



**ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA
PARA LA CUENCA DEL RÍO NEVADO UBICADA
EN EL MUNICIPIO DE GÜICÁN, MEDIANTE EL
EMPLEO DE TÉCNICAS SIG Y UN MODELO
HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO.**

**ANALYSIS OF THE HYDROLOGICAL RESPONSE FOR THE
NEVADO RIVER BASIN LOCATED IN THE MUNICIPALITY
OF GÜICÁN, BY USING GIS TECHNIQUES AND A
DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL**

Laura Lorena González Saavedra
3101557
Ingeniero Ambiental

Director trabajo de grado:
Ing. Freddy León Reyes M.Ed

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
DICIEMBRE DE 2021
BOGOTÁ-COLOMBIA**

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA PARA LA CUENCA DEL RÍO NEVADO UBICADA EN EL MUNICIPIO DE GÜICÁN, MEDIANTE EL EMPLEO DE TÉCNICAS SIG Y UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO.

ANALYSIS OF THE HYDROLOGICAL RESPONSE FOR THE NEVADO RIVER BASIN LOCATED IN THE MUNICIPALITY OF GÜICÁN, BY USING GIS TECHNIQUES AND A DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL

Laura Lorena González Saavedra
Especialista en Seguridad y Salud en el Trabajo, Ingeniero Ambiental.
Universidad Militar Nueva Granada.
Bogotá, Colombia
est.laural.gonzalezs@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El presente trabajo de grado contiene un análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca del río nevado ubicada en el municipio de Guican, mediante el empleo de técnicas SIG y la construcción de un modelo hidrológico distribuido lluvia escorrentía en Iber, para dos períodos de retorno, 50 y 100 años; información que sirve como referente del estado actual de la hidrología en la zona de estudio. El documento presenta el área de interés, los pasos empleados para la generación de una herramienta de geoprocésamiento en el ModelBuilder de ArcGIS que permite delimitar la Cuenca hidrográfica y su divisoria de aguas. Resultados a partir de los cuales se calculan algunos parámetros morfométricos de la cuenca (área, perímetro, pendiente) empleados para la construcción del modelo hidrológico y la obtención de los hidrogramas de respuesta para los períodos de retorno en mención.

A través de la ejecución de la herramienta de geoprocésamiento, se experimenta la optimización de los flujos de trabajo y la facilidad de su interfaz para el cambio de datos e interacción por parte de un usuario; así mismo, los resultados obtenidos permiten evidenciar que por tratarse de una zona de alta montaña con una pendiente media de 11.33%, la cuenca es propensa a la producción de altos y rápidos caudales.

Palabras Clave: Cuenca hidrográfica, Técnicas SIG, Güicán, Modelo hidrológico distribuido, Iber.

ABSTRACT

This degree work contains an analysis of the hydrological response of the Nevado river basin located in the Guican municipality, through the use of GIS techniques and the

construction of a hydrological model distributed rain runoff in Iber, for two different return periods, 50 and 100 years; information that serves as a reference of the current state of hydrology in the study area. The document presents the area of interest, the steps used to generate a geoprocessing tool in the ArcGIS ModelBuilder that allows the delimitation of the hydrographic basin and its watershed. Results from which some morphometric parameters of the basin are calculated (area, perimeter, slope) used for the construction of the hydrological model and obtaining the response hydrographs for the return periods in question.

Through the execution of the geoprocessing tool, the optimization of workflows and the ease of its interface are experienced for the change of data and interaction by a user; Likewise, the results obtained show that since it is a high mountain area with an average slope of 11.33%, the basin is prone to the production of high and rapid flows.

Keywords: Hydrographic basin, GIS techniques, Güicán, Distributed hydrological model, Iber.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica aportan información física y espacial sobre las características ambientales del territorio a través de la geometría de las aguas superficiales. Aspectos que han permitido analizar su funcionamiento, y asemejarla con un colector que recibe la lluvia o precipitación y la convierte en escurrimiento. Los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica, resultan ser de suma importancia dentro de los análisis del ciclo hidrológico y generalmente, son requeridos como datos de entrada en los modelos hidrológicos para generar información que permita planificar el ordenamiento del territorio. [1]

En esencia, estos modelos tratan de reproducir el fenómeno lluvia-escurrimiento en una cuenca y suelen clasificarse en globales y distribuidos. Donde los primeros, refieren a la precipitación y a las características físicas de la cuenca como un “promedio” en toda ella o en un número limitado de subcuencas. Mientras que, los modelos distribuidos toman la variación espacial de la precipitación y de las características físicas de la cuenca mediante una discretización espacial final. [2]

Es por ello, que para el presente trabajo de grado se adopta el modelo distribuido, cuyo procedimiento consiste en dividir la cuenca en una malla de subcuencas, a nivel de celdas de elementos o volúmenes finitos, haciendo uso del software libre “Iber” el cual constituye un modelo numérico de simulación hidráulica bidimensional para flujo no permanente en lámina libre. [2]

Esto quiere decir que, el análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica, es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua lluvia.

Por otro lado, gracias al avance de la geomática y existencia de diversas herramientas, como los Sistemas de Información Geográfica –SIG, es posible realizar la caracterización espacio temporal de una cuenca hidrográfica, en cualquier área o zona

de interés, donde se desee conocer el estado actual de la hidrología, para la gestión integral del recurso hídrico en el territorio.

Es así que, como zona de interés o caso de estudio, se adopta el municipio de Güicán de la Sierra, ubicado en la provincia de Gutiérrez, en el departamento de Boyacá. El cual se elige por ser de gran importancia ambiental, al destacarse porque un 80% del territorio de su jurisdicción hace parte de un Parque Nacional (PNN), y porque en su jurisdicción territorial se encuentra establecido parte del Resguardo de la comunidad indígena U`wa. El municipio de Güicán limita por el Norte con Cubará; por el Suro con los municipios de El Cocuy y el Departamento de Arauca; por el Oriente con el Departamento de Arauca y por el Occidente con los municipios de Chiscas, El Espino y Municipio de Panqueba. Presenta una altitud de 1600 a 5300 m.s.n.m y una temperatura promedio de 13 °C,. Su cuenca principal corresponde al Río Chicamochha medio – Río Bojaba y las principales actividades económicas desarrolladas son la ganadería, la agricultura y el turismo. [3]

Expuesto lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de la respuesta hidrológica para la cuenca del río Nevado ubicado en el municipio de Güicán, mediante el empleo de técnicas SIG y un modelo hidrológico distribuido que permitan ser un referente del estado actual de la hidrología en la zona de estudio y llegar a emplearse como insumo en la gestión integral de los recursos hídricos en el territorio.

Para su desarrollo, la metodología empleada parte de la revisión bibliográfica, obtención de información primaria del IDEAM, delimitación y caracterización de la cuenca hidrográfica seleccionada a través del software ArcGIS, construcción de un modelo hidrológico lluvia – escorrentía a través de un esquema de volúmenes finitos en el Software Iber y finalmente, la obtención del hidrograma de respuesta para las tormentas de cálculo construidas por el método de bloques alternos para intensidades a períodos de retorno de 50 y 100 años.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de la respuesta hidrológica para la cuenca del río Nevado ubicada en el municipio de Güicán, departamento de Boyacá, requiere de la delimitación y caracterización de la cuenca hidrográfica para la obtención de los principales parámetros morfométricos (área, perímetro, longitud del cauce principal, altura máxima y mínima entre otros), los usos y coberturas de la tierra, que serán fundamentales en la construcción del modelo hidrológico lluvia escorrentía distribuido, y la determinación del hidrograma de respuesta para las tormentas de cálculo, construidas por el método de bloques alternos para intensidades asociadas a diferentes períodos de retorno.

Es por ello que, para la delimitación y caracterización morfológica de la cuenca hidrográfica, se empleó la cartografía base del municipio de Güicán y un Modelo de Elevación del Terreno (DEM) de la zona de estudio, obtenido del servidor “EARTHDATA-ASF”, cuyas características se presentan en la tabla 1.

Así mismo, se utilizó la capa de uso y coberturas de la tierra para Colombia publicada por el IDEAM, para el proceso de modelación hidrológica de la cuenca; además, se

solicitó la Curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) del municipio de Güicán para el cálculo de las tormentas de cálculo y cuya información alusiva se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1. Insumos generales para el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Nevado localizada en Güicán, Boyacá.

Insumos	Fecha	Características	Fuente
Cartografía base Güicán	2019	GDB en formato ESRI	SIGTER – Información disponible en línea Kits Ordenamiento
DEM Zona de estudio	2016	Resolución espacial de 12,5 metros	EARTHDATA-ASF
Curva IDF Güicán	-	Código de la estación: 24035070	IDEAM
Uso y coberturas de la tierra	2018	shapefile	IDEAM

La información recolectada fue proyectada al sistema de coordenadas planas Magna Sirgas, con el Único Origen Nacional, conforme con lo dispuesto por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, en las resoluciones 471 del 14 de mayo de 2020 y 529 del 05 de junio de 2020.

1.1 ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio es desarrollado en el municipio de Güicán, en Boyacá (Figura 1), debido a que esta zona es una de las más importantes de la Provincia de Gutiérrez y del departamento, porque un 81% del territorio de su jurisdicción, hace parte del parque nacional natural El Cocuy. Se encuentra a 255 km de Tunja, capital del departamento. Presenta una altitud de 2963 m.s.n.m y una temperatura promedio anual de 12.2°C.

Para la selección del área de interés, se realizó un análisis de la presencia de estaciones del IDEAM con información representativa y sitios de interés ambiental; que en conjunto permitieran definir una zona específica o caso de estudio al interior de Güicán. Aspectos que permitieron elegir como área de estudio la parte Sur – Occidental del municipio, donde se localiza el río Nevado y la estación Limnimétrica de San Luis.

De acuerdo a lo anterior, en la Figura 1 se presenta la localización del municipio de Güicán y se ilustra la zona de estudio que corresponde a la cuenca hidrográfica, así mismo, se ubica la estación climática de Guican trabajada.

Tabla 2. Generalidades Estación IDEAM

código	Nombre	Sub zona Hidrográfica	Elevación	Municipio	Tipo
24035070	GUICAN	RÍO CHICAMOCHA	Altitud: 2963 msnm	GÜICÁN	CLIMÁTICA ORDINARIA
			Latitud: 6.463472		
			Longitud: -72.409194		

En la Tabla 2, se presentan algunas generalidades de la estación de Güicán, la cual cuenta con datos representativos para el área de estudio por su distancia, altura y

correlación espacial. Se ubica en el área hidrográfica del Magdalena Medio, en la zona hidrográfica de Sogamoso y en la sub zona hidrográfica del Río Chicamocha; es de tipo climática ordinaria y a partir de esta se obtuvo la curva IDF trabajada en el presente proyecto.

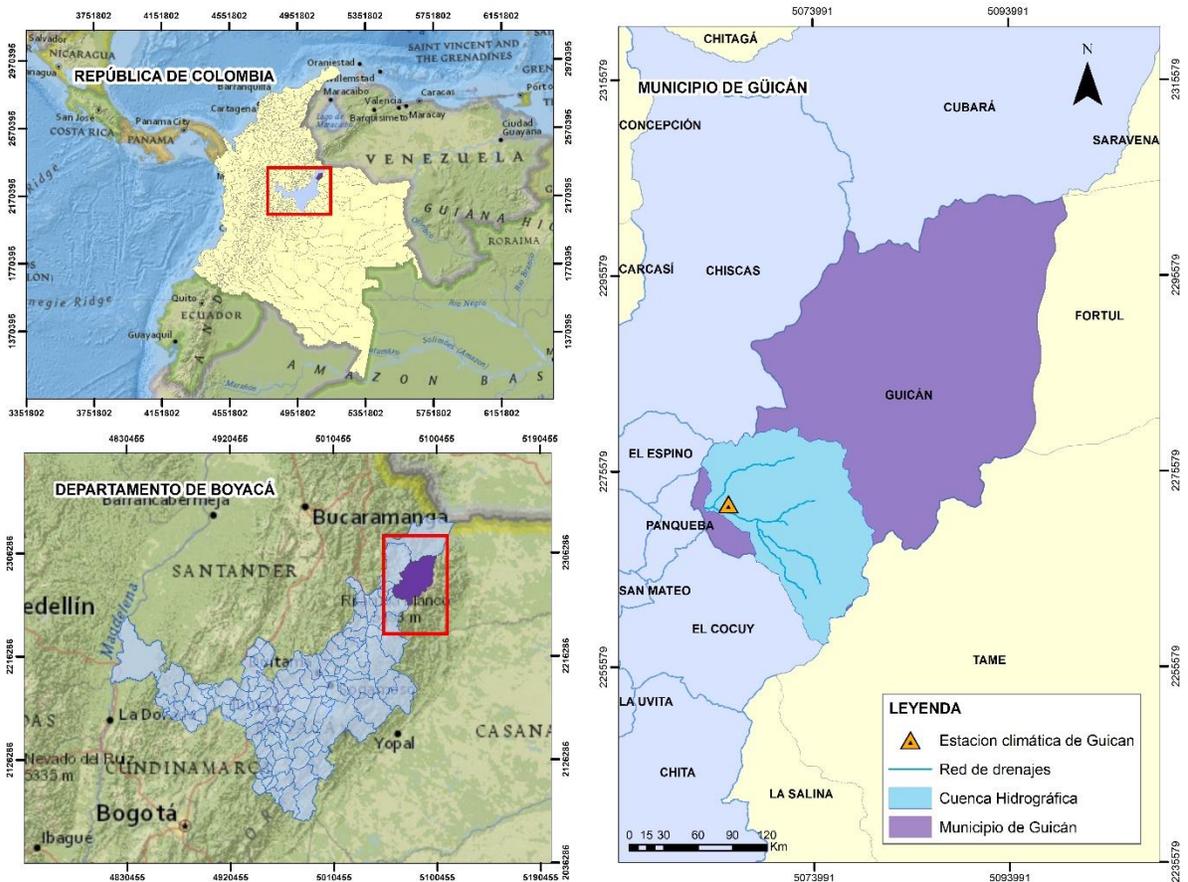


Figura 1. Ubicación general

1.2 DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE GEOPROCESAMIENTO EN ARCGIS PARA LA DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

La metodología empleada para la delimitación de la cuenca hidrográfica, se basa en la construcción de un modelo de geoprocésamiento o flujo de trabajo en el ModelBuilder de ArcGIS, con el propósito de encadenar una secuencia de herramientas que permitan automatizar el trabajo.

Una vez generado y verificado el modelo de geoprocésamiento, se procede con la parametrización del mismo o asignación de parámetros a las herramientas deseadas, de tal modo, que permitan convertirlo en una herramienta útil de geoprocésamiento, que pueda ser empleada con diferentes datos y de forma sencilla por el usuario.

1.2.1 Preparación de datos

Los insumos o capas de entrada requeridos para el desarrollo del modelo de Geoprocesamiento, corresponden a un Modelo de Elevación del Terreno – DEM de la zona de estudio, obtenido del servidor “EARTHDATA-ASF” (Ver tabla 1) y a un polígono o shapefile de la zona de estudio, digitalizado por el usuario.

1.2.2 Crear el modelo de Geoprocesamiento en ModelBuilder

Para el desarrollo del modelo de geoprocesamiento se procedió a generar una carpeta de trabajo llamada Cuenca Hidrográfica en ArcCatalog, en su interior se creó un nuevo Toolbox, el cual fue renombrado con el mismo nombre, y dentro de este, se crearon dos ModelBuilder, llamados Modelo 1 y Modelo 2.

Dadas las necesidades requeridas para los posteriores análisis hidrológicos (Delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca), se generaron dos modelos de geoprocesamiento, donde a partir del primero, se visualizó el resultado de la densidad de drenajes, la dirección del flujo, el fill sinks o relleno del ráster (Dem de la zona de estudio), la clasificación de las corrientes y la acumulación del flujo, todos estos sobre el Dem del área de estudio.

Tras obtener el resultado de la acumulación del flujo, se digitalizó el outlet o punto de drenaje demandado para la delimitación de la cuenca hidrográfica, el cual a su vez es un insumo requerido para el Modelo 2; a partir del cual, se culminó el proceso, se ajustó la red de drenajes a la cuenca delimitada y se efectuaron algunos cálculos para conocer las estadísticas de la cuenca hidrográfica resultante.

Es de resaltar que el Modelo 1, fue desarrollado para que el usuario ingrese las coordenadas tanto de su ráster inicial como del polígono del área de estudio, de tal modo que, se puedan proyectar los datos espaciales de un sistema de coordenadas a otro, donde para el caso se proyectó al sistema de coordenadas planas Magna Sirgas, con el Único Origen Nacional.

En la Tabla 3, se presenta a detalle cada uno de los modelos generados, especificando el lugar o carpeta de almacenamiento, el propósito para el cual fue generado, los servicios de geoprocesamiento involucrados, las tareas de geoprocesamiento que lleva a cabo o ejecuta, las entradas y salidas que genera y finalmente, las extensiones empleadas.

Tabla 3. Especificaciones de los modelos de geoprocesamiento creados para la Cuenca Hidrográfica.

	Modelo 1	Modelo 2
Propósito	Generar una herramienta de geoprocesamiento que permita calcular la densidad de drenajes y acumulación del flujo de un área específica.	Generar una herramienta de geoprocesamiento que permita delimitar y calcular un polígono de la cuenca hidrográfica. [4]

Continuación Tabla 3.

	Modelo 1	Modelo 2
Servicios	<ul style="list-style-type: none"> - Projections and Transformations - Extraction - Hydrology - Conditional 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrology - From Raster - Features - Extract - Generalization - Fields
Tareas de geoprocresamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Project: Proyectar el sistema de coordenadas del polígono de la zona de estudio. - Project Raster: Proyectar el sistema de coordenadas del DEM general de la zona de estudio. - Extract by mask: Recortar DEM de la zona de estudio. - Fill: Rellenar las depresiones del DEM recortado para quitar pequeñas imperfecciones. - Flow direction: Crear el ráster de dirección del flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada. - Flow Accumulation: Generar un ráster de flujo acumulado para cada celda. - Con: Calcular la densidad de drenajes de la zona de estudio. - Stream Order: clasificación de corrientes, se asigna un orden numérico a los segmentos del ráster que representan las de ramas de una red lineal. [5] 	<ul style="list-style-type: none"> - Watershed: Determinar el área de contribución. - Raster To Polygon: Convertir el raster de la cuenca en un polígono. - Add geometry attributes: Calcular área y perímetro de la cuenca. - Stream to feature: De entidad a corriente, permite convertir un ráster que representa una red lineal a entidades que representan la red lineal - Clip: Extraer el resultado del Stream feature al área o polígono de la cuenca hidrográfica. - Dissolve: Fusionar los drenajes que hagan parte de la misma corriente. - Add field: Adicionar un campo - Calculate field: Calcular la longitud de los drenajes obtenidos para la cuenca hidrográfica resultante. [5]
Entradas	<ul style="list-style-type: none"> - El usuario digitaliza un polígono en el área de estudio. - El usuario ingresa un DEM de la zona de estudio. 	<ul style="list-style-type: none"> - El usuario digitaliza un punto de drenaje para la delimitación de la cuenca. - Ráster Resultante de dirección del flujo. - Raster resultante de la clasificación de corrientes o Stream order
Salidas	<ul style="list-style-type: none"> - Ráster o Dem recortado de la zona de estudio en el sistema de coordenadas deseado. - Polígono del área de estudio en el sistema de coordenadas deseado. - Ráster del Fill de la zona de estudio - Ráster del resultado la Dirección del flujo. - Ráster de la acumulación del flujo zona - Ráster de la densidad de drenajes - Ráster del o clasificación de corrientes Stream order 	<ul style="list-style-type: none"> - Ráster de la cuenca hidrográfica generada. - Polígono de la cuenca hidrográfica generada. - Red de drenajes dentro de la cuenca hidrográfica. - Polígonos tipo línea de la red de drenaje. - Adición de campo de longitud y cálculo del mismo para la red de drenajes que se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica.
Extensiones	Spatial Analyst	

De acuerdo con lo anterior, en la Figura 2 y 3 se ilustran los modelos de geoprocесamiento generados en ModelBuilder, donde a modo general los óvalos de color azul, representan las capas de entrada del modelo, los rectángulos amarillos indican las tareas de geoprocесamiento y los óvalos verdes contienen las salidas del modelo y/o entradas requeridas para otras herramientas.

Los óvalos azul celeste en la Figura 2 o Modelo 1, indican que se han creado variables a partir de parámetros, los cuales permiten variar el sistema de coordenadas para el DEM y Zona de estudio, así como la densidad de drenajes.

1.2.3 Ejecución y validación del modelo

Una vez construido cada modelo, se procedió a su ejecución y validación, ingresando los insumos o capas de entrada especificados en la Tabla 3. Así mismo, se emplearon las herramientas de Validate Entire Model (Validar el modelo completo) y Run (Correr el modelo) presentes en el ModelBuilder.

Acciones que permitieron evidenciar los resultados esperados para cada modelo. En la Figura 1 y 2, se ilustra la sombra generada en cada modelo, lo cual representa que han sido ejecutados correctamente.

1.2.4 Crear parámetros de modelo

Una vez validados los modelos, se procedió a parametrizarlos indicando las variables deseadas, estos se muestran con la letra p junto a la variable y permiten que al abrir el cuadro de diálogo de la pueda ser cambiado el parámetro por otro dato o capa de información. Es decir que las herramientas se ejecutan utilizando los datos que el usuario ha proporcionado.

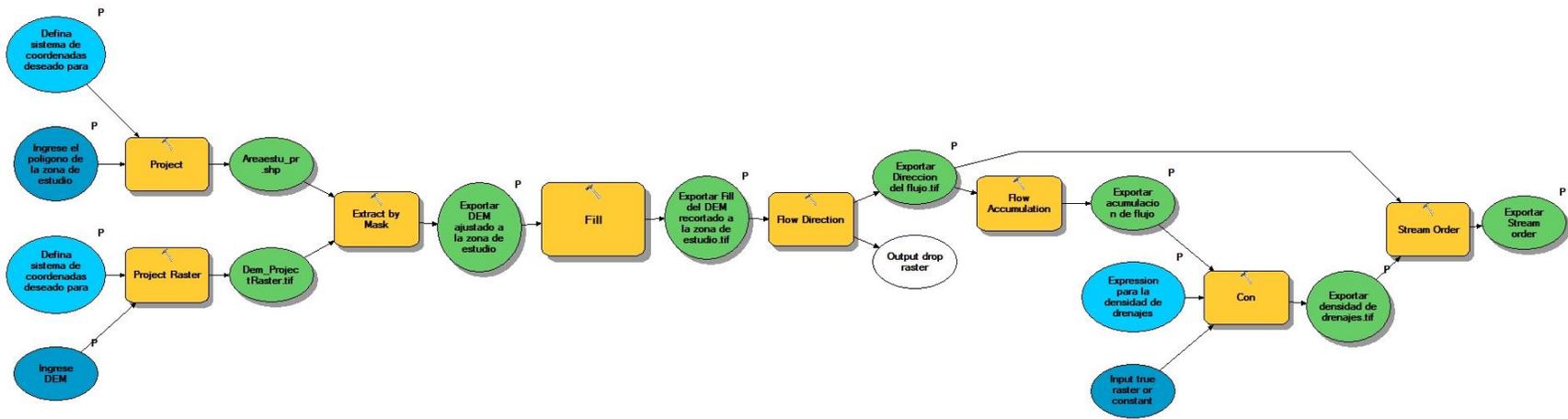


Figura 2. Modelo 1 – Acumulación del flujo y red de drenajes

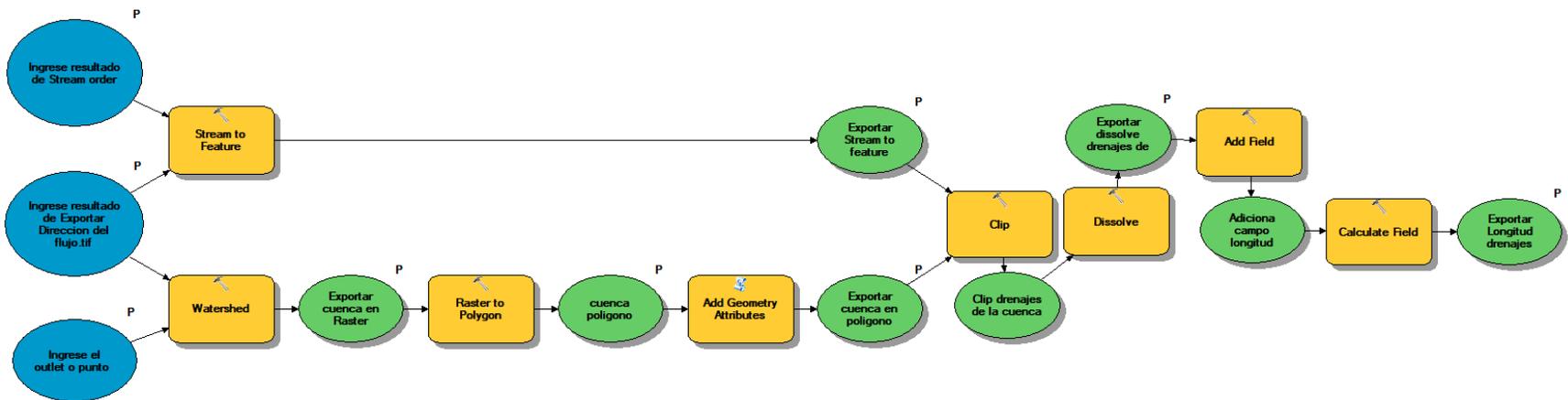


Figura 3. Modelo 2 – Delimitación de la cuenca hidrográfica

En la Figura 2, se presenta la construcción del Modelo 1 en ModelBuilder, mientras que, en la Figura 4 se ilustra la visualización de la herramienta de Geoprocesamiento generada tras la parametrización del mismo, ventana creada para el usuario.

Este modelo permite efectuar un recorte entre un DEM y una zona de estudio deseada, para calcular la acumulación del flujo, densidad de drenajes, dirección del flujo, llenado del DEM recortado y clasificación de corrientes hídricas. De este modo, a partir de los resultados obtenidos para la acumulación del flujo, el usuario debe digitalizar un punto de drenaje u outlet, sobre la zona deseada para la posterior delimitación de la cuenca hidrográfica, el cual será el insumo para la segunda parte o modelo 2 de la cuenca hidrográfica.

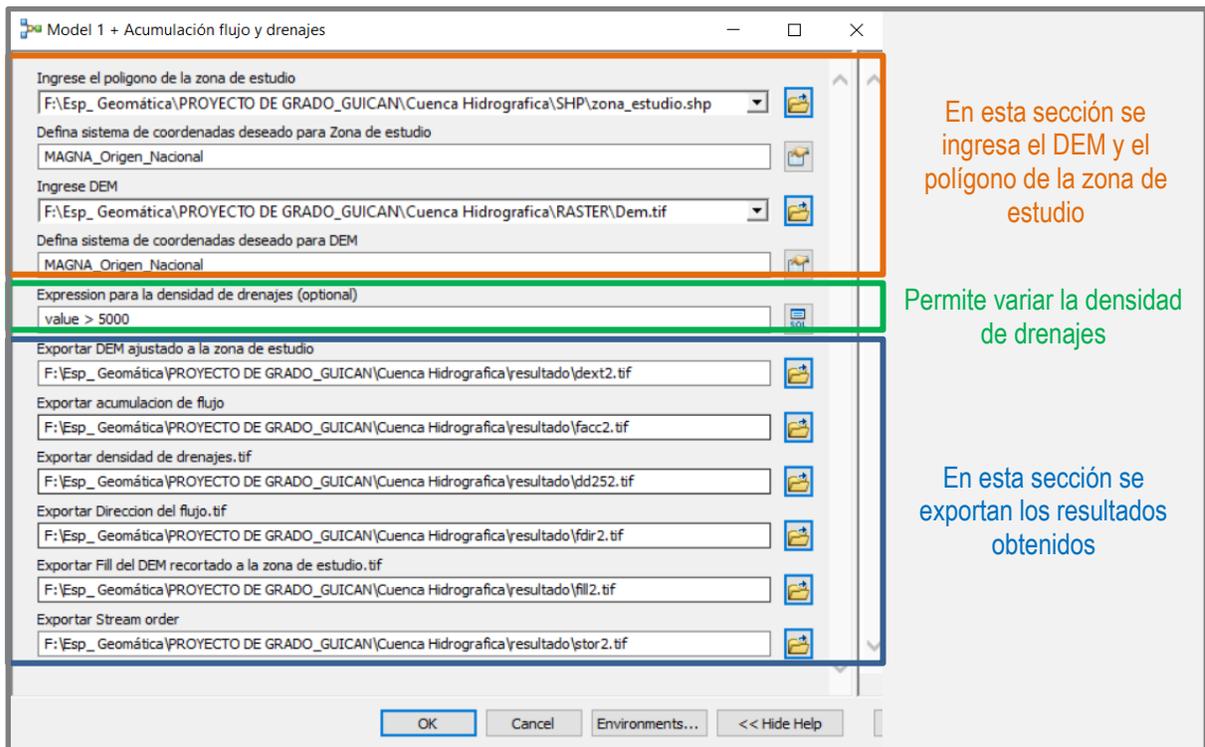


Figura 4. Visualización de la herramienta de geoprocesamiento del modelo 1

En cuanto a la Figura 3, representa el ModelBuilder generado y la Figura 5, ilustra la ventana interactiva resultante para el usuario o donde fueron ingresados los datos solicitados para la generación del polígono de la cuenca y su red de drenajes.

Es decir que el modelo permite delimitar la cuenca hidrográfica a partir del resultado obtenido de la dirección del flujo en el Modelo 1 y el outlet o punto de drenaje digitalizado (shapefile tipo punto). Tanto para el Modelo 1 como para el Modelo 2, los campos que presentan la expresión "Exportar" solicitan el nombre de archivo y ruta donde el usuario desea guardar sus resultados.

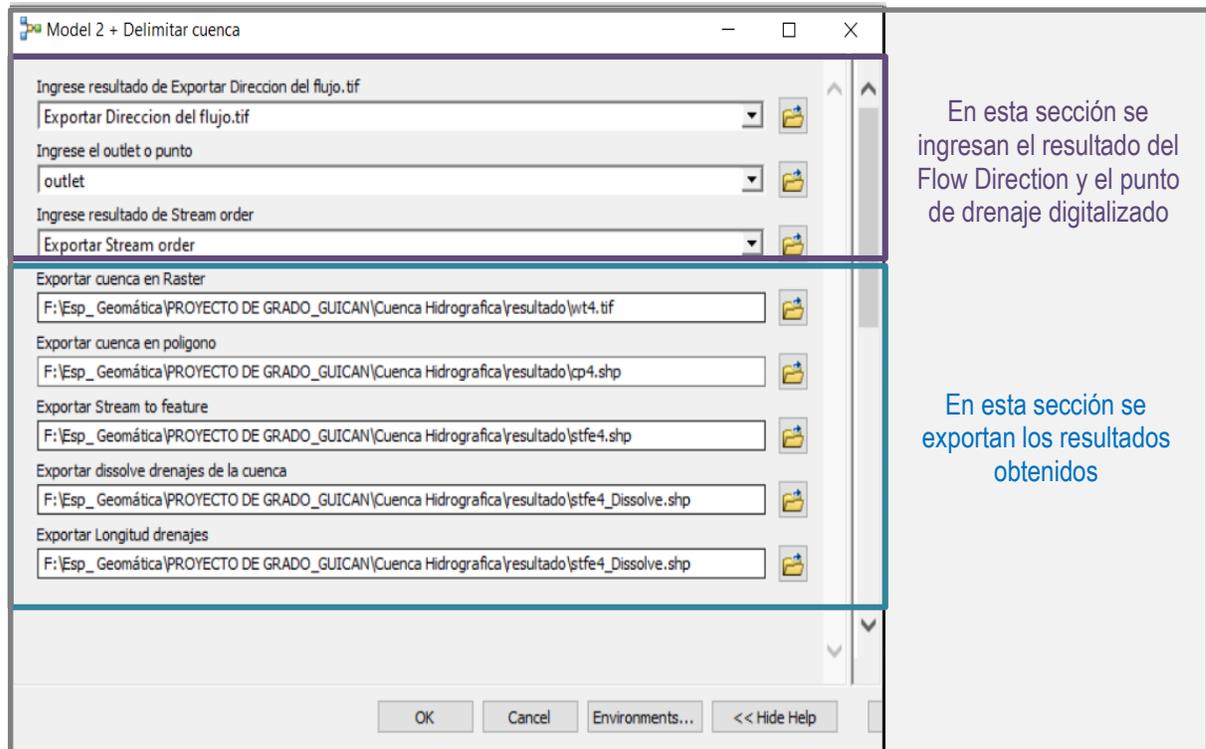


Figura 5. Visualización de la herramienta de geoprocresamiento del modelo 2

1.3 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA

A partir del modelo digital de elevación empleado y los resultados obtenidos en los modelos de geoprocresamiento, se definió la línea divisoria de la cuenca y se obtuvieron los parámetros de área aferente, perímetro, longitud de drenajes y pendiente máxima y mínima de la cuenca. Posteriormente, con ayuda de la extensión Arc Hydro Tools se definió la longitud máxima del flujo y se procedió a calcular el Tiempo de concentración y el Tiempo de retardo.

Para el cálculo del tiempo de concentración (T_c) se eligió el método planteado por Kirpich

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad [6]$$

Dónde:

T_c = Tiempo de concentración, en horas (h)

L = Longitud del cauce principal, en kilómetros (km)

S = Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m)

Referente al tiempo de retardo (T_{lag}) se empleó la relación en la que T_{lag} es igual a $0.6 \times T_c$ [7]

1.4 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO LLUVIA – ESCORRENTÍA DISTRIBUIDO EN IBER

Los modelos lluvia – escorrentía son empleados cuando no se tiene la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en las cuencas hidrográficas, y se desea determinar la escorrentía superficial. Para su cálculo, se requieren datos históricos representativos de lluvia de corta duración de la zona de interés, aplicados a la cuenca hidrográfica y contemplando características de sus suelos y vegetación [6]

Debido a que, durante la modelación hidrológica, la precipitación presenta pérdidas tales como la infiltración, la interceptación y la detención superficial, se requiere adoptar un método que permita estimar dichas abstracciones iniciales de un evento de lluvia [8]. En ese sentido, para el presente proyecto se emplea el método del número de curva CN del Soil Conservarrtion Service de los Estados Unidos de América, SCS, para estimar las abstracciones de la precipitación. Así mismo, y por tratarse de un modelo hidrológico distribuido, requiere de la definición del coeficiente de Manning n, valor que indica la rugosidad presente en un canal. [9]

Para obtener la tormenta de cálculo, se empleó el método de los bloques alternos a partir de la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) obtenida de la estación climática ordinaria del municipio de Güicán (cód.: 24035070), como se relaciona en la Tabla 2.

1.4.1 Modelación hidrológica en IBER

IBER es un modelo matemático bidimensional basado en las ecuaciones 2D de Saint Venant que permite el cálculo de la transformación de lluvia a escorrentía [10]. Dentro de sus herramientas y para efectos del presente análisis, se considera el esquema numérico de cálculo, la definición del límite mojado, el tipo y tamaño de la celda y la herramienta Fill sink, a fin de obtener un mejor cálculo hidrológico. En la tabla 4, se especifican las anteriores consideraciones,

Tabla 4. Herramientas principales para la modelación hidrológica en IBER

ESQUEMA DESACOPLADO (DHD Basin)	UMRAL SECO MOJADO
Permite resolver algunas inestabilidades producidas para casos de cálculo hidrológico con caudales muy pequeños. No obstante, para cálculos hidráulicos con calados grandes y con cambios de régimen pueden generarse inestabilidades. [8]	Variable que indica la altura límite de calado por encima de la cual IBER considera a un elemento finito como mojado, aspecto que mejora el rendimiento del programa, pues no realizará cálculos sobre aquellos elementos que se reconozcan como secos. [8]
FILL SINKS	MALLADO
Permite rellenar las depresiones encontradas en el DEM.	La malla es un conjunto de celdas contiguas que permite representar en forma discreta el dominio de un problema a resolver numéricamente, donde para IBER es una superficie. La confiabilidad de la solución numérica depende de la malla. [8]

Para dar inicio a la construcción del modelo, fue necesario contar con la geometría o delimitación de la cuenca hidrográfica, obtenida a partir de la herramienta de geoprocésamiento y a la cual, a partir de IBER, se le generó su respectiva superficie como se observa en la Figura 6.

1.4.1.2 Datos del problema

Con el ánimo de obtener un mejor modelo e hidrograma de salida que permitiera reducir las inestabilidades, se configuraron los datos del problema, seleccionando el esquema desacoplado (DHD Basin) y el Fill sink para rellenar las depresiones encontradas en el DEM. Adicionalmente, se configuró el umbral seco – mojado en 0.001 m, de tal modo que a partir de este valor IBER reconociera un elemento como mojado y efectuará los respectivos cálculos.

1.4.1.3 Condiciones de contorno

No se considera una condición de entrada, puesto que se utiliza un hidrograma que representa las tormentas de cálculo y generarán una respuesta hidrológica de la cuenca. Para la condición de salida y lugar en donde se obtendrá el hidrograma resultante se estableció el punto más bajo de la cuenca, asumiendo a su vez una condición de flujo supercrítico por tratarse de una zona de alta pendiente y para eventos de lluvia asociados a períodos de retorno de 50 y 100 años.

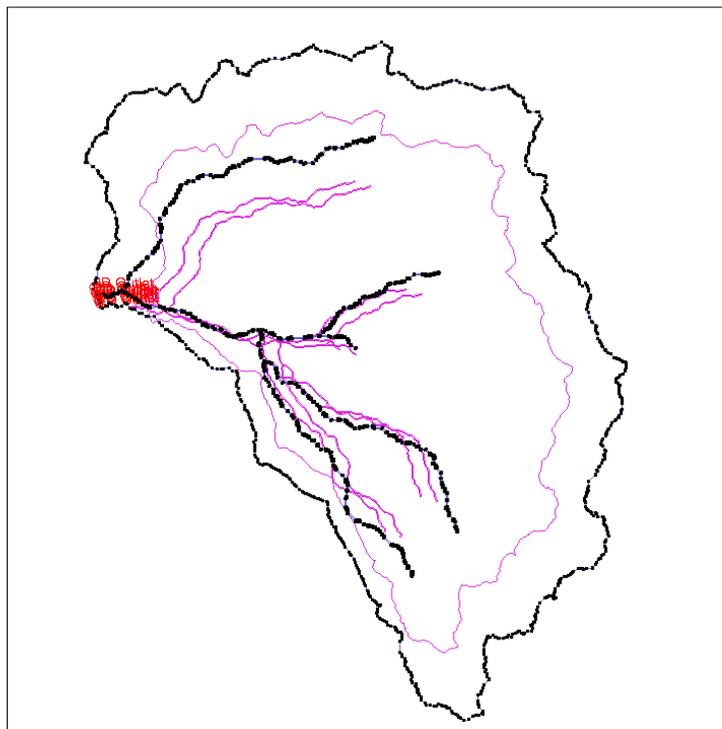


Figura 6. Asignación de la salida a la geometría de la cuenca en IBER

En la Figura 6, se aprecia en color negro la geometría o delimitación de la cuenca hidrográfica junto a su red de drenajes y los colores magenta indican la superficie

generada en Iber para dichas capas; finalmente, en color rojo, se aprecia el punto de drenaje definido para la cuenca.

1.4.1.4 Mallado

Para efectos del presente modelo se construyó una malla no estructurada, con dos tamaños de elementos diferenciados para la red de drenaje y el área aportante, donde para el primero se asignó un valor de malla de 5 metros y para el segundo de 50 metros. Enseguida, se empleó un archivo en formato ASCII del Dem de la zona de estudio obtenido de la herramienta de geoprocésamiento, a partir del cual se asignaron las elevaciones a la malla de la cuenca.

1.4.1.5 Pérdidas

Para el cálculo de las pérdidas se empleó el método de la Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América, SCS. Cuyo valor de número de curva, fue establecido con la ayuda del Dem de la zona de estudio y a partir de la asignación de valores de referencia obtenidos del Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS, para una condición de humedad antecedente promedio (CNII), de conformidad con el análisis de la capa del uso y cobertura vegetal de la tierra presente en el área de interés, obtenido del IDEAM (Ver Anexos 1,2 y 3).

La metodología del número de curva surge a partir de la observación del fenómeno hidrológico de distintos tipos de suelo en varios estados con diversas condiciones de humedad antecedente; en donde se obtuvo como resultado una familia de curvas que fue estandarizada en un número adimensional de curva que varía entre un rango de 1 a 100; siendo CN=100 el valor que indica que toda la lluvia escurre y CN=1 que toda la lluvia se infiltra. [11]

1.4.1.6 Coeficiente de rugosidad

Para la asignación de la rugosidad se emplearon valores teóricos de referencia obtenidos de Ven Te Chow, de conformidad con el uso del suelo y la cobertura vegetal de la zona (Ver Anexos 1,2 y 3). [12]

1.5 TORMENTA DE CÁLCULO

Además de los atributos descritos en el ítem anterior para la generación del modelo Hidrológico distribuido en Iber, se cargaron dos tormentas de cálculo para tiempos de retorno de 50 y 100 años, las cuales fueron calculadas mediante el método de bloques alternos a partir de las Curvas IDF obtenidas de la estación climática ordinaria del municipio de Güicán con una duración asociada al tiempo de concentración para obtener la lluvia máxima. [13]

A continuación, se presentan los hietogramas obtenidos

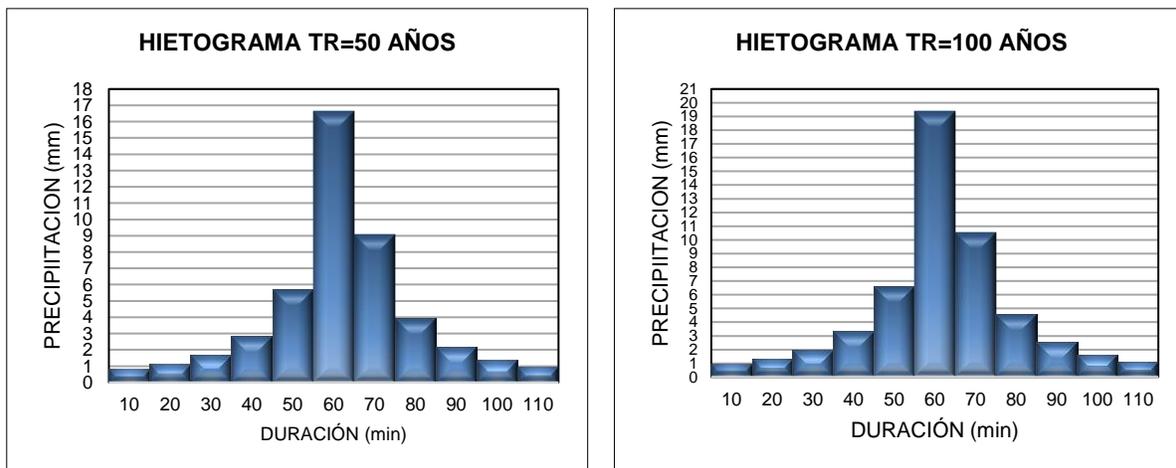


Figura 7. Hietogramas calculados por el método de bloques alternos para los períodos de retorno de 50 y 100 años.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.1 DELIMITACIÓN Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO NEVADO

Una vez ejecutados los Modelos 1 y 2 de geoprocésamiento, fue posible obtener la delimitación de la cuenca hidrográfrica para la zona de estudio (Ver Figura 8), cuya geometría se presenta en color azul claro y su divisoria de aguas en tonos de azul oscuro, así mismo, se ilustra la ubicación del punto de drenaje considerado para el proceso de delimitación de la misma.

Tabla 5. Parámetros morfométricos de la cuenca

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Área cuenca	A (Km ²)	225.82
Perímetro cuenca	P (km)	75.98
Altura máxima cuenca	h1 (m.s.n.m)	5350
Altura mínima cuenca	h2 (m.s.n.m)	2560
Pendiente media cuenca	p (%)	11.33%
Longitud del cauce principal	L (km)	24.62
Tiempo de concentración	T _c (Hr)	1.81
Tiempo de retardo	Tlag (Hr)	1.08

Referente a los parámetros morfométricos de la cuenca, en la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos. Allí se aprecia que el polígono de la cuenca resultante tiene un área aferente de 225.82 km², un perímetro de 75.98 km y la longitud de su cauce principal es de 24.62 km.

Al estar ubicada en una zona de alta pendiente y cerca al Nevado del cocuy, presenta una altura máxima de 5350 m.s.n.m y mínima de 2560 m.s.n.m con una pendiente media de 11.33%, que la hace propensa a la producción de altos y rápidos caudales

pico. De acuerdo al tiempo de concentración obtenido, el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la cuenca hasta llegar a la salida de la misma es de 1.81 horas; presenta un tiempo de retardo de 1.08 hora.

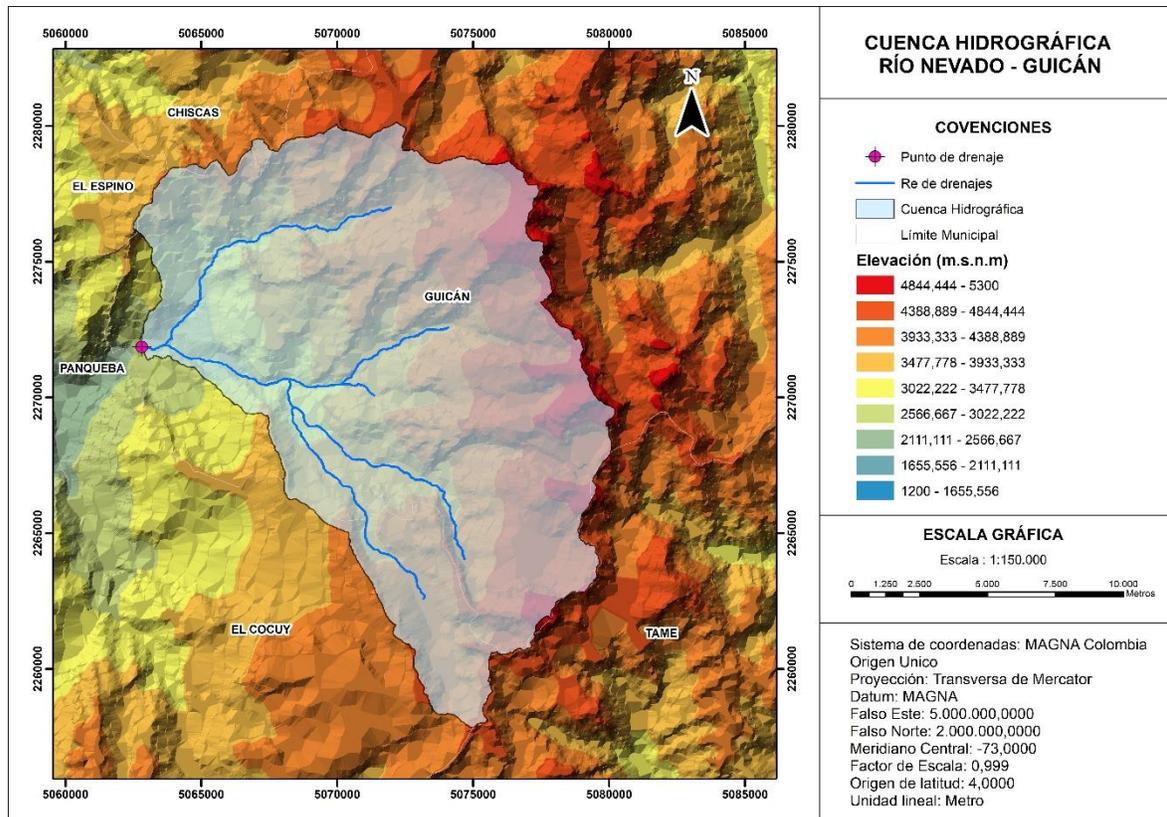


Figura 8. Delimitación de la cuenca hidrográfica

2.1 MODELO HIDROLÓGICO

Tras efectuar las modelaciones para cada uno de los períodos de retorno, 50 y 100 años, en Iber desde la herramienta calcular > ver información del proceso, se consultan los resultados obtenidos para el Caudal de salida (Q_{out}) y el tiempo de simulación para cada modelo.

En la figura 9, se presentan los resultados obtenidos para cada modelo hidrológico, correspondientes a los tiempos de retorno de 50 y 100 años respectivamente; las líneas entrecortadas de color azul indican el tiempo de simulación y las marrón el caudal de salida (Q_{out}).

Con el ánimo de ilustrar los resultados obtenidos, en las Figuras 10 y 11, se presentan los valores de calado derivados para los tiempos de retorno de 50 y 100 años. Donde para el caso del primero (Ver Figura 10) se aprecia una profundidad para la lámina de agua de 0.001 a 2.292 metros; representando en su mayoría (tonalidades zules) áreas con presencia de escorrentía, con profundidades de 0.001 a 0.450 aproximadamente; mientras que, las áreas vacías indican la ausencia de escorrentía por la incidencia del número de curva asignado, asociados a suelos con alta tasa de infiltración.

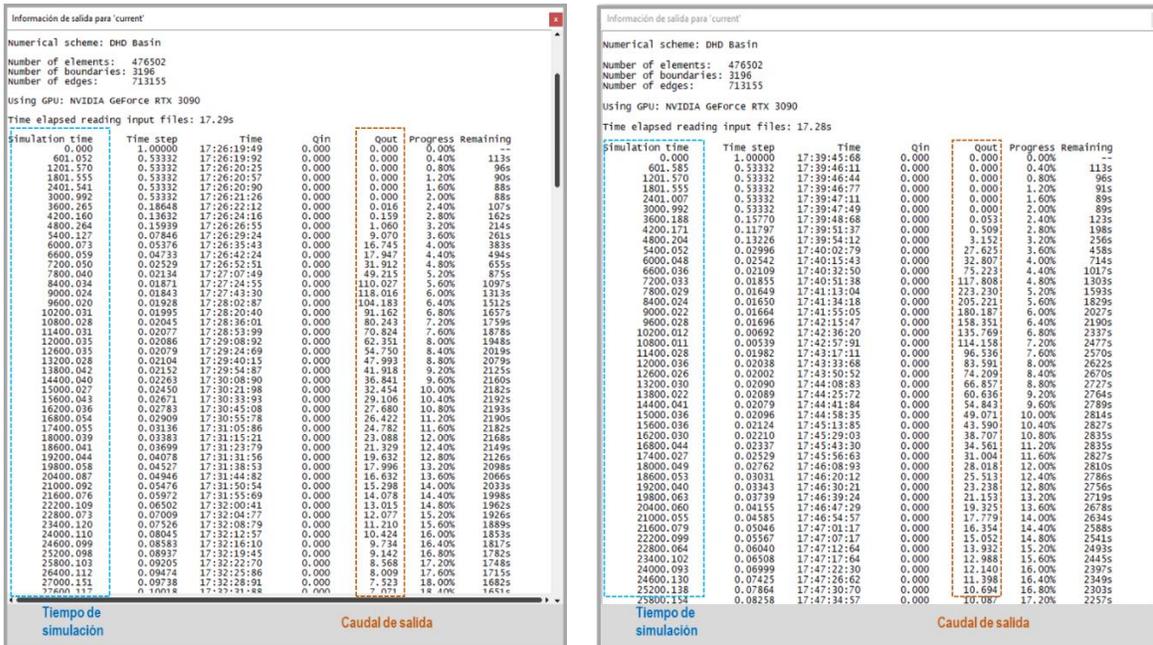


Figura 9. Tiempo de concentración y caudal de salida – TR: 50 años y 100 años.

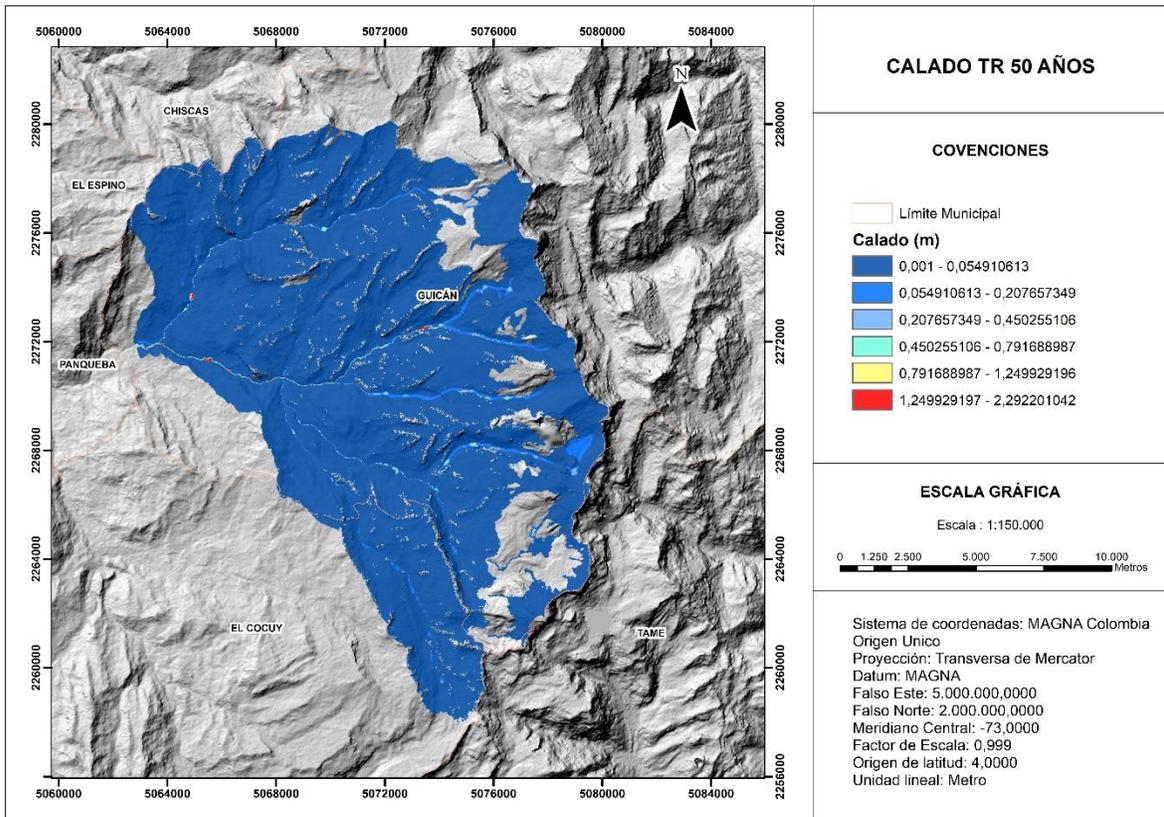


Figura 10. Calado obtenido para un TR de 50 años.

En cuanto al Tiempo de retorno a 100 años, se aprecia el mismo comportamiento para la profundidad de la lámina de agua, la cual alcanza en determinadas zonas una profundidad de hasta 2.702 metros. No obstante, se aprecian las mismas áreas sin escorrentía al oeste de la cuenca hidrográfica.

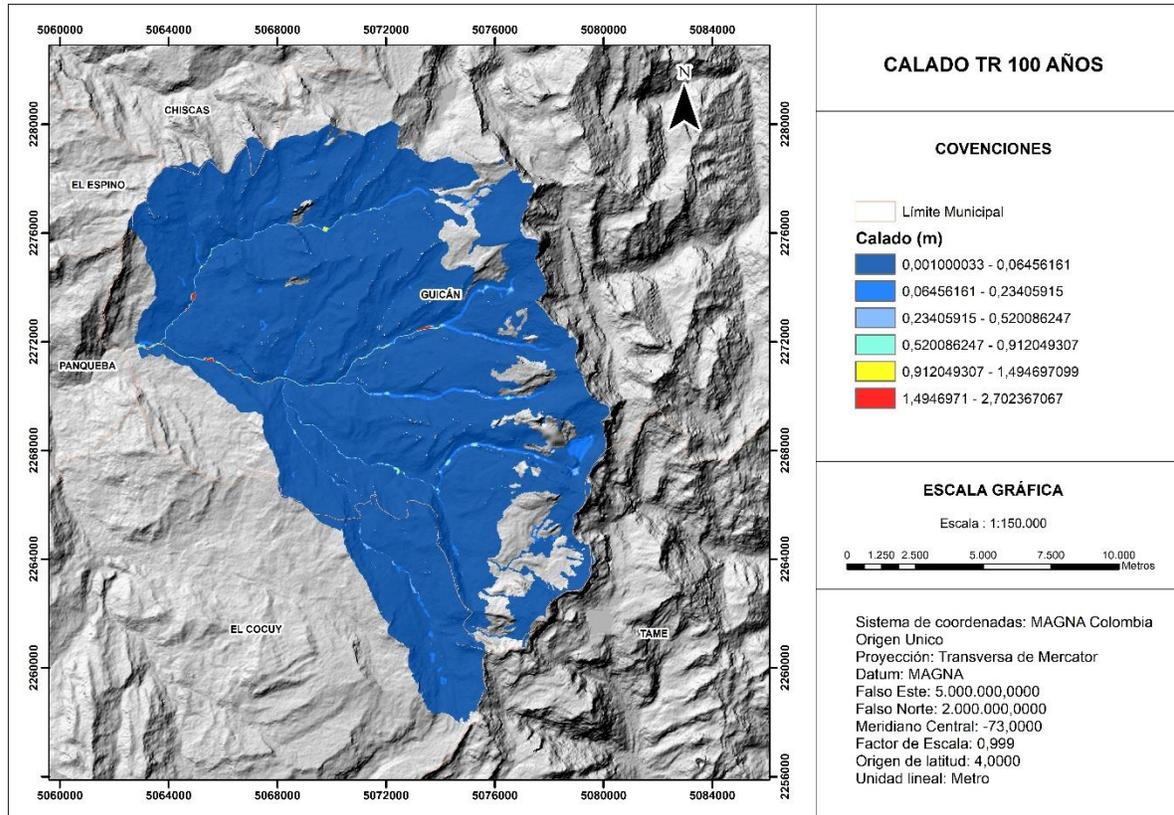


Figura 11. Calado obtenido para un TR de 100 años.

2.2 HIDROGAMAS DE RESPUESTA PARA LAS TORMENTAS DE CÁLCULO PARA PERÍODOS DE RETORNO DE 50 Y 100 AÑOS.

Para la construcción de los hidrogramas de respuesta se emplearon los valores de los caudales de salida obtenidos de Iber para los períodos de retorno de 50 y 100 años.

Para las gráficas de los hidrogramas resultantes que se presentan en la Figura 12, se decidió mostrar únicamente los resultados en un intervalo de tiempo de 0 a 10 horas, esto buscando una mejor escala de visualización e interpretación de resultados. No obstante, se aclara que cada una de las modelaciones efectuadas en Iber comprende una simulación de por lo menos 40 horas, lo que ocasiona que las gráficas queden muy prolongadas y no sea fácil su interpretación.

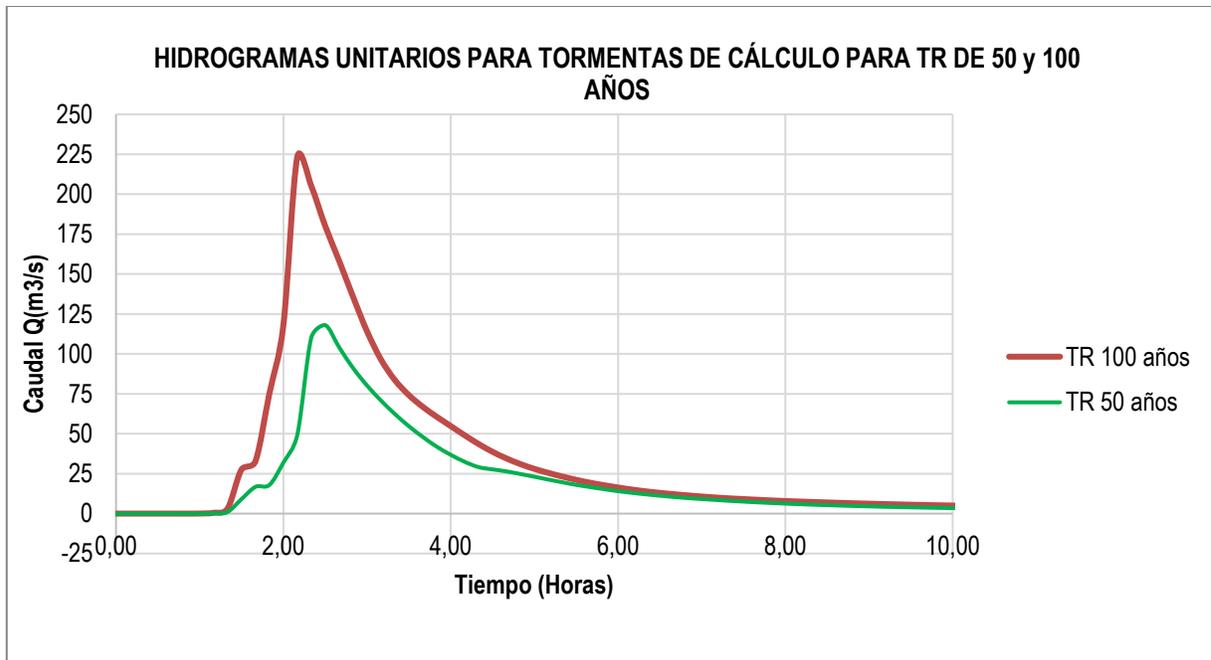


Figura 12. Hidrogramas de respuesta para las tormentas de cálculo a períodos de retorno de 50 y 100 años.

De acuerdo a los resultados presentados en la Figura 12 se aprecia que, para una tormenta de cálculo a un período de retorno de 50 años, se obtiene un caudal pico de 118 (m³/s) en un tiempo de 2.50 horas. Mientras que, para un tiempo de retorno a 100 años, el caudal pico alcanza los 223 (m³/s) para un tiempo de 2.17 horas, lo cual permite identificar que, la respuesta hidrológica para un período de retorno de 50 a 100 años tiene una variación significativa, obteniéndose una respuesta del hidrograma más pronta y un caudal significativamente mayor para un TR de 100 años, como consecuencia de las altas pendientes que presenta esta cuenca y, además, al tenerse alturas de precipitación más elevadas, se supera el umbral de escorrentía con un mayor volumen de precipitación efectiva, la cual se convierte a su vez en escorrentía directa, generando caudales más elevados en comparación con el TR de 50 años.

3. CONCLUSIONES

- De la generación de herramientas de geoprocésamiento se puede constatar que automatizan y disminuyen los tiempos de trabajo, permitiendo al usuario el desarrollo de un flujo de trabajo rápido y sencillo, para la obtención de la delimitación y divisoria de la cuenca hidrográfrica.
- Para los periodos de retorno a 50 y 100 años, la altura de calado o profundidad de la lámina de agua alcanzó valores hasta de 2.70 metros aproximadamente, no obstante, se evidencian áreas sin escorrentía al noroeste y suroeste de la cuenca del Río Nevado, debidos a la topografía de la zona, cobertura vegetal y el bajo valor de número de curva asignado.

- La respuesta hidrológica para un período de retorno de 50 a 100 años tiene una variación significativa, como consecuencia de las altas pendientes de la cuenca y elevadas alturas de precipitación, donde se supera el umbral de escorrentía, al generar un mayor volumen de precipitación efectiva; la cual, se convierte en escorrentía directa y genera caudales más elevados para el tiempo de retorno a 100 años.
- De acuerdo con el análisis de las características morfométricas y la respuesta hidrológica obtenida de la cuenca, se observa que la zona de estudio representa la parte alta de la cuenca hidrográfica o zona vertiente del Río Nevado, en donde el cauce como consecuencia de las altas e irregulares pendientes se encuentra en una etapa torrencial (Pendiente >6% régimen hidráulico torrencial) [14]; estas zonas se caracterizan por presentar crecientes repentinas ante eventos de lluvias fuertes, y porque su hidrodinámica exhibe un régimen rápido o supercrítico, ocasionando que se tenga un gran potencial de arrastre de sedimentos que luego serán depositados aguas abajo de la cuenca, en las zonas de piedemonte y áreas de llanuras aluviales.

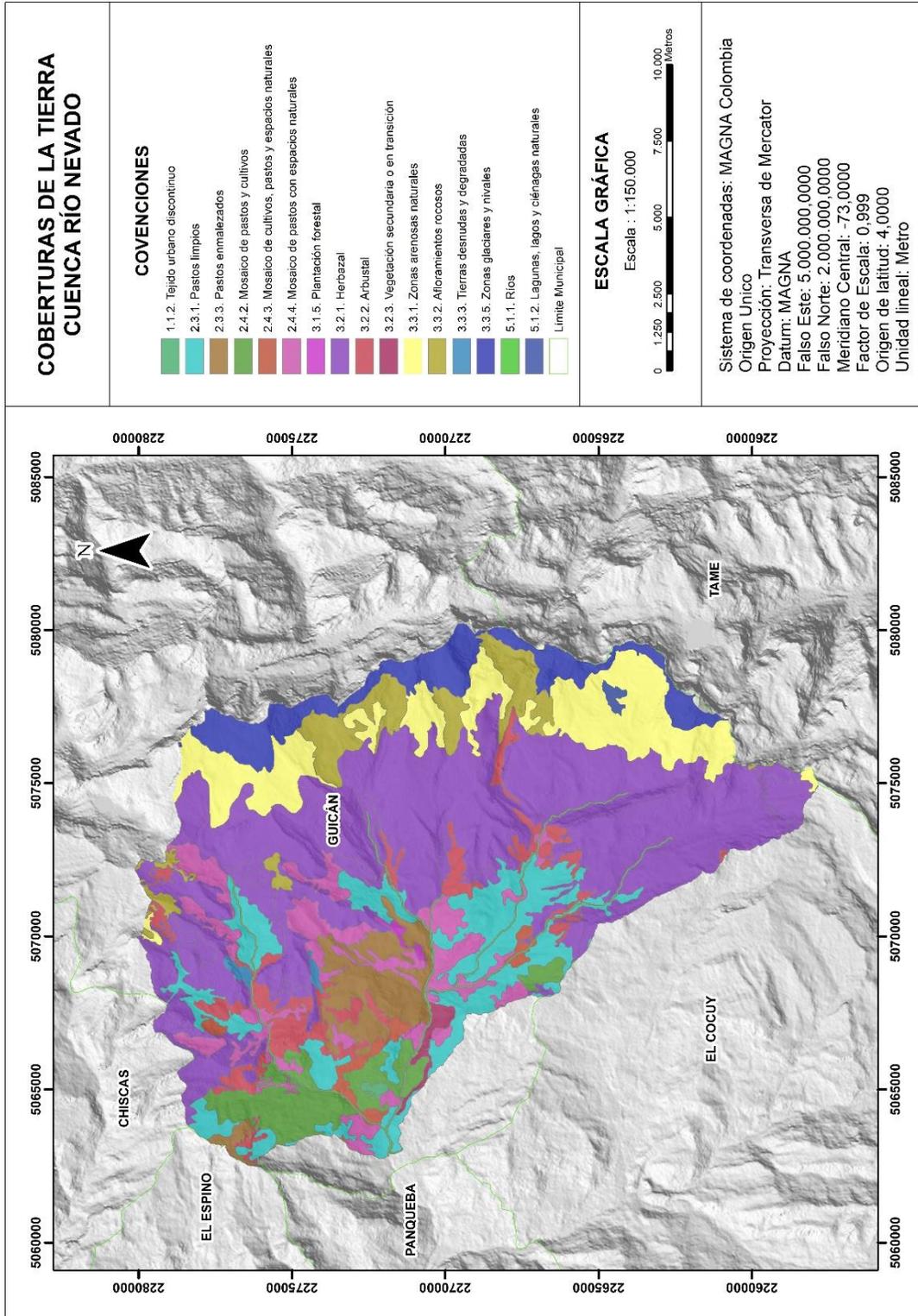
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. J. Gaspari, A. M. Rodríguez Vagaría, G. E. Senisterra, G. Denegri, M. I. Delgado y S. Besteiro, «CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAUCE GRANDE, BUENOS AIRES, ARGENTINA,» *AUGMDOMUS*, p. 16, 2012.
- [2] C. A. Caro Camargo, *Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos*, Barcelona, 2015, p. 230.
- [3] J. J. Blanco López, *Plan de Desarrollo Municipal*, Guicán, 2016, p. 167.
- [4] ESRI, *Tutorial de creación de servicios de geoprocesamiento*, 2012, p. 111.
- [5] ESRI, «ArcGIS for Desktop,» ESRI, [En línea]. Available: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/fill.htm>. [Último acceso: 1 Noviembre 2021].
- [6] M. d. Transporte, *Manual de drenaje de carreteras*, Bogotá D.C, 2009, p. 538.
- [7] Natural Resources Conservation Service , de *National Engineering Handbook.Chapter 16:Hydrographs*, 2007.
- [8] C. D. Barea, «Modelización hidrológica distribuida con un esquema en volúmenes finitos.Validación del método,» 2015.

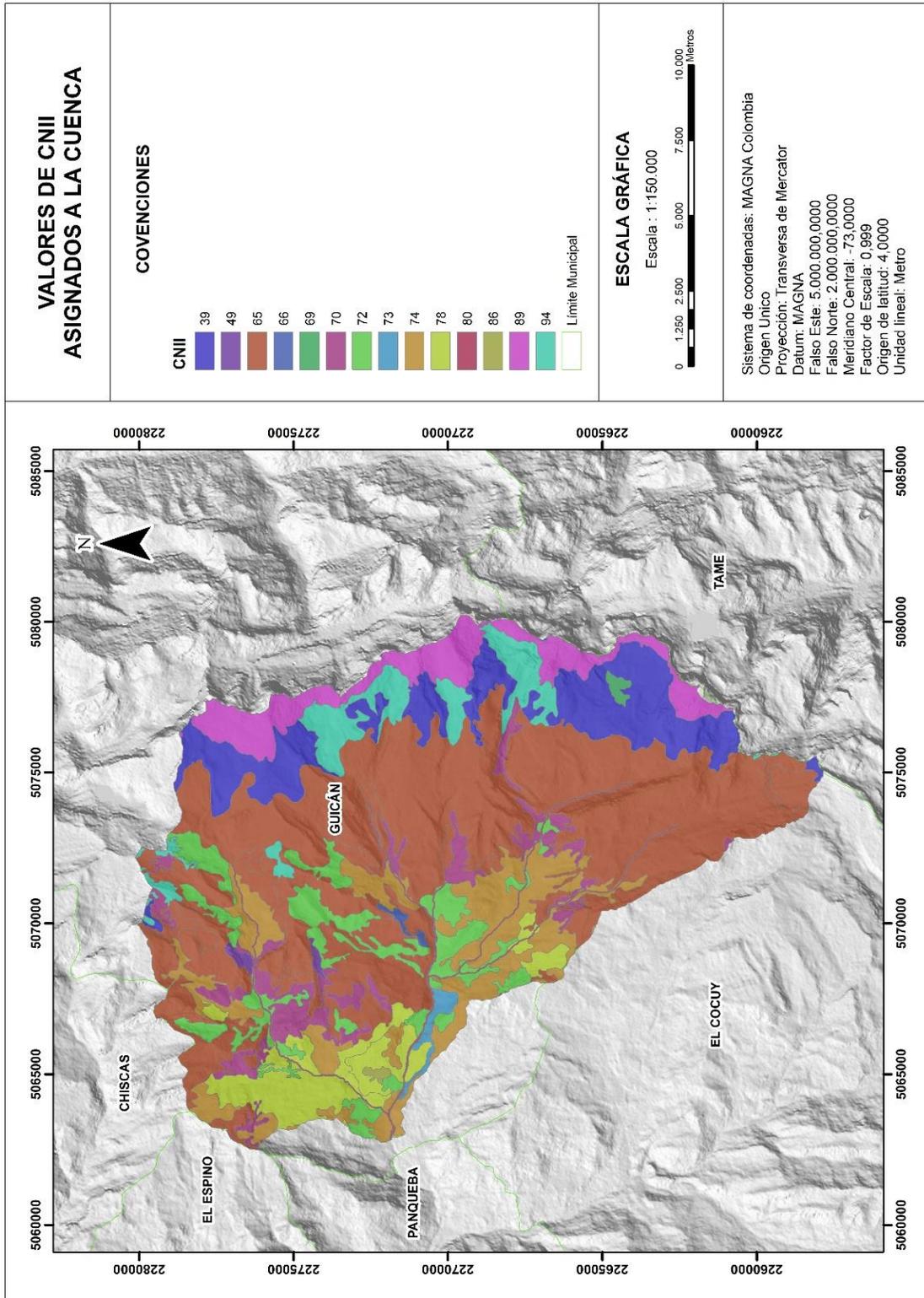
- [9] Y. B. Parra Ariza, *Estimación del coeficiente de manning con el método de los dos puntos en el río negro (Cundinamarca)*, Bogotá D.C, 2018, p. 51.
- [10] O. F. Pacheco Merchán, *Calibración de la rugosidad "n" de manning en cuencas rurales no instrumentadas mediante un modelo hidrológico distribuido*, Tunja, 2018.
- [11] S. A. Lavao Pastrana, *Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña, caso de estudio: Cuenca del Río Muca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica*, Bogotá D.C, 2014, p. 19.
- [12] V. T. Chow, *Hidráulica de canales abiertos*, McGRAW-HILL, 1994, p. 337.
- [13] J. J. Vélez Upegui, «Estimación del tiempo de concentracion y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales,» p. 14, 2010.
- [14] H. A. R. Díaz, *Hidráulica fluvial Fundamentos y aplicaciones* Socavación, Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.

ANEXOS

ANEXO 1: Coberturas de la tierra para la Cuenca del Río Nevado



ANEXO 2: Valores de CNII asignados para la Cuenca del Río Nevado



ANEXO 3: Coeficiente de Rugosidad “n” para la Cuenca del Río Nevado

