

**DESARROLLO DE LA CURVA DE RIESGO POR INUNDACIÓN DE LA
CUENCA DEL RÍO MAGDALENA EN EL TRAMO PUERTO SALGAR – LA
DORADA**

**OMAR ANDRÉS GUTIÉRREZ MARTÍNEZ
DANIELA SÁNCHEZ AMAYA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2017**

**DESARROLLO DE LA CURVA DE RIESGO POR INUNDACIÓN DE LA
CUENCA DEL RÍO MAGDALENA EN EL TRAMO PUERTO SALGAR – LA
DORADA**

**OMAR ANDRÉS GUTIÉRREZ MARTÍNEZ
DANIELA SÁNCHEZ AMAYA**

TESIS DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

**DIRECTOR
MIGUEL ÁNGEL CAÑÓN RAMOS
CODIRECTOR
DARWIN MENA RENTERIA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2017**

GLOSARIO

A

Amenaza

Es un fenómeno de origen natural o antrópico que pueda ocasionar muerte, impactos a la salud, pérdidas económicas y daños ambientales, 5

B

Boundary conditions

Son aquellas que definen el comportamiento de un modelo en sus límites ya sean superior o inferior, 6

C

Cuenca

Es el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia, nieve o deshielo escurre y transita o drena a través de una red de corriente que fluye hacia una corriente que fluye hacia una corriente principal, y por ésta hacia un punto de común de salida, 4

Curva de Riesgo

Es la representación de la relación entre la probabilidad de ocurrencia de una amenaza y el número de víctimas que se produce en una determinada área de estudio, 5

M

Modelación hidráulica

Es la reproducción a escala reducida de fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua, su base es la identificación de las magnitudes predominantes en el fenómeno analizado, 5

P

Periodo de retorno

Se define como el tiempo de recurrencia de un evento en un lapso de tiempo, 5

R

Riesgo

Es la probabilidad de que un evento natural o antrópico ocurra en un tiempo y modo específico a partir de la combinación de la amenaza y vulnerabilidad, 4

S

Shapefiles

Es un formato de almacenamiento de datos vectoriales de Esri para almacenar la ubicación, la forma y los atributos de las entidades geográficas, 6

V

Vulnerabilidad

son las características y circunstancias de una comunidad que esta susceptible a los efectos de la amenaza, 5

Nota de aceptación:

_____ Firma del director

_____ Firma del jurado

Bogotá D.C. Febrero de 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a Dios por guiarnos en cada paso de nuestras vidas, de nuestra carrera y enriquecernos cada día más.

A nuestros padres por la confianza y el esfuerzo que realizaron para que lográramos ser profesionales, por sus valores inculcados para seguir nuestro diario vivir de una manera íntegra.

A nuestros directores de tesis los ingenieros Miguel Ángel Cañón y Darwin Mena Rentería por tenernos paciencia y apoyarnos en cada uno de los pasos de este proyecto.

A la universidad Santo tomas por prestarnos las instalaciones y el apoyo para realizar el proyecto.

Al instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) por la información brindada para poder ejecutar este proyecto.

Al centro de investigación del río magdalena (CIRMAG) que nos apoyó con la realización de este proyecto con sus conocimientos.

A las Alcaldías de la Dorada Caldas y de Puerto Salgar por brindarnos la información necesaria y permisos para realizar nuestro proyecto.

Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa. (Mahatma) Gandhi

Contenido

Pág.

RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	15
3.1 GENERAL	15
3.2 ESPECÍFICOS.....	15
4. PERTINENCIA SOCIAL	16
5. MARCO TEÓRICO	17
5.1 Generalidades de los municipios de puerto Salgar – La Dorada	17
5.1.1 Municipio de Puerto Salgar.....	17
5.1.2 Municipio de La Dorada	17
5.2 Inundación por desbordamiento	18
5.3 Inundaciones súbitas.....	18
5.4 Curva de calibración	19
5.5 HEC-RAS.....	20
5.5.1 Ecuaciones hidráulicas implementadas en Hec- Ras	21
5.6 Hec- Georas.....	23
6. MARCO LEGAL.....	24
7. METODOLOGÍA.....	25
7.1 Etapa 1: Recopilación de información	26
7.1.1 Selección de estaciones hidrometeorológicas	26
7.1.2 Procesamiento de la Información	26
7.1.3 Ajuste de Función de densidad de probabilidad	29
7.2 Etapa 2: Desarrollo de modelos.....	30
7.2.1 Construcción curva de calibración.....	30
7.2.2 Construcción del modelo.....	30

7.2.3	Calibración del modelo	31
7.2.4	Mapas de inundación.....	32
7.3	Etapa 3: Análisis de resultados.....	32
7.3.1	Determinación de la vulnerabilidad	32
7.3.2	Elaboración Curva de riesgo	34
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	35
8.1	Etapa 1. Recopilación de información	35
8.1.1	Procesamiento de la información.	36
8.1.2	Ajuste a una función de densidad de probabilidad.	36
8.2	Etapa 2. Desarrollo de modelos.....	37
8.2.1	Construcción curva de calibración de caudales.....	37
8.2.2	Construcción del modelo.....	39
8.2.3	Calibración del modelo.....	41
8.2.4	Mapas de inundación.....	41
8.3	Etapa 3. Determinación curva de riesgo	44
9.	CONCLUSIONES.....	47
10.	RECOMENDACIONES	48
	Bibliografía	49

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Curva de calibración por medio del método de logaritmos.....	20
Ilustración 2.	Curva de calibración obtenida por medio del método de logaritmos.	20
Ilustración 3.	Resultados de la modelación en HEC-RAS.....	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Coeficientes de Manning para cauces naturales.....	22
Tabla 2.	Construcción de curva de calibración de caudales.....	37
Tabla 3.	Niveles observados y niveles simulados.	41
Tabla 4.	Valores máximos anuales de caudal y nivel para cada Tr.....	39
Tabla 5.	Ajuste del número de Manning.	30
Tabla 6.	Ajuste de la pendiente para cada sección transversal.....	31
Tabla 7.	Datos de Ingreso de flujo en Hec-RAS	31
Tabla 8.	Datos de Ingreso de condiciones de Frontera en Hec-Ras	31
Tabla 9.	Valores de vulnerabilidad económica y estratos socioeconómicos.....	32

Tabla 10. Valores de vulnerabilidad física y calidad constructiva.	33
Tabla 11. Perdidas económicas para cada periodo de retorno en La Dorada.	34
Tabla 12. Perdidas económicas para cada periodo de retorno en Puerto Salgar.	34

LISTA DE GRAFICOS

<i>Gráfico 1.</i> Ajuste de los datos a la distribución Gumbel.	37
<i>Gráfico 2.</i> Curva de calibración de caudales.	39
<i>Gráfico 3.</i> Curva de riesgo para el municipio de La Dorada.	45
<i>Gráfico 4.</i> Curva de riesgo para el municipio de La Dorada.	45

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Delimitación del DEM para el área de estudio.	26
Mapa 2. Digitalización del río Magdalena.	27
Mapa 3. Elaboración del TIN a partir de las secciones transversales y las curvas de nivel.	28
Mapa 4. Demarcación del río, los bancos del río y zonas inundables.	29
Mapa 5. Ubicación de la estación de Puerto Salgar.	35
Mapa 6. Elaboración de secciones transversales y zonas de inundación.	36
Mapa 7. Importación de la geometría del tramo de estudio.	40
Mapa 8. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 2 años.	42
Mapa 9. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 25 años.	43
Mapa 10. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 100 años.	44

RESUMEN

Uno de los principales problemas que presenta la cuenca del Río Magdalena es, el crecimiento poblacional en las riberas y laderas del río, lo cual a lo largo de los siglos ha alterado el entorno con actividades extractivas y productivas, afectando gran parte de los recursos naturales como el suelo; generando problemas de erosión y transporte de sedimentos.

con esta problemática los municipios de Puerto Salgar y La Dorada están en constante amenaza frente a inundaciones causadas por diversos elementos climáticos como a los patrones bimodales de precipitación que suceden a lo largo del año, humedad, vientos y los periodos de fenómenos de La Niña que aumenta la intensidad de este evento natural.

Por lo anterior este proyecto busca construir una curva de riesgo por inundación de los cascos urbanos de puerto salgar- la dorada con el propósito de evaluar el riesgo económico de dicho evento en los cascos urbanos, por medio de sistemas de información geográfica utilizando ArcGis, datos de las estaciones hidrológicas y meteorológicas de la zona; que ayuden a definir las condiciones de frontera para el modelo hidráulico en el tramo de estudio mediante los software Hec-ras y Hec-georas en distintos periodos de retorno de 2,25 y 100 años generando las zonas de inundación, La curva de riesgo representa el riesgo económico para estos municipios si se presentara dicho evento, la cual se realizó por medio de Excel y los datos socioeconómicos de la zona de estudio.

Los resultados obtenidos son que a partir de un periodo de 25 años se verán afectadas las estructuras físicas de los dos municipios, generando pérdidas económicas a los municipios de Puerto Salgar – La Dorada. Con los resultados obtenidos en este proyecto son una herramienta fundamental para mejorar el plan de gestión de riesgo para estos municipios.

Palabras Claves: Inundación, Amenaza, Vulnerabilidad, Curva de riesgo, Río Magdalena.

ABSTRACT

One of the main problems presented by the Magdalena River basin is the population growth on the banks and slopes of the river, which over the centuries has altered the environment with extractive and productive activities, affecting much of natural resources like the ground; generating problems of erosion and sediment transport.

With this problem the municipalities of Puerto Salgar and La Dorada are in constant threat against floods caused by various climatic elements such as the bimodal rainfall patterns that occur throughout the year, wet, winds and periods of La Niña phenomenon that increases the intensity of this natural event.

Therefore, this project seeks to construct a flood risk curve for the urban areas of Puerto Salgar la Dorada with the purpose of evaluating the economic risk of this event in urban areas, through geographic information systems using ArcGIS, data of the hydrological and meteorological stations of the area; that help define boundary conditions for the hydraulic model in the study section using Hec-ras and Hec-georas software in different return periods of 2, 25 and 100 years generating the flood zones. The risk curve represents the economic risk for these municipalities if present this event, which was done through Excel and the socioeconomic data of the study area.

The results obtained are that from a period of 25 years the physical structures of the two municipalities will be affected, generating economic losses to the municipalities of Puerto Salgar - La Dorada. With the results obtained in this project, they are a fundamental tool to improve the risk management plan for these municipalities.

Keywords: Flood, Threat, Vulnerability, Risk curve, Magdalena River.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes, que han coexistido con el hombre desde épocas antiguas, generando condiciones adecuadas para el desarrollo de civilizaciones enriqueciendo los suelos agrícolas con nutrientes y la movilidad de personas o de productos por medio de la navegación. Sin embargo, este fenómeno en los últimos años se ha incrementado por lluvias persistentes, las cuales generan un aumento progresivo del nivel de las aguas de los cauces, generando desbordamientos y un gran riesgo a las poblaciones ubicadas en las riberas de los cauces

Como se evidencio en el año 2010-2011 donde el fenómeno de la niña dejo más de 200 personas muertas, 337.513 familias afectadas, 2049 viviendas destruidas y 275.569 viviendas averiadas en 654 municipios de Colombia entre ellos los municipios de Puerto Salgar- La Dorada, Debido a esto el decreto 4674 del 2010 dispone que las entidades deben tomar medidas de prevención e identificar la vulnerabilidad de las poblaciones en riesgo ante este evento.

Por lo anterior el presente proyecto tiene como fin generar la curva de riesgo para los municipios de Puerto Salgar-La Dorada los cuales se encuentran ubicados en las cercanías del rio Magdalena, mediante la aplicación del software Hec-Ras y la extensión Hec-georas, que nos proporcionan las zonas inundables (amenaza) en un periodo de retorno (2,25 y 100) años a partir de caudales y niveles provenientes de estaciones hidrometereológicas las cuales se solicitaron al IDEAM (instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y a las alcaldías de los municipios de Puerto Salgar y La Dorada.

De tal forma la metodología explicada en el documento permite generar las curvas de riesgo para cada municipio, volviéndose en una herramienta de apoyo para generar estrategias de prevención ante futuros eventos en estos municipios

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es un país que cuenta con características topográficas e hidrometeorológicas particulares, las cuales la hace susceptible a sufrir inundaciones más que todo por sus ríos principales como es el río Magdalena el cual tiene un caudal aproximado de $7.200 \text{ m}^3/\text{s}$, generando amenaza a los pueblos ribereños al río, como es el caso de los municipios de Puerto Salgar – La Dorada los cuales están ubicados a lo largo el cauce aproximadamente 13 km , volviéndolos más susceptibles a el incremento de inundaciones por las modificaciones antrópicas.

Este fenómeno se ha registrado a lo largo del tiempo, principalmente en el periodo del 2010-2011 en los meses de abril, mayo, junio y septiembre donde el nivel del agua incremento a 7,5 metros considerada como una de las más fuertes olas invernales. [1] También cabe resaltar que en este año (2017) en los meses de mayo y junio se presentó alerta roja en estos municipios por las fuertes lluvias, lo cual ha incrementado el nivel del rio a 5,96 metros más de lo normal dejando 217 familias damnificadas en la dorada y 46 en el municipio de puerto salgar.

Otro de los grandes problemas es la morfología del cauce, ya que se caracteriza por tener una forma rectilínea con distintos anchos que varían entre los 250 metros hasta los 500 metros, en el sector sur del cauce, el rio forma un meandro que envuelve y limita con el sur del municipio de La Dorada, es por allí donde el rio ocasiona inundaciones. También cabe destacar que el Rio Magdalena tiene un comportamiento de carácter estacional en cuanto a crecidas por alta pluviosidad, lo cual hace que el agua reboce, y lleve al desbordamiento, depósito de materiales y formación de islas temporales. [2]

2. JUSTIFICACIÓN

El río Magdalena constituye el eje principal de desarrollo en Colombia desde el ámbito ambiental, social, cultural, demográfico, histórico, pero sobre todo por su importancia hidrográfica. Ya que cuenta con una longitud de aproximadamente 1600 km, el cual fluye de sur a norte entre las cordilleras central y oriental de los Andes.

Las inundaciones son eventos naturales que se producen por corrientes de agua como resultado de lluvias intensas o continuas que, al sobrepasar la capacidad de absorción del terreno y los cauces, inundan grandes extensiones de terreno, también son uno de los desastres naturales más comunes del planeta y casi todos los países, regiones o zonas han experimentado en alguna ocasión una inundación [3]

En 2011 se presentó una de las más fuertes olas invernales que se ha registrado en Colombia. Los volúmenes de agua que cayeron superaron cualquier pronóstico y causaron grandes desastres en casi todo el territorio nacional, en el tramo de Puerto Salgar- La Dorada se vivió una inundación sin precedentes que produjo grandes afectaciones. [1]

La gestión del riesgo aparece como una herramienta que ayuda a poner al descubierto las fortalezas y debilidades del territorio y sus habitantes, por esta razón, en el sector Puerto Salgar- La Dorada, se requiere construir la curva de riesgo por inundación como ejercicio piloto a ser replicado en los demás municipios de Colombia.

Es por esto, que el desarrollo del presente trabajo es un insumo que contribuirá al cumplimiento de la legislación nacional vigente, sino también contribuirá como un instrumento de apoyo a instituciones de planeación urbana y rural, ordenamiento del territorio y gestión del riesgo; acompañado de la adecuada gobernanza de los gobiernos locales y departamentales, se tendrá como principal resultado una amplia gama de información sobre las zonas en las cuales existe una mayor probabilidad de inundación y los efectos negativos que tendrá sobre su área de influencia directa, cuya información estará fundamentada en las diferentes predicciones de los distintos caudales que se pueden presentar en periodos de retornos conocidos y que serán de vital importancia para la toma de decisiones las

cuales estén encaminadas en mitigar y desaparecer la posible afectación ante un evento de inundación.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Realizar la curva de riesgo por inundación de los cascos urbanos de Puerto Salgar- La Dorada.

3.2 ESPECÍFICOS

- Analizar los datos de las estaciones hidrológicas y meteorológicas de la zona que ayuden a definir las condiciones de frontera e iniciales para los modelos hidrológico e hidráulico del tramo en estudio.
- Determinar la Vulnerabilidad física y económica en los municipios de Puerto Salgar y La Dorada con datos prediales, de estratificación socioeconómica, calidad constructiva y densidad de población de la zona urbana.
- Caracterizar la hidrodinámica de flujos altos en la zona de estudio.
- Aplicar modelos hidráulicos para la zona urbanas de los municipios Puerto Salgar- La Dorada, acorde con la información básica disponible de batimetría para establecer la amenaza por inundación para diferentes periodos de retorno y llevar a cabo la elaboración de la curva de riesgo.
- Realizar mapas de amenaza en los municipios de Puerto Salgar- La Dorada para evidenciar el alcance de la inundación para periodos de retorno de 2,25 y 100.

4. PERTINENCIA SOCIAL

El proyecto pretende prevenir a las comunidades que habitan en los cascos urbanos de los municipios de Puerto Salgar y La Dorada sobre la constante amenaza a la que están expuestos frente a un evento de inundación causada por el río Magdalena, además ser un instrumento en el cual se pueda generar conciencia sobre las consecuencias sociales, económicas y físicas que puede acarrear este tipo de eventos.

Todo esto con el fin de evidenciar lo vulnerables que pueden ser estas zonas al estar ubicadas en las riberas del cauce, no solo en el tramo de estudio (Puerto Salgar - La Dorada), sino también para los demás municipios que centraron su desarrollo económico en torno a un cuerpo de agua como sucede en toda la cuenca del río Magdalena. Igualmente se pretende que este trabajo sea un insumo para el desarrollo e implementación de planes de gestión del riesgo de los municipios de estudio.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Generalidades de los municipios de puerto Salgar – La Dorada

A continuación, se presentan las características fisiográficas del área de estudio:

5.1.1 Municipio de Puerto Salgar

El Municipio de Puerto Salgar está localizado en la parte noroccidental del departamento de Cundinamarca, en la ribera del río Magdalena, pertenece a la Provincia del Bajo Magdalena, integrada además por los Municipios de Guaduas, y Caparrapí. tiene una extensión aproximada de 521 Km², distribuidos en la parte urbana de 2,12 Km² y en la parte rural de 518,88 Km².

Cuenta con una climatología de bosque seco tropical, con un promedio anual de precipitaciones de 2.152,1 mm.; Con humedad relativa entre un 75% a 80% y evaporación de 2.000 a 2.100 horas/sol/año. La ubicación de puerto salgar dentro de la gran vertiente del río Magdalena, le permite contar con una gran oferta de recursos naturales. En proximidades de la estructura urbana Puerto Salgar - La Dorada y aguas abajo, se presentan áreas de ciénaga o humedales, así como islas demarcadas por modificaciones en el curso del río. [2]

5.1.2 Municipio de La Dorada

La Dorada se encuentra en la región del magdalena medio, Tiene una extensión de 500,8 km². Hace parte del departamento de Caldas y está ubicado a la margen izquierda del río Magdalena. Limita al oriente con Puerto Salgar en el Departamento de Cundinamarca, por el occidente con los municipios de Victoria y Samaná en el Departamento de Caldas, por el norte con San Miguel del departamento de Antioquia y por el sur con Honda del Departamento de Tolima. Cuenta con una extensión urbana de 29,30km² y una extensión rural de 471,50 km².

El río Magdalena cruza al municipio de La Dorada Caldas en su casco urbano en una longitud aproximada de 13 km en la cual la dinámica natural del río se ha visto

afectada por la actividad antrópica que hace que durante las épocas de invierno se presenten inundaciones sobre algunos sectores del municipio. [4]

Estos municipios al estar ubicados en las cercanías de río Magdalena son más susceptibles a presentar diversos eventos de inundaciones, las cuales se producen por lluvias persistentes que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce, superando la altura de las orillas ya sean naturales o artificiales ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación o zonas aledañas. Existen dos tipos de inundación las cuales son:

5.2 Inundación por desbordamiento

Se producen en los terrenos aledaños a los ríos y quebradas y son fenómenos normales de su comportamiento, que en invierno aumentan sus caudales e inundan los terrenos cercanos. Los desbordamientos se incrementan cuando el hombre altera o interviene el curso natural de los ríos. Se producen sobre terrenos planos que desaguan muy lentamente, cercanos a las riberas de los ríos donde las lluvias son frecuentes o torrenciales. Muchas de ellas son producto del comportamiento normal de los ríos, es decir de su régimen de aguas, ya que es habitual que en invierno aumente la cantidad de agua inundando los terrenos cercanos. [4]

5.3 Inundaciones súbitas

Son las crecientes en cuencas de alta pendiente, en especial en deforestadas y con escasa capa vegetal. Ocurren con gran rapidez cuando las lluvias son intensas y duraderas. Las aguas desarrollan gran velocidad y caudal produciendo que pueden originar el represamiento del agua. También se pueden producir por deficiencia de drenajes y son conocidas como de desagües y aquellos cuya superficie es plana o algo cóncava pueden sufrir inundaciones o encharcamientos como efecto directo de las lluvias. [4]

Ante esta problemática se han generado herramientas de gestión de riesgo para prevenir o mitigar diversos daños ya sean económicos o sociales, como las curvas de riesgo o también conocidas como curvas F-N (curvas de probabilidad de ocurrencia), las cuales nos representan la relación entre la probabilidad de ocurrencia de una amenaza y el número de víctimas o daños económicos, para realizar estas curvas se necesitan tener datos confiables, por esto se realizan ajustes de distribución de probabilidad los cuales nos indica toda la gama de

valores que pueden representarse como un resultado de un experimento, es decir describe la probabilidad de que un evento ocurra en el futuro, esta es generada por variables aleatorias, una de las distribuciones mas utilizadas para eventos de inundación son las de Gumbel, esta se utilizan para valores extremos independientes de variables meteorológicas y parece ajustarse bastante bien a los valores máximos de la precipitación en diferentes intervalos de tiempo y después de muchos años de uso parece también confirmar su utilidad en los problemas prácticos de ingeniería de dimensionamiento de redes de drenaje y diversas obras hidráulicas, [5].

Para tener la certeza de las curvas de riesgo sean viables, los datos utilizados deben ser calibrados, un método para esto son las curvas de calibración las cuales son la representación gráfica de la relación existente entre el nivel de agua en un determinado momento.

5.4 Curva de calibración

La curva de calibración permite transformar niveles de agua, leídos con una mira, en caudales. Las curvas se construyen a partir de los aforos hechos durante un período largo de tiempo, de tal manera que se tengan niveles bajos y altos del río [6].

La curva de calibración normalmente debería estar representada por una ecuación del tipo:

$$Q = a(h \pm b)^n$$

Dónde:

Q = Caudal en m³/s.

h = lectura de mira en la regla limnimétrica en metros.

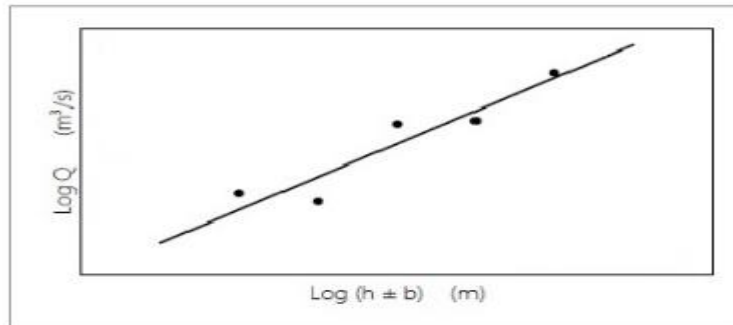
b = nivel del cero de la mira sumado o restado al nivel del río.

a y n = constantes para cada sección.

Con los datos del nivel y caudal determinados, las constantes a, b y n pueden ser calculadas por medio del método de mínimos cuadrados, dado que:

Ilustración 1. Curva de calibración por medio del método de logaritmos.

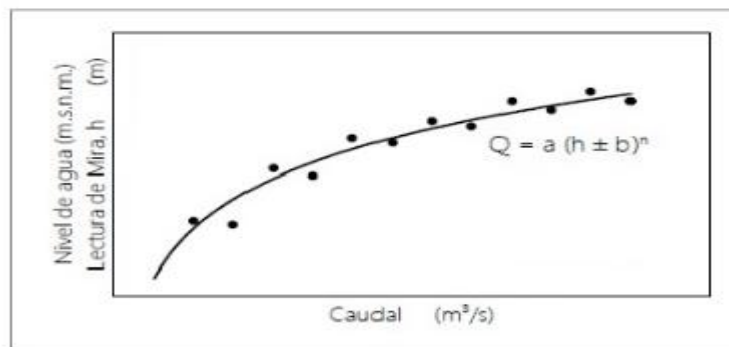
$$\log Q = \log a + n \log(h \pm b)$$



Fuente: [6]

Variando el valor de b se calculan los valores de a y n respectivos de la ecuación, luego se encuentra el respectivo coeficiente de correlación (R^2) resultante del método de mínimos cuadrados para los datos históricos de nivel h y caudal Q en relación con la ecuación hallada. Una vez obtenida la ecuación de la curva de calibración ajustada se obtiene el siguiente gráfico [6]:

Ilustración 2. Curva de calibración obtenida por medio del método de logaritmos.



Fuente: [6]

Para hacer este tipo de estudio se pueden utilizar diversos software que permiten modelar eventos de inundación uno de estos es HEC-RAS.

5.5 HEC-RAS

Es un software que realizar cálculos hidráulicos de una y dos dimensiones para una red completa de canales naturales y artificiales, se divide en varios componentes de análisis fluvial como, modelar el flujo del régimen permanente, flujo de régimen no permanente, transporte de sedimentos y análisis de calidad del

agua, con el fin de determinar el nivel del agua, lo cual es usado para realizar estudios de inundabilidad.

5.5.1 Ecuaciones hidráulicas implementadas en Hec- Ras

Ecuacion 1. Ecuación de la energía.

El cálculo de los perfiles hidráulicos se basa en el balance de la ecuación de la energía, calculando la superficie libre del agua de una sección a otra, empleando un método iterativo llamado paso estándar.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Fuente: [7]

Dónde: Z1 y Z2 carga de posición de las secciones 1 y 2 Y1 y Y2 carga de presión de las secciones 1 y 2 (también llamado tirante del agua) V1 y V2 velocidad media en las secciones transversales 1 y 2 α_1 y α_2 coeficiente de Coriolis en las secciones 1 y 2 g aceleración de la gravedad h_e pérdida de energía entre las secciones 1 y 2. [7]

Ecuacion 2. Ecuación de Manning

Permite mirar la perdida de energía por fricción

$$I = \frac{n^2 * Q^2}{A^3 * P^4}$$

Fuente: [8]

El coeficiente de Manning se selecciona según la relación de ciertas características físicas de los cauces, según la siguiente tabla. [8]

Tabla 1. Coeficientes de Manning para cauces naturales.

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A. Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida <30m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
Limpios, rectos y sin fallas ni pozos	0.025	0.030	0.033
Rectos con algunas piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
Limpios con meandros	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	0.075	0.100	0.150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación y laderas pronunciadas			
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
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
Pasto corto	0.025	0.030	0.035
Pasto alto	0.030	0.035	0.050
A.2.2 Zonas cultivadas			
Sin cultivo	0.020	0.030	0.030
Cultivos sembrados en línea en fase de madurez	0.025	0.035	0.045
Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez	0.030	0.040	0.050
A.2.3 Zonas arbustivas			
Escasos arbustos y pasto abundante	0.035	0.050	0.070
Pequeños árboles y arbustos sin follaje	0.035	0.050	0.060
Pequeños árboles y arbustos con follaje	0.040	0.060	0.080
Arbustos medianos a densos en parada invernal	0.045	0.070	0.110
Arbustos medianos a densos en fase vegetativa	0.070	0.100	0.160

Fuente: [8]

Con base a la tabla anterior se utilizó un coeficiente de Manning de 0.035, esto debido a las características que tiene el río Magdalena en el tramo de los municipios de Puerto Salgar- La Dorada.

5.6 Hec- Georas

HEC-GeoRAS es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para procesar datos geoespaciales en ArcGIS utilizando una interfaz gráfica, La interfaz permite la preparación de datos geométricos para la importación a HEC-RAS y procesa los resultados de la simulación exportados desde HEC-RAS por HEC-GeoRAS, esta extensión se utiliza para el análisis GIS para cartografía de llanuras de inundación, cálculos de daños por inundaciones, restauración de ecosistemas y respuesta y preparación de advertencia de inundaciones. [9]

6. MARCO LEGAL

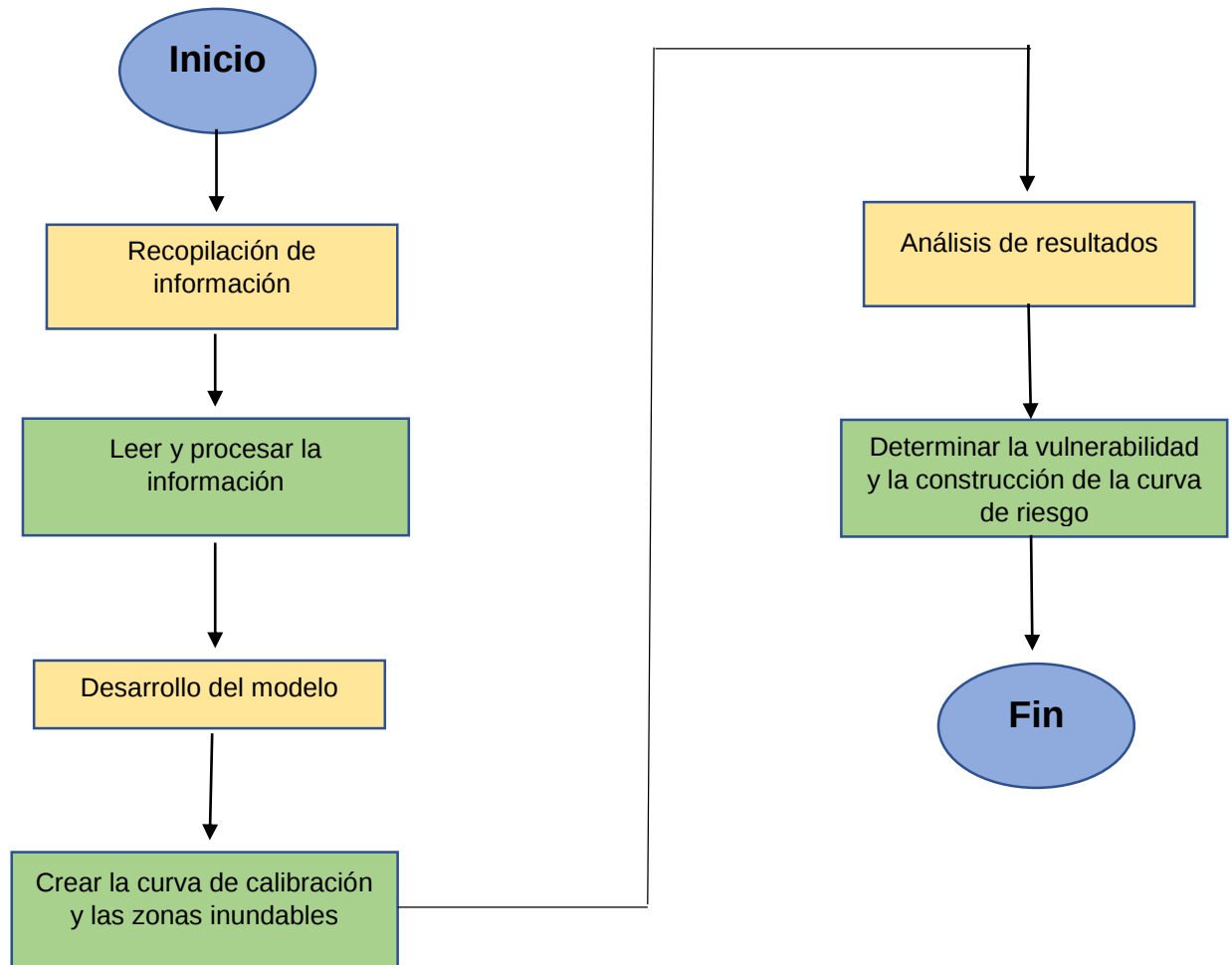
Antes estos eventos, la legislación nacional sobre la gestión del riesgo de inundaciones desde la década de los 90, tiene un papel muy importante después de la tragedia sucedida en el municipio de Armero; debido a esto se crea la Ley 46 de 1988 y el decreto 919 de 1989 en el cual se crea el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD), que posteriormente sería derogado por la Ley 1523 de 2012 por el cual se adopta la política nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. La cual fue precedida por el decreto 4147 de 2011 donde se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). También tiene gran relevancia la ley 388 de 1997 donde se reglamenta los planes de ordenamiento territorial y la inclusión del riesgo en procesos de planificación en el ámbito ambiental.

Los municipios de Puerto Salgar – La Dorada son susceptibles a presentar eventos de inundaciones cuando ocurren periodos del fenómeno de La Niña como ocurrió en el año 2010 – 2011, donde se creó el decreto 4674 de 2010 con el fin de ejecutar medidas encaminadas a la protección de la población y tomar medidas de prevención, Una de las herramientas son las curvas de riesgo, las cuales pueden ser utilizadas por entidades territoriales para la toma de decisiones en la gestión del riesgo.

7. METODOLOGÍA

A continuación, se detallan las etapas implementadas para el desarrollo del proyecto:

Diagrama de flujo de la metodología



7.1 Etapa 1: Recopilación de información

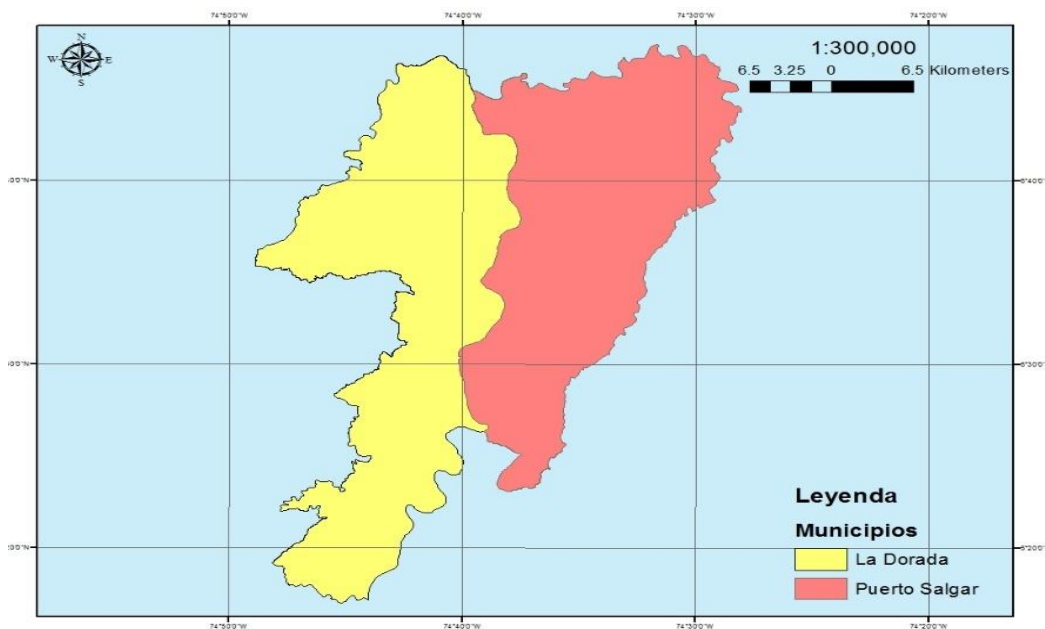
7.1.1 Selección de estaciones hidrometeorológicas

Para poder realizar la modelación en el software HEC-RAS es de vital importancia disponer de información confiable, debido a esto se seleccionó la estación hidrometeorológica que contaba con mayor cantidad de datos de caudales y niveles (serie de 26 años), estos datos fueron obtenidos por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

7.1.2 Procesamiento de la Información

Se adquirió la información topobatrímica del Rio Magdalena del tramo de Puerto Salgar – La Dorada, estos datos fueron obtenidos por medio del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). Posteriormente a esto se realizó la delimitación del DEM por medio de los shapefiles de división política de los municipios de La Dorada y Puerto Salgar.

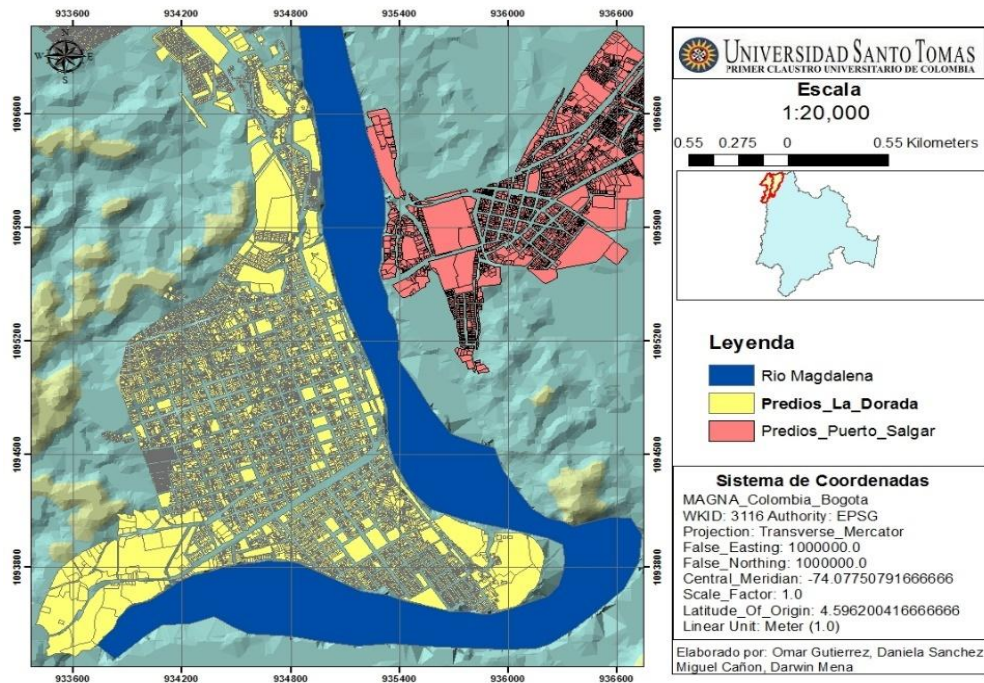
Mapa 1. Delimitación del DEM para el área de estudio.



Fuente: Autores

Seguido de esto se realizó la demarcación y digitalización del río Magdalena para las zonas de interés de estudio por medio de los shapefiles de predios de los municipios, las secciones transversales y el modelo digital de elevación.

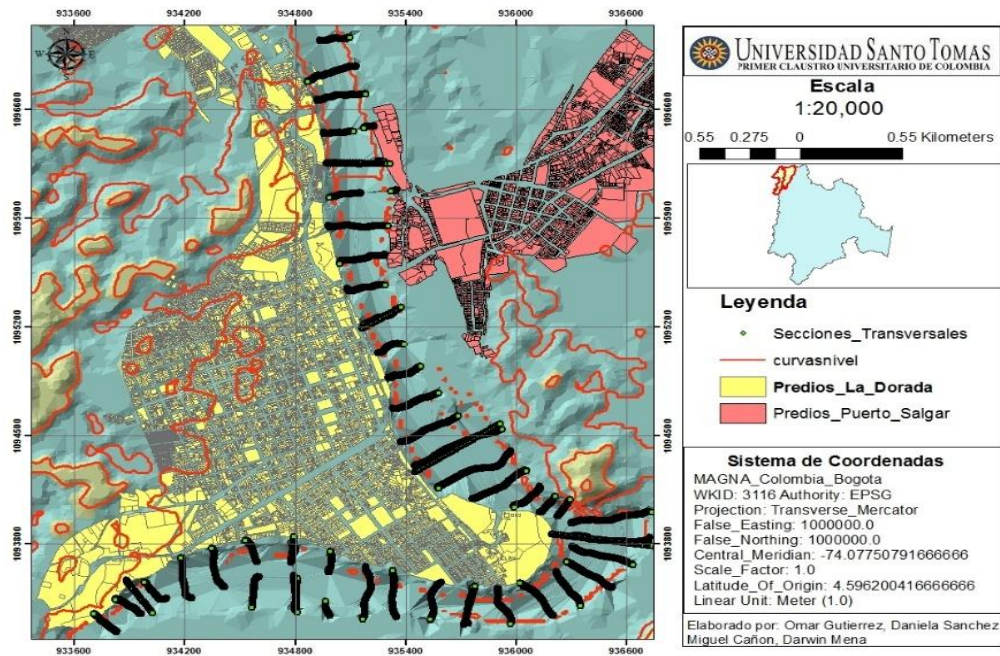
Mapa 2. Digitalización del río Magdalena.



Fuente: Autores

A partir de los shapefiles de secciones transversales y junto con las curvas de nivel creadas a partir del DEM, se obtuvo el TIN a través de la herramienta *3D analyst tool – create tin*, donde se generó el siguiente mapa:

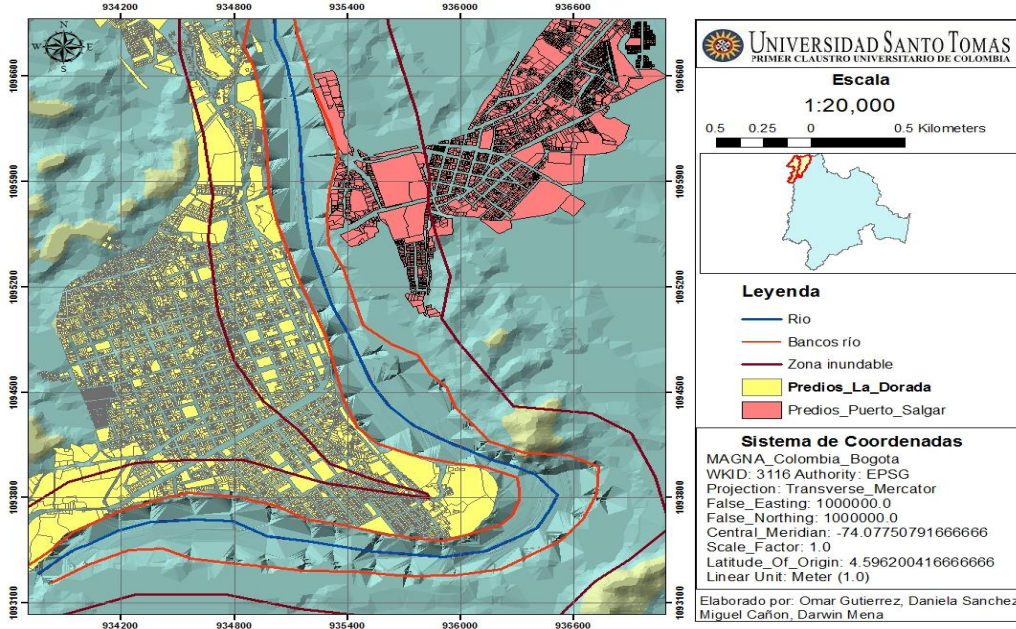
Mapa 3. Elaboración del TIN a partir de las secciones transversales y las curvas de nivel.



Fuente: Autores

Después de generar el TIN, Por medio de la herramienta Hec-GeoRas, se realizó la demarcación del río, los bancos y las posibles zonas de inundación por medio de la herramienta *RAS Geometry - Create RAS layers*, obteniendo lo siguiente:

Mapa 4. Demarcación del río, los bancos del río y zonas inundables.



Fuente: Autores

Por último, se realizó la construcción de las secciones transversales que se trazaron cada 200 metros por medio de la herramienta *Construct XS cut lines* y su transformación en coordenadas 3D por medio de la herramienta *Ras geometry – XS cut line attributes*, para exportar el archivo final a Hec-Ras.

7.1.3 Ajuste de Función de densidad de probabilidad

Posteriormente se llevó a cabo el ajuste de función de densidad de probabilidad con valores máximos anuales de las variables hidrometeorológicas (caudales y niveles), para mirar cuál distribución de probabilidad se ajustaba mejor a los datos obtenidos y así mirar la confiabilidad de ellos, este se realizó por medio del software HIDROESTA.

7.2 Etapa 2: Desarrollo de modelos

7.2.1 Construcción curva de calibración

Para la elaboración de la curva de calibración se tomaron 26 datos de las series de tiempo de niveles y de caudales, donde se construyó una tabla por medio de excel con la siguiente información, caudal, Nivel, logaritmo natural para las variables (x),(y), la diferencia de la lámina de agua de la superficie al fondo (nivel convertido), tomando como cota cero la elevación de la estación con el fondo del río que es de 168.92 msnm.

7.2.2 Construcción del modelo

Seguido de construir la curva de calibración y ajustar los datos a la función de probabilidad se extrajeron los valores correspondientes a diferentes períodos de retorno (2,25 y 100 años), con estos datos y los modelos de elevación de terreno de alta resolución se realizó la Modelación Hidráulica en Hec-Ras, en donde se hallaron las zonas inundables para cada período de retorno.

Para modelar las zonas de inundación del tramo de estudio, primeramente se creó el nuevo proyecto en Hec-Ras, se exporto la geometría creada en Argis por medio de la opción *importa geometry data -Gis format*, seguido de esto se realizó un ajustes como el número de Manning teniendo en cuenta los datos tomados de la tabla 1.

También se ajustó la pendiente, como se muestra en las tablas 5-6.

Tabla 2. Ajuste del número de Manning.

River Station	Factor	N#1	N#2	N#3
193-9868.977	n	0.035	0.035	0.035

Fuente: autores.

Finalmente, por medio del perfil topográfico obtenido en la herramienta Hec-GeoRAS, se determinó que la pendiente es de 0.01, el cual es introducido en la modelación.

Tabla 3. Ajuste de la pendiente para cada sección transversal.

Sección Transversal	Pendiente
193-9868.977	0.01

Fuente: autores

En la segunda parte de la modelación se ingresaron los caudales con sus respectivos niveles, los cuales se ingresaban en la opción de *flow data*, donde primero se incluyó el caudal, como se muestra en la tabla

Tabla 4 .Datos de Ingreso de flujo en Hec-RAS

River	RS	PF1
Rio Magdalena	9868.977	6588.88

Fuente: autores

Luego se seleccionó la opción *reach boundary conditions*, en donde se colocó el nivel el cual sería una condición aguas abajo debido a que el régimen del río es subcrítico.

Tabla 5. Datos de Ingreso de condiciones de Frontera en Hec-Ras

River	Tr	Known WS(m)	PF1
Rio Magdalena	2 años	171.056	4135.37
Rio Magdalena	25 años	194.561	5776.61
Rio Magdalena	100 años	208.629	6588.88

Fuente: autores

7.2.3 Calibración del modelo

La calibración del modelo se llevó a cabo con la sección transversal, los niveles registrados en la estación de Puerto Salgar (sección 4200) y con la sección de control aguas arriba (sección 9200) del río por medio de la curva de calibración de caudales.

Los niveles observados fueron comparados con los niveles que simula el modelo, empleando caudales de las series de tiempo de la estación y de la curva de calibración para estas dos secciones, ya que en cada sección se conoce un caudal y un nivel asociado.

Para la comparación de los niveles observados y simulados por el modelo, se utilizó como caudal aguas arriba 4020 m³/s y para la estación un caudal de 4135.37 m³/s y un coeficiente de Manning de 0.035

7.2.4 Mapas de inundación

Se utilizó la herramienta de Hec-GeoRas, en donde se exporto el formato generado en Hec-Ras por la opción *Export GIS data* a Argis, para generar el mapa en ArcGis se seleccionó la opción *import RAS data*, luego se dio la opción de layer Setup para agregar el TIN, por último se da la opción de *Inundation Mapping* en donde se generan las zonas inundables (Amenaza) para los periodos de retorno 2. 25 y 100 años de los municipios de Puerto Salgar-La Dorada.

7.3 Etapa 3: Análisis de resultados

7.3.1 Determinación de la vulnerabilidad

El método para evaluar la vulnerabilidad económica se basó en consultas en los censos de 2005 e infografías de ingresos por estratos socioeconómicos del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) de los habitantes de Puerto Salgar y La Dorada, donde se estableció un valor de vulnerabilidad para cada estrato (Tabla 9).

Tabla 6. Valores de vulnerabilidad económica y estratos socioeconómicos.

Vulnerabilidad económica		0.5
Estrato	Valor vulnerabilidad	Clasificación
1	1	muy alta
2	0.75	alta
3	0.5	media
4	0.25	baja

Fuente: [10]

El valor máximo para la vulnerabilidad más alta es 1, y para la vulnerabilidad más baja un valor de 0,25 (0 si hay presencia de un lote o zona verde). A esta variable se da un peso de 50%.

Para evaluar la vulnerabilidad física se realizó visitas de campo para conocer los materiales que estaban construidas las viviendas que se veían afectadas para cada periodo de retorno (2, 25 y 100 años) y a las que también se les estableció un peso para cada variable (Tabla 10) la cual se llevó a cabo por el método establecido en el estudio “Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el municipio de Guarne” que se mostrara a continuación:

Tabla 7. Valores de vulnerabilidad física y calidad constructiva.

Vulnerabilidad física		0.5
Calidad constructiva	Tipo material	Valor vulnerabilidad
área no construida	Lotes destinados a parqueaderos, ganadería, agricultura o engorde.	0.01
Excelente	Mampostería Reforzada: Concreto, Bloque, y Madera Fina.	0.25
Buena	Materiales Combinados: Bloque, Ladrillo y Madera.	0.5
Regular	Mampostería No Reforzada: Ladrillo y Adobe.	0.75
Mala	Materiales Desechos: Tapia, Bareque y Adobe.	1

Fuente: [10]

Para la vulnerabilidad más alta se tiene un valor máximo de 1, y para la vulnerabilidad más baja un valor de 0,01. Para esta variable se da un peso de 50%.

Una vez obtenido los resultados de la vulnerabilidad económica y física, la vulnerabilidad total se halló multiplicando el valor que se obtuvo por cada vulnerabilidad, por su equivalente en porcentaje (50%) y el valor obtenido se multiplica por la amenaza (1/T),para obtener el riesgo se utilizó la siguiente ecuación: [10]

$$Vt = (Ve * 0,5) + (Vf * 0,5)$$

$$Riesgo = Amenaza * Vulnerabilidad$$

7.3.2 Elaboración Curva de riesgo

Para cada uno de los eventos de amenaza por inundación, se realizó la captura de información de los predios afectados en cuanto a los avalúos catastrales proporcionados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), con base en el índice de valoración predial (IVP) del año 2017 y las alcaldías municipales de Puerto Salgar y La Dorada; los ingresos de las personas de cada uno de los estratos socioeconómicos de la zona y por último la calidad constructiva de las viviendas, para poder determinar el costo en dólares (USD) del riesgo que genera este evento.

El riesgo se obtuvo a partir de multiplicar la amenaza por la vulnerabilidad total por el valor económico de cada vivienda afectada, de las cuales se obtuvo un valor total de la sumatoria de las viviendas afectadas por cada evento de inundación que se mostraran a continuación:

Tabla 8. Perdidas económicas para cada periodo de retorno en La Dorada.

Curva de riesgo La Dorada		
Periodo de retorno	Valor riesgo (USD)	Probabilidad
2	\$ 541.80	0.5
25	\$ 3,184,107.3	0.04
100	\$ 20,433,352.4	0.01

Fuente: autores.

Tabla 9. Perdidas económicas para cada periodo de retorno en Puerto Salgar.

Curva de riesgo Puerto Salgar		
Periodo de retorno	Valor riesgo	Probabilidad

2	\$ 841.82	0.5
25	\$ 2,836,720.66	0.04
100	\$ 15,612,400.3	0.01

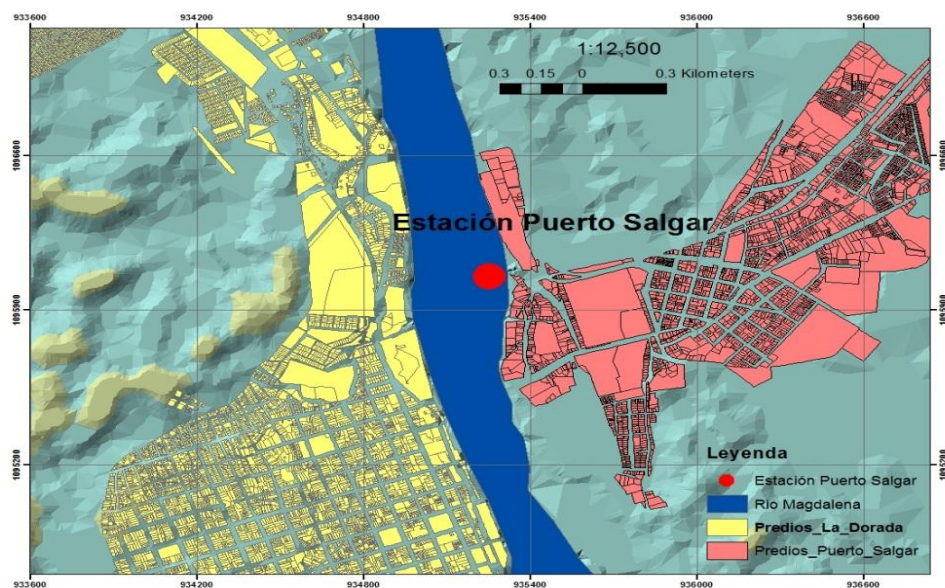
Fuente: autores

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 Etapa 1. Recopilación de información

Estación Puerto Salgar (23037010) ubicada en las coordenadas 5°28'10.8"N 74°39'43.8"W, era la única que contaba con la serie de datos de caudales y niveles requeridos para la realizar la modelación.

Mapa 5. Ubicación de la estación de Puerto Salgar.

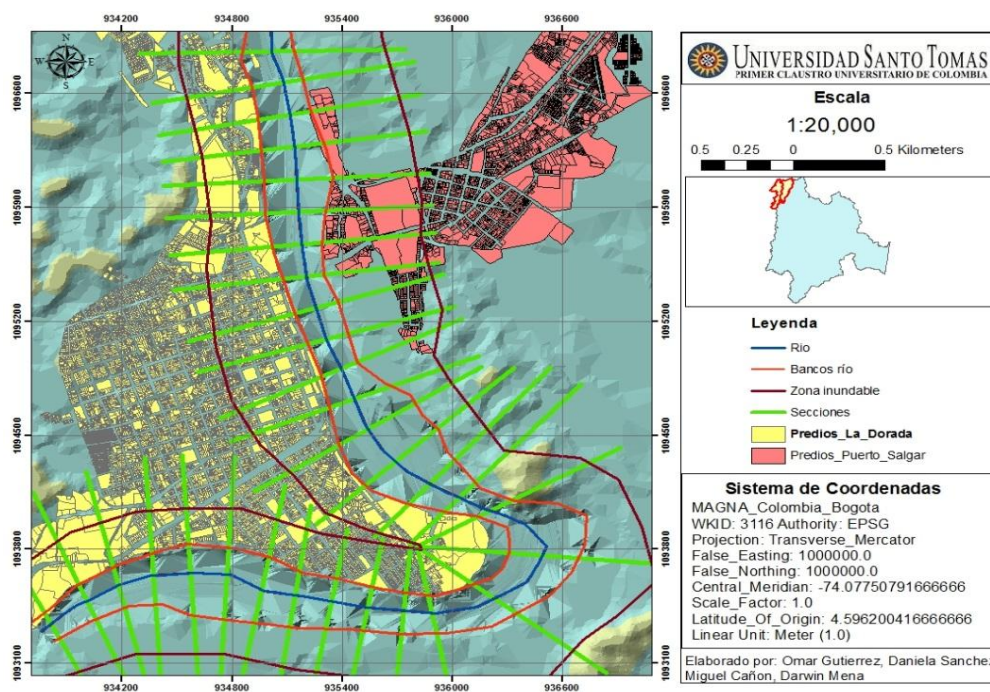


Fuente: autores

8.1.1 Procesamiento de la información.

Llevados a cabo los pasos del numeral 6.1.2, en donde se realizó las delimitaciones del río y las zonas de inundación, se generaron las secciones transversales cada 200 metros como se muestra en el siguiente mapa:

Mapa 6. Elaboración de secciones transversales y zonas de inundación.

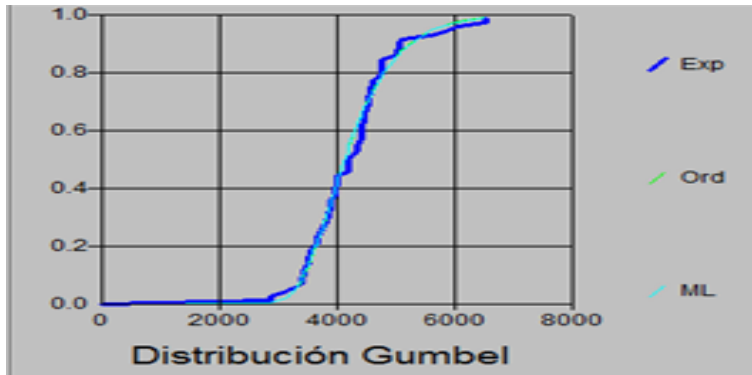


Fuente: autores

8.1.2 Ajuste a una función de densidad de probabilidad.

A continuación, se presenta la gráfica de Ajuste de probabilidad, en donde se observó que la mejor distribución de probabilidad fue la de Gumbel con un nivel de significancia de 5%, ya que esta distribución se caracteriza por ajustarse a valores máximos de caudales, como se observa en la siguiente gráfica:

Gráfico 1. Ajuste de los datos a la distribución Gumbel.



Fuente: Hidroesta.

Dónde:

Exp: Datos Ingresados.

Ord: Tipo de ajuste para Parámetros ordinarios.

ML: Tipo de ajuste para momentos lineales.

8.2 Etapa 2. Desarrollo de modelos.

8.2.1 Construcción curva de calibración de caudales.

Se realizó la curva de calibración, con el fin de hallar los niveles aguas arriba para así ejecutar el modelo ya que es una de nuestras condiciones de frontera.

Tabla 10. Construcción de curva de calibración de caudales

Caudal(x)	Nivel(y)	Nivel conv(y)	Ln(x)	Ln(y)	Ln(x)^2	Ln(y)^2	Ln(x)*Ln(y)
2869	170.18	4.26	7.962	1.449	63.389	2.100	11.539
3147	170.4	4.48	8.054	1.500	64.870	2.249	12.078
3283	170.51	4.59	8.097	1.524	65.554	2.322	12.338
3387	170.39	4.47	8.128	1.497	66.060	2.242	12.170
3399	170.45	4.53	8.131	1.511	66.117	2.282	12.284
3444	170.78	4.86	8.144	1.581	66.331	2.500	12.877
3500	170.82	4.9	8.161	1.589	66.594	2.526	12.969
3520	170.48	4.56	8.166	1.517	66.687	2.302	12.391
3563	170.52	4.6	8.178	1.526	66.886	2.329	12.481

3648	170.54	4.62	8.202	1.530	67.272	2.342	12.552
3671	171.08	5.16	8.208	1.641	67.375	2.693	13.469
3859	171.07	5.15	8.258	1.639	68.197	2.686	13.535
3880	170.66	4.74	8.264	1.556	68.287	2.421	12.858
3893	171.48	5.56	8.267	1.716	68.342	2.943	14.183
4020	171.18	5.26	8.299	1.660	68.874	2.756	13.777
4181	170.65	4.73	8.338	1.554	69.527	2.415	12.957
4394	171.58	5.66	8.388	1.733	70.358	3.005	14.540
4435	171.6	5.68	8.397	1.737	70.514	3.017	14.586
4503	171.62	5.7	8.412	1.740	70.770	3.029	14.642
4540	171.07	5.15	8.421	1.639	70.908	2.686	13.801
4559	171.66	5.74	8.425	1.747	70.978	3.054	14.722
4605	171.34	5.42	8.435	1.690	71.148	2.856	14.256
5058	171.2	5.28	8.529	1.664	72.739	2.769	14.191
5857	171.54	5.62	8.675	1.726	75.262	2.980	14.977
6042	172.31	6.39	8.706	1.855	75.803	3.440	16.148
6509	173.02	7.1	8.781	1.960	77.105	3.842	17.211

Fuente: autores.

La ecuación de la curva que se obtuvo es:

$$Q=217.76*(H+h_o)^{1.77706}$$

Dónde:

Q = Caudal en m³/s.

H = lectura de mira en la regla limnimétrica en metros.

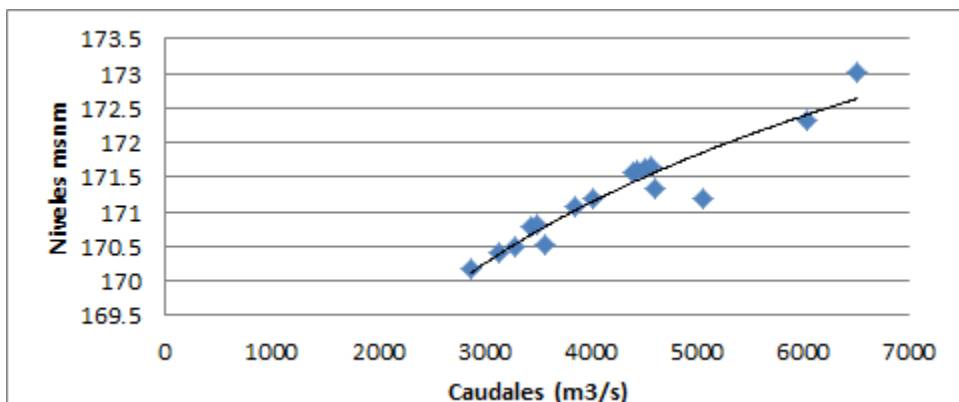
h_o = nivel del cero de la mira sumado o restado al nivel del río.

a= 217.76

n=1.77706

En la cual se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.79, el cual demuestro que la curva de calibración se ajusta de buena manera a los datos registrados por la estación de Puerto Salgar, para que así se pueda establecer un punto de control aguas arriba del río y posteriormente realizar una calibración del modelo hidráulico.

Gráfico 2. Curva de calibración de caudales.



Fuente: autores.

8.2.2 Construcción del modelo

Se establecieron los valores de caudales y niveles asociados a cada periodo de retorno, por medio de la curva de calibración como se menciona en el... numeral 6.2.1....

Los datos obtenidos se pueden visualizar en la tabla 4

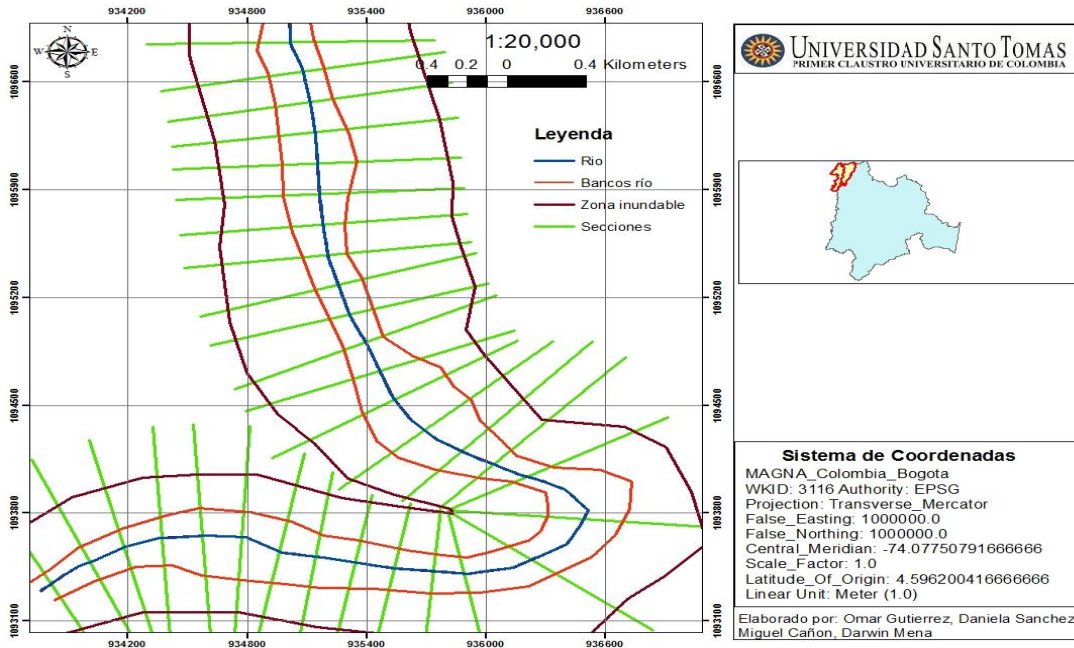
Tabla 11. Valores máximos anuales de caudal y nivel para cada Tr.

Tr	Nivel (msnm)	Caudal (m³/s)	Maning
2 años	171.056	4135.37	0.035
25 años	194.561	5776.61	0.035
100 años	208.629	6588.88	0.035

Fuente: autores

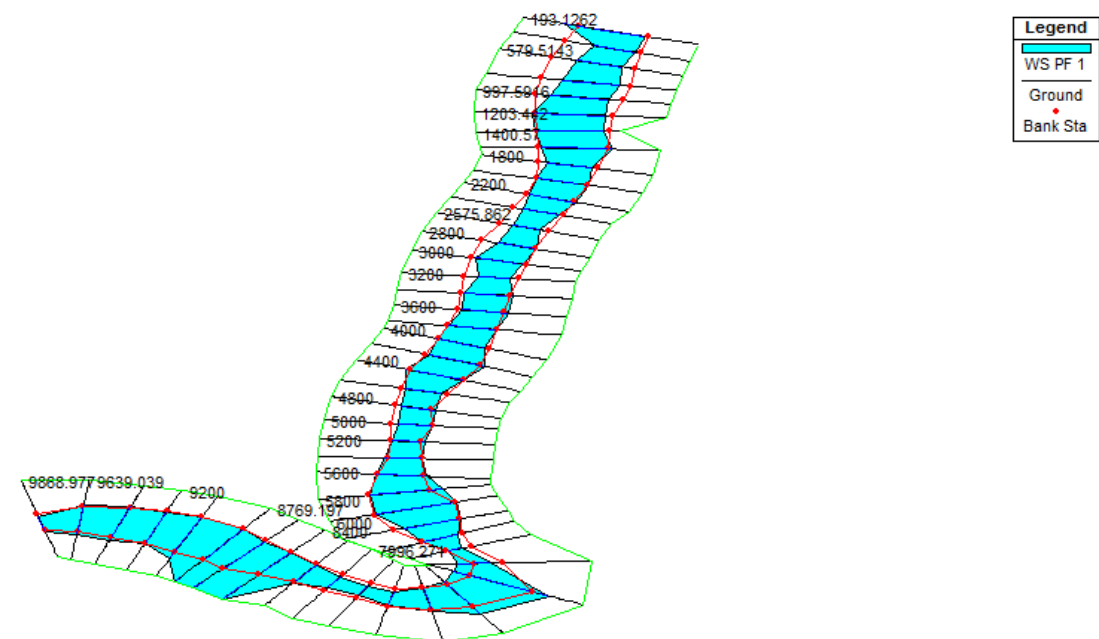
Al obtener estos datos se realiza la modelación por medio del software Hec-Ras, generando los siguientes resultados:

Mapa 7. Importación de la geometría del tramo de estudio.



Fuente: autores.

Ilustración 3. Resultados de la modelación en HEC-RAS.



Fuente: Hec-Ras

8.2.3 Calibración del modelo.

Con base a la siguiente tabla, se evidencia que se obtuvieron errores inferiores al 10% en ambas secciones de control, por lo cual se procedió a la modelación de los caudales y niveles máximos, además de utilizar el coeficiente de Manning extraído en la literatura para cauces naturales

Tabla 12. Niveles observados y niveles simulados.

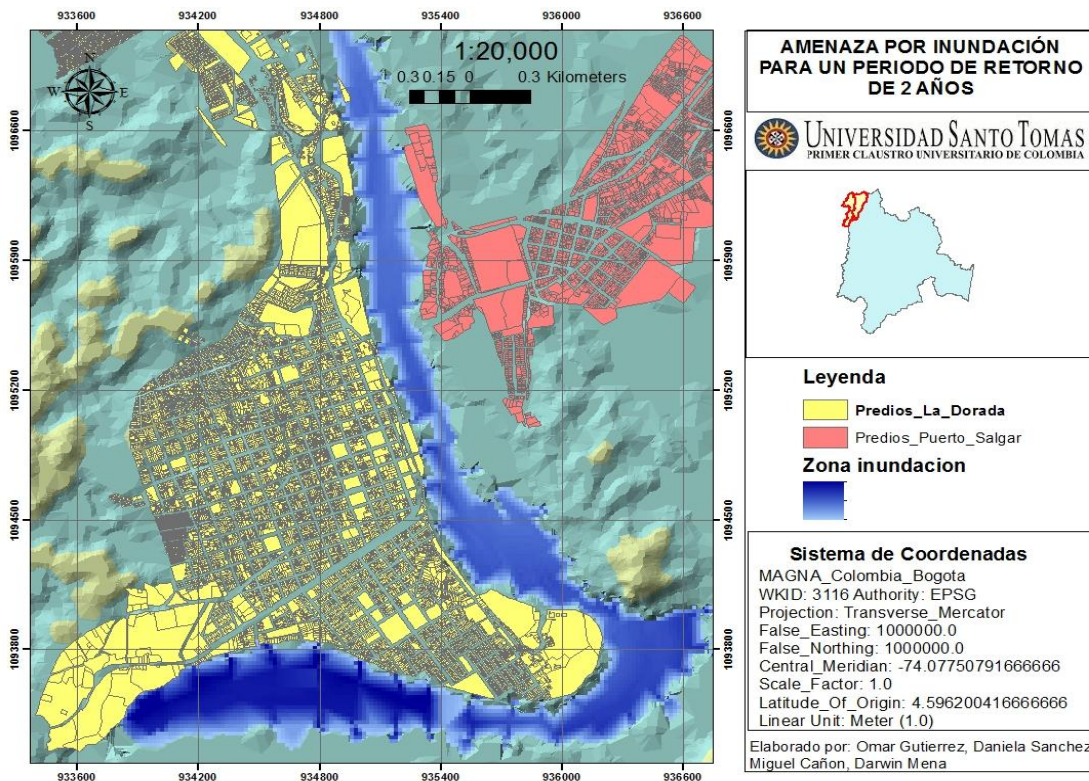
Sección control	Estación	Altura de la sección		Ho(msnm)	168.92
		Observado	Simulado	Δ	%
9200	Sección control	5.260	5.130	-0.130	2.47
4200	Puerto Salgar	5.136	5.390	0.254	4.72

Fuente: autores.

8.2.4 Mapas de inundación

Posteriormente de haber generado las zonas de inundación en Hec-Ras para cada periodo de retorno (2,25 y 100 años), se generaron los respectivos mapas según el... numeral 6.2.4..., los resultados se observan en los siguientes mapas:

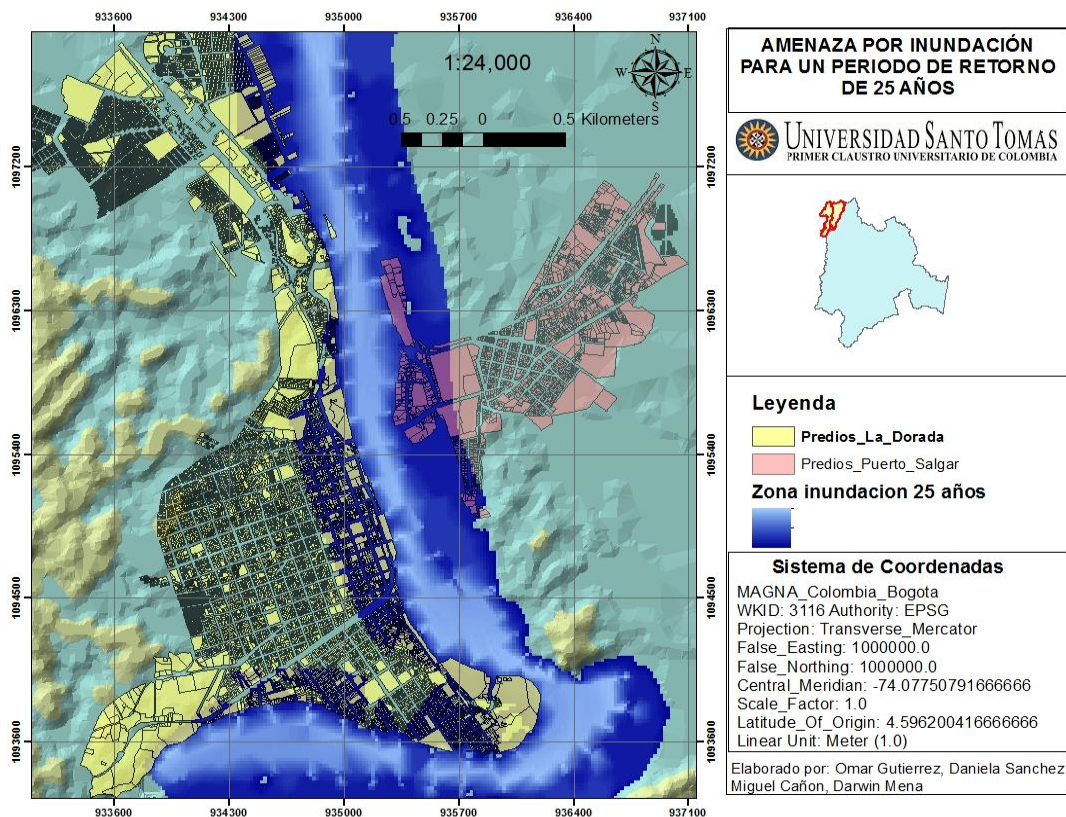
Mapa 8. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 2 años.



Fuente: autores.

Del mapa anterior se observa que la zona de inundación no afecta ningún tipo de vivienda, lo cual era un resultado esperado, ya que gran parte de las construcciones en el municipio inician a partir de la cota 175 msnm, por ende solo se afectarían algunas viviendas que están construidas en el valle aluvial del río, lo que causaría que tengan al borde el nivel del agua del río Magdalena.

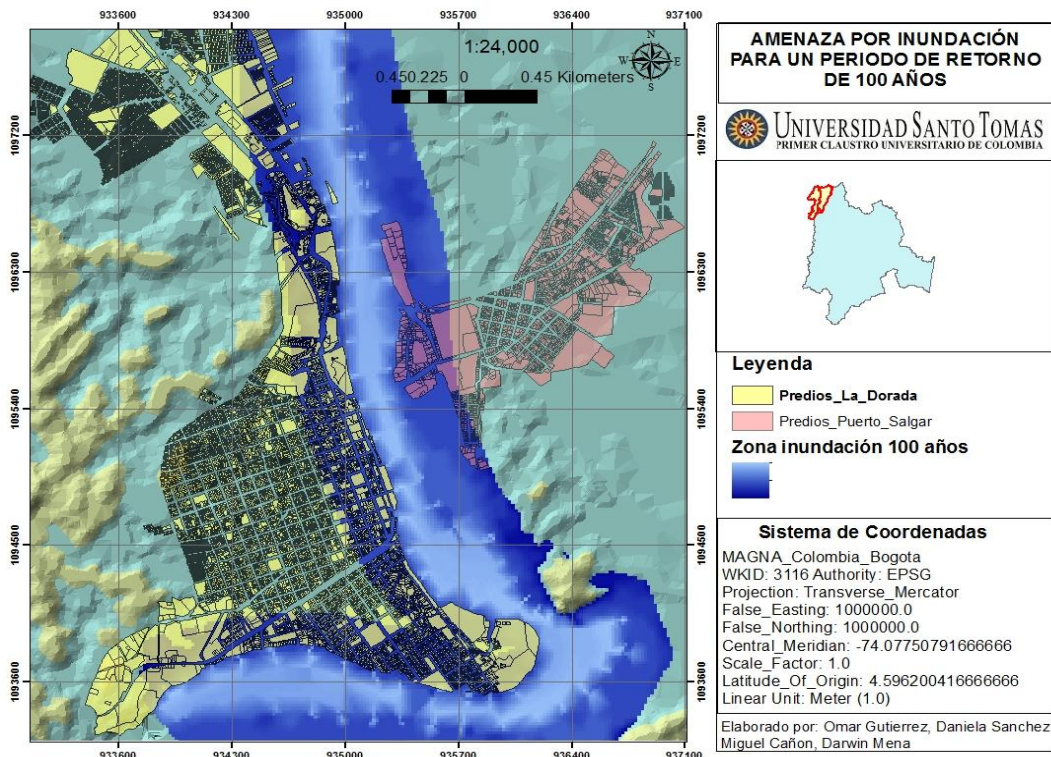
Mapa 9. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 25 años.



Fuente: autores.

De la imagen anterior se observó que la mancha de inundación afecta gran parte de las viviendas que se encuentran en la ribera del río, de lo cual se puede determinar que de suceder un evento de esta magnitud se verían muy afectados estos municipios, especialmente el municipio de La Dorada, el cual es más vulnerable a que la población este expuesta ante un evento de inundación del río Magdalena si se llegase a presentar este calado del río (194.561m) con su respectivo caudal.

Mapa 10. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 100 años.



Fuente: autores.

De la imagen anterior se observó que la mancha de inundación presenta una mayor afectación a las viviendas de los habitantes que se encuentran en la ribera del río, de lo cual se puede determinar que de suceder un evento de esta magnitud se verían muy afectados estos municipios, especialmente el municipio de La Dorada, que con respecto al periodo de retorno de 25 años, se verán perjudicados nuevos predios en la parte sur y norte del municipio.

En el municipio de Puerto Salgar no se ve ningún tipo de variación en la zona de inundación, solo se observa el aumento del nivel del agua en la parte sur del municipio, en el cual se vería afectada una manzana en este sector.

8.3 Etapa 3. Determinación curva de riesgo

Con los resultados obtenidos de la amenaza y vulnerabilidad se construyó las curvas de riesgo para cada uno de los municipios, a continuación se observan cada una de ellas:

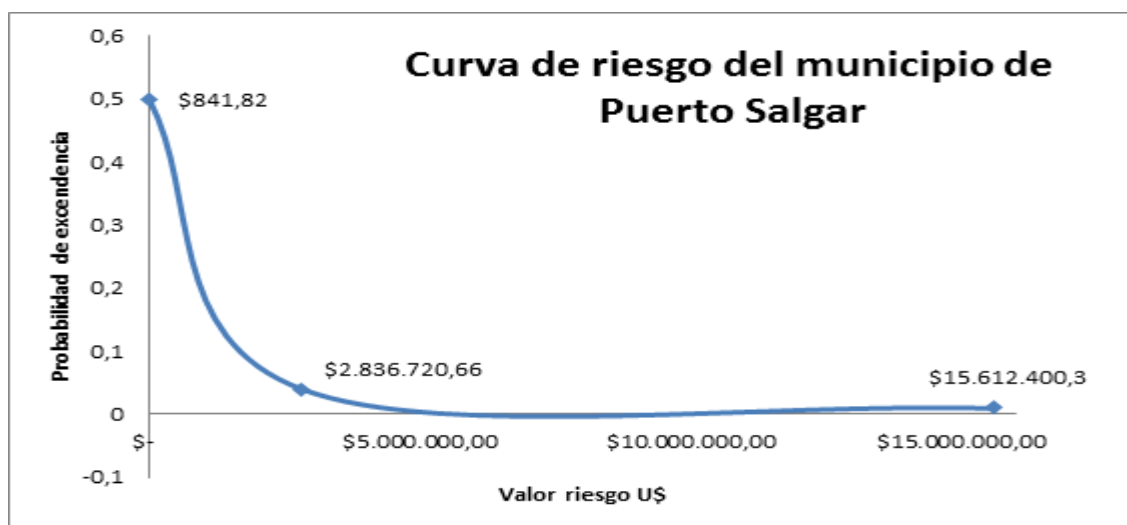
Gráfico 3. Curva de riesgo para el municipio de La Dorada.



Fuente: autores.

De la figura anterior se observa que, para un periodo de retorno de 2 años, con una probabilidad de excedencia de 50%, la curva de riesgo registra un valor de USD \$541.8; y para un periodo de retorno de 100, aunque tiene una probabilidad de ocurrencia del 1%, los daños económicos son considerablemente elevados en el momento que ocurra un evento de inundación del río Magdalena con un valor de USD \$20,433,352.4.

Gráfico 4. Curva de riesgo para el municipio de La Dorada.



Fuente: autores.

De la figura anterior se observa que para un periodo de retorno de 2 años, con una probabilidad de excedencia de 50%, la curva de riesgo registra un valor de USD \$841.2; y para un periodo de retorno de 100, aunque tiene una probabilidad de ocurrencia del 1%, los daños económicos son considerablemente elevados en el momento que ocurra un evento de inundación del río Magdalena con un valor de USD \$15,612,400.3.

9. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se llevó a cabo la realización de la curva de riesgo por inundación por medio de la utilización de Excel y de software Hec-ras, donde fue posible concluir que la curva de riesgo de inundación para el municipio de La Dorada con una probabilidad de ocurrencia del 1% fue de USD \$20,433,352.4. Mientras que para el municipio de Puerto Salgar fueron de USD \$15,612,400.3, es importante resaltar que estos valores únicamente engloban los ingresos de las personas y los avalúos de las viviendas afectadas.

Fue posible establecer que el municipio de la dorada es el más susceptible debido la gran presencia de asentamientos ilegales, construcciones en terrenos dejados por el río en su madurez, por presencia de actividades agrícolas en las cercanías del río, otro factor es el reflujo que se presenta en esas zonas por el desagüe de las aguas residuales y de alcantarillado los cuales son vertidos en el río Magdalena, por estos factores y por la densidad de población en el municipio de La Dorada se generaría mayores pérdidas económicas que en el municipio de Puerto Salgar.

Partiendo de los resultados obtenidos de las curvas de riesgo, se evidencio que la falta de datos prediales y de los ingresos económicos de la población estudiada, se presentaron sesgos, los cuales no garantizas que las pérdidas económicas sean menor o mayor al valor obtenido en el presente proyecto.

También se concluye que el modelo hidráulico elaborado por medio de HEC-RAS, es muy aplicable para ríos de gran tamaño como el río Magdalena con distintos flujos, de baja pendiente, debido a que representa con gran precisión la distribución de los caudales del tramo de estudio en cada una de las secciones, pero en el cual se debe tener en cuenta que puede haber secciones que al procesar la información, no se ajuste a la realidad debido a errores humanos en la medición de batimetría y en la resolución del modelo digital de elevación.

Otro factor que influyó es el tipo de flujo que se presenta en la zona de estudio, el cual es subcrítico, ya que al presenta velocidades bajas, no se percibe el aumento súbito del nivel del agua. Finalmente, con base a los mapas de inundación se evidencio que en un periodo de retorno de 100 años el municipio de La Dorada, presenta una zona de inundación significativa en las riberas del río, en donde se pueden representar grandes pérdidas económicas.

10.RECOMENDACIONES

- Tomando en cuenta las curvas de riesgo y los mapas de amenaza por inundación, se sugiere a nivel de gobernanza e institucionalidad, incorporar las curvas de riesgo a nivel de planeación y ordenamiento de los municipios, para establecer medidas de prevención o mitigación orientada a la reducción de los riesgos existentes y la generación de nuevas estrategias de reubicación a la población por las distintas temporadas de mayor precipitación en el país o ante fenómenos de La Niña.
- Se determina como una limitación del modelo hidráulico elaborado por medio de HEC-RAS, la existencia de un apartado que permita la calibración para evitar que el usuario tenga que hacer una tarea externa multiobjetivo para efectuar la calibración manualmente, lo cual requiere de mucho tiempo.
- Se sugiere que las entidades gubernamentales tengan actualizadas las bases de datos de la información sociodemográfica y económica, con el fin de generar un resultado más confiable en este tipo de investigaciones, ya que la mayoría de la información esta hasta el último censo del año 2005.
- Es necesario iniciar campañas de socialización con la población que se vería afectada por eventos de inundación, con la ayuda de los mapas de amenaza y curvas de riesgo elaborados en este proyecto para sensibilizar a la población sobre las pérdidas económicas y físicas que se generan por eventos de inundación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pueblo D.d, "Emergencia en colombia por el fenomeno de la niña 2010-2011," Bogota , 2011.
- [2] Fernando Muñoz Pedraza, "plan de desarrollo municipal social, competitivo y gobernable," alcaldia municipal de puerto salgar, puerto salgar, 2012.
- [3] Alejandra Robayo Mejia, "Análisis de amenaza por inundación para la localidad de tunjuelito, desarrollado a través de sistemas de información geográfica," 2014.
- [4] Victor Mauricio Aristizabal, Juan Camilo Jaramillo Rojas, "Modelos hidrológicos e hidráulicos de zonificación de amenaza por inundación en el municipio la dorada caldas ," corpocaldas, 2013.
- [5] MARÍA ALEJANDRA AGUILERA NAVARRO, "Estimación de Funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule," Universidad de Talca , Talca-chile , 2007.
- [6] Alejandra Sorto, Christian Saravia, José Paz, "Hidrometría y Caudales," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala , 2013.
- [7] JUAN CARLOS BUSTOS MONTES, "CÁLCULO DE FLUJO GRADUALMENTE VARIADO CON," MEXICO , 2011.
- [8] JORDI OLIVERAS. (2016, FEBRERO) HIDROJING. [Online]. <http://www.hidrojing.com/como-seleccionar-el-coeficiente-de-rugosidad-de-manning-en-cauces-naturales/>
- [9] Christopher N. Dunn, Dawn Palma, Chief. (1964) U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center. [Online]. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>
- [10] Universidad Católica de oriente, "Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa e inundaciones zona urbana municipio de Guarne," Guarne, 2014.
- [11] Universidad Católica de Oriente, "Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa e inundaciones zona urbana ," Universidad Católica de Oriente , 2011.
- [12] Ideam. (2011, febrero) Ideam. [Online]. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>
- [13] Universidad Nueva Granada, Área de ingeniería hidráulica, "Manual básico HEC-RAS y HEC-GEORAS," Granada, 2007.

- [14] Carlos D. SEGERER, Esp. Rubén VILLODAS, *Hidrología I, Estadística aplicada a la hidrología*, novena ed. Argentina, 2007.
- [15] Universidad de Medellín, "Estudio hidraulico del río Medellín en el tramo comprendido entre las estaciones Ancon sur y Acevedo," Area metropolitana del Valle de Aburra, Medellín, 2010.
- [16] Ana Carolina Santos Rocha and Carlos Eduardo Cubillos Peña, "Modelación hidráulica de un sector del rio caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS," *Avances en recursos hidráulicos*, vol. ISSN 0121-5701, no. 17, pp. 45-64, Mayo 2008.