

**MODELAMIENTO DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS BAJO ESCENARIOS CLIMÁTICOS,
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
GIS-HYDROBID**

AUTOR:

ÁLVARO FERNEY GONZÁLEZ ROA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. DAVID SANTIAGO PEÑA GARCÍA



**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2.022

Contenido

1. Objetivos	4
1.1 Objetivo General	4
1.2 Objetivos Específicos	4
2. Introducción	5
3. Marco de Referencia	7
3.1 Q-GIS	7
3.2 Hydro-BID	7
3.2.1 Calibración de Hydro-BID	8
4. Capítulo 1. Generalidades y Métodos de Aplicación	9
4.1 Área de Estudio – localización de la cuenca	9
4.2 Caso de Aplicación General	10
4.3 Modelo - Etapa previa QGIS + HYDROBID	11
4.3.1 Obtención de datos programa QGIS (instructivo del paso a paso)	12
4.3.1.1 Alistamiento inicial, carga de archivos y ficheros.	12
4.3.2 Modelación software HYDROBID.	36
4.3.2.1 Descripción de la zona de estudio y recopilación de la información.	36
4.3.2.2 Localización de las estaciones de la Cuenca.	37
4.3.2.3 Obtención, Alistamiento y Ajuste de Datos	39
4.3.2.4 Calibración, Simulación, Validación y Análisis de Resultados del Modelo en HydroBID	41
4.3.2.5 Calibración	42
4.3.2.6 Simulación en HydroBID.	44
4.3.2.7 Análisis de Sensibilidad	50
4.3.2.8 Calibración y Ajuste de Resultados Obtenidos de la Simulación en HydroBID	52
4.3.2.9 Escenarios para el caso de la modelación con valores extremos	53
5. Capítulo 2. Resultados	58
5.1 Análisis de sensibilidad	58
5.2 Calibración y Ajuste de Resultados Obtenidos de la Simulación en HydroBID	59
5.3 Escenarios para el caso de la modelación con valores extremos	62
6. Capítulo 3. Análisis de Resultados	65
6.1 Análisis de resultados	65

6.1.1 Resultados del Modelamiento.....	65
6.1.2 Balance Hídrico.	65
6.2 Calibración y Ajuste de Resultados Obtenidos de la Simulación en HydroBID.....	70
6.2.1 Curva de Duración de caudales.....	72
6.2.2 Gráfico de Dispersión Ajustado.....	72
6.2.3 Hidrogramas Diarios y/o Mensuales.	72
6.3 Escenarios para el caso de la modelación con valores extremos.....	73
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	75
7.1 Conclusiones.	75
7.2. Recomendaciones.	76
8. Bibliografía y Referencias.....	78

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Validar el modelamiento de un sistema hidrológico bajo escenarios climáticos, mediante el uso, la aplicación e implementación del Sistema de Información Geográfica **GIS-HydroBID**.

1.2 Objetivos Específicos

Definir el origen, tipo y formato de los datos de entrada al software, aplicables en el modelamiento y simulación de escenarios de cambio climático, ECC, en Colombia.

Validar la capacidad de modelamiento climático de GIS-HydroBID aplicado a una cuenca en Colombia (Caso de Aplicación General).

2. Introducción

Tomando como base los pronunciamientos de la Organización de las Naciones Unidas, O.N.U., durante la 64a. Asamblea General, en la que se declaró *“El derecho humano al agua y el saneamiento”*, teniendo como precedente que el agua es fuente de vida y el acceso equitativo es un componente fundamental y esencial del disfrute de todos los derechos humanos; *“Exhorta a los Estados y las organizaciones internacionales a que proporcionen recursos financieros y propicien el aumento de la capacidad y la transferencia de tecnología por medio de la asistencia y la cooperación internacionales, en particular a los países en desarrollo, a fin de intensificar los esfuerzos por proporcionar a toda la población un acceso económico al agua potable y el saneamiento”* (O.N.U. GAOR, 2.010).

En este contexto, el Banco Interamericano de Desarrollo, BID, junto con la Secretaría de Estado para Asuntos Económicos de Suiza, SECO, la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, COSUDE, Fundación PEPSICO, el Ministerio Federal de Finanzas de la República de Austria, Finance, Cooperación Española y RTI International, desarrollaron la herramienta predictiva **GIS-HydroBID** para el diseño y modelamiento de sistemas hidrológicos bajo escenarios climáticos, cambio poblacional y efectos antropogénicos en las cuencas, el cual permite estimar la capacidad hídrica superficial en cuencas y subcuencas de América Latina y el Caribe, como parte de una estrategia para asegurar la sostenibilidad, la sustentabilidad y la implementación de prácticas mejoradas en la administración de recursos hídricos en la región.

HydroBID trabaja junto con la plataforma libre QGIS, Java Platform y una base de datos SQL, que relaciona los datos geográficos dentro del software, para analizar la disponibilidad de volúmenes y caudales a varias escalas. Hasta el año 2.021, había sido aplicado en Argentina, Brasil, Ecuador, Guatemala y Perú. De manera adicional, se estaban realizando evaluaciones sobre algunos casos piloto en colaboración con institutos y universidades de Colombia, Paraguay, Chile y Venezuela.

HydroBID se ha presentado como una herramienta digital de alta tecnología creada por el BID para apoyar la gestión y la planificación eficiente de los recursos hídricos. Es una tecnología disponible de manera gratuita, presente en más de 23 países de Latinoamérica y el Caribe.

Con esta herramienta se pueden realizar simulaciones hidrológicas con datos reales de cada país o región. También permite visualizar y medir riesgos como inundaciones y sequías, con el fin de desarrollar planes de mitigación, rehabilitación y obras de infraestructura hídrica, y evaluar la disponibilidad de agua de cuencas, sub – cuencas, aguas subterráneas, superficiales, pronosticar los efectos del cambio climático y como afecta a este recurso.

Estos datos permiten conocer la disponibilidad del agua para la creación de planes y soluciones que permitan mejorar su gestión. A través de esta herramienta se podrá estimar la disponibilidad de agua dulce, planeación de embalses, simular la interactividad de las aguas superficiales y subterráneas, evaluar los efectos del cambio climático y cómo se ve afectada la disponibilidad de este valioso recurso; además, es posible realizar análisis de calidad del agua, generación y transporte de sedimentos, como parte de la buena toma de decisiones para el futuro de una obra de infraestructura con gran impacto social y ambiental.

Esta herramienta es importante y el principal motivo de esta investigación es aplicarla en la formulación de los diferentes proyectos, que van enlazados a obras de infraestructura hídrica, con el fin de realizar una verificación del comportamiento de las cuencas, de los cambios climáticos, de las afectaciones antropogénicas que son los causantes directos de los daños ambientales, para que a tiempo se pueda determinar la causa y se proyecten planes para mitigarlos.

3. Marco de Referencia

3.1 Q-GIS

Es un sistema de información Geográfica, El cual fue creado en mayo de 2.002 por la fundación Open Source Geospatial Foundation (OSgeo), es un software libre y de uso gratuito para la organización, almacenamiento, análisis y modelacion de datos espaciales y datos abierto, que sirve para amplias área de trabajo, en especial esta creado como software para el alistamiento de datos necesarios que genera el QGIS, donde se aísla la cuenca de estudio, las líneas de flujo, establece los catchements o microcuencas que componen los (COMID) y la generación de resultados de los Catchment_centroides.csv para uso en HydroBID.

3.2 Hydro-BID

Es una herramienta creada por el BANCO IBEROAMERICANO DE DESARROLLO para apoyar a America Latina y el caribe, para el manejo de la simulación y planificacion del recurso hidrico. Hydro-BID, es un sitema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos en la región de America Latina y el caribe Bajo escenarios de cambio (climatológico, poblacional y de uso de suelos). (Nalesso & Coli, 2.018)

Esta herramienta permite evaluar la cantidad y calidad del agua, el tipo y necesidades de infraestructuras y diseños de estrategias y planes de mitigación para los diferentes proyectos relacionados con este recurso.

Para el uso de Hydro-BID, Se requiere de la obtención de datos y archivos en formato .csv (separados por comas), de precipitación (mm), temperatura (°C), Caudal (m3/s), software que solo es compatible con el tipo de entrada de valores medios diarios.

Hydro-BID permite realizar interpolación de series de tiempo de temperatura y precipitación de las estaciones climatológicas de cada una de las subcuencas, mediante las coordenadas y centroides de cada estación.

3.2.1 Calibración de Hydro-BID

La base de datos de Hydro-BID, se encuentra parametrizada y precalibrada utilizando valores provenientes de bases de datos regionales, por esta razón el proceso de calibración y validación es necesario para garantizar que el modelo represente lo más correctamente posible a la realidad. (Nalesso & Coli, 2.018, pág. 42)

En esta fase final los parámetros y los valores recomendados para calibrar el modelo simulado son los siguientes.:

Tabla 1

Parámetros de calibración de Hydro-BID.

Fuente: Banco interamericano de desarrollo (como ir ajustando parámetros de calibración Hydro-BID), año 2.017.

Parámetro	Descripción	Valor recomendado
• Número de Curva (NC):	Parámetro utilizado para caracterizar el tipo de uso del suelo y representar la hidrología del terreno. Se asigna un número de curva a cada subcuenca de la base de datos.	0.8 a 1.2.
• Contenido de Agua Disponible (CDA o AWC):	Estima la cantidad de agua que puede almacenarse en el suelo para ser utilizada por las plantas, afectando a la infiltración en las aguas subterráneas. Se asigna un valor asignado a cada subcuenca en la base de datos.	0.2 a 1.2.
• Coefficiente de Recesión (R o r):	Caracteriza cómo el agua subterránea cerca de la superficie contribuye al caudal de los ríos después de un evento de grandes caudales.	0.001 a 0.75.
• Coefficiente de Percolación, Pérdidas o Filtración (Seepage, Seep o s):	Es el intercambio entre las aguas subterráneas cercanas a la superficie y las aguas subterráneas más profundas.	0.005 a 0.1.

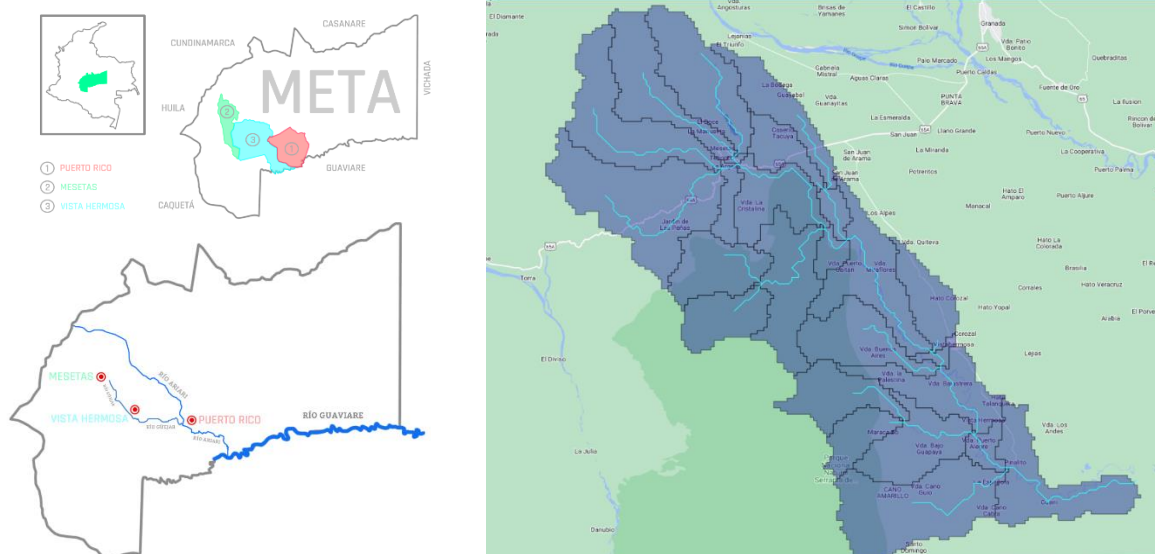
Parámetro	Descripción	Valor recomendado
• Factor de ET (Evapo-Transpiración) en Temporada de Cultivo (o la estación de crecimiento):	Se utiliza para simular el efecto de la variación de la ET debida crecimiento de las plantas/cultivos en determinados períodos del año.	0.5 a 1.5.
• Factor de ET (Evapo-Transpiración) de la Estación de Letargo (o Latente):	Se utiliza para simular el efecto de la variación de la ET en los períodos del año en los que el crecimiento de las plantas/cultivos se detiene en su mayor parte debido a las condiciones ambientales.	0.5 a 1.5.
• Umbral de temperatura:	Temperatura mínima necesaria para la precipitación y acumulación.	1 %.
• Factor de fusión:	Se utiliza para relacionar la temperatura media diaria con el proceso de fusión de la nieve	1 %.

4. Capítulo 1. Generalidades y Métodos de Aplicación

4.1 Área de Estudio – localización de la cuenca

La cuenca del río Güejar se encuentra ubicada en el sur del departamento del Meta, sobre la cordillera oriental y sierra de la Macarena, esta cuenca nace en la parte alta de la zona montañosa del parque natural de la macarena, cuenca que inicia en las montañas del municipio de Lejanías, pasando por los municipios de Mesetas, Vista hermosa y desembocando en el río Ariari a la altura del municipio de Puerto Rico, es una de las cuenca con mayor caudal y ocupa un área aproximada de 2892.81 Km².

Mapa 1 Ubicación de la cuenca río Güejar. Fuente: autor



4.2 Caso de Aplicación General.

Para la realización de este estudio se realizó una revisión detallada de la documentación generada y suministrada directamente por líder del Proyecto HydroBID, Ing. Mauro Nalesso, del Banco Interamericano de Desarrollo, BID, Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente, División de Agua y Saneamiento Parte 1, 2 y 3, Notas Técnicas IDB-TN-528 (Rineer, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F. y Muñoz-Castillo, R., 2.014)., e IDB-TN-529 (Moreda, F.,2.014).

Una vez realizada la revisión documental, se tomó la opción de explorar la información existente, contactar de manera personal o hacer una solicitud directa a cada dependencia sobre algunas cuencas en Colombia y los datos disponibles de temperatura media diaria, precipitación y caudal en la base de datos del IDEAM, a través del Sistema de Información para la Gestión de Datos Hidrológicos y Meteorológicos, DHIME (Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales (IDEAM), s.f.), al igual que el catálogo nacional de estaciones hidrometeorológicas a través del portal de: Datos Abiertos GOV.CO (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2.021), sin resultados favorables, en las Corporaciones Autónomas Regionales, CAR, de los departamentos de Cundinamarca (con dos respuestas favorables y solamente una viable) y Boyacá (sin respuesta), la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare, CORNARE (respondieron pero no suministran ese tipo de información).

Posteriormente, se consultó directamente en la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena, CORMAGDALENA, (sin respuesta), la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena, CORMACARENA (respuesta con un resultado muy favorable) y finalmente en el sitio Web del Sistema de Información del Recurso Hídrico, SIHR, Sección: Observatorio de Aguas Superficiales portal del (Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales (IDEAM), s.f) sin resultado favorable alguno.

Una vez localizada la información que pudiera ser útil para este proyecto, se encontraron dos escenarios. En el primero, sobre la Cuenca alta del Río Bogotá, en el Departamento de Cundinamarca, se logró descargar información en datos promedio mensuales, desde el sitio Web de la (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), 2.020) en la Sección: Histórico de Series Hidrometeorológicas, en valores mensuales compatible, continua de manera más uniforme (menor cantidad de datos faltantes a primera vista) y común entre los años 2.005 y 2.014. En el segundo escenario, bajo solicitud directa y personal al IDEAM Sede Villavicencio, el Ing. Jorge Enrique Duque Cabrera aportó al proyecto un paquete de datos en formato digital con información media diaria de algunas estaciones ubicadas en la Cuenca Media y Alta del Río Güejar en el Departamento del Meta, la cual es compatible, continua de manera uniforme (menor cantidad de datos faltantes a primera vista) y recopilada en un período común entre los años 1.995 y 2.004.

Con los datos obtenidos anteriormente se tomó la decisión de realizar la aplicación del segundo caso para que el lector o usuario pueda consultarlo como referencia o punto de partida para futuros proyectos.

4.3 Modelo - Etapa previa QGIS + HYDROBID

Se da inicio para la generación de los datos que se requieren del programa QGIS, para el uso del modelamiento en el Software HydroBID, programa que depende uno del otro.

Los pasos son primero el alistamiento de datos necesarios que genera QGIS, donde se aísla la cuenca de estudio, las líneas de flujos, establece los catchements o microcuencas que la componen (COMID) y la generación de resultados de los Catchment_centroides.csv para uso en HydroBID.

4.3.1 Obtención de datos programa QGIS (instructivo del paso a paso)

4.3.1.1 Alistamiento inicial, carga de archivos y ficheros.

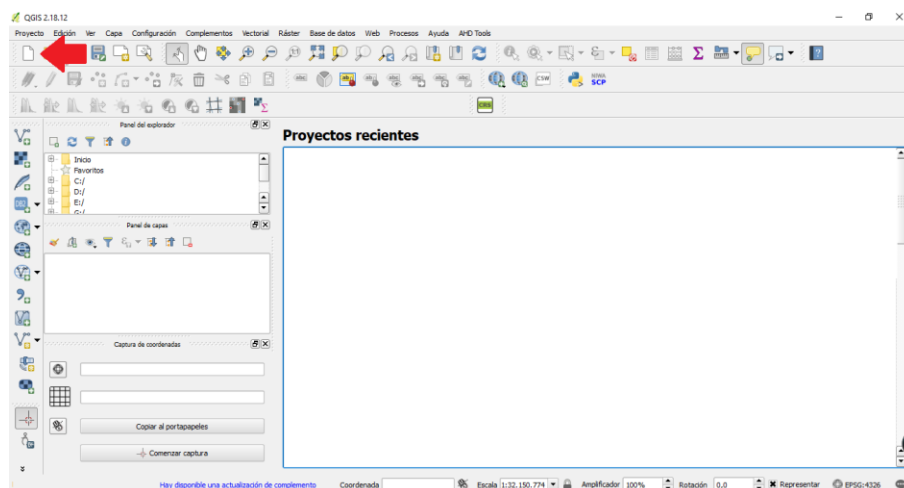
Dentro de la carpeta **Mis Documentos/Hydrobid**, se crea una carpeta con la clave del proyecto. En este caso **GUEJAR_ESTUDIO**. Se recomienda No utilizar caracteres o símbolos especiales en los nombres de los archivos, tales como tilde, diéresis (ü), ñ, guion alto (-) o símbolos matemáticos (+, -, /, etc.), ya que el módulo de programación de base de HydroBID no los reconoce y puede generar errores.

Ubicar en **Escritorio**, la carpeta **QGIS 2.18.02** y abrir el programa: **QGIS Desktop 2.18.12**.

Una vez abierto, se hace clic en la opción **Nuevo Proyecto**.

Figura 1

Ventana de inicio, QGIS 2.18.02.



Sobre la barra de menú, se selecciona la opción **Proyecto/Guardar como...** y dentro de la carpeta de **Hydrobid/GUEJAR_ESTUDIO**, se crea una nueva carpeta con el nombre clave del proyecto y los elementos de QGIS que se generan. En este caso, se llama **QGIS_GUEJAR**. Luego, dentro de esta se crea el archivo del proyecto: **qgis_guejar_meta** y se hace clic en

Guardar. En esta carpeta se deben cargar todos los archivos, imágenes, capas (.shp o shapes), archivos de base de datos (.dbf) y demás elementos que requiera el nuevo proyecto.

Nota: si el proyecto se va a visualizar siempre en el mismo PC, no es necesario crear copia de los archivos existentes en este. Solo se recomienda para los casos que se desee visualizar, enviar, mover o compartir el archivo en otros PC's.

Las carpetas y/o archivos a cargar o guardar son:

COL_CUENCAS_2012 (Carpeta completa)

De la carpeta **Mis Documentos/HydroBID3.0/AHD Files/South América**, se deben cargar o copiar los siguientes elementos:

Carpeta **Catchments** (Completa)

Carpeta **Connectivity Table** (Completa)

Carpeta **Flowlines** (Completa)

Base de datos general: **SouthAmericaComplete_hi_res_no_met_obs.sqlite**

El contenido, uso e importancia de estos archivos se describe brevemente a continuación.

- **catchment.shp:** delimitación de las cuencas hidrográficas.
- **AHDFLOWLINE.shp:** delineación de los arroyos (solo el arroyo principal de cada cuenca).
- **AHDFlow.dbf:** tabla de conectividad entre cada cuenca y cada arroyo.
- **AHDFlow.dbf** es utilizado por la herramienta AHDNavigation para delinear automáticamente las áreas y las rutas de drenaje.
- **AHDNavigation Tool** fue desarrollado para QGIS y debe ser probado para su posible aplicación en productos ESRI.

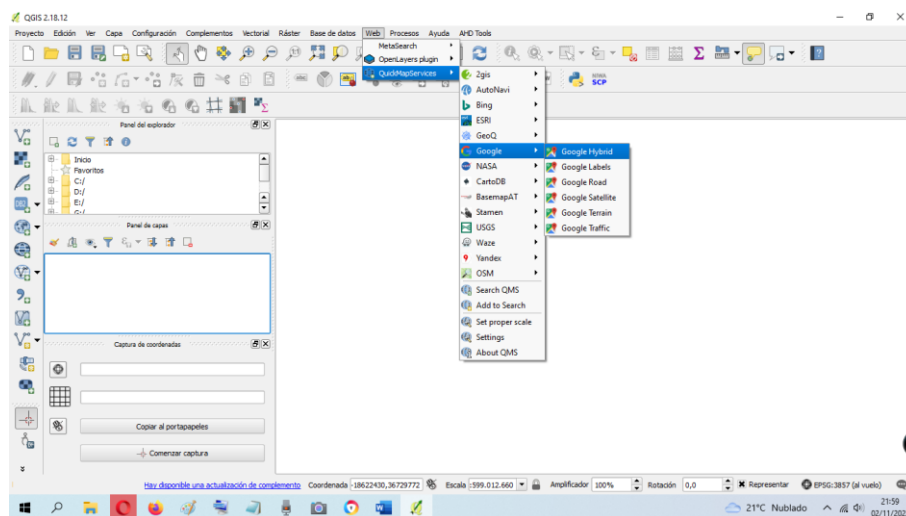
- El sistema de referencia de coordenadas está establecido para **WGS 84 EPSG: 4326**.

La base de datos **SouthAmericaComplete_hi_res_no_met_obs.sqlite** (en su última versión, 2.020), ya contiene la tabla de conectividad entre cuencas **catchment_navigation** (**fromCOMIDtoCOMID**), al igual que una tabla con datos para Suramérica sobre la cubierta del suelo (tipo y uso de suelo) según la recopilación y clasificación de la *National Land Cover Database*, U.S.A.) nombrada como **catchment_nlcd_soils**.

Antes de iniciar, se recomienda adicionar una capa que contenga un mapa físico para facilitar la ubicación de la cuenca en estudio. Esto se hace a través de la barra de menú, opción **Web/QuickMapServices/Google Maps/Google Hybrid**.

Figura 2

Ventana para insertar capa de mapa físico del Colombia o área a estudiar, QGIS 2.18.02.

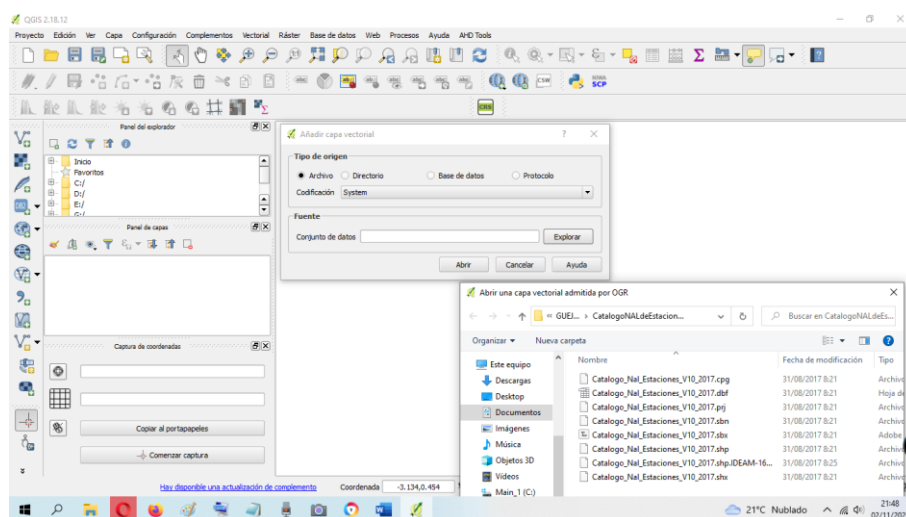


Para iniciar el nuevo proyecto, el segundo paso es añadir los elementos antes mencionados al *stage* o mesa de trabajo de QGIS. Esto se hace de la siguiente manera:

En la barra de menú, se selecciona la opción **Capa/Añadir Capa/Capa Vectorial...** al hacer clic, aparece una ventana y sobre ella se da clic nuevamente en **Explorar** para ubicar los archivos previamente cargados en la carpeta de trabajo **qgis_guejar_meta**.

Figura 3

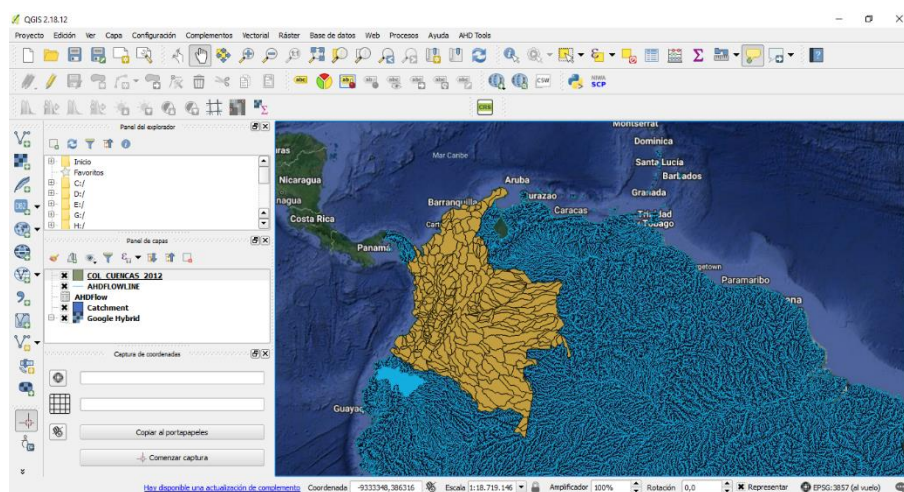
Ventana para añadir capa vectorial, QGIS 2.18.02.



Uno a uno, se añaden: **South América/Drainage/Catchment.shp**, **Conectividad Table/AHDFFlow.dbf**, **South América/hydrography/AHDFLOWLINE.shp** y **COL_CUENCAS_2012/COL_CUENCAS_2012.shp**. En este punto, sobre la parte izquierda de la mesa de trabajo de QGIS, se deben visualizar las siguientes capas:

Figura 4

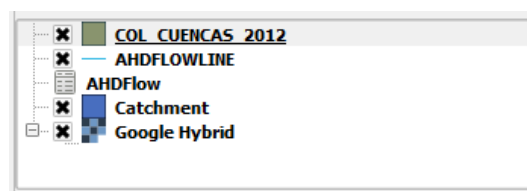
Ventana de visualización de las capas, QGIS 2.18.02.



Y en detalle:

Figura 5

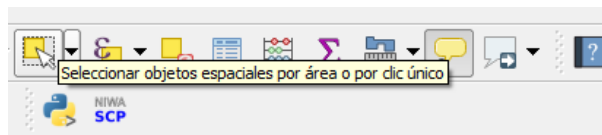
Ventana de panel de capas, QGIS 2.18.02.



Ahora, se ocultan las capas **AHD_FLOWLINE** y **Catchment** para hacer una exploración más fácil. Al tiempo, se modifican las propiedades de la capa **COL_CUENCAS_2012**, dando un nivel de transparencia que permita explorar sobre el mapa físico de fondo. En este momento, es posible navegar sobre cada capa por separado y ubicar el Río Güejar sobre **Google Hybrid**. Posteriormente, seleccionando la capa **COL_CUENCAS_2012** se marca la cuenca del Río Güejar. El marcado o selección de la cuenca debe hacerse teniendo el puntero del mouse con la opción **Seleccionar objetos espaciales por área o clic único** la barra de menú.

Figura 6

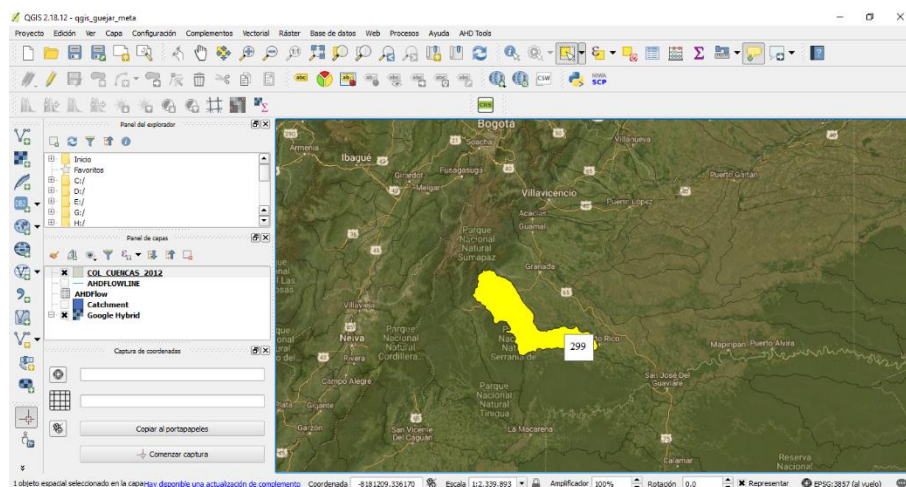
Ventana donde se encuentra el icono de selección de objetos espaciales por área o por clic único, QGIS 2.18.02.



Con esta opción, es posible demarcar la cuenca del Río Güejar, tal y como se muestra en la siguiente figura 7.

Figura 7

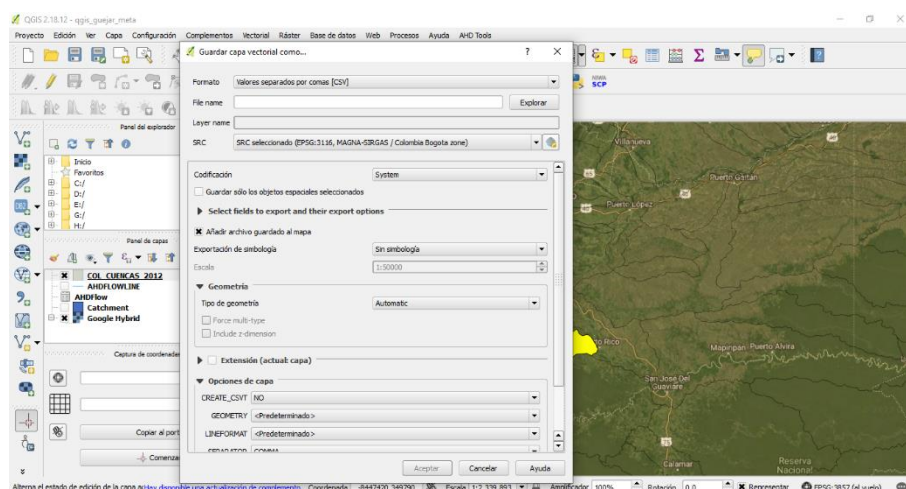
Ventana de inicio, donde se demarca la cuenca a Estudiar, QGIS 2.18.02.



Ahora, es necesario guardar esta cuenca en una capa nueva para focalizar el estudio. Esto se hace seleccionando la capa **COL_CUENCAS_2012** y al hacer clic derecho se escoge la opción **Guardar como...**

Figura 8

Ventana para Guardar capa vectorial como..., QGIS 2.18.02.

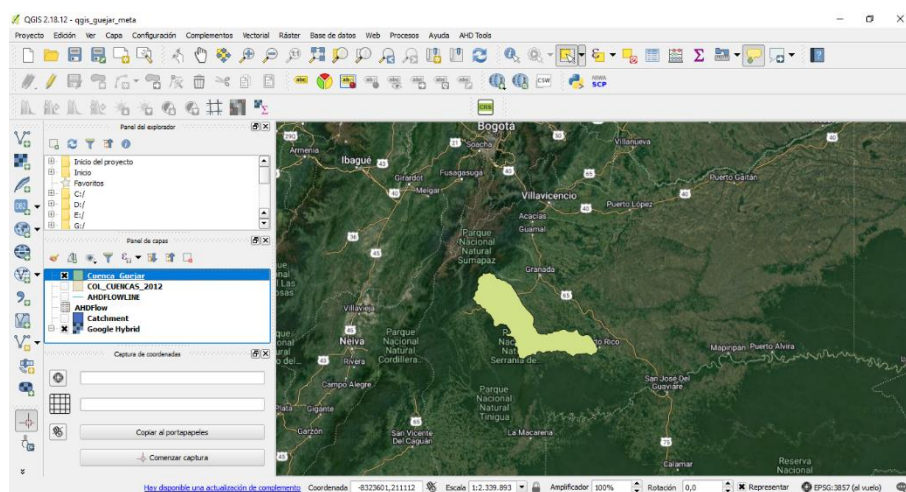


Sobre esta ventana se llenan los siguientes datos. **Formato:** Archivo shape de ESRI, en **File Name**, se hace clic en **Explorar** y se ubica el archivo en la carpeta de trabajo **qgis_guejar_meta**, se asigna el nombre **Cuenca_Guejar**, clic en **Guardar**, de nuevo en la ventana, en **SRC** se marca la opción: **SRC del proyecto (EPSG:4326 – WGS 84)**, en la sección **Codificación** se marca con una **X** la opción **Guardar sólo los objetos espaciales seleccionados**; para terminar y guardar la cuenca se da clic en **Aceptar**.

Ahora, se desmarca o invisibiliza la capa **COL_CUENCAS_2012** y el resultado es el que se muestra en la siguiente figura 9.

Figura 9

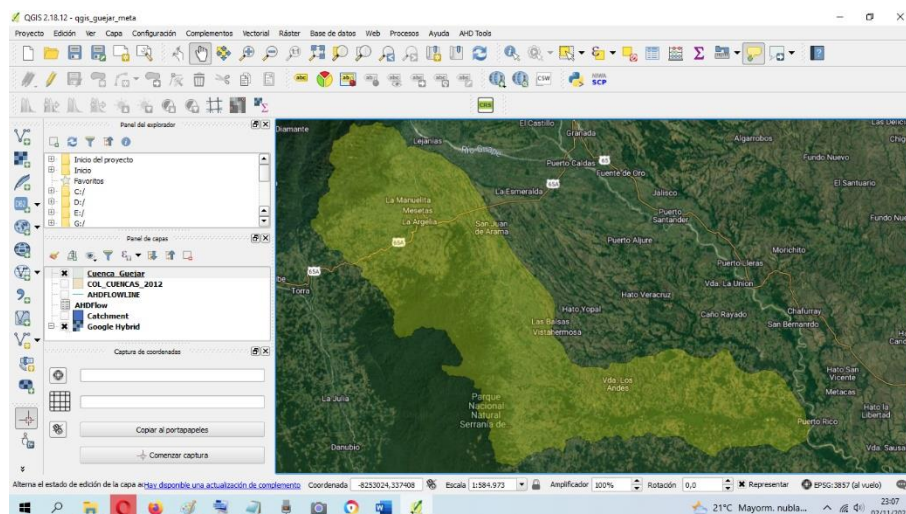
Ventana de inicio, donde se demarca o invisibiliza la capa, QGIS 2.18.02.



De igual manera, se modifican las propiedades de la capa para darle transparencia y seguir ubicando los demás elementos; en su orden, los COMID o subcuencas que componen la cuenca media y alta del río Güejar de este caso de estudio y las líneas de flujo aguas arriba desde Piñalito (Vereda ubicada al Sureste de Vista Hermosa), punto escogido como cierre o caudal de salida, tomando como base la información suministrada por IDEAM Villavicencio.

Figura 10

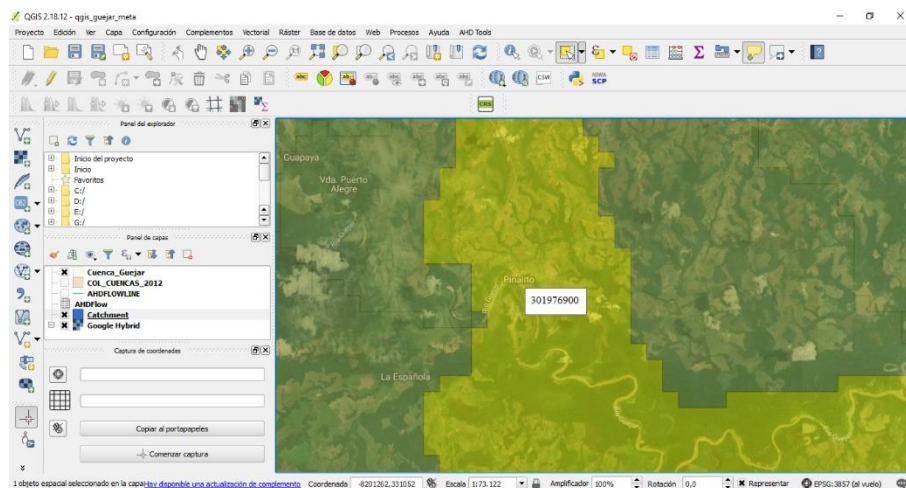
Ventana de inicio, propiedades para la transparencia de las capas, QGIS 2.18.02.



Por lo tanto, ahora se debe ubicar Piñalito y el COMID de cierre en este punto. Para esto, se visualiza nuevamente la capa **Catchment**. Se modifican sus propiedades aplicando un nivel de transparencia del 60 o 70 % y, sobre esta capa, con la herramienta **Seleccionar objetos espaciales por área o clic único** de la barra de menú, se hace clic sobre Piñalito. El resultado inicial es el COMID de salida, marcado con el número **301976900**, tal y como se muestra en la siguiente figura 11.

Figura 11

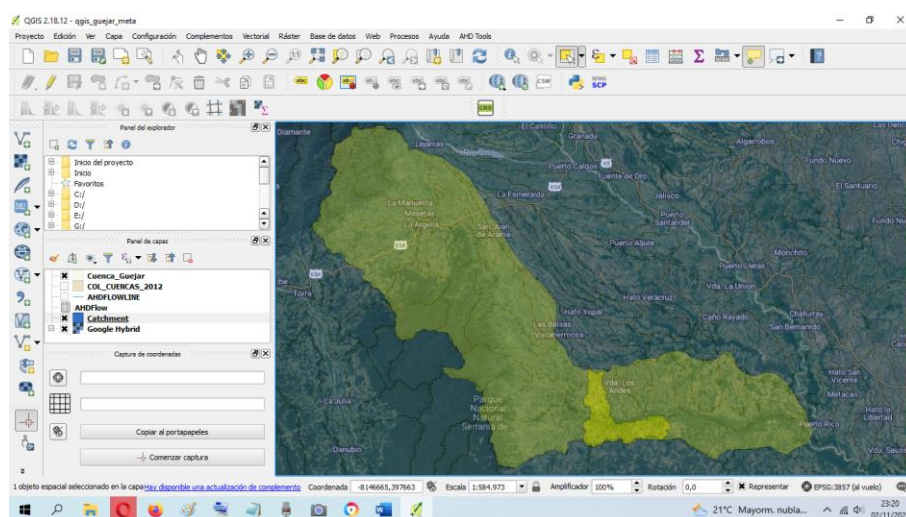
Ventana de inicio, ubicación del COMID de Salida de la cuenca de estudio, QGIS 2.18.02.



Y ampliando la figura, se puede obtener su ubicación con respecto a la cuenca completa del río Güejar, antes demarcada y aislada.

Figura 12

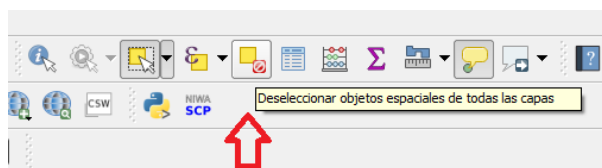
Ventana de inicio, ubicación de la cuenca de estudio (demarcada y aislada), QGIS 2.18.02.



Para identificar los COMID que componen la cuenca del Río Güejar, aguas arriba desde Piñalito, primero se debe desmarcar el COMID de cierre (**301976900**) nuevamente; lo cual se consigue al hacer clic sobre con la herramienta **Deseleccionar objetos espaciales de todas las capas**, ubicado en la barra de menú, tal y como se muestra en la siguiente figura 13.

Figura 13

Ventana donde se encuentra el icono de deselección de objetos espaciales de todas las capas, QGIS 2.18.02.

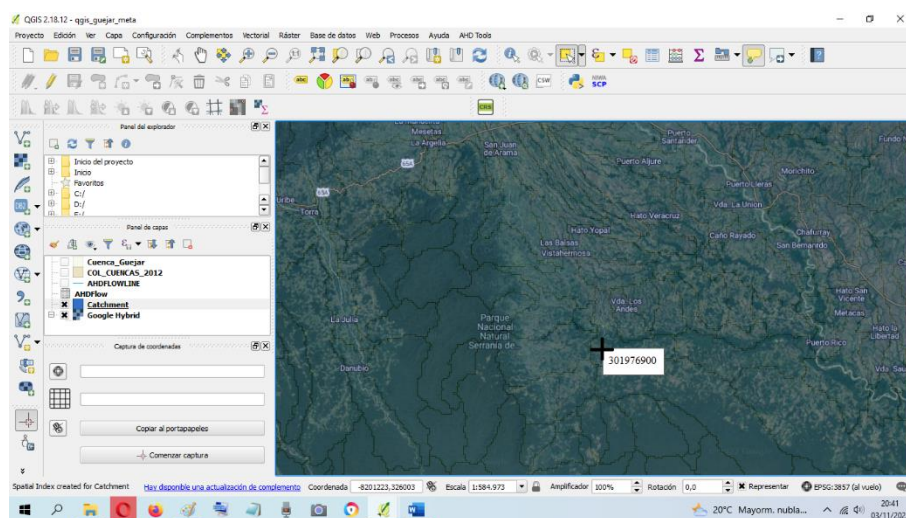


Ahora, la mesa de trabajo está lista para usar la herramienta **ADH Tools/AHD Navigator** de la barra de menú. Sobre la ventana emergente, primero, se hace clic sobre **Reinicializar** para recargar las capas y bases de datos. En el campo **ADH Flow Table...** se

deja la opción **AHDFlow**, que aparece por defecto. Luego, en la opción **Geometry Layer...** se marca la capa de origen, en este caso **Catchment**. En el submenú **Navigate Direction...** se marca la opción **Upstream** (aguas arriba). El paso final es activar con una **X** la opción **Activate (Check)** y esperar unos segundos hasta que el puntero del mouse se convierta en un signo de suma grande (+) al pasarlo sobre alguna sección del mapa o mesa de trabajo de QGIS, al tiempo que el navegador actualiza y carga datos en la ventana, luego se oculta de manera temporal esperando que se haga clic sobre el COMID de salida. El resultado se muestra en la siguiente figura 14.

Figura 14

Ventana emergente / Reinicializar, QGIS 2.18.02.

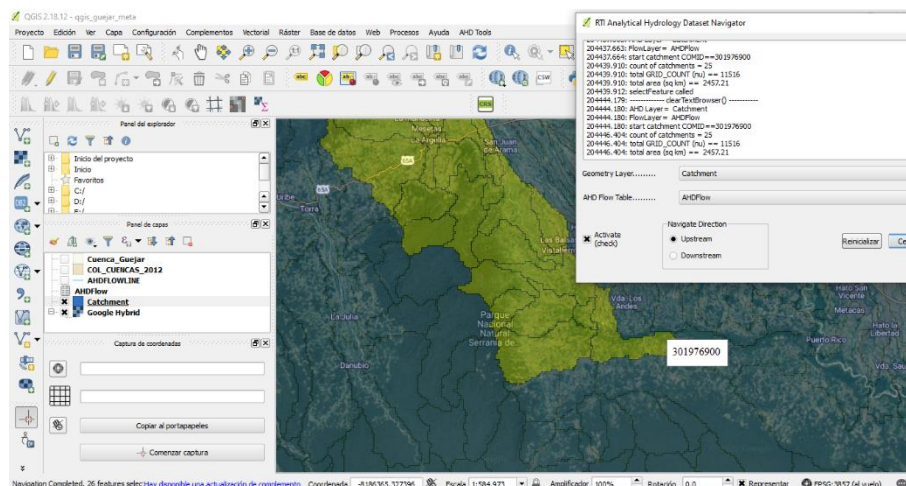


Lo siguiente es hacer clic sobre el COMID de salida en Piñalito o al pasar sobre el mapa y leer el mensaje emergente con el número **301976900**. Una vez se hace clic sobre el COMID de salida, el puntero se convertirá en un círculo de espera (circular, reloj de arena o el asignado según la configuración o versión del PC) y pasados unos segundos, reaparecerá la ventana del Navegador de AHD Tools, mostrando en su ventana principal la información sobre el número de subcuencas o COMID aguas arriba desde el punto de cierre o salida, su área total y otros datos.

Al mismo tiempo, sobre la capa **Catchment**, se resaltarán todos los COMID que hacen parte de la cuenca del Río Güejar, aguas arriba, desde Piñalito. El resultado de este paso se muestra en la siguiente figura 15.

Figura 15

Ventana del Navegador de AHD Tools, QGIS 2.18.02.



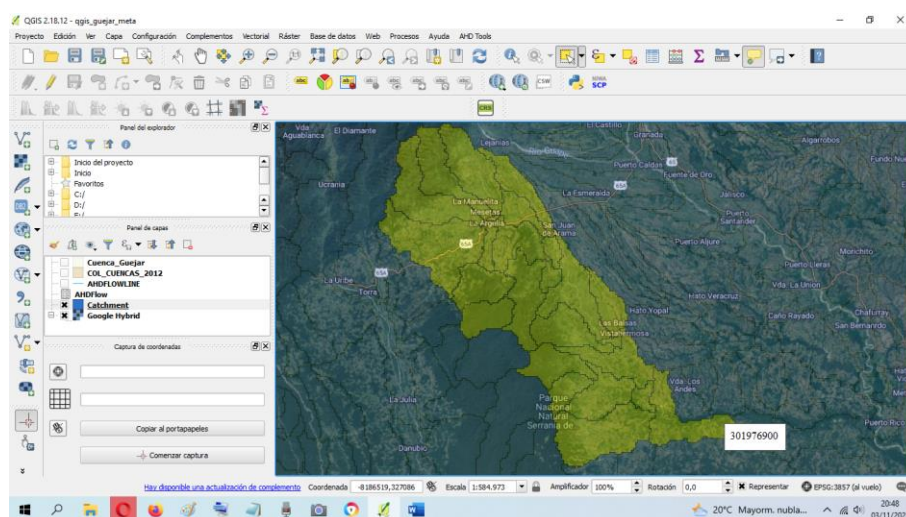
De este resultado se toman algunos apuntes importantes como:

- **start catchment COMID = 301976900** → COMID de inicio o cierre de captación.
- **count of catchments = 25** → Recuento de cuencas.
- **Total área (sq km) = 2457.21** → Área total (Kilómetros cuadrados)

Una vez tomados estos datos de relevancia, se hace clic en **Cerrar** y posteriormente **Guardar**. Luego, de cada corto período de trabajo, se recomienda guardar los cambios que se hagan sobre el proyecto. En este momento, el área de trabajo debe resultar similar a la siguiente figura 16.

Figura 16

Ventana de inicio del área de trabajo, QGIS 2.18.02.



Como se observa, en esta figura se han resaltado solamente los COMID aguas arriba desde Piñalito y no todos los que conforman la cuenca.

Como siguiente paso, se debe guardar este resultado como una capa independiente. Esto se logra haciendo clic derecho sobre la capa activa (**Catchment**) y seleccionando la opción **Guardar como...** en el menú emergente.

Figura 17

Ventana de inicio capa independiente de la zona de estudio y guardar como..., QGIS 2.18.02.

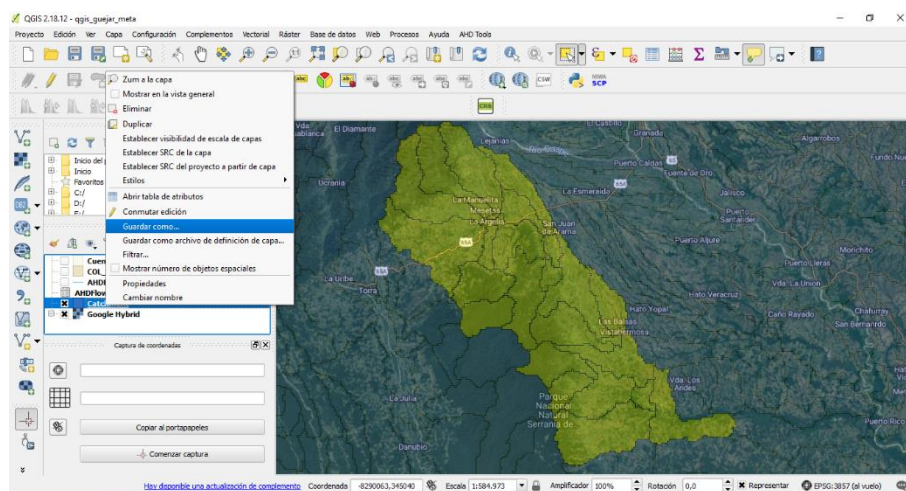
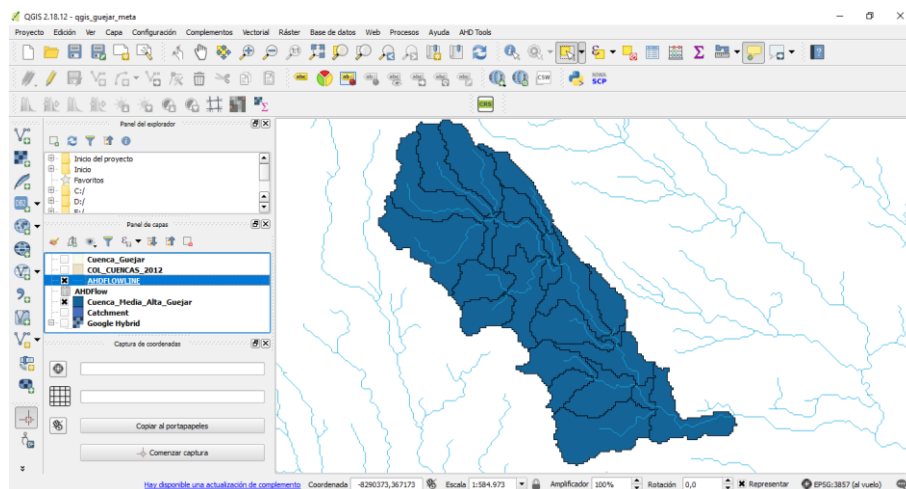


Figura 19

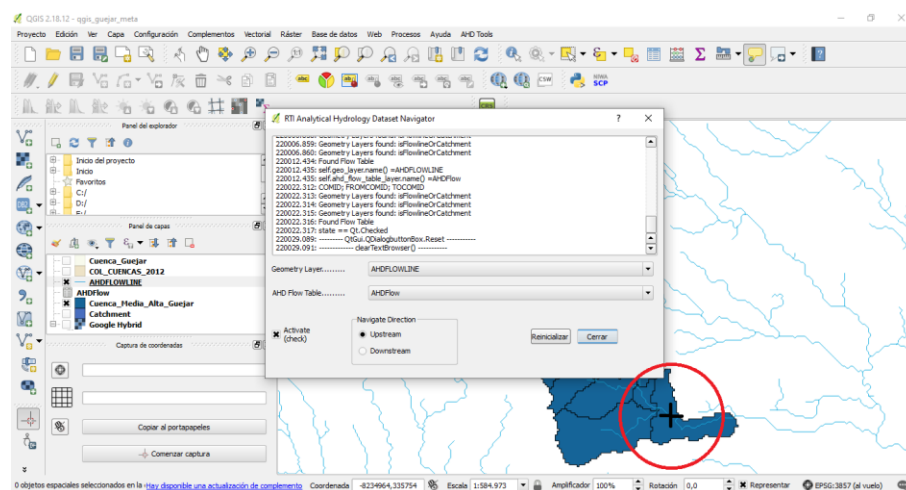
Ventana de inicio, demarcación de la capa Google Hybrid y se visibiliza la capa AHDFLOWLINE, QGIS 2.18.02



De manera similar, para aislar las líneas de flujo, se utiliza la herramienta **ADH Tools/AHD Navigator** de la barra de menú. Sin embargo, deben tenerse en cuenta los parámetros que deben ser cambiados. En este caso, sobre la ventana emergente se hace clic sobre **Reinicializar** para recargar las capas y bases de datos. En el campo **ADH Flow Table...** se deja la opción **AHDFLOWLINE**, la cual debe estar en la lista que aparece al desplegar la pestaña. Luego, en la opción **Geometry Layer...** se marca la capa de origen, en este caso aparece solamente **AHDFlow**. Por defecto. En el submenú **Navigate Direction...** se marca la opción **Upstream** (aguas arriba). El paso final es activar con una **X** la opción **Activate (Check)** y esperar unos segundos hasta que el puntero del mouse se convierta en un signo de suma grande (+) al pasarlo sobre alguna sección de la mesa de trabajo de QGIS, al tiempo que el navegador actualiza y carga datos en la ventana, luego se oculta de manera temporal esperando que se haga clic, esta vez, **“SOBRE el segmento o tramo del Río Güejar que pasa por Piñalito”** (en el COMID de salida **301976900**). Antes de hacer clic SOBRE el segmento en el COMID de cierre, el resultado debe ser igual o similar al que se muestra en la siguiente figura 20.

Figura 20

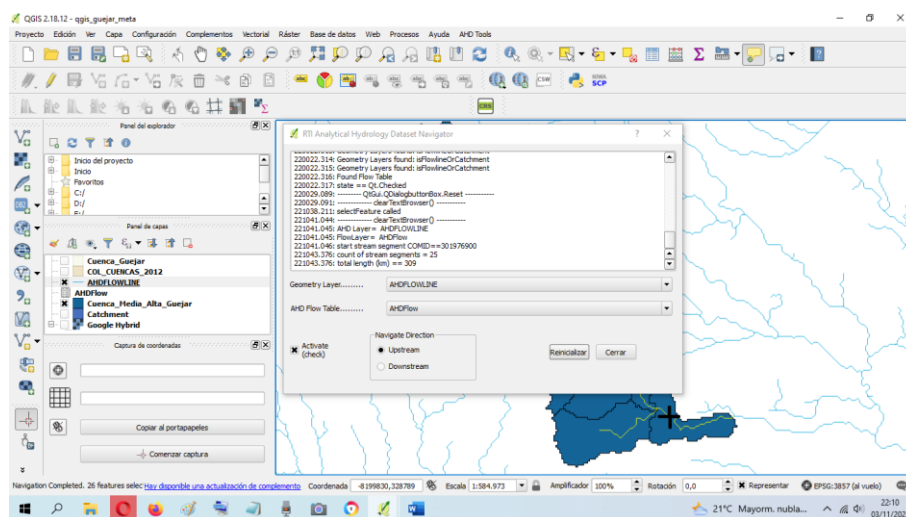
Ventana RTI Analytical Hydrology Dataset Navigator, QGIS 2.18.02



Lo siguiente es hacer clic SOBRE el segmento o línea de flujo en el COMID de salida en Piñalito. Una vez se hace clic, el puntero se convertirá en un círculo de espera (circular, reloj de arena o el asignado según la configuración o versión del PC) y pasados unos segundos, reaparecerá la ventana del Navegador de AHD Tools, mostrando en su ventana principal la información sobre el conteo del número de segmentos de las corrientes (también denominadas micro o sub-cuencas) aguas arriba desde el punto de cierre o salida, su longitud total y otros datos. Al mismo tiempo, sobre la capa **Catchment**, se resaltarán todos los segmentos que hacen parte de la cuenca del Río Güejar, aguas arriba, desde Piñalito. El resultado de este paso se muestra en la siguiente figura 21.

Figura 21

Ventana RTI Analytical Hydrology Dataset Navigator (Resultados), QGIS 2.18.02



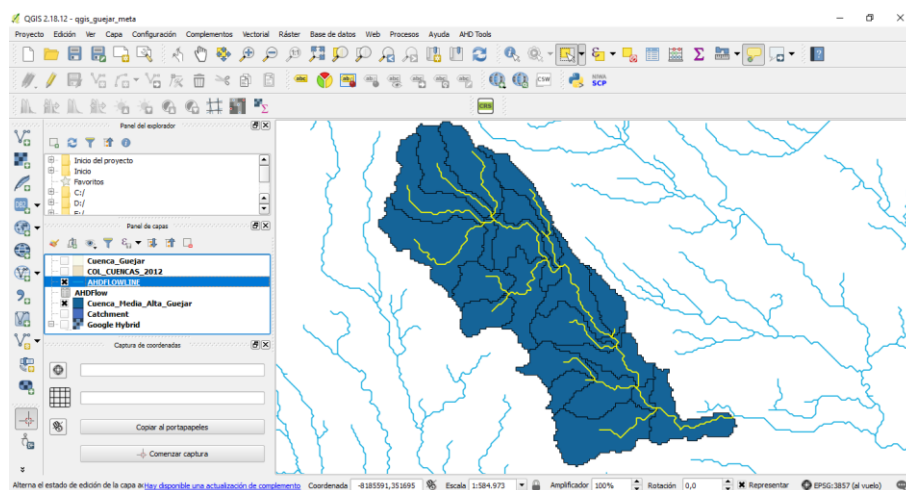
De este resultado se toman algunos apuntes importantes como:

- **start catchment COMID = 301976900** → COMID de inicio o cierre de captación.
- **count of stream segments = 25** → Recuento de los segmentos de las corrientes.
- **total lenght (km) = 309** → Longitud total (Kilómetros)

Una vez tomados estos datos de relevancia, se hace clic en **Cerrar** y posteriormente **Guardar**. Luego de este paso, el área de trabajo debe resultar similar a la siguiente figura 22.

Figura 22

Ventana de inicio, Cerra y guardar, QGIS 2.18.02

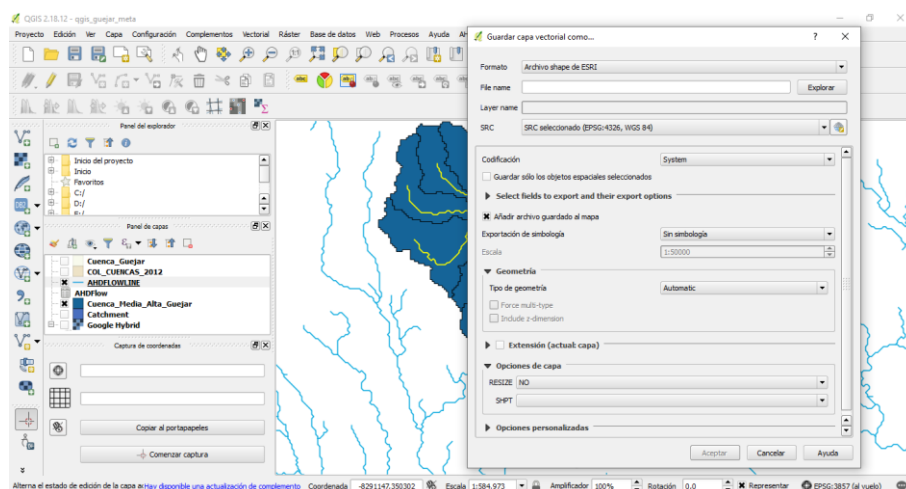


Como se observa, en esta figura se han resaltado solamente los segmentos o corrientes aguas arriba desde Piñalito y no todos los que conforman la cuenca.

Como siguiente paso, se debe guardar este resultado como una capa independiente. Esto se logra haciendo clic derecho sobre la capa activa (**AHDFLOWLINE**) y seleccionado la opción **Guardar como...**

Figura 23

Ventana de Guardar capa vectorial como..., QGIS 2.18.02

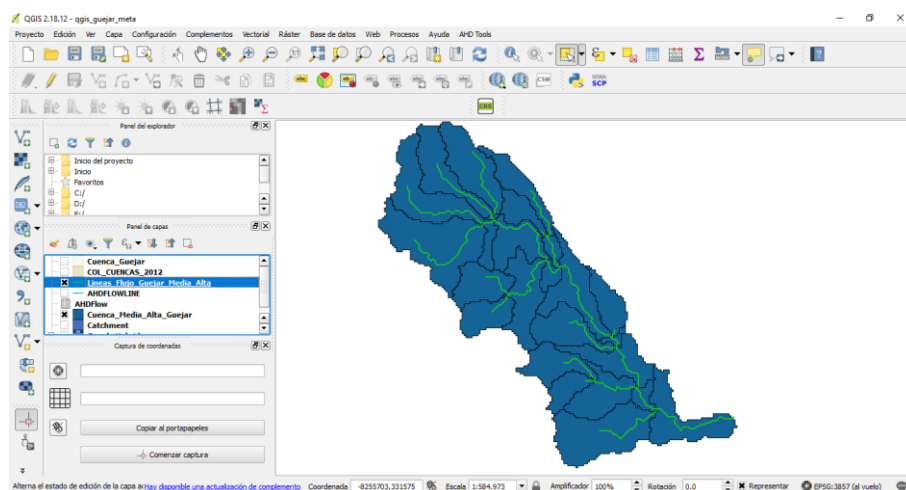


En la ventana emergente se llenan los siguientes datos. **Formato:** Archivo shape de **ESRI**, en **File Name**, se hace clic en **Explorar** y se ubica el archivo en la carpeta de trabajo **qgis_guejar_meta**, se asigna el nombre **Lineas_Flujo_Guejar_Media_Alta**, clic en **Guardar**, de nuevo en la ventana, en **SRC** se marca la opción: **SRC del proyecto (EPSG:4326 – WGS 84)**, en la sección **Codificación** se marca con una **X** la opción **Guardar sólo los objetos espaciales seleccionados**; para terminar y guardar la cuenca se da clic en **Aceptar**.

Ahora, se desmarca o invisibiliza la capa **AHDFLOWLINE** y el resultado es el que se muestra en la siguiente figura 24.

Figura 24

Ventana de inicio, donde se desmarca o invisibiliza la capa AHDFLOWLINE, QGIS 2.18.02



De este modo, se ha podido asilar el área de estudio de la cuenca Media y Alta del Río Güejar con sus respectivas líneas de flujo desde Piñalito, aguas arriba.

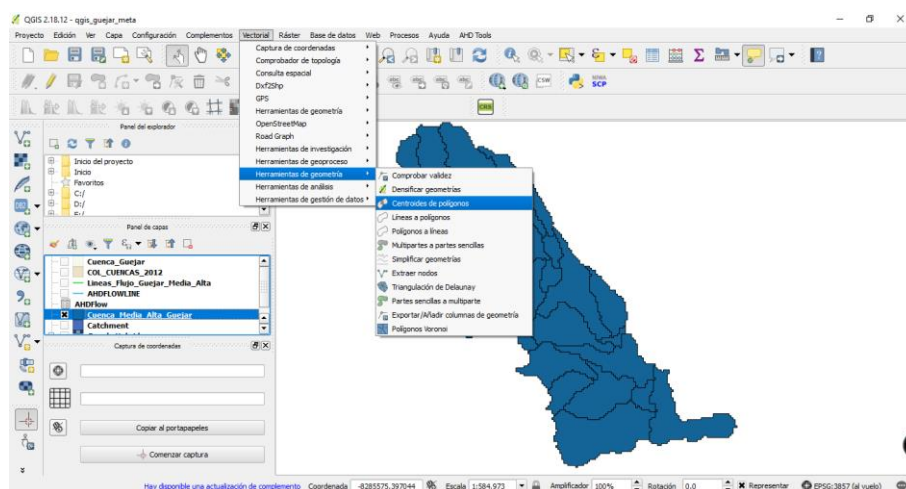
Finalmente, como requisito de entrada para HydroBID, se procede a determinar los centroides de cada uno de los COMID que hacen parte del área de estudio, los cuales deben ser exportados en un archivo de formato Valores Separados por Coma (.csv, *Comma Separated Values*), el cual debe contener como datos: **COMID**, **Longitud X** (en grados) y **Latitud Y** (en

grados). La información obtenida en este procedimiento es la base para la creación del archivo **Catchment_centroids.csv**.

El primer paso es activar la capa **Cuenca_Media_Alta_Guejar**, (por precaución, hacer clic en la herramienta **Deseleccionar objetos espaciales de todas las capas**). Enseguida se hace clic en la herramienta **Vectorial** de la barra de menú, luego ubicar el puntero sobre la opción **Herramientas de geometría** y finalmente hacer clic sobre **Centroides de polígonos**. El procedimiento es el mostrado en la siguiente figura 25.

Figura 25

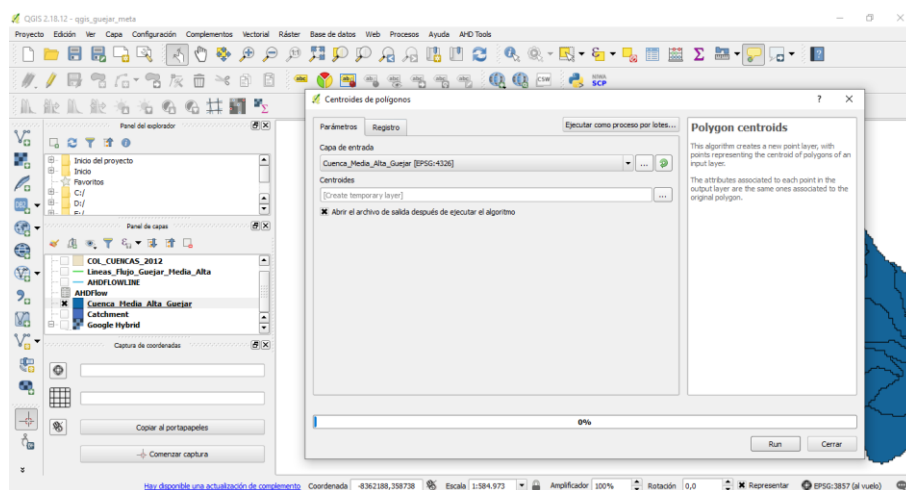
Ventana Vectorial / Herramienta de Geometría / Centroides de polígonos, QGIS 2.18.02



Una vez se hace clic, aparece la ventana emergente Centroides de polígonos mostrado en la siguiente figura 26.

Figura 26

Ventana de centroides de polígonos, QGIS 2.18.02

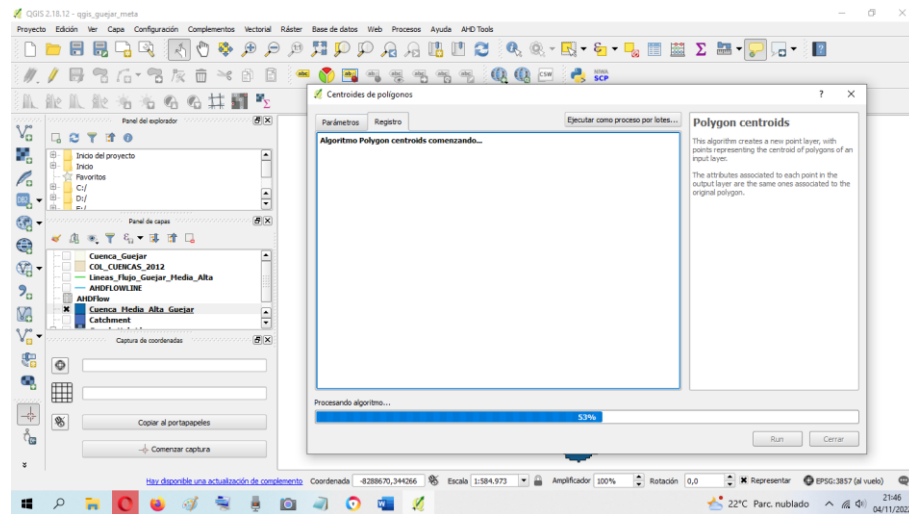


En la pestaña **Parámetros** se ubica el campo **Capa de entrada** y al desplegar la pestaña derecha (▼) se hace clic sobre la opción **Cuenca_Media_Alta_Guejar [EPSG:4326]**. El campo **Centroides** no se modifica, es decir, al dejarlo vacío solamente debe aparecer el mensaje en gris por defecto: **[Create temporary layer]** (Crear capa temporal) y, luego, señalar con una **X** sobre la opción **Abrir el archivo de salida después de ejecutar el algoritmo**. Finalmente, se da clic sobre el botón **Run** (Correr).

La ejecución de este algoritmo puede tomar unos segundos, a lo sumo un minuto, dependiendo de la capacidad de procesamiento del ordenador.

Figura 27

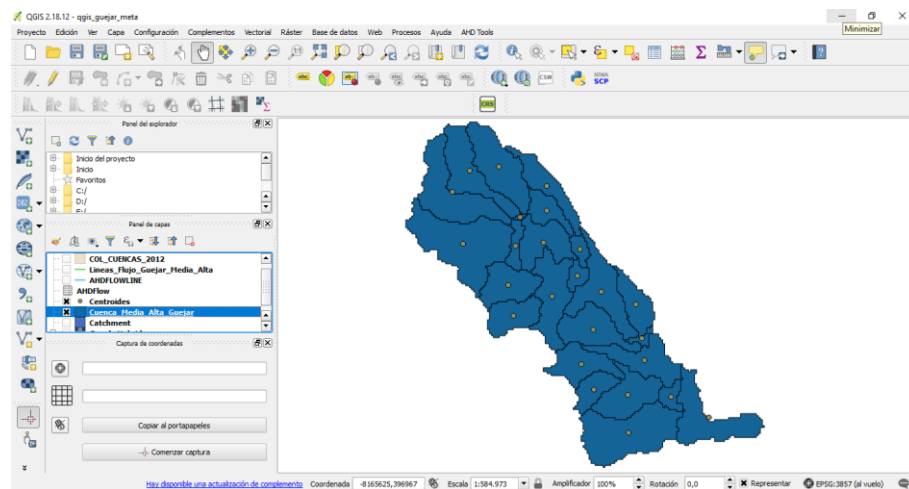
Ventana de centroides de polígonos / correr programa, QGIS 2.18.02



Una vez se ha corrido el 100 % se crea una nueva capa con el nombre **Centroides** y la mesa de trabajo de QGIS muestra una figura similar o igual a la siguiente.

Figura 28

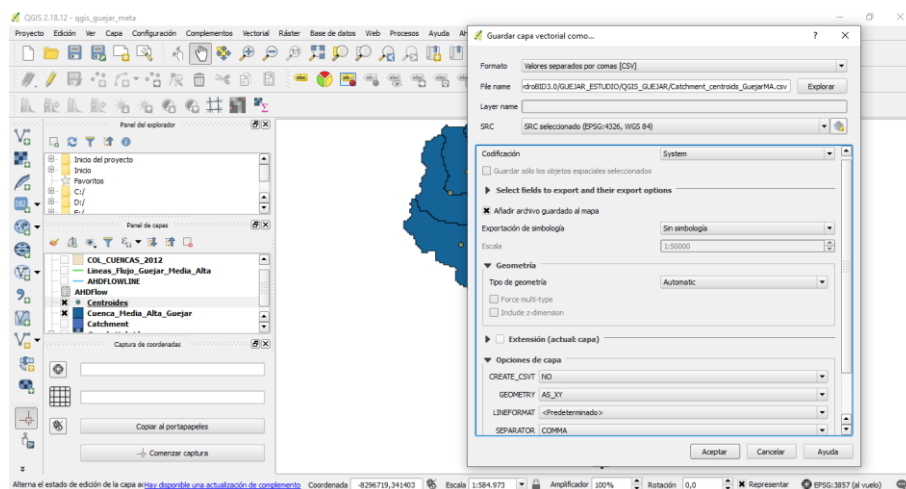
Ventana de inicio, ubicación de los centroides en la cuenca de estudio, QGIS 2.18.02



Para generar la tabla **Centroids**, se debe activar la capa **Centroides** y hacer clic derecho sobre ella. Una vez se despliega el menú, se hace clic sobre la opción Guardar como... Sobre la ventana emergente guardar capa vectorial como... se modifica el primer campo Formato, desplegando la pestaña y marcando la opción **Valores separados por comas (VSC)**. En el campo File Name, se hace clic en el botón Explorar y se ubica la carpeta de trabajo QGIS_GUEJAR, se asigna el nombre **Catchment_centroids_GuejarMA**. El campo **Layer Name** se deja vacío. El campo **SRC** debe estar configurado en el sistema **EPSG:4326, WGS 84**. En el campo **Codificación**, debe marcarse con una **X** la opción **Añadir archivo guardado al mapa**. En la sección **▼ Opciones de capa**, se modifica el campo **GEOMETRY**, marcando la opción **AS_XY** y se hace clic sobre el botón **Aceptar**. En la siguiente figura se observan los campos modificados.

Figura 29

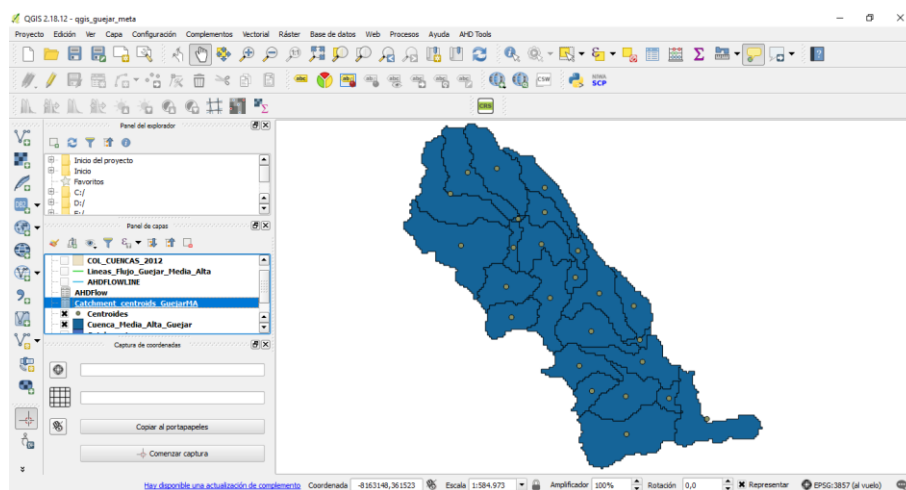
Ventana de Guardar capa vectorial como..., QGIS 2.18.02



Una vez se ha hecho clic sobre el botón **Aceptar**, se crea una nueva capa de datos, en este caso **Catchment_centroid_GuejarMA**, tal y como se muestra en la siguiente figura 30.

Figura 30

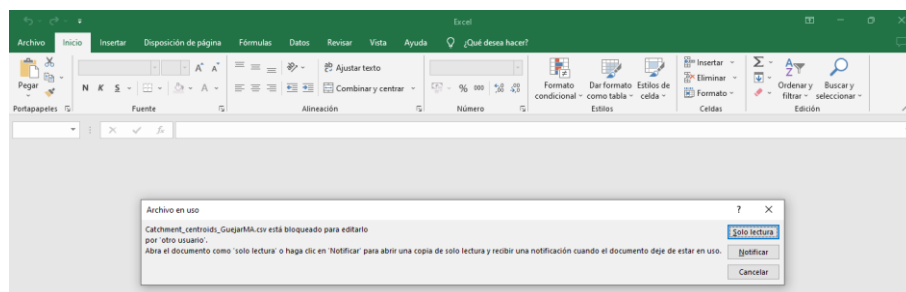
Ventana de inicio, creación de nueva capa de datos de centroides, QGIS 2.18.02



El archivo creado al exportar los datos de la capa **Centroides** y ubicado en la carpeta de trabajo se abre en modo **Solo lectura**.

Figura 31

*Ventana de inicio datos de resultados **Catchment_centroid_GuejarMA_XY.csv**, Excel.*



Una vez abierto, se guarda de nuevo con una variación del nombre, por ejemplo **Catchment_centroid_GuejarMA_XY.csv**, luego debe ser modificado y adaptado al formato exigido por HydroBID para la creación del archivo **Catchment_centroids.csv**, es decir, en el formato exportado como **X,Y,COMID,GRID_CODE,GRID_COUNT,PROD_UNIT,AREASQKM**

se deben eliminar los datos sobrantes estableciendo el orden **Centroid_x,Centroid_y,COMID**, obteniendo como resultado lo que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2

Archivo Catchment_centroids_ GuejarMA_XY.csv

X,Y,COMID,GRID_CODE,GRID_COUNT,PROD_UNIT,AREASQKM	Centroid_x,Centroid_y,COMID
-73.8573536706333,3.21242559524282,301909500,301871200,672,3,143.38700	-73.8573536706333,3.21242559524282,301909500
-73.8727250957839,3.00869252874034,301943400,301956400,261,3,55.70100	-73.8727250957839,3.00869252874034,301943400
-73.8990151515137,3.06105113636836,301943500,301941600,440,3,93.89800	-73.8990151515137,3.06105113636836,301943500
-74.052424568964,3.22695761494725,301876100,301878800,464,3,99.00400	-74.052424568964,3.22695761494725,301876100
-73.9020054517118,3.30130451713869,301861100,301853300,107,3,22.82900	-73.9020054517118,3.30130451713869,301861100
-73.786125621889,3.18688432836294,301909600,301919900,335,3,71.48200	-73.786125621889,3.18688432836294,301909600
-74.1465483539079,3.31287551440803,301859400,301846100,1215,3,259.22400	-74.1465483539079,3.31287551440803,301859400
-73.9604694928669,3.20300118859426,301876200,301868400,631,3,134.64000	-73.9604694928669,3.20300118859426,301876200
-74.0367953431357,3.30891544118118,301831000,301842600,136,3,29.01600	-74.0367953431357,3.30891544118118,301831000
-73.8011012770757,2.9177194471434,301981800,301976300,1031,3,220.04700	-73.8011012770757,2.9177194471434,301981800
-74.0416611697434,3.1625604661437,301886100,301891300,379,3,80.87300	-74.0416611697434,3.1625604661437,301886100
-73.9723604114174,3.43362195634396,301840200,301824700,397,3,84.69100	-73.9723604114174,3.43362195634396,301840200
-74.0267628205113,3.36810897436371,301829400,301839600,13,3,2.77300	-74.0267628205113,3.36810897436371,301829400
-73.8014614427845,2.99698383085049,301951300,301961900,536,3,114.39100	-73.8014614427845,2.99698383085049,301951300
-74.1689335985297,3.42048398613286,301830900,301836200,817,3,174.29100	-74.1689335985297,3.42048398613286,301830900
-73.8747537523437,3.13389227642749,301920700,301910300,533,3,113.73800	-73.8747537523437,3.13389227642749,301920700
-74.1329045110736,3.46561655862171,301826500,301803000,617,3,131.61800	-74.1329045110736,3.46561655862171,301826500
-73.9716358625147,3.38176880674924,301840100,301851100,257,3,54.82800	-73.9716358625147,3.38176880674924,301840100
-73.6328304597686,2.9496048850622,301976900,301980800,696,3,148.54400	-73.6328304597686,2.9496048850622,301976900
-73.9078124999985,3.24557291667138,301864200,301873600,112,3,23.89700	-73.9078124999985,3.24557291667138,301864200
-73.7722630718939,3.1153186274557,301918600,301925600,51,3,10.88300	-73.7722630718939,3.1153186274557,301918600
-73.9784956140335,3.3148114035135,301855700,301844300,475,3,101.34300	-73.9784956140335,3.3148114035135,301855700
-73.7679069390387,3.0699254215352,301949900,301933300,514,3,109.68700	-73.7679069390387,3.0699254215352,301949900
-74.0718086987255,3.47419554455921,301826600,301792800,707,3,150.81600	-74.0718086987255,3.47419554455921,301826600
-73.7117708333318,2.99368055556026,301962900,301963100,120,3,25.61000	-73.7117708333318,2.99368055556026,301962900



4.3.2 Modelación software HYDROBID.

4.3.2.1 Descripción de la zona de estudio y recopilación de la información.

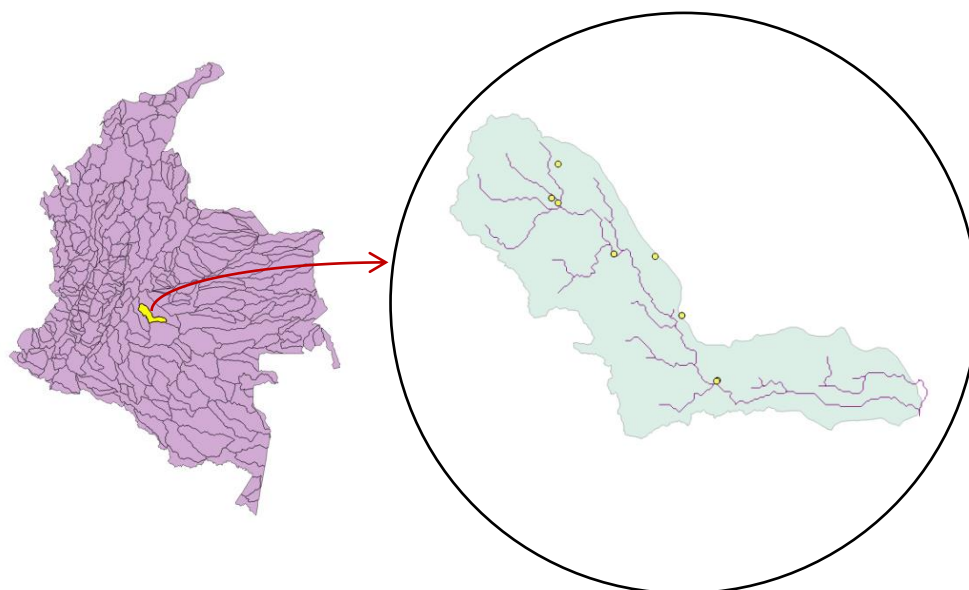
Se encontró que el IDEAM, Cuenta con mayor información disponible de datos diarios, de manera consecutiva durante los últimos 20 años. Por lo anterior, se escogió la cuenca del Río Güejar como punto de partida.

En el programa de QGIS se aisló la cuenca del Río Güejar mediante el uso del software libre QGIS, en donde pudo evidenciarse que la cuenca tiene un total de 29 subcuencas (COMID), las cuales ocupan un área aproximada de 2892.81 Km², antes de desembocar sobre

el Río Ariari en el Municipio de Puerto Rico (Meta). obteniendo la división de todas sus subcuencas, tal y como se muestra en la **figura 32**.

Figura 32

Cuenca del Río Güejar (Depto. Meta).



4.3.2.2 Localización de las estaciones de la Cuenca.

En la **tabla 3** se consignó la información relacionada con las estaciones y su localización geográfica sobre la zona de estudio, obtenida a partir del Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM.

Tabla 3

Estaciones Meteorológicas seleccionadas para el caso de la Cuenca Media del Río Güejar.

No.	ID Estación	Nombre	Ini_Datos	Fin_Datos	Lat_N (Y)	Long_W (X)
EsG_2	32070030	Los Micos	01/01/1.995	31/12/2.005	3.252210	-73.813110
EsG_3	32070120	Mesa de Fernández	01/01/1.995	31/12/2.005	3.456560	-74.029970
EsG_4	32075050	Mesetas	01/01/1.995	31/12/2.005	3.380080	-74.0430
EsG_5	32070090	Peñas Blancas	01/01/1.995	09/05/2.005	3.256220	-73.906150

No.	ID Estación	Nombre	Ini_Datos	Fin_Datos	Lat_N (Y)	Long_W (X)
EsG_6	32070040	Piñalito	01/01/1.995	31/12/2.005	2.976190	-73.675010
EsG_7	32075030	Vista Hermosa	01/01/1.995	31/12/2.005	3.1203888890	- 73.75402778
EsG_11	32077100	El Limón	01/01/1.995	01/01/2.005	3.369080	-74.029670
EsG_12	32077100	Peñas Blancas	01/01/1.995	31/12/2.004	3.2559	-73.905720
EsG_13	32077070	Piñalito	06/01/1.995	01/01/2.005	2.975480	-73.676730
EsG_21	32075050	Mesetas	01/01/1.995	01/01/2.005	3.38008	-74.043
EsG_22	32075030	Vista Hermosa	27/09/1.995	01/01/2.005	3.120388889	- 73.75402778

Mediante el uso de QGIS, se obtuvo la tabla de centroides de cada una de las subcuencas, los cuales se encuentran consignadas en la tabla 4. El caudal de salida se estableció sobre la línea de flujo del Río Güejar en el COMID **301976900** (Piñalito).

Tabla 4

Referenciación y geolocalización de subcuencas, Cuenca Media y Alta del Río Güejar.

COMID	Centroid_x	Centroid_y
301909500	-73.8573536706333	3.21242559524282
301943400	-73.8727250957839	3.00869252874034
301943500	-73.8990151515137	3.06105113636836
301876100	-74.052424568964	3.22695761494725
301861100	-73.9020054517118	3.30130451713869
301909600	-73.786125621889	3.18688432836294
301859400	-74.1465483539079	3.31287551440803
301876200	-73.9604694928669	3.20300118859426
301831000	-74.0367953431357	3.30891544118118
301981800	-73.8011012770757	2.9177194471434
301886100	-74.0416611697434	3.1625604661437
301840200	-73.9723604114174	3.43362195634396
301829400	-74.0267628205113	3.36810897436371
301951300	-73.8014614427845	2.99698383085049
301830900	-74.1689335985297	3.42048398613286
301920700	-73.8747537523437	3.13389227642749
301826500	-74.1329045110736	3.46561655862171
301840100	-73.9716358625147	3.38176880674924
301976900	-73.6328304597686	2.9496048850622
301864200	-73.9078124999985	3.24557291667138

Los datos hidrometeorológicos de la cuenca del Río Güejar se obtuvieron por solicitud directa al IDEAM Sede Villavicencio, aportando al proyecto un paquete de datos en formato digital con información diaria de algunas estaciones ubicadas en la Cuenca Media y Alta del Río Güejar en el Departamento del Meta. La información registra las variables Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Precipitación (mm) y Caudal ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), compatibles con el tipo de entrada que requiere HydroBID (valores medios diarios). En la **tabla 5** se muestra la disposición de la información suministrada y su distribución.

Datos iniciales de Temperatura (°C), Precipitación (mm) y Caudal (m.s-10) cuenca Río Güejar, Formato Excel. Fuente: IDEAM.

Una vez organizados los datos, se organizaron las tablas de Temperatura, Precipitación y Caudal en la hoja electrónica con el formato mostrado en la **tabla 6**. Los archivos deben ser guardados en formato de Valores Separados por Coma (*Comma Separated Values*, **.csv**).

Tabla 6

Formato de datos meteorológicos.

Variable (unidad)	Temperatura (°C)	Caudal (m ³ .s ⁻¹)	Precipitación (mm)
Título	Date,Temp	Date,Flow	Date,Precip_mm
Formato	dd/mm/aaaa,valor	dd/mm/aaaa,valor	dd/mm/aaaa,valor
Tipo de archivo	.csv	.csv	.csv
Muestra	01/01/2.005,14.56	17/10/2.009,0.194	19/03/2.011,21.12

El rango de tiempo establecido comprende información registrada y ajustada entre los días **01/01/1.995** y el **31/12/2.004**, debido a que es el período de tiempo con mayor información continua y común entre las estaciones seleccionadas de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar. De manera adicional se organizó el archivo **Catchment_centroids.csv** con la información sobre las 25 subcuencas hasta la estación salida de piñalito, donde se aisló la cuenca y la localización de su centroide, Latitud y Longitud en grados (*degrees*), con formato .csv. Esta información se generó mediante el uso de QGIS. Como se detalla en la **tabla 2**.

Para completar la información de entrada requerida, se creó el archivo **station_coords.csv** con un nombre simplificado o identificador para cada una de las 11 estaciones y sus respectivas coordenadas: Longitud y Latitud en grados (*degrees*), con formato .csv. Esta información se extrajo del Catálogo Nacional de Estaciones suministrado en la página Web del IDEAM.

Tabla 7

Archivo *station_coords.csv*

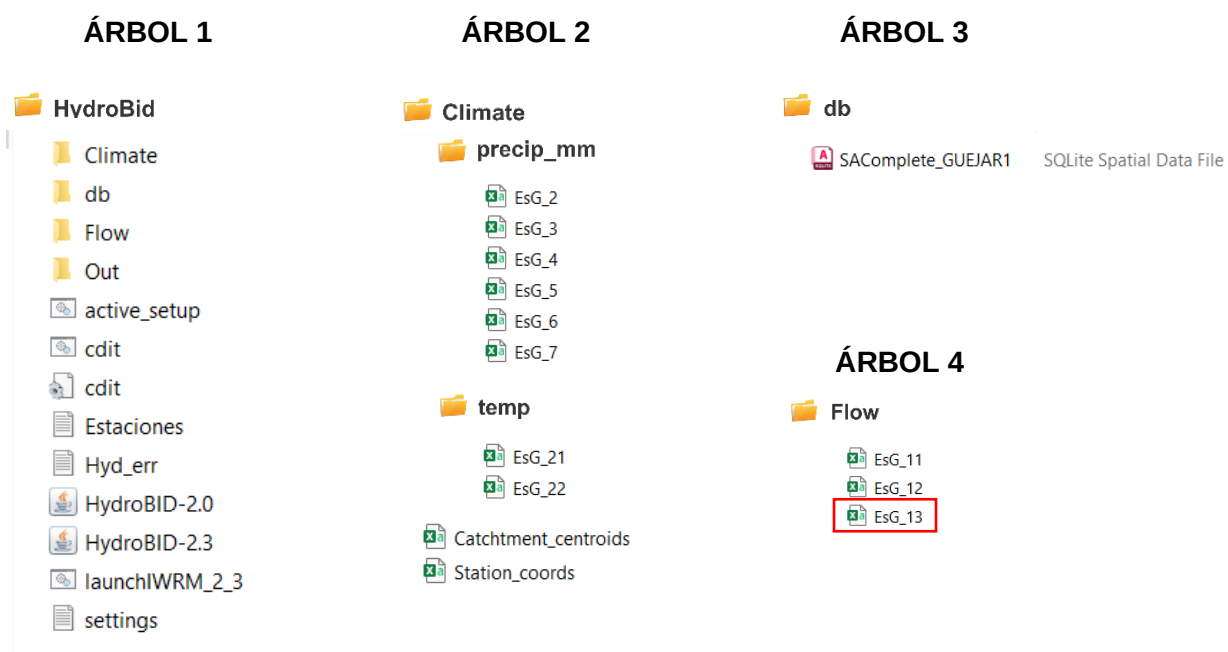
Name	Lat_deg	Long_deg
EsG_2	3.252210	-73.813110
EsG_3	3.456560	-74.029970
EsG_4	3.380080	-74.0430
EsG_5	3.256220	-73.906150
EsG_6	2.976190	-73.675010
EsG_7	3.1203888890	-73.75402778
EsG_11	3.369080	-74.029670
EsG_12	3.2559	-73.905720
EsG_13	2.975480	-73.676730
EsG_21	3.38008	-74.043
EsG_22	3.120388889	-73.75402778

4.3.2.4 Calibración, Simulación, Validación y Análisis de Resultados del Modelo en HydroBID.

Para la calibración del modelo en HydroBID se dispuso la información tabulada bajo la estructura mostrada en la **figura 33**.

Figura 33

Árbol de archivos, estructura caso Cuenca Media y Alta del Río Güejar.



Es importante aclarar que se tabuló información de caudal de 3 estaciones (Carpeta Flow), sin embargo, es suficiente trabajar con la estación de salida del sistema de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, en este caso, la localizada en la Zona de Piñalito, E13.

El archivo ubicada en la carpeta **db: SAComplete_GUEJAR1.sqlite** corresponde a la base de datos suministrada por la División de Agua y Saneamiento del BID. En esta base se encuentran todas las líneas de flujo de las cuencas y subcuencas de América Latina, conectividad entre cuencas, al igual que la información relativa al tipo, uso y distribución de suelos. Solamente es necesario crear la tabla de datos meteorológicos con la información suministrada por el usuario.

4.3.2.5 Calibración.

Una vez organizada la información de entrada con los datos hidrometeorológicos de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, se inicia HydroBID y se cargan los archivos en cada uno de los campos establecidos tal y como se indica en la **figura 34**.

Figura 34

Ventana de Configuración, HydroBID.

Para hacer la calibración del modelo, se utiliza la **Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos** que se encuentra en el Menú **Herramientas.**, cuya ventana se observa en la **figura 35**. Para hacer esta calibración, se deben llenar los espacios con la información correspondiente a cada campo, estableciendo las fechas de inicio y fin entre el **01/01/1.995** y **31/12/2.004**. Adicionalmente, se llenan los demás espacios para obtener la ruta de cada uno de los archivos solicitados.

Figura 35

Ventana Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos, HydroBID.

Una vez suministrada la información, se asignó el nombre a la tabla de salida de los datos climáticos interpolados: **GUEJAR_MET_01**, y se estableció en 2 el número de estaciones para utilizar en la interpolación.

4.3.2.6 Simulación en HydroBID.

En esta etapa, se llenan los campos correspondientes para realizar un modelamiento hidrológico en la ventana principal, tal y como se indica en la **figura 36**. Se establece las fechas inicial y final para la simulación entre el día 01/01/1.995 al 31/12/2.004.

Figura 36

Ventana de Configuración HydroBID, ajustes de simulación.

The screenshot shows the 'Hydro-BID settings.txt' window with the following configuration details:

- Opciones de Configuración:**
 - Nombre del Proyecto: GUEJAR
 - Nombre de la Corrida: GUEJAR_Meta
 - COMID: 301976900
 - Fecha Inicial (dd/mm/yyyy): 01/01/1995
 - Fecha Final (dd/mm/yyyy): 31/12/2004
 - Años de Calentamiento: 1
- Opciones de la Base de Datos:**
 - Base de Datos SQLite: db/SAComplete_GUEJAR1.sqlite
 - Tabla de Datos Climáticos: GUEJAR_META_01
 - Tabla de NC: catchment_nlcd_soils
 - Tabla de CDA: catchments
- Opciones de Flujo:**
 - Caudales Observados: Flow/EtG_13.csv
 - Carpeta de Fuentes Puntuales: (empty)
 - Puntos de Flujo Local: (empty)
- Opciones de Salida:**
 - Carpeta de Reservorios: (empty)
 - Carpeta de Resultados: Out
 - Resultados: ☒ Cuenca de Salida, ☐ Todas las Cuencas, ☐ History

Se define el COMID de la subcuenca de salida, en este caso la ubicada en Piñalito: **301976900**. Se especifica la tabla de datos climáticos creada con la herramienta de Interpolación de Datos Climáticos, **GUEJAR_MET_01**, se especifica la estación que contiene los datos de caudal observados en la subcuenca de salida, en este caso la estación **E13**. El siguiente paso es establecer unos parámetros iniciales para el modelamiento. Esto se hizo desplegando la pestaña **Parámetros del Modelo**, tal y como se indica en la **figura 37**. Inicialmente, se dejan los valores que carga el software por defecto. En el siguiente paso, se indica el procedimiento para ajustar el modelamiento.

Figura 37

Ventana Parámetros del Modelo, HydroBID.

Hydro-BID settings.txt

Archivo Herramientas Ayuda

Configuración Escenario Climático **Parámetros del Modelo** Reservorios Parámetros de Sedimentos Aguas Subterráneas Correr Modelo Salidas Hidroelectricidad

Parámetros Hidrológicos:

Velocidad del Flujo: 0.5 ☒ Obtener Latitud de la Base de Datos

Latitud (decimales): ☐ Guardar Percolación Profunda

Comienzo de la Temporada de Cultivo (día juliano): 90

Final de la Temporada de Cultivo (día juliano): 220

COMID de Calibración Aguas Arriba:

	Valor Único	Multiplicador	Usar Calibrado	Reemplazar Todos	
Numero de Curva (NC):	☐	☒	☐	☒	1
Contenido Disponible de Agua (CDA):	☐	☒	☐	☒	0.7
Coef. de Recesión/ln (r):	☒	☐	☐	☒	0.004
Coef. de Percolación (s):	☒	☐	☐	☒	0.005
Factor de ET en Temporada de Cultivo:	☒	☐	☐	☒	1
Factor de ET en Temporada Latente:	☒	☐	☐	☒	1
Porcentaje de Cobertura Impermeable:	☒	☐	☐	☒	1.0
Umbral de Temperatura:	☐	☐	☒	☐	1
Factor de Fusión:	☐	☒	☒	☐	1

Finalmente, se despliega la pestaña Correr Modelo y se da clic sobre el botón Correr.

Una vez finalizado el proceso exitosamente, aparecerá el mensaje **Finalizado**, como se indica en la **figura 38**.

Figura 38

Ventana Correr Modelo, HydroBID.

Hydro-BID settings.txt

Archivo Herramientas Ayuda

Configuración Escenario Climático Parámetros del Modelo Reservorios Parámetros de Sedimentos Aguas Subterráneas **Correr Modelo** Salidas Hidroelectricidad

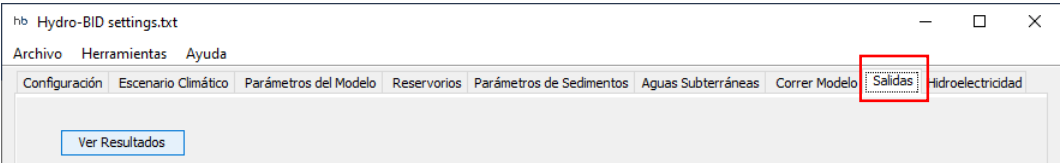
Correr

(Finalizado)

Para visualizar los resultados, se despliega la pestaña Salidas y se hace clic sobre el botón Ver Resultados que se muestra en la **figura 39**.

Figura 39

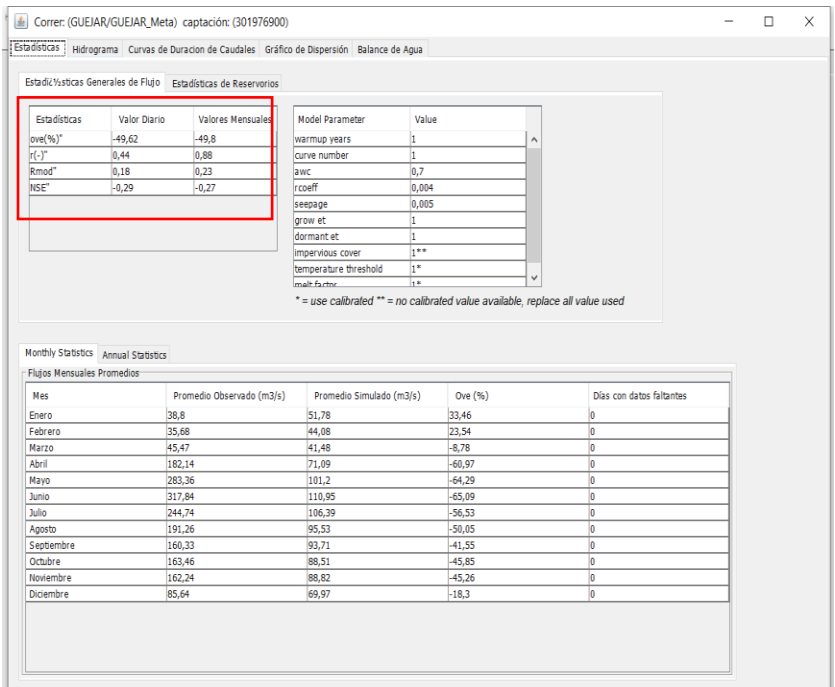
Ventana Ver Resultados, HydroBID.



Al desplegar la venta de resultados (**Correr**), se exploran las diferentes pestañas que aparecen en la **figura 40**. Por ejemplo, en la primera ventana: **Estadísticas**, aparece toda la información sobre los parámetros de la simulación: **Error Global de Volumen, Ove (%)**, **Correlación, r (-)**, **Correlación modificada, Rmod**, **Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash, J. E. & Sutcliffe, J.V. ,1.970).**, **R²** y también se incluyen los valores de los parámetros utilizados por defecto para el modelo en la simulación.

Figura 40

Ventana Correr, HydroBID.

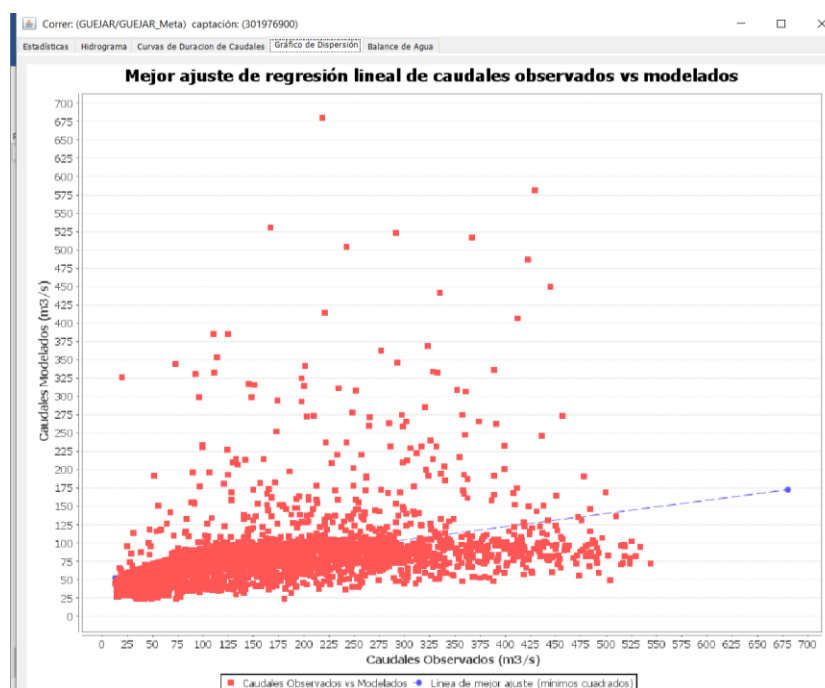


En la pestaña **Curvas de Duración de Caudales** se muestra la relación existente entre el **Caudal modelado** (azul) y el **Caudal observado** (rojo), en la subcuenca de salida (COMID **301976900**). Este gráfico indica el porcentaje de tiempo en que se iguala o supera un caudal determinado. Es útil para evaluar el rendimiento del modelo durante la calibración.

Al explorar la siguiente pestaña: **Gráfico de Dispersión (figura 41)**, es posible observar la relación existente entre los Caudales Observados (puntos rojos) y los Caudales Modelados (línea punteada azul), generados mediante el método de mínimos cuadrados o línea de mejor ajuste.

Figura 41

Gráfico de Dispersión, HydroBID.



Finalmente, la pestaña **Balance de Agua o Balance Hídrico (tabla 8)**, se genera un resumen anual de todos los parámetros incluidos en el balance hídrico (1.995 a 2.004),

incluyendo un balance de aguas subterráneas (solamente si el módulo se incluye en la simulación).

Tabla 8

Balance de Agua, resultado de HydroBID.

Correr: (GUEJAR/GUEJAR_Meta) captación: (301976900)

Estadísticas | Hidrograma | Curvas de Duración de Caudales | Gráfico de Dispersión | Balance de Agua

Unidades: Millions m3 Agregado por: Month

Rango de F...	Precipitación	Evapotrans...	Escorrentía	Descarga d...	Caudal Total	Almacenami...	Almacenami...	Contribución...	Recarga	Error de Bal...
enero 1996	8,9753E-5	2,28539E-1	0E0	3,81129E-4	3,81129E0	9,02419E-1	9,44266E1	0.0	4,74505E-1	0E0
febrero 1996	1,57604E-3	7,34182E-1	2,85207E-2	3,04817E-4	3,33338E0	1,22653E1	7,58383E1	0.0	3,79497E-1	0E0
marzo 1996	1,18316E-3	7,74239E-1	9,6672E-3	2,62461E-4	2,72128E0	1,72554E1	6,52796E1	0.0	3,26764E-1	0E0
abril 1996	2,41354E-3	7,75792E-1	1,08007E-1	3,14356E-4	4,22363E0	1,89205E1	7,94257E1	0.0	3,91374E-1	0E0
mayo 1996	4,41682E-3	7,60565E-1	3,29657E-1	5,03481E-4	8,33138E0	2,04967E1	1,28079E2	0.0	6,26834E-1	0E0
junio 1996	2,18984E-3	7,37973E-1	4,71416E-2	6,11036E-4	6,58178E0	1,9854E1	1,52776E2	0.0	7,6074E-1	0E0
julio 1996	2,75508E-3	7,2699E-1	1,68412E-1	6,3368E-4	8,02092E0	1,99374E1	1,58863E2	0.0	7,88932E-1	0E0
agosto 1996	1,87195E-3	8,60866E-1	2,53593E-2	6,61133E-4	6,86493E0	1,97468E1	1,64842E2	0.0	8,23111E-1	0E0
septiembre 1996	1,42665E-3	9,55087E-1	2,42431E-2	5,66572E-4	5,90815E0	1,61721E1	1,4079E2	0.0	7,05382E-1	0E0
octubre 1996	2,20317E-3	9,52065E-1	1,16626E-1	4,95503E-4	6,12129E0	1,82478E1	1,23843E2	0.0	6,16902E-1	0E0
noviembre 1996	3,11508E-3	9,42041E-1	2,17467E-1	5,3863E-4	7,56096E0	1,96728E1	1,35415E2	0.0	6,70594E-1	0E0
diciembre 1996	1,07364E-3	8,44036E-1	3,35265E-2	5,76188E-4	6,09714E0	1,7296E1	1,43284E2	0.0	7,17354E-1	0E0

Cada corrida o ejecución del modelo se guarda en la carpeta del proyecto y produce diez archivos **figura 42** con el nombre de la ejecución (**GUEJAR_Meta**) proporcionado en la ventana de **Configuración**. Los archivos se guardan en la carpeta **Out**. Además, se producen dos archivos relativos a las curvas de duración de los caudales observados y simulados.

Figura 42

Archivos de resultados generados por la ejecución de la simulación, HydroBID.

- flowDurationObs-301976900
- flowDurationSim-301976900
- GUEJAR_Meta-Annual
- GUEJAR_Meta-Daily
- GUEJAR_Meta-Landuse
- GUEJAR_Meta-Monthly
- GUEJAR_Meta-Outlet
- GUEJAR_Meta-settings
- GUEJAR_Meta-Spatial
- GUEJAR_Meta-summary

En donde,

- **GUEJAR_Meta-Annual:** resultados, incluida la disponibilidad de agua, por año.
- **GUEJAR_Meta -Daily:** resultados por día para cada subcuenca (COMID).
- **GUEJAR_Meta -Landuse:** distribución de los usos del suelo dentro del estudio.
- **GUEJAR_Meta -Monthly:** series temporales mensuales de precipitación, temperatura, caudal simulado y flujo observado.
- **GUEJAR_Meta -Outlet:** series temporales simuladas de las variables de salida por cuenca.
- **RunName-Settings:** muestra todos los parámetros de entrada y la configuración del modelo.
- **GUEJAR_Meta -Spatial:** resultados por cada subcuenca, o COMID
- **GUEJAR_Meta -Summary:** número total de cuencas, el área de drenaje, el tiempo de cálculo y el COMID de la cuenca de salida y el COMID de la cuenca de salida.
- **flowDurationObs-COMID:** datos estadísticos de flujo observado para el COMID de inicio dado.
- **flowDurationSim-COMID:** datos estadísticos del caudal simulado para el COMID inicial dado.

4.3.2.7 Análisis de Sensibilidad

Con el análisis de sensibilidad de cada parámetro del modelo, se busca estudiar los cambios que se producen en una variable cuando se introducen ciertas variaciones.

Con este análisis se pretende determinar cuáles serán los parámetros que tiene mayor y menor sensibilidad para el ajuste de los resultados, con el fin de encontrar el mejor caso.

Se proyectan 9 caso, buscando determinar las relaciones y variaciones de cada parámetro, con el fin de seleccionar la mejor combinación y obtener la calibración y el ajuste de los resultados que se obtiene de la simulación.

Se modelarán los casos (del cero (0) al ocho (8)) para realizar el análisis de sensibilidad, donde se optó por realizar la comparación y el análisis del error promedio, sobre los resultados de los caudales obtenidos de cada simulación **tabla 9**, con el fin de encontrar el caso de menor variación de resultados con respecto al caso 0.

Tabla 9

Escenarios, Parámetros para el Análisis de sensibilidad de HydroBID.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELAMIENTO EN HYDROBID, RÍO GÜEJAR												
ANÁLISIS NUMÉRICO												
Parámetro	Descripción	Valores Recomendados	Valor Medio	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Velocity	Velocidad promedio estimada de los segmentos fluviales.	0,5 m/s	0.5 (Por defecto)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Curve Number (CN)	Número de Curva. Controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía.	0.8 – 1.2 (multiplicador)	1.0	1	0.8	1.2	1	1	1	1	1	1
AWC Contenido Disponible de Agua, CDA	Capacidad de Campo. Activa el inicio de la percolación.	0.2 – 1.2 (multiplicador)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.2	1.2	0.7	0.7	0.7	0.7
R Coefficient (r)	Parámetro de Recesión. Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado.	0.001 – 0.75 (día-1)	0.3755	0.3755	0.3755	0.3755	0.3755	0.3755	0.001	0.75	0.3755	0.3755
Seepage (s)	Parámetro de Percolación. Controla la tasa de filtración hacia el acuífero subterráneo.	0.005 – 0.1 (día-1)	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.005	0.1
Grow season ET factor	Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo.	0.5 – 1.5	1.0 (Por defecto)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dormant season ET factor	Factor de evapotranspiración durante la estación latente.	0.5 – 1.5	1.0 (Por defecto)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Impervious cover percent	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca.	0.07	No Aplicado	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

El caso 0, corresponde a los parámetros que se introducen con valores medios, entre los intervalos de los valores recomendados del programa; y con respecto a los otros escenarios de simulación, estos se proyectan con valores máximo y mínimos según el parámetro.

4.3.2.8 Calibración y Ajuste de Resultados Obtenidos de la Simulación en HydroBID.

Es importante establecer que los valores recomendados son solamente una aproximación para la mayoría de modelos. Cada caso de simulación requiere sus valores propios y únicos, los cuales los establecerán las condiciones mismas que se generen en el proceso de iteración. (Nalesso & Coli, 2018)

En esta fase final los parámetros y los valores recomendados para calibrar el modelo simulado son los siguientes:

- **Número de Curva (NC):** Valores recomendados: 0.8 a 1.2.
- **Contenido de Agua Disponible (CDA o AWC):** Valores recomendados: 0.2 a 1.2.
- **Coeficiente de Recesión (R o r):** Valores recomendados: 0.001 a 0.75.
- **Coeficiente de Percolación, Pérdidas o Filtración (Seepage, Seep o s):** Valores recomendados: 0.005 a 0.1.
- **Factor de ET (Evapo-Transpiración) en Temporada de Cultivo (o la estación de crecimiento):** Valores recomendados: 0.5 a 1.5.
- **Factor de ET (Evapo-Transpiración) de la Estación de Letargo (o Latente):** Valores recomendados: 0.5 a 1.5.
- **Umbral de temperatura:** Valores recomendados: 1 %.
- **Factor de fusión:** Valores recomendados: 1 %.

Se debe tener en cuenta que las simulaciones de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, donde los valores utilizados para la calibración de esta cuenca, no serán los mismos para simulaciones futuras en otras cuencas; no se puede regir en un orden específico para

calibrar cada parametro, ya que esto dependerá de cada simulacion a calibrar, dependiendo de la primera comparacion entre los valores simulados y observados.

4.3.2.9 Escenarios para el caso de la modelación con valores extremos.

Se realizara el cálculo para hallar los valores extremos de cada estación, con el fin de encontrar el valor de la precipitación; En esta proyección se calculara los valores extremos para un periodo de retorno de 2.5 veces del periodo de los datos modelado, que para el caso de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, se tiene información de 10 años continuos; se calculara un periodo de 25 años, esto significando que, un día cualquiera en este periodo proyectado, se puede presentar un evento extremo, lo que significa que se presentara una lluvia mayor (tormenta) fuera de lo normal, estos calculo se realizaran por la transformación del metodo de momentos (método de Gumbel) y por regresión lineal (metodo que predice el valor de una variable según el valor de otra). **tabla 10** y la **grafica 1**.

Tabla 10.

Tabla de cálculo de parámetros por el método de Momentos (GUMBEL) y método de regresión lineal, ESTACIÓN No. 3. Mesa de Fernández.

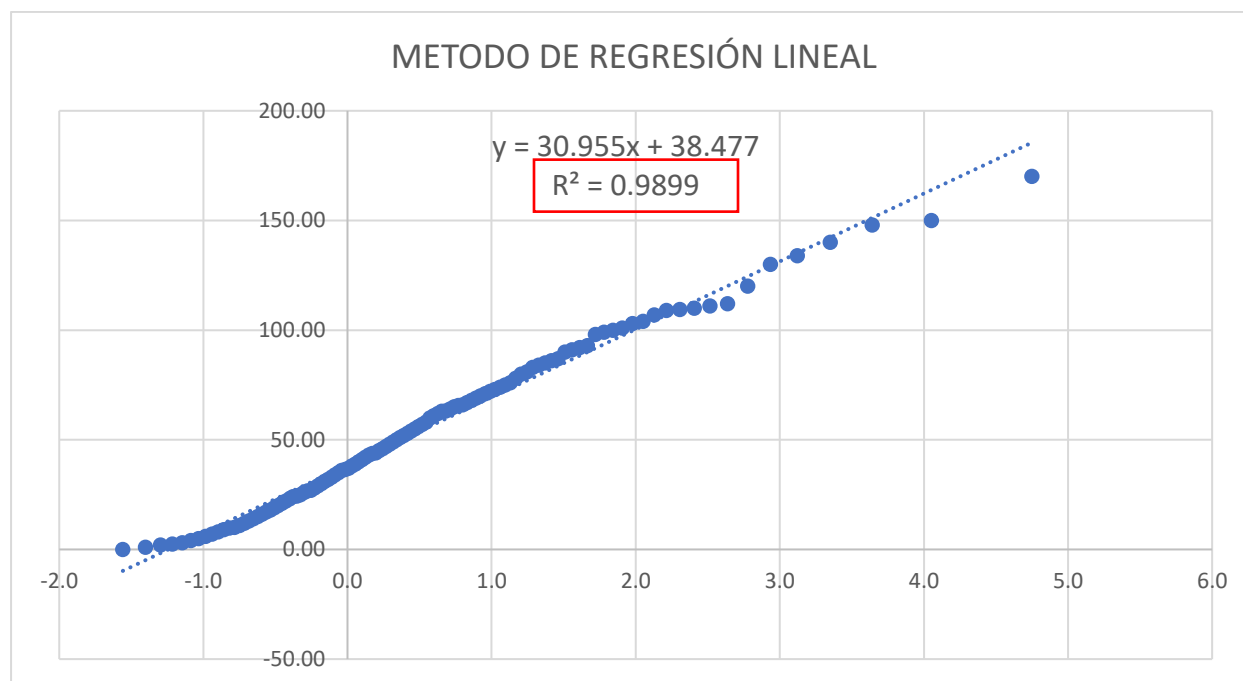
RANGO	PRECIPITACIÓN DIARIA (MM)	FRECUENCIA RELATIVA		PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA		TIEMPO PROMEDIO DE REURRENCIA	MOMENTO (METODO DE GUMBEL)
		F(X)	F(X) %	P (X)	P (X) %	T(X)	
1	0.00	0.009	0.862	0.991	99.138	1.01	-1.5589
2	1.00	0.017	1.724	0.983	98.276	1.02	-1.4013
3	2.00	0.026	2.586	0.974	97.414	1.03	-1.2961
4	2.40	0.034	3.448	0.966	96.552	1.04	-1.2141
5	3.00	0.043	4.310	0.957	95.690	1.05	-1.1455
6	4.00	0.052	5.172	0.948	94.828	1.05	-1.0858
7	5.00	0.060	6.034	0.940	93.966	1.06	-1.0324
8	6.00	0.069	6.897	0.931	93.103	1.07	-0.9836
9	7.00	0.078	7.759	0.922	92.241	1.08	-0.9386
10	8.00	0.086	8.621	0.914	91.379	1.09	-0.8965
11	9.00	0.095	9.483	0.905	90.517	1.10	-0.8568
12	9.70	0.103	10.345	0.897	89.655	1.12	-0.8192
13	10.00	0.112	11.207	0.888	88.793	1.13	-0.7833
14	11.00	0.121	12.069	0.879	87.931	1.14	-0.7488
15	12.00	0.129	12.931	0.871	87.069	1.15	-0.7157

		FRECUENCIA RELATIVA		PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA		TIEMPO PROMEDIO DE REURENCIA	
RANGO	PRECIPITACIÓN DIARIA (MM)	F(X)	F(X) %	P (X)	P (X) %	T(X)	MOMENTO (METODO DE GUMBEL)
16	13.00	0.138	13.793	0.862	86.207	1.16	-0.6836
17	14.00	0.147	14.655	0.853	85.345	1.17	-0.6525
18	15.00	0.155	15.517	0.845	84.483	1.18	-0.6223
19	16.00	0.164	16.379	0.836	83.621	1.20	-0.5929
20	17.00	0.172	17.241	0.828	82.759	1.21	-0.5641
21	18.00	0.181	18.103	0.819	81.897	1.22	-0.5359
22	19.00	0.190	18.966	0.810	81.034	1.23	-0.5084
23	20.00	0.198	19.828	0.802	80.172	1.25	-0.4813
24	21.00	0.207	20.690	0.793	79.310	1.26	-0.4546
25	22.00	0.216	21.552	0.784	78.448	1.27	-0.4283
26	23.00	0.224	22.414	0.776	77.586	1.29	-0.4025
27	24.00	0.233	23.276	0.767	76.724	1.30	-0.3769
28	24.30	0.241	24.138	0.759	75.862	1.32	-0.3516
29	25.00	0.250	25.000	0.750	75.000	1.33	-0.3266
30	26.00	0.259	25.862	0.741	74.138	1.35	-0.3019
31	26.70	0.267	26.724	0.733	73.276	1.36	-0.2773
32	27.00	0.276	27.586	0.724	72.414	1.38	-0.2530
33	28.00	0.284	28.448	0.716	71.552	1.40	-0.2288
34	29.00	0.293	29.310	0.707	70.690	1.41	-0.2048
35	30.00	0.302	30.172	0.698	69.828	1.43	-0.1809
36	31.00	0.310	31.034	0.690	68.966	1.45	-0.1571
37	32.00	0.319	31.897	0.681	68.103	1.47	-0.1334
38	33.00	0.328	32.759	0.672	67.241	1.49	-0.1098
39	34.00	0.336	33.621	0.664	66.379	1.51	-0.0862
40	35.00	0.345	34.483	0.655	65.517	1.53	-0.0627
41	36.00	0.353	35.345	0.647	64.655	1.55	-0.0392
42	36.50	0.362	36.207	0.638	63.793	1.57	-0.0158
43	37.00	0.371	37.069	0.629	62.931	1.59	0.0076
44	38.00	0.379	37.931	0.621	62.069	1.61	0.0311
45	39.00	0.388	38.793	0.612	61.207	1.63	0.0545
46	40.00	0.397	39.655	0.603	60.345	1.66	0.0780
47	41.00	0.405	40.517	0.595	59.483	1.68	0.1015
48	42.00	0.414	41.379	0.586	58.621	1.71	0.1251
49	43.00	0.422	42.241	0.578	57.759	1.73	0.1488
50	43.70	0.431	43.103	0.569	56.897	1.76	0.1725
51	44.00	0.440	43.966	0.560	56.034	1.78	0.1963
52	45.00	0.448	44.828	0.552	55.172	1.81	0.2202
53	46.00	0.457	45.690	0.543	54.310	1.84	0.2442
54	47.00	0.466	46.552	0.534	53.448	1.87	0.2684
55	48.00	0.474	47.414	0.526	52.586	1.90	0.2927
56	49.00	0.483	48.276	0.517	51.724	1.93	0.3171
57	50.00	0.491	49.138	0.509	50.862	1.97	0.3417
58	51.00	0.500	50.000	0.500	50.000	2.00	0.3665
59	52.00	0.509	50.862	0.491	49.138	2.04	0.3915
60	53.00	0.517	51.724	0.483	48.276	2.07	0.4167
61	54.00	0.526	52.586	0.474	47.414	2.11	0.4421
62	55.00	0.534	53.448	0.466	46.552	2.15	0.4677
63	56.00	0.543	54.310	0.457	45.690	2.19	0.4935
64	57.00	0.552	55.172	0.448	44.828	2.23	0.5197
65	58.00	0.560	56.034	0.440	43.966	2.27	0.5461
66	60.00	0.569	56.897	0.431	43.103	2.32	0.5728
67	61.00	0.578	57.759	0.422	42.241	2.37	0.5998
68	62.00	0.586	58.621	0.414	41.379	2.42	0.6272

		FRECUENCIA RELATIVA		PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA		TIEMPO PROMEDIO DE REURENCIA	
RANGO	PRECIPITACIÓN DIARIA (MM)	F(X)	F(X) %	P (X)	P (X) %	T(X)	MOMENTO (METODO DE GUMBEL)
69	63.00	0.595	59.483	0.405	40.517	2.47	0.6549
70	63.20	0.603	60.345	0.397	39.655	2.52	0.6830
71	64.00	0.612	61.207	0.388	38.793	2.58	0.7115
72	65.00	0.621	62.069	0.379	37.931	2.64	0.7404
73	65.60	0.629	62.931	0.371	37.069	2.70	0.7697
74	66.00	0.638	63.793	0.362	36.207	2.76	0.7996
75	67.00	0.647	64.655	0.353	35.345	2.83	0.8299
76	68.00	0.655	65.517	0.345	34.483	2.90	0.8607
77	69.00	0.664	66.379	0.336	33.621	2.97	0.8921
78	70.00	0.672	67.241	0.328	32.759	3.05	0.9241
79	71.00	0.681	68.103	0.319	31.897	3.14	0.9567
80	72.00	0.690	68.966	0.310	31.034	3.22	0.9900
81	73.00	0.698	69.828	0.302	30.172	3.31	1.0240
82	74.00	0.707	70.690	0.293	29.310	3.41	1.0588
83	75.00	0.716	71.552	0.284	28.448	3.52	1.0944
84	76.00	0.724	72.414	0.276	27.586	3.63	1.1308
85	78.00	0.733	73.276	0.267	26.724	3.74	1.1682
86	80.00	0.741	74.138	0.259	25.862	3.87	1.2065
87	81.00	0.750	75.000	0.250	25.000	4.00	1.2459
88	83.00	0.759	75.862	0.241	24.138	4.14	1.2864
89	84.00	0.767	76.724	0.233	23.276	4.30	1.3282
90	85.00	0.776	77.586	0.224	22.414	4.46	1.3713
91	86.00	0.784	78.448	0.216	21.552	4.64	1.4158
92	87.00	0.793	79.310	0.207	20.690	4.83	1.4619
93	90.00	0.802	80.172	0.198	19.828	5.04	1.5096
94	91.00	0.810	81.034	0.190	18.966	5.27	1.5592
95	92.00	0.819	81.897	0.181	18.103	5.52	1.6109
96	93.00	0.828	82.759	0.172	17.241	5.80	1.6647
97	98.00	0.836	83.621	0.164	16.379	6.11	1.7210
98	99.00	0.845	84.483	0.155	15.517	6.44	1.7801
99	100.00	0.853	85.345	0.147	14.655	6.82	1.8422
100	101.00	0.862	86.207	0.138	13.793	7.25	1.9077
101	103.00	0.871	87.069	0.129	12.931	7.73	1.9771
102	104.00	0.879	87.931	0.121	12.069	8.29	2.0509
103	107.00	0.888	88.793	0.112	11.207	8.92	2.1298
104	109.00	0.897	89.655	0.103	10.345	9.67	2.2146
105	109.40	0.905	90.517	0.095	9.483	10.55	2.3063
106	110.00	0.914	91.379	0.086	8.621	11.60	2.4063
107	111.00	0.922	92.241	0.078	7.759	12.89	2.5163
108	112.00	0.931	93.103	0.069	6.897	14.50	2.6386
109	120.00	0.940	93.966	0.060	6.034	16.57	2.7767
110	130.00	0.948	94.828	0.052	5.172	19.33	2.9354
111	134.00	0.957	95.690	0.043	4.310	23.20	3.1222
112	140.00	0.966	96.552	0.034	3.448	29.00	3.3498
113	148.00	0.974	97.414	0.026	2.586	38.67	3.6419
114	150.00	0.983	98.276	0.017	1.724	58.00	4.0518
115	170.10	0.991	99.138	0.009	0.862	116.00	4.7493

Grafica 1.

Grafica de Regresión Lineal (eje X Transformada de Gumbel y eje Y precipitación) de la ESTACIÓN No. 3. Mesa de Fernández.



El R2 significa que en efecto la serie de tiempo, mediante la transformada de Gumbel transforma de manera lineal a la serie de datos, y si la transforma correctamente con un buen nivel de coeficiente de determinación que es el R2 con valor casi igual a 1, quiere decir que se puede utilizar este método para extrapolar valores más allá del periodo de tiempo que se analizó, y se puede continuar con la transformación del método de Momentos; para este caso el valor de R2 es igual a 0.99, valor que es casi igual a 1.

Obteniendo este resultado se procede al cálculo del Método de Momentos, para calcular aquella precipitación que tiene un periodo de retorno determinado, que para el caso de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, es de 25 años, y se aplica la siguiente ecuación 1:

Ecuación 1.

Transformación del método de momento, para eventos extremos de precipitación.

$$X = a - \frac{1}{b} \ln \ln \left[\frac{T(x)}{T(x) - 1} \right]$$

$$b = \pi / (X_{desves} * 6^{0.5}) = 0.034$$

$$a = X_{promedio} - \left[\frac{0.5772}{b} \right] = 38.80$$

$$X = a - \frac{1}{b} \ln \ln \left[\frac{T(x)}{T(x) - 1} \right] = \mathbf{308.41 \text{ mm}}$$

(Valor del evento extremo estación de Mesa de Fernández)

Por el método de momentos, se obtuvo para cada estación de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, los resultados de los valores extremos. De estos resultados se selecciono el de mayor precipitación **tabla 11**, valor con el cual se altero la precipitación de todas las estaciones para la fecha del 08 de Julio del año 1.997, y como resultado se obtuvo una precipitación de 308.41 mm.

Tabla 11

Cálculo de precipitaciones de los valores extremos con un periodo de retorno de 25 años.

DESCRIPCIÓN	VALORES EXTREMOS T:25 AÑOS
	(mm)
ESTACION 2	272.76
ESTACION 3	308.41
ESTACION 4	253.44
ESTACION 5	293.95
ESTACION 6	271.93
ESTACION 7	254.04

5. Capítulo 2. Resultados

5.1 Análisis de sensibilidad

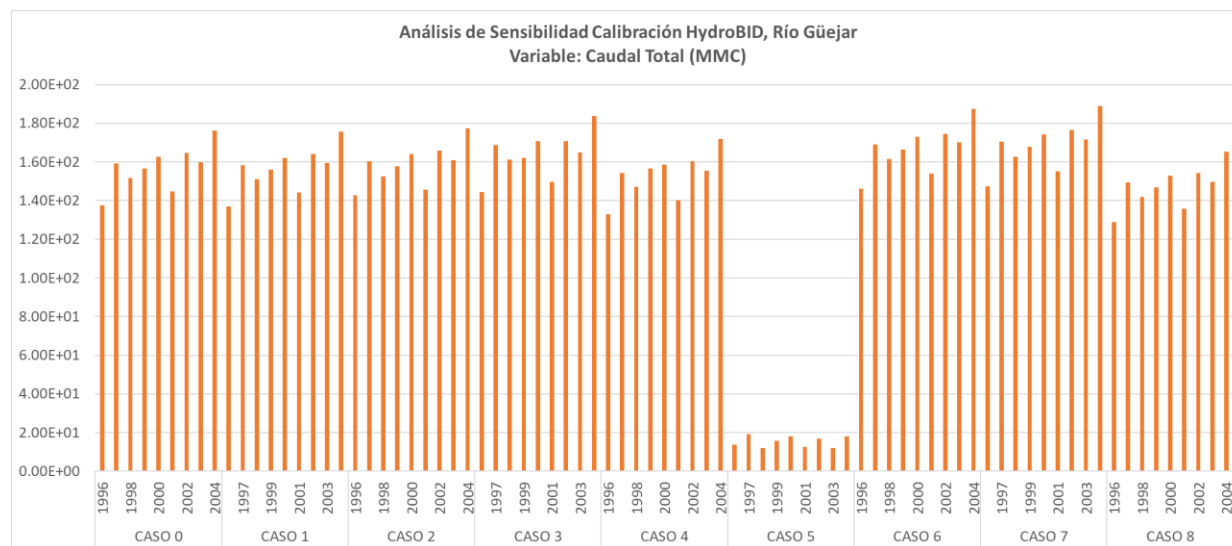
Cada caso se ejecutó con los valores propuestos de valores mínimos y máximos según los parámetros del programa, y se compararon los valores de los resultados de los caudales, con el fin de realizar un análisis de los datos, para determinar el caso con el error promedio más cercano al caso 0, caso que se simuló con valores medios según intervalo de cada parámetro.

En la siguiente **gráfica 2** se puede observar la variable de caudal total por cada caso simulado (caso 0 al caso 8), donde se representó los caudales por el periodo simulado del 01/01/1.995 al 31/12/2.004, afectados por los valores según intervalos de datos de los parámetros para cada caso.

En la gráfica se observa que para el caso 5, es el menos recomendado para una calibración, teniendo que el parámetro de R Coefficient (r) se dejó al mínimo recomendado, y esto alteró la información y generó un resultado por fuera de lo real.

Gráfica 2

Análisis de sensibilidad calibración HydroBID, Caudales casos del 0 al 8.

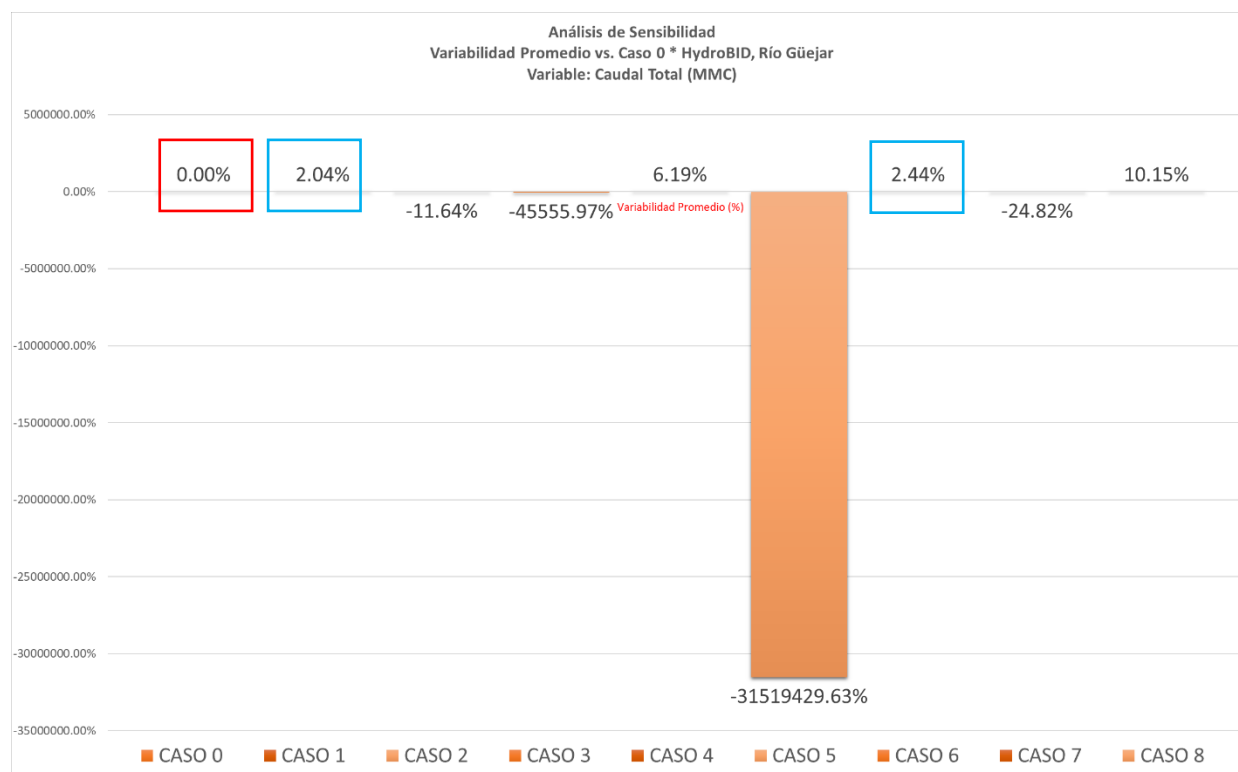


Apartir de la comparación de datos del caudal total de los 9 casos, se realizó una comparación por cada año simulado de los casos de 1 al 8, comparados con el caso 0, con el fin de encontrar el promedio de error mas cercano a este caso.

En la **gráfica 3** se puede observar la variabilidad promedio con respecto al caso 0, del analisis de sensibilidad, sobre los datos comparados de caudal total.

Grafica 3.

Variabilidad promedio vs Caso 0, HydroBID, Río Güejar.



5.2 Calibración y Ajuste de Resultados Obtenidos de la Simulación en HydroBID.

Al desplegar la pestaña Parámetros del Modelo, tal y como se muestra en la **figura 43**, se muestran los valores finales que se utilizaron para calibrar el modelo de simulación hasta el

punto óptimo, mediante iteraciones continuas, según a los análisis de sensibilidad y al resultado del error promedio de la comparación de los caudales totales de cada caso.

Figura 43

Ventana Parámetros del Modelo, HydroBID.

Hydro-BID settings.txt

Archivo Herramientas Ayuda

Configuración Escenario Climático **Parámetros del Modelo** Reservorios Parámetros de Sedimentos Aguas Subterráneas Correr Modelo Salidas Hidroelectricidad

Parámetros Hidrológicos:

Velocidad del Flujo: 0.5 ☒ Obtener Latitud de la Base de Datos

Latitud (decimales): ☐ Guardar Percolación Profunda

Comienzo de la Temporada de Cultivo (día juliano): 90

Final de la Temporada de Cultivo (día juliano): 220

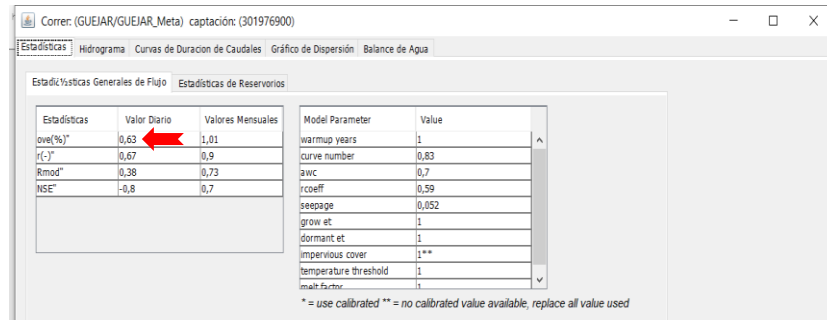
COMID de Calibración Aguas Arriba:

	Valor Único	Multiplicador	Usar Calibrado	Reemplazar Todos	
Numero de Curva (NC):	☐	☒	☐	☒	0.83
Contenido Disponible de Agua (CDA):	☐	☒	☐	☒	0.7
Coef. de Recesión (r):	☒	☐	☐	☒	0.59
Coef. de Percolación (s):	☒	☐	☐	☒	0.0525
Factor de ET en Temporada de Cultivo:	☒	☐	☐	☒	1
Factor de ET en Temporada Latente:	☒	☐	☐	☒	1
Porcentaje de Cobertura Impermeable:	☒	☐	☐	☒	1.0
Umbral de Temperatura:	☐	☐	☐	☒	1
Factor de Fusión:	☐	☒	☐	☒	1

La calibración se ajustó con los valores de los casos 1 y 6, que según al error promedio son los más cercanos al caso cero, donde solo se afectaron los parámetros de Número de curva (CN) y Coeficiente R (parámetro de Recesión), y se obtuvieron los siguientes resultados, y graficas de la simulación **figura 44**.

Figura 44.

Ventana Estadísticas: (a) Flujos Mensuales Promedio, (b) Flujos Anuales Promedio, HydroBID



En las **figuras 45 y 46** se muestran el grafico de dispersión ajustado y la gráfica de duración de flujo y ajuste por Regresión Lineal obtenidas con la calibración del caso de simulación.

Figura 45

Gráfico de Dispersión Ajustado, HydroBID, caso Cuenca Media y Alta del Río Güejar.

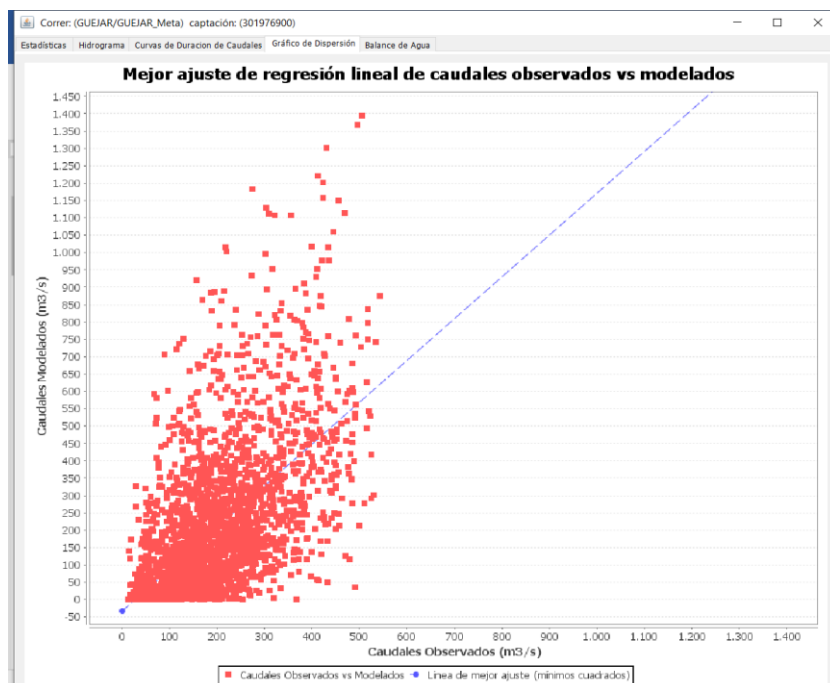
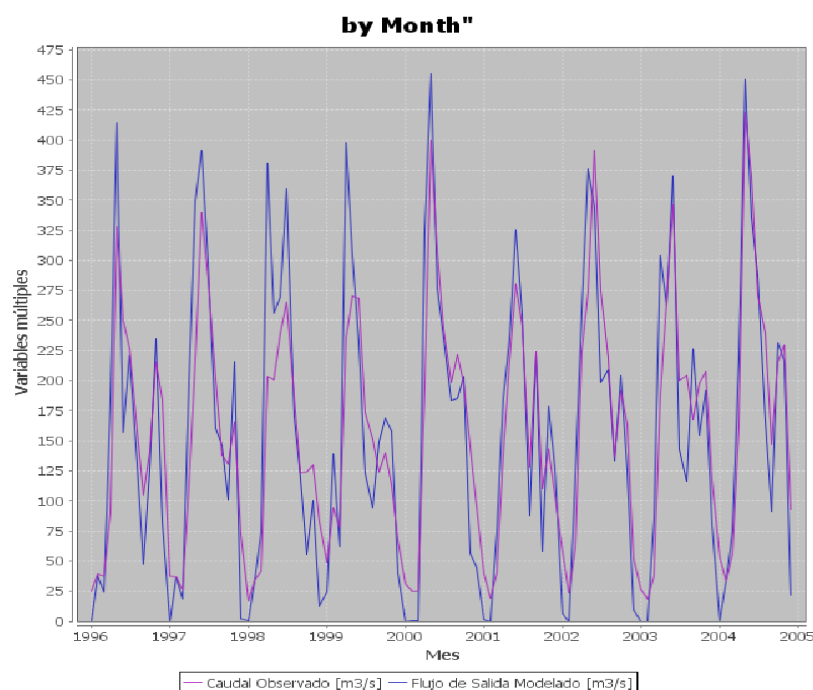


Figura 46

Grafica de duración de flujo, HydroBID, caso Cuenca Media y Alta del Río Güejar



5.3 Escenarios para el caso de la modelación con valores extremos.

Como resultados de las modelaciones en el programa HydroBID, donde se realizó una primera corrida del programa, con información de datos reales de precipitación y luego se realizó una segunda corrida, con precipitación ajustadas con valores extremos, donde se alteró la información de las 6 estaciones para el día 08/07/1.997.

Se obtuvo un archivo de cada modelación **figura 47** con el nombre de **Guejar_meta-Daily** y **Guejar_Tormenta-Daily**, archivos en formato Excel (.cvs), que se encuentra en las carpetas de resultados que genera el programa HydroBID, ubicada en la carpeta con nombre "OUT".

Figura 47

Resultados de la simulación para el caso de datos de caudales real y caudales de valores extremos Cuenca Media y Alta del Río Güejar

RIO GUEJAR AFGR > DATOS ANALIZADOS > hydrobid_guejar > Out > GUEJAR				GUEJAR TOR > hydrobid_guejar tormenta > Out > GUEJAR_TOR			
Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño	Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
flowDurationObs-301976900	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	3 KB	flowDurationObs-301976900	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	3 KB
flowDurationSim-301976900	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	3 KB	flowDurationSim-301976900	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	3 KB
GUEJAR_Meta-Annual	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	4 KB	GUEJAR_TORMETA-Annual	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	4 KB
GUEJAR_Meta-Daily	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	895 KB	GUEJAR_TORMETA-Daily	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	895 KB
GUEJAR_Meta-Landuse	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	1 KB	GUEJAR_TORMETA-Landuse	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	1 KB
GUEJAR_Meta-Monthly	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	33 KB	GUEJAR_TORMETA-Monthly	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	33 KB
GUEJAR_Meta-Outlet	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	1,828 KB	GUEJAR_TORMETA-Outlet	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	1,828 KB
GUEJAR_Meta-settings	19/01/2023 9:38 p. m.	Documento de tex...	4 KB	GUEJAR_TORMETA-settings	20/01/2023 9:19 p. m.	Documento de tex...	5 KB
GUEJAR_Meta-Spatial	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	7 KB	GUEJAR_TORMETA-Spatial	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	7 KB
GUEJAR_Meta-summary	19/01/2023 9:38 p. m.	Archivo de valores...	1 KB	GUEJAR_TORMETA-summary	20/01/2023 9:19 p. m.	Archivo de valores...	1 KB

Se extrajo la información de los caudales del modelo real y del modelo de valores extremos del periodo del 01/07/1.997 hasta el 08/08/1.997 en la **tabla 12**, con el fin de observar los caudales.

Tabla 12

Resultados de caudal observado, caudal modelado real y caudal modelado extremo, Caudales diarios Cuenca Media y Alta del Río Güejar

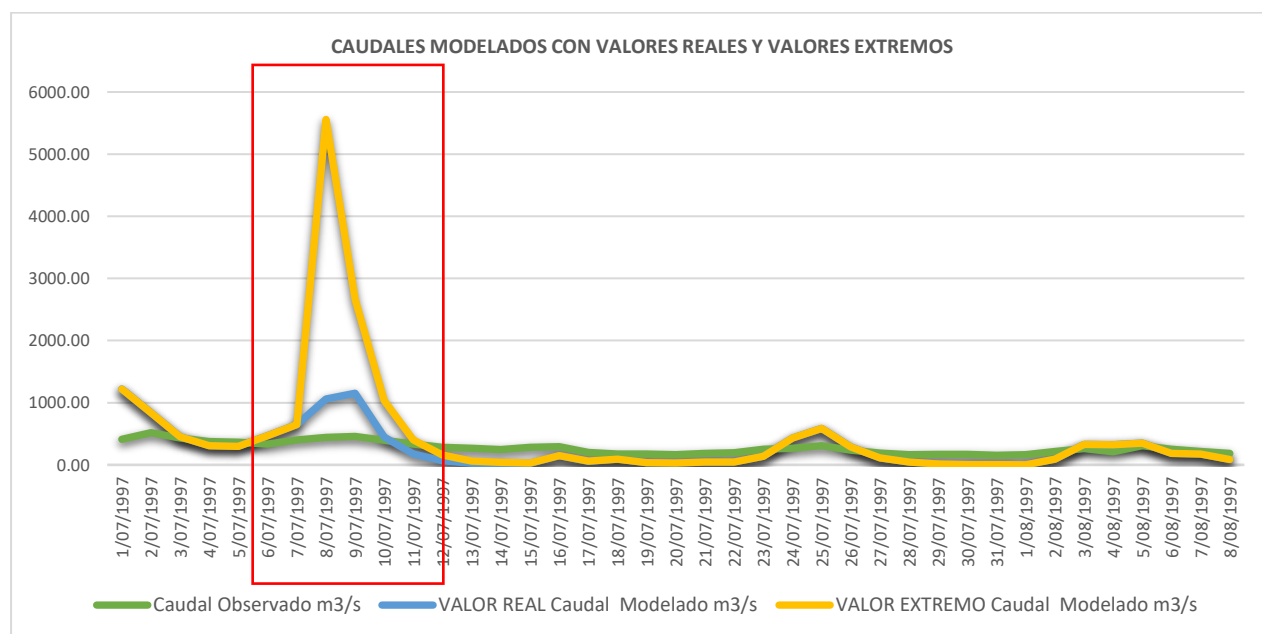
ESTACIÓN DE PIÑALITO	Fecha	Caudal Observado m3/s	VALOR REAL Caudal Modelado m3/s	VALOR EXTREMO Caudal Modelado m3/s
301976900	1/07/1.997	411.40	1221.22	1221.22
301976900	2/07/1.997	518.00	838.15	838.15
301976900	3/07/1.997	432.00	452.00	452.00
301976900	4/07/1.997	377.30	309.16	309.16
301976900	5/07/1.997	366.80	296.24	296.24
301976900	6/07/1.997	335.60	467.50	467.50
301976900	7/07/1.997	399.60	649.83	649.83
301976900	8/07/1.997	444.30	1059.60	5557.92
301976900	9/07/1.997	456.50	1150.90	2665.88
301976900	10/07/1.997	393.60	447.10	1035.63
301976900	11/07/1.997	334.50	173.69	402.32
301976900	12/07/1.997	283.00	67.47	156.29
301976900	13/07/1.997	268.10	26.81	61.32
301976900	14/07/1.997	247.50	25.67	39.07
301976900	15/07/1.997	283.00	25.63	30.84
301976900	16/07/1.997	290.90	148.90	150.92
301976900	17/07/1.997	199.90	57.84	58.63
301976900	18/07/1.997	176.00	92.78	93.09
301976900	19/07/1.997	176.20	36.04	36.16
301976900	20/07/1.997	161.50	27.95	27.99
301976900	21/07/1.997	185.30	42.99	43.01
301976900	22/07/1.997	195.40	47.56	47.57

ESTACIÓN DE PIÑALITO	Fecha	Caudal Observado m3/s	VALOR REAL		VALOR EXTREMO	
			Caudal	Modelado m3/s	Caudal	Modelado m3/s
301976900	23/07/1.997	249.30		136.98		136.98
301976900	24/07/1.997	265.00		431.77		431.77
301976900	25/07/1.997	308.60		584.05		584.05
301976900	26/07/1.997	236.50		285.21		285.21
301976900	27/07/1.997	189.30		110.80		110.80
301976900	28/07/1.997	163.00		43.04		43.04
301976900	29/07/1.997	166.50		16.72		16.72
301976900	30/07/1.997	167.50		6.50		6.50
301976900	31/07/1.997	154.00		2.52		2.52
301976900	1/08/1.997	163.00		0.98		0.98
301976900	2/08/1.997	217.70		92.69		92.69
301976900	3/08/1.997	260.60		328.97		328.97
301976900	4/08/1.997	212.50		321.68		321.68
301976900	5/08/1.997	306.90		350.14		350.14
301976900	6/08/1.997	251.60		184.10		184.10
301976900	7/08/1.997	215.10		175.33		175.33
301976900	8/08/1.997	182.50		84.53		84.53

Con los valores de los caudales modelados reales vs los caudales modelados valores extremos, se realizó la **gráfica 4**, para detallar las diferencias de los caudales en el periodo de tiempo, a partir del 08/07/1.997, donde fue alterado los valores de precipitación para las 6 estaciones.

Gráfica 4.

Caudales modelados reales y valores extremos, HydroBID, Río Güejar



6. Capítulo 3. Análisis de Resultados

6.1 Análisis de resultados

6.1.1 Resultados del Modelamiento.

En este capítulo se hace un análisis general a los resultados gráficos y numéricos obtenidos, resultados que fueron incluidos dentro del balance hídrico, durante la etapa de modelamiento y simulación realizado a través del software HydroBID para el caso de aplicación de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, en el departamento del Meta, Colombia.

6.1.2 Balance Hídrico.

Para realizar el análisis del balance hídrico es importante recordar que en los resultados obtenidos influyen diversas variables tales como precipitación, evapotranspiración (ET), infiltración, percolación y escorrentía, sumado al aporte de las condiciones de tipo y uso de suelo y los datos hidrometeorológicos suministrados como entrada. En este caso, se considera que el almacenamiento de la cuenca se determina por la diferencia entre los valores iniciales y finales del período de estimación del balance hídrico.

En el caso de estudio, se visualizan los resultados al desplegar la pestaña **Salidas\Ver Resultados\Estadísticas\Monthly Statistics (Estadísticas Mensuales)** tal y como se observa en la **tabla 13**. En esta sección, se muestran los resultados obtenidos de las Estadísticas Mensuales (y Anuales) de Flujo o Caudal, cada una con su tabla respectiva, en donde es posible diferenciar y comparar el Valor Promedio Observado ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), junto al Valor Promedio Simulado ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), y el Porcentaje del Error Global de Volumen (ove %).

En los resultados, el (ove %) evidencia que el modelo arroja valores subestimados o sobreestimados en comparación a los valores observados. No obstante, una vez realizados los ajustes y la calibración, el porcentaje de error global de volumen de la simulación sigue muy cercano a cero (0.63 %), lo cual es una característica importante para tener en cuenta si se desean hacer estimaciones de mayor precisión en este tipo de simulaciones.

Tabla 13

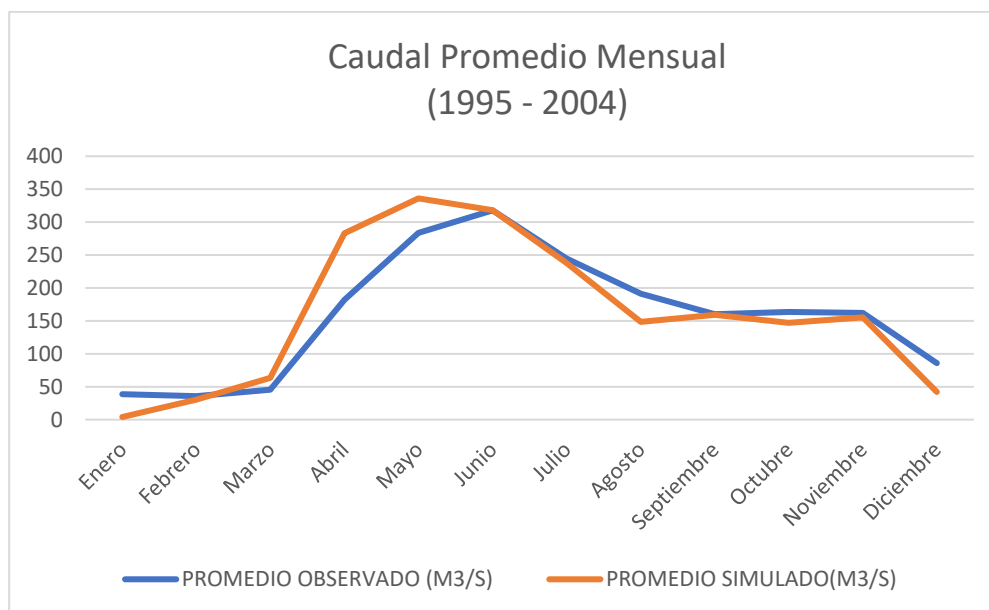
Estadísticas Mensuales, 1.995 a 2.004, Cuenca Media y Alta del Río Güejar , HydroBID.

MONTHLY STATISTICS			
MES	PROMEDIO OBSERVADO (M3/S)	PROMEDIO SIMULADO (M3/S)	OVE (%)
Enero	38.80	4.00	-89.68
Febrero	35.68	30.26	-15.19
Marzo	45.47	63.52	39.69
Abril	182.14	282.94	55.34
Mayo	283.36	336.04	18.59
Junio	317.84	318.15	0.10
Julio	244.74	237.84	-2.82
Agosto	191.26	148.64	-22.28
Seotembre	160.33	159.06	-0.79
Octubre	163.46	147.23	-9.93
Noviembre	162.24	155.47	-4.17
Diciembte	85.64	42.14	-50.79

De igual manera, la **tabla 13**, muestra que existe un período de menor retención, o mayor descarga en la salida, entre los meses de Abril a Noviembre, y un período de alta o moderada retención (menor descarga en la salida), entre los meses de Diciembre a Marzo, lo cual coincide con la época de lluvias y la temporada seca respectivamente con sus correspondientes meses de transición entre una y otra tal como se ha evidenciado en la información hidrometeorológica suministrada por el IDEAM para el presente estudio **grafica 5**.

Gráfica 5.

Gráfica Caudal Promedio Mensual ($m^3.s^{-1}$), 1.995 a 2.004, Cuenca Media y Alta del Río Güejar, HydroBID



Las columnas de la tabla que se presenta en la **tabla 14** contienen cada una de las variables que componen el balance hídrico y sus valores calculados para el período simulado 1.995 -2.004. Esta ventana se visualiza al desplegar la pestaña **Balance de Agua**. Las variables, en su orden, comprenden: **Rango de Fecha**, **Precipitación**, **Evapotranspiración**, **Escorrentía**, **Descarga de aguas poco profundas**, **Caudal Total**, **Almacenamiento No Saturado**, **Almacenamiento Saturado**, **Contribución neta de aguas subterráneas**, **Recarga** y **Error de Volumen del Balance**. Las unidades establecidas son Millones de Metros Cúbicos, MMC o Hm^3 .

Tabla 14

Parámetros del balance hídrico, años 1.995 a 2.004, simulación sobre la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, HydroBID.

Correr: (GUEJAR/GUEJAR_Meta) captación: (301976900)

Estadísticas Hidrograma Curvas de Duración de Caudales Gráfico de Dispersión Balance de Agua

Unidades: Millions m3 Agregado por: Month

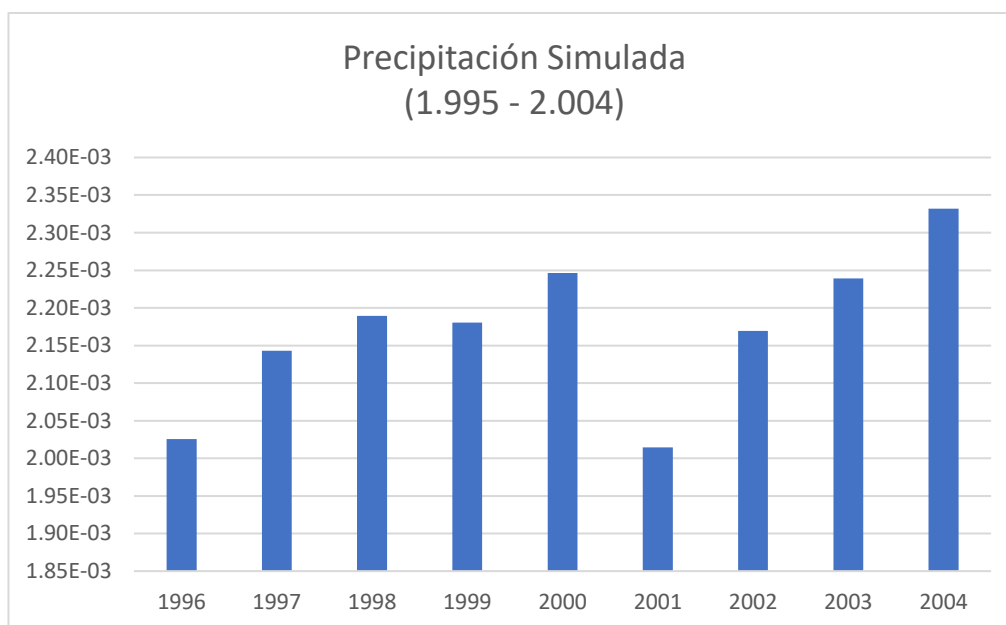
Balance de Aguas Superficiales

Rango de F...	Precipitación	Evapotrans...	Escorrentía	Descarga d...	Caudal Total	Almacenami...	Almacenami...	Contribución...	Recarga	Error de Bal...
enero 1996	8,9753E-5	2,29287E-1	0E0	7,33839E-21	7,33839E-17	9,1293E-1	4,83183E-18	0.0	2,67727E-19	0E0
febrero 1996	1,57604E-3	7,34182E-1	9,73356E-3	3,16348E-4	3,26082E0	1,2317E1	5,43582E-1	0.0	1,15413E-2	0E0
marzo 1996	1,18316E-3	7,74239E-1	2,24131E-3	2,09094E-4	2,11336E0	1,73034E1	4,00386E-1	0.0	7,6284E-3	0E0
abril 1996	2,41354E-3	7,75792E-1	4,8428E-2	1,5409E-3	1,58933E1	1,89205E1	2,61648E0	0.0	5,62167E-2	0E0
mayo 1996	4,41682E-3	7,60565E-1	1,51844E-1	3,43208E-3	3,58392E1	2,04967E1	5,77698E0	0.0	1,25213E-1	0E0
junio 1996	2,18984E-3	7,37973E-1	1,60476E-2	1,3405E-3	1,35655E1	1,9854E1	2,30275E0	0.0	4,89056E-2	0E0
julio 1996	2,75508E-3	7,2699E-1	9,12647E-2	1,81374E-3	1,90501E1	1,99374E1	3,137E0	0.0	6,61708E-2	0E0
agosto 1996	1,87195E-3	8,60866E-1	7,98749E-3	1,12611E-3	1,13409E1	1,97468E1	1,80123E0	0.0	4,10838E-2	0E0
septiembre 1996	1,42665E-3	9,55087E-1	7,32264E-3	3,99011E-4	4,06334E0	1,62271E1	6,93662E-1	0.0	1,45571E-2	0E0
octubre 1996	2,20317E-3	9,52065E-1	5,63178E-2	1,03272E-3	1,08904E1	1,83392E1	1,8247E0	0.0	3,76768E-2	0E0
noviembre 1996	3,11508E-3	9,42041E-1	1,05766E-1	1,92122E-3	2,02698E1	1,96728E1	3,34335E0	0.0	7,00918E-2	0E0
diciembre 1996	1,07364E-3	8,44036E-1	1,32851E-2	7,02675E-4	7,1596E0	1,7296E1	1,01301E0	0.0	2,56357E-2	0E0

En la **gráfica 6** se muestra un diagrama de barras que muestra la relación de cambio en el comportamiento simulado de la Precipitación para el período 1.995 a 2.004, en donde es claro identificar que el mayor nivel de aportación al balance hídrico de esta variable se dio durante el año 2.004, disminuyendo en los siguientes períodos en un 20 % para el 2.000 y 2.003, un 30 % en los años 1.997, 1.998, 1.999 y 2.002. Y finalmente un 60% para los años 1.996 y 2.001.

Gráfica 6.

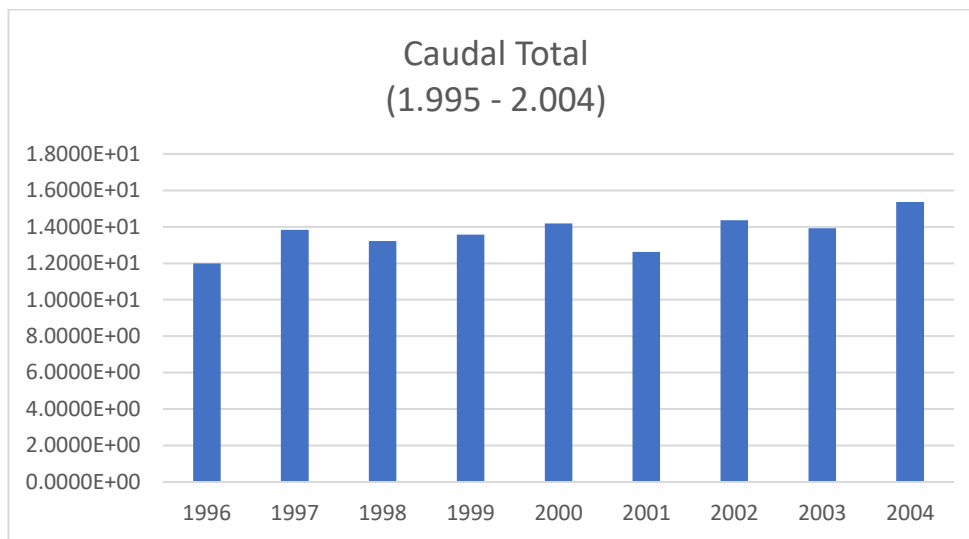
Parámetros del balance hídrico: Precipitación simulada periodo 1.995 – 2.004, HydroBID.



Se muestra el diagrama de barras que muestra la relación de cambio en el comportamiento simulado del Caudal Total para el período 1.995 a 2.004, en donde es claro identificar que el mayor nivel de Caudal se dio durante el año 2.004 y, siguiendo el comportamiento de otras variables, empezó su descenso en un 5%, 10% y hasta un 20% para los años 1.996 y 2.001.

Gráfica 7.

Parámetros del balance hídrico: Caudal Total simulado para el período 1.995 a 2.004, Cuenca Media y Alta del Río Güejar, HydroBID.



6.2 Calibración y Ajuste de Resultados Obtenidos de la Simulación en HydroBID.

La calibración efectuada para la Cuenca Media y Alta del Río Güejar, fueron tomadas bajo las variables de los casos (1 y 6), caso que obtuvieron un menor error promedio con respecto al caso cero; se realizaron las verificaciones en el modelo, y se ejecutó nuevamente el programa, para modelarlo por periodos de 5 años **figura 48**.

Figura 48

Verificación de la Calibración del modelo por periodo de 5 años, HydroBID, caso Cuenca Media y Alta del Río Güejar

Figura 48.a. Año simulado del 01/01/1.995 a 12/31/1.999

Figura 48.b. Año simulado del 01/01/2.000 a 12/31/2.004

Datos de entrada HydroBID

Hydro-BID settings.dat

Archivo Herramientas Ayuda

Configuración Escenario Climático Parámetros del Modelo Reservorios Parámetros de Sedimentos Aguas Subterráneas Correr Modelo Salidas Hidroelectricidad

Opciones de Configuración:

Nombre del Proyecto: GUEJAR
 Nombre de la Cuenca: GUEJAR_Media
 COMID: 301976900
 Fecha Inicial (dd/mm/aaaa): 01/01/1995
 Fecha Final (dd/mm/aaaa): 31/12/1999
 Años de Calentamiento: 1

Opciones de la Base de Datos:

Base de Datos SQL: db/54Completos_GUEJAR1.sqlite
 Tabla de Datos Climáticos: GUEJAR_META_01
 Tabla de HC: catchment_Hc_01a
 Tabla de CDA: catchment

Opciones de Flujo:

Caudales Observados: Flow/E01_13.csv
 Carpeta de Fuentes Puntuales:
 Puntos de Flujo Local:

Opciones de Salida:

Carpeta de Reservorios:
 Carpeta de Resultados: Out
 Resultados: ☒ Cuenca de Salida ☐ Todas las Cuencas ☐ History

Hydro-BID settings.dat

Archivo Herramientas Ayuda

Configuración Escenario Climático Parámetros del Modelo Reservorios Parámetros de Sedimentos Aguas Subterráneas Correr Modelo Salidas Hidroelectricidad

Opciones de Configuración:

Nombre del Proyecto: GUEJAR
 Nombre de la Cuenca: GUEJAR_Media
 COMID: 301976900
 Fecha Inicial (dd/mm/aaaa): 01/01/2000
 Fecha Final (dd/mm/aaaa): 31/12/2004
 Años de Calentamiento: 1

Opciones de la Base de Datos:

Base de Datos SQL: db/54Completos_GUEJAR1.sqlite
 Tabla de Datos Climáticos: GUEJAR_META_01
 Tabla de HC: catchment_Hc_01a
 Tabla de CDA: catchment

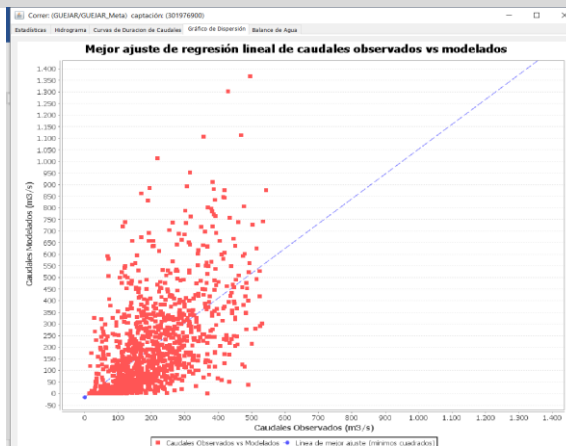
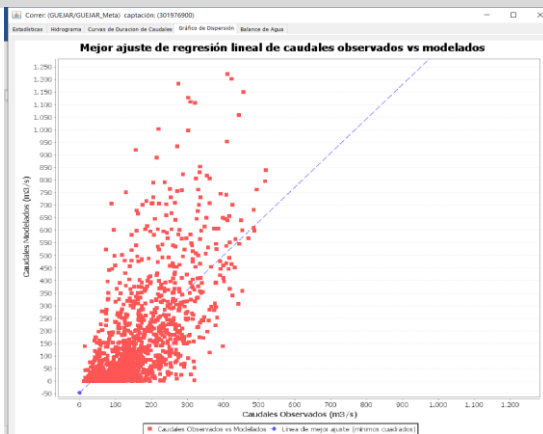
Opciones de Flujo:

Caudales Observados: Flow/E01_13.csv
 Carpeta de Fuentes Puntuales:
 Puntos de Flujo Local:

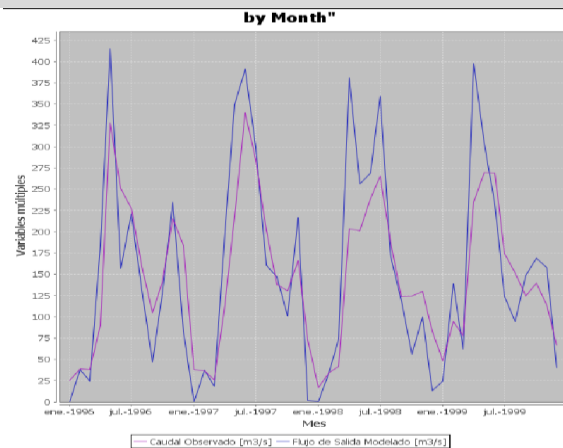
Opciones de Salida:

Carpeta de Reservorios:
 Carpeta de Resultados: Out
 Resultados: ☒ Cuenca de Salida ☐ Todas las Cuencas ☐ History

Gráfico de Dispersión Ajustado



Histograma Mensual simulado



6.2.1 Curva de Duración de caudales

Como resultado se obtiene una gráfica de flujo de estas simulaciones para los primeros y últimos años y se observó como el volumen simulado es menor al volumen observado.

6.2.2 Gráfico de Dispersión Ajustado

En la **figura 48**. En la gráficas de dispersión se observa que hay una concentración grande de datos en la parte inicial, ubicados en el cuadrante inferior izquierdo, donde se acumulan la mayoría de datos; también se encontró que se encuentran unos datos perdidos en el sector superior.

Para los dos escenarios del año 1.995 al 1.999 y del 2.000 al 2.004, se observó que los datos gráficos son muy similares los unos con los otros, a raíz que los datos para cada periodo tienen diferente información.

6.2.3 Hidrogramas Diarios y/o Mensuales.

En **figura 48** en los hidrogramas de valores diarios, se muestran los resultados obtenidos al comparar el Flujo de Salida Observado (color magenta o rojo) y el Flujo de Salida Simulado (color cian o azul) en la zona de descarga de la Cuenca Media y Alta del Río Güejar (sector Piñalito) generada a través de HydroBID. Los valores representan el flujo medio diario, en unidades homogéneas: $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.

En la gráfica de resultados mensuales, se observa que las variaciones o picos son constantes y próximos entre los valores observados y los simulados para los dos escenarios de los periodos entre 01/01/1.995 a 31/12/1.999 y 01/01/2.000 a 31/12/2.004.

Se presentó una diferencia en los picos en los años 1.998 y 1.999 para los meses de abril a junio para el año 1.998 y abril a julio para el año 1.999. No obstante, aún con la existencia de estas diferencias, la superposición de las gráficas muestra una tendencia favorable en términos generales, con algunos períodos más consistentes como el que se observa durante el los años del 2.000 al 2.004.

6.3 Escenarios para el caso de la modelación con valores extremos.

Del análisis de resultado se obtuvo que para la fecha de 08/07/1.997, día donde se ajustó los valores de las precipitaciones, según cálculo del método de Momentos, se obtuvieron valores extremos para cada estación, y se seleccionó el valor más alto de precipitación de las 6 estaciones. Por consiguiente, se alteró la precipitación para esa fecha en las seis estaciones, colocándole el valor de 308.41 mm.

De esta modelación se obtuvo como resultados que los caudales en la fecha del 08/07/1.997, tuvo un aumento de caudal del 5.24 veces el caudal, donde paso de 1059.60 m³/s del modelo de valores reales a 5557,92 m³/s del modelo de evento extremo.

El aumento del caudal fue de 4498.32 m³/s, y a partir de la fecha fue decreciendo día a día con valores de 1514.98 m³/s, 588.53 m³/s hasta llegar nuevamente al punto, el cual se presentó nivelación del caudal el día 23/07/1.997, ver la **tabla 15 y gráfica 8**.

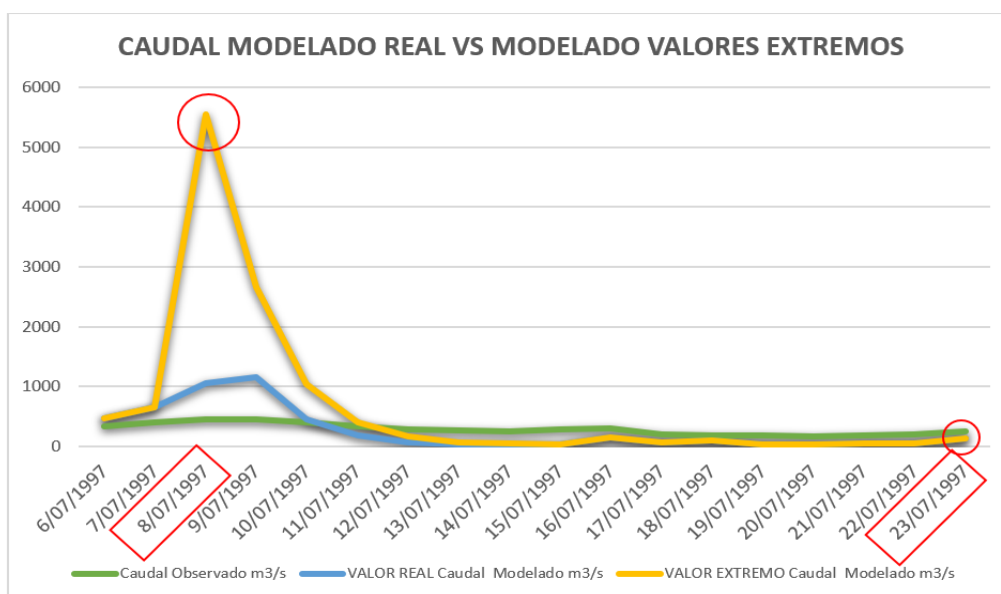
Tabla 15

Valor del aumento de caudal y disminución en días trascurrido, después del evento extremo, HydroBID, caso Cuenca Media y Alta del Río Güejar.

ESTACIÓN DE PIÑALITO	Fecha	Caudal Observado m3/s	VALOR REAL Caudal Modelado m3/s	VALOR EXTREMO Caudal Modelado m3/s	VALOR DEL AUMENTO DE CAUDAL SEGÚN VALORES EXTREMOS
301976900	7/07/1.997	399.60	649.83	649.83	0.00
301976900	8/07/1.997	444.30	1059.60	5557.92	4498.32
301976900	9/07/1.997	456.50	1150.90	2665.88	1514.98
301976900	10/07/1.997	393.60	447.10	1035.63	588.53
301976900	11/07/1.997	334.50	173.69	402.32	228.63
301976900	12/07/1.997	283.00	67.47	156.29	88.82
301976900	13/07/1.997	268.10	26.81	61.32	34.50
301976900	14/07/1.997	247.50	25.67	39.07	13.40
301976900	15/07/1.997	283.00	25.63	30.84	5.21
301976900	16/07/1.997	290.90	148.90	150.92	2.02
301976900	17/07/1.997	199.90	57.84	58.63	0.79
301976900	18/07/1.997	176.00	92.78	93.09	0.31
301976900	19/07/1.997	176.20	36.04	36.16	0.12
301976900	20/07/1.997	161.50	27.95	27.99	0.05
301976900	21/07/1.997	185.30	42.99	43.01	0.02
301976900	22/07/1.997	195.40	47.56	47.57	0.01
301976900	23/07/1.997	249.30	136.98	136.98	0.00

Grafica 8.

Caudal modelado real vs caudal modelado de valores extremos, a partir de la fecha 08/07/1.997, HydroBID, caso Cuenca Media y Alta del Río Güejar



7. Conclusiones y Recomendaciones.

7.1 Conclusiones.

Se ha podido establecer que **QGIS-HydroBID** es un conjunto de herramientas que permiten realizar modelamiento de datos hidrometeorológicos, simular o proyectar su comportamiento y generar resultados sobre proyecciones en Escenarios de Cambio Climático.

Los datos hidrometeorológicos de entrada, tanto para QGIS como para HydroBID: Temperatura, precipitación e información general sobre estaciones son obtenidos a través de descarga directa desde los portales del DHIME del (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), s.f.), Datos abiertos GOV.CO (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2.021), o mediante solicitud personal ante entidades del orden nacional públicas o privadas. Es importante aclarar que la información obtenida debe pasar por un proceso de ajuste, y cambio de formato en archivos tipo .csv (Valores Separados por Coma), para cumplir con los requisitos de entrada de HydroBID.

Se validó la capacidad de HydroBID mediante el modelamiento de un caso de estudio localizado en la Cuenca Media y Alta del Río Güejar (Colombia), localizada a lo largo del municipio de Lejanías, pasando por los municipios de Mesetas, Vista hermosa hasta Piñalito, COMID de salida, incluyendo las microcuencas aportantes de los municipios circunvecinos. No obstante, los resultados del modelamiento se constituyen en una base para futuros estudios que puedan incluir dicha información, estableciendo un escenario que ofrezca una mayor precisión y un nivel de confiabilidad aceptable sobre las proyecciones que se hagan en la zona.

Con la información obtenida se realizó un modelamiento del comportamiento de las aguas superficiales: Caudal Total en el COMID de salida **301976900**, sector Piñalito, como caso de estudio. Se realizó la comparación de los dos periodos modelados desde 1.995 – 1.999 y 2.000 – 2.004, donde se observó que según al ajustes y datos del análisis de sensibilidad, los dos modelos tienen resultados y datos similares. Los parámetros utilizados para la combinación

de datos en los intervalos de los casos de estudios, donde los casos con menos diferencia con el error promedio con respecto al caso 0, fueron los casos 1 y 6 donde fueron modificados los valores de los parámetros de Curve Number (CN) y R Coefficient (r).

Finalmente, la calibración se dio por concluida una vez se pudo verificar también en la pestaña **Resultados/Estadísticas**, que el valor para el **Error Global de Volumen, Ove (%)**, era lo más cercano a 0 (cero), donde para este caso, se obtuvo un **Ove (%)** de **0.63**.

7.2. Recomendaciones.

En primer lugar, es importante adquirir el paquete de instalación adecuado para que el conjunto sea funcional. No es recomendable instalar el software de **QGIS** e **HydroBID** por separado debido a la incompatibilidad en los módulos y la activación de herramientas importantes como **AHDTTools**, que es imprescindible en la etapa de aislamiento de cuenca, líneas de flujo, identificador único de cuenca (COMID), geolocalización de centroides de las microcuencas, al igual que el uso y tipo de suelo de la región bajo estudio.

Para manejar con propiedad y aprovechar las múltiples ventajas y posibilidades que brinda el software libre de **HydroBID**, es recomendable que el usuario tenga conocimientos Previos sobre Sistemas de Información Geográfica como **QGIS**, al igual que manejo de datos con bases de datos (**SQL**), hoja electrónica, bases de análisis estadístico, generación e interpretación de información hidrometeorológica y conocimientos claros sobre modelamiento y simulación de escenarios climáticos. Para usuarios avanzados y desarrolladores de software es importante tener conocimientos previos de un lenguaje de programación de alto nivel como es **Phyton**.

Finalmente, se debe tener en cuenta que el soporte sobre las dificultades que se puedan encontrar en el manejo de HydroBID son muy escasas, o casi nulas. Durante el desarrollo del

presente caso de estudio, se solicitó información y apoyo a diferentes instituciones públicas y privadas en Colombia y otros países, a personas que han realizado publicaciones o aplicaciones de la herramienta y nunca se obtuvo respuesta positiva por parte de ellos.

8. Bibliografía y Referencias.

Moreda, F. (2.014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos*. parte 2: IDB-TN-529. BID.

Nalesso, M., & Coli, P. (2.018). Step by step Guide. HydroBID Series: Technical Information. New York: Inter-American Development Bank, IDB.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J.V. (1.970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.

O.N.U. GAOR, 64a. ses., 48o. plen. mtg, U.N. Doc A/RES/64/292 (3 de agosto de 2.010), disponible en: <http://www.refworld.org/cgi-bin/texis/vtx/rwmain/opedocpdf.pdf?reldoc=y&docid=4cc9270b2>.

Rineer, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F. y Muñoz-Castillo, R. (2.014). *Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe*. Parte 1: IDB-TN-528. BID.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2.020). Histórico de series Hidrometeorológicas. Obtenido de <https://www.car.gov.co/vercontenido/2524>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). dhime.Ideam. Obtenido de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). Sistema de Información del Recurso Hídrico "SIRH". Obtenido de <http://sirh.ideam.gov.co/Sirh/faces/observatorioSuperficiales.jspx>.

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2.021). Portal de Datos Abiertos Gov.co. Obtenido de <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM/n6vw-vkfe>.