones Utilizadas

Cod. Estación	Nombre	Tipo	Clase	Categoría	No. De Años con Datos
2120596	Tachi	Con	Met	ME	20
2120107	El Corazón	Con	Met	PM	40
2120127	El Tibar	Con	Met	PM	22
2120155	El Roble	Con	Met	PM	29
2120594	Villa Inés	Con	Met	CO	19
2120577	Base Aérea Madrid	Con	Met	CO	33
2120606	Casablanca	Con	Met	ME	23
2120069	Vertientes Tesoro	Con	Met	PM	25
2120173	Campobello	Con	Met	PM	30
2120174	Manjui	Con	Met	PM	35
2120075	Bojacá	Con	Met	PM	36
2120631	Tisquesusa	Con	Met	CP	33

Fuente: Recopilación IDEAM y CAR

En la zona existen más estaciones con registros de precipitación, pero se han descartado porque no tiene una serie de datos mayores a 10 años o la serie existente tiene muchos datos incompletos y no se considera significativa. Se han seleccionado las relacionadas anteriormente ya que tienen serie histórica de datos superior a 15 años y que para el objetivo del presente estudio son suficientes.

Para el caso de la estación Base Aérea Madrid [Cod. 2120577] fue necesario utilizar dos estaciones que no se encontraban muy cerca para completar los datos del año 79 pero que si tenían registros desde el mismo o años anteriores.

La Figura 1.2 muestra la distribución espacial de las estaciones dentro de la cuenca. La estación con código 2120173 es tenida en cuenta para el proceso de llenado de registros faltantes, mas no para la implementación del modelo Lluvia-Escorrentía ya que se encuentra fuera de la línea divisoria de la cuenca.

En total se tienen 4108 registros de precipitaciones mensuales y se realizó el ajuste de 206 datos en todas las estaciones. En el Anexo se muestra la serie de datos para las estaciones utilizadas y se ha resaltado en color verde los datos que han sido reemplazados.

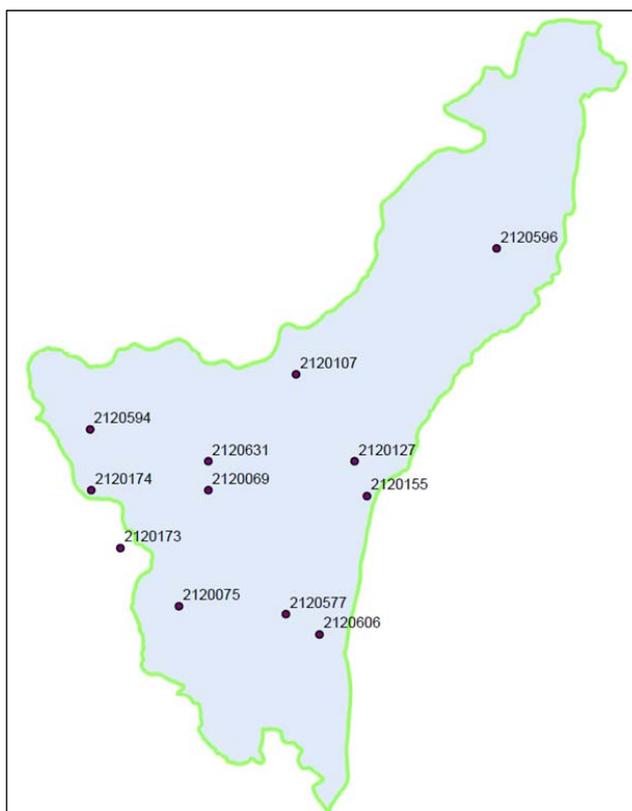


Figura 1.2 Ubicación Estaciones utilizadas. Fuente: Elaboración propia mediante ArcGis

1.3 Completado de datos faltantes

En la estimación de la precipitación, cuando hay carencia de datos, existen diversos métodos que van desde avanzadas tecnologías como el uso de satélites, programas estadísticos y modelaciones hidrológicas (Smith, 1997), que por su elevado costo, no son de masiva utilización, hasta los métodos tradicionales, que son más factibles de utilizar. Estos últimos, se basan en fórmulas matemáticas simples, en donde se establecen relaciones entre estaciones patrones o cercanas (con datos completos) y la estación con carencia de información pluviométrica.

El llenado de registros faltantes en una serie histórica de precipitación debe realizarse teniendo en cuenta las estaciones cercanas en la zona algunos métodos tienen en cuenta la distancia hasta la estación testigo. Para el presente trabajo se utiliza la metodología descrita por (Pizarro, 2009).

1.3.1 Ajuste por Razones Promedio

Se define por la siguiente base conceptual. Si en una zona cualquiera, la precipitación normal de la estación X, difiere en más de un 10% con alguna de las estaciones vecinas, entonces es posible aplicar la ecuación (Pizarro, 2009), (UNESCO, 1982)

$$P_x = \frac{\bar{P}_x}{n} * \left(\frac{P_A}{P_A} + \frac{P_B}{P_B} + \dots + \frac{P_N}{P_N} \right)$$

Dónde:

P_x : Registro de precipitación faltante

\bar{P}_x : Promedio mensual a nivel multianual de la estación en estudio

Lo que se busca al aplicar este método, es realizar una estimación para la estación faltante en función de las relaciones entre las precipitaciones de un período en estudio y las precipitaciones medias mensuales de una serie multianual.

Las estaciones que se tienen en cuenta para el llenado de registros faltantes corresponden a las 4 estaciones más cercanas a la estación en estudio. Verificando que tengan datos del mismo mes y con un periodo de registros similar.

La primera estación analizada es *El Corazón [Cod. 2120107]*, por tratarse de la estación con menos datos faltantes y con la serie de tiempo más larga. En este caso se utilizaron las estaciones: [2120631], [2120127], [2120594] y [2120596] para realizar los respectivos análisis.

2. MONTAJE DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La utilización de Sistemas Información Geográfica (*SIG*) en la gestión de los recursos hídricos se ha incrementado en los últimos años. Esto se debe a la versatilidad y ventajas que se tienen al implementar estos sistemas en proyectos de aprovechamiento, utilización y prevención, con diferentes usos. Desde consumo humano hasta diseño de embalses.

Implementar un SIG en cualquier proyecto en el área de recursos hidráulicos resulta muy conveniente si lo que se necesita es hacer manejo de cantidades importantes de información.

2.1 ArcGis

Es un sistema de información geográfica, el cual posee una interface gráfica de usuario, de manejo sencillo con el ratón, posibilita cargar con facilidad datos espaciales y tabulares para ser mostrados en forma de mapas, tablas y gráficos, también provee las herramientas necesarias para consultar y analizar los datos y presentar los resultados como mapas con calidad de presentación. Algunos ejemplos de lo que se puede obtener es cartografía temática, creación y edición de datos, análisis espacial, geocodificación de direcciones, etc. ArcGis se compone de tres aplicaciones que están incluidas en ArcInfo, ArcEditor y ArcView, las cuales son ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, (Puerta, 2011)

2.1.1 Componentes principales

ArcMap

Es el software que se utiliza para construir un sistema de información geográfico (*SIG*), consta de un conjunto de aplicaciones con las cuales se pueden crear datos, mapas, modelos y aplicaciones. Es el punto de partida y la base para la implementación de SIG.

ArcMap, es la aplicación central utilizada en ArcGis. ArcMap es el lugar donde visualiza y explora los dataset SIG de su área de estudio, donde asigna símbolos y donde crea los diseños de mapa para imprimir o publicar. Es también la aplicación que utiliza para crear y editar los dataset.

ArcToolbox

Permite convertir los datos espaciales de un formato a otro, así como introducir un sistema de referencia o cambiar proyecciones de los datos. Las herramientas se encuentran organizadas temáticamente y mediante el empleo de intuitivos asistentes, permiten realizar dichas funciones de forma sencilla e inmediata; su poder radica en funciones para análisis espacial, (Orduña, 2007).

ArcCatalog

Permite manipular y acceder la información geográfica de un modo fácil. Se puede agregar las conexiones de la información geográfica con que se está trabajando al Catálogo; también, se pueden conectar los fólder con los discos locales y compartir fólderes y bases de datos que están disponibles en la red de trabajo. Después de construir el Catálogo, es posible observar diferentes vistas para ver las fuentes de información geográfica que están disponibles con su respectiva conexión y explorar los contenidos individuales de las fuentes de datos. Es permisible explorar toda la información del mismo modo en que fue guardada. Además, el programa posee herramientas para organizar y darle mantenimiento a la información. Los datos son presentados en una estructura de árbol y a la derecha de la pantalla se pueden observar los archivos espaciales en miniatura, por ejemplo se pueden previsualizar las capas de forma ampliada y obtener los datos relativos al origen y contenidos de ese archivo, (Orduña, 2007).

2.2 Información a Utilizar

Para desarrollar cualquier trabajo con ArcGis es necesario contar con información confiable y de calidad

Para realizar el respectivo análisis con ArcGis es necesaria información suficiente que permita hacer una buena aproximación a la realidad. Para esto se ha utilizado información previamente descargada desde el repositorio de la Nasa que permite descargar modelos

digitales de terreno de cualquier parte del mundo. Dichos modelos son utilizados para los análisis hidrológicos posteriores.

2.2.1 Modelo Digital de Terreno (DEM)

Un Modelo Digital de Terreno o DEM (*Digital Elevation Model*) es un archivo tipo Raster. Estos archivos son una nube de puntos y cada uno contiene información específica, en este caso el DEM contiene información de ubicación (coordenadas proyectadas x y y) y de altura (z)

El *DEM* utilizado para el presente trabajo fue descargado desde un repositorio habilitado por la Nasa¹.

El *DEM* utilizado tiene una resolución de 30x30 cada pixel, es decir, la unidad mínima de muestreo es de 30x30 metros lo cual es bueno para este estudio y para los objetivos propuestos no es necesario tener más detalle.

Inicialmente se debe realizar el ajuste del *DEM* para eliminar depresiones que puedan generar errores en análisis posteriores. La herramienta utilizada fue *Fill Sinks* en el módulo Arc Hydro Tools/Preprocessing/DEM Manipulation.

¹ Es necesario hacer transformación a coordenadas, Magna Colombia Bogotá. Es necesario crear una cuenta y hacer una solicitud en la página <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb> para descargar este tipo de archivos compatibles con cualquier SIG. No se darán detalles acerca del proceso de solicitud y descarga

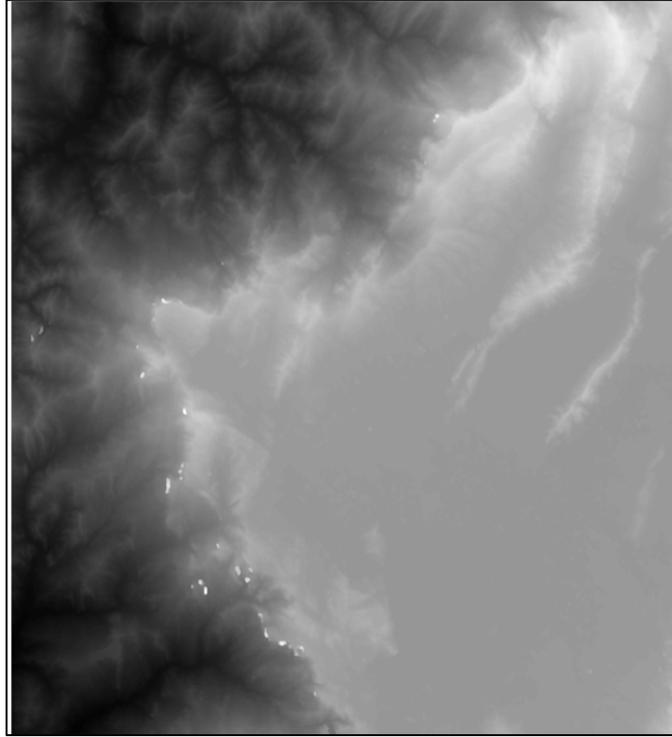


Figura 2.1 Modelo Digital de Terreno base. Fuente: Elaboración propia con ArcGis

2.3 Ubicación de Estaciones

Con la información disponible de las estaciones se puede generar un archivo tipo *Shape* que muestra la ubicación espacial de las estaciones, información que se utilizará más adelante.

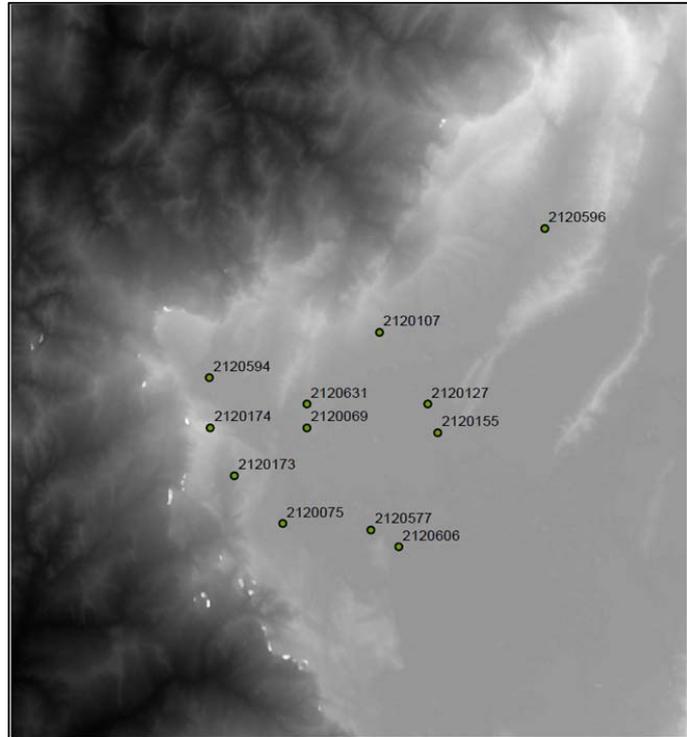


Figura 2.2 Ubicación de la estaciones a utilizar. Fuente: Elaboración propia con ArcGis

La información de la ubicación, nombres y datos fue adquirida a través del IDEAM la cual puede ser adquirida de forma gratuita de dos maneras. Creando una cuenta en la página oficial o de manera física en medio magnético en las instalaciones de IDEAM.

La Figura 2.2 Ubicación de la estaciones a utilizar. Fuente: Elaboración propia con ArcGis muestra la ubicación de las estaciones dentro de la cuenca.

2.4 Mapa Uso de Suelo

La información del uso de suelo fue adquirida a través del corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Existen zonas de conservación y protección ambiental. Esta información será necesaria para hacer la clasificación de los usos de suelo y posteriormente para determinar el número de curva.

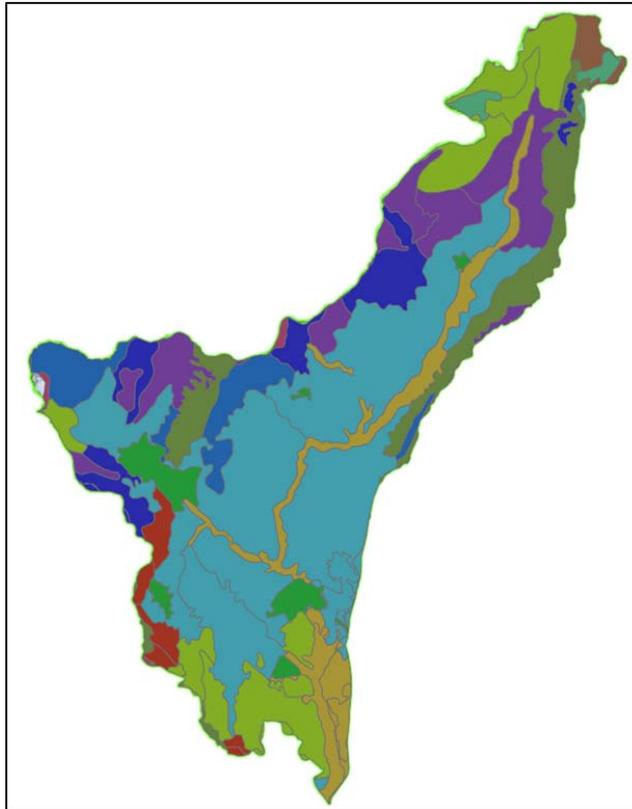


Figura 2.3 Mapa Uso de Suelo. Fuente: CAR

2.5 Cuenca Río Balsillas

Haciendo uso de las herramientas disponibles en ArcGis se procede a realizar la delimitación de la cuenca definiendo las direcciones de flujo y el flujo acumulado.

Existe una extensión para ArcGis desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos llamada HEC - GeoHMS de uso libre y de fácil instalación. Por otro lado existe un módulo incluido en el ArcGis llamado Arc Hydro Tools. Estas dos herramientas son de gran utilidad al momento de realizar cualquier análisis hidrológico. Para el presente trabajo se utilizaron algunas herramientas del módulo Arc Hydro Tools, aunque en su mayoría se utilizó la sección de hidrología incluida en el ArcToolbox.

Teniendo como base el Modelo Digital de Terreno se procede a realizar la delimitación de la cuenca teniendo un punto de referencia, en este caso el punto en el que el Río Balsillas desemboca en el Río Bogotá. Con dicho punto y con el flujo acumulado se puede delimitar cualquier cuenca tomando como el punto más bajo el especificado.

La Figura 2.4 muestra el punto de referencia para delimitar la cuenca y la cuenca delimitada sobrepuesta en el *DEM*

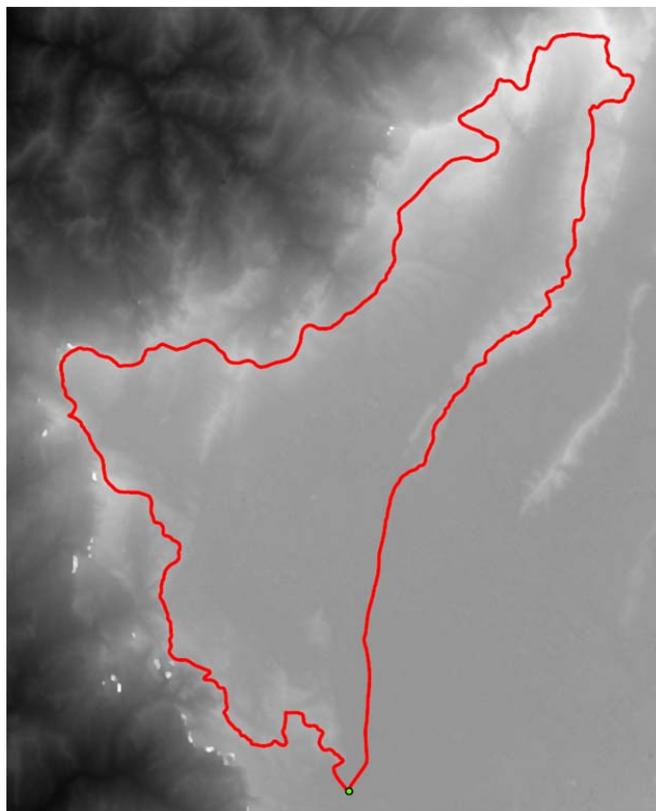


Figura 2.4 Delimitación de la Cuenca. Fuente: Elaboración propia con ArcGis

Teniendo como base el Modelo Digital de Terreno, se puede realizar diferentes estudios sobre la cuenca, apoyados en un Sistema de Información Geográfica. La Figura 2.5 muestra las direcciones de flujo establecidas para la cuenca. Se realizó con la herramienta *Flow Direction* disponible en el ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Hydrology

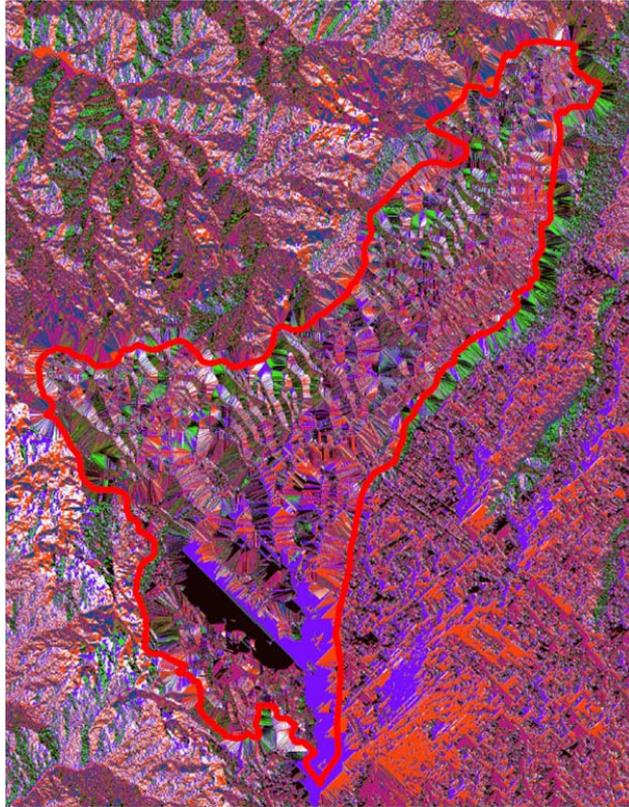


Figura 2.5 Direcciones de Flujo

Luego de tener las direcciones de flujo se procede a determinar el flujo acumulado, se muestra en la Figura 2.6. Se realizó con la herramienta *Flow Accumulation* disponible en el ArcToolBox/Spatial Analyst Tools/Hydrology

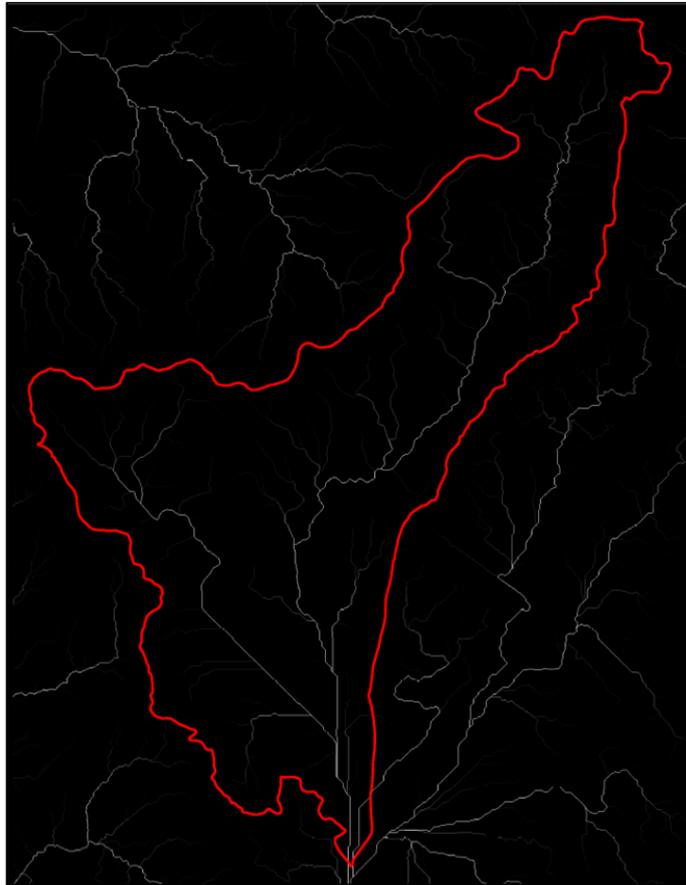


Figura 2.6 Flujo Acumulado

Las direcciones de flujo y el flujo acumulado son suministro suficiente para realizar la delimitación de los cauces y se muestran en la Figura 2.7. Se realizó con la herramienta *Stream definition* disponible en el Acr Hydro Tools/Terrain Preprocessing.

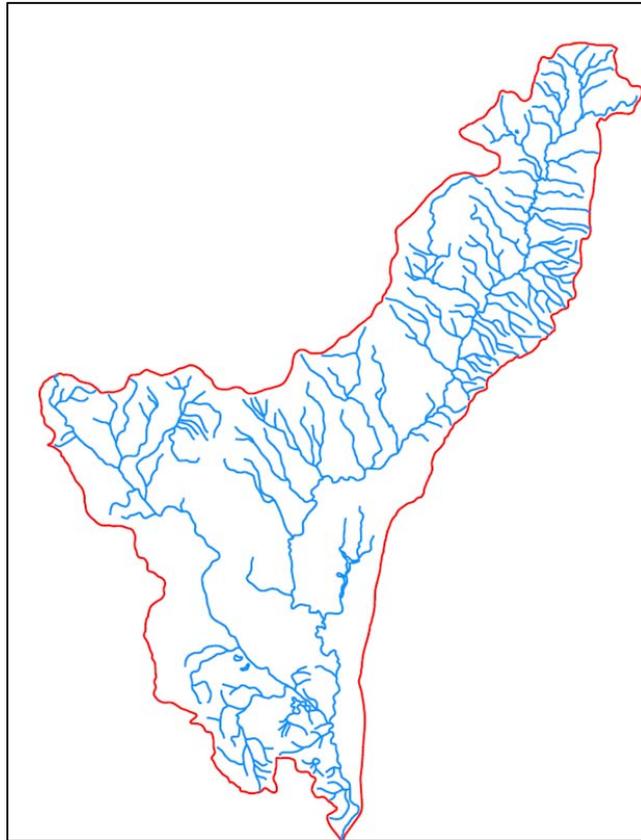


Figura 2.7 Definición de Cauces

Comparando con la información suministrada por la CAR se encuentra que los cauces definidos concuerdan con dicha información, a pesar de que es susceptible de errores, los cauces se encuentran guardados en un archivo tipo *shape* y puede ser editado para eliminar inconsistencias.

Los ríos que se encuentran en la zona se relacionan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Longitud de los principales ríos

Cauce	Longitud
Río Balsillas	12,65
Río Subachoque	45,47
Río Bojacá	29,88
Río Los Andes	10,9
Río Botello	4,0
Río Pava	5,97

Fuente: Elaboración propia

Existe además una cantidad importante de Quebradas que son afluentes a estos ríos entre las que podemos mencionar: Q. La Chorrera, Q. El Cerezo, Q. El Cajón, Q. del Molina, Q. Santa Bárbara, Q. San Joaquín, Q. Los Curubitos y Q. El Soche

Teniendo en cuenta la distribución espacial de la lluvia, se determinan las subcuencas para el estudio, Figura 2.9.

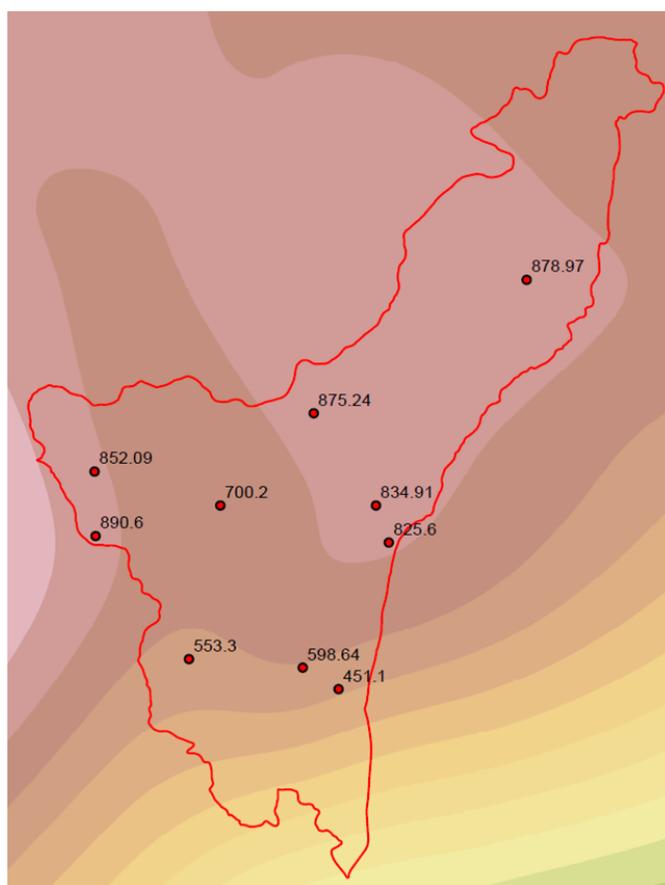


Figura 2.8 Isoyetas

Con la ayuda de ArcGis se genera una superficie teniendo en cuenta los puntos de las estaciones y tomando como referencia la precipitación media anual de una serie multianual mayor a 15 años de registros.

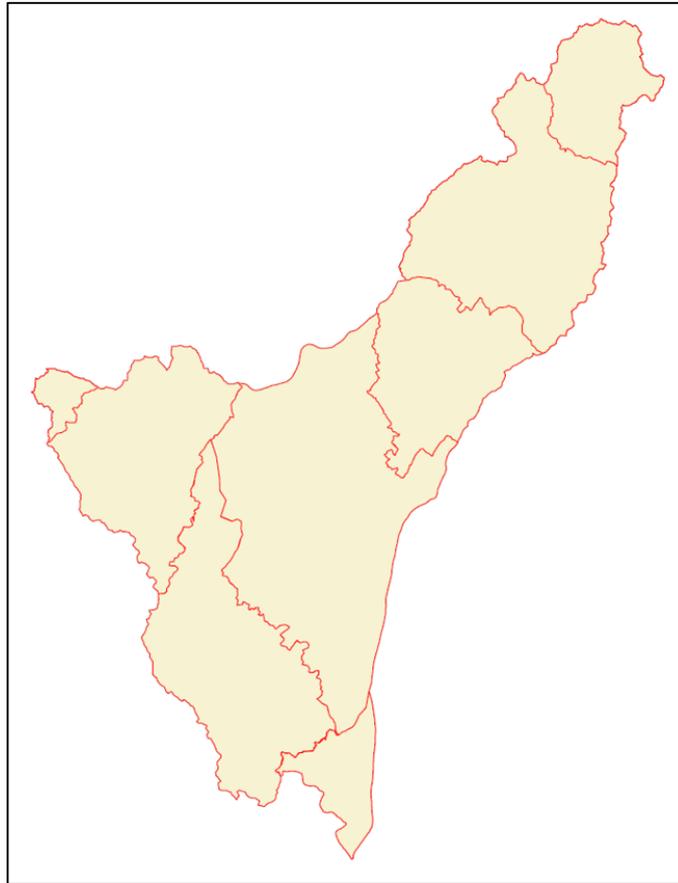


Figura 2.9 Definición de subcuencas

A cada una de estas subcuencas se le ha asignado un número como forma de identificarlas, necesarios para establecer el modelo meteorológico, Figura 2.10.

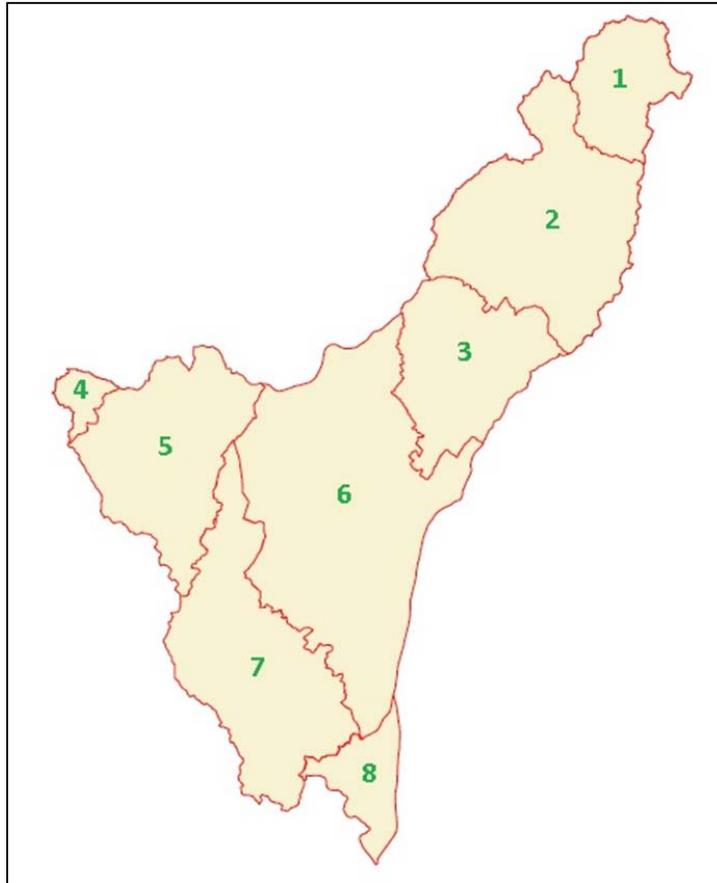


Figura 2.10 Asignación a Subcuencas

2.6 Caracterización Morfométrica de la Cuenca

La caracterización morfométrica de la cuenca se hace con el fin conocer y apreciar de forma más clara la distribución y la variación de los diferentes parámetros que se puedan medir. Los parámetros más importantes son: Área, Perímetro, Pendiente media.

Con la ayuda del SIG se pueden obtener los siguientes parámetros de la cuenca:

2.6.1 Área

El área se define como el área plana (proyección) de la cuenca o sub cuencas de estudio. La Tabla 2.2 muestra la relación de las áreas para cada una de las subcuencas definidas, estos datos serán de gran utilidad al definir el modelo hidrológico.

Tabla 2.2 Áreas de las subcuencas definidas

Subcuenca	Área (km^2)
1	38,56
2	114,37
3	68,68
4	8,00
5	86,53
6	183,28
7	106,28
8	24,49

Fuente: Elaboración propia

2.6.2 Perímetro

El perímetro de la cuenca es utilizado para describir la forma de la cuenca. La Tabla 2.3 muestra los perímetros de las subcuencas definidas.

Tabla 2.3 Perímetro de las subcuencas definidas

Subcuenca	Perímetro (km)
1	30,62
2	60,31
3	36,89
4	15,38
5	60,62
6	86,37
7	71,81
8	30,2
Cuenca	165,82

Fuente: Elaboración propia

2.6.3 Pendiente media

Se tiene en cuenta el punto más alto, el más bajo y la longitud del cauce principal de la subcuenca. Es muy complicado conocer y describir el comportamiento de la pendiente dentro de toda la cuenca, por esto se habla de la pendiente media.

Tabla 2.4 Pendiente de las subcuencas definidas

Subcuenca	Pendiente media (<i>m/m</i>)
1	0.073
2	0.007
3	0.002
4	0.068
5	0.01
6	0.0015
7	0.0016
8	0.0007

3. MODELO LLUVIA-ESCORRENTÍA UTILIZANDO HEC – HMS

3.1 HEC - HMS (Hydrological Modeling System)

Para hacer la implementación de modelo lluvia escorrentía se utiliza la versión 4.1 del software de uso libre HEC - HMS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Es utilizado ampliamente desde los años 90 por entidades estatales y firmas consultoras en el tema de manejo, gestión, aprovechamiento y conservación del recurso hídrico con resultados muy buenos que han sido base para realizar diseño, manejo y control de obras hidráulicas.

El Software HEC - HMS fue diseñado para ser aplicado en un amplio rango de regiones geográficas para solucionar innumerables problemas. Puede ser utilizado en pequeñas cuencas urbanas, o en grandes cuencas sin intervención, los resultados se pueden aplicar para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervenciones en cuencas, reducción del daño por inundaciones, operación de sistemas, etc.

La interfaz gráfica del programa consta básicamente de:

Explorador

Ubicado en la parte superior izquierda, aquí se encuentran todos los componentes definidos en el modelo. Así como las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos.

Editor de Componentes

Ubicado en la parte inferior izquierda, una vez seleccionada un elemento en el explorador, se muestran las características de dicho elemento tanto las que son editables como las que no.

Escritorio

Es la parte visual del programa, al seleccionar una cuenca en el explorador se muestra en el escritorio. Se muestran también los resultados obtenidos.

Mensajes de Registro

Los mensajes de error son mostrados en esta ventana, así como los mensajes de confirmación a los cambios realizados.

La Figura 3.1 muestra la interfaz gráfica del programa, no se darán detalles de su uso y configuración.

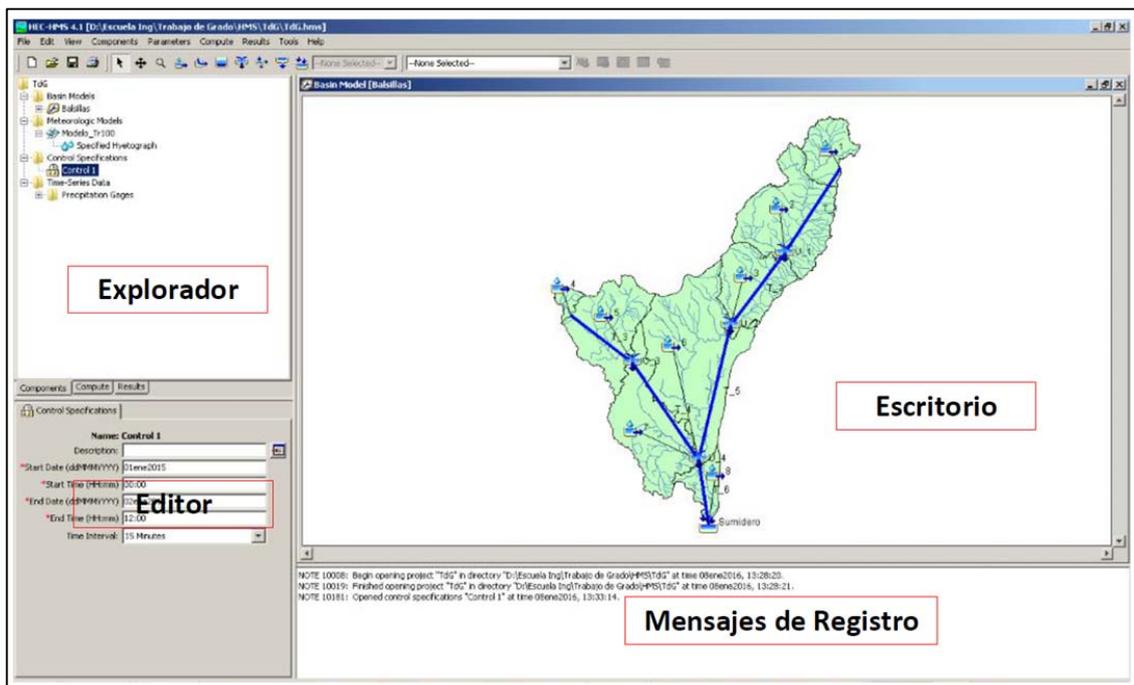


Figura 3.1 Interfaz HEC-HMS

3.1.1 Conceptualización Proceso Lluvia – Escorrentía

Conceptualmente el Proceso Lluvia - Escorrentía se encuentra incluido en el ciclo hidrológico. La Figura 3.2 muestra un esquema del proceso. El cual comienza con el proceso de precipitación y termina con una descarga final.

Desde la entrada (precipitación) hasta la salida (descarga) el proceso puede verse afectado por condiciones naturales, por lo tanto la respuesta de las cuencas son diferentes y puede verse reflejado en el tiempo al pico, caudal pico y volumen drenado.

Si no se cuenta con una estación hidrométrica que permita conocer el caudal en cierto punto de la cuenca, es posible hacerlo a través de modelos matemáticos determinados en su mayoría de forma experimental y es aquí donde la utilización de herramientas informáticas cobra vital importancia en el manejo de información y procesamiento de datos.

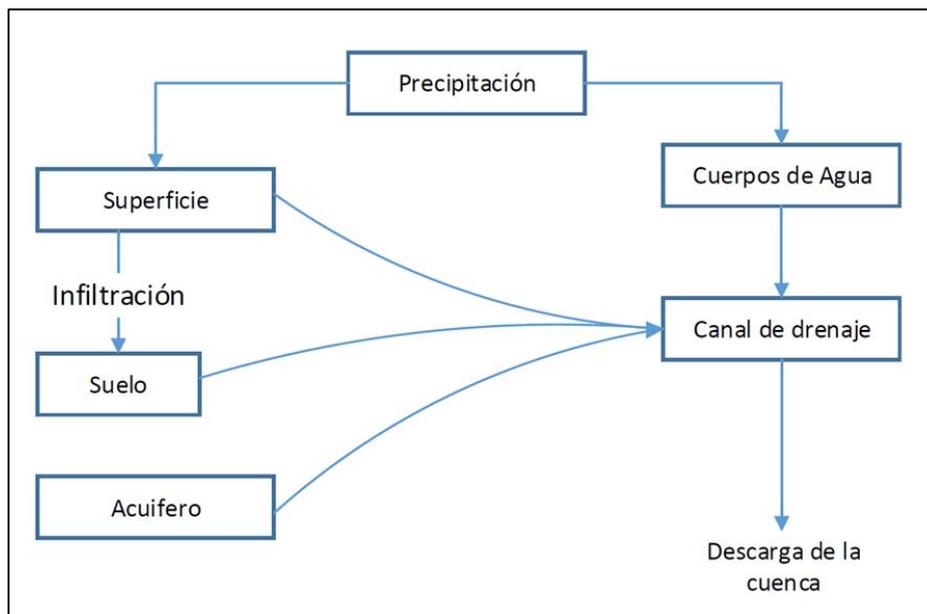


Figura 3.2 Conceptualización proceso lluvia – escorrentía. Fuente: Adaptado de (Chow, Hidrología Aplicada, 1994)

Normalmente la entrada es un hietograma de precipitación, Figura 3.3 y la salida es un hidrograma de escorrentía en la salida de la cuenca, Figura 3.4.

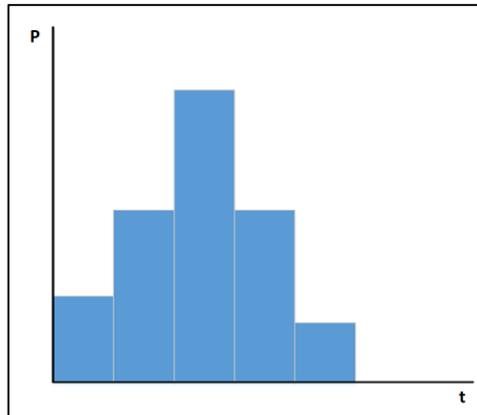


Figura 3.3 Hietograma de entrada. Fuente: Elaboración propia

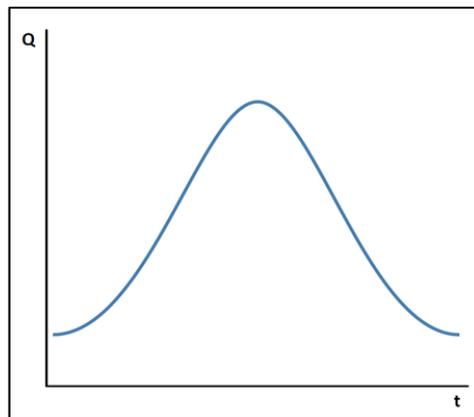


Figura 3.4 Hidrograma de Salida. Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Aplicaciones Modelo Lluvia - Escorrentía

Los modelos lluvia escorrentía se han determinado en su mayoría de manera experimental, algunos aplicado a zonas específicas y con algunas modificaciones se han adaptado a otras partes del mundo en otros ambientes y condiciones hidrográficas distintas.

En general todos son aplicados con los mismos objetivos pero para solucionar problemas o situaciones específicas.

- Planeación y diseño de obras hidráulicas de conducción y de control
- Operación y/o evaluación de obras hidráulicas existentes

- Preparación y respuesta a inundaciones
- Regulación de actividades de regulación en las planicies

3.1.3 Definición de Parámetros de Entrada

3.1.4 Número de Curva

En el estudio de la escorrentía superficial el Soil Conservation Service desarrolló un método denominado el número de curva de escorrentía CN, para calcular las abstracciones de una tormenta, incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha, (Monsalve, 1999). El número de curva varía entre 1 y 100 teniendo en cuenta:

- Tipo de Suelo Hidrológico
- Utilización y tratamiento del suelo
- Condiciones de la superficie del terreno
- Condición de humedad antecedente del suelo

Para la estimación del número de curva se utilizan tablas en las que se encuentra simplificado el número de curva, teniendo en cuenta el uso y la condición hidrológica del suelo. Para esto se utiliza el mapa de Uso de Suelo, Figura 2.3

Clasificación hidrológica de suelo

Para el uso del método del Soil Conservation Service se ha definido cuatro grupos hidrológicos de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

A - Bajo potencial de escorrentía

Suelos que tienen alta tasa de infiltración aun cuando estén muy húmedos. Compuestos por arenas gravas profundas bien a excesivamente drenados.

B - Moderadamente bajo potencial de escorrentía

Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenado a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasa de transmisión de agua moderada.

C - Moderadamente alto potencial de escorrentía

Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o alkali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidades de 50 a 10cm

D - Alto potencial de escorrentía

Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o alkali, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen tasa de transmisión de agua muy lenta.

En este caso se han clasificado en suelo teniendo en cuenta la información aportada por la CAR, estas se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Grupos hidrológicos para cada subcuenca

Subcuenca	Grupo hidrológico
1	B
2	B
3	C
4	B
5	C
6	D
7	C
8	D

Fuente: Elaboración propia

Uso del Suelo

Tabla 3.2 Usos de Suelo subcuencas

Subcuenca	Uso de Suelo
1	Reforestación y regeneración espontánea de la vegetación natural
2	Agricultura de subsistencia y ganadería semiintensiva y extensiva para doble propósito
3	Agricultura semiintensiva con fines comerciales y de sustento y ganadería semiintensiva para doble propósito
4	Agricultura semiintensiva con fines comerciales y de sustento y ganadería semiintensiva para doble propósito
5	Reforestación y regeneración espontánea de la vegetación natural. Forestería de protección y protección y producción.
6	Agricultura intensiva con fines comerciales y ganadería semiintensiva con utilización de pastos mejorados
7	Agricultura intensiva con fines comerciales y ganadería semiintensiva con utilización de pastos mejorados
8	Reforestación y regeneración espontánea de la vegetación natural

Fuente: Elaborada con Información de la CAR

Condición hidrológica del suelo

De la misma manera la condición hidrológica del suelo se ha definido con base en la información suministrada por la CAR, la Tabla 3.3 muestra el resumen, así como el tipo de cobertura

Tabla 3.3 Condición hidrológica de los suelos

Subcuenca	Tipo de Cobertura	Grupo hidrológico
1	Bosques	Buena
2	Combinación de bosques y pastos	Buena
3	Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	Buena
4	Bosques	Buena
5	Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	-
6	Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	-
7	Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	-
8	Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	-

Fuente: Elaborada con información de la CAR

Utilizando el ArcGis es posible promediar los usos de suelo, los cuales se muestran en la Tabla 3.2 con la ayuda del ArcGis es fácil identificar y asignar a cada una de las subcuencas los CN correspondientes, valores que se utilizarán en el análisis posterior.

Es posible definir un mapa en el que se observe el uso de suelo por cada subcuenca, Figura 3.5 pero la curva número puede ser diferente por el grupo hidrológico, tipo de cobertura o condición hidrológica.

Dado que la determinación de la curva número se realizó por tablas, es necesario especificar

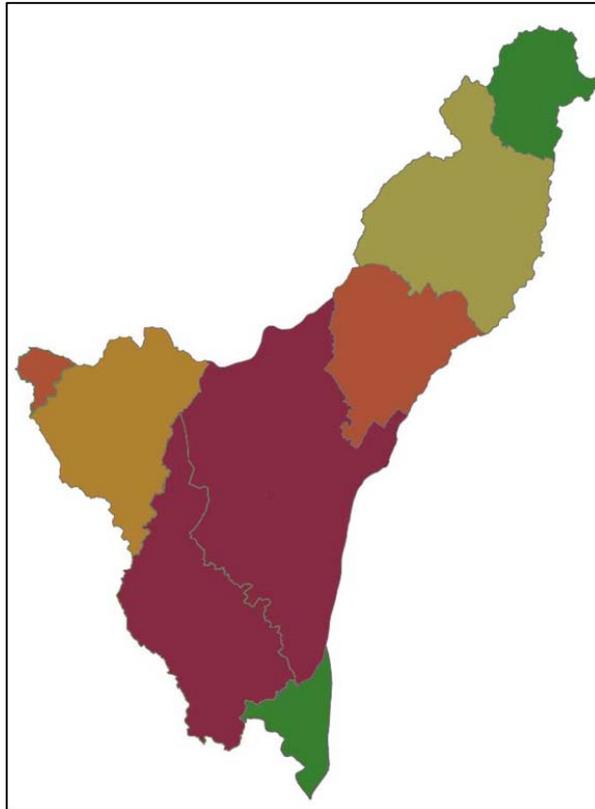


Figura 3.5 Uso por subcuenca

Teniendo en cuenta las especificaciones anteriores, se determina el CN de cada una de las subcuencas los cuales serán ingresados al modelo hidrológico implementado en HEC - HMS. La Tabla 3.4 muestra cada uno de los CN seleccionado para cada subcuenca.

Tabla 3.4 CN para cada subcuenca

Subcuenca	Curva Número
1	55
2	59
3	82
4	55
5	82
6	86
7	82
8	86

Fuente: Elaboración Propia

3.1.5 Curvas I-D-F Sintéticas

Las curvas I-D-F se obtienen a través del método propuesto por (Vargas, 1997). Esta metodología es aplicable en zona que no tienen datos de caudal, únicamente datos de precipitación. El método fue desarrollado para cuatro zonas del país a partir de información de 165 estaciones.

La información pluviométrica requerida corresponde a los registros multianuales de precipitación máxima en 24 horas, el número de días con lluvia y la precipitación multianual. Esta información fue solicitada a la entidad operadora de cada estación en medio magnético, aunque en algunos casos fue necesario consultar directamente los anuarios meteorológicos correspondientes al periodo de registro con el cual fueron calculadas las curvas. Para algunas estaciones no se logró conseguir esta información, con lo cual el grupo final de estaciones analizadas fue de 165.

El resultado del estudio arrojó un grupo de siete ecuaciones que aproximan las curvas Intensidad - Duración - Frecuencia cuatro zonas del país. Para el presente estudio se selecciona la zona andina con la ecuación más completa, que incluye todos los parámetros de análisis.

$$i = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT^f * E^g$$

Dónde:

i: intensidad media, en (mm/hr)

T: periodo de retorno, en (años)

t: duración, en (horas)

M: precipitación máxima en 24 horas, en (mm)

N: número de días con lluvia al año

PT: precipitación media anual, en (mm)

Los parámetros de la ecuación para la zona andina se muestran en la Tabla 3.5

Tabla 3.5 Parámetros para el modelo I-D-F

Parámetro	Valor
a	1.64
b	0.19
C	0.65
D	0.73
E	-0.13
f	0.08
g	-0.01

Fuente: (Vargas, 1997)

En el presente trabajo se utiliza esta metodología principalmente porque no se cuenta con información disponible tan detallada de precipitación con en la que se pueda determinar las curvas I-D-F. Los registros deben ser horarios y manejar dicha información puede ser tedioso. Por otro lado, se adoptan dichas formulas, el coeficiente de determinación r^2 del trabajo realizado por (Vargas, 1997) es de 0,93 lo que infiere que el trabajo estadístico realizado es aceptable para términos prácticos.

En los Anexos se muestran las curvas I-D-F para diferentes periodos de retorno.

3.2 Determinación de la Tormenta de Diseño

3.2.1 Método del bloque alterno

Es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia (Chow, Hidrología Aplicada, 1994). Tiene ventaja sobre otros métodos ya que tiene en cuenta la distribución temporal de la precipitación. Dicho método produce un hietograma que especifica la profundidad de precipitación que ocurre en los n intervalos definidos de duración Δt y una duración total de diseño $Td=n*\Delta t$. Luego de seleccionar el periodo de retorno deseado para el cual se quiere diseñar, la intensidad es leída en las I-D-F para cada una de las duraciones $\Delta t, 2 \Delta t, 3\Delta t, \dots$, y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración.

Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño.

El resultado de esta metodología arroja un hietograma de precipitación como el mostrado en la Figura 3.6. En los anexos se muestran los hietogramas para cada una de las estaciones analizadas, el Δt han sido definido en 10 minutos.

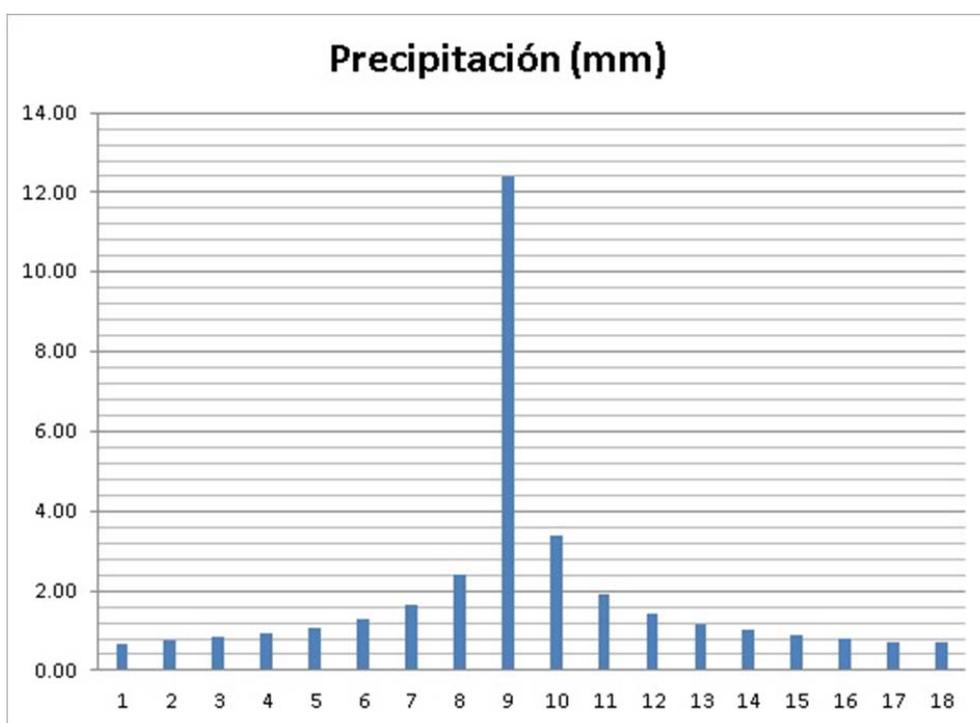


Figura 3.6 Hietograma por Bloque Alterno. Fuente: Elaboración propia usando Excel

3.2.2 Tiempo de Concentración

Para la determinación del tiempo de concentración de han determinado numerosas formulas determinadas en su mayoría de manera experimental. A continuación se

muestran algunas con las cuales de determina el tiempo de concentración para cada una de las subcuencas.

Método de Clark

$$T_c = 0,335 * \left(\frac{A}{S^{0,5}} \right)^{0,593}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, (*hr*)

A: Área de la cuenca, (*km²*)

S: Pendiente media del cauce principal, (*m/m*)

Método del SCS

$$T_c = \frac{100 * L^{0,8} * \left[\left(\frac{1000}{CN} \right) * 9 \right]^{0,7}}{1900 * (S * 100)^{0,5}}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, (*min*)

A: Área de la cuenca, (*pies*)

CN: Curva número

S: Pendiente media del cauce principal, (*m/m*)

Método de Kirpich

$$T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$$

T_c: Tiempo de concentración, (*min*)

L: Longitud del cauce principal, (*pies*)

S: Pendiente media de la cuenca, (*pie/pie*)

Método de Temez

$$T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, (*hr*)

L: Longitud del cauce principal, (*km*)

S: Pendiente media de la cuenca, (*m/m*)

Método Racional Generalizado

$$T_c = \left[\frac{60 * n * L}{H^{0,3}} \right]^{0,76}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, (*hr*)

L: Longitud del cauce principal, (*km*)

n: Coeficiente de rugosidad del cauce.

H: Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, (*m*)

Método Ven T Chow

$$T_c = 0,273 * \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,64}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, (*hr*)

L: Longitud del cauce principal, (*km*)

S: Pendiente media de la cuenca, (*m/m*)

La información de la longitud de los cauces principales de cada una de las subcuencas fue obtenida a través del SIG a continuación se muestra una tabla con las longitudes de los cauces y los tiempo de concentración seleccionados. Los tiempos de concentración se muestran en los anexos.

Tabla 3.6 Tiempo de concentración

Subcuenca	Longitud cauce principal (m)	Tiempo de concentración (hr)
1	9717	3,71
2	14100	12,59
3	12506	13,39
4	4259	1,85
5	10871	7,54
6	27516	25,88
7	18301	19,0
8	9061	12,71

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Modelo para el cálculo de pérdidas

Para el presente trabajo se utiliza el modelo de la curva número del *Soil Conservation Service* el cual se basa en pérdidas incrementales. Originalmente el método fue aplicado para calcular infiltración total durante una tormenta. El HEC - HMS calcula la precipitación incremental durante una tormenta recalculando los volúmenes de infiltración para cada intervalo de tiempo.

Los parámetros necesarios son el número de curva y el porcentaje de impermeabilidad.

La curva número representa el grupo de suelo y sus posibles combinaciones con el uso y la condición hidrológica.

La impermeabilidad hace referencia a esa fracción de la subcuenca en la que por condiciones del uso del suelo es posible que no se genere infiltración.

También es posible ingresar la abstracción inicial, que se define como la cantidad de precipitación que debe caer antes de que la superficie alcance el exceso de humedad. Si es dejado en blanco, automáticamente se calculará como 0,2 veces el potencial de retención, calculado a partir de la curva número.

3.2.4 Modelo de Escorrentía Directa

Para el modelo de escorrentía directa se utiliza también el método del *Hidrograma Unitario del SCS*, solo es necesario ingresar el *Lag Time* que corresponde a 0.6 veces el tiempo de concentración, el cual ya ha sido calculado.

3.3 Modelo HEC - HMS

En el software HEC - HMS se debe construir una representación gráfica de la cuenca con las herramientas disponibles. Además de eso son requeridos componentes mínimos para que el modelo sea válido

3.3.1 Modelo de la cuenca

Es construido esquemáticamente a partir de los iconos disponibles en el HEC - HMS, estos son: subcuenca, río, reservorio, unión, división, fuente y sumidero.

A continuación se muestra paso a paso la definición del modelo hidrológico en HEC - HMS.

Inicialmente se cuenta con shape base que es definido en el ArcGis, se puede abrir desde HEC - HMS para crear un background del modelo, Figura 3.7.

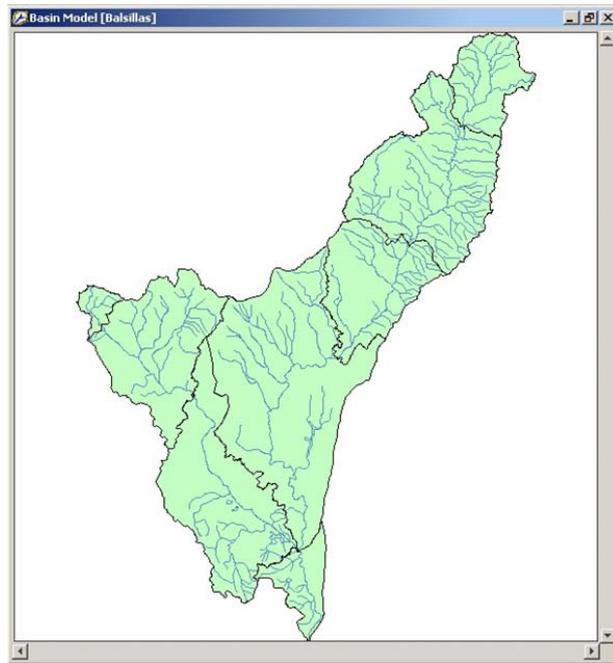


Figura 3.7 Definición de la Cuenca en HMS. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se inserta el número de subcuencas necesarias en el modelo, cada una de estas subcuencas debe tener la información necesaria, en este caso: precipitación máxima en 24hr, número de días con lluvia, para poder definir las curvas I-D-F y posteriormente el hietograma de diseño.

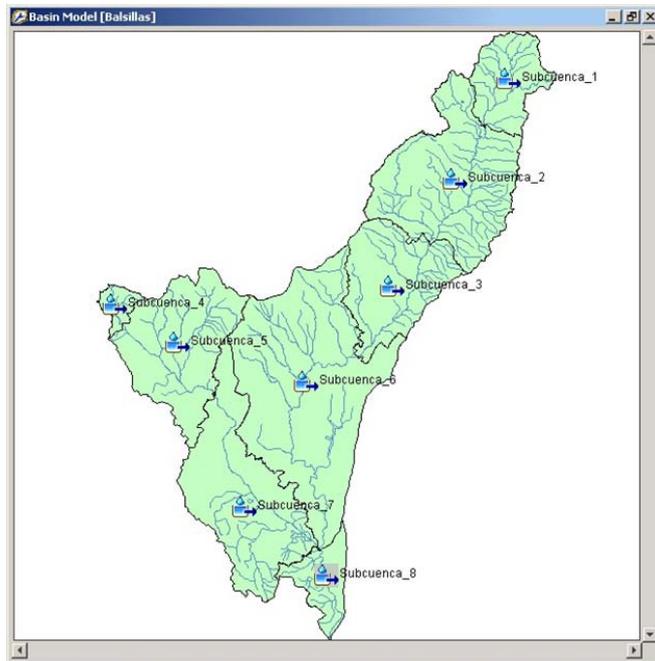


Figura 3.8 Definición de la subcuencas en HMS. Fuente: Elaboración propia con HMS

Dentro del modelo se deben definir los tramos (*Reach*) que conectarán las subcuencas, las uniones y los sumideros. No deben existir tramos sin conectar para no generar errores en el modelo.

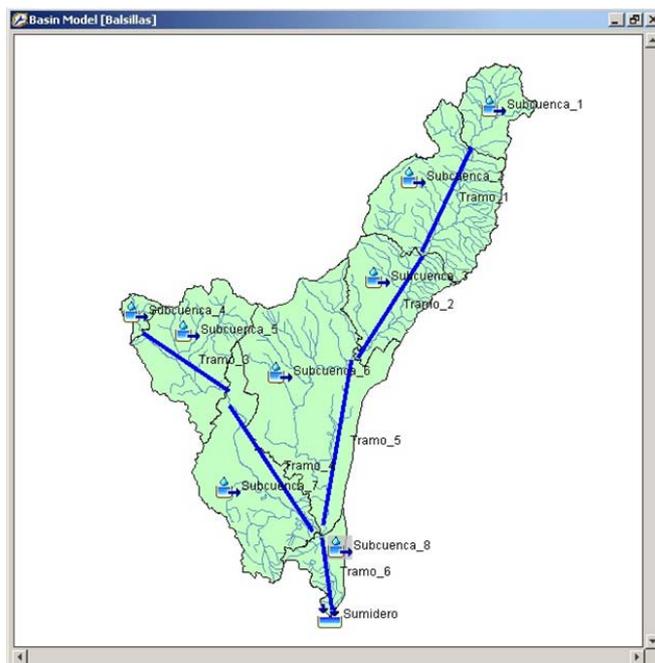


Figura 3.9 Definición de los cauces. Fuente: Elaboración propia con HMS

Finalmente se tiene el modelo hidrológico completo, se muestra en la Figura 3.10.

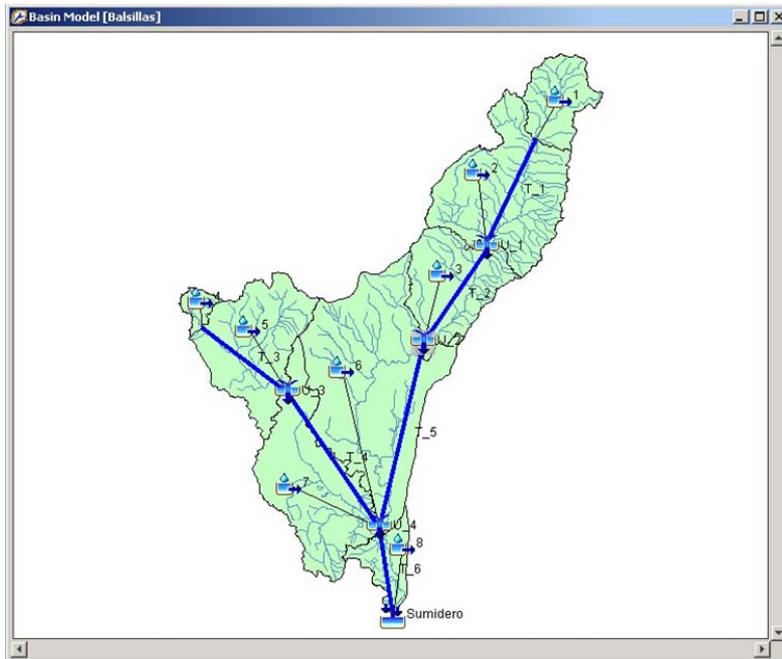


Figura 3.10 Modelo hidrológico. Fuente: Elaboración propia con HMS

3.3.2 Modelo meteorológico

Aquí son incluidos los modelos teóricos que se encuentran detrás del modelo, es decir se especifica que se quiere modelar y bajo qué modelo. Las opciones son: Radiación, Precipitación, Evapotranspiración y derretimiento de nieve.

Para el presente análisis se modelará únicamente la precipitación, por medio de un hietograma de diseño específico para cada subcuenca; dichos hietogramas fueron definidos anteriormente.

3.3.3 Especificaciones de control

Se especifica la fecha de inicio y de final de la simulación, además del intervalo de tiempo que se quiere modelar. Si no se desea colocar una fecha específica, esta puede ser aleatoria, pero siempre debe ser una fecha pasada para no generar conflictos con el modelo.

En el modelo meteorológico lo que se pretende es simular la respuesta a una tormenta en particular y en este caso no es necesario especificar una fecha en particular. La simulación se realizará desde el 1 de enero de 2015 a las 00:00 horas hasta el 2 de Enero a las 12:00 con intervalos de 15 minutos.

3.3.3.1 Datos de entrada

Los datos de entrada son el suministro para que el modelo pueda ejecutarse. Consiste en la información meteorológica e hidrológica que ha sido adquirida del proceso natural. De ser necesario puede tener un procesamiento previo.

Los datos que pueden ser ingresados son: Precipitación, Caudales, Temperatura, Radiación, Velocidad del Viento, Presión y Humedad relativa.

Los datos de entrada en este caso son hietogramas de precipitación para cada una de las subcuencas

3.3.3.2 Tránsito de Crecientes

Se han desarrollado muchos métodos hidrológicos para el tránsito de crecientes y existe mucha literatura relacionada con el tema, (Chow, Hidráulica de Canales Abiertos, 1994). Para el presente trabajo se utilizará el método de *Muskingum*, descrito más adelante.

En general, los métodos hidrológicos para el tránsito de crecientes pueden clasificarse en dos grupos: los analíticos y los instrumentales. Para el presente estudio se utilizará un método analítico el cual se encuentra disponible en HEC - HMS

Método de Muskingum

EL método de *Muskingum* es un método de tránsito hidrológico que se usa comúnmente para manejar relaciones caudal-almacenamiento variable. Este método modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un canal de un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma. Durante el avance de la onda de creciente, el

caudal de entrada en mayor que el caudal de salida, siendo un almacenamiento de cuña. Durante la recesión, el caudal de salida es mayor que el caudal de entrada resultando en una cuña negativa. Adicionalmente, existe un almacenamiento por prisma que está formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo de la longitud del canal prismático, (Chow, Hidráulica de Canales Abiertos, 1994).

El almacenamiento total es por consiguiente la suma de los componentes

$$S = K O + K X(l - Q)$$

Realizando algunas simplificaciones, para el caso del caudal se tiene que:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j$$

Dónde:

K : Tiempo de recorrido de la onda, en horas

X : Factor de atenuación de la onda

Δt : Intervalo de cálculo, en horas

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2K(1 - X) - \Delta t}{2K(1 - X) + \Delta t}$$

Los valores de K y X deben determinarse a partir de las características del canal de estudio

El valor de K (en horas) puede ser calculado como:

$$K = \frac{L}{c * 3600}$$

Dónde:

c : celeridad de onda, en m/s

L : Longitud del tramos, en m

Tomando la celeridad de onda c como $2m/s$ es posible calcular el número de tramos como

$$nt = \frac{K}{\Delta t}$$

La Tabla 3.7 muestra cada uno de los tramos definido en el modelo meteorológico, la constante de Muskingum K y el número de tramos

Tabla 3.7 Parámetro K para cada tramo

Tramo	Longitud cauce (m)	K (hr)	Tramos
1	14100	1,96	12
2	12506	1,74	12
3	18301	1,51	10
4	4259	2,54	16
5	27516	3,82	24
6	9061	1,26	8

Fuente: Elaboración propia

En este caso se va asumir $X=0,1$. Para asignar estos valores en el modelo basta con selecciones cada uno de los tramos, especificar el método Muskingum y asignar los parámetros, la Figura 3.11 muestra un ejemplo de la asignación de dichos parámetros.

Reach Routing Options

Basin Name: Balsillas
 Element Name: T_1

*Muskingum K (HR) 1.95
 *Muskingum X: 0.1
 Subreaches: 12

Figura 3.11 Asignación de parámetros – Método Muskingum.

3.4 Análisis de Incertidumbre

3.4.1 Incertidumbre

La incertidumbre es un concepto metrológico fundamental, se relaciona con la precisión cuando se obtienen resultados analíticos basados en mediciones. El término precisión está asociado a la proximidad de concordancia entre valores obtenidos por medio de múltiples mediciones de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas. Mientras que la incertidumbre considera todas las fuentes posibles de error que intervienen en el resultado final de la medición. (OIML, 2008)

La evaluación de incertidumbres requiere de dos fases, (Hernández, 2009):

La *Formulación* del modelo de medición que es realizada por el especialista en base al conocimiento de los fenómenos que rigen su sistema.

El *Cálculo* realizado por el estadístico en base al análisis numérico y programas de computadora.

Es por esto que se debe conocer la magnitud de los parámetros de la distribución utilizada, es decir el comportamiento de las variables utilizadas, por ejemplo: los valores máximos, mínimos o las restricciones que puede tener un parámetro de estudio. Se puede incurrir en errores por el mal dimensionamiento que pueden tener estos parámetros y el programa funciona como cualquier otro, puede identificar errores de cálculo pero nunca errores lógicos, es este caso asociados a la fase de formulación.

3.4.2 Método de Monte Carlo

El análisis de incertidumbre de HEC - HMS se basa en el método de Monte Carlo. Que es una técnica estocástica basada en el uso de números al azar y las estadísticas de probabilidad para investigar los problemas matemáticos. Se utiliza para combinar la función de probabilidad de cada contribuyente obteniendo la incertidumbre por la generación de números aleatorios con la distribución de probabilidad correspondiente, simulando los valores de cada variable aleatoria del modelo. Al igual que en el método clásico, el analista debe encontrar cada parámetro de incertidumbre del modelo matemático del ensayo. Finalmente, utilizando un software adecuado, un gran número de muestras (100 000 o más) se realizan con el modelo simulado, para obtener resultados con una distribución particular y desconocida. (García, 2012)

3.4.3 Descripción modulo Análisis de Incertidumbre

A continuación se hace una breve descripción del módulo análisis de incertidumbre disponible en la última versión de HEC - HMS.

El módulo funciona bajo la misma lógica a los módulos previos (Simulación, Optimización, etc.). Se debe crear una rutina de análisis de incertidumbre como muestra la Figura 3.12 utilizando en este caso el asiste. Luego seleccionar el modelo hidrológico, Figura 3.13 y luego el modelo meteorológico, Figura 3.14.

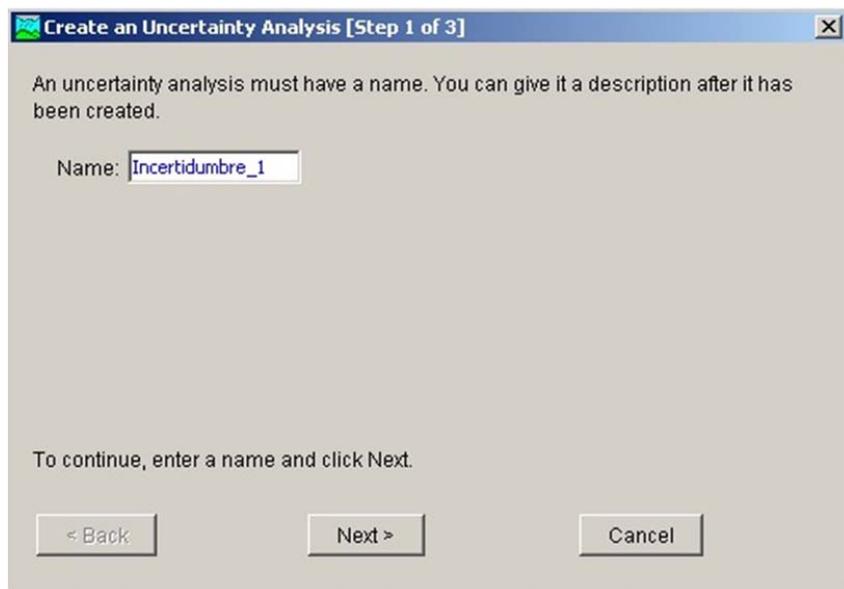


Figura 3.12 Creación rutina de Incertidumbre. Fuente: Elaboración propia

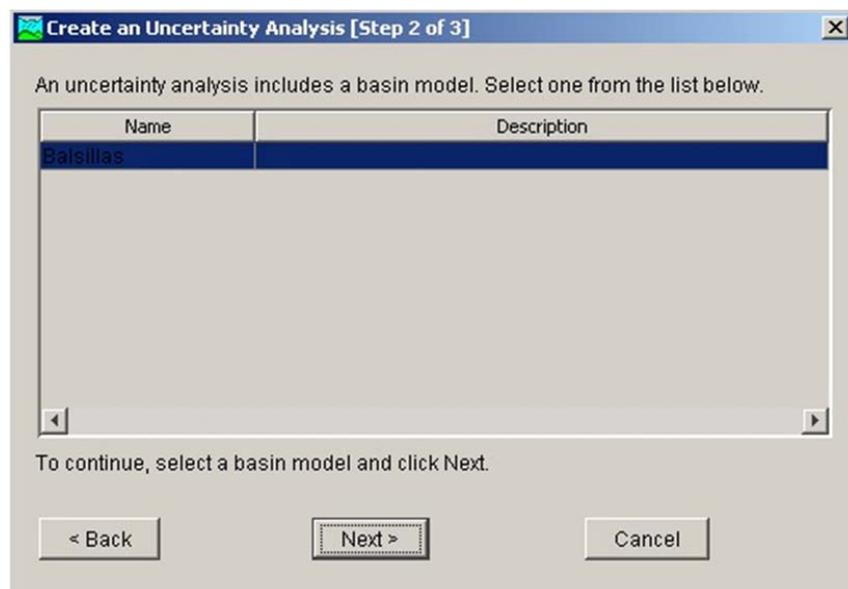


Figura 3.13 Inclusión de la cuenca en la rutina de Incertidumbre

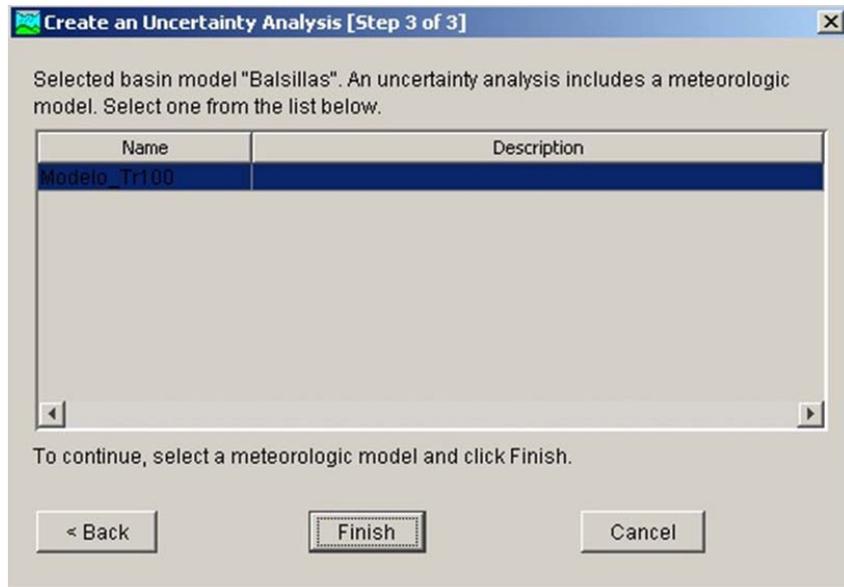


Figura 3.14 Selección del modelo hidrológico

A continuación, al seleccionar el modelo de incertidumbre creado se procede a configurarlo. Se debe seleccionar: el modelo de la cuenca, fecha y hora de inicio, fecha y hora de fin, el intervalo del análisis y el número de muestras.

El número de muestras (*Total Samples*) hace referencia al número de veces que se va a modificar el parámetro seleccionado

Para el presente trabajo se realizan cuatro análisis de incertidumbre, mostrados en la Figura 3.15 los cuales son:

Análisis 1: Parámetro *K* del modelo Muskingum para los seis tramos

Análisis 2: Parámetro *X* del modelo Muskingum para los seis tramos

Análisis 3: Parámetros Curva Número de la 8 subcuencas

Análisis 4: Parámetro Lag Time para todas las subcuencas

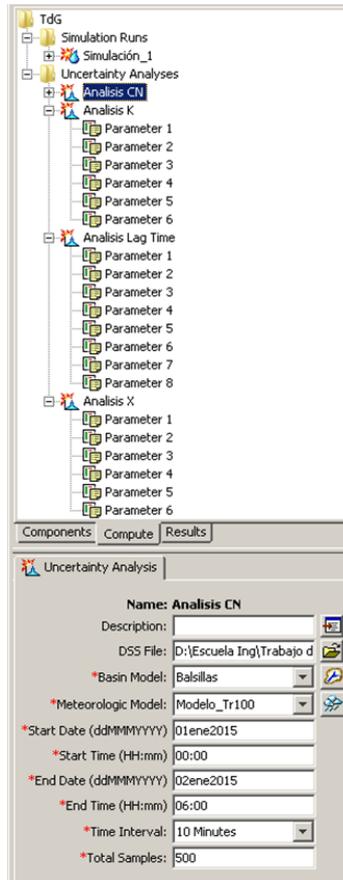


Figura 3.15 Definición de análisis de Incertidumbre

El análisis 1 y 2 se hacen con el fin de evaluar la incertidumbre en el tránsito de una creciente por un tramo de río establecido. El análisis 3 se hace teniendo en cuenta el modelo de cálculo de pérdidas y el último para el análisis de incertidumbre del modelo de escorrentía directa. Es decir cada uno de los cuatro análisis tiene parámetros diferentes para evaluar cada uno de los modelos involucrados de forma independiente.

El periodo de tiempo en el que se realiza el análisis puede ser el mismo que ha sido ingresado en las especificaciones de control.

A cada uno de estos análisis se le debe asignar un número de muestras, es decir el número de veces que el parámetro va a ser muestreado, en este caso se ha establecido 500 para todos los análisis.

Antes de hacer el análisis se deben especificar los resultados deseados.

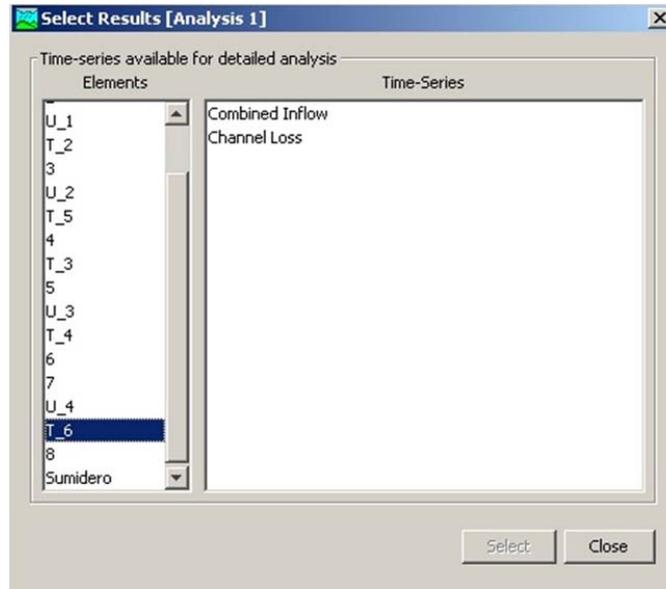


Figura 3.16 Selección de resultados deseados

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos con la simulación para las especificaciones establecidas y bajo la tormenta de diseño para un periodo de retorno de 100 años en tres puntos de la cuenca. Luego se analizan cuatro análisis de incertidumbre de manera independiente.

Para los análisis de incertidumbre en los tramos de los ríos se seleccionan dos parámetros: uno corresponde al K y otro X , parámetros del modelo de Muskingum. Posteriormente en las subcuencas se realiza un análisis de incertidumbre con las pérdidas modificando en número de curva del SCS. Finalizando se analiza la incertidumbre en el Lag Time o tiempo de retardo del método de escorrentía directa del SCS.

4.1 Simulación para $Tr = 100$ años

En la simulación realizada no se generaron errores ni advertencias de inestabilidades, falta de información o incompatibilidades. Sin embargo se presenta una advertencia en la salida de la subcuenca 1 y 4: “el flujo de entrada en T_1 y T_3 es cero”; revisando las pérdidas se observa que corresponden a la totalidad del agua precipitada.

A continuación se muestran los resultados en cuatro puntos de la cuenca desde aguas arriba hacia aguas abajo.

4.1.1 Unión U_2

Los resultados de la simulación en la Unión U_2 muestran los hidrogramas generados por el aporte de la subcuenca 3, el tramo T_2 y el flujo a la salida del mismo.

El caudal de que llega a esta unión desde el tramo 2 es comparativamente mucho menor que el de la subcuenca 3, dado que las pérdidas en la subcuenca 1 son del 100%.

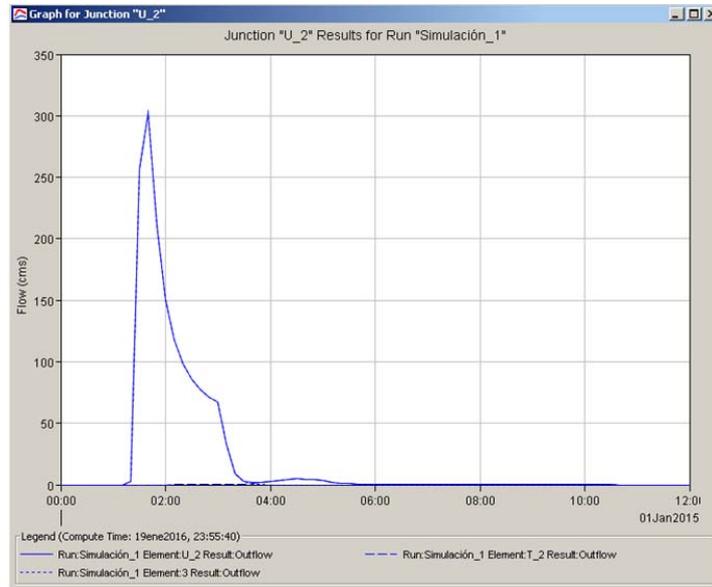


Figura 4.1 Hidrograma en la unión U_2

Se presenta un caudal de $302,0 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 1:40 del 1 de enero de 2015 con un volumen de 951.100 m^3 . El tiempo al pico se presenta relativamente rápido comparado hietograma de entrada a la cuenca 3. Puede ser por el modelo del canal o el tiempo de concentración calculado puede ser bajo.

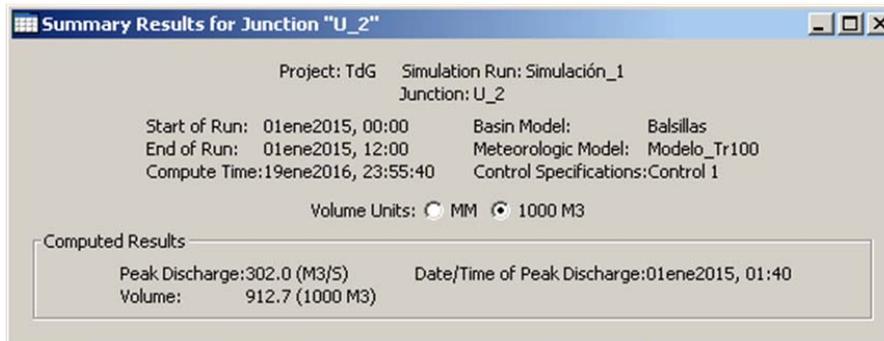


Figura 4.2 Resumen resultados unión 2

4.1 Unión U_4

A continuación se muestran los resultados del tránsito en la unión U_4, ya que es el punto donde confluyen los dos tramos principales de la cuenca. En la Figura 4.3 Se muestran

los diferentes hidrogramas generados en ese punto. Se muestra la salida de la unión U_4, la salida de Tramo T_4, la salida del Tramo T_5 y las subcuencas 6 y 7.

El caudal pico es de $780,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y se presenta el 1 de enero a la 1:45 con un volumen total de 4003.400 m^3 . Se presentan cuatro hidrogramas diferentes que tienen formas diferentes dependiendo de donde provienen y se puede observar la diferencia entre el tránsito de una creciente por un canal o una subcuenca, comparando su forma.

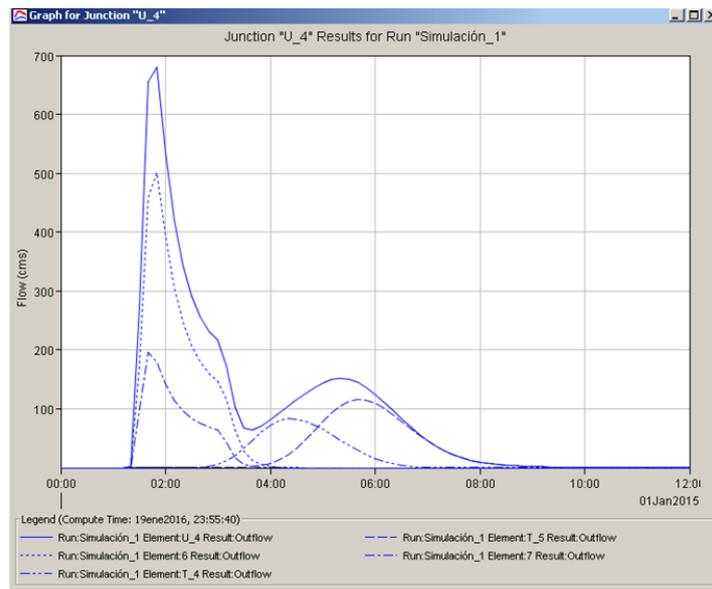


Figura 4.3 Hidrograma de salida en la unión U_4. Fuente: Resultado HMS

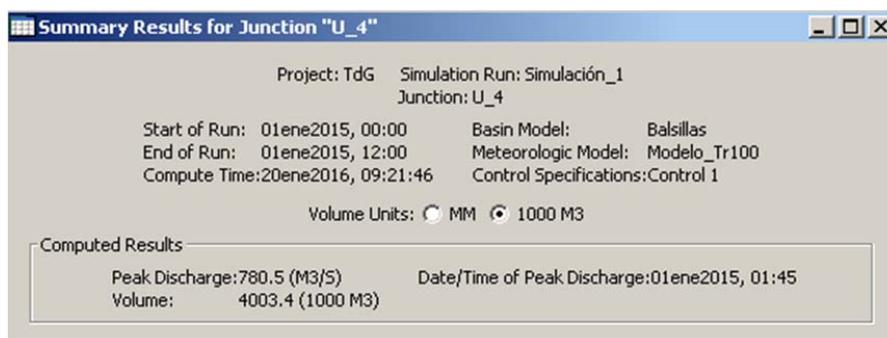


Figura 4.4 Resumen Resultado U_4. Fuente: Resultados HMS

El hidrograma de la unión tiene 2 picos, el máximo se presenta muy rápido y es el proveniente de la subcuenca 6, es la afluente más grande y descarga directamente, Luego se presenta el aporte del tramo 4 y 5 respectivamente.

4.1 Tramo T_6

Para un periodo de 100 años en el tramo 6 a la salida de la cuenca presenta un caudal pico es de $431.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y ocurre el 1 de enero a las 03:10. El caudal pico se ha reducido significativamente comparado con el máximo de la unión 4 aunque es congruente la similitud de los volúmenes totales descargados. Podría decirse que el tramo 6 actúa como atenuador de la onda.

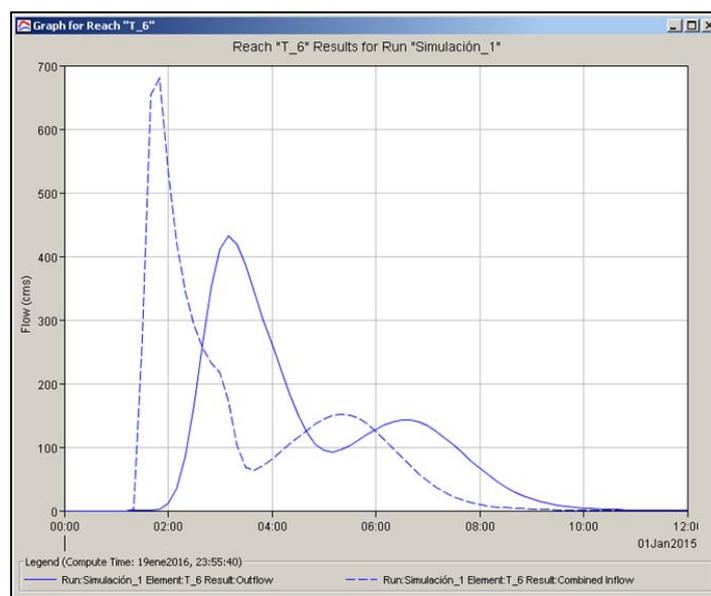


Figura 4.5 Hidrograma a la salida de la cuenca. Fuente: Resultados HMS

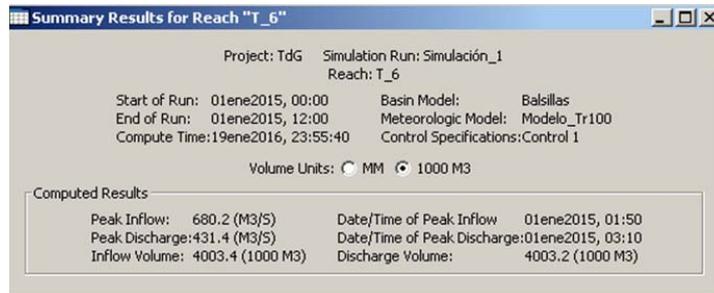


Figura 4.6 Resumen resultados T_6. Fuente: Resultados HMS

4.2 Sumidero

En el sumidero se presenta un pequeño pico al inicio del hidrograma que corresponde al aporte de la cuenca 8, el resto del hidrograma es muy similar al tramo 6.

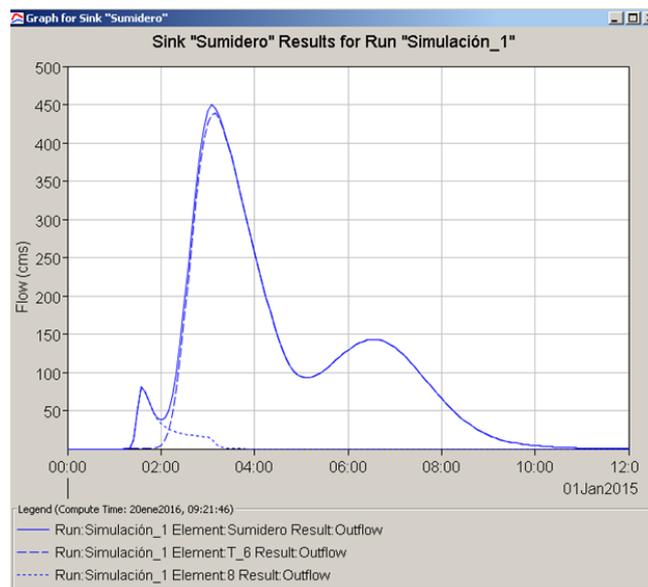


Figura 4.7 Hidrograma de salida para el sumidero

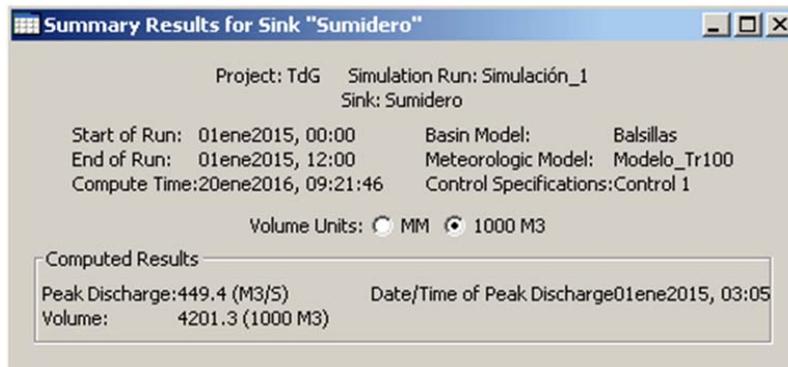


Figura 4.8 Resumen resultados Sumidero

4.3 Análisis 1: Parámetro K

Para el análisis de incertidumbre en el tránsito de canales se han definido dos parámetros del modelo de Muskingum, la Tabla 4.1 muestra los parámetros de dicho análisis. Se utilizó el método de distribución simple con la distribución de probabilidad normal, un valor mínimo de 0 y máximo de 4, la desviación corresponde al 10% de la media en cada tramo.

Tabla 4.1 Valores del análisis K

Tramo	μ	σ
1	1.96	0.19
2	1.74	0.17
3	1.51	0.15
4	2.54	0.25
5	3.82	0.38
6	1.26	0.12

Fuente: Elaboración propia

HEC – HMS muestra en sus resultados una gran variedad de gráficas y tablas una vez realizado el análisis de incertidumbre, mostrando los parámetros que han sido seleccionados anteriormente.

La Figura 4.9 muestra los resultados obtenidos para el caso del análisis del parámetro K en el tramo 1, son 500 muestras en total. Así mismo el HMS presenta una tabla por cada parámetro, en este caso una por cada tramo.

El análisis de incertidumbre arroja resultados únicamente de los elementos seleccionados. Es posible observar resultados de cualquier elemento en la cuenca, subcuencas, tramos, uniones, etc; pero deben ser cargados previamente en el modelo de incertidumbre.

Project: TdG Uncertainty Analysis: Analysis 1
 Element: T_1 Parameter: Muskingum - K

Start of Analysis: 01ene2015, 00:00 Basin Model: Balsillas
 End of Analysis: 01ene2015, 14:00 Meteorologic Model: Modelo_Tr100
 Compute Time: 20ene2016, 09:22:48

Sample Number	Parameter Value
1	2.0672
2	1.6931
3	1.9544
4	2.7065
5	1.8278
6	1.7220
7	1.8244
8	1.8862
9	1.9305
10	2.0255
11	1.9650
12	2.5129
13	1.9599
14	2.1658
15	2.2198
16	2.2799
17	1.9332
18	2.1120
19	1.7935
20	1.9257
21	2.2725
22	2.1335
23	2.0646
24	1.6981
25	1.8256
26	2.0865
27	1.9359
28	1.9471
29	1.9174
30	1.9314
31	1.6537
32	2.0074

Figura 4.9 Valores de análisis K Tramo 1.

A continuación se hace una revisión de los resultados obtenidos en los puntos de interés con las modificaciones respectivas de K .

Respecto a la simulación inicial, en la unión 2 no se presentan cambios apreciables en el hidrograma de salida, se observa el mismo comportamiento y el mismo caudal pico.

4.3.1 Unión 2

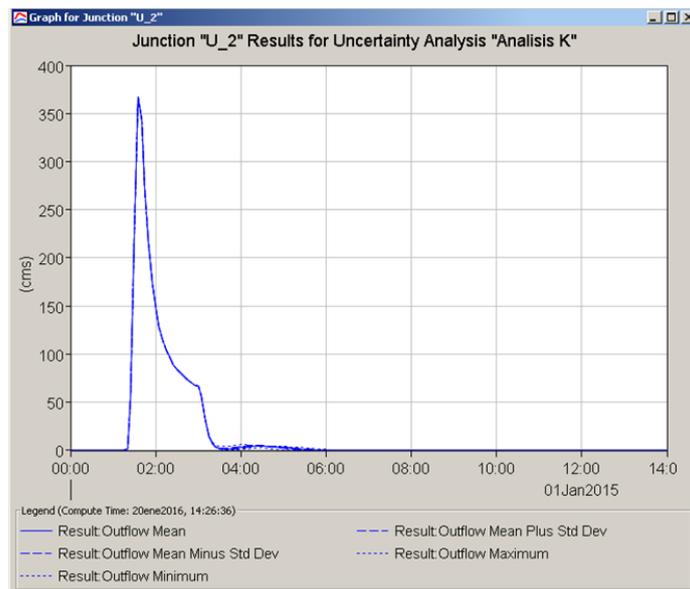


Figura 4.10 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis K

4.3.2 Unión 4

En la unión 4 se presenta el mismo comportamiento durante las 2 primeras horas, la desviación estándar tiende a cero. Sin embargo en las siguientes dos horas, en el segundo pico aumenta la desviación estándar debido a los pequeños aportes que se presentan en la parte final del hidrograma.

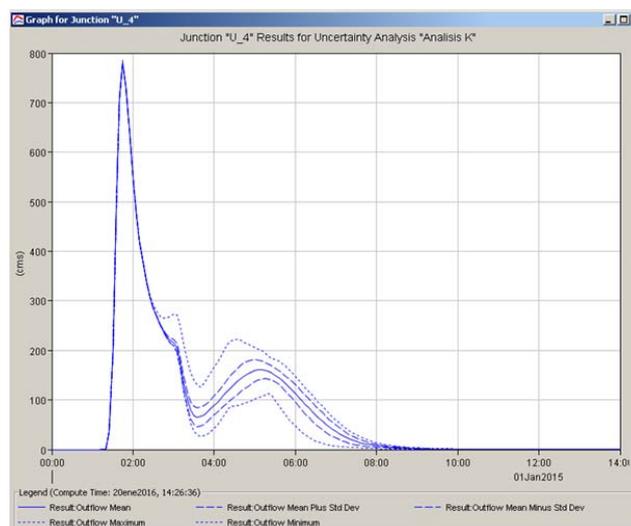


Figura 4.11 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis K

4.3.3 Tramo 6

En el tramo 6 la desviación estándar permanece proporcional en todo el hidrograma sin cambios significativos.

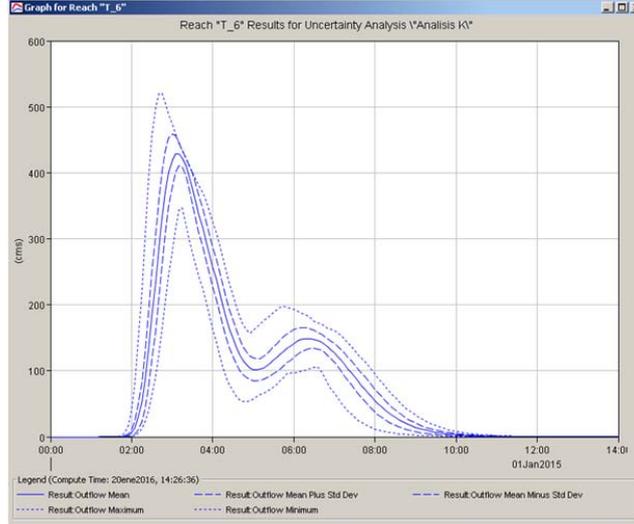


Figura 4.12 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis K

4.3.4 Sumidero

La entrada del sumidero es la salida del tramo 6 más los aportes de la subcuenca 8. En este caso el aporte de la subcuenca 8 presenta desviación pequeña y sigue el mismo comportamiento a lo obtenido anteriormente.

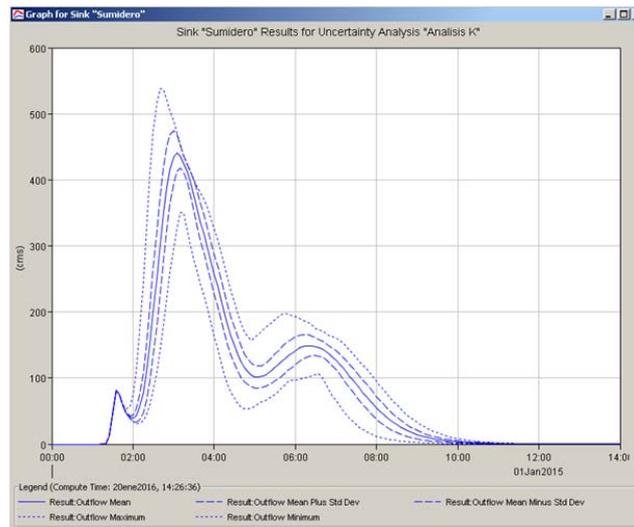
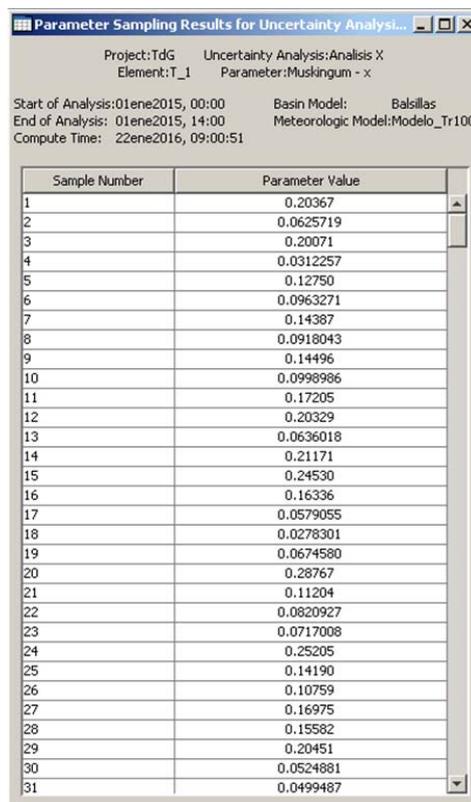


Figura 4.13 Resultados Incertidumbre Sumidero, Análisis K

4.4 Análisis 2: Parámetro X

Para el análisis del parámetro X del método Muskingum se ha establecido al igual que para el parámetro K método de distribución simple y distribución normal con un mínimo de 0, máximo de 0.5, $\mu=0.1$ y $\sigma=0.1$. En este caso todos tramos tienen un valor establecido de $X=0.1$. Los valores del parámetro K asignados al análisis se presentan en la



Project: TdG Uncertainty Analysis: Analisis X
Element: T_1 Parameter: Muskingum - x

Start of Analysis: 01ene2015, 00:00 Basin Model: Balsillas
End of Analysis: 01ene2015, 14:00 Meteorologic Model: Modelo_Tr100
Compute Time: 22ene2016, 09:00:51

Sample Number	Parameter Value
1	0.20367
2	0.0625719
3	0.20071
4	0.0312257
5	0.12750
6	0.0963271
7	0.14387
8	0.0918043
9	0.14496
10	0.0998986
11	0.17205
12	0.20329
13	0.0636018
14	0.21171
15	0.24530
16	0.16336
17	0.0579055
18	0.0278301
19	0.0674580
20	0.28767
21	0.11204
22	0.0820927
23	0.0717008
24	0.25205
25	0.14190
26	0.10759
27	0.16975
28	0.15582
29	0.20451
30	0.0524881
31	0.0499487

Figura 4.14 Valores de X para el análisis

4.4.1 Unión 2

El método de *Muskingum* se presenta estable en el tramo 2, con desviación estándar tendiendo a cero y el mismo caudal pico.

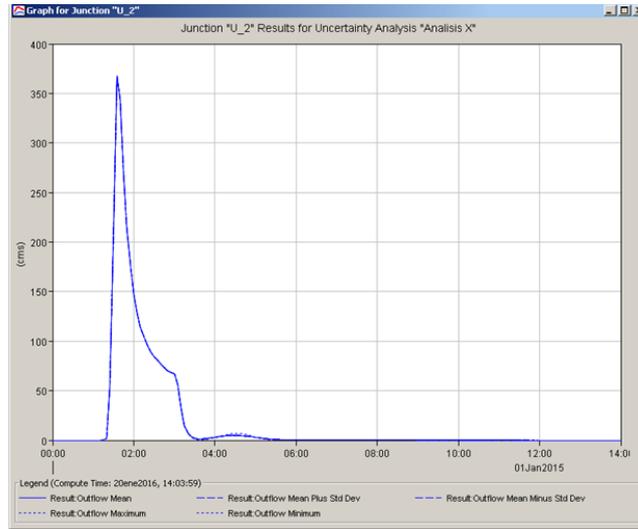


Figura 4.15 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis X

4.4.2 Unión 4

De la misma manera que el análisis anterior, en las primeras dos horas se presenta desviación tendiendo a cero y en las últimas dos horas aumenta, aunque en este caso es muy variable, puede presentarse inestabilidad en el método dados los pequeños aportes que se presentan.

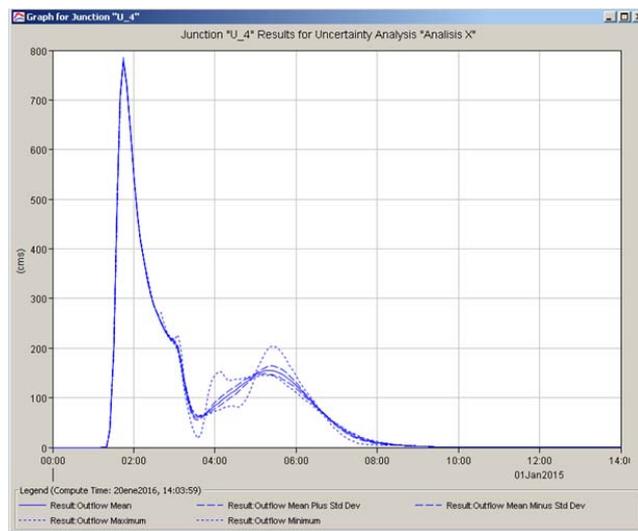


Figura 4.16 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis X

4.4.3 Tramo 6

Este es el único análisis que presenta resultados negativos en el análisis de X , en algún momento puede que no se cumpla la condición del método: $2 \cdot X \cdot K < \Delta t < K$.

Si X tiende a cero con $\Delta t = 5$ minutos y $K = 1.26$ horas se puede deducir que la inestabilidad se puede presentar cuando X tiende a crecer es decir valores de 0.2 o superiores. Se hará el respectivo análisis más adelante con el fin de verificar este comportamiento y la estabilidad del modelo.

Es de anotar que el valor negativo que se presenta es de $-100 \text{ m}^3/\text{s}$, se trata de un valor importante que debe ser analizado de manera independiente.

La desviación estándar más grande se presenta en el pico del hidrograma.

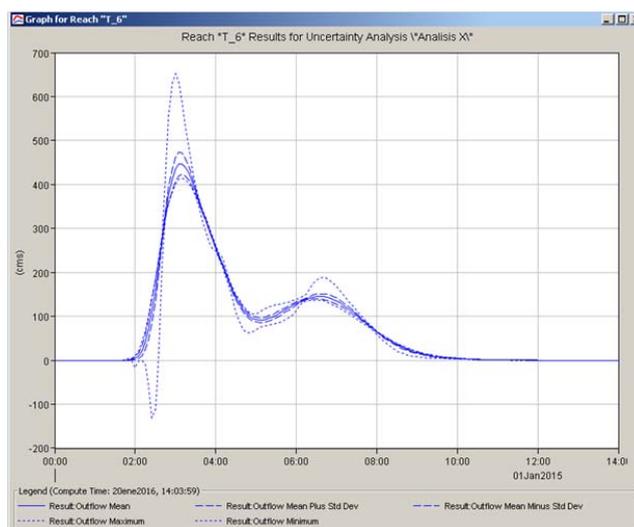


Figura 4.17 Resultados Incertidumbre Tramo 6, Análisis X

4.4.4 Sumidero

A pesar de la conexión directa del tramo 6 con el sumidero, no se presentan valores negativos, se observa más estable. La desviación más grande se presenta en el caudal pico.

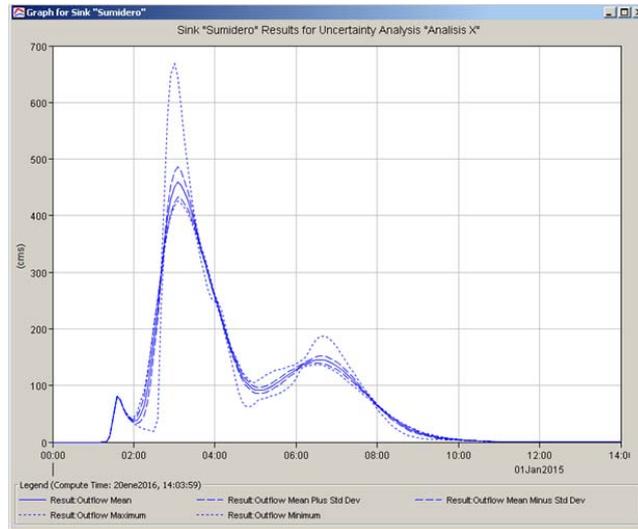


Figura 4.18 Resultados Incertidumbre Sumidero, Análisis X

4.5 Análisis 3: Parámetro CN

Para el análisis de la curva número se han agregado todas las subcuencas al análisis asignando a cada una como media el número de curva calculada anteriormente. El método seleccionado es distribución simple ajustado a la distribución de probabilidad normal. Con un mínimo de 1 y máximo de 99, la desviación ha sido establecida como el 5% de la media.

En los resultados se muestra la serie de datos que ha sido utilizada en el análisis de cada una de las subcuencas, la Figura 4.19 muestra los datos utilizado en el análisis de la subcuenca 1.

Para este análisis se ha establecido condiciones de control desde el 1 de enero de 2015 a las 00:00 horas hasta las 12:00 del mismo día.

Parameter Sampling Results for Uncertainty Analysis "A..."

Project: TdG Uncertainty Analysis: Analisis CN
 Element: 1 Parameter: SCS Curve Number - Curve Number

Start of Analysis: 01ene2015, 00:00 Basin Model: Balsillas
 End of Analysis: 02ene2015, 06:00 Meteorologic Model: Modelo_Tr100
 Compute Time: 20ene2016, 14:34:02

Sample Number	Parameter Value
1	56.302
2	49.885
3	55.680
4	53.767
5	58.088
6	53.310
7	53.686
8	55.164
9	55.408
10	56.711
11	56.415
12	59.418
13	54.326
14	55.779
15	49.452
16	55.655
17	52.777
18	56.126
19	55.946
20	56.232
21	57.456
22	55.450
23	61.775
24	53.428
25	52.865
26	51.348
27	60.030
28	52.120
29	58.306
30	50.307
31	57.128
32	53.080
33	52.291

Figura 4.19 Número de curva utilizado para la subcuena 1

4.5.1 Unión 2

La unión 2 presenta una desviación estándar muy grande, más de 100 m³/s en el caudal pico y el caudal máximo está por encima del caudal pico y a más del doble del mismo. Estas variaciones tan grandes se pueden relacionar con la sensibilidad que tiene la respuesta de la cuenca ante pequeños cambios en el CN de las subcuencas.

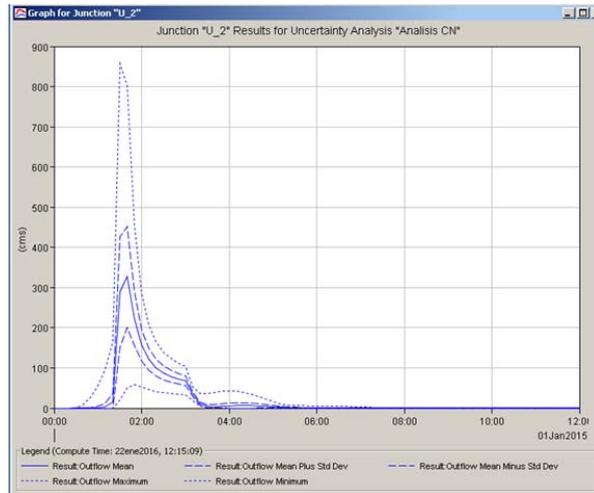


Figura 4.20 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis CN

4.5.2 Unión 4

De la misma manera que en la unión 2, se presenta una desviación alta en el caudal pico, con un caudal máximo de más del doble del caudal pico. A pesar de que la desviación establecida para el muestreo del CN es del 10% de la media, se presentan una desviación hasta de 500 m³/s.

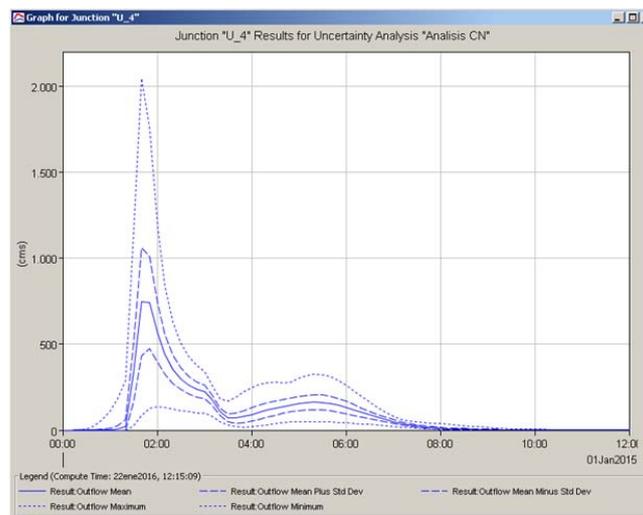


Figura 4.21 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis CN

4.5.3 Tramo 6

En este caso la desviación se ha reducido un poco, pero aún se observa un caudal máximo de más del doble del caudal pico y se observa más inestabilidad que en los anteriores puntos.

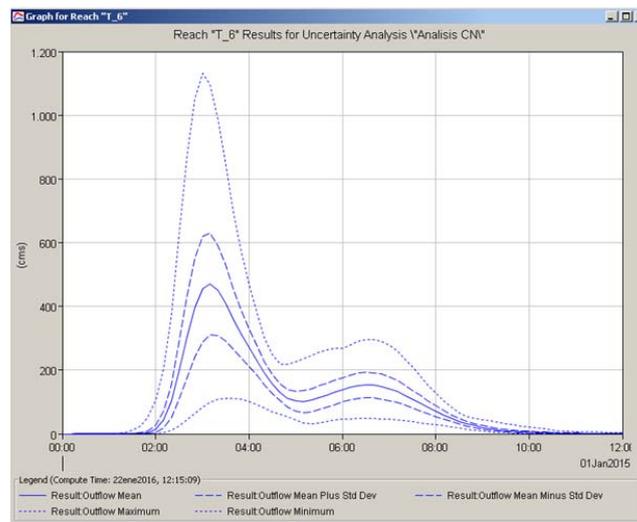


Figura 4.22 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis CN

4.5.4 Sumidero

Diferente al análisis realizado en el parámetro X, el primer pico correspondiente a la subcuenca 8 muestra una desviación estándar un poco alta y un caudal máximo del doble en ese punto.

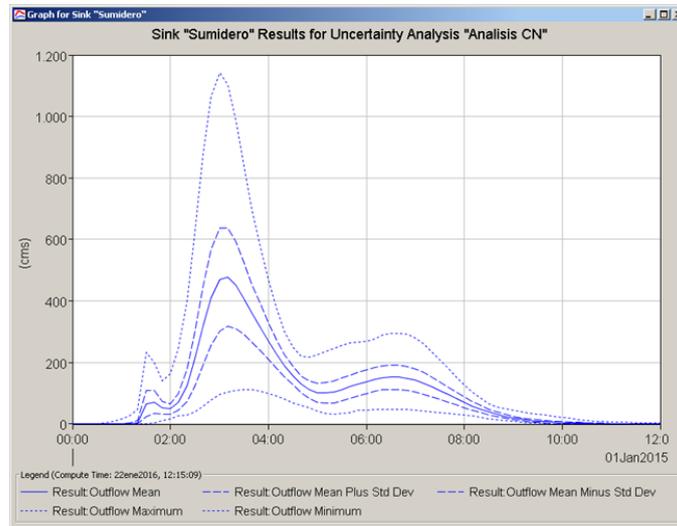


Figura 4.23 Resultados Incertidumbre Sumidero, Análisis CN

4.6 Análisis 4: Parámetro Lag Time

En este caso se ha establecido un media equivalente al Lag Time del modelo con una desviación estándar del 10%

Parameter Sampling Results for Uncertainty Analysis "A..."

Project: TdG Uncertainty Analysis: Analisis Lag Time
 Element: 1 Parameter: SCS Unit Hydrograph - Lag Time

Start of Analysis: 01ene2015, 00:00 Basin Model: Balsillas
 End of Analysis: 02ene2015, 12:00 Meteorologic Model: Modelo_Tr100
 Compute Time: 20ene2016, 16:50:31

Sample Number	Parameter Value
1	2.4342
2	2.2180
3	2.4611
4	2.1034
5	2.5068
6	2.4021
7	2.1203
8	2.0194
9	2.2936
10	2.0421
11	2.0891
12	2.1980
13	1.9818
14	2.0314
15	2.0615
16	2.3900
17	2.4792
18	2.5798
19	2.1418
20	2.0519
21	2.2126
22	2.3037
23	2.0733
24	2.3391
25	1.9931
26	2.0373
27	2.1457
28	2.2155
29	2.1318
30	2.2491
31	2.3179
32	2.3380
33	2.0853

Figura 4.24 Valores e análisis Lag Time

4.6.1 Unión 2

Es uno de los hidrogramas que tienen menor desviación y su comportamiento es muy similar a la simulación normal realizada anteriormente, debido a que los aportes de entrada son pocos y la subcuenca es relativamente pequeña.

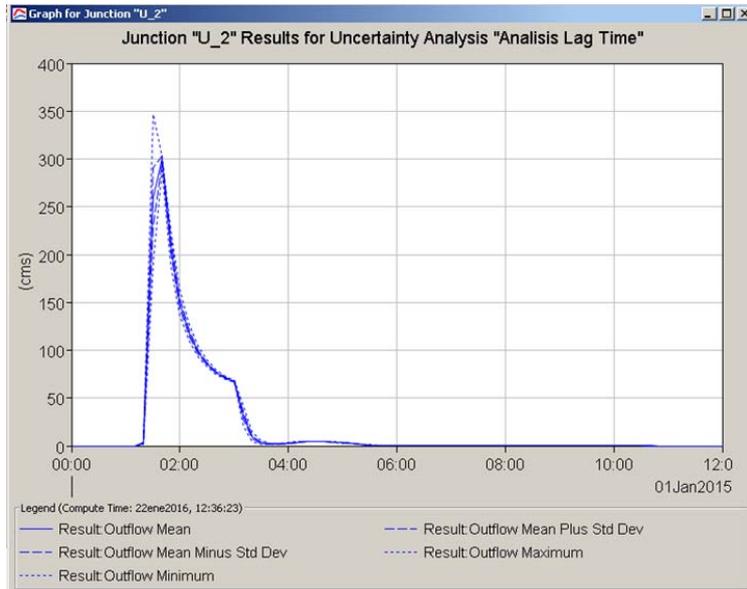


Figura 4.25 Resultados Incertidumbre U_2, Análisis Lag Time

4.6.2 Unión 4

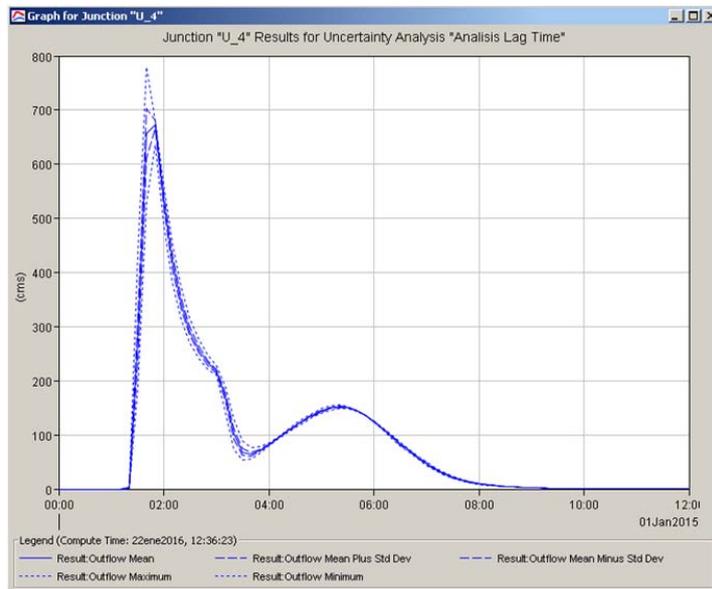


Figura 4.26 Resultados Incertidumbre U_4, Análisis Lag Time

4.6.3 Tramo 6

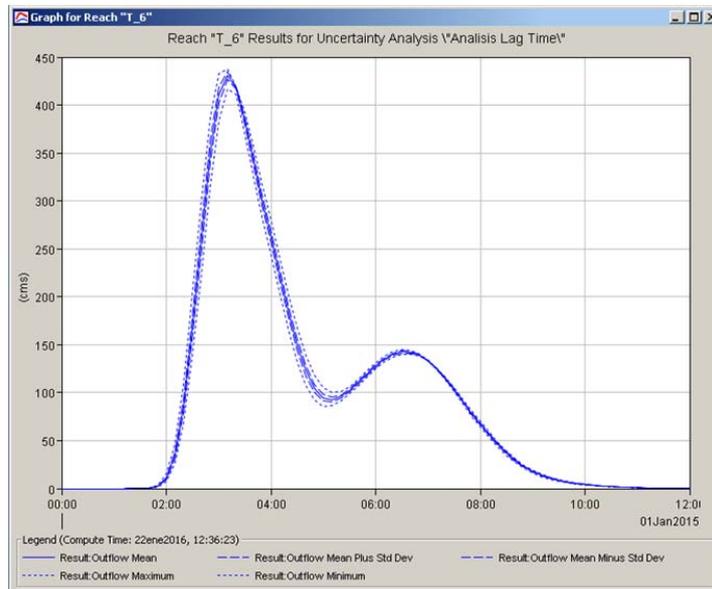


Figura 4.27 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis Lag Time

4.6.4 Sumidero

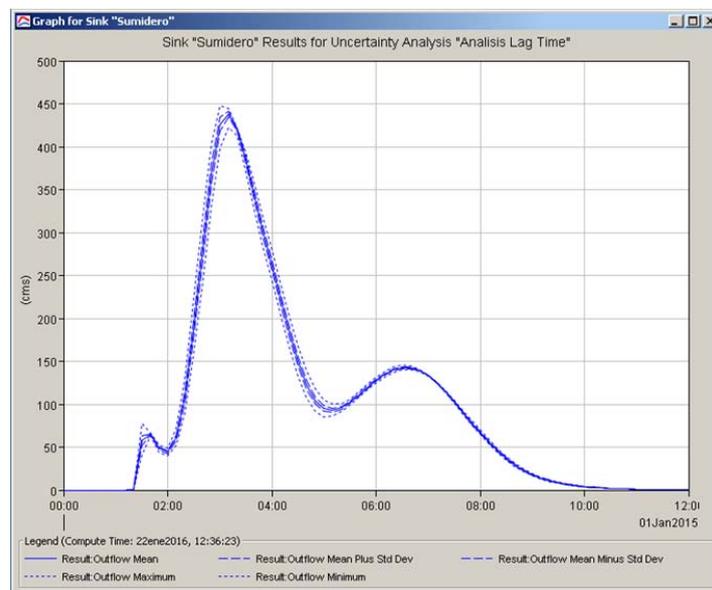


Figura 4.28 Resultados Incertidumbre T_6, Análisis Lag Time

En general los resultados obtenidos para el análisis del Lag Time no tienen mayor discrepancia entre los obtenidos inicialmente. La desviación establecida en este caso es del 10% de la media y al parecer los cambios en el Lag Time no tienen mucha influencia en el comportamiento de la cuenca.

4.7 Análisis para $X=0.5$

A continuación se hace una simulación con una modificación en el método de Muskingum que consiste en variar únicamente el valor de X , subiéndolo a 0.5 con el fin de analizar el comportamiento de la cuenca ante la variación mínima de un parámetro en el tránsito de crecientes.

Se modificarán los valores de X en todos los tramos de la cuenca y se simulará normalmente, luego se hace análisis de incertidumbre.

4.7.1 Resultados simulación



Figura 4.29 Simulación U_2 con $X=0.5$

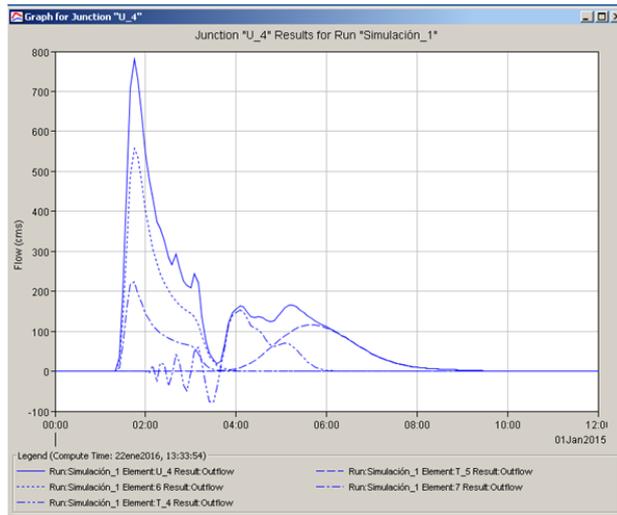


Figura 4.30 Simulación U_2 con $X=0.5$

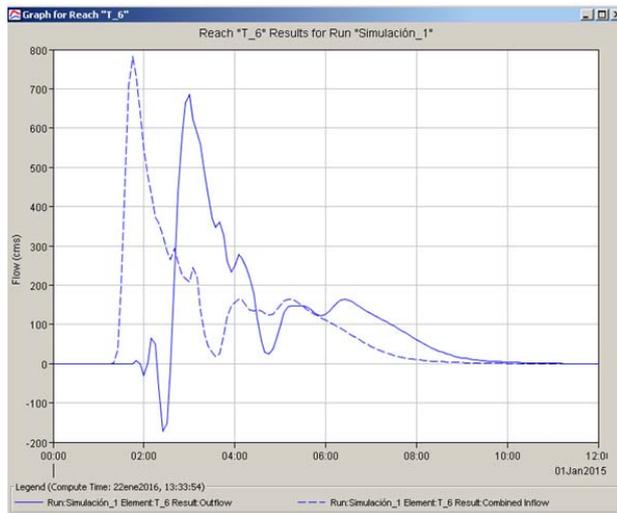


Figura 4.31 Simulación U_2 con $X=0.5$

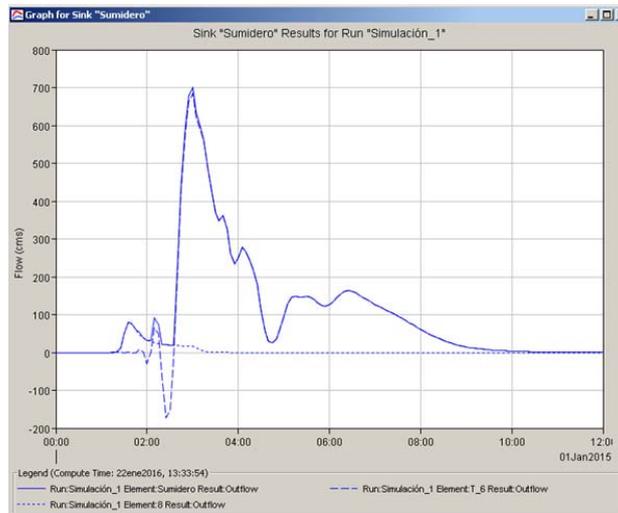


Figura 4.32 Simulación U_2 con $X=0.5$

Existen datos negativos en tres de los cuatro resultados negativos, se puede ver la influencia que tiene éste parámetro en el modelo y en la respuesta de la cuenca. Se presentan varias inestabilidades en la simulación, lo recomendable claramente es reducir el valor de X ; en general debe cumplirse lo siguiente:

$$2 X K < \Delta t < K$$

Cuando $X=0.5$ entonces:

$$K < \Delta t < K$$

Y lo anterior no se cumple bajo las condiciones establecidas, por esto se presentan dichas inestabilidades.

5. CONCLUSIONES

Para realizar un estudio comparativo es necesario tener datos de caudales medidos a la salida de la cuenca, para poder comparar entre datos modelados y datos reales. De esta manera se puede determinar con más precisión la incertidumbre que existe en los datos hidrológicos e identificar la fuente de posibles errores.

El valor de la incertidumbre se determinará teniendo en cuenta la desviación estándar y caudal máximo (que este caso sería teórico) de los resultados obtenidos en la rutina de simulación, sin embargo determinar la incertidumbre del modelo hidrológico de forma global en toda la cuenca es muy complicado dada la cantidad de datos que se manejan, el espacio muestreado, el tiempo de estudio y el intervalo de tiempo de simulación. En un solo intervalo de tiempo pueden tenerse características modificadas de las 8 subcuencas adicionando el número de parámetro que se quieran analizar y sin tener la posibilidad de comparar los datos con los tomados en el punto de interés, es difícil llegar a conclusiones concretas. Sin embargo, aunque se tengan datos reales de caudales pueden haberse generado errores en alguna parte del proceso y existirá algún grado de incertidumbre en la modelación hidrológica.

La estabilidad del modelo puede influir en la incertidumbre calculada. Es decir, para ajustar un modelo hidrológico a la realidad no es simplemente aplicar un conjunto de formula y modelos adaptados, es necesario conocer lo que se encuentra detrás de dichos modelos sin desconocer la naturaleza de los procesos naturales que son sistemas dinámicos muy cambiantes.

Una gran aplicación del módulo de incertidumbre en el HEC – HMS tiene que ver con los análisis de riesgo. Es decir, inundaciones, sequias, falla de presas, etc, ya que se puede analizar e identificar los procesos en los que requieran más atención y análisis profundo,

no solo tránsito de crecientes sino también otras variables hidrológicas que puedan ser determinantes y sensibles a cambios en una cuenca.

A pesar de que no se tienen datos observados de caudales en los puntos de interés, con los datos obtenidos es posible determinar un grado de incertidumbre en la respuesta de la cuenca a partir de los caudales máximos. En caso de que existan dichos datos es posible llegar a conclusiones concretas, dar un paso adelante simplificando los análisis y calibrar un modelo para minimizar la incertidumbre, de esta manera se tendrá más confiabilidad en el diseño de estructuras o intervenciones en la cuenca.

El parámetro más sensible a los análisis realizados es el Número de Curva ya que con una desviación relativamente pequeña (10%) se presentaron cambios significativos que podrían requerir un análisis más profundo o con más detalle para análisis posteriores.

Bibliografía

- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Editorial Mc Graw Hill: Bogotá, Colombia.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogota: Mc Graw Hill.
- García, J. R. (2012). *Cálculo de la incertidumbre estándar mediante*. México: Revista Electrónica Nova Scientia.
- Hernández, G. D. (2009). *Cálculo de la incertidumbre por simulación de Monte Carlo en la determinación de aflatoxina B1*. Nicaragua: Universitas, Volumen 3.
- Jenning, M. (1982). *Urban Stormwater Hydrology*. Washington: Water Resources Monograph 7, American Geophysical Union.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- OIML. (2008). *Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. Paris - Francia: International Organization Of Legal Metrology.
- Orduña, F. (2007). *Aplicaciones de software SIG: ArcGIS 9.2. Lección 1:*. UNIGIS Girona. 9ª ed.: Girona, España.
- Pizarro, R. (2009). *Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del maule*. Chile: Aqua -LAC Vol 1.
- Puerta, R. (2011). *ArcGis Básico 10*. Tingo María, Perú: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Smith, D. (1997). *Statistical modeling approach to passive microwave rainfall retrieval*. Journal of Applied Meteorology. Vol. 37.

UNESCO. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América de sur. Oficina Regional de Ciencias y Tecnología de la UNESCO para América latina y el Caribe*. Montevideo. Uruguay: Unesco.

Vargas, R. (1997). *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.