

**COMPARACIÓN DE ESCENARIOS DE PLANICIES DE INUNDACIÓN  
PROVOCADAS POR EL DESVÍO DEL RÍO RANCHERÍA**

**María José Pérez Martínez**

**Universidad Santo Tomas  
Facultad de Ingeniería Ambiental  
Bogotá D.C., Colombia  
2018**

**COMPARACIÓN DE ESCENARIOS DE PLANICIES DE INUNDACIÓN  
PROVOCADAS POR EL DESVÍO DEL RÍO RANCHERÍA**

**María José Pérez Martínez  
Cód. 2135290**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**Director:  
Miguel Ángel Cañón Ramos  
INGENIERO AMBIENTAL  
MSc (c). HIDROSISTEMAS**

**Universidad Santo Tomas  
Facultad de Ingeniería Ambiental  
Bogotá D.C., Colombia  
2018**

**PÁGINA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

---

**Ciudad y fecha de presentación**

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

*Agradezco infinitamente a Dios por darme la vida y la salud para llevar a cabo cada etapa de mi vida conforme a su voluntad, por la sabiduría y entendimiento para afrontar las adversidades y guiarme por su camino, por cada uno de los momentos y las personas que pone en mi camino como ángeles para cumplir estas metas planteadas.*

*Agradezco a mi hermosa familia, en especial a mi madre luchadora, a quien a su vez dedico este y cada uno de mis triunfos, porque más que míos son de ella, quien me ha acompañado en cada ciclo de mi vida, siendo mi apoyo incondicional, con sus palabras de aliento y sus llamados de atención necesarios, juntas, ella y yo por el sendero de la vida.*

*Gracias a cada una de las personas amigos y compañeros que de alguna u otra forma han hecho parte de este proceso, a mi amiga y hermana de alma Vivian Daniela Arguello Cuevas, por su incondicionalidad, lealtad y atención, a Manuel Alejandro Castro Cortés por su apoyo y acompañamiento desde que inicie este proyecto, a Jorge Daniel Torres Luna por su preocupación, asesoría y energía positiva, a Juan Gabriel Romero Cano por su ayuda.*

*A mi director de tesis, el ingeniero Miguel Ángel Cañón Ramos, por acompañarme en el proceso y el camino de la investigación, por brindarme la oportunidad de trabajar con él y darme la mano en el momento que lo necesité. A él, gracias por transmitirme sus conocimientos, por su dedicación y tiempo.*

*Gracias a la Universidad por mi formación ética y profesional. A todos y cada uno de los docentes que me brindaron sus conocimientos, ayudándome a crecer académicamente, profesionalmente y personalmente.*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
3. ALCANCE.....	16
4. JUSTIFICACIÓN.....	17
5. MARCO TEÓRICO .....	18
5.1. MÉTODO DE PROPORCIÓN NORMAL.....	18
5.2. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN.....	19
5.3.1. <i>Distribución Log Gumbel o distribución de Fréchet</i> .....	20
5.3.2. <i>Distribución Gumbel</i> .....	20
5.3.3. <i>Distribución Gamma de 2 parámetros</i> .....	21
5.3.4. <i>Distribución Log Pearson</i> .....	22
5.4. HIDROESTA® .....	23
5.4.1. <i>Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov</i> .....	23
5.5. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL .....	24
5.5.1. <i>Ecuaciones Bidimensionales o Aguas Someras</i> .....	25
5.5.2. <i>Iber ®</i> .....	26
6. MARCO DE REFERENCIA.....	26
6.1. ÁREA DE ESTUDIO .....	26
6.2. EL CERREJÓN .....	29
7. MARCO DE LEGAL .....	30
8. METODOLOGÍA .....	31
8.1. FASE 1 METODOLOGÍA: PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN Y DATOS.....	31
8.1.1. <i>Estaciones hidrometeorológicas</i> .....	31
8.1.2. <i>Procesamiento de la información</i> .....	32
8.2. FASE 2 METODOLOGÍA: PREPARACIÓN DEL MODELO .....	34
8.2.1. <i>Preprocesamiento del modelo</i> .....	34
8.3. FASE 3 METODOLOGÍA: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	40
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	41
9.1. RESULTADOS FASE 1 .....	41

9.1.1. <i>Análisis de frecuencia – caudales asociados a periodos de retorno 41</i>	
9.2. RESULTADOS FASE 2 .....	44
9.2.1. <i>Desvío río Ranchería</i> .....	44
9.3. RESULTADOS FASE 3 .....	46
9.3.1. <i>Profundidad de la lámina de agua</i> .....	46
9.3.2. <i>Cota de agua</i> .....	52
9.3.3. <i>Velocidad</i> .....	57
9.4. RESULTADOS GENERALES .....	61
10. LIMITACIONES .....	65
11. CONCLUSIONES .....	66
12. RECOMENDACIONES .....	67
13. REFERENCIAS .....	68

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valor de alfa según función Gamma .....	21
<b>Tabla 2.</b> Normatividad aplicable al caso de estudio .....	30
<b>Tabla 3.</b> Descripción estaciones utilizadas. ....	32
<b>Tabla 4.</b> Coeficientes de Rugosidad para canales naturales. ....	37
<b>Tabla 5.</b> Variable y periodos de retorno utilizados para el estudio .....	41
<b>Tabla 6.</b> Caudales en (m <sup>3</sup> /s) asociados a diferentes periodos de retorno de cada estación .....	42
<b>Tabla 7.</b> Caudales asociados a periodos de retorno escogidos para el modelo. ....	44
<b>Tabla 8.</b> Puntos geodésicos de la cartografía base del IGAC seleccionados para el análisis. ....	52
<b>Tabla 9.</b> Comparación de los valores de los escenarios para cada una de las variables. ....	61

## LISTA DE MAPAS

<b>Mapa 1.</b> Delimitación Departamento de la Guajira .....	27
<b>Mapa 2.</b> Delimitación Cuenca del río Ranchería .....	28
<b>Mapa 3.</b> Área título minero Cerrejón y Zona de expansión. ....	29

<b>Mapa 4.</b> Estaciones utilizadas para el estudio. ....	31
<b>Mapa 5.</b> Área determinada como (polígono) de estudio. ....	36
<b>Mapa 6.</b> Estaciones seleccionadas dentro del dominio ó área de estudio. ....	43
<b>Mapa 7.</b> Comparación Cauce Original con Cauce del desvío. ....	45
<b>Mapa 8.</b> Sobre posición de cauce original contra cauce de desvío. ....	46
<b>Mapa 9.</b> Comparación profundidad de la lámina de agua sin el desvío del cauce y arroyo Bruno periodo de retorno 10 y 100 años. ....	48
<b>Mapa 10.</b> Comparación profundidad de la lámina de agua con el desvío del cauce y arroyo Bruno Periodo de retorno 10 y 100 años. ....	50
<b>Mapa 11.</b> Comparación de los 4 escenarios de la profundidad de la lámina de agua antes y después del desvío. ....	51
<b>Mapa 12.</b> Comparación cota de agua en todo el cauce y arroyo Bruno sin el desvío del cauce periodo de retorno 10 y 100 años. ....	53
<b>Mapa 13.</b> Comparación cota de agua con el desvío del cauce y arroyo Bruno periodo de retorno 10 y 100 años. ....	55
<b>Mapa 14.</b> Comparación de los 4 escenarios de la cota de agua antes y después del desvío. ....	56
<b>Mapa 15.</b> Comparación de velocidad en el cauce y arroyo Bruno sin desvío del cauce periodo de retorno 10 y 100 años. ....	58
<b>Mapa 16.</b> Comparación de velocidad en el cauce y arroyo Bruno con desvío del cauce periodo de retorno 10 y 100 años. ....	59
<b>Mapa 17.</b> Comparación de los 4 escenarios de velocidad antes y después del desvío. ....	60

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de modelo bidimensional (x,y). ....	24
<b>Figura 2.</b> Procesamiento de la información. ....	33
<b>Figura 3.</b> Preparación modelo ArcGIS®. ....	34
<b>Figura 4.</b> Metodología modelo Iber®. ....	36
<b>Figura 5.</b> Rugosidad introducida en el programa Iber® para cada sección. ....	39
<b>Figura 6.</b> Malla creada utilizada para el modelo en Iber®. ....	39
<b>Figura 7.</b> Prueba bondad de ajuste de distribución de datos de la estación (E1)15067160 correspondiente a la estación Abajo bocatoma. ....	41
<b>Figura 8.</b> Restricciones en la planicie según la frecuencia de la inundación. ....	62

## **LISTA DE SIGLAS**

DEM: Modelo Digital de Elevación

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

POMCA: Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas

POT: Plan de Ordenamiento Territorial

## GLOSARIO

**BASEMAP:** También conocido como mapa base, recopilan los datos clave para ofrecer una base reutilizable para diversos mapas. Los mapas base proporcionan una base o un lienzo para el trabajo. Pueden ser de finalidad general, (como los mapas base topográficos, de imágenes o callejeros), o bien centrarse en un tema en concreto, (como los mapas base hidrológicos o geológicos). Es posible dibujar cualquier dato sobre un mapa base. El mapa base proporciona un contexto geográfico y detalles de referencia.[1]

**COTA DE AGUA:** Son los niveles de los ríos que se tienen de referencia para poder alertar a la población ante la probabilidad de que se presente una inundación y corresponden también con los niveles a partir de los cuales se comienza a presentar las primeras afectaciones en zona urbanas.[2]

**CUENCA:** Área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua. La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o “divisora de aguas” se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río. [3]

**ESCENARIO(S):** Eventos posibles dados en respuesta del impacto de una actividad. Posibilidades o perspectivas de un hecho o de una situación.[4]

**INUNDACIÓN:** Aumento inesperado del agua por el fallo de una presa o la duración extrema de la precipitación y la intensidad en la cual la vida y las características en la área afectada están bajo riesgo.[5] Fenómeno natural no permanente, durante el cual una parte del territorio es ocupada temporalmente por las aguas. El riesgo que provocan las inundaciones en una zona concreta del territorio se obtiene por la combinación en el espacio de la peligrosidad y la vulnerabilidad.[6]

**LÁMINA DE AGUA:** Es una forma de expresión de mucha utilidad por que no depende del área. La unidad de medida más frecuente para expresar la lámina es el mm, que equivale al volumen de 1 litro de agua distribuido en una superficie de 1 metro cuadrado, es decir  $1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$  .[7]

**MODELO:** Es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática.[8]

**MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN:** Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. [9] Capa simbolizada con una rampa de color, que se pueden usar para estudiar propiedades de la superficie, como la visibilidad y el flujo de agua.[10]

**PERIODO DE RETORNO:** Tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado por lo menos una vez.[11]

**PLANICIES DE INUNDACIÓN:** Son áreas de superficie adyacentes a ríos o riachuelos, sujetas a inundaciones recurrentes.[12]

**SHAPE:** Es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). [13]

## RESUMEN

El propósito del presente trabajo de investigación, es identificar, comparar y evaluar los diversos escenarios de planicies de inundación como resultado de la intervención de desviar el río Ranchería en la Guajira, realizando un análisis hidrodinámico por medio de un modelo en dos dimensiones. Para el desarrollo y modelación de esta tesis se utilizaron los softwares ArcGIS® e Iber® respectivamente, siguiendo una metodología conformada por tres etapas principales, la primera es la recolección de la información base, de aquí el análisis de frecuencia de las series de datos suministradas por el IDEAM de las estaciones Abajo Bocatoma y la Esperanza, la segunda es el desarrollo de la modelación, donde se define el dominio o zona de estudio y se ejecuta el modelo y la tercera la creación de los posibles escenarios de planicies de inundación para las variables de velocidad del cauce, profundidad de la lámina de agua y cota de agua; las dos últimas variables se diferencian en que la cota de agua son los niveles de los ríos que se tienen de referencia para poder alertar ante la probabilidad de que se presente una inundación y se mide en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) y la profundidad de la lámina de agua, es el nivel máximo alcanzado por las aguas y se mide en metros (m), es decir, se puede relacionar que la cota de agua es la representación de la lámina de agua en el relieve. Iber® emplea las ecuaciones de aguas someras, las cuales se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas [14], por tanto se entiende que el modelo fue realizado con una malla no estructurada, la anterior de tamaño 80 y 160 entre sus triángulos, de esta forma, con el dominio o área de control se introducen los datos, generando así los dos escenarios de las planicies de inundación de los caudales asociados a los periodos de retorno de 10 y 100 años para las variables de profundidad de la lámina de agua, cota de agua y velocidad. Como resultado se evidenció en los mapas de la modelación desbordamientos en la intersección del río Ranchería y el arroyo Bruno alterando la zona de expansión para explotación de carbón y la zona de explotación actual.

**Palabras clave.** Río Ranchería, arroyo Bruno, planicies de inundación, modelo hidrodinámico, Iber®.

## ABSTRACT

The purpose of this research work is to identify, compare and evaluate the various floodplain scenarios as a result of the intervention of diverting the Ranchería River in the Guajira, performing a hydrodynamic analysis by means of a two-dimensional model. For the development and modeling of this thesis the ArcGIS® and Iber® software were used respectively, following a methodology consisting of three main stages, the first one is the collection of the base information, hence the frequency analysis of the data series supplied by the IDEAM of the stations Abajo Bocatoma and La Esperanza, the second is the development of the modeling, where the domain or study area is defined and the model is executed and the third the creation of possible floodplain scenarios for the variables of channel velocity, depth of water sheet and water level; the last two variables differ in that the water level are the levels of the rivers that are reference to be able to alert to the probability of a flood and is measured in meters above sea level (msnm) and the Depth of the sheet of water, is the maximum level reached by the water and is measured in meters (m), that is, it can be related that the water level is the representation of the sheet of water in the relief. Iber® uses the shallow water equations, which are solved using the finite volume method for two-dimensional unstructured meshes [14], therefore it is understood that the model was made with an unstructured mesh, the previous one of size 80 and 160 between its triangles, in this way, with the domain or control area, the data are introduced, thus generating the two floodplain scenarios of the flows associated with the 10 and 100 year return periods for the water depth variables. the sheet of water, level of water and speed. As a result, it was evidenced in the maps of the overflow modeling at the intersection of the Ranchería River and the Bruno Stream, altering the expansion zone for coal exploitation and the current exploitation zone.

**Key words.** Rancheria river, Bruno stream, floodplains, Bruno stream, floodplains, hydrodynamic model, Iber®.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación busca comparar las planicies de inundación provocados por la intervención del desvío del río Ranchería por medio de la modelación hidrodinámica bidimensional. Realizar un análisis hidrodinámico por medio de un modelo en dos dimensiones, es útil en flujos muy extendidos (como estuarios, lagos y ríos) donde la variación vertical de velocidad es pequeña y por eso suelen llamarse modelos de aguas someras. [15] Equiparar estos escenarios es importante ya que mediante los mismos se pueden proponer obras de mitigación y/o prevención según sea el caso.

Para este estudio se realiza la modelación del cauce principal y el arroyo Bruno en condiciones actuales y con el desvío del río, dicha modelación se desarrolla mediante el software Iber® [16], modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios promovido por el *Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX*.

Para la modelación en Iber® se realiza un pre proceso, el cual consiste en la preparación de capas y datos que se introducen al modelo. Este proceso se desarrolla a lo largo del trabajo, paso a paso, para así crear los posibles escenarios de profundidad de lámina de agua, cota de agua y velocidad en el cauce evaluado.

Con el empleo de este modelo es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en las disposiciones del territorio con respecto a los ríos o para tener criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia tales como desbordamientos, represamiento de cauces y taponamiento u obstrucción de sistemas de drenaje. [8] Por tanto estos modelos son aplicables en Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y Planes de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca Hidrográfica (POMCA).

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El departamento de la Guajira se localiza en el extremo norte de Colombia, es una de las zonas más desérticas del país y en ella la cuenca del río Ranchería. El río Ranchería nace en el flanco este de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el páramo de Chirigua, realiza un recorrido aproximado de 248 km y desemboca al mar Caribe en inmediaciones de Riohacha.[17]

La cuenca del río limita de la siguiente forma, al Occidente con Riohacha capital del departamento de la Guajira, al sur con los municipios de San Juan del Cesar, El Molino y Dibulla, al Oriente por el Brazo Yotomahana y el arroyo Purpurema. La cuenca abarca una extensión de 4.223 km<sup>2</sup>, correspondiente al 20,5% del área total del departamento, y representa la cuenca de mayor importancia para la Guajira ya que de ella se abastecen 55.000 habitantes. [17]

En la cuenca del río se encuentra Cerrejón, un yacimiento o complejo de minería de carbón y transporte integrado. Abarca una mina a cielo abierto de carbón térmico que produce más de 32 millones de toneladas. Cerrejón, busca desviar el río Ranchería, con el fin de obtener más dividendos económicos producto de la explotación de carbón, sin tener en cuenta, las afectaciones sociales, ambientales, culturales, entre otras, que el desvío del río causaría a la población, en su mayoría indígena y afro descendiente, que aún habita a lo largo de éste y las afectaciones al territorio. [18]

La desviación temporal o permanente de los cauces que se derivan de los proyectos, pueden tener incidencia en un territorio. Estas desviaciones pueden producir desertificación por la deforestación y la alteración en las dinámicas hídricas, lo cual repercute a distintos niveles, como pueden ser los procesos locales de erosión - sedimentación y la vegetación.[19] Cabe aclarar que no en todos los proyectos es necesario la desviación de un río, pero para este proyecto en particular, por su ubicación es necesaria la desviación con fines económicos.

Las intervenciones antropogénicas en los flujos de agua continentales son en la actualidad un elemento importante dentro de la evolución de los sistemas hídricos y propician cambios significativos en cortos periodos de tiempo. Según la Organización Censat agua viva, junto a la organización Cedetrabajo, se debe tener en cuenta que proyectos de esta índole tienen repercusiones como las variaciones en los aportes fluviales de agua, sedimentos y nutrientes. [20][21][22] Estos efectos deben estar ampliamente definidos y en el caso de ser negativos, contrarrestarlos con acciones de mitigación. Por lo anterior, es de gran importancia, realizar los estudios necesarios para evaluar dichas intervenciones y para el caso de la empresa Cerrejón, no hay información secundaria suficiente de estudios hidrológicos e hidrodinámicos que permitan corroborar la factibilidad del proyecto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un análisis hidrodinámico al desvío del río Ranchería por medio de un modelo en dos dimensiones de los diferentes escenarios que se pueden presentar.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un diagnóstico hidrodinámico del río Ranchería con el fin de observar el comportamiento de las planicies de inundación.
- Modelar el comportamiento hidrodinámico del río Ranchería bajo los escenarios de condiciones actuales y de desvío para representar las planicies de inundación.
- Generar los posibles escenarios de planicies de inundación comparando los cambios ante la intervención del río, mediante variables de profundidad de lámina de agua, cota de agua y velocidad.

### 3. ALCANCE

Se realiza la modelación hidrodinámica en dos dimensiones del cauce del arroyo Bruno en la cuenca del río Ranchería en las condiciones actuales y con el desvío del río, con el fin de comparar los cambios con respecto a las planicies de inundación, al realizar dicha actividad.

Con la modelación, generar los posibles escenarios de planicies de inundación para, profundidad de lámina de agua, cota de agua y velocidad asociados a periodos de retorno de 10 y 100 años.

Con lo anterior establecemos ciertas suposiciones descritas a continuación:

- Se comparan únicamente las planicies de inundación de acuerdo a las variables: profundidad de lámina de agua, cota de agua y velocidad en el cauce. Estas son las variables de interés necesarias para la comparación de las planicies de inundación, es decir hacen parte de las características o variables principales de una planicie de inundación.
- Se evalúan únicamente los periodos de retorno de 10 y 100 años. Estos periodos de retorno fueron seleccionados principalmente porque se quiere evaluar dos condiciones extremas. Por otro lado no se tienen en cuenta los otros periodos de retorno ya que no se observó un cambio drástico durante el desarrollo del trabajo en la modelación entre rangos de 2,33 a 5 con respecto a 10 años, como tampoco se evidenció gran cambio en la modelación de 25 a 50 años con respecto a 100 años. Además, en hidrología, los períodos de retorno varían típicamente de 10 a 100 años cuando el caudal máximo probable está definido, es decir se conoce o ha sido estimado, por tal motivo, y para este estudio se tiene en cuenta la metodología del Cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE-US Army Corps of Engineers) y se estiman los caudales máximos asociados a periodos de retorno de 10 y 100 años.
- Se toman secciones transversales en todo el cauce de 2 m de profundidad, para el escenario sin desvío y el escenario con desvío. Estas debido a que son las profundidades promedio de la lámina de agua.
- Condiciones actuales: Cauce sin desvío

- Para los periodos de retorno se asume que los instantes son permanentes, lo que quiere decir que, lo relevante son los escenarios generados.

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

Colombia tiene las reservas de carbón más grandes de América Latina, más de 6.200 millones de toneladas que representan cerca del 80% de las reservas de carbón bituminoso; y se ha convertido en uno de los siete principales exportadores de carbón térmico del mundo según el Instituto Mundial del Carbón. El Cerrejón participa con más del 50% de las exportaciones del país siendo hoy en día una de las minas de carbón a cielo abierto más grandes del mundo, produce aproximadamente 32 millones de toneladas al año, [23] cantidad que quiere aumentar con la modificación de la cuenca del río Ranchería. Cualquier intervención natural o antrópica en un río origina cambios en su hidrología e hidrodinámica que pueden propagarse grandes distancias aguas arriba y aguas abajo del sitio intervenido, generando riesgos para las diferentes estructuras existentes como inundaciones, desbordamientos y sequías. Predecir los cambios hidrodinámicos e hidrológicos en un río es posible a través de la modelación. [24] Este desvío puede traer consecuencias ambientales y sociales en el territorio de la Guajira, por lo cual es importante buscar los posibles escenarios encontrando así los impactos al realizar el proyecto y/o actividad por medio de estudios de investigación.

Realizar este estudio de investigación es de gran importancia ya que desde tiempos pasados se han venido presentando en el país fenómenos de sequías e inundaciones las cuales en gran parte se creen han sido causados por las diferentes intervenciones realizadas a cuencas hidrográficas. Este estudio es posible realizarlo gracias a los Sistemas de Información Geográfica y a los modelos hidrológicos e hidrodinámicos.

Los Sistemas de Información Geográfica junto con los modelos hidrológicos e hidrodinámicos han sufrido una lógica evolución en la última década, los SIG comenzaron a utilizarse de forma aislada a los modelos, como herramientas para regionalizar, agregar y/o calcular variables y parámetros, usando los resultados como entradas a los modelos; pero últimamente han proliferado las aplicaciones, macros, extensiones o módulos que conectan directamente SIG. [25]

La modelación hidrodinámica describe el movimiento del agua que junto a la hidrología ayuda al análisis de procesos de inundación y sequías en diferentes escenarios y constituye la base para el estudio de importantes problemas hidroambientales. La modelación permite la evaluación del riesgo de inundaciones, además, los modelos hidrodinámicos que describen apropiadamente los procesos hidráulicos en sistemas cauce-planicie de inundación pueden ser utilizados para representar otros subprocesos. [26]

El modelo hidrodinámico permite analizar la incidencia de las obras en el flujo del río en las secciones de interés y para diferentes eventos. También permite el análisis del efecto de las pérdidas de carga, introducidas en el flujo, por la presencia de curvas en el desarrollo del canal de desvío proyectado. [27]

Por lo anterior el estudio pretende comparar el río Ranchería y el arroyo Bruno en su cauce original y en el escenario de desvío, analizando así que tan viable o no es realizar el mismo, permitiendo observar los cambios en las planicies de inundación y las diferentes implicaciones que llevaría el resultado de la caracterización y modelación.

## **5. MARCO TEÓRICO**

Con el fin de otorgarle a este proyecto de investigación una estructura ordenada, acorde y de mayor entendimiento es necesario realizar una breve explicación de los conceptos y herramientas utilizadas. Por lo anterior y teniendo en cuenta que el proyecto se enfoca en evaluar por medio de la modelación las planicies de inundación que se pueden presentar por el desvío del río Ranchería, empleando herramientas como HidroEsta®[28], ArcGIS®[29] y como primordial Iber®[16], es necesaria la contextualización de estas y de los conceptos generales del modelo.

### **5.1. MÉTODO DE PROPORCIÓN NORMAL**

Uno de los inconvenientes más comunes en hidrología y probablemente en otras áreas que utilizan registros medidos, es la falta de un registro completo, esto implica errores en los resultados que se pretenden alcanzar. En consecuencia, es imprescindible estimar los datos faltantes para que el modelo tenga un margen de error mínimo. Para la estimación de los datos faltantes se utilizó el Método de Proporción Normal expresado en la ecuación (1). [30]

$$P_x = \frac{1}{3} \left[ \frac{N_x P_a}{N_a} + \frac{N_x P_b}{N_b} + \frac{N_x P_c}{N_c} \right] \quad (1) \quad [30]$$

**P<sub>x</sub>**: precipitación para la estación con registro faltante

**P<sub>a,b,c</sub>**: valores de la precipitación de las estaciones vecinas

**N<sub>a,b,c,x</sub>**: valores de la precipitación media anual de las respectivas estaciones

## 5.2. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

Para poder definir qué es una distribución, primero es importante definir qué es una variable aleatoria, la cual puede definirse como cualquier característica medible que toma diferentes valores con probabilidades determinadas. [31]

Toda variable aleatoria posee una distribución de probabilidad que describe su comportamiento. Si la variable es discreta, es decir, si toma valores aislados dentro de un intervalo, su distribución de probabilidad especifica todos los valores posibles de la variable junto con la probabilidad de que cada uno ocurra. En el caso continuo, es decir, cuando la variable puede tomar cualquier valor de un intervalo, la distribución de probabilidad permite determinar las probabilidades correspondientes a subintervalos de valores. Una forma usual de describir la distribución de probabilidad de una variable aleatoria es mediante la denominada función de densidad en el caso de variables continuas y función de masa de probabilidad en el caso de variables discretas, en tanto que lo que se conoce como función de distribución representa las probabilidades acumuladas. [31]

La función de distribución de probabilidad de una variable aleatoria discreta y la función de densidad de una variable aleatoria continua denotada como f(.) contienen exhaustivamente toda la información sobre la variable. Para una variable aleatoria discreta la función de distribución de probabilidades f(.), es aquella que designa una probabilidad de ocurrencia a cada valor de la variable. [31]

Las funciones de distribución, permiten calcular para este estudio, los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno.

Para este caso de estudio se utilizaron las distribuciones explicadas a continuación.

### 5.3.1. Distribución Log Gumbel o distribución de Fréchet

El nombre de la distribución viene del matemático francés Maurice Fréchet, y su principal uso es en el campo de la hidrología. Es un caso especial de la distribución de valores extremos generalizada. Su función de distribución, cuando se tienen tres parámetros, viene dada por [12]

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{-\alpha}} \text{ si } x > \lambda \quad (2) [12]$$

Mientras que la función de densidad es,

$$f(x) = \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{-1-\alpha} e^{-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{-\alpha}} \text{ si } x > \lambda \quad (3) [12]$$

Donde  $\alpha \in (0, \infty)$  es el parámetro de forma,  $\delta \in (0, \infty)$  el de escala y  $\lambda \in (-\infty, +\infty)$  el de localización. Cuando se tienen dos parámetros (en el caso en el que  $\lambda = 0$ ), la función de distribución pasa a ser [32]

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)^{-\alpha}} \text{ si } x > 0 \quad (4) [32]$$

Y la función de densidad es,

$$f(x) = \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{x}{\delta}\right)^{-1-\alpha} e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)^{-\alpha}} \text{ si } x > 0 \quad (5) [32]$$

Por último, cuando la distribución sólo tiene un parámetro ( $\delta=1$ ), [32]

$$F(x) = e^{-x^{-\alpha}} \text{ si } x > 0 \text{ y } f(x) = \alpha x^{-1-\alpha} e^{-x^{-\alpha}} \text{ si } x > 0 \quad (6) [32]$$

### 5.3.2. Distribución Gumbel

Fue descubierta por Emil Julius Gumbel, matemático judío nacido en Alemania a finales del siglo XIX. Es un caso particular de la distribución de valores extremos generalizada, y también es conocida como la distribución log-Ceibal, o como la distribución exponencial doble. Según Reis y Thomas (1997), la

distribución de Gumbel tiene la misma importancia que la distribución Normal en otras aplicaciones. [32]

La función de distribución de la distribución de Gumbel es [32]

$$F(x) = e^{-e^{\frac{(\mu-x)}{\beta}}} \quad (7) [32]$$

mientras que la función de densidad viene dada por [32]

$$f(x) = \frac{e^{-e^{\frac{(\mu-x)}{\beta}}} - e^{\frac{(\mu-x)}{\beta}}}{\beta}, \quad x \in (-\infty, +\infty) \quad (8) [32]$$

La distribución de Gumbel corresponde al caso en el que  $\mu=0$  y  $\beta=1$ . [32]

En ese caso, la función de distribución viene dada por,

$$F(x) = e^{-e^{-x}} \quad (9) [32]$$

mientras que la función de densidad de probabilidad sería, [32]

$$f(x) = e^{-e^{-x}} \quad (10) [32]$$

### 5.3.3. Distribución Gamma de 2 parámetros

Se le conoce, también, como una generalización de la distribución exponencial. Es una distribución de probabilidad continua adecuada para modelar el comportamiento de variables aleatorias con asimetría positiva y/o los experimentos en donde está involucrado el tiempo. [33]

La expresión de la distribución Gamma incluye la propia función Gamma  $\Gamma(\alpha)$ , que para valores enteros de  $\alpha$  se ha demostrado que  $\Gamma(\alpha) = (\alpha-1)!$  En este caso la distribución Gamma se conoce como “distribución de Erlang”. [34]

**Tabla 1.** Valor de alfa según función Gamma.

Valor $\alpha$	Función Gamma
1	1
2	1
3	2

4	6
5	24
6	120
7	720
8	5040
9	40320
10	362880
11	3628800
12	39916800

**Fuente.** [34]

La función de densidad de la distribución Gamma es, [34]

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} * x^{\alpha-1} * e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \mathbf{(11)} \quad [34]$$

Donde  $x > 0$  y  $\beta, \alpha$  son parámetros positivos. Se puede ver que para  $\alpha=1$  la función de densidad será, [34]

$$f(x) = \frac{1}{1*1} * x^0 * e^{-\frac{x}{1}} = e^{-x} \quad \mathbf{(12)} \quad [34]$$

Lo que significa que una distribución Gamma de parámetro  $\alpha=1$  y  $\beta = 0$  es una distribución exponencial de parámetro  $\alpha=1$ . [34]

#### 5.3.4. Distribución Log Pearson

Se utiliza principalmente para análisis de probabilidad de eventos extremos; consiste, principalmente, en transformar los valores extremos en logaritmo en base 10, con el fin de reducir la asimetría de los datos. Se calcula con la ecuación (13). [35]

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - k \frac{x-u}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}}\right] \quad \mathbf{(13)} \quad [35]$$

En el caso de la hidrología, el uso de esta distribución se limita para el tratamiento de datos en picos de inundación; esta distribución, es la distribución estándar para el análisis de la crecida máxima en los Estados Unidos. Esta distribución infiere que si en la muestra de máximos anuales la frecuencia alcanza un valor de límite inferior, como, por ejemplo, cero, en tal caso, será apropiado utilizar otra distribución. [35]

#### **5.4. HIDROESTA®**

HidroEsta®[29], es una herramienta que facilita y simplifica los cálculos y el proceso del análisis de la abundante información que se deben realizar en los estudios hidrológicos. El sistema permite resolver los problemas más frecuentes que se presentan en los cálculos hidrológicos, entre los cuales esta, evaluar si una serie de datos se ajustan a una serie de distribuciones: normal, log-normal de 2 y 3 parámetros, gamma de 2 y 3 parámetros, log-Pearson tipo III, Gumbel y log-Gumbel, tanto con momentos ordinarios, como con momentos lineales. Si la serie de datos se ajusta a una distribución, permite calcular por ejemplo caudales o precipitaciones de diseño, con un periodo de retorno dado o con una determinada probabilidad de ocurrencia. [36]

##### **5.4.1. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov**

HidroEsta®[29], trabaja con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov, la cual se describe a continuación.

Se habla de bondad de ajuste cuando se intenta comparar una distribución de frecuencias observadas con los correspondientes valores de una distribución esperada o teórica. [37]

La prueba de Kolmogorov-Smirnov es una prueba no paramétrica para diferencias entre distribuciones acumulativas. La prueba de una muestra se refiere al acuerdo entre una distribución acumulativa observada, o empírica, de valores muestrales y una función de distribución continua especificada; por lo tanto, es una prueba de bondad de ajuste. La prueba de dos muestras se refiere al acuerdo entre dos distribuciones acumulativas observadas; prueba la hipótesis de si las dos muestras independientes proceden de distribuciones continuas idénticas, y es sensible a diferencias de población respecto de ubicación, dispersión o sesgadura. [37]

La prueba de una muestra de Kolmogorov-Smirnov es generalmente más eficiente que la prueba ji-cuadrada para bondad de ajuste de muestras

pequeñas, y puede servir para muestras muy pequeñas en las que no se aplican la prueba ji-Cuadrada. [37]

Hipótesis nula: Cualquier hipótesis establecida fundamentalmente para comprobar si puede ser rechazada,  $H_0$ . [37]

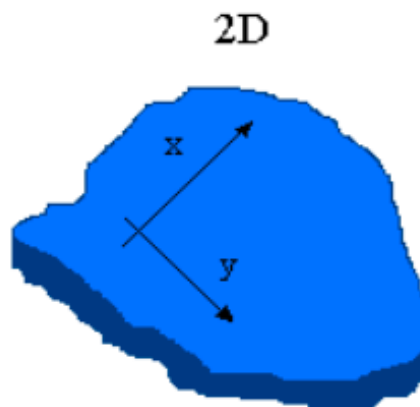
Hipótesis alternativa: Se especifica que la media de la población (o cualquier otro parámetro de interés) no es igual a, mayor que o menor que el valor supuesto en la hipótesis nula. [37]

Nivel de significancia: La probabilidad de incurrir en el error rechazando la hipótesis verdadera, y se fija habitualmente en  $\alpha = 0.05$  o  $\alpha = 0.01$ . La decisión de la escogencia de este valor dependerá de los riesgos o consecuencias de cometer un error. [37]

## 5.5. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL

Los modelos bidimensionales (2D) consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor. Estos modelos son especialmente útiles en flujos muy extendidos (como estuarios, lagos, etc.) donde la variación vertical de velocidad es pequeña, por eso suelen llamarse modelos de aguas someras o poco profundas. Estrictamente no son aplicables a casos en que la variación vertical de la velocidad es apreciable, como por ejemplo el flujo sobre un vertedero o a través de un orificio sumergido; sin embargo, mediante uso de expresiones empíricas o similares pueden incorporar estas singularidades dentro de la modelación. [15]

**Figura 1.** Esquema de modelo bidimensional (x,y).



**Fuente.** [15]

Las ecuaciones hidrodinámicas se resuelven en forma integral por el método de volúmenes finitos. Para resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar. [38]

### 5.5.1. Ecuaciones Bidimensionales o Aguas Someras

Las ecuaciones de aguas someras se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas. Los esquemas numéricos utilizados en Iber@[16] son especialmente apropiados para la modelización de cambios de régimen y de frentes seco-mojado (frentes de inundación).[14]

El conjunto completo de las ecuaciones del modelo de aguas someras describen la evolución de un flujo homogéneo (densidad constante) e incompresible sobre la superficie de una esfera y son aplicables cuando la escala horizontal del flujo es mucho más pequeña que la escala vertical de la capa del fluido considerado. Los modelos que se basan en las ecuaciones de aguas someras tienen sólo un nivel vertical, por lo que no pueden representar ningún parámetro que varíe con la altura. En general, casi todas las formas de estos modelos se refieren principalmente a tres variables y a su evolución, tanto en el tiempo como en la capa considerada. Estas variables son: velocidad zonal,  $u$ , velocidad en la dirección  $x$ ; velocidad meridional,  $v$ , velocidad en la dirección  $y$ ; y  $\eta$ , desviación de la altura del campo de presión horizontal en superficie de su media,  $H$ , por lo que la altura total del campo es  $h(x, y) = \eta(x, y) + H(x, y)$ . [39]

Las ecuaciones de aguas someras para las variables antes descritas son:

$$\frac{du}{dt} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + bu = 0 \quad (14) [39]$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + bv = 0 \quad (15) [39]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V}(H + \eta) = 0 \quad (16) [39]$$

Donde  $b$  representa el arrastre viscoso que por lo general se desprecia,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $f$  es el parámetro de Coriolis, que es igual a  $2 \Omega \sin(\varphi)$ , donde  $\Omega$  es la velocidad angular de la Tierra ( $\pi/12$  radianes/hora), y  $\varphi$  es la latitud (GFDL, 2007b). [39]

### **5.5.2. Iber ®**

El modelo Iber® es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios promovido por el *Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX* y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, *GEAMA* (Universidad de A Coruña), el *Grupo Flumen* (Universitat Politècnica de Catalunya y Universitat de Barcelona) y el *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE* (vinculado a la Universidad Politècnica de Catalunya), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua. [40]

La modelización matemática del flujo de agua en un río consiste en intentar conocer los valores que toman las variables hidráulicas (profundidad de la lámina de agua, velocidades, caudal, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis.[40]

Iber® es una herramienta diseñada para el estudio de profundidad de lámina de agua y velocidades que permite resolver problemas de ingeniería y dinámica fluvial, tales como la delimitación de zonas inundables, el diseño de encauzamientos y obras de protección, restauración de ríos, planes de emergencia en rotura de presas, optimización del funcionamiento de obras hidráulicas, etc.[40]

## **6. MARCO DE REFERENCIA**

### **6.1. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio de la cuenca del río Ranchería se encuentra ubicada en la parte baja de la Guajira, desde la cabecera sur oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta, discurriendo por sus derivaciones hasta el corredor de Valledupar bordeando las estribaciones de la Sierra Nevada hasta bordear los Montes de Oca y de allí tomando rumbo norte hacia su desembocadura en el Caribe, coincidiendo con la ciudad de Riohacha. [17]

**Mapa 1. Delimitación Departamento de la Guajira.**



**Fuente. Autor**

La región de La Guajira se localiza en el extremo norte de Colombia como se muestra en el Mapa 1. Es una de las zonas más desérticas del país y en ella la cuenca del río Ranchería, con una superficie de 4.070 km<sup>2</sup> de extensión. La cuenca del río Ranchería está ubicada en la jurisdicción de los municipios de San Juan del Cesar, Fonseca, Distracción, Barrancas, Hato nuevo, Albania, Riohacha, Manaure y Maicao. [17]

La cuenca del río se encuentra delimitada de la siguiente forma, al Occidente con Riohacha capital del departamento de la Guajira, al sur con los municipios de San Juan del Cesar, El Molino y Dibulla, al Oriente por el Brazo Yotomahana y el arroyo Purpurema presentando este sector una altura máxima de 400 m.s.n.m. y mínima 40 m.s.n.m, al Norte la cuenca limita con el Océano Atlántico, la Cabecera Municipal de Riohacha, los municipios de Maicao y Manaure. La cuenca abarca una extensión de 4.223 km<sup>2</sup>, correspondiente al 20,5% del área total del departamento, y representa la cuenca de mayor importancia para la Guajira ya que de ella se abastecen 55.000 habitantes. [17]

**Mapa 2.** Delimitación Cuenca del río Ranchería.



Fuente. Autor

El río Ranchería nace en el flanco este de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el páramo de Chirigua a una altitud de 3.875 msnm., y luego de un recorrido aproximado de 248 km desemboca al mar Caribe en inmediaciones de Riohacha.[17] El caudal promedio del río Ranchería oscila entre los 6,3 m<sup>3</sup>/s y los 7,8 m<sup>3</sup>/s [41] El arroyo Bruno cuenta con 26 km de longitud, hasta desembocar en el río Ranchería, y un caudal medio mensual multianual de 0.45 m<sup>3</sup>/s.[42]

## 6.2. EL CERREJÓN

Cerrejón es un yacimiento o complejo de minería de carbón y transporte integrado en La Guajira. Abarca una mina a cielo abierto de carbón térmico que produce más de 32 millones de toneladas al año, un ferrocarril de 150 km de largo y un puerto marítimo de cargue directo capaz de recibir buques de hasta 180.000 toneladas de capacidad. Emplea a 10.000 personas, de las cuales más del 99% son nacionales colombianas; es el exportador privado más grande y uno de los más importantes contribuyentes de impuestos en Colombia. [43]

**Mapa 3.** Área título minero Cerrejón y Zona de expansión.



Fuente. Autor

El Cerrejón busca expandir su área de explotación minera con el fin de explotar 40 millones de toneladas de carbón. Se pretende desviar 3,6 km de los últimos 4,8 km del arroyo Bruno, unos 700 metros hacia el norte y así expandir los límites actuales de la mina en 170 hectáreas. [44]

## 7. MARCO DE LEGAL

Dentro del marco legal se identificó la normatividad expuesta en la Tabla 2 a continuación.

**Tabla 2.** Normatividad aplicable al caso de estudio.

Tipo de Norma	Número	Año	Nombre de la norma	Autoridad que aprueba	Tema	Artículo	Descripción
DECRETO	1076	2015	Por medio del cual se expide el Decreto unico reglamentario del sector Ambiente y desarrollo sostenible	Presidencia de la Republica	Instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos	2.2.3.1.1.1 .- 2.2.3.1.5.2 .	Instrumento a través del cual se realiza la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca entendido como la ejecución de obras y tratamientos, en la perspectiva de mantener el equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente del recurso hídrico.
					Competencia y Exigibilidad de la Licencia ambiental	2.2.2.3.2.2 .	La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) otorgará o negará de manera privativa la licencia ambiental para los siguientes proyectos, obras o actividades: (...)Desviación de cauces en la red fluvial.(...)
RESOLUCIÓN	1386	2014	Por el cual se modifica un plan de manejo ambiental	Agencia Nacional de Licencias Ambientales	Modificaciones P 40	2.3.2.4.1.	Descripción arroyo Bruno y zona de desvío.

**Fuente.** Autor, [42] [45]

El marco legal de este proyecto aplica dos normas, las cuales son el Decreto único reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (1076 de 2015) y la Resolución 1386 de 2014.

En la anterior normatividad descrita, se tiene en cuenta la planificación sobre el recurso hídrico (POMCA), la obligatoriedad de la licencia ambiental, y aspectos con respecto al desvío del río Ranchería (arroyo Bruno).

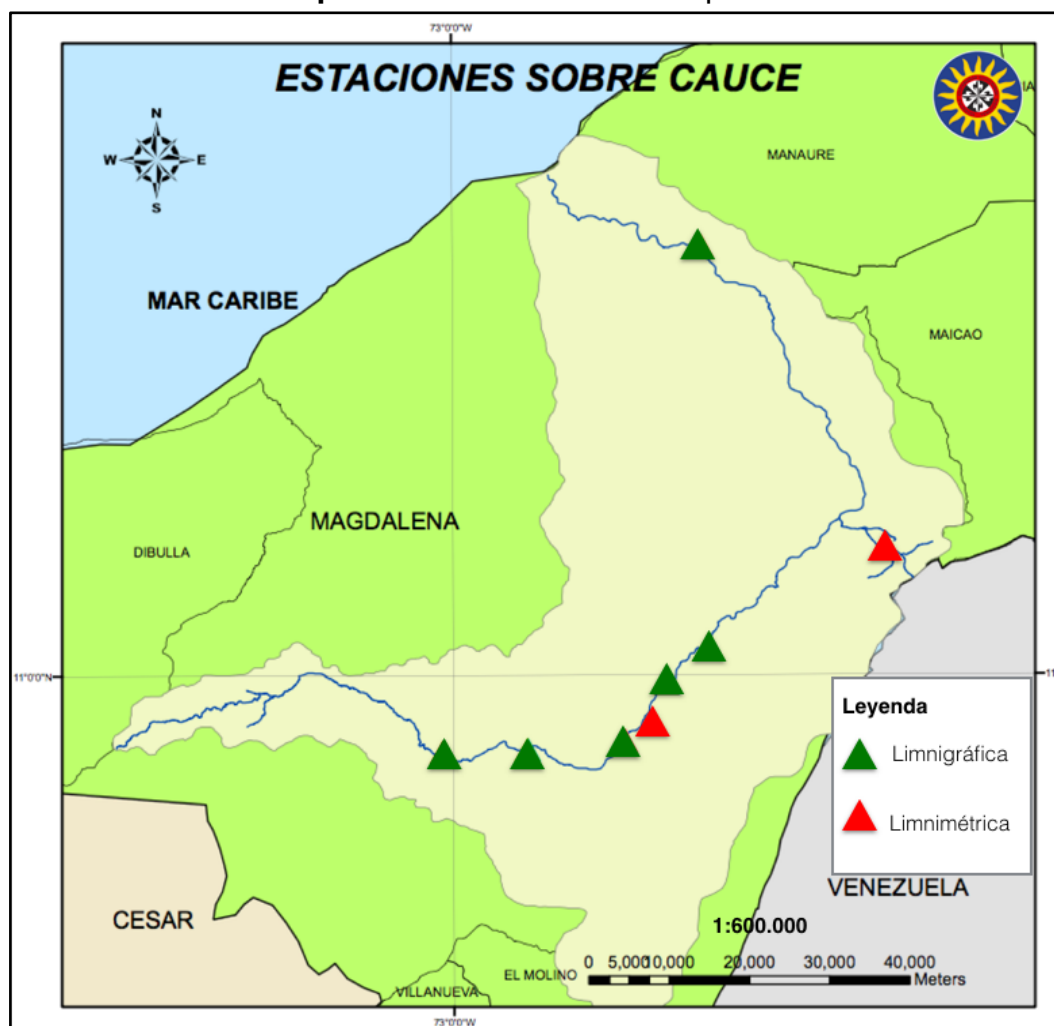
## 8. METODOLOGÍA

### 8.1. FASE 1 METODOLOGÍA: PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN Y DATOS

#### 8.1.1. Estaciones hidrometeorológicas

La cuenca del río Ranchería posee 8 estaciones, las cuales son la base necesaria para el estudio. Conocer las estaciones ubicadas sobre el cauce a evaluar Mapa 4, permite adquirir los datos a entrar al modelo. Para esta investigación, los datos son los caudales máximos, y son aportados por el IDEAM.

**Mapa 4.** Estaciones utilizadas para el estudio.



Fuente. Autor

De acuerdo con el Mapa 4, son 8 estaciones hidrométricas en su mayoría limnigráficas las que se encuentran sobre el cauce de estudio Tabla 3, de estas, se escogen únicamente dos estaciones para el modelo, las cuales son Abajo bocatoma y La esperanza.

LG: Limnigráfica, LM: Limnimétrica

**Tabla 3.** Descripción estaciones utilizadas.

Nombre estación	Cód. estación	Municipio	Tipo	Clase	Categoría	Latitud	Longitud
El silencio	15067200	Fonseca	AUT	HID	LG	10.91708	-72.915333
Aremasahin	15067180	Riohacha	AUS	HID	LG	11.48077	-72.715167
San Francisco	15067170	Barrancas	AUT	HID	LG	10.99122	-72.756083
Abajo bocatoma	15067160	Barrancas	CON	HID	LG	11.03308	-72.708722
Pte Guajiro	15067150	Barrancas	AUT	HID	LG	10.92644	-72.804389
Los Magueyes	15067080	Barrancas	CON	HID	LM	10.94672	-72.772278
El cercado	15067020	Fonseca	AUT	HID	LG	10.91513	-73.011528
La esperanza	15067060	Albania	CON	HID	LM	11.14233	-72.508194

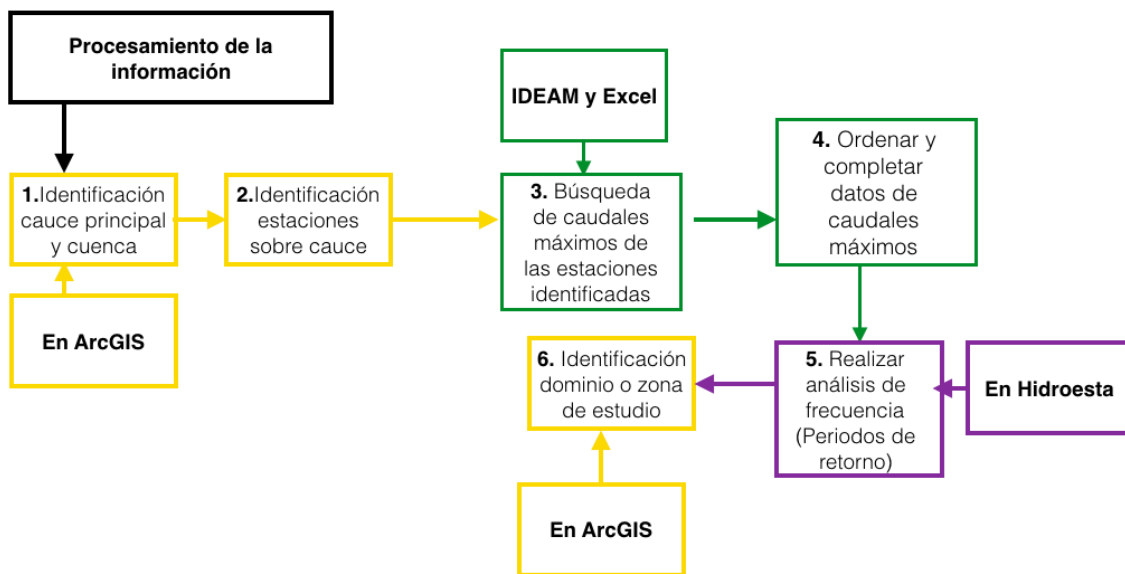
**Fuente.** Autor

En la Tabla 3, se puede observar las estaciones, sus respectivos códigos, municipios en los que están ubicadas, tipo, clase, categoría y localización por coordenadas.

### 8.1.2. Procesamiento de la información

Para correr el modelo se debe realizar ciertos procesos tanto en la información adquirida como en la preparación de los datos en el software ArcGIS®[29], los cuales serán introducidos en el modelo Figura 2.

**Figura 2.** Procesamiento de la información.



**Fuente.** Autor

- Primer paso: En primera instancia se realiza en ArcGIS®[29] la identificación de la cuenca y su cauce principal por medio de los shapes proporcionados por el SIGOT, con el fin de facilitar el reconocimiento de las estaciones hidrométricas necesarias para el estudio que se encuentren sobre el cauce principal, realizando así el primer filtro de información.
- Segundo paso: Posteriormente se obtiene la información de las estaciones (caudales máximos) en el IDEAM.
- Tercer paso: Se ordenan en un excel los caudales máximos mensuales anuales por cada estación. Las series de datos suministradas por el IDEAM se encuentran incompletas, por lo cual se utiliza el método de proporciones para completar los datos faltantes. Se tienen en cuenta todos los meses del año para cada estación de interés. Se tienen en cuenta las series de datos de más de 30 años y los meses en los que se necesita completar datos se realiza con la serie de los años anteriores o del mes posterior y/o próximo. Si falta el 30% de los datos se elimina el registro.
- Cuarto paso: Al finalizar la estimación de los datos faltantes para las estaciones seleccionadas, se procede a realizar un análisis de frecuencia

de las series de datos, estimando caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno por medio del programa HidroEsta@[29].

Con el programa mencionado, se estima la distribución que mejor se ajuste a cada serie de datos de cada estación, LogGumbel, Gumbel, LogPearson tipo III, Gama 3 parámetros, Gama 2 parámetros, LogGama 3 parámetros, LogGama2 parámetros o distribución Normal.

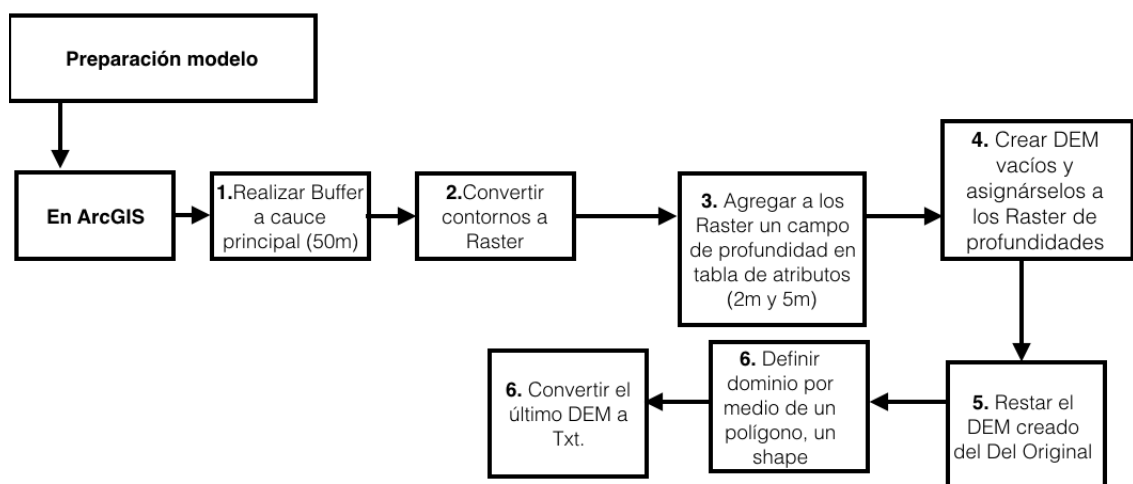
- Quinto paso: Determinar dominio (El cual se determina en la Fase 2: Preparación de modelo) y posteriormente escoger la estación que más aguas arriba se encuentre de la zona de estudio. En este caso, tendremos dos estaciones a evaluar, la estación del cauce principal y la estación del arroyo Bruno.

## 8.2. FASE 2 METODOLOGÍA: PREPARACIÓN DEL MODELO

Por otro lado en los procesos realizados en el programa ArcGIS@[29], se utiliza el modelo digital de elevación (DEM), el cual posee información de la altitud de la superficie del terreno y no tiene información de las profundidades de los ríos, por tal motivo y para contribución de este estudio conviene disminuir la profundidad de acuerdo al río Ranchería y el arroyo Bruno, las cuales oscilan entre 1 ó 2 metros a lo largo del cauce. [41] Posteriormente se hace el proceso en Iber@[16], donde se importa el DEM en formato txt con la información de las profundidades y el terreno[16] y se ejecuta el modelo.

### 8.2.1. Preprocesamiento del modelo

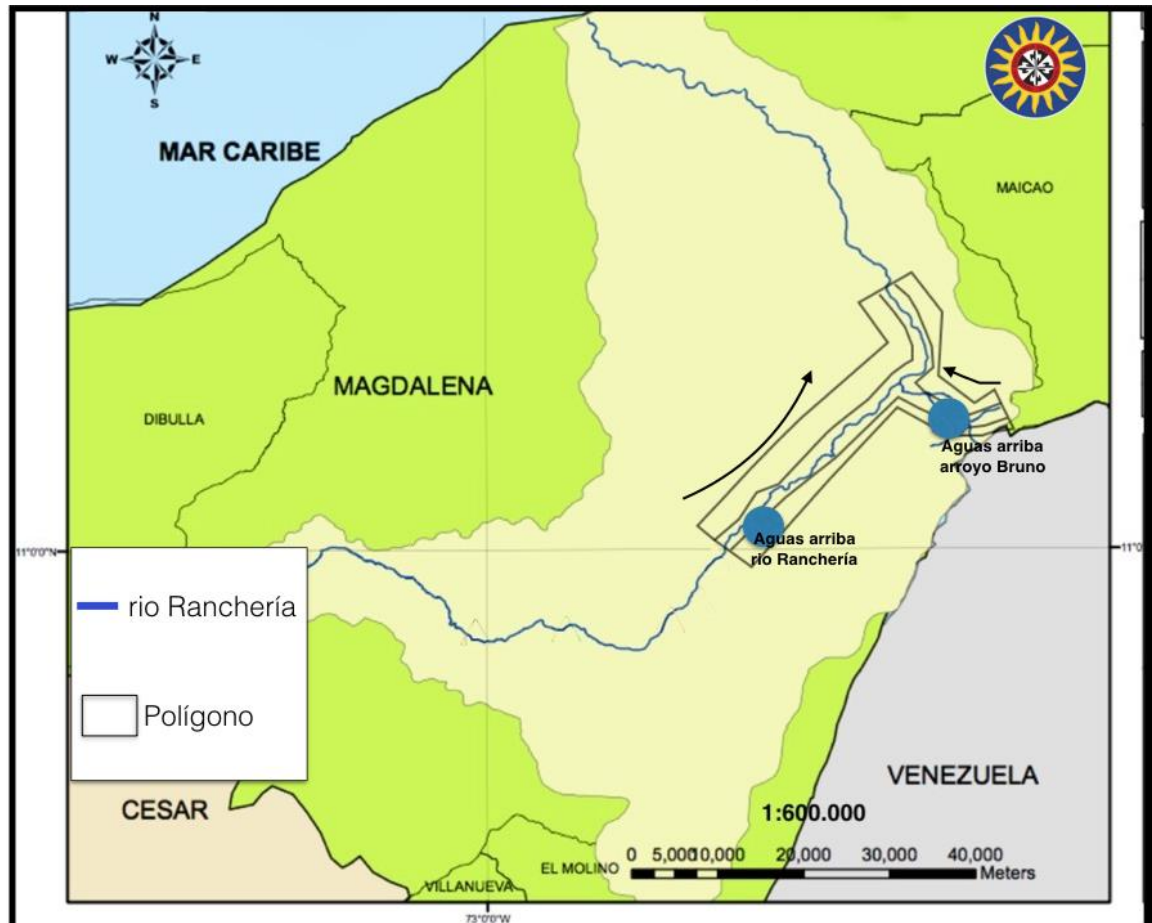
Figura 3. Preparación modelo ArcGIS®.



Fuente. Autor

- Primer paso: Para lo anterior se realiza contornos de 50 m al cauce a evaluar en escenario actual y escenario de desvío mediante la herramienta de ArcGIS®[29] en la ventana de ArcToolBox, la opción “Buffer” al cauce principal. Estos contornos se realizan a la ubicación actual de la lámina de agua y a la ubicación del desvío.
- Segundo paso: Los contornos realizados se convierten a Raster (Matriz de celdas con información), a estos, se les agrega un campo de información a las tablas de atributos llamado “Profundidad” calculando el valor respectivo, de 2 metros para el escenario sin desvío y con desvío ya que es la profundidad promedio del río, debido a que es una proyección se calculan escenarios extremos. Esta profundidad se selecciona como las secciones transversales. Los raster generados se les asignan a un raster vacío.
- Tercer paso: De esta forma se sustrae del modelo digital de elevación original, el nuevo modelo digital de elevación con las respectivas profundidades, es decir se realiza una resta del DEM original y el raster vacío al cual se le agrega la profundidad.
- Cuarto paso: Al tener el DEM de la profundidad, se define el dominio (Área interesada para el estudio) por medio de un shape (polígono) el cual delimita no solamente la zona de interés sino los bancos o límites del cauce principal, así como las entradas y las salidas. De esta forma se prepara la información (Shape) para exportarla a Iber®[16]. Este es el llamado pre-proceso.
- Quinto paso: Los DEM resultantes se transforman a formato txt para ser utilizados en Iber®[16] como información del terreno del área de estudio.

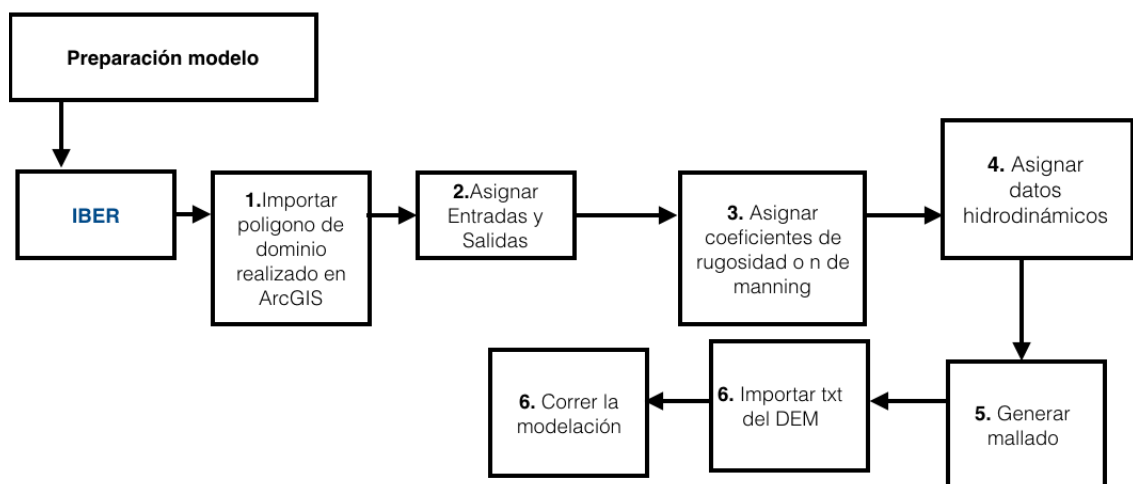
Mapa 5. Área determinada como (polígono) de estudio.



Fuente. Autor

A Continuación se expone la metodología en Iber@[16].

Figura 4. Metodología modelo Iber®.



Fuente. Autor

- Primer paso: En Iber®[16] se importa el polígono denominado dominio y se asignan entradas y salidas. Mediante Iber®[16] se introducen datos de rugosidad para el cauce en la opción *Uso de suelo*, aquí solicita ingresar el coeficiente de rugosidad o n de manning Tabla 4, el cual es escogido según la Guía para seleccionar el coeficiente de rugosidad para canales naturales y llanuras de inundación.

**Tabla 4.** Coeficientes de Rugosidad para canales naturales.

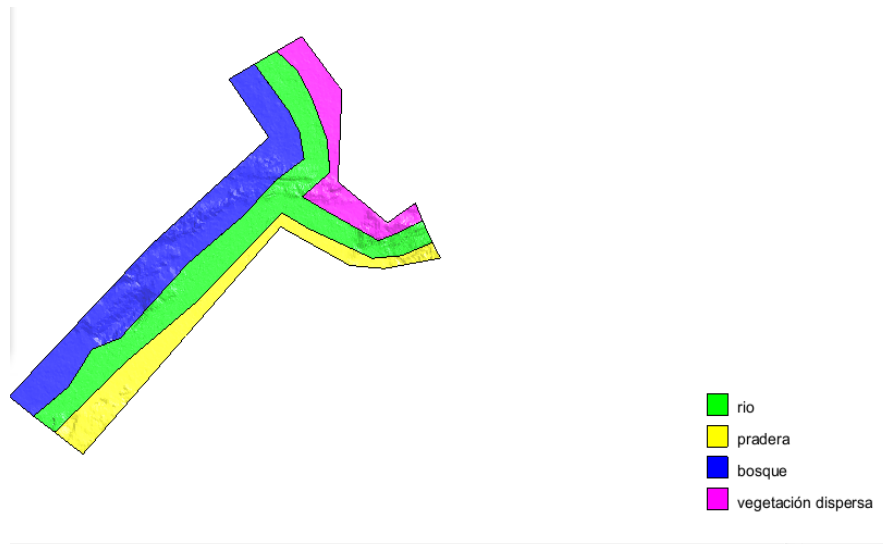
Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
<b>A. Cauces naturales</b>			
<b>A.1. Cursos Secundarios (Ancho de la superficie libre e crecida &lt; 30 m)</b>			
<b>A.1.1. Cursos en planicies</b>			
Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
Rectos con lagunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0,033	0,040	0,045
Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
<b>A.1.2. Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida</b>			
Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
<b>A.2. Cursos en planicies inundadas</b>			
<b>A.2.1. Zonas de pastos, sin arbustos</b>			
Pasto corto	0,025	0,030	0,035
pasto alto	0,030	0,035	0,050
<b>A.2.2. Zonas cultivadas</b>			
Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
<b>A.2.3. Zonas Arbustivas</b>			
Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070

pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
Pequeños árboles y arbustos con follaje (Fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
<b>A.2.4. Zonas Arbóreas</b>			
Sauces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza las ramas	0,100	0,120	0,160
<b>A.3. Cursos importantes (Ancho de la superficie libre en crecida &gt; 30 m)</b>			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor.			
Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Fuente. [46]

- Segundo paso: De la tabla anterior se escogen de acuerdo a información secundaria de las características del terreno, 3 categorías de coeficiente de rugosidad, las cuales son, tramos sucios con pastos y pozos profundos, cauce de cantos rodados con grandes rocas y meandros con muchas rocas [46]. Estos Valores se introducen a Iber@ [16] generando la Figura 5 (n de mannings en cada sección, río, pradera, bosque, vegetación dispersa), para así poder correr el programa, y continuar con los datos hidrodinámicos. Se escogen 3 valores indicando los n de manning más representativos de la topografía.

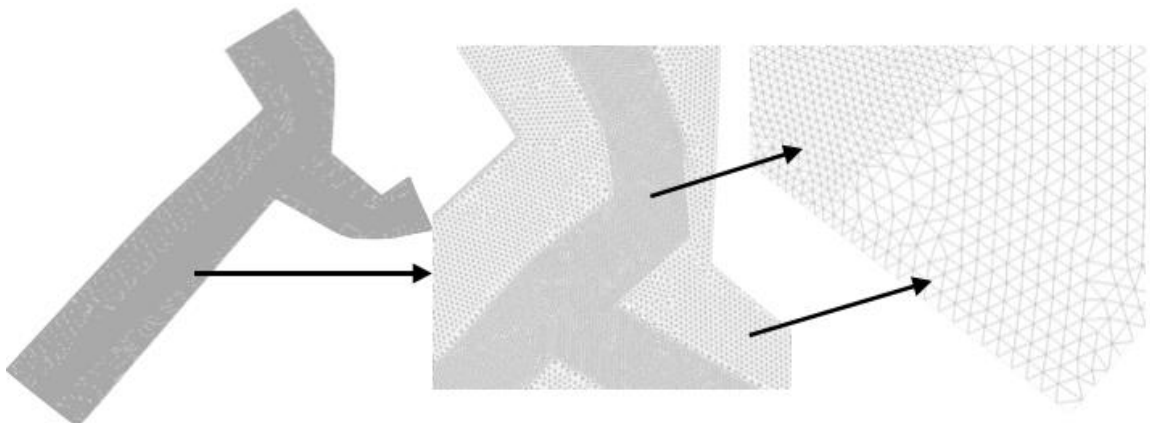
**Figura 5.** Rugosidad introducida en el programa Iber® para cada sección.



**Fuente.** Autor

- Tercer paso: Al asignar el coeficiente de rugosidad, se procede a los análisis hidrodinámicos, donde se entran los datos de caudales a los diferentes periodos de retorno teniendo en cuenta cual es la entrada y salida del caudal. Para este estudio, es necesario la asignación de 2 entradas y una salida, tanto del cauce principal como del arroyo Bruno.
- Cuarto paso: Posteriormente se genera una malla la cual está conformada por pequeños triángulos, con diferentes tamaños entre cada superficie. Para la superficie del cauce se escoge de 80 y para las faltantes de 160. De esta forma se genera la malla dando como resultado la Figura 6.

**Figura 6.** Malla creada utilizada para el modelo en Iber®.



**Fuente.** Autor

Al generar la malla se escogen los datos del problema, donde se establece el tiempo máximo de simulación y el intervalo de resultados requerido para el modelo.

- Quinto paso: Se agrega elevación en formato txt a la malla, es decir en formato txt se asigna el DEM.
- Sexto paso: Finalmente, al establecer los datos del problema se corre el modelo, de forma que el caudal de entrada como de salida sean similares, con el fin de cumplir la condición de conservación de masa y energía. De esta forma se termina con el proceso de la simulación y se continúa con el post-proceso, los cuales son los resultados arrojados por Iber®[16] y la realización de los mapas como base para el análisis de resultados de la investigación.

### **8.3. FASE 3 METODOLOGÍA: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados de este estudio están basados en los mapas generados como paso final en Iber® [16], en estos se muestran la zona con posible afectación por medio de un mapa sobre puesto de la zona de estudio.

Para los escenarios de planicies de inundación se contemplaron las siguientes variables: velocidad en el cauce; que ayuda a identificar junto con la profundidad de la lámina de agua crecientes extremas, cota de agua; que está relacionada con una medida de referencia y alerta ante la amenaza de inundación, profundidad de la lámina de agua; que determina el nivel máximo alcanzado por la lámina de agua. Las anteriores variables, son generadas por Iber® [16] y son de importancia en el momento de comparar planicies de inundación por la desviación del río.

Se evalúan únicamente los periodos de retorno de 10 y 100 años. La selección de periodo de retorno depende de varios factores, entre los cuales se incluyen el tamaño de la cuenca y el grado de seguridad deseado. En hidrología, los períodos de retorno varían típicamente de 10 a 100 años cuando el caudal máximo probable está definido, es decir se conoce o ha sido estimado, por tal motivo, y para este estudio se tiene en cuenta la metodología del Cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE-US Army Corps of Engineers) y se estiman los caudales máximos asociados a periodos de retorno de 10 y 100 años.[47][48][49]

## 9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 9.1. RESULTADOS FASE 1

#### 9.1.1. Análisis de frecuencia – caudales asociados a periodos de retorno

Para este estudio se evalúan 2 periodos de retorno (Tabla 5). Esto permite conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento (En este caso caudales máximos) de igual o mayor magnitud en un intervalo promedio de tiempo. [50]

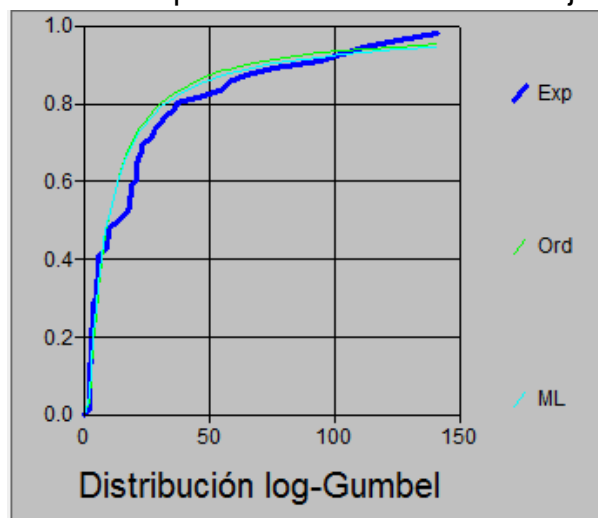
**Tabla 5.** Variable y periodos de retorno utilizados para el estudio.

Variable	Periodo de Retorno (T)
Caudales (Q) máximos	10
	100

Fuente. Autor

Los caudales asociados a los periodos de retorno son estimados mediante el programa HidroEsta®[29], buscando la distribución con mejor ajuste para la serie de datos como se muestra en la Figura 7, de la estación Abajo bocatoma.

**Figura 7.** Prueba bondad de ajuste de distribución de datos de la estación (E1)15067160 correspondiente a la estación Abajo bocatoma.



Fuente. Autor

De esta forma se realiza el análisis de frecuencia con cada estación como se muestra en la Tabla 6, donde se visualiza que los caudales aumentan su magnitud a medida que aumenta el periodo de retorno según la distribución de cada una de las estaciones. Los caudales se mueven en un rango entre 9.85 m<sup>3</sup>/s a 675.08 m<sup>3</sup>/s para la estación Abajo Bocatoma correspondiente el río Ranchería y entre 0.37 m<sup>3</sup>/s a 221.4 m<sup>3</sup>/s para la estación La Esperanza que corresponde a el arroyo Bruno.

**Tabla 6.** Caudales en (m<sup>3</sup>/s) asociados a diferentes periodos de retorno de cada estación.

T (años) m <sup>3</sup> /s	Log Gumbel	Log Pearson III
	Abajo Bocatoma	La Esperanza
	<b>1 5 0 6 7 1 6 0</b>	<b>1 5 0 6 7 0 6 0</b>
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
2.33	9.85	0.37
5	30.54	2.97
<b>10</b>	<b>64.62</b>	<b>9.8</b>
25	166.55	37.8
50	336.18	94.42
<b>100</b>	<b>675.08</b>	<b>221.4</b>

Fuente. Autor

En la anterior tabla se muestran las estaciones posteriormente nombradas con sus referidos periodos de retorno y la distribución que mejor ajuste posee según el cálculo en el software HidroEsta®[29], dando así como resultado los caudales a diferentes periodos de retorno. Esta distribución se comprueba por medio de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov que se expone en el marco teórico de este documento.

Para la modelación se utilizan las estaciones resaltadas en la Tabla 6. Inicialmente se escogieron 8 estaciones sobre el cauce dentro de la zona de estudio, de las cuales para el estudio, se seleccionaron 2 de interés que se presentan a la entrada de la zona de estudio definida y sobre el cauce del río Ranchería y el arroyo Bruno, cada uno de los cauces a estudiar. Reducir las estaciones a esta cantidad también fue necesario por la toma de tiempo de ejecución del modelo, es decir el nivel computacional es alto y retrasa el proceso de modelación.

Las estaciones escogidas son la 15067160 correspondiente a la estación Abajo bocatoma ubicada en el municipio de Barrancas y la estación 15067060, La Esperanza ubicada en el municipio de Albania Mapa 6. Estas estaciones tienen caudales asociados a periodos de retorno de 9.85 m<sup>3</sup>/s a 675.08 m<sup>3</sup>/s para la estación Abajo bocatoma que pertenece a la estación sobre el cauce del río Ranchería y de 0.37 m<sup>3</sup>/s a 221.4 m<sup>3</sup>/s, para la estación de La Esperanza la cual está sobre el cauce del arroyo Bruno.

**Mapa 6.** Estaciones seleccionadas dentro del dominio o área de estudio.



Fuente. Autor

Se tiene en cuenta estas estaciones dado que son las que se encuentran más aguas arriba dentro del dominio definido como zona de estudio. La estación de Abajo bocatoma está más aguas arriba del dominio, es decir a la entrada de la zona de estudio sobre el cauce del río Ranchería y la estación La Esperanza está aguas arriba del arroyo Bruno en el brazo que conecta con el río Ranchería.

## 9.2. RESULTADOS FASE 2

### 9.2.1. Desvío río Ranchería

Para las estaciones escogidas, se estimaron los respectivos caudales asociados a los diferentes periodos de retorno, de los cuales para la modelación se escogieron el periodo de retorno de 10 años y 100 años como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Caudales asociados a periodos de retorno escogidos para el modelo.

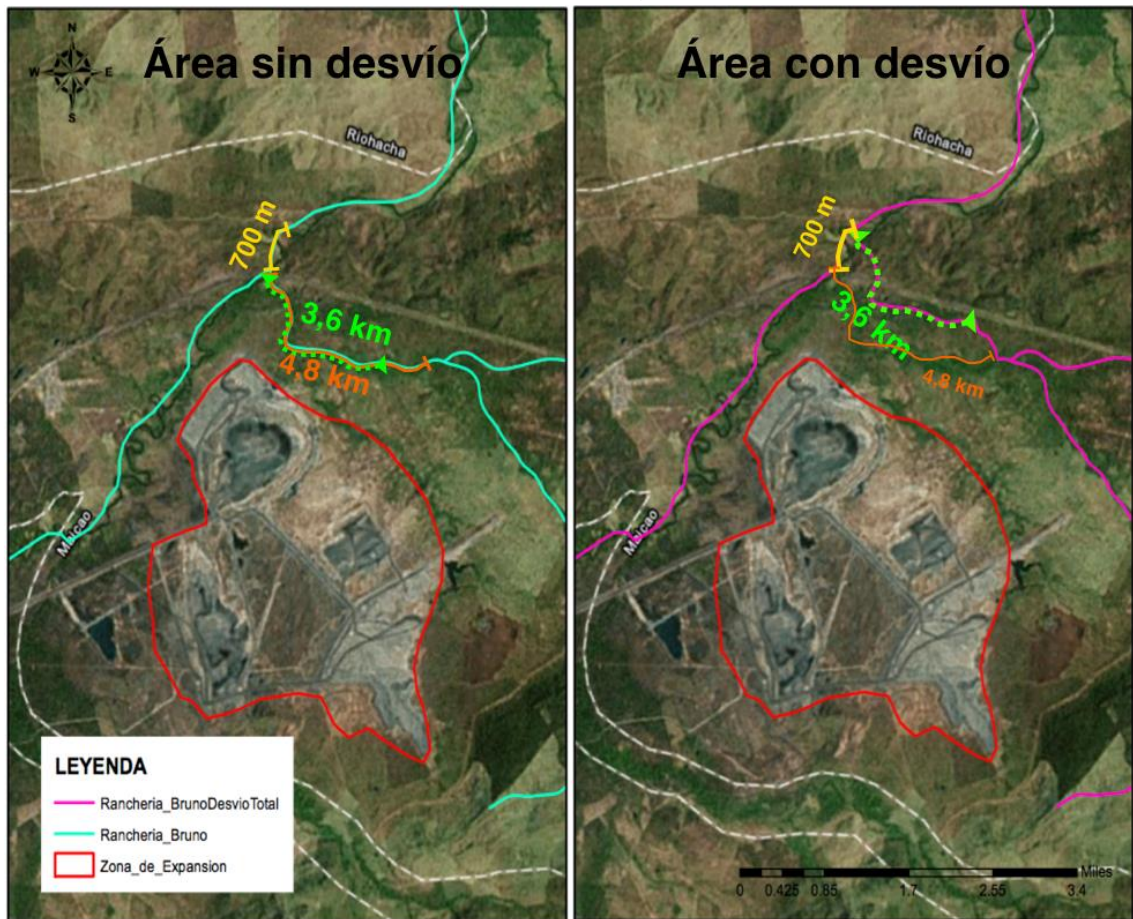
	<b>Abajo Bocatoma</b>	<b>La esperanza</b>
<b>10 años</b>	64.62 m <sup>3</sup> /s	9.8 m <sup>3</sup> /s
<b>100 años</b>	675.08 m <sup>3</sup> /s	221.4 m <sup>3</sup> /s

**Fuente.** Autor

En el Mapa 7, se muestra a la izquierda el cauce principal del río Ranchería y a la derecha el desvío que se quiere realizar con las medidas descritas anteriormente, de los últimos 4,8 km del arroyo Bruno, desviar 3,6 km de este, 700 metros al norte del río Ranchería.

El polígono rojo presentado en el Mapa 7 demarca la zona que se quiere expandir, dejando para explotación de carbón un área aproximada de 2.52 km<sup>2</sup>. En la zona solo se encuentra la mina de carbón del Cerrejón delimitada por el municipio de Albania al norte y el municipio de Maicao al sur.

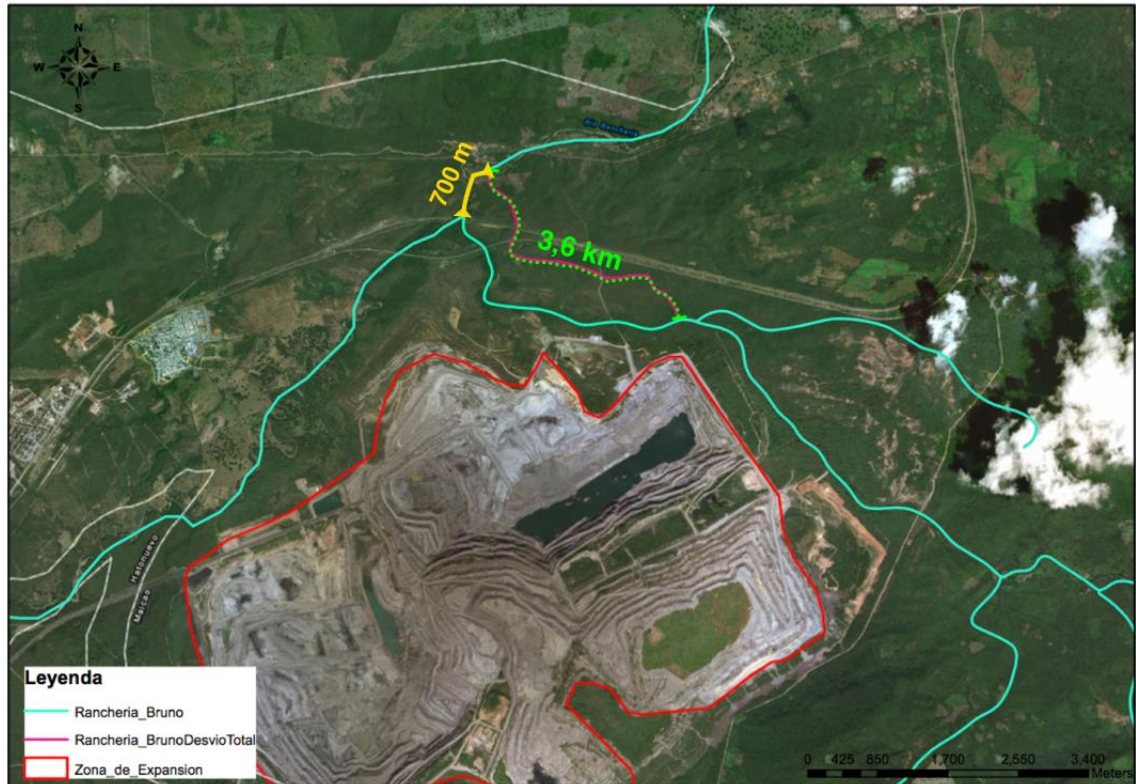
**Mapa 7. Comparación Cauze Original con Cauze del desvío.**



**Fuente. Autor**

Cabe aclarar que el área del polígono señalado no es la única explotación de carbón que la empresa Cerrejón posee, esto es posible visualizarlo en el mapa antes especificado Mapa 3, donde se muestra la región del título minero del Cerrejón.

**Mapa 8.** Sobre posición de cauce original contra cauce de desvío.



**Fuente.** Autor

En el Mapa 8 se realiza una sobre posición del cauce original del río Ranchería y el arroyo Bruno con respecto al desvío del tramo del arroyo Bruno, mostrando así de forma precisa el área de expansión de la mina de carbón.

### **9.3. RESULTADOS FASE 3**

A continuación se exponen los escenarios de planicies de inundación hallados como resultados de la acción del desvío del río Ranchería en mapas comparativos de los diferentes periodos de retorno en años (10 años y 100 años) para 3 variables, profundidad de la lámina de agua, Cota del agua y Velocidad, analizados con una sobre posición del contexto geográfico y detalles de referencia de la zona de estudio (visualización de espacio real del terreno).

#### **9.3.1. Profundidad de la lámina de agua**

La superficie de la tierra está representada con Modelos Digitales de Elevación, que, como anteriormente se ha descrito, poseen información de altitud en cualquier punto de un área específica, más no posee información de las

profundidades de los ríos. La teledetección espacial es una importante fuente de datos para originar un DEM, esta es la tecnología que consiste en la adquisición de información de la superficie terrestre sin entrar en contacto material con ella, mediante sensores localizados en plataformas espaciales (satélites) y el posterior análisis de dicha información por medio de procesamiento digital e interpretación de imágenes. El intercambio de dicha información entre superficie terrestre y sensor se realiza a través de un flujo de energía electromagnética entre ambos, la energía reflejada vuelve a través de la atmósfera siendo modificada antes de alcanzar el sensor, donde finalmente es captada. La información así obtenida es posteriormente enviada a las estaciones receptoras en tierra para su procesamiento. Como resultado final de la adquisición de datos por parte de un satélite obtenemos una imagen digital, esto es, una representación de la superficie de la tierra mediante una matriz numérica, de tal manera que cada componente de dicha matriz es un punto imagen o píxel y su valor numérico representa la intensidad de radiación recibida por el sensor procedente del área terrestre. Para este estudio se utilizó la plataforma de Alaska Satellite Facility (ASF) donde se descarga el DEM; esta plataforma descifra, procesa, archiva y distribuye datos de teledetección a usuarios científicos de todo el mundo, esta utiliza el satélite ALOS PALSAR. [51][52]

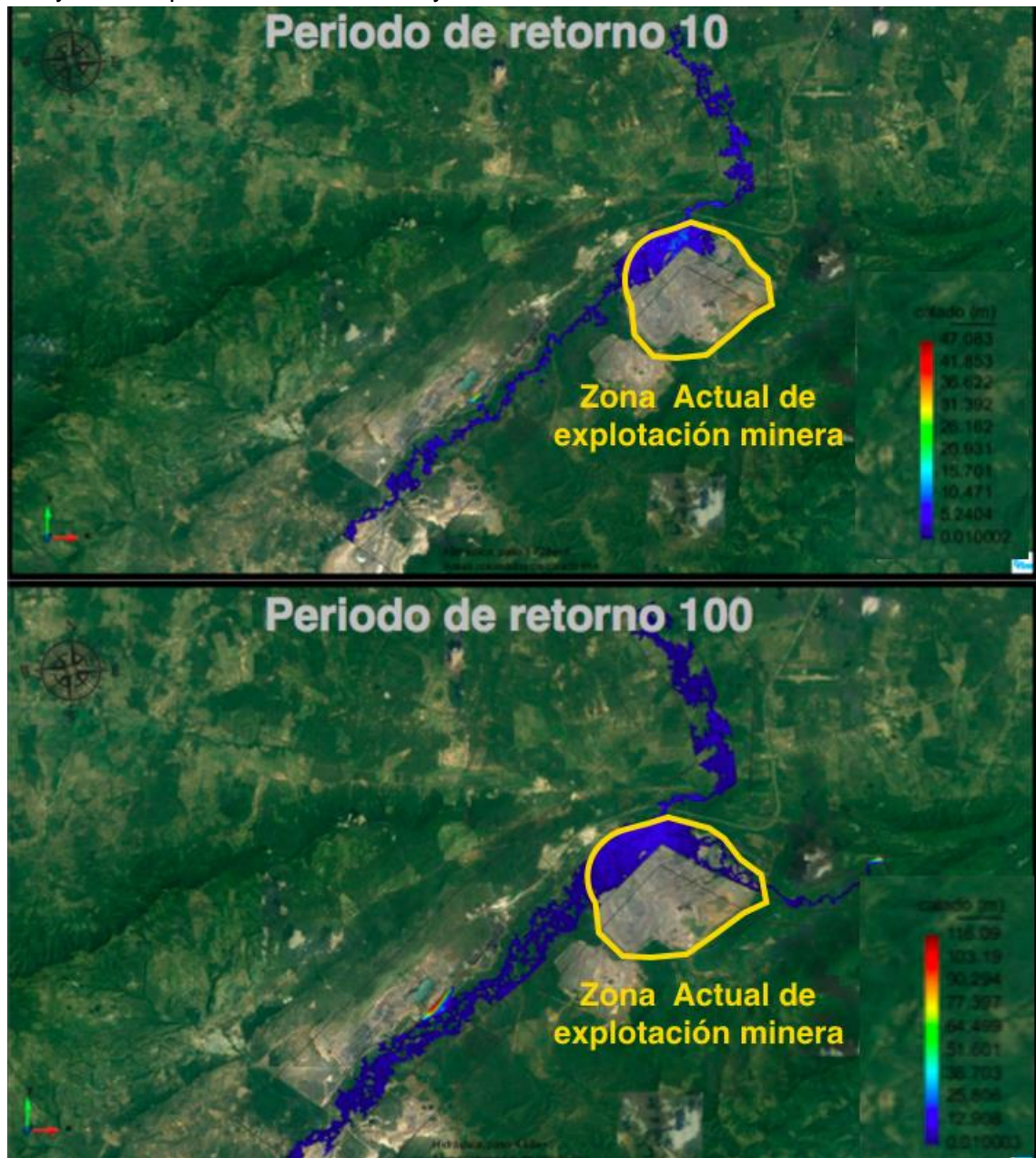
El DEM, en el caso de los ríos no tiene la información de las profundidades, el satélite envía el flujo de energía y detecta los ríos como una superficie totalmente horizontal, es decir, sin ninguna elevación, por tal motivo se realiza el proceso de disminución de la profundidad nombrado en la metodología y definido como 2 metros en todo el cauce, por tanto el modelo tiene un fondo predeterminado y la lámina de agua resultante será desde ese fondo (2m) y lo que aumente la lámina de agua en la modelación, es decir los 2 m, es el valor de referencia del incremento en la lámina de agua.

La profundidad de la lámina de agua se caracteriza por ser la variable de magnitud más importante en la determinación de la amenaza de inundación, es el nivel máximo alcanzado por las aguas.[6]

### **9.3.1.1. Profundidad de la lámina de agua sin desvío en el cauce principal y arroyo Bruno**

En el siguiente mapa se compara la profundidad de la lámina de agua en la condición inicial del cauce del río Ranchería para periodos de retorno de 10 y 100 años, evaluando el modelo del posible comportamiento de la profundidad de la lámina de agua a futuro en su estado original.

**Mapa 9.** Comparación profundidad de la lámina de agua sin el desvío del cauce y arroyo Bruno periodo de retorno 10 y 100 años.



Fuente. Autor

En el Mapa 9 se observa que la profundidad de la lámina de agua asociada al periodo de retorno de 10 años varía entre 2.5 m y 5.24 m, lo que indica que el cauce se considera como una creciente extrema debido que las profundidades incrementan en más de 1.5 m. Para la profundidad de la lámina de agua asociada al periodo de retorno de 100 años se muestran profundidades de 5 m a 6.45 m, lo que se traduce que al igual que el periodo de retorno de 10 años, existen crecientes extremas, ya que, hay incrementos en la profundidad superiores a 1.5

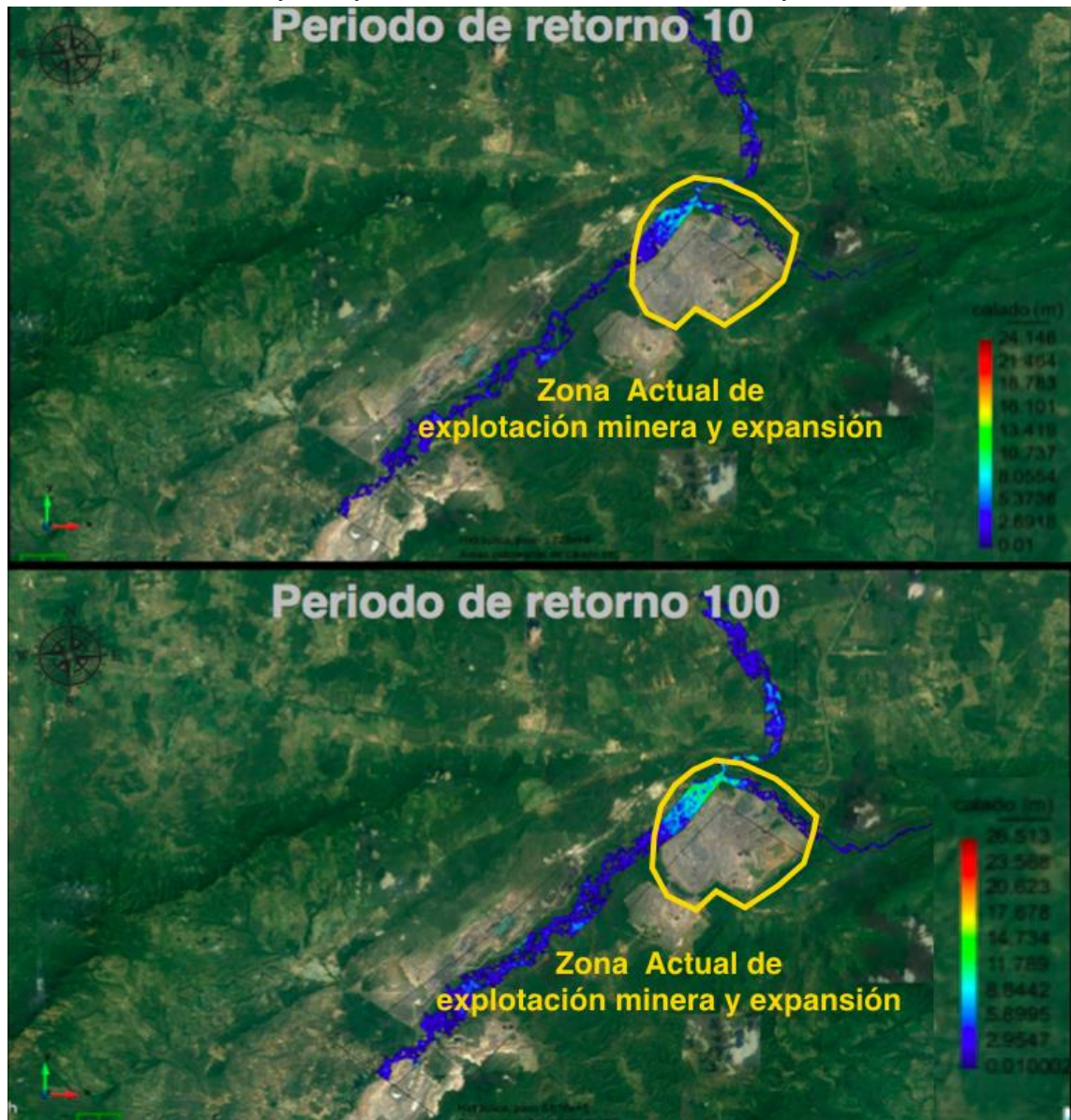
m. Por tanto, para los 10 años el incremento en la lámina de agua fue de 0.5 m a 3.24 m y para los 100 años de 3 m a 4.45 m. [48][53]

El brazo del arroyo Bruno presenta un caudal intermitente, es decir no propicia un caudal durante todo el año sino en algunas temporadas, lo que se traduce en que no manifiesta profundidad en la lámina de agua en el Mapa 9. Por otra parte los caudales son pocos significativos para la ejecución del modelo y puede incidir en los resultados arrojados.

### ***9.3.1.2. Profundidad de la lámina de agua con desvío en el cauce principal y arroyo Bruno***

Para poder realizar un análisis completo surge la necesidad de realizar no solo un análisis de la profundidad de la lámina de agua en los mapas sin desvío, sino también del comportamiento de la lámina de agua con el desvío, para así, posteriormente comparar los escenarios de planicies de inundación para los periodos de retorno de 10 y 100 años como se evidencia en el Mapa 10.

**Mapa 10.** Comparación profundidad de la lámina de agua con el desvío del cauce y arroyo Bruno Periodo de retorno 10 y 100 años.



**Fuente.** Autor

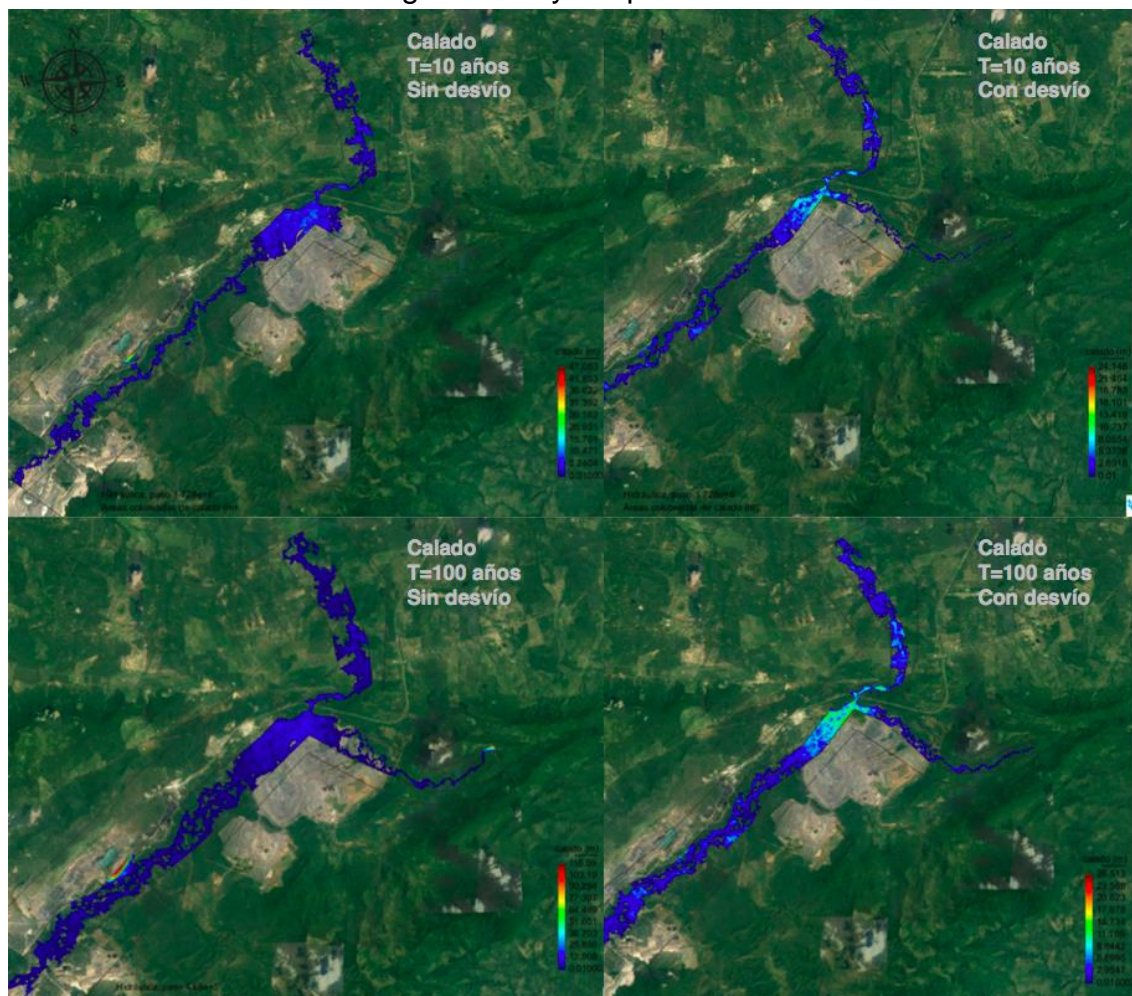
En el Mapa 10 se puede identificar que las profundidades asociadas al periodo de retorno de 10 años oscilan entre 2.6 m y 5.3 m, corroborando que en el transcurso del tiempo hay un incremento en las profundidades que superan los 1.5 m, ya que el incremento de la lámina de agua es de 0.6 m y 3.3 m. Las profundidades asociadas al periodo de retorno de 100 años, son las que registran mayores cambios en sus valores, con un intervalo que varía desde 5.8 m a 11 m, con incremento de la lámina de agua de 3.8 m a 9 m.

Para los dos escenarios se identifican crecientes extremas ya que, las profundidades aumentan en más de 1.5 m, evidenciando una posible zona de inundación con desbordamientos para los dos periodos de retorno, en la intersección entre el cauce principal y el arroyo.[48][53]

### 9.3.1.3. Comparación 4 escenarios de la profundidad de la lámina de agua

Se contraponen los 4 escenarios de la profundidad de la lámina de agua para así tener mayor precisión en los análisis y conclusiones, mostrando los periodos de retorno de 10 y 100 años con el desvío y sin el desvío.

**Mapa 11.** Comparación de los 4 escenarios de la profundidad de la lámina de agua antes y después del desvío.



Fuente. Autor

Con el desvío según el Mapa 11, se evidencia un incremento en la profundidad de la lámina de agua con respecto a la simulación de la condición original del cauce, revelando una gran profundidad en la lámina de agua desbordada en la

intersección del río Ranchería y la desembocadura del arroyo Bruno, con una profundidad de la lámina de agua aproximado de 5.8 m y un incremento en la misma de 3.8 m aproximadamente. En general, se han reportado inundaciones en la cuenca del río Ranchería pero no se posee información o datos sobre las profundidades de la lámina de agua, por tanto no es posible comparar los valores que arroja el modelo con respecto a datos históricos.

### 9.3.2. Cota de agua

Las cotas de inundación, están referenciadas topográficamente a una estación hidrológica del IDEAM, por tanto se configura una altura de referencia, debido a que los ríos poseen una alta dinámica y sus orillas, profundidades y condiciones hidráulicas pueden cambiar rápidamente en el tiempo y en el espacio.[2]

Las cotas de inundación o de desbordamiento, son los niveles de los ríos que se tienen de referencia para poder alertar ante la probabilidad de que se presente una inundación y corresponden también con los niveles a partir de los cuales se comienza a presentar las primeras afectaciones en zonas de interés.[2]

La cota de agua se analiza de la misma forma que la profundidad de la lámina de agua, con la diferencia que a la profundidad se le suma la elevación del terreno y se mide en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Para el análisis de este estudio, se tienen en cuenta 4 puntos geodésicos a escala 1:100.000 de la cartografía base del IGAC, cercanos a la zona de estudio que poseen información de las elevaciones presentados a continuación.

**Tabla 8.** Puntos geodésicos de la cartografía base del IGAC seleccionados para el análisis.

<b>FID</b>	<b>Nombre del punto geodésico</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>
113	Tochón-626	0
116	QUEPI-638	200
119	GT-14	80
121	GT-13	100

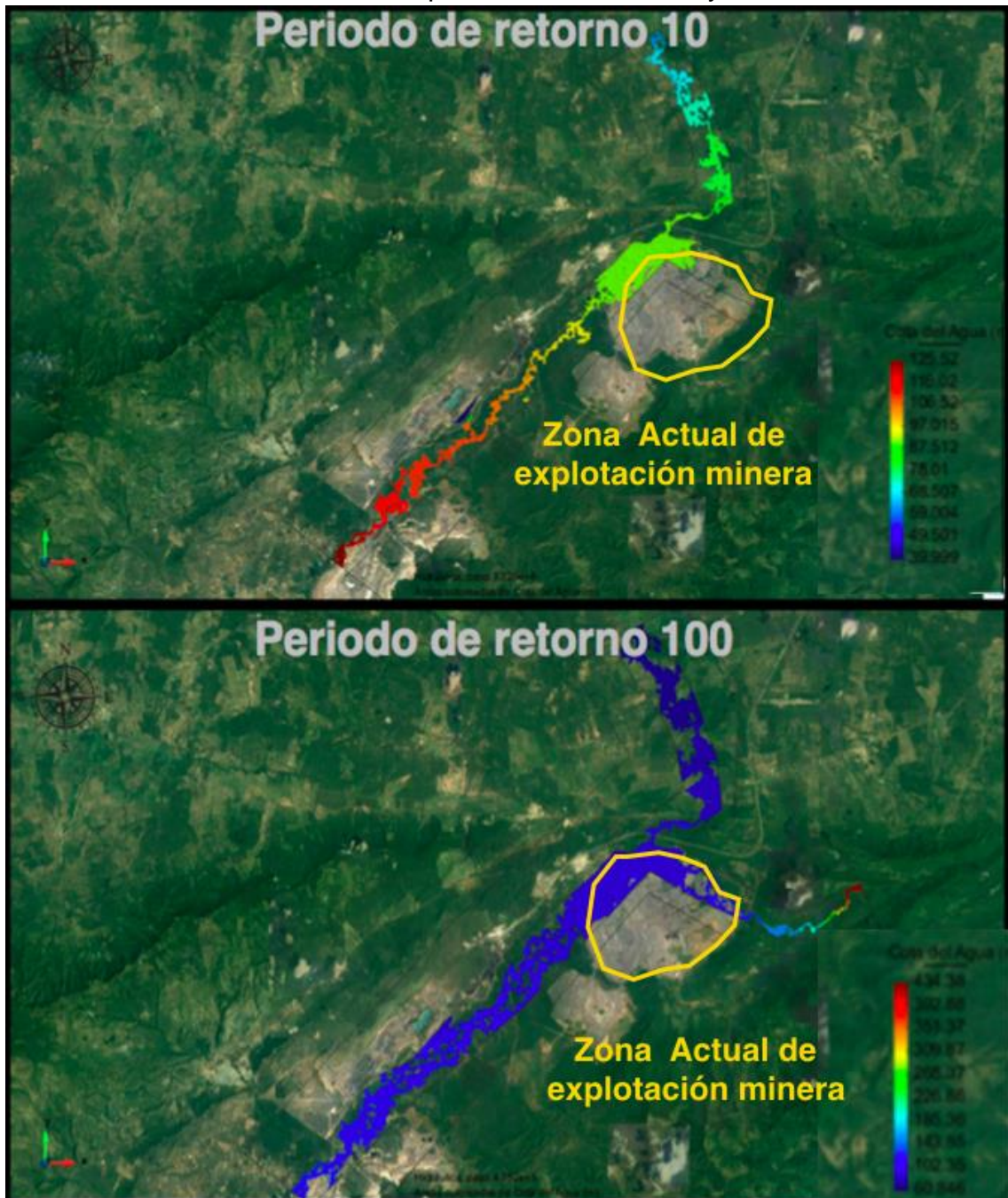
**Fuente.** Autor [54]

Por la anterior tabla, se indica según los puntos geodésicos de la cartografía base del IGAC, que el comportamiento de las elevaciones para la zona de estudio oscilan entre 0 m.s.n.m a 200 m.s.n.m, lo cual señala que las cotas de agua del modelo han de moverse en este rango.

### 9.3.2.1. Cota de agua sin desvío en el cauce principal y arroyo Bruno

A continuación se analiza las cotas de agua sin el desvío del cauce, con el fin de comparar las condiciones iniciales para esta variable.

**Mapa 12.** Comparación cota de agua en todo el cauce y arroyo Bruno sin el desvío del cauce periodo de retorno 10 y 100 años.



Fuente. Autor

En el Mapa 12 se observa un aumento de la cota de agua, esta variable se analiza de la misma forma que la profundidad de la lámina de agua, se diferencia en que su unidad es m.s.n.m, lo cual ayuda a estimar el nivel de descarga en el caso de inundación, es decir, la capacidad de desagüe como función reguladora del río.[55] También es posible utilizar la cota para identificar hasta qué punto sobre el terreno llega la inundación medida sobre el nivel del mar.

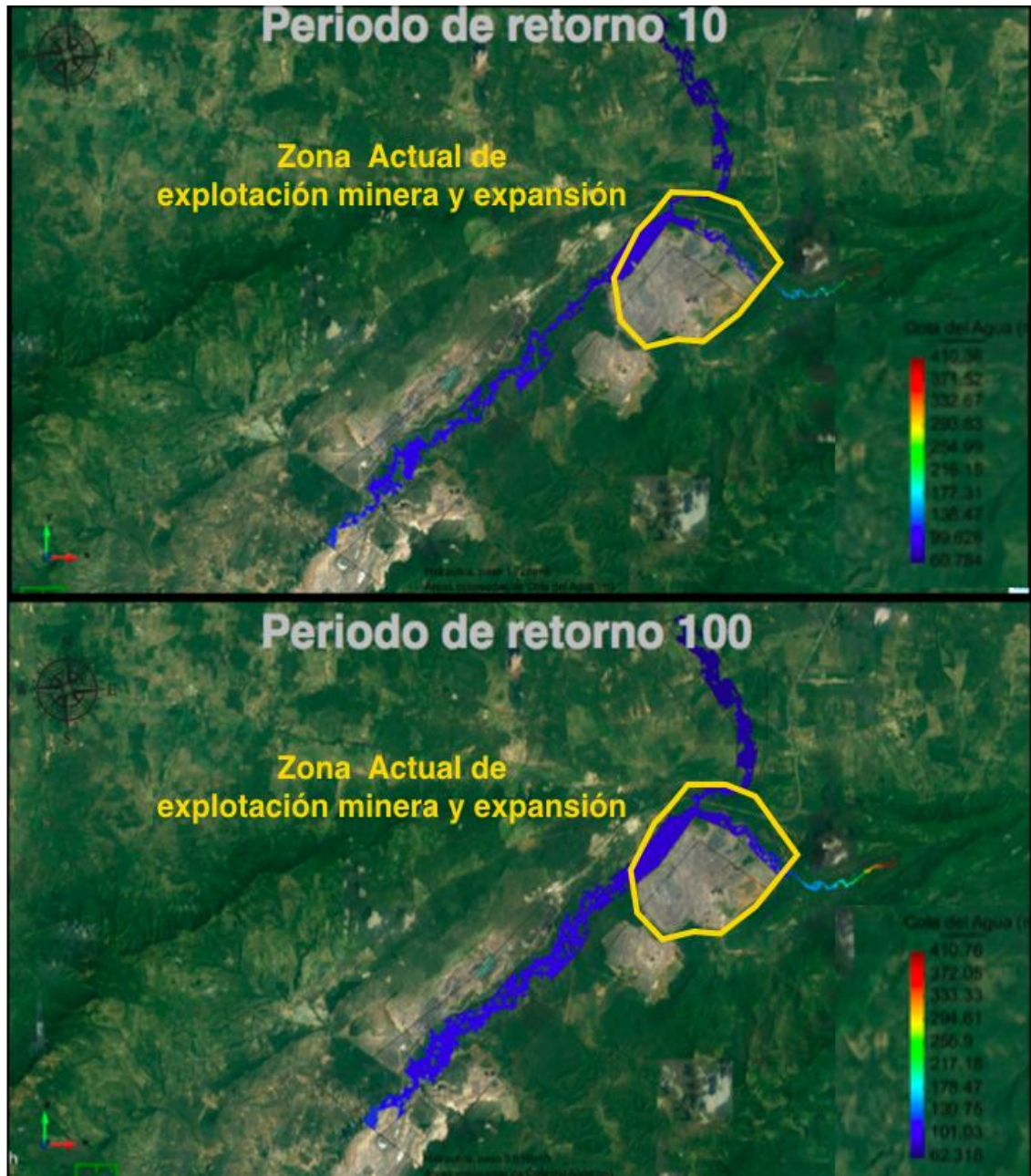
Para la cota asociada al periodo de retorno de 10 años en el escenario sin desvío, no se manifiestan valores de cotas de agua en el brazo del arroyo Bruno, ratificando que el arroyo es un cuerpo de agua intermitente, es decir, no propicia un caudal durante todo el año sino en algunas temporadas.

Los resultados arrojados en el Mapa 12 muestran un intervalo de valores de cotas de agua que van desde 78.01 m.s.n.m a 87.51 m.s.n.m para el periodo de retorno de 10 años sin el desvío, revelando que no hay cambios relevantes en la elevación para la zona de estudio, de igual forma para el periodo de retorno de 100 años, no se evidencian grandes cambios en los valores de elevación en el área de estudio mostrando cotas de 60.84 m.s.n.m a 81.60 m.s.n.m, sin embargo se registran cotas de agua que se pueden considerar atípicas teniendo en cuenta su valor más no su posición, ya que estas cotas se encuentran ubicadas en el costado oriental a la altura del nacimiento del arroyo Bruno donde se presentan las mayores elevaciones representadas en el mapa.

### 9.3.2.2. Cota de agua con desvío en el cauce principal y arroyo Bruno

El estudio de la cota con desvío es fundamental porque con este se identifica las posibles zonas de inundación.

**Mapa 13.** Comparación cota de agua con el desvío del cauce y arroyo Bruno periodo de retorno 10 y 100 años.



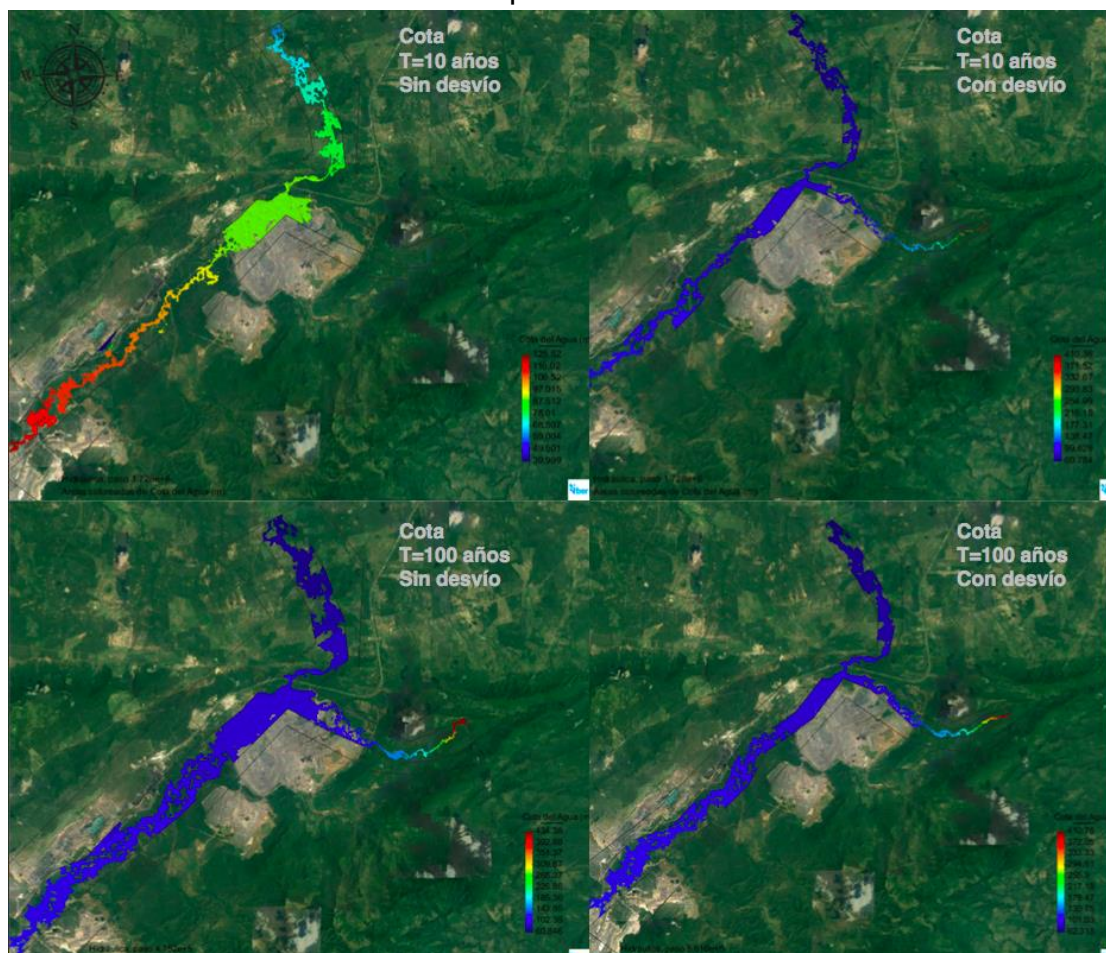
Fuente. Autor

Los resultados obtenidos para el escenario con desvío, demuestran que no hay grandes variaciones en las cotas de agua asociadas al periodo de retorno de 10 años, ya que, los valores arrojados en la zona estudio se encuentran en un intervalo aproximado de 60.78 m.s.n.m a 82 m.s.n.m, por otra parte para el periodo de retorno de 100 años, se encuentran cotas de agua en un intervalo aproximado de 62.32 m.s.n.m a 85 m.s.n.m, mostrando que al igual que el periodo de retorno de 10 años no existen grandes variaciones en las cotas de agua, dado que el área de estudio no es de gran extensión. Es importante mencionar que fuera del área de estudio se registran datos que alcanzan los 410.36 m.s.n.m, debido a que estas elevaciones se encuentran a la altura del nacimiento del arroyo Bruno.

### 9.3.2.3. Comparación 4 escenarios Cota de agua en el cauce principal

Se comparan los 4 escenarios de la cota de agua, con desvío y sin desvío.

**Mapa 14.** Comparación de los 4 escenarios de la cota de agua antes y después del desvío.



Fuente. Autor

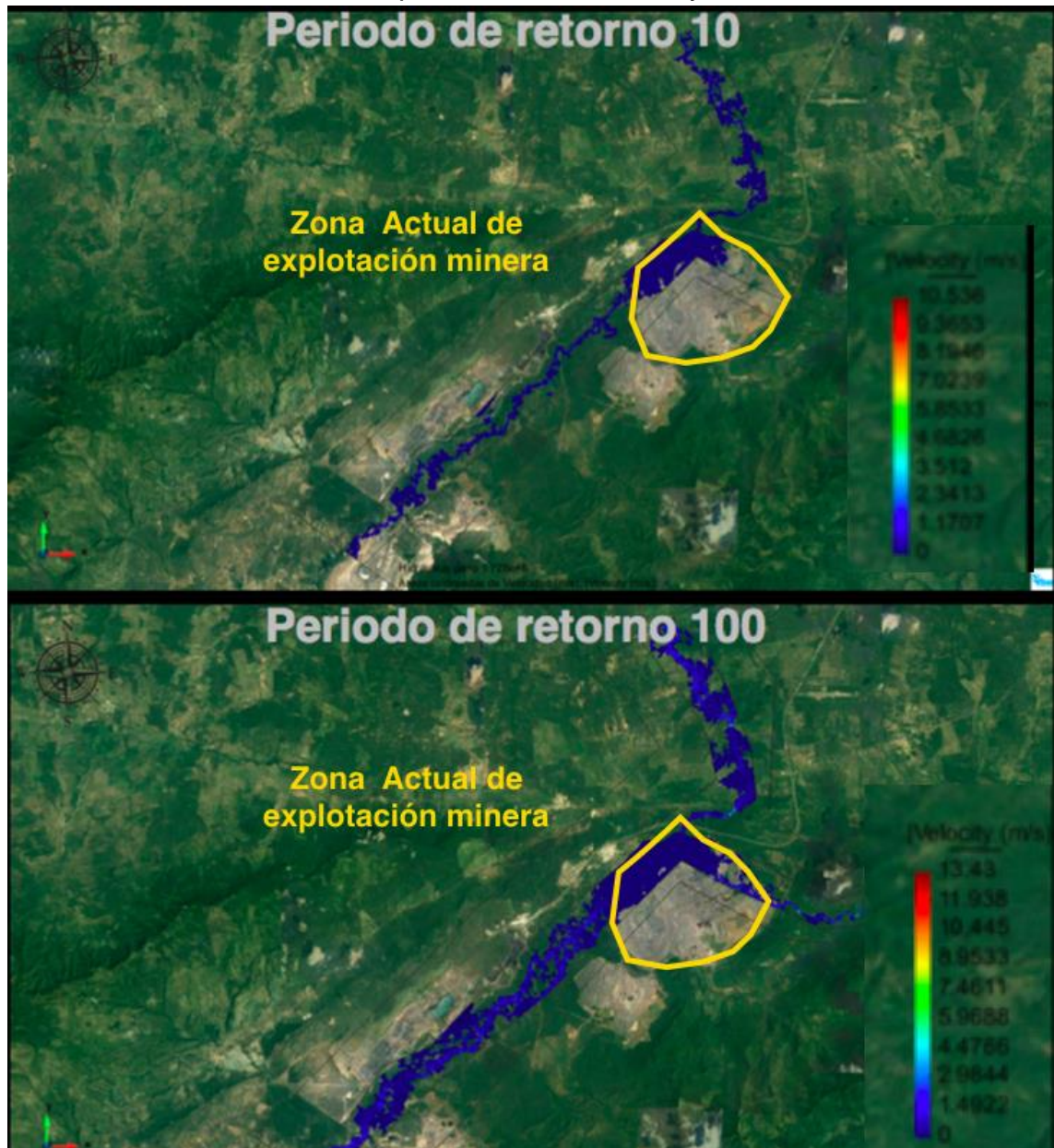
Con los 4 escenarios se visualiza el crecimiento de la cota de agua al aumentar el periodo de retorno tanto para los escenarios originales, como los escenarios con desvío.

### **9.3.3. Velocidad**

La velocidad es una variable importante para el estudio ya que en función de esta, puede cambiar el comportamiento de la distribución y el movimiento del flujo, así mismo, al presentarse un desbordamiento se puede encontrar una disminución de la velocidad debido a que el paso disponible (Área) para el avance del agua aumenta haciendo que la velocidad del flujo disminuya.

### 9.3.3.1. Velocidad del cauce y arroyo Bruno sin desvío en el cauce principal

**Mapa 15.** Comparación de velocidad en el cauce y arroyo Bruno sin desvío del cauce periodo de retorno 10 y 100 años.



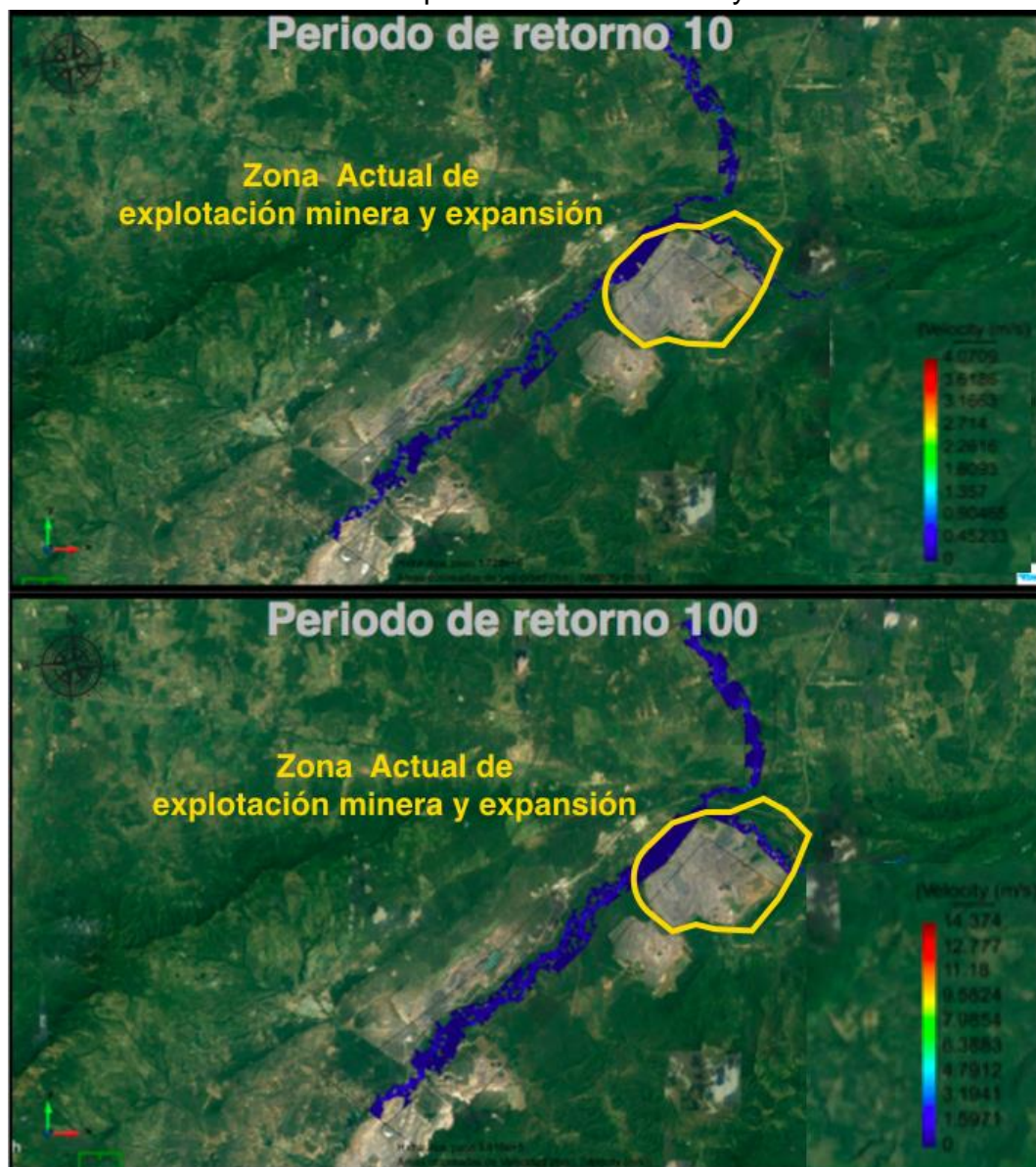
Fuente. Autor

Se observa incremento en la velocidad del río entre el periodo de retorno de 10 años y el periodo de retorno de 100 años en el Mapa 15, con velocidades asociadas al periodo de retorno de 10 años de 0.5 m/s y velocidades asociadas al periodo de retorno de 100 años de 1m/s, manteniéndose en velocidades

habituales de un río, de igual forma se percibe que las velocidades asociadas a los dos periodos de retorno evaluados no sobrepasan los 1.17 m/s. [56][57]

### 9.3.3.2. *Velocidad del cauce y arroyo Bruno con desvío en el cauce principal*

**Mapa 16.** Comparación de velocidad en el cauce y arroyo Bruno con desvío del cauce periodo de retorno 10 y 100 años.



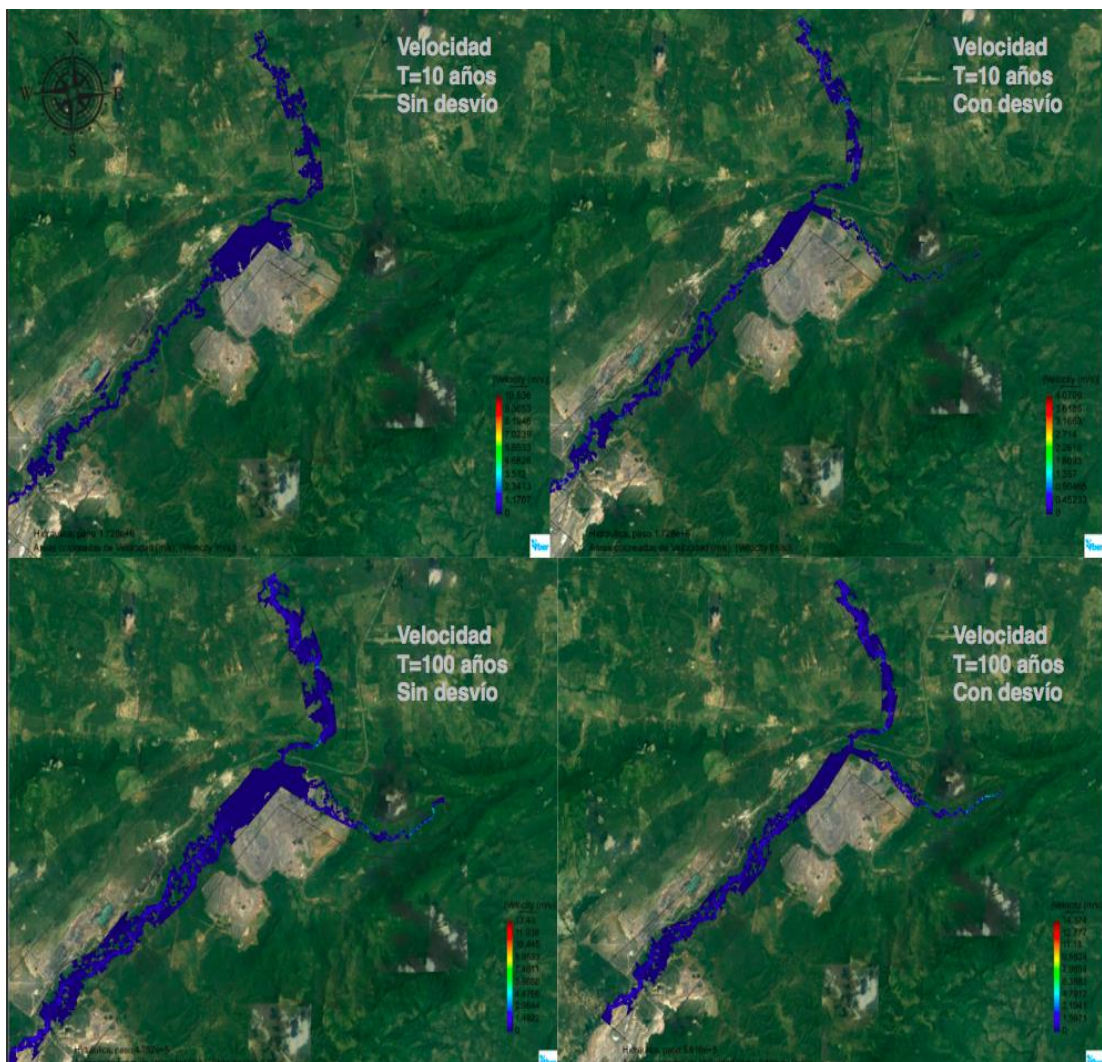
Fuente. Autor

Para el escenario con desvío, se evidencia un incremento significativo de la velocidad de 0.6 m/s aproximadamente asociada a los periodos de retorno de 10

años a 100 años en el Mapa 16, manteniéndose dentro del régimen normal de velocidades de un río, es decir, no son velocidades bajas ni altas teniendo en cuenta las velocidades promedio de otros ríos como lo son el Magdalena y el río Bogotá, y la clasificación del IDEAM de velocidades máximas en crecidas en ríos grandes, las cuales oscilan entre 6 m/s a 8 m/s. En la intersección del arroyo Bruno y el río Ranchería muestra velocidades muy bajas, casi nulas lo que se traduce en un probable estancamiento por inundación, además, esta zona en particular, no posee cambios altitudinales, esto es, no hay variación en las elevaciones.[56][57]

### 9.3.3.3. Comparación 4 escenarios Velocidad

**Mapa 17.** Comparación de los 4 escenarios de velocidad antes y después del desvío.



Fuente. Autor

Predominan para los 4 escenarios velocidades promedio que no sobrepasan los 1.5 m/s, y que oscilan entre 0.4 m/s a 1m/s considerándose dentro del régimen normal de un río con pendientes suaves en la intersección del arroyo Bruno y el río Ranchería.

Entre los periodos de retorno para el escenario sin desvío y el escenario con desvío, se refleja un incremento significativo en las velocidades.

Con respecto al análisis de las velocidades asociadas al periodo de retorno de 10 años, se evidenció una disminución en la velocidad de 0.1 m/s entre el escenario sin desvío con respecto al escenario con desvío, esto se puede atribuir a distintos factores tales como, cambios en la extensión del cuerpo hídrico, cambios geomorfológicos, transporte de sedimentos y variables climatológicas. Por otra parte, para el periodo de retorno de 100 años se muestra el mismo comportamiento en la velocidad en los dos escenarios evaluados.

#### 9.4. RESULTADOS GENERALES

A continuación se presenta una tabla comparativa de los valores arrojados para cada una de las variables asociadas a los periodos de retorno de 10 y 100 años con el escenario sin desvío y con el desvío.

**Tabla 9.** Comparación de los valores de los escenarios para cada una de las variables.

	Escenario sin desvío		Escenario con desvío	
	10 años	100 años	10 años	100 años
<b>Profundidad lámina de agua (m)</b>	2.5 – 5.24	5 – 6.45	2.6 – 5.3	5.8 - 11
<b>Cota de agua o cota de inundación (m.s.n.m)</b>	78.01 – 87.51	60.84 - 81.60	60.78 - 82	62.32 - 85
<b>Velocidad (m/s)</b>	0.5	1	0.4 – 0.6	1

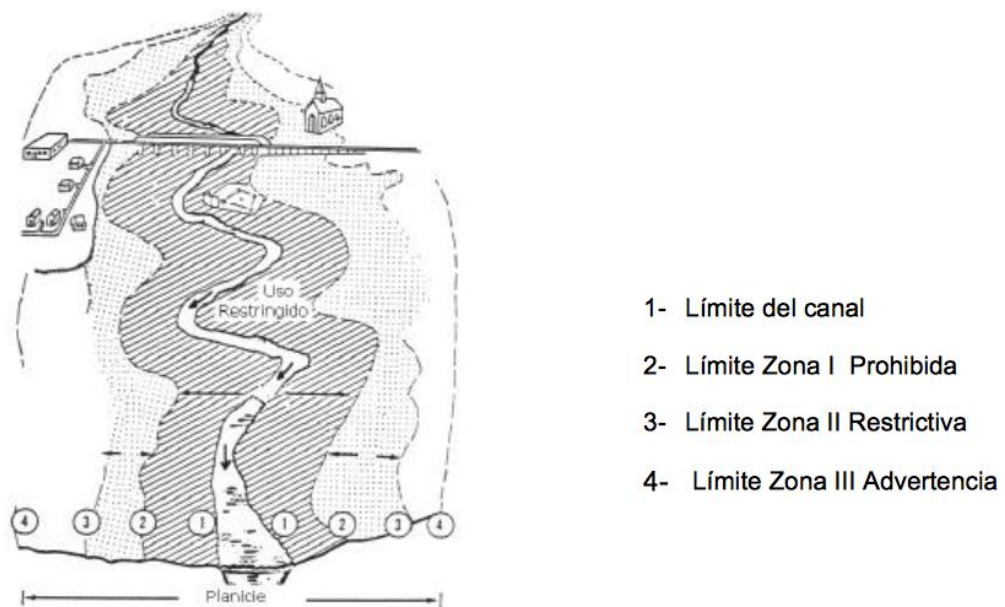
Fuente. Autor

En general se presenta una planicie de inundación con profundidad de la lámina de agua de 2,5 m a una velocidad 0,5 m/s para el escenario sin desvío asociado a un periodo de retorno de 10 años. Por otro lado se evidencia ampliación en la planicie de inundación en el periodo de retorno de 100 años sin desvío, donde se tiene una profundidad de la lámina de agua de 5 m a una velocidad de 1 m/s. Aunque sus velocidades no pasan de 1.5 m/s, se consideran los dos escenarios

sin desvíos propios de crecientes extremas ya que poseen profundidades mayores a 1.5 m, comprendiendo las características de crecientes extremas. [53][48]

Con el desvío los escenarios se comportan en el mismo patrón de ampliación de la planicie de inundación, con la diferencia que las magnitudes de las variables aumentan tanto para el periodo de retorno de 10 años como para el periodo de retorno de 100 años. Se evidencia profundidades de la lámina de agua entre 2,6 m a 5,3 m con una velocidad de 0,4 m/s para el periodo de retorno de 10 años. El escenario con periodo de retorno de 100 años, muestra profundidades de la lámina de agua de 5,8 m a 11 m con velocidades de 1 m/s. Al igual que los escenarios sin desvío, se clasifica dentro de las crecientes extremas teniendo en cuenta que son profundidades mayores a 1.5 m. Con esto se debe tener en cuenta que la profundidad que alcanza el flujo sobre la planicie restringe el uso del suelo tal como lo muestra la Figura 8. [53][48]

**Figura 8.** Restricciones en la planicie según la frecuencia de la inundación.



**Fuente.** [53][58]

Por otro lado se puede inferir que se presentan inundaciones lentas,[59] ya que ocurren en zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos. Lo anterior analizado dentro del área del polígono que representa el área de explotación actual y futura área de explotación.

La velocidad de un cauce, depende de la pendiente, y de la profundidad del mismo. Normalmente un cauce con caudal medio posee una velocidad igual o

inferior a 1 m/s, para pendientes suaves. Por el contrario, pendientes pronunciadas suelen estar en un rango de 1,5 m/s a 2m/s. De esta forma se analiza que los resultados que arroja el programa son lógicos respecto a la zona de estudio, (es decir velocidad acorde al cauce y terreno) la cual posee pendientes bajas.

Para el desarrollo del proyecto fue necesario obtener un DEM de 12 pixeles que se ajustara al modelo, debido a que no se encontró el DEM óptimo que se ajustara al mismo, fue necesario realizar ciertos tratamientos los cuales fueron unir varios DEM encontrados y reducir el tamaño de las celdas, generando así un mayor rango de error en los resultados del modelo, estos cambios son factores altamente condicionantes a la hora de ejecutar el modelo, además cualquier modelación hidrológica e hidrodinámica es altamente sensible a la pérdida de información de cada celda en un DEM, es decir el modelo es sensible a la calidad del DEM, por tal motivo específicamente, se presentan escalas atípicas, que inciden en las variables de profundidad de la lámina de agua, cota de agua y velocidad. Por otro lado, se debe tener en cuenta que en el DEM, en áreas montañosas el relieve provoca distorsiones de magnitud variable en función de la geometría de observación del satélite que posee la información y de la rugosidad del terreno, lo que causa poca precisión en la modelación, ya que el modelo toma referentes del DEM.

El inconveniente anterior radica en las direcciones del flujo haciendo que den altas profundidades y velocidades mayores de las habituales, lo que concluye que entre más profundo relacione el modelo que es el terreno más rápido hará el flujo porque tiene mayor espacio verticalmente más no en extensión, es decir al cambio direcciones de flujo, varía la profundidad y si varía la profundidad cambia la velocidad, influyendo también en las cotas de agua debido a la falta de información del DEM, falta de información de las elevaciones del terreno.

Por otro lado, es importante resaltar que no se recolectó información primaria, ya que no se realizó los respectivos aforos, levantamientos topográficos y batimétricos, generando así una mayor incertidumbre o margen de error a la hora de ejecutar el modelo, en otras palabras, el modelo no se encuentra calibrado.

El no contar con las batimetrías afecta directamente con la precisión de los resultados, ya que, no se determina cómo se estructura el fondo, es decir no se conocen las secciones transversales actuales del río. Los levantamientos batimétricos permiten estimar los volúmenes almacenados en los cuerpos de agua y conocer la dinámica de los lechos de ríos identificando zonas de socavación y áreas de depósito, además los levantamientos batimétricos son insumo indispensable para aplicar cualquier software de modelación lo cual

permite evaluar el tránsito de crecientes con fines de pronóstico hidrológico e hidrodinámico, por tanto al no tener las batimetrías, hay variación en la dirección del flujo en el modelo, lo que conlleva a generar cambios en las profundidades y velocidades, debido a la falta de esta información. [60][61]

## 10. LIMITACIONES

- El modelo no está calibrado y para su calibración es indispensable realizar levantamiento topográfico y batimétrico para definir las elevaciones actuales sobre el terreno, las profundidades del río y extensiones. Por otro lado realizar aforos para variables tales como caudales, velocidades y número de manning en condiciones actuales del terreno.
- Inicialmente se empleó Hec GEO RAS y Hec RAS, pero debido a sus resultados, las condiciones del área de estudio y la información, se optó por implementar un modelo bidimensional IBER®[16]. Las condiciones del área que hicieron que no funcionara bien son: El cambio de las profundidades como secciones transversales para condiciones iniciales y con el desvío generó por medio de los DEM errores. Además fue complicado la recopilación de los DEM de la región de resolución 12.5 por internet por tanto fue necesario cambiar los pixeles de 30 de los DEM a 12.5 mediante ArcGIS®[29], aquí se generó pérdida de la información y errores en el momento de usar Hec GEO RAS y Hec RAS.
- Por otro lado, el nivel y costo computacional son altos, por lo cual toma más tiempo de ejecución del modelo y los gráficos pueden arrojar errores.

## 11. CONCLUSIONES

- El estudio realizado permite conocer el comportamiento de las aguas superficiales de la intersección entre el río Ranchería y el arroyo Bruno, de las variables lámina de agua, cota de agua y velocidad del cauce, dando un indicio de las planicies de inundación que se pueden presentar a futuro, por tanto, sirve para tomar acciones preventivas ante la amenaza de inundación.
- Se realizó la modelación hidrodinámica del río en donde se presentó un aumento en la lámina de agua a través de los años, evidenciando en los mapas del modelo, desbordamientos en la intersección del río Ranchería y el arroyo Bruno, justo donde se ubica la mina de carbón y zona de expansión de explotación.
- Se evidenció por medio de los escenarios de planicie de inundación que tanto en la zona de explotación de carbón como en la zona próxima a expansión, hay amenaza de inundación, esto permite tener un control sobre la disposición del territorio con obras de prevención y mitigación.
- El modelo posee un sesgo debido a la no calibración, por tanto hay un margen de error que no se pudo determinar.
- El arroyo Bruno se considera un cuerpo de agua intermitente, esto por la representación gráfica arrojada por la modelación, donde a través del tiempo evaluado en los periodos de retorno no se representa en el mapa de profundidad de agua del cauce ni en la cota de agua del cauce.
- Al observar los periodos de retorno, y analizar sus magnitudes, se evidencian probables desbordamientos, es decir el cauce no es capaz de soportar los volúmenes asociados a un periodo de retorno de 10 años y 100 años tanto en con las condiciones iniciales como con el desvío.

## 12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar estudios técnicos referentes a modelaciones hidrodinámicas e hidrológicas en estudios de impactos ambientales para lograr un criterio más objetivo.
- Se recomienda ir a campo con el fin de calibrar el modelo y tener precisión en los resultados. (Levantamiento topográfico, batimétrico y aforo)
- Se recomienda diseñar y modificar las secciones transversales del tramo a desviar con el fin de aumentar la capacidad de almacenamiento del volumen de agua, de forma que se encuentre las secciones transversales óptimas para evitar el desbordamiento.
- Se recomienda construir muros de contención o de encauzamiento como acción preventiva.
- Se recomienda para la ejecución del modelo usar un DEM óptimo que se ajuste al modelo.

### 13. REFERENCIAS

- [1] Esri, "Tipos de mapas de ArcGIS," *ArcGIS Resources*, 2010. [Online]. Available: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000017000000.htm>. [Accessed: 12-Feb-2018].
- [2] IDEAM, "Cotas de inundación," *Agua. Modelación Hidrológica*, 06-Apr-2016. .
- [3] B. Ramakrishna, *Estrategia de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Conceptos y Experiencias*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1997.
- [4] Diccionario de la lengua española, *Real Academia Española y Asociación de Academias de la Lengua Española*, 23.ª edici. Madrid, 2001.
- [5] J. Ntjajal, B. L. Lamptey, I. B. Mahamadou, and B. K. Nyarko, "Flood disaster risk mapping in the Lower Mono River Basin in Togo, West Africa," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 23, no. March, pp. 93–103, 2017.
- [6] G. Bussi *et al.*, "Modelación hidráulica y análisis del riesgo de inundación según las líneas guía de la Directiva Marco del Agua . El caso de la Marina Alta y la Marina Baja ( Alicante )," no. 1. Valencia, 2007.
- [7] R. Gil, "El Agua del suelo," Buenos, 2014.
- [8] IDEAM, "Modelación Hidrológica," *IDEAM*, 2014. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>. [Accessed: 19-Sep-2017].
- [9] Á. M. Felicísimo, "El modelo digital de elevaciones," Madrid, 2012.
- [10] Esri, "Modelos digitales de elevación," *Learn ArcGIS*. [Online]. Available: <https://learn.arcgis.com/es/related-concepts/digital-elevation-models.htm>. [Accessed: 19-Sep-2017].
- [11] G. Monsalve Sáenz, *Hidrología en la Ingeniería*, Primera ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
- [12] Organización de los Estados Americanos, "Capítulo 8 . Definición de llanura de inundación y evaluación del peligro de inundaciones," *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*, 1993. [Online]. Available: <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/ch13.htm>. [Accessed: 13-Jan-2018].
- [13] Esri, "Qué es un shapefile," *ArcGIS for Desktop - ArcMap*. [Online]. Available: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>. [Accessed: 19-Sep-2017].
- [14] E. Bladé *et al.*, "Iber: Herramienta de simulación numérica de flujo en ríos," *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–10, 2014.
- [15] U. de Piura, "Modelación Bidimensional," Universidad de Piura Perú, 2016.
- [16] Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA

(Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), “Los mapas de modelación en este trabajo fueron creados usando Iber® software. Para más información visite Iberaula.es.” .

- [17] Corpogujira, “Plan de Ordenamiento de la CUENCA DEL RIO RANCHERIA,” vol. Tomo 2, no. Diagnóstico, p. 606, 2011.
- [18] Corporación Colectivo de Abogados José Alvear Restrepo, “La desviación del Arroyo Bruno : entre el desarrollo minero y la sequía,” Bogotá, 2015.
- [19] J. L. Hernández, J. Pisanty, V. M. Sánchez, M. A. Carreón, and M. Roladán, “Impacto ambiental de proyectos carreteros en escurrimientos del agua superficial,” México, 2000.
- [20] E. Wolanski and S. Spagnol, “Environmental degradation by mud in tropical estuaries,” *Reg Env. Chang.*, no. January, p. 1(3-4): 152-162., 2000.
- [21] C. Vörösmarty and D. Sahagian, “Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle,” *Bioscience*, vol. 50, no. 9, pp. 753–765, 2000.
- [22] Censat Agua Viva Organización, “Desviación del Arroyo Bruno un proyecto destructivo para el territorio guajiro,” La Guajira, 2014.
- [23] J. E. Salas, “EL CERREJÓN Y SUS EFECTOS: UNA PERSPECTIVA SOCIOECONÓMICA Y AMBIENTAL,” no. 20. Bogotá, p. 17, 2004.
- [24] C. A. Ramírez, R. A. Bocanegra, and M. C. Sandoval, “Modelación morfológica del río Cauca en el tramo La Balsa Juanchito,” Universidad del Valle, 2006.
- [25] M. Lorente, A. Díez, and L. Laín, “APLICACIONES DE LOS SIG ALANÁLISIS Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES: AVANCES RECIENTES,” *Barcelonactiva*, vol. 37, no. Actuació i resposta davant de situacions de crisi, pp. 29–51, 2013.
- [26] M. Garcia, P. A. Basile, G. A. Riccardi, and H. Stenta, “MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE SISTEMAS CAUCE-PLANICIE DE INUNDACIÓN EN GRANDES RÍOS ALUVIALES DE LLANURA,” Córdoba, Argentina, 2007.
- [27] L. Teixeira, R. López, C. Chreties, and G. López, “ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL DESVÍO DEL ARROYO CORRALES, RIVERA, URUGUAY,” Salta, 2009.
- [28] M. Villón, “HidroEsta, software para cálculos hidrológicos.” Tecnología en marcha, 2005.
- [29] Esri, “Los mapas de este trabajo fueron creados usando ArcGIS® software por Esri. ArcGIS® y ArcMap™ Licencia, Son propiedad intelectual de Esri y son usados en adelante sobre la licencia. Copyright © Esri. Todos los derechos reservados. Para más información visit.” .
- [30] E. Camacho, “Relleno de registro faltante en estaciones climatológicas.” pp. 1–6, 2013.
- [31] Consellería de Sanidade y el Servicio Gallego de Salud, “Epidat 4: Distribuciones de probabilidad,” *Xunta de Galicia*, 2014. [Online]. Available: [https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda\\_Epidat\\_4\\_Distribuciones\\_de\\_probabilida](https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda_Epidat_4_Distribuciones_de_probabilida)

- d\_Octubre2014.pdf. [Accessed: 20-Dec-2017].
- [32] A. Ibañez Rosales, “Análisis estadístico de valores extremos y aplicaciones,” Universidad de Granada, 2011.
- [33] I. Arroyo, L. C. B. M, R. Nat, H. Llinás, and F. L. Muñoz, “Distribuciones Poisson y Gamma : Una Discreta y Continua Relación Poisson and Gamma Distributions : A Discrete and Continuous Relationship,” vol. 12, no. 1, pp. 99–107, 2014.
- [34] F. Henríquez, “Distribución gamma.” pp. 5–10, 2015.
- [35] P. Acosta and L. Sierra, “Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste IDF construction methods ’ evaluation , from probability distributions and adjustment ’ s parameters,” *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, vol. 22, no. 35, Bogotá, pp. 25–33, Jul-2013.
- [36] M. Villón Béjar, “HidroEsta, software para cálculos hidrológicos y estadísticos aplicados a la Hidrología,” *Revista digital Matemática*, vol. 12, Costa Rica, Mar-2012.
- [37] I. Miller, *Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund*, 5ta ed. Naucalpan de Juárez: Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company, 1997.
- [38] P. De Córdoba *et al.*, “Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctlamochita, Provincia de Córdoba.,” vol. 3, no. 2, pp. 95–101, 2016.
- [39] E. J. Alfaro and D. Hern, “Uso de un modelo de aguas someras para analizar la influencia del Atlántico Tropical Norte y del Pacífico Ecuatorial del Este sobre la circulación atmosférica en los mares Intra-Americanos,” *Revista de Climatología*, vol. 7, San José, Costa Rica, pp. 15–26, 2007.
- [40] R. Benayas, “Curso de Iber. Modelización hidráulica bidimensional con Iber y ArcGis.” Servicios de Consultorias GIS y Teledetección, pp. 2–3, 2016.
- [41] J. Polanía, C. Orozco, and F. Ángel, “Delta del río ranchería (la guajira, colombia): caudal, salinidad y transporte de sólidos y su posible influencia sobre composición y estructura de los manglares,” *Actual Biol*, vol. 28, no. 84, Medellín, pp. 27–37, Jun-2006.
- [42] Autoridad Nacional De Licencias Ambientales, “Resolución 1386,” 2014. [Online]. Available: [http://www.anla.gov.co/sites/default/files/14885\\_res\\_1386\\_181114.pdf](http://www.anla.gov.co/sites/default/files/14885_res_1386_181114.pdf). [Accessed: 29-Jun-2017].
- [43] Cerrejón, “Cerrejón: Minería sostenible,” *Nuestra empresa*, 2016. [Online]. Available: <http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa.aspx>. [Accessed: 15-Jun-2017].
- [44] Y. P. Lubo Vélez, “LA RESPONSABILIDAD SOCIAL DEL CERREJÓN CON LA COMUNIDAD GUAJIRA,” Universidad Militar Nueva Granada, 2013.
- [45] Presidente de la República, “Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 Nivel Nacional,” *Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.*, 2015. [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=62511>. [Accessed: 19-Sep-2017].
- [46] United States Geological Survey Water-Supply, “Guide for Selecting Manning ’ s Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood

- Plains,” Denver, 1989.
- [47] V. Ponce, “Sobre periodo de retorno a ser usado para diseño.” pp. 2–3, 2009.
- [48] A. C. Árbelaez, L. Posada, and M. V. Velez, “XV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA - VULNERABILIDAD Y USO DE LA PLANICIE DE INUNDACIÓN,” Medellín, 2002.
- [49] US Army Corps of Engineering, “Flood Hydrograph and Peak Flow Frequency Analysis,” Davis, CA, 2009.
- [50] M. Martínez, D. Fernández, and R. Salas, “HIDROLOGÍA APLICADA A LAS PEQUEÑAS OBRAS HIDRÁULICAS,” México, 2012.
- [51] F. Ardila and Y. Quintero, “APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA INTERPRETACIÓN DE ZONAS INUNDABLES. CASO DE ESTUDIO: RÍO SOAPAGA, SECTOR PAZ DE RÍO, BOYACÁ,” Universidad Militar Nueva Granada, 2013.
- [52] G. Diaz, D. Morh-Bell, and J. D. Lencinas, “Modelos digitales de elevación de alta resolución - Extracción con datos del satélite ALOS,” 2010.
- [53] M. Jaeggi and B. Zarn, “A new policy designing flood protection schemes as a consequence of the 1987 floods in the Swiss Alps,” in *Proceedings of the International Conference on River Flood Hydraulics*, 1990.
- [54] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, “Punto Geodesico, Escala 1:100.000, Cartografía Base - IGAC,” *Datos Abiertos IGAC*, 2017. [Online]. Available: [http://datosabiertos-geoportal-igac.opendata.arcgis.com/datasets/9be5fea8b1bc4bfc83cbe50ae64c806\\_0/data?geometry=-95.273%2C-43.073%2C264.727%2C86.402&orderBy=PK\\_CUE&page=12](http://datosabiertos-geoportal-igac.opendata.arcgis.com/datasets/9be5fea8b1bc4bfc83cbe50ae64c806_0/data?geometry=-95.273%2C-43.073%2C264.727%2C86.402&orderBy=PK_CUE&page=12). [Accessed: 10-Mar-2018].
- [55] Fundación Nueva Cultura, “Guía Nueva Cultura del Agua - Una guía de referencia y consulta sobre la gestión y conservación de los recursos hídricos.” Nueva Cultura del Agua, Zaragoza, 2010.
- [56] E. Torres, G. Munarríz, and D. Villazón, “DETERMINACIÓN DE CAUDAL, TIEMPOS DE TRÁNSITO, VELOCIDAD Y COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN EL RÍO BOGOTÁ, FRÍO Y MAGDALENA UTILIZANDO TÉCNICAS NUCLEARES,” Univeridad Libre, 2006.
- [57] IDEAM, “Capítulo 11. Medición del caudal,” Bogotá, 2010.
- [58] White G. et al., “Changes in urban occupancy of floodplains in the United States,” The University of Chicago, 1964.
- [59] IDEAM, “Amenazas inundación,” *AGUA*, 2014. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>. [Accessed: 13-Jan-2018].
- [60] V. Aristizabal, “Modelos hidrológicos e hidráulicos de zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de La Dorada Caldas,” Manizales, 2013.
- [61] IDEAM, “Batimetrías,” *Modelación hidrológica*, 2010. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/batimetrias>. [Accessed: 10-Mar-2018].