

**Análisis de las zonas urbanas con mayor amenaza por inundación de la microcuenca del  
Río Frío en el municipio de Floridablanca sector Santa Coloma y barrios aledaños por  
medio del uso de un SIG**

**Leonardo Becerra Arenas, Laura Andrea González Ortiz**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Juan Camilo Jerez Gómez**

**Magíster en Geotecnia**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Ingeniería Civil**

**2022**

## Contenido

Introducción .....	11
1. Análisis de las zonas urbanas con mayor amenaza por inundación de la microcuenca del Río Frío en el municipio de Floridablanca sector Santa Coloma y barrios aledaños por medio del uso de un SIG .....	13
1.1 Planteamiento del problema .....	13
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos .....	16
1.3.1 Objetivo general .....	16
1.3.2 Objetivos específicos .....	17
2. Marco referencial .....	17
2.1 Antecedentes de investigación .....	17
2.2 Marco teórico .....	19
2.2.1 Inundaciones.....	20
2.2.2 Prevención y mitigación del riesgo por inundación .....	20
2.2.3 Mapas de inundación .....	21
2.2.4 Cuenca hidrográfica.....	22
2.2.5 Sistema de información geográfica .....	24
2.3 Marco Conceptual .....	25
2.3.1 Identificación y caracterización del Río Frío .....	26
2.4 Marco legal.....	30
2.4.1. Requisitos mínimos para el análisis de amenaza por inundación.....	30
2.4.2. Parámetros para la zonificación de áreas con amenaza por inundación.....	30

2.4.3 Parámetros para la categorización de la amenaza y niveles de inundación.....	31
3. Metodología .....	31
3.1. Recolección de datos topográficos, hidrológicos y demográficos .....	32
3.2 Clasificación y digitalización de los datos en Quantum Gis.....	34
3.3. Cálculo de parámetros para el análisis de datos.....	35
3.4 Generación de modelos dinámicos y mapas de inundación .....	36
3.5 Análisis comparativo de datos digitales .....	38
4. Resultados .....	38
4.1 Recolección de datos topográficos, hidrológicos y demográficos .....	38
4.2 Clasificación y digitalización de los datos en Quantum Gis.....	42
4.3 Cálculo de parámetros para el análisis de datos .....	46
4.4 Generación de modelos dinámicos y mapas de inundación .....	61
4.5 Análisis comparativo de datos digitales .....	67
4.5.1 Identificación de áreas de inundación .....	71
4.5.2 Superposición de áreas inundadas de los diferentes eventos.....	78
4.5.3 Categorización de nivel de amenaza y probabilidad para eventos de inundación .....	80
5. Discusión.....	85
6. Conclusiones.....	87
Referencias.....	90
Apéndices.....	96

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Datos demográficos sectores aledaños al Río Frío año 2005</i> .....	41
<b>Tabla 2.</b> <i>Datos demográficos sectores aledaños al Río Frío año 2018</i> .....	42
<b>Tabla 3.</b> <i>Parámetros morfométricos de la microcuenca</i> .....	44
<b>Tabla 4.</b> <i>Datos pluviométricos faltantes, estación Llano grande.</i> .....	49
<b>Tabla 5.</b> <i>Datos pluviométricos faltantes, estación floresta LA</i> .....	50
<b>Tabla 6.</b> <i>Datos pluviométricos faltantes, estación Bucaramanga IDEAM</i> .....	50
<b>Tabla 7.</b> <i>Datos pluviométricos faltantes, estación Galvicia LA</i> .....	51
<b>Tabla 8.</b> <i>Resumen total de datos originales y faltantes de la microcuenca del Río Frío</i> .....	52
<b>Tabla 9.</b> <i>Distancias respecto a la estación Galvicia LA</i> .....	54
<b>Tabla 10.</b> <i>Datos de precipitación existentes y calculado</i> .....	55
<b>Tabla 11.</b> <i>Estaciones utilizadas para el rellenado de estaciones nuevas</i> .....	56
<b>Tabla 12.</b> <i>Datos para la pendiente del Río Frío</i> .....	57
<b>Tabla 13.</b> <i>Caudales máximos anuales en el rango de tiempo estudiado.</i> .....	59
<b>Tabla 14.</b> <i>Caudales máximos calculados y variación estándar</i> .....	60
<b>Tabla 15.</b> <i>Periodo de retorno y su caudal proyectado</i> .....	61
<b>Tabla 16.</b> <i>Tabla de convenciones figura 37</i> .....	80
<b>Tabla 17.</b> <i>Convenciones de clasificación de amenaza de la zona</i> .....	82

### Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Principales fuentes de captación hídrica para la ciudad de Bucaramanga y el municipio de Floridablanca.....	26
<b>Figura 2.</b> Trayectoria del Río Frío a través de las zonas urbanas de Floridablanca .....	27
<b>Figura 3.</b> Mapa conceptual de metodología .....	33
<b>Figura 4.</b> Áreas 1 y 2 sector Bucarica -Floridablanca .....	40
<b>Figura 5.</b> Áreas 3 y 4 sector Lagos – Anillo Vial.....	41
<b>Figura 6.</b> Curvas de nivel, afluentes principales y secundarios de la zona de estudio.....	43
<b>Figura 7.</b> Mapa hidrológico y divisoria de aguas de la microcuenca del Río Frío.....	45
<b>Figura 8.</b> Modelo digital de elevación de la microcuenca del Río Frío .....	46
<b>Figura 9.</b> Ubicación geográfica- estaciones meteorológicas iniciales en la microcuenca del Río Frío .....	47
<b>Figura 10.</b> Ubicación geográfica y distancia- estaciones meteorológicas iniciales y nuevas en la microcuenca del Río Frío. ....	48
<b>Figura 11.</b> Tabla dinámica datos originales de precipitación estación Galvicia LA. ....	49
<b>Figura 12.</b> Distancias desde Floresta LA, Bucaramanga IDEAM y Llano Grande hasta Galvicia LA.....	53
<b>Figura 13.</b> Perfil de elevación del afluente principal de la microcuenca del Río Frío .....	57
<b>Figura 14.</b> Geometría, condiciones de borde y DEM en el software HEC-RAS.....	62
<b>Figura 15.</b> Ventana de trabajo HEC-RAS – Datos de flujo variable .....	63
<b>Figura 16.</b> Ventana de trabajo HEC-RAS – Hidrograma de Flujo o caudales diarios .....	64
<b>Figura 17.</b> Modelo dinámico inundación 28 de enero del 2020 .....	66
<b>Figura 18.</b> Evento inundación 2005.....	67

<b>Figura 19.</b> <i>Evento inundación 2020</i> .....	67
<b>Figura 20.</b> <i>Superposición eventos 2005 y 2020</i> .....	68
<b>Figura 21.</b> <i>Evento 2020 datos con información recolectada</i> .....	69
<b>Figura 22.</b> <i>Superposición eventos recopilado y 2020</i> .....	70
<b>Figura 23.</b> <i>Superposición evento 2005, 2020 e información recopilada</i> .....	71
<b>Figura 24.</b> <i>Polígonos evento 2005.</i> .....	72
<b>Figura 25.</b> <i>Polígono primero áreas</i> .....	73
<b>Figura 26.</b> <i>Polígono segundo áreas.</i> .....	73
<b>Figura 27.</b> <i>Tercer polígono evento 2005 con áreas</i> .....	74
<b>Figura 28.</b> <i>Cuarto polígono evento 2005 con áreas</i> .....	74
<b>Figura 29.</b> <i>Polígonos evento 2020</i> .....	75
<b>Figura 30.</b> <i>Primer polígono evento 2020 con áreas</i> .....	76
<b>Figura 31.</b> <i>Primer polígono evento 2020 con áreas</i> .....	76
<b>Figura 32.</b> <i>Tercer polígono evento 2020 con áreas</i> .....	77
<b>Figura 33.</b> <i>Polígono evento 2020 información recolectada.</i> .....	78
<b>Figura 34.</b> <i>Primer polígono evento 2020 información recopilada con áreas</i> .....	78
<b>Figura 35.</b> <i>Superposición polígonos similares eventos 2020 y 2005</i> .....	79
<b>Figura 36.</b> <i>Superposición de áreas polígonos eventos 2020, 2005 y 2020 información recopilado</i> .....	79
<b>Figura 37.</b> <i>Categorización alta, media, baja sector.</i> .....	81
<b>Figura 38.</b> <i>Mapa de amenaza por inundación POT</i> .....	84

**Lista de apéndices**

<b>Apéndice A.</b> <i>Figura 1. Valores de <math>Y_n</math> y <math>\delta N</math>.</i> .....	96
<b>Apéndice B.</b> <i>Figura 2. Valores de <math>N\alpha \delta m</math> en función de <math>\Phi</math>.</i> .....	97
<b>Apéndice C.</b> <i>Mapa 1 – Modelo Digital de Elevación DEM</i> .....	98
<b>Apéndice D.</b> <i>Mapa 2. Modelo dinámico inundación 2020</i> .....	99
<b>Apéndice E.</b> <i>Mapa 3. Modelo dinámico inundación 2005</i> .....	100
<b>Apéndice F.</b> <i>Mapa 4. Modelo dinámico inundación periodo de retorno 100 años</i> .....	101
<b>Apéndice G.</b> <i>Mapa 5. Modelo dinámico inundación periodo de retorno 500 años</i> .....	102
<b>Apéndice H.</b> <i>Mapa 6. Mapa de inundación datos de campo</i> .....	103

### **Resumen**

La presente investigación se basa en analizar las zonas urbanas con mayor amenaza por inundación de la microcuenca del Río Frío partiendo de la recolección de datos tales como las precipitaciones, la cartografía y la demografía del sector de estudio extraídos de las bases de datos de las entidades responsables de dicha información y seguidamente mediante el uso de las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica SIG como Quantum Gis y HEC-RAS para la generación de mapas y modelos dinámicos de los eventos de inundación ocurridos y los que podrían ocurrir, los cuales permiten categorizar la amenaza y así mismo clasificar la probabilidad de dicha inundación. Los resultados obtenidos a partir de los modelos dinámicos y mapas de inundación permiten no solo la comparación de los eventos entre sí, sino también con los estudios realizados por las entidades gubernamentales encargadas de la prevención de riesgo por inundación dando lugar a un análisis más profundo del comportamiento de dichos eventos de inundación permitiendo identificar las zonas del sector afectadas si se presentara un evento de las magnitudes estudiadas en la investigación.

*Palabras clave:* sistema de información geográfica, mapas de inundación, mitigación, prevención, zonas urbanas



### **Abstract**

This research is based on analyzing the urban areas most threatened by flooding in the Río Frío micro-basin, starting from the collection of data such as rainfall, cartography and demography of the study sector extracted from the databases of the entities. responsible for this information and then by using the tools of the Geographic Information Systems GIS such as Quantum Gis and HEC-RAS for the generation of maps and dynamic models of the flood events that have occurred and those that could occur, which allow to categorize the threat and also classify the probability of said flood.

The results obtained from the dynamic models and flood maps allow not only the comparison of the events with each other, but also with the studies carried out by the government entities in charge of flood risk prevention, giving rise to a more in-depth analysis of the behavior of these flood events allowing to identify the affected areas of the sector if an event of the magnitudes studied in the investigation were to take place.

*Keywords:* geographic information system, flood maps, mitigation, prevention, urban areas

## Glosario

*Capa vectorial:* Son los datos utilizados para representar el mundo real objetos espaciales en un SIG, dividiéndose en diferentes tipos de geometría como punto, línea o polígono [1].

*Cuenca hidrográfica:* Unidad Geográfica e hidrológica delimitada por una divisoria de aguas y formada por un afluente principal y todos los recursos asociados entre el origen de dicho afluente y su desembocadura, incluyendo todos los ecosistemas (Territorios, Ríos menores, aguas subterráneas, zonas costeras) y las interacciones de estos que inciden en el curso de agua tanto en cantidad como en calidad [2].

*Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS):* Software que permite la modelización hidráulica de flujo de aguas de ríos naturales y otros canales mediante ciertos tipos de análisis como los son: flujo en régimen permanente, flujo en régimen no permanente, modelización del transporte de sedimentos, entre otros [3].

*Microcuenca:* Se entiende como microcuenca a aquella cuenca que está dentro de una subzona hidrográfica, es decir una subcuenca y su área es menor a 500 km<sup>2</sup>, está conformada por un área de captación, área de vertientes y área de confluencia [4].

*Sistema de información Geográfico (SIG):* se entiende por SIG al conjunto de herramientas que conforman un software el cual permite representar de forma eficiente datos geográficos referenciados o asociados a un territorio o unidad específica con una coordenada espacial definida [5].

*Quantum Gis (Qgis):* Es un sistema de información geográfico de código abierto que soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos, el cual permite mediante sus herramientas visualizar, gestionar, editar y analizar datos, y diseñar mapas imprimibles [6].

## Introducción

Las inundaciones son consideradas mundialmente como uno de los fenómenos que genera mayor impacto negativo para la sociedad, debido a que le trae grandes consecuencias que se derivan entre daños a bienes públicos y privados hasta pérdida de vidas humanas lo cual aumenta la vulnerabilidad de la población y el deterioro de la calidad de vida de la misma, además de esto las inundaciones son consideradas como un fenómeno natural que se presenta cuando el agua sube mucho su nivel en los ríos, lagunas, lagos y mar; entonces, cubre o llena zonas de tierra que normalmente son secas [7].

Cada evento de inundación se diferencia de cualquier otro debido a las características propias del lugar donde se presenta, las características de la cuenca y la relación con la población que lo rodea. Para el caso de Colombia, debido al fenómeno de la niña en el periodo entre 2010 y 2011 se presentaron fuertes lluvias y aumento en el nivel de los ríos con los cuales se presentó un fuerte impacto en los eventos de inundación en todo el país. Debido a esto, en las diferentes regiones del país se han realizado estudios para mitigar los efectos de estos eventos de inundación [8].

Uno de los eventos más recientes ocurridos en Santander se presentó en el Municipio de Floridablanca en el mes de enero del presente año, ocasionado por fuertes precipitaciones que produjeron el desbordamiento del Río Frío el cual pertenece a la microcuenca del río frío, dejando con su paso muchas familias afectadas tanto física como económicamente. Con el fin de mitigar los impactos de este fenómeno, los estudios de este tipo son enfocados en la zonificación de las amenazas por inundación en los cuales se representan factores como los periodos de retorno de las precipitaciones, las zonas con mayor probabilidad de riesgo, el uso de Sistemas de Información Geográfica SIG, entre otros.

La finalidad de este proyecto incurre en el uso del SIG para el análisis de las zonas con mayor probabilidad de riesgo por inundación del Río frío en ciertos barrios que componen el municipio de Floridablanca con el fin de mitigar dichos impactos negativos para la población.

## **1. Análisis de las zonas urbanas con mayor amenaza por inundación de la microcuenca del Rio Frío en el municipio de Floridablanca sector Santa Coloma y barrios aledaños por medio del uso de un SIG**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Las inundaciones son uno de los desastres naturales meteorológicos más peligrosos, estos pueden durar horas o incluso extenderse días y se pueden originar por diferentes factores tales como fuertes o intensas precipitaciones, la geografía del lugar, las construcciones muy cercanas a los cauces de los ríos, la deforestación del lugar, entre otros. Estos factores se ven asociados a elementos como las altas pendientes existentes en el lugar, la velocidad del caudal y todos los sedimentos que lleve consigo el río provocando daños de gran consideración o impacto a la población [9].

Basados en lo anterior, es fundamental tener en cuenta diversos aspectos para prevenir las inundaciones por el desbordamiento de los ríos y de la misma forma mitigar el gran impacto negativo que generan para la población. La Organización Meteorológica Mundial, indica que a nivel mundial el 55% de las muertes y el 86% de las pérdidas económicas más importantes entre 1970 y 2012 fueron causadas debido a acontecimientos hidrológicos extremos como lo es el desbordamiento de los ríos [10].

En ese orden de ideas, es evidente ver que la alta probabilidad de ocurrencia de un desastre natural por inundación, se da por la relación entre las condiciones naturales y el impacto de la población hacia este, por tal motivo al enfrentar un suceso de dicha magnitud no solo es suficiente tener estudios que determinen simplemente las zonas afectadas por dichos evento, “la aplicación de estudios determina las zonas afectadas, pero las condiciones naturales cambiantes dificultan los

procesos de planeación y planes contingentes a estos desastres, volviéndolos obsoletos para eventualidades actuales” [7]. Según esto, se hace necesario obtener un estudio que no solo proporcione información, sino que a su vez mediante el uso de un Software se pueda actualizar dicha información y así poder tener una fácil interpretación para quienes lo utilizan con el fin de poder tomar decisiones concretas y establecer planes de Gestión de Riesgo frente a este fenómeno.

Teniendo en cuenta esto, es pertinente mencionar que en el municipio de Floridablanca específicamente en los barrios Villa jardín, Santa Coloma, Villa Piedra del Sol, Colegio Agustiniano, los cuales son aledaños al Río Frío que pertenece a la Microcuenca de Río Frío, se han presentado en las últimas dos décadas dos eventos de inundación, estos han tenido un gran impacto negativo para la comunidad de este sector trayendo consecuencias como daños a vías de acceso, daños a sistemas de abastecimiento de agua potable, daños a propiedad privada, índice de mortalidad, entre otros, así lo informó la Unidad de Gestión del Riesgo de Floridablanca “son 60 familias las afectadas por la avalancha del Río Frío provocada por las fuertes lluvias presentadas en la madrugada del 28 enero de 2020” [11].

A su vez, la ciudad de Bucaramanga cuenta con un estudio para el análisis de las amenazas por inundación en la cuenca baja y media del Río Frío realizado por la Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga en el 2010, en el cual no se contempla el ultimo evento de inundación ocurrido el 28 de enero del 2020 debido a su antigüedad, por ende, existe una incertidumbre sobre la posibilidad de un nuevo evento de inundación así como de las causas o factores que ocasionaron dicho fenómeno. Teniendo en cuenta que el municipio de Floridablanca no cuenta con un estudio actualizado y que el POT que está actualmente en vigencia hasta el 2022 no contempla el último evento de inundación, se considera que se debe realizar un estudio en el cual mediante el uso de un SIG relacione los dos últimos eventos de inundación para

el análisis de las amenazas por inundación de la Microcuenca del Río Frío en los barrios mencionados anteriormente para poder determinar cuáles zonas del municipio de Floridablanca cercanas al Río Frío presentan una mayor posibilidad de riesgo o amenaza de inundación teniendo en cuenta las características y los factores propios que componen y rodean dicho Río.

## **1.2 Justificación**

Las inundaciones se presentan por diversos factores, principalmente por fuertes precipitaciones en lugares de grandes pendientes, por la baja capacidad de retención de sedimentos debido a la deforestación del lugar o la invasión de las llanuras de inundación de los ríos por parte de las construcciones urbanas generando así acumulaciones de agua [12].

Según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, las inundaciones repentinas son frecuentes en ríos de zonas montañosas con bastante pendiente, y muchas veces se producen a causa de los fuertes aguaceros sobre los terrenos débiles o sin vegetación los cuales aceleran la formación de deslizamientos en las montañas cercanas al cauce de los ríos y quebradas [11].

Es por esto por lo que la implementación de nuevas tecnologías para el análisis de las inundaciones es de vital importancia para prevenir y mitigar los impactos negativos que se puedan presentar. Los medios más óptimos para llevar a cabo dichos análisis son los Sistemas de Información Geográfica, como lo demuestra el Ing. Romero Alfonso en su trabajo de titulación especial previo a la obtención del título de Magister en Gestión de Riesgos, en el cual por medio del SIG se analizan resultados y se identifican los factores que más predominan en las zonas con mayor amenaza de inundación y a su vez, se identifican las áreas más afectada en la zona analizada permitiendo generar estrategias para la prevención y mitigación de riesgos de inundación [13].

Teniendo en cuenta lo anterior, el municipio de Floridablanca, específicamente en el sector de Villa Piedra del Sol y sus barrio aledaños cuenta con un estudio realizado por la CDMB en el 2010 para la zonificación de las amenazas por inundación, sin embargo, el municipio de Floridablanca no cuenta con un estudio actualizado que basado en la información proporcionada por las bases de datos y la obtenida en campo, relacione mediante el SIG los dos últimos eventos de inundación con el fin de obtener un análisis de las zonas con mayor amenaza de inundación y las posibles causas que generaron estos sucesos.

Es por esto que se presenta la necesidad de mitigar los riesgos y las afectaciones ocasionadas por las inundaciones del Río Frío las cuales afectan no solo física si no económicamente a la población del sector, por lo cual este trabajo se basa en proporcionarle a la comunidad y a las entidades encargadas a través del uso de un Sistema de Información Geográfica, un análisis comparativo de los eventos de inundación de mayor impacto negativo de las últimas dos décadas, junto con las zonas con mayor amenaza de inundación de la Microcuenca del Río Frío con el fin de servir al municipio de Floridablanca como un insumo para poder prevenir y mitigar las consecuencias que trae consigo un desastre natural de este tipo.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Analizar las zonas urbanas con mayor amenaza por inundación de la microcuenca del Río Frío específicamente en el sector de Santa Coloma y barrios aledaños mediante la modelación de los eventos de inundación de gran impacto negativo presentados en las dos últimas décadas.



### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Recopilar la información cartográfica, hidrológica y demográfica de la microcuenca del Río Frío para obtener información útil en la generación y el análisis de los mapas de inundación.

Generar mapas de eventos de inundación mediante el procesamiento de la información recolectada de las bases de datos, cálculos requeridos y observaciones obtenidas en campo.

Determinar el nivel y la probabilidad de amenaza por inundación analizando los mapas de amenaza obtenidos del SIG relacionándolos con la información de este tipo proporcionada por el POT vigente del municipio de Floridablanca.

## **2. Marco referencial**

### **2.1 Antecedentes de investigación**

En lo que concierne a los antecedentes tanto a nivel nacional como internacional existen varios referentes que hacen alusión al tema de la investigación. Esto es reflejado en Khattak, M. et al. un artículo titulado “Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcGIS: A Case Study of Kabul River” [14] donde se hace uso del Software hidrológico HECRAS con el fin de desarrollar mapas de llanura de inundación para el Río Kabul el cual ha experimentado inundaciones afectando a la provincia de Khyber, es por esto, que en el artículo se realizan modelos por medio de los periodos de retorno para determinar los niveles de inundación correspondientes a lo largo del río para así proteger las áreas más vulnerables. Este documento es de gran importancia debido que no solo se encuentran los procesos de identificación de niveles de inundación, sino también se plasman estrategias para la toma de decisiones de manera rápida, oportuna y precisa con el fin de prevenir mayores daños en un posible evento de mayor magnitud.

También, Larry, R., Juan, C. en el artículo “Zonificación de la amenaza por inundaciones en la planicie aluvial del río Borburata, estado Carabobo, Venezuela” [15] desarrolla una investigación por la Universidad Pedagógica Experimental y publicada en la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe (Redalyc), esta, se basa en la identificación de las zonas de amenaza por inundación teniendo en cuenta datos pluviométricos y haciendo usos de los modelos digitales de elevación para representar los escenarios de las precipitaciones ocurridas para de esta forma identificar las áreas con alta amenaza por inundación. El desarrollo de este trabajo es importante para esta investigación debido a que en las fases de su metodología se evidencia la relación de variables o características del río con el uso de las herramientas SIG para la generación de mapas de riesgo por inundación.

Otro artículo de relevancia titulado “Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e hidráulicos y técnicas SIG; Estudio aplicado al litoral sur de la región de Murcia” [16] por parte de Rafael, G., Carmelo, C. desarrollado en la Universidad de Murcia, España, resalta que la información recolectada para el desarrollo de su metodología son datos (cartográficos e hidrológicos) que se emplean o se combinan con técnicas SIG en software tales como Hec- Ras, Hec- GeoRas, entre otros, para la estimación de avenidas y la identificación de las áreas más propensas a inundarse en el sector estudiado, aportándonos diferentes factores y variables a tener en cuenta en el análisis de riesgo por inundación.

Así mismo, el aporte por parte de Anders, P., Juan, W., Yaismil, R. en el artículo la “Importancia de los modelos digitales del terreno en la simulación hidráulica de inundaciones” [17] publicado por la revista cubana de ingeniería presenta una importante relación y relevancia para la presente investigación debido a que, en este se muestra la influencia y precisión de los

Modelos Digitales del Terreno MDT o también conocidos como Modelos digitales de Elevación DEM para la simulación de inundaciones, validando de esta forma la importancia del desarrollo de dicho modelo en el análisis de riesgo por inundación.

Para finalizar, Fuentes, G. en el artículo “Generación de mapa de áreas inundables mediante el SIG en la Cuenca Baja del Río Anchicayá Valle del Cauca” [18] documento realizado por la Universidad Católica de Colombia donde se plantean las afectaciones en la población e infraestructura por parte de la cuenca del Río Anchicayá y la evaluación de estas por medio de Sistemas de Información Geográfica. Para el desarrollo del problema se digitalizó un modelo de elevación DEM de las zonas afectadas procesados en ArcGis, así mismo, se obtuvieron datos hidrológicos de estaciones del IDEAM y procesados en HYFA cumpliendo con la normativa ISO 9000 para obtener los periodos de retorno y determinar los caudales esperados para cada año analizado y así generar un mapa de inundación obteniendo propuestas de prevención y mitigación ante una posible inundación.

La importancia del documento es el procesamiento de los datos hidrológicos de las estaciones del IDEAM por medio de un Software a fin de determinar los periodos de retorno y a su vez los caudales en los posteriores años, una vez obtenidos estos datos se realizarán los mapas de inundación.

## **2.2 Marco teórico**

Los riesgos asociados a los fenómenos de inundación poseen características que afectan significativamente la integridad y la economía de las personas, estos tipos de eventos para ser considerados como una amenaza deben ocurrir a una escala o magnitud capaz de afectar a

cualquier elemento que este expuesto a este, es por esto que es de gran importancia identificar las diferentes características que presentan las diferentes zonas de estudio [19].

Tener claro el concepto de todos los factores presentes alrededor el objeto de estudio es de vital importancia para poder entender la relación y la función que cumplen a lo largo del desarrollo del proyecto y la forma en como estos se ven implicados en la toma de decisiones.

### ***2.2.1 Inundaciones***

Según Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, existen diferentes tipos de inundaciones dadas por eventos pluviales (concentración de precipitaciones en una zona particular), fluviales (desborde de ríos) y costeras (intensidad de vientos) ocurridos usualmente por intensas precipitaciones [20]. Las intensas precipitaciones son dadas por lluvias constantes y propagadas que generan un aumento progresivo del caudal ocasionando desbordamiento [21] y estas se deben básicamente a una falta de planeación de las actividades humanas que alteran el medio de forma acelerada propiciando este tipo de fenómenos.

### ***2.2.2 Prevención y mitigación del riesgo por inundación***

Según Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, para las mitigaciones del riesgo por inundación se presentan las gestiones de riesgo para su evaluación para impedir o evitar que se genere, se reduzca o pueda ser controlado, asimismo, se tiene en cuenta la rehabilitación y reconstrucción para garantizar la seguridad, bienestar y calidad de vida de las personas [20].

- Factores de riesgo y vulnerabilidad: existen sectores de gran vulnerabilidad según Dirección de Gestión de Riesgo de Santander, para dichos eventos debido a la presencia de bajas

pendientes, pérdidas de drenados asociados a las cuencas y microcuencas, pérdida de cobertura vegetal, disminución de la capacidad del almacenamiento de aguas subterráneas y superficiales, ocupación de las zonas de amenaza por inundación, falta de planeación del uso del suelo y mal funcionamiento de la infraestructura hidráulica [22].

- Estrategias para la gestión de riesgo: según la Dirección de Gestión de Riesgo de Santander, es importante tener un conocimiento del riesgo para identificarlo, monitorear sus puntos críticos y realizar una modelación hidrológica de las cuencas para así reducir el riesgo mediante la construcción de obras de defensa y prevención de las inundaciones en los puntos críticos [22].

### ***2.2.3 Mapas de inundación***

Los mapas de inundación tienen como objetivo proveer información de eventos pasados o la extensión probable de inundación y sus respectivos impactos para la ayuda en tomas decisiones. Existen diversos tipos de mapas en función de la información disponible, estos pueden ser mapas susceptibles de inundaciones, eventos de inundaciones, amenaza de inundación, zonificación de amenaza por inundación, vulnerabilidad de inundación, riesgo de inundación y emergencia de inundación [21].

- Mapas de amenaza por inundación: son medidas preventivas no estructurales para la gestión del riesgo de inundaciones, este provee información gráfica de la inundación esperada, tal como, alturas de la lámina de agua, profundidades, velocidades del flujo, extensión de la inundación y tiempo de permanencia. Esta consta según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de cinco pasos para la realización obtención de información gráfica de un evento ocurrido, modelación hidrológica, obtención de un modelo digital de terreno, modelación hidráulica y generación de mapas de profundidad y velocidad [21].

### 2.2.4 Cuenca hidrográfica

Es el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar [23].

**2.2.4.1 Período de retorno:** es la probabilidad de ocurrencia de un evento en un periodo determinado, puede ser cualquier evento extremo como lluvias, huracanes, temperaturas que se presenten de manera frecuente en intervalos, duración o números de años en promedio [24].

**2.2.4.2 Método de Gumbel.** Es un método estadístico que considera que el caudal máximo anual, es una variable con una determinada distribución, por medio de él se puede estimar su relación con un periodo de retorno en específico [25]. La expresión para determinar dicha relación es:

$$Q_{max} = Q_m - \frac{\delta Q}{\delta N} (Y_N - \ln T) \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

$Q_{max}$ : Caudal máximo para periodo de retorno ( $m^3/seg$ ).

$Q_m$ : Promedio de caudales ( $m^3/seg$ ).

$\delta Q$ : Desviación estándar de los caudales.

$\delta N$ : Constante en función de N. Ver *apéndice 1. Figura 1. Valores de  $Y_n$  y  $\delta N$ .*

$Y_n$ : Constante en función de N. Ver *Apéndice A. Figura 1. Valores de  $Y_n$  y  $\delta N$ .*

$T$ : Tiempo de retorno (años)

El caudal de diseño surge de la sumatoria del caudal máximo y la variación estándar( $\Delta Q$ ) el cual depende del intervalo de confianza  $\Phi$  que es la variación de seguridad de dicho caudal máximo [25] dado por la siguiente condición:

Si  $0.2 < \Phi < 0.8$  se usa:

$$\Delta Q = \sqrt{N\alpha} \delta_m \frac{\delta Q}{\delta N \sqrt{N}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

$N$ : Número de años de registro.

$\sqrt{N\alpha} \delta_m$ : constante en función de  $\Phi$ . Ver *Apéndice 2. figura 2. Valores de  $\sqrt{N\alpha} \delta_m$  en función de  $\Phi$ .*

$\delta N$ : Constante en función de  $N$ .

$\delta Q$ : Desviación estándar de los caudales.

Si  $\Phi > 0.90$  se usa:

$$\Delta Q = \frac{1.14 * \delta Q}{\delta N} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Obteniendo:

$$Qd = Q_{max} + \Delta Q \quad \text{Ecuación 4.}$$

**2.2.4.3 Pendiente media de la cuenca (s).** Es la variación en la inclinación de una cuenca la cual se estima con base en un plano que represente las diferentes alturas o desniveles del terreno (Plano topográfico) y es importante ya que define el comportamiento del desplazamiento de las capas de suelo en dicha cuenca [26].

**2.2.4.4 Método de Taylor Schwarz.** Es un método que permite determinar la pendiente media del cauce de una manera detallada, dividiéndolo en tramos de longitudes similares y sus respectivas pendientes [26].

$$S = \left[ \frac{L}{\sum_i^n \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

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

*L*: Longitud del cauce principal de la cuenca (m)

*Li*: Longitud de cada uno de los tramos (m)

*Si*: Pendiente de cada uno de los tramos en que se subdivide la longitud del cauce principal (m /m).

**2.2.4.5 Tiempo de concentración (Tc).** Se define como el tiempo que demora en llegar una gota de precipitación desde el extremo más alejado de la cuenca hasta el final o desembocadura de esta [27]. Un método usado para su estimación es el método de Kirpich de 1942:

$$Tc = 0.066 * \left[ \frac{L}{\sqrt{S_o}} \right]^{0.77} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (horas).

L: Longitud del cauce principal hasta la divisoria.

So: Pendiente promedio del cauce principal (m/m).

### 2.2.5 Sistema de información geográfica

El Sistema de Información Geográfica SIG según Ávila, Carvajal y Sedano captura, almacena, analiza, gestiona y representa datos vinculados a una locación, es una herramienta



vinculada a la planificación territorial y la resolución de problemas socioeconómicos y ambientales por medio de la interpretación de variables que tiene datos referenciados [28]. Se utilizan datos topográficos, edafológicos, hidrológicos, climáticos, uso de suelo, vegetación, modelación hidrológica e hidráulica para la recolección y alimentación de datos de un SIG [29].

- *Aplicación del SIG en el análisis de riesgo de inundación.* A través del uso de las herramientas de los sistemas de información geográfica se pueden crear mapas de riesgo de inundación los cuales representen las áreas afectadas por este fenómeno ocurrido o próximo a ocurrir, así lo menciona Romero “A través de los SIG, se crean bases de datos organizadas y clasificadas con los diferentes datos de la zona, que ofrecen la ventaja de crear diferentes mapas temáticos por superposición de capas.” [13].
- *Quantum gis en la generación de mapas de inundación.* Este sistema ofrece una gran cantidad de fundiciones que nos permite según Avendaño, Cadena dar como resultado un análisis de las condiciones reales facilitando la toma de decisiones en las zonas donde se presentan los desastres por medio de mapas de elevación, pendientes, zonas de inundación con los cuales se determinan los comportamientos de las zonas de inundación y se logran los mapas de las cuencas hidrológicas según la necesidad en tiempo real [29].
- *HEC-RAS en los modelos dinámicos de inundación.* En este sistema se permite modelar perfiles del agua, es uno de los modelos comúnmente más utilizados para estudios hidráulicos debido a su flexibilidad en la creación de escenarios hidráulicos, su rapidez de cálculos y su operación [30].

### **2.3 Marco Conceptual**

Un factor importante dentro del análisis de los riesgos asociados al fenómeno de inundación es la detallada caracterización de los componentes urbanos de las zonas cercanas a

dichos afluentes para determinar los posibles riesgos y un mejor manejo de las afectaciones. Además de esto, es de igual importancia la caracterización de los factores hidrológicos de las zonas por donde pasan dichos afluentes, los cuales se originan en las cuencas o microcuencas existentes en la región [31].

### **2.3.1 Identificación y caracterización del Río Frío**

Según el Plan de Ordenamiento Territorial Revisión general, la cuenca principal del Municipio Floridablanca es la cuenca superior del Río Lebrija compuesta por dos subcuencas llamadas Río Frío y Río de Oro bajo, en donde Río Frío se divide en cuatro microcuencas entre ellas la cuenca del Río Frío Alto y la cuenca de Río Frío Bajo [32].

A continuación, se presenta el mapa de las principales fuentes de captación hídrica para Bucaramanga y Floridablanca:

**Figura 1.** Principales fuentes de captación hídrica para la ciudad de Bucaramanga y el municipio de Floridablanca



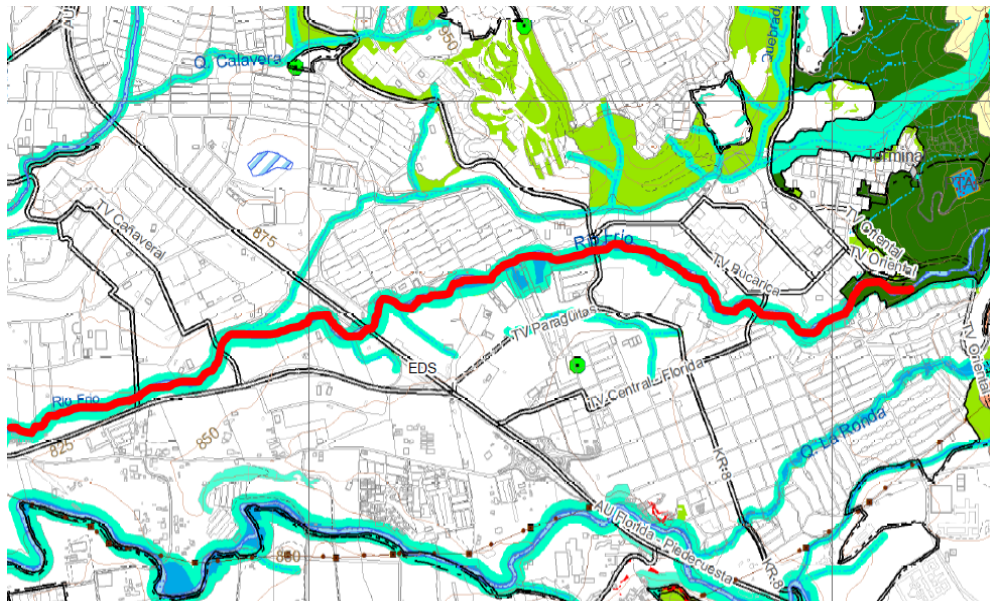
Adaptado de “Gestión integral del agua”, por Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB, 2017).

**2.3.1.1 Ubicación y delimitación.** El Río Frío es uno de los afluentes más importantes que atraviesa por el municipio de Floridablanca y de acuerdo con la Contraloría Municipal de

Floridablanca, la microcuenca del Río Frío nace en el Municipio de Floridablanca en un sitio llamado la corcova ubicado a 3050 m.s.n.m. específicamente en la divisoria de aguas con los Ríos Tona y Lato, abarca un área de 11820 Hectáreas aproximadamente con una longitud de 30.1 kilómetros ubicándose en el costado oriental de la subcuenca del Río de Oro [33].

En la trayectoria del Río Frío a través del municipio de Floridablanca se puede observar que abarca gran parte de componentes urbanos, la trayectoria por este sector corresponde a la microcuenca del Río Frío demarcada por un color rojo a través de algunos barrios del municipio de Floridablanca, junto con otros afluentes cercanos a este:

**Figura 2.** Trayectoria del Río Frío a través de las zonas urbanas de Floridablanca



Adaptado de “Plan de ordenamiento territorial revisión general Floridablanca”, por Alcaldía de Floridablanca (POT, 2018).

### ***2.3.2 Caracterización de las zonas aledañas al Río Frío***

Esta trayectoria, pasa específicamente por las zonas y barrios Floridablanca, Bucarica, Santa Coloma, Villa piedra del sol, Lagos 2, Autopista Floridablanca-Piedecuesta y Autopista Anillo vial-Girón.

- *Vulnerabilidad de la urbanización cercana.* Específicamente estos componentes urbanos cercanos a lo largo del Río Frío están conformados por viviendas, instituciones educativas privadas y públicas, centros de salud, construcciones civiles como intercambiadores, vías, entre otros, sin embargo, los componentes urbanos más afectados por los fenómenos de inundación se encuentran en el sector comprendido entre la Autopista Floridablanca- Piedecuesta hasta el barrio Santa Coloma.
- *Amenazas y antecedentes por inundación.* De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial Revisión General, uno de los componentes geográficos desde los cuales se analiza la amenaza por inundación es la zona que pertenece al casco urbano del municipio de Floridablanca y su área de influencia, teniendo en cuenta que las amenazas para una zona urbana pueden ser bajas, medias o altas en donde para el sector del barrio Lagos se clasifica como media. Se tiene en cuenta que en este sector han ocurrido en las últimas dos décadas, dos eventos de inundación que trajeron consigo impactos negativos de gran consideración aumentando la incertidumbre y vulnerabilidad de la población de dicho sector [32].

### ***2.3.3 Hidrología de la microcuenca del Río Frío***

Según el Plan de Ordenamiento Territorial Revisión General, “la subcuenca del Río frío está conformada por las microcuencas de río Frío Bajo, Río Frío Alto, Zapamanga y Aranzoque Mensulí” [32]. La precipitación propia de dicho sector del Río

Frío es aportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y son obtenidas mediante estaciones hidrológicas más cercanas al Río Frío. Estas estaciones cerca al Río Frío existen 5 estaciones las cuales proporcionan información sobre las precipitaciones medias mensuales y anuales, las cuales son: a) Estación La Galvicia (2319040) b) Estación Piedecuesta (2310970) c) Estación Palo Gordo (2319028) d) Estación Llano Grande (2319511) e) Estación El Pantano (2319060) f) Estación Apto Palo Negro (2319513) [34].

Al ser información gratis y disponible al público en general, dichas estaciones meteorológicas están sujetas a ausencias en los registros de datos de precipitación, es por esto que para rellenarlos y tener datos pluviométricos completos en el periodo requerido se debe emplear un método de rellenado tal como el método de la distancia inversa ponderada o por sus siglas en inglés *inverse distance weighting*, (*IDW*) el cual se lleva a cabo asignando valores a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa [35] .Su fórmula es:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} \right)} \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde:

$Z_p$ : Valor estimado para el punto P.

n: Número de puntos usados en la interpolación.

$Z_i$ : valor o el dato en el punto i conocido

$d_i$ : La distancia del punto i conocido al punto P.

P: Es una potencia que varía entre 1 y 2.

## **2.4 Marco legal**

Llevar a cabo un estudio de análisis de las zonas urbanas con amenaza por inundación, requiere contemplar parámetros o aspectos legales los cuales están establecidos en resoluciones planteadas por el gobierno de cada país los cuales garantizan el cumplimiento de los requisitos mínimos de dichos estudios con el fin de tener productos o resultados confiables y de calidad ya que son estos la base para plantear proyectos que involucren la calidad de vida de la sociedad.

### ***2.4.1. Requisitos mínimos para el análisis de amenaza por inundación***

De acuerdo con el Decreto 1077 los estudios básicos que tratan este tema deben tener especificaciones mínimas tales como: a) El área de estudio b) Los insumos c) El alcance d) Los productos para los cuales “se elaboran mapas de zonificación de amenaza por inundaciones” (p.322). Dentro de los insumos se debe contemplar parámetros como: a) la Geomorfología b) Modelos de elevación c) Hidrología d) Identificación de zonas inundables [36].

### ***2.4.2. Parámetros para la zonificación de áreas con amenaza por inundación***

Dentro de los parámetros indispensables para realizar la zonificación de áreas con amenaza por inundación, según el Plan de Ordenamiento Territorial Revisión General se deben tener un mapa hidrológico de la zona, un mapa hidrogeológico, el mapa de pendientes y las cuencas o microcuencas a la que pertenece el objeto de estudio junto con sus redes de drenaje o afluentes que llegan al mismo [32].

### ***2.4.3 Parámetros para la categorización de la amenaza y niveles de inundación***

- De acuerdo con la resolución 1294 del 29 de diciembre del 2009 de la CDMB, los niveles de amenaza alta, media y baja para eventos de inundación se categorizan como se muestra a continuación [8]:
- Zona de amenaza alta: Es aquella zona afectada por la creciente básica de diseño, es decir el periodo de retorno de 100 años.
- Zona de amenaza media: Es la zona que se encuentra entre la creciente básica y máxima de diseño, es decir no es afectada por el periodo de retorno de 100 años, pero si por el periodo de retorno de 500 años.
- Zona de amenaza baja: Es aquella zona que no es inundada por ninguna creciente de diseño.

## **3. Metodología**

Para la realización final del proyecto se tuvo en cuenta principalmente la identificación de parámetros de diseño y ejecución de este, estos parámetros son esenciales para definir y tener claridad en el tipo y qué diseño de investigación se realiza, junto a la población y la muestra sobre donde se realizará la toma de datos, el lugar de la investigación y los instrumentos para la recolección de datos.

Se obtiene un tipo de investigación cuantitativa descriptiva gracias a que la base del desarrollo de esta fue la recolección de datos digitales para ser procesados por los diferentes softwares requeridos junto a la descripción de características propias de los eventos de inundación de la microcuenca del Río Frío. La medición de variables se realizó por medio de la observación en la recolección de datos de las entidades encargadas del manejo de estos clasificando la investigación como tipo no experimental junto a transversal y correlacional – causal debido a que

los datos que se recolectaron y se obtuvieron por única vez con fin de analizar la relación de las variables en el momento de su recolección y la descripción de la relación entre estas variables para identificar las causas y efectos que traían.

En la investigación se identificó la población presente en esta la cual fue principalmente la Microcuenca del Río Frío, la población del municipio de Floridablanca y las estructuras o construcciones privadas y públicas del municipio de Floridablanca, a su vez, se identificó la muestra de la investigación como tipo probabilística ya que se determinaron de manera aleatoria los resultados y se tiene en cuenta como muestras la zona de la microcuenca que abarca el recorrido del Río Frío, la población del municipio de Floridablanca cercana al Río Frío y las construcciones privadas y públicas cercanas al Río Frío del municipio de Floridablanca.

Teniendo en cuenta la descripción del proyecto de investigación se desarrolla las fases propuestas y se plantea una ruta a seguir donde se pueda observar la forma en cómo se realizó el proyecto y sus resultados finales, estos procedimientos fueron requeridos para lograr los objetivos planteados en dicho proyecto de investigación. La metodología consta de cinco etapas (ver figura 3) donde se evidencia los procesos que se debían realizar para poder llegar los entregables que contará el proyecto para así por medio de los análisis requeridos obtener el resultado final del proyecto de investigación.

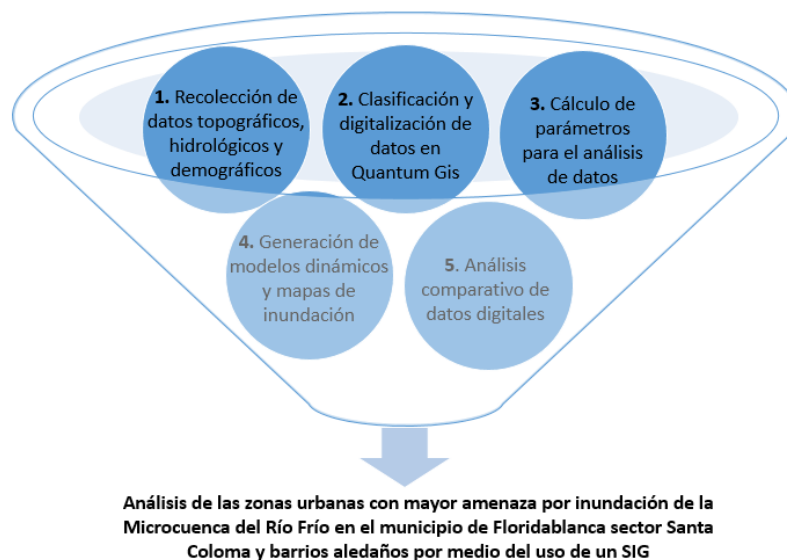
### **3.1. Recolección de datos topográficos, hidrológicos y demográficos**

Como primera instancia se realiza la recolección de la información necesaria para llevar a cabo dicho proyecto, se recolecta información topográfica, demográfica e hidrológica por medio de diferentes entidades que proporcionaron información para fines educativos. La recolección de información topográfica se realizó por medio del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi)



para la identificación de curvas de nivel de la zona para así poder identificar las áreas, la longitud del cauce, el área final y demás factores importantes a tener cuenta de información general de la microcuenca. Así mismo, se recolecta información necesaria sobre la densidad poblacional a través del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) para conocer más a fondo el número de personas que habitan el área de estudio, se extrajo información necesaria para conocer la densidad poblacional de los años 2005 y 2020, y también, se recolecta la información del tipo y uso de suelo en la misma entidad para conocer los porcentajes de área rural y urbana junto al uso del sector a estudiar para identificar sectores comerciales, institucionales y residenciales.

**Figura 3.** *Mapa conceptual de metodología*



Para finalizar, se recolectaron los datos hidrológicos gracias a los datos pluviométricos encontrados en las diferentes estaciones del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), la microcuenca del Río Frío no cuenta con estaciones pluviométricas cercanas activas por lo que para identificar las precipitaciones anuales del sector se debió tomar 4

estaciones cercanas y activas que estuvieran cerca de la microcuenca del Río Frío de Floridablanca, las estaciones tomadas en cuenta son 1. Galvicia, 2. Floresta LA, 3. Bucaramanga -IDEAM, 4. Llano Grande; La primera estación respectivamente, se encontraba justo en el límite de la microcuenca y las otras tres se encontraban ubicadas por fuera a más de 10 kilómetros de la misma, las cuatro se encuentran activas al 2021.

Estos datos fueron descargados directamente de la página oficial del IDEAM en formato Excel el cual fue organizado y distribuido por días, meses y años desde el 2005 hasta el 2020 con el fin de determinar los datos faltantes en cada estación para así proceder posteriormente a realizar el relleno de datos pluviométricos requeridos para el cálculo de los caudales.

### **3.2 Clasificación y digitalización de los datos en Quantum Gis**

Una vez obtenidos todos los datos de recolección necesarios para el desarrollo de la investigación se identifican los aspectos generales de la microcuenca del Río Frío lo cual es de gran importancia para un análisis asertivo y completo del sector, es por eso que, principalmente se delimita el sector a estudiar donde gracias a las curvas de nivel se logran identificar con mayor claridad los factores importantes y específicos a tener cuenta de información general de la microcuenca. Estos aspectos generales fueron reconocidos en el software QGIS (Quantum Geographic Information System) donde por medio de la delimitación de la cuenca se logró observar los parámetros requeridos y los afluentes a tener en cuenta por medio de la creación del polígono en la microcuenca en QGIS.

Teniendo como base esto, se crea el mapa hidrológico donde por medio de la herramienta polilínea de QGIS se sigue la forma topográfica y se identifica así el cauce principal del río y los afluentes secundarios que desembocan el río, una vez obtenido la representación del río principal

junto a sus afluentes se traza la divisoria de aguas la cual teniendo en cuenta la extensión de los afluentes que desembocan en el Río Frío y la topografía del terreno delimitó el área de drenaje de la microcuenca.

Identificados todos los parámetros principales de la microcuenca del Río Frío se realiza el modelo digital DEM mediante el uso de complementos de QGIS como lo es Demto3D donde se asignan los parámetros de diseño para la creación del modelo.

### **3.3. Cálculo de parámetros para el análisis de datos**

En la recolección de datos se obtuvieron los diferentes datos pluviométricos requeridos del IDEAM para todos los años requeridos, sin embargo, fue necesario realizar un relleno de datos de algunos días, meses o años de precipitaciones según la falta de datos en las diferentes estaciones utilizadas, este relleno de datos se hizo por medio del método IDW (Ponderación de distancia inversa) método utilizado para interpolación donde se estiman valores calculando promedios de los puntos de referencia [27], se tuvieron en cuenta como referencia para la interpolación tres estaciones cercanas junto a la distancia entre estas con respecto a la estación a la cual se iban a rellenar los datos, en este se consideran los promedios de las precipitaciones anuales y así se obtuvieron en totalidad las precipitaciones diarias desde el primer evento de inundación (2005) hasta el último evento de inundación (2020) de la microcuenca del Río Frío.

Después de rellenar las estaciones iniciales descargadas del IDEAM, se identificaron 3 estaciones dentro de la microcuenca ya que como se mencionó anteriormente tres de las cuatro estaban por fuera está, proporcionando debido a la distancia, cierto grado de imprecisión al momento del análisis; dichas “estaciones nuevas” encontradas al no estar activas actualmente no

presentaban registros de precipitaciones en el rango requerido, por lo cual se rellenaron utilizando el mismo método utilizado para las estaciones iniciales.

Una vez obtenidos los datos de las precipitaciones es necesario conocer los caudales diarios presentes en la microcuenca Río Frío desde el año 2005 hasta el año 2020 donde se puede observar con más precisión los caudales máximos presentes en este periodo para la generación de periodos de retorno de los diferentes eventos presentes, es por esto que por medio del software HEC-HMS el cual es el indicado para la modelación de procesos hidrológicos, se determinan los caudales donde con la identificación de los datos generales (morfológicos) de la microcuenca se ingresan al software junto con el ingreso de los datos anteriormente mencionados de precipitaciones con los tiempos establecidos para así identificar y señalar el modelo meteorológico que se utiliza en los años y por último poder obtener los promedios de los caudales con las precipitaciones obtenidas.

Para finalizar esta fase, se determinaron los periodos de retorno a analizar, se realizaron cálculos de periodos de retorno a 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años por lo que fue necesario utilizar el método de Gumbell donde identificados los caudales anuales promedio desde el 2005 hasta el 2020, la desviación estándar de los caudales, constantes en función de N y el tiempo de retorno a calcular, se aplica la ecuación para la obtención del caudal máximo para los diferentes periodos de retorno (Ver ecuación 1 – Método de Gumbell).

### **3.4 Generación de modelos dinámicos y mapas de inundación**

Teniendo los caudales diarios es importante realizar una modelización hidráulica para la simulación de los eventos de inundación ocurridos y los posibles eventos, para esto se utiliza el software HEC-RAS en el cual se importa el modelo digital de elevación DEM obtenido en QGIS, una vez identificado este modelo en HEC-RAS se procede a dibujar la grilla o geometría la cual

indica el sector por donde pasa el cauce principal de la microcuenca del Río Frío y de esta manera identificado el cauce se introdujeron las dos condiciones de borde del Río la cual delimita aguas arriba y aguas abajo para así introducir posteriormente las condiciones de flujo que representan los caudales diarios arrojados por el software HEC-HMS para finalmente obtener los modelos dinámicos los cuales serán la representación aproximada de la inundación para los eventos ocurridos en el año 2005, 2020, y el periodo de retorno más crítico según los resultados de los cálculos realizados.

Una vez obtenidos los modelos dinámicos de inundación en HEC-RAS, se dibuja la representación de dicha inundación en el software QGIS donde por medio del uso de sus herramientas se obtiene para cada evento su respectivo mapa de inundación, permitiendo la relación con los demás datos digitales ya establecidos en el software y de esta manera, una mejor interpretación de los mismos.

Además de esto, para realizar un análisis más completo de los eventos, se dibuja otro mapa de inundación para el evento del 2020 pero esta vez teniendo en cuenta datos basados en información teórica obtenida de los registros y antecedentes de dichas inundaciones, permitiendo determinar en campo puntos de referencia del alcance de la inundación y de esta forma las distancias de los mismos, también para la construcción de este mapa se tiene en cuenta la percepción de algunas personas habitantes del sector Santa Coloma- Villa piedra del sol (Sector más afectado), acerca del evento lo cual permite retroalimentar la distancia o alcance de dicha inundación.

### **3.5 Análisis comparativo de datos digitales**

Una vez obtenidos todos los mapas dinámicos y de inundación se procede a realizar el respectivo análisis donde inicialmente se superponen los mapas de inundación del evento del 2005, 2020 y de la información recogida en campo donde activando las capas de cada uno en QGIS se pueden relacionar y analizar entre sí para identificar las áreas de inundación en común que se presenta en cada mapa dinámico y observar la evolución de nuevas áreas de inundación del sector. Se realiza un análisis comparativo entre eventos presentados para conocer con mayor exactitud qué zonas aumentan y disminuyen en inundación para así identificar factores influyentes en estos resultados, además de esto, teniendo en cuenta la resolución 1294 del 29 de diciembre del 2009 de la CDMB se puede categorizar el nivel de amenaza por área clasificándolas en niveles altos, medios y bajos basados en la superposición de los modelos de los periodos de retorno de 100 y de 500 años y de esta manera por medio de una escala de colores se puede identificar las zonas de mayor a menor amenaza de inundación. Para finalizar, una vez obtenidos todos los datos, analizados y comparados entre sí, se comparan con información recopilada del POT (Plan de Ordenamiento Territorial) vigente del municipio para identificar posibles similitudes o en su defecto diferencias entre los datos obtenidos y los datos otorgados por el municipio a fin de generar conclusiones y otorgar información extra para posibles análisis futuros.

## **4. Resultados**

### **4.1 Recolección de datos topográficos, hidrológicos y demográficos**

El primer instrumento de recolección de datos utilizado fue el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a través del cual en la sección “Datos abiertos” - “ Cartografía y geografía” -

“Colombia en mapas” se descargó un archivo comprimido en el que se encontraban varios archivos pero con diferentes tipos de extensiones de las curvas de nivel de una parte del departamento de Santander, de los cuales filtró y se seleccionó el archivo con extensión “.shx” ya que es el archivo principal que más adelante nos iba a mostrar dichas curvas de nivel en el software en Quantum Gis.

Además de la información topográfica, en dicho archivo comprimido también reposaba la cartografía de los drenajes principales y secundarios del mismo sector de las curvas de nivel del departamento Santander los cuales tenían por nombre “Drenaje\_doble” y “Drenaje\_sencillo” y al igual que con las curvas de nivel se seleccionó el archivo con el mismo tipo de extensión “.shx”. Para visualizar los archivos de las curvas de nivel y afluentes *Ver apéndice 1. Datos digitales de la Microcuenca- bases de datos.*

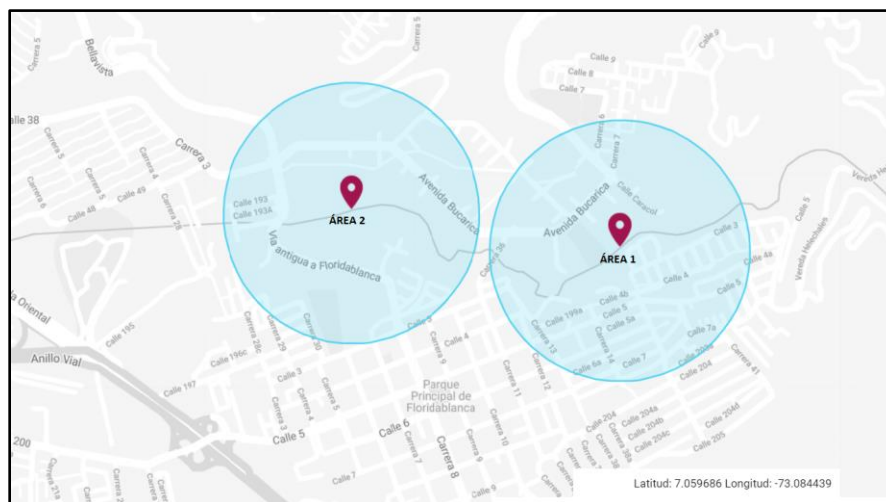
En la recolección de la información hidrológica el instrumento de recolección de datos utilizado fue el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por medio del cual se descargaron los datos de precipitación para la Microcuenca del Río Frío los cuales provenían de las estaciones meteorológicas cercanas a dicha microcuenca.

Para llevar a cabo esta investigación fue necesario contar con un mínimo de 4 estaciones meteorológicas las cuales se seleccionaron teniendo en cuenta dos requisitos tales como: la proximidad con el Río Frío y su estado activo entre el periodo 2005 - 2020 con el fin de garantizar una mayor precisión y un registro completo de los datos respectivamente.

Las estaciones existentes más próximas al Río Frío de las cuales se descargaron los datos de precipitación en el rango de tiempo requerido tienen por nombre “Bucaramanga IDEAM” “Floresta LA” “Llano Grande” y “Galvicia LA”. Para visualizar los archivos descargados de los datos pluviométricos originales *ver apéndice 2 Datos originales de precipitación.*

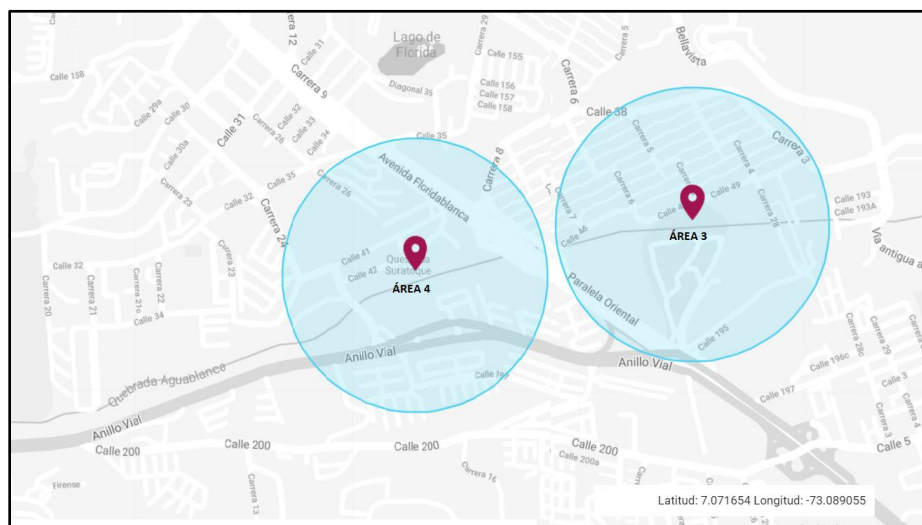
En la recolección de la densidad poblacional y el tipo y uso de suelo para los años 2005 y 2020 se utilizó la herramienta Geovisor de análisis espacial del DANE en la cual se colocó un marcador en la ubicación geográfica del objeto de estudio y se dibujó un radio arbitrario de 350 metros alrededor de dicho marcador obteniendo los datos demográficos, cabe resaltar que dicho marcador se colocó en puntos específicos a lo largo del recorrido del Río Frío donde se consideró que la densidad poblacional era mayor:

**Figura 4.** Áreas 1 y 2 sector Bucarica -Floridablanca



*Nota:* Identificación de áreas y zonas de estudio para la realización del trabajo de investigación.



**Figura 5.** Áreas 3 y 4 sector Lagos – Anillo Vial

*Nota:* Identificación de áreas y zonas de estudio para la realización del trabajo de investigación.

Las *figuras 4 y 5* representan las áreas de ciertos sectores a lo largo del Río frío sobre las cuales se obtuvieron los datos demográficos presentados a continuación.

**Tabla 1.** Datos demográficos sectores aledaños al Río Frío año 2005

Datos demográficos sectores aledaños al Río Frío año 2005				
Área	Datos de personas		Datos de vivienda	
	Población total	Casas	Apartamento	Tipo Cuarto
Área 1	13185	1367	1950	40
Área 2	9230	685	1778	18
Área 3	9707	1294	894	49
Área 4	7507	962	1166	7

*Nota:* Los datos presentes en esta tabla fueron extraídos del análisis geoespacial del Censo Nacional de Población y Vivienda 2005 (CNPV2005).

Una vez obtenidos los datos demográficos del año 2005, se utilizó nuevamente la herramienta Geovisor de análisis espacial para encontrar los datos correspondientes al censo del

2018, cabe resaltar que, al momento de buscar datos más actualizados, la herramienta del DANE presentaba información más detallada y clasificada como se muestra a continuación:

**Tabla 2.** Datos demográficos sectores aledaños al Río Frío año 2018

Datos demográficos sectores aledaños al Río Frío año 2018							
Área	Datos de personas	Datos de vivienda			Datos de edificaciones		Unidad No residencial
	Población total	Casas	Apartamento	Tipo Cuarto	Vivienda	Mixto	
Área 1	11774	1685	2543	54	4220	69	279
Área 2	8492	736	2342	46	3072	53	254
Área 3	8889	1451	1447	54	2877	75	186
Área 4	9101	1170	2426	21	3608	11	111

*Nota:* Los datos presentes en esta tabla fueron extraídos del análisis geoespacial del Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 (CNPV2018).

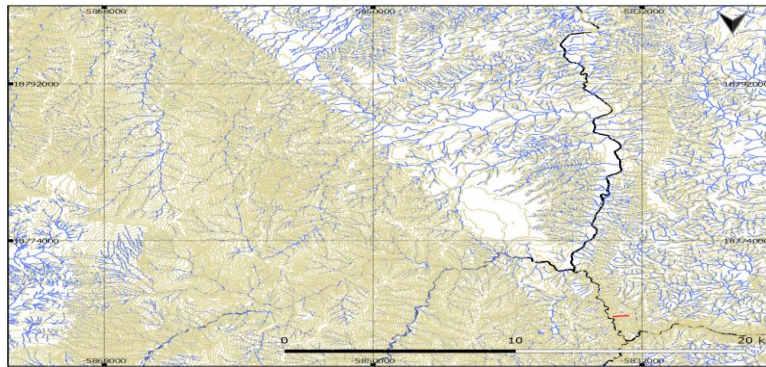
#### 4.2 Clasificación y digitalización de los datos en Quantum Gis

Una vez recopilada toda la información de tipo digital se crearon las capas o “layers” para cada uno de los archivos recolectados haciendo uso de la herramienta “New shapefile layer” y definiendo para cada una de ellas las propiedades o los atributos específicos como por ejemplo el color, grosor, transparencia, etiquetas y el sistema de coordenadas.

Para la digitalización de las curvas de nivel se escogió un color café claro y para los afluentes principales y secundarios se escogió un color negro y azul oscuro respectivamente, lo cual permitió identificar las zonas de mayor y menor altura, así como el curso de todos los afluentes presentes en la zona de estudio, es importante mencionar que la imagen mostrada a continuación son los datos originales descargados de las curvas de nivel y afluentes principales y secundarios ya digitalizados en el software Quantum Gis del sector de estudio el cual fue ubicado haciendo uso de la herramienta “open layer plugin” o complementos de capa, activando el complemento

“Google maps- Google satélite”; además de esto, es de gran importancia mencionar que el norte geográfico en el software QGIS se encuentra en dirección sur debido a las coordenadas en las que se trabajó el proyecto, las cuales eran necesarias para su compatibilidad con el software HEC-RAS.

**Figura 6.** Curvas de nivel, afluentes principales y secundarios de la zona de estudio



*Nota:* identificación en curvas de nivel, afluentes presentes en el área de estudio utilizando el Software QGIS.

Una vez digitalizadas las curvas de nivel y los afluentes principales y secundarios de toda la zona de estudio como se muestra en la *figura 6*, se procedió a realizar el mapa hidrológico de la Microcuenca del Río Frío para lo cual se identificó y se trazó el curso del afluente principal (Río Frío) y a partir de ahí se trazaron los afluentes secundarios que desembocan en él; para el afluente principal se determinó un punto de inicio o nacimiento ubicado en la cota más alta de todo el recorrido de dicho Río Frío la cual fue 2650 msnm y un punto de cierre establecido en la desembocadura de dicho Río, en este caso en el encuentro con el Río de Oro específicamente en la cota 700 msnm en el Municipio de Girón Santander, presentando una longitud total de treinta y dos kilómetros ochocientos treinta y seis metros ( 32,836 km).

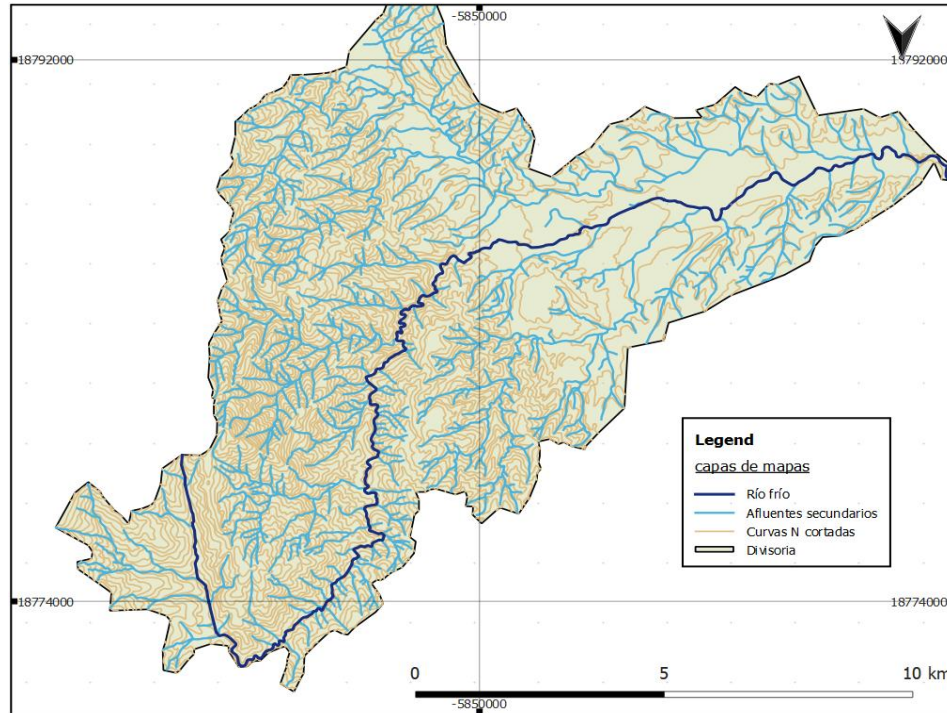
Después de trazar el Río principal junto con todos sus afluentes secundarios se realizó la delimitación del área de drenaje o también llamada divisoria de aguas, la cual se trazó teniendo en cuenta la topografía del terreno y los nacimientos de los afluentes secundarios del Río frío, es decir se delimitó el área que abarcaba el inicio y el fin del río frío así como de la totalidad de los afluentes que desembocaban en él, presentando un área total de ciento trece coma doscientos cuarenta y tres kilómetros cuadrados (113,243 Km<sup>2</sup>); la siguiente tabla plantea los parámetros morfométricos de la microcuenca del Río Frío:

**Tabla 3.** *Parámetros morfométricos de la microcuenca*

<b>Parámetros morfométricos de la microcuenca</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Perímetro (km)	P	66,419
Área (km <sup>2</sup> )	A	113,243
Longitud cauce principal (km)	LCP	32,836
Longitudes afluentes secundarios (km)	LAS	376,51

*Nota:* es importante conocer la longitud total de los afluentes en el área total de la Microcuenca.

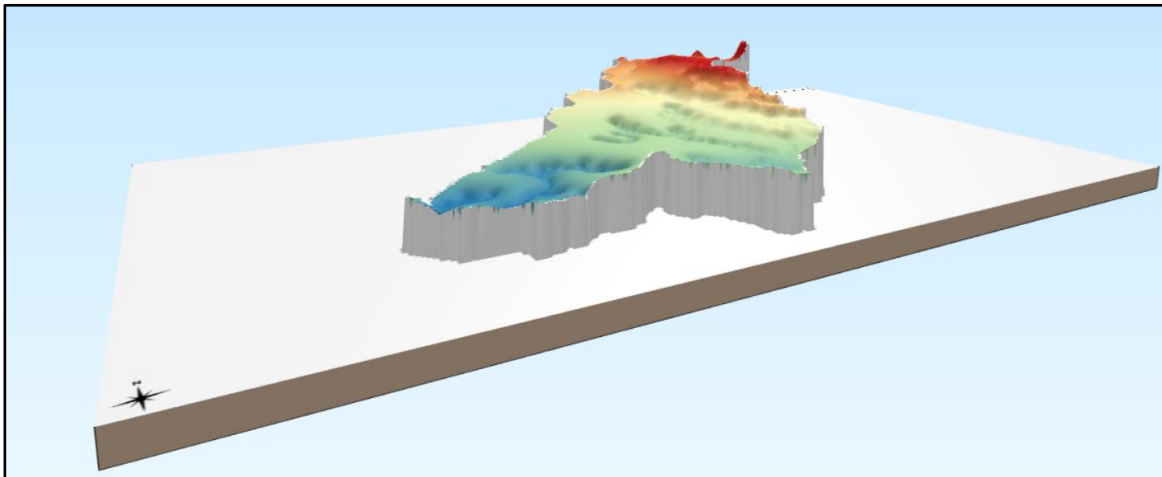
Una vez delimitada el área de la microcuenca del Río Frío se utilizó la herramienta cortar o “clip” perteneciente a las herramientas de geoprocso “Geoprocessing tools”, mediante la cual se creó una nueva capa únicamente con las curvas de nivel y los afluentes que conforman la microcuenca del Río Frío como se muestra en la *Figura 7*:

**Figura 7.** Mapa hidrológico y divisoria de aguas de la microcuenca del Río Frío

*Nota:* generación del mapa hidrológico junto a su divisoria de aguas de la zona de estudios con el Software QGis.

El Modelo Digital de Elevación (DEM), se realizó por medio del complemento llamado “Qgis2threejs” combinando los datos topográficos y el área de la microcuenca del Río Frío permitiendo ver que las zonas de mayores alturas se presentan en la parte este mientras que las zonas de menores elevaciones o planicies se encuentran en la parte oeste de la microcuenca.

*Apéndice C. Mapa 1 – Modelo Digital de Elevación DEM.* En la *Figura 8*, se muestra el DEM en tercera dimensión ilustrando como se ve físicamente la Microcuenca:

**Figura 8.** *Modelo digital de elevación de la microcuenca del Río Frío*

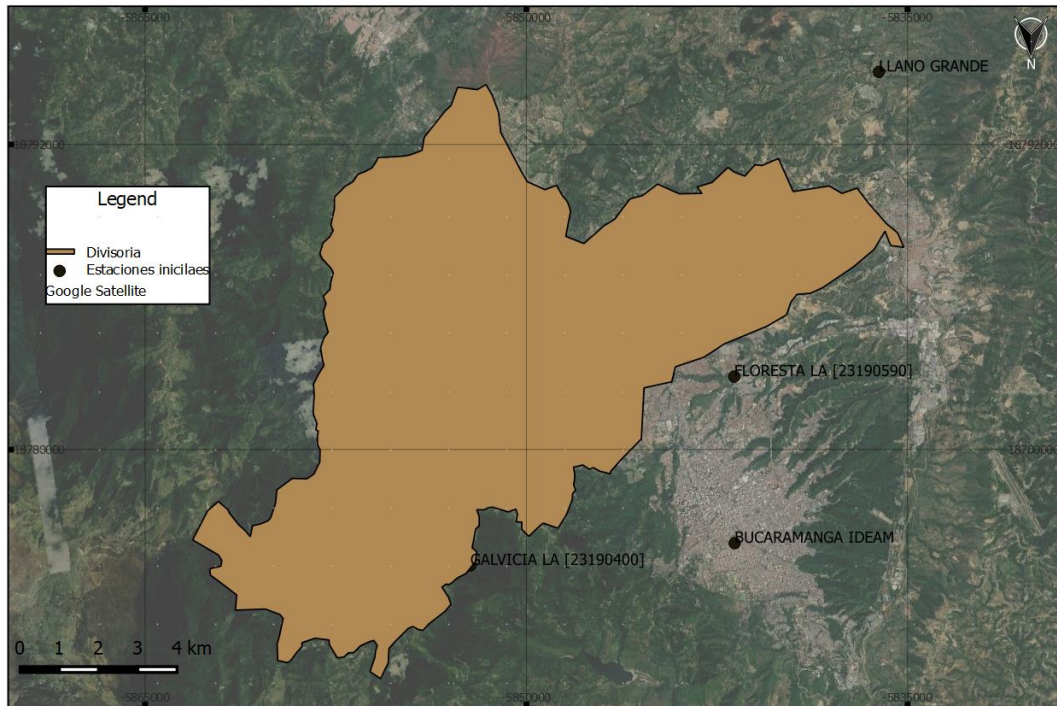
*Nota:* generación del modelo digital DEM por medio del Software QGis.

#### **4.3 Cálculo de parámetros para el análisis de datos**

El primer parámetro sujeto a cálculos en esta investigación fueron las precipitaciones ya que, como se mencionó en la primera fase, los datos pluviométricos se recolectaron de las 4 estaciones meteorológicas más próximas a la microcuenca con datos en el periodo 2005-2020, estas estas estaciones tienen por nombre “Bucaramanga Ideam”, “Floresta LA”, “Llano Grande” y “Galvicia LA” las cuales se consideraron como las “estaciones iniciales”; es importante mencionar que existen otras estaciones más cercanas a la microcuenca pero sin registro de datos pluviométricos en el rango de tiempo requerido. Con el fin de tener una mejor visualización de la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas en la microcuenca, a continuación, se presenta la siguiente imagen:



**Figura 9.** Ubicación geográfica- estaciones meteorológicas iniciales en la microcuenca del Río Frío

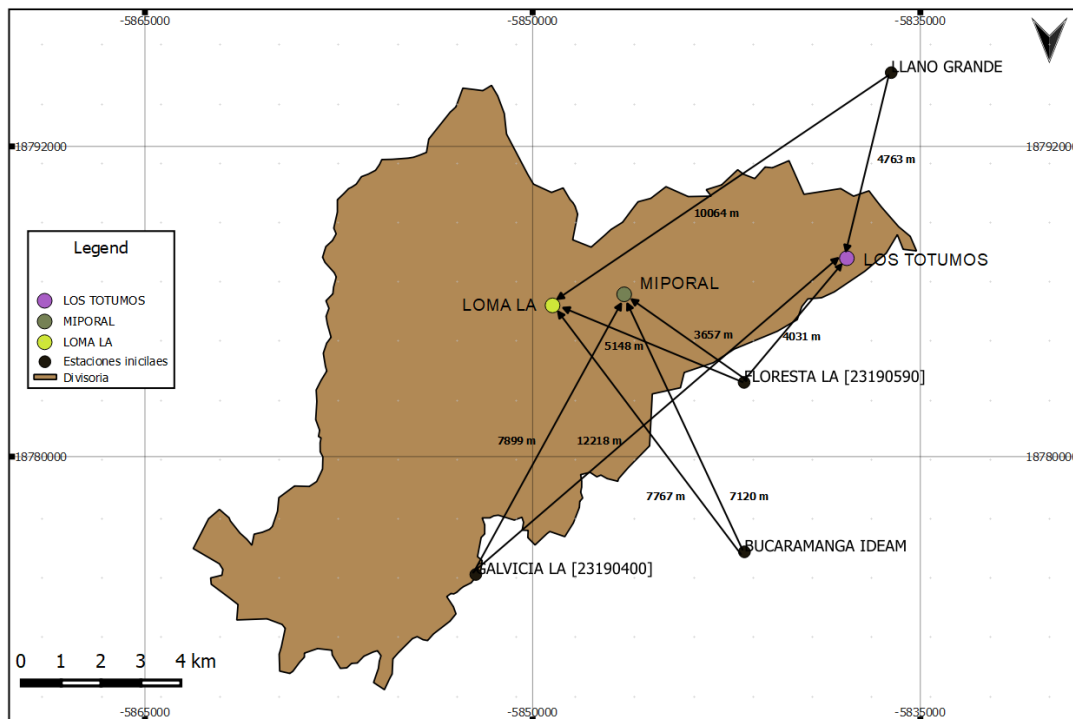


*Nota:* representación geográfica de la zona de estudio junto a las estaciones de precipitaciones cercanas al área.

A pesar de que las cuatro estaciones presentaban datos pluviométricos en el periodo requerido, tres de ellas estaban ubicadas por fuera de la microcuenca como se muestra en la *Figura 9*, lo cual iba generar una imprecisión al momento de calcular los caudales; Con la finalidad de obtener datos pluviométricos útiles para el cálculo de los caudales fue necesario ubicar tres estaciones nuevas que estuviesen dentro de la microcuenca del río frío y de esta manera calcular un aproximado de los datos de precipitación en el periodo requerido para cada una de dichas estaciones, para lo cual se aplicó el método de la distancia inversa ponderada (IDW), visualizar *Ecuación 7*, que relaciona los datos pluviométricos conocidos y la distancia entre las estaciones iniciales con las estaciones nuevas, es decir las estaciones que si arrojaron datos con las estaciones que no presentaron datos pero que sí se encontraban dentro de la microcuenca; Cabe resaltar que

las estaciones nuevas tienen por nombre “Los Totumos”, “Miporal” y “Loma LA”. La *Figura 10* muestra la ubicación geográfica de las estaciones nuevas y las distancias respecto a las estaciones iniciales utilizadas para aplicar el método IDW:

**Figura 10.** Ubicación geográfica y distancia- estaciones meteorológicas iniciales y nuevas en la microcuenca del Río Frío



*Nota:* identificación de distancias de las diferencias estaciones cercanas del área de estudio.

Para poder realizar el método de rellenado de datos IDW primero fue necesario organizar en tablas dinámicas los datos de precipitación descargados de las estaciones iniciales agrupándolos en años, meses y días lo cual permitió identificar la ausencia de información pluviométrica de algunos días en el transcurso de los años en cada una de las estaciones. A continuación, se presenta un ejemplo de tabla dinámica para una de las estaciones iniciales con los datos originales



organizados, para visualizar las tablas dinámicas de las demás estaciones iniciales, *ver apéndice*

## 2. Datos originales de precipitación.

**Figura 11.** Tabla dinámica datos originales de precipitación estación Galvicia LA

Cuenta de Fecha	Etiquetas de columna															Total general	
	⊕ 2005	⊕ 2006	⊕ 2007	⊕ 2008	⊕ 2009	⊕ 2010	⊕ 2011	⊕ 2012	⊕ 2013	⊕ 2014	⊕ 2015	⊕ 2016	⊕ 2017	⊕ 2018	⊕ 2019	⊕ 2020	
Etiquetas de fila																	
GALVICIA LA [23190400]	365	364	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	5843
<b>Total general</b>	<b>365</b>	<b>364</b>	<b>365</b>	<b>366</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>366</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>366</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>366</b>	<b>5843</b>

*Nota:* Representación de datos de precipitaciones obtenidos por las diferentes estaciones de estudio, estos datos fueron recogidos diarios.

Una vez organizadas las 4 estaciones iniciales en tablas dinámicas como se muestra en la *figura 11*, fue necesario identificar exactamente los días que faltaban por información pluviométrica en el periodo de 15 años para de esta manera de poder rellenarlos con los datos de las demás estaciones. Con el fin de tener una mayor brevedad en la ilustración de los datos, a continuación, se mostrarán las tablas con la cantidad de datos faltantes, pero en los meses y años de cada una de las estaciones iniciales; Cabe resaltar que los años que no están presentes en la tabla es debido a que se contó con un registro completo de datos en dichos años:

**Tabla 4.** Datos pluviométricos faltantes, estación Llano grande

Datos pluviométricos faltantes, estación Llano grande											
Estación Llano grande											
Meses \ Años	2006	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2019	2020
Enero	0	0	0	31	31	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	29	28	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	31	31	1	0	0	1	0	7
Abril	0	0	0	30	30	0	0	0	1	0	5

<b>Datos pluviométricos faltantes, estación Llano grande</b>												
<b>Estación Llano grande</b>												
<b>Años</b>	<b>Meses</b>	<b>2006</b>	<b>2009</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
	Mayo	0	0	0	31	31	0	1	0	0	0	0
	Junio	0	0	0	30	30	0	1	0	0	0	1
	Julio	0	0	0	31	13	0	31	0	0	0	0
	Agosto	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0
	Septiembre	1	30	0	30	0	0	0	1	0	0	0
	Octubre	0	0	31	31	0	0	0	0	0	0	0
	Noviembre	0	0	30	30	0	1	0	1	0	1	0
	Diciembre	0	0	31	31	1	0	0	1	0	0	0
	<b>TOTAL</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>92</b>	<b>366</b>	<b>195</b>	<b>2</b>	<b>33</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>13</b>

*Nota:* El periodo comprendido entre los años 2011-2013 fue en el que se presentó mayor ausencia de datos pluviométricos con un total de 653 datos de precipitación.

**Tabla 5.** Datos pluviométricos faltantes, estación floresta LA

<b>Datos pluviométricos faltantes, estación floresta LA</b>					
<b>Floresta LA</b>					
<b>Años</b>	<b>Meses</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2020</b>
	Enero	0	0	0	0
	Febrero	0	0	0	0
	Marzo	0	0	0	15
	Abril	0	0	5	0
	Mayo	0	0	0	3
	Junio	0	3	0	0
	Julio	0	0	0	0
	Agosto	0	0	0	1
	Septiembre	0	0	0	0
	Octubre	7	0	0	0
	Noviembre	0	0	0	0
	Diciembre	0	0	0	1
	<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>20</b>

*Nota:* A pesar de presentar la mayoría de los años con la totalidad de datos pluviométricos, el año 2020 fue el que más presentó vacíos en su información.

**Tabla 6.** Datos pluviométricos faltantes, estación Bucaramanga IDEAM

<b>Datos pluviométricos faltantes, estación Bucaramanga IDEAM</b>		
<b>Bucaramanga IDEAM</b>		
<b>Años Meses</b>	<b>2005</b>	<b>2020</b>
Enero	0	3
Febrero	0	0
Marzo	0	0
Abril	0	0
Mayo	0	0
Junio	0	0
Julio	0	0
Agosto	0	0
Septiembre	0	0
<b>Años Meses</b>	<b>2005</b>	<b>2020</b>
Octubre	2	0
Noviembre	0	0
Diciembre	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

*Nota:* Es la segunda estación con menor ausencia de datos pluviométricos con una totalidad de 5 datos faltantes.

**Tabla 7.** Datos pluviométricos faltantes, estación Galvicia LA

<b>Datos pluviométricos faltantes, estación Galvicia LA</b>	
<b>Estación Galvicia LA</b>	
<b>Años Meses</b>	<b>2006</b>
Enero	0
Febrero	0
Marzo	0
Abril	0
Mayo	0
Junio	0
Julio	0
Agosto	0
Septiembre	1
Octubre	0
Noviembre	0
Diciembre	0

<b>Datos pluviométricos faltantes, estación Galvicia LA</b>	
<b>TOTAL</b>	1

*Nota:* Fue la estación con mayor registro de datos, presentando 1 solo dato pluviométrico faltante.

Al organizar los datos para todas las estaciones se obtuvieron un total de veinte dos mil quinientos noventa y siete (22597) datos originales descargados, lo que quiere decir que hacían falta aproximadamente setecientos setenta y nueve (779) datos para alcanzar los veinte tres mil trescientos setenta y seis (23376) datos pluviométricos correspondientes al total de los días de los (15) años requeridos de las 4 estaciones meteorológicas, se debe tener en cuenta que cada dato, es el dato pluviométrico de un día calendario completo. Con el fin de tener una mayor comprensión de los datos faltantes, a continuación, se presenta la siguiente tabla:

**Tabla 8.** *Resumen total de datos originales y faltantes de la microcuenca del Río Frío*

<b>Resumen total de datos originales y faltantes de la microcuenca del Río Frío</b>							
<b>Estación</b>	<b>Código</b>	<b>Estado</b>	<b>Departamento</b>	<b>Fecha recolección</b>	<b>Total, datos originales</b>	<b>Total, de datos</b>	<b>Total, de datos faltantes</b>
Bucaramanga Ideam	23190830	Activa	Santander	01/01/2005 hasta 31/12/2020	5839	5844	5
Floresta LA	23190590	Activa	Santander	01/01/2005 hasta 31/12/2020	5809	5844	35
Galvicia LA	23190400	Activa	Santander	01/01/2005 hasta 31/12/2020	5843	5844	1
Llano Grande	23195110	Activa	Santander	01/01/2005 hasta 31/12/2020	5106	5844	738

*Nota:* El total de datos corresponde al número de datos que se debería obtener por cada estación durante los 15 años analizados y el total de datos originales es la cantidad de datos por estación descargados del IDEAM. Se puede observar que la estación llano grande fue la que más presento ausencia de información en sus registros.

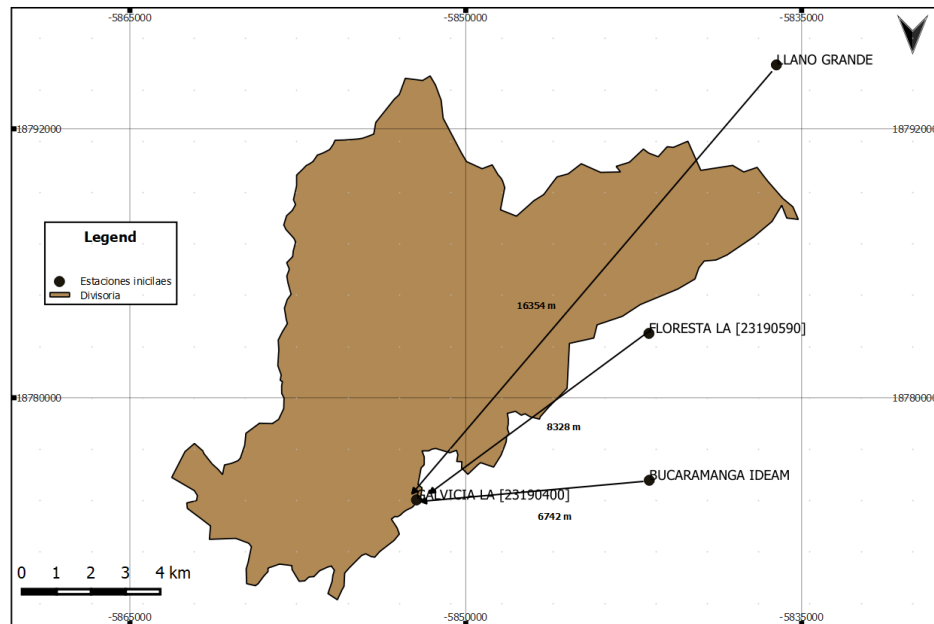
Después de obtener los días faltantes por datos de precipitación de cada estación, y con el mismo método de relleno mencionado anteriormente se procedió a calcular un valor para cada

uno de esos días que no contara con información, esto se realizó midiendo la distancia entre la estación que no presento el dato pluviométrico en cualquier día de los 15 años analizados con la estación que si presento información en ese mismo día y se aplicó la fórmula del método de la distancia inversa ponderada, *ver ecuación 7*, la cual como se mencionó con anterioridad al relacionar los datos que sí se conocían de las otras tres estaciones de ese mismo día y la distancia de dichas estaciones a la estación que se quería calcular, permitió obtener un valor promedio que se tomó como el valor de precipitación para ese día faltante.

Debido a la cantidad de datos analizados y al tamaño de las tablas, se tomará como ejemplo y para ilustrar el proceso de rellenado de datos de las estaciones iniciales, la estación de la *tabla 8* llamada Galvicia LA, ya que, fue la estación con mayor registro de datos y por tanto solo necesitó rellenar 1 día sin información pluviométrica.

Siguiendo con el proceso, con ayuda de las herramientas de QGIS se tomaron las distancias desde las otras tres estaciones hasta la estación que se quería rellenar y una vez obtenidas dichas distancias, se extrajeron las precipitaciones de las tablas descargadas del IDEAM, del día a rellenar de las estaciones que, si presentaron información; para este caso la estación Galvicia LA no presentó información pluviométrica el día 15 de septiembre del año 2006. En la *figura 12* y la *tabla 10* se puede observar las distancias a la estación que se rellenó para ejemplificar el proceso:

**Figura 12.** *Distancias Floresta LA, Bucaramanga IDEAM y Llano Grande hasta Galvicia LA*



*Nota:* identificación de las distancias de las estaciones escogidos hasta la estación Galvicia LA.

**Tabla 9.** Distancias respecto a la estación Galvicia LA

Distancias respecto a la estación Galvicia LA	
Estación	Distancia a estación Galvicia LA (m)
Bucaramanga Ideam	6742
Floresta LA	8328
Llano Grande	16354

*Nota:* De las otras tres estaciones con las cuales se rellenó Galvicia LA, la más alejada fue Llano grande con una distancia aproximada de 16 kilómetros.

Una vez obtenidas dichas distancias, se extrajeron las precipitaciones de las tablas descargadas del IDEAM (Datos originales), del mismo día a rellenar de las estaciones mencionadas en la *tabla 10* y posteriormente a esto se aplicó la fórmula del método IDW, con la cual se encontró el valor faltante de precipitación; para este caso la estación Galvicia LA no presentó información pluviométrica el día 15 de septiembre del año 2006.

Visualizar el cálculo del rellenado de datos para las estaciones iniciales; en el *Apéndice 3. Cálculo y rellenado estaciones iniciales*.

**Tabla 10.** *Datos de precipitación existentes y calculado*

<b>Datos de precipitación existentes y calculado</b>		
<b>Estación</b>	<b>Dato de precipitación registrados (mm/día)</b>	<b>Dato de precipitación calculado (mm/día)</b>
Bucaramanga	0.4	
Ideam		0.18
Floresta LA	0	
Llano Grande	0	

*Nota:* Los datos de precipitación registrados son los datos pertenecientes a las otras tres estaciones del mismo día que la estación Galvicia LA no presento información.

Para finalizar el proceso de rellenado de datos de las estaciones iniciales, se tomó el valor de precipitación calculado mostrado en la *tabla 11* para la estación Galvicia LA, y se completó su tabla de precipitaciones originales. El rellenado de datos para las demás estaciones se realizó de la misma manera mencionada anteriormente, de modo que, para conocer las tablas rellenas de precipitaciones de las estaciones iniciales, dirigirse al *Apéndice 3. Cálculo y rellenado estaciones iniciales*.

Como se mencionó anteriormente, después de tener las estaciones iniciales completas y con ayuda de estas, se calculó un aproximado de precipitaciones en el rango de tiempo de 15 años para cada una de las estaciones nuevas que sí se encontraban dentro de la microcuenca del Río Frío utilizando el mismo método de interpolación IDW; es de gran importancia resaltar que la estación Galvicia LA se tomó como estación inicial y estación nueva ya que, como se muestra en la *Figura 10* se encuentra ubicada en el límite de la microcuenca, es decir sus datos de precipitación son útiles para el cálculo de los caudales.

El procedimiento para el cálculo y el relleno de datos de las estaciones nuevas mostradas en la *Figura 10*, fue exactamente el mismo al de las estaciones iniciales por lo cual y debido a la magnitud de las tablas, simplemente se mostrará en la *tabla 12* las estaciones utilizadas para calcular una estación nueva específica junto con sus respectivas distancias, sin embargo, para visualizar los resultados de los datos de precipitación en el rango de 15 años para dichas estaciones nuevas, dirigirse al *apéndice 4. Calculo y relleno estaciones nuevas.*

**Tabla 11.** Estaciones utilizadas para el relleno de estaciones nuevas

<b>Estaciones utilizadas para el relleno de estaciones nuevas</b>			
<b>Estaciones nuevas</b>	<b>Estaciones iniciales utilizadas</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Total de datos Calculados</b>
Loma LA	Floresta LA	5148	23376
	Bucaramanga Ideam	7767	
	Llano Grande	10364	
Miporal	Floresta LA	3657	23376
	Bucaramanga Ideam	7120	
	Galvicia LA	7899	
Los Totumos	Floresta LA	4031	23376
	Galvicia LA	12218	
	Llano Grande	4763	
<b>Estaciones nuevas</b>	<b>Estaciones iniciales utilizadas</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Total de datos Calculados</b>
Galvicia LA		Completada	

*Nota:* El total de datos calculados corresponde al total de los datos para el periodo de 15 años; por su parte la estación Galvicia LA ya había sido calculada con las estaciones iniciales. Ver tabla 11.

Una vez obtenidos los datos de precipitación para las estaciones nuevas se procedió a obtener los caudales de la microcuenca por medio del uso de las herramientas del software HEC-HMS, para lo cual fue de vital importancia a partir de los parámetros morfométricos de dicha microcuenca encontrar el tiempo de concentración necesario para llevar a cabo la modelación.



Como primer paso se utilizaron las herramientas del software Google Earth exportando a este, la capa vectorial del Río Frío creada anteriormente en la clasificación y digitalización de datos en QGIS, obteniendo las diferentes alturas del terreno por el que transcurre dicho Río principal, las cuales se representan en el perfil de elevación mostrado en la *Figura 13* generado por el programa.

**Figura 13.** Perfil de elevación del afluente principal de la microcuenca del Río Frío



*Nota:* representación del afluente principal en perfil de elevación para identificar desniveles, cantidades, longitudes, entre otros factores del río.

Seguido a esto, y con el fin de calcular la pendiente media del Río Frío la información arrojada por Google Earth acerca de los desniveles, cantidad, longitud y pendientes de los tramos, se organizó como se muestra en la *tabla 13* y posteriormente se aplicó la fórmula del Taylor Schwarz, ver *ecuación 5*, obteniendo el valor de 0.5% para dicha pendiente media.

**Tabla 12.** Datos para la pendiente del Río Frío

<b>Datos para la pendiente del Río Frío</b>					
<b>Tramo</b>	<b>Desnivel (Di) en (m)</b>	<b>Longitud (Li) en (m)</b>	<b>Pendiente (Si) (Di/Li)</b>	<b>Raiz de la pendiente</b>	<b>Li/Raiz pend.</b>
1	700	9000	0.07778	0.279	32271.172
2	800	8000	0.10000	0.316	25298.221
3	250	8000	0.03125	0.177	45254.834
4	150	7000	0.02143	0.146	47819.104
Total	-	32000	-	-	150643.331

*Nota:* La pendiente calculada para el afluente principal de la microcuenca del Río Frío tuvo un valor de 5%.

$$S = \left( \frac{32000}{150643,331} \right)^2 = 0,05$$

El valor calculado de la pendiente del afluente principal de la microcuenca del Río Frío la clasifica como una microcuenca con un tipo de relieve suave al encontrar su valor en el rango de 3% a 7% [27]. Después de obtenida la pendiente, se calculó con la fórmula de Kirpich, ver *ecuación 6*, el tiempo de concentración para la microcuenca el cual arrojó un valor de 9.55 horas.

$$Tc = 0,066 * \left( \frac{32}{0,05} \right)^{0,77} = 9.55 \text{ hr}$$

Continuando con el proceso, después de obtener el tiempo de concentración se comenzó con la modelación en el software HEC-HMS, visualizar *Apéndice 5. Modelo Software HEC-HMS*. En el cual fueron fundamental cuatro aspectos como lo son, la información de la microcuenca, los datos de precipitación, el modelo meteorológico y la forma en la que se querían obtener los datos.

La información de la microcuenca requerida en el HEC-HMS, que básicamente era la divisoria de aguas, el afluente principal y secundarios, el tiempo de concentración y la curva numérica que para esta investigación se tomó un valor estimado de 40 por la infiltración del suelo, debido a que se observó que la microcuenca presenta más zonas urbanas que boscosas, se introdujeron y se organizaron en el programa dentro de lo que se denominó basin model o modelo de cuenca; Es importante resaltar que el valor de la curva numérica es un estimado ya que su valor

exacto requeriría de un estudio más específico de la microcuenca el cual no hace parte del alcance de esta investigación.

Por su parte, los datos de precipitación se ingresaron al programa realizando un promedio de los datos de precipitación de las cuatro estaciones nuevas calculadas anteriormente, visualizar el *Apéndice 6. Promedios de precipitación estaciones nuevas*, definiendo como intervalo de modelación 1 día y como rango de tiempo los 365 días de cada año. Después de ingresar todos los datos al programa se realizó un modelo meteorológico para cada año y por último se ejecutó el programa con toda la información proporcionada obteniendo los caudales diarios para el periodo de 15 años, visualizar *Apéndice 7. Caudales de diarios de la microcuenca del Río Frío*.

Finalizado el proceso de obtener los caudales diarios en el rango de tiempo requerido y como parte final de los cálculos, se realizó el cálculo para estimar el caudal máximo y de diseño para los periodos de retorno de los años 5, 10, 25, 50, 100 y 500, para lo cual como primer paso se identificaron y se organizaron como se ilustra en la *tabla 14*, los caudales máximos de cada año obtenidos anteriormente del software HEC-HMS.

**Tabla 13.** Caudales máximos anuales en el rango de tiempo estudiado

<b>Caudales máximos anuales en el rango de tiempo estudiado</b>	
<b>Años</b>	<b>Caudal máximo (m<sup>3</sup>/seg)</b>
2005	220.55
2006	30.1
2007	23.3
2008	38.5
2009	47.9
2010	75.9
2011	96.3
2012	59.1
2013	29.7
2014	56.6
2015	26.9
2016	35.7
2017	55.3
2018	41.8
2019	37.5

<b>Caudales máximos anuales en el rango de tiempo estudiado</b>	
2020	150.5

*Nota:* Los años que presentaron los mayores caudales máximos fueron el 2005 y el 2020 a diferencia de 2006 que fue el año con el caudal máximo más pequeño en el periodo de 15 años.

Siguiendo con el proceso, después identificar los caudales máximos para cada año, se aplicó la fórmula general del método de Gumbel, visualizar *ecuación 1*, para calcular el caudal máximo para cada uno de los periodos de retorno y una vez obtenidos dichos caudales se procedió a calcular la variación estándar  $\Delta Q$  siguiendo las condiciones del intervalo de confianza  $\Phi$ , ver *ecuación 2 y 3*. A continuación, en la *Tabla 15*, se presentan los caudales máximos calculados junto con la variación estándar para cada uno de los periodos de retorno analizados.

**Tabla 14.** Caudales máximos calculados y variación estándar

<b>Caudales máximos calculados y variación estándar</b>		
<b>Periodo de retorno (Años)</b>	<b>Caudal máximo (m3/seg)</b>	<b>Variación estándar <math>\Delta Q</math></b>
5	119.79	28.47
10	155.02	57.94
25	201.6	57.94
50	236.83	57.94
100	272.06	57.94
500	353.87	57.94

*Nota:* El caudal máximo corresponde al caudal máximo calculado para cada uno de los periodos de retorno; la variación estándar es la misma para 4 de los periodos de retorno ya que cumplen con la misma condición del intervalo de confianza.

Por último, se obtuvo el caudal de diseño a partir de la sumatoria del caudal máximo y la variación estándar, visualizar *ecuación 4*, es decir el valor del caudal de diseño fue el valor tomado como el caudal proyectado. En la *tabla 15* se presenta el caudal proyectado para cada uno de los periodos de retorno analizados, sin embargo, para visualizar los cálculos y el procedimiento con mayor detalle, dirigirse al *Apéndice 8. Cálculo periodo de retorno*.

**Tabla 15.** *Periodo de retorno y su caudal proyectado*

<b>Periodo de retorno y su caudal proyectado</b>	
<b>Periodo de retorno (Años)</b>	<b>Caudal (m3/seg)</b>
5	148.27
10	212.97
25	259.54
50	294.77
100	330.01
500	411.81

*Nota:* Los valores del caudal corresponden a los resultados del modelo estadístico de Gumbel, representando el valor del caudal de diseño proyectado en cada uno de los años evaluados en el periodo de retorno.

#### **4.4 Generación de modelos dinámicos y mapas de inundación**

Una vez obtenida la información de tipo digital y la información numérica (cálculos) se pudo realizar una representación aproximada de los modelos dinámicos y mapas de inundación para los eventos de inundación ocurridos en los años 2005, 2020 y para los periodos de retorno, a través del software HEC-RAS y QGIS, los cuales fueron a partir de los datos de precipitación recopilados de las bases de datos mencionadas en la fase 1 y rellenados en la fase 3 de esta investigación. Es importante mencionar que, para la categorización de los niveles de amenaza solo era necesario modelar la creciente básica y máxima de diseño, por lo cual únicamente se realizaron los modelos de inundación para los periodos de retorno de 100 y 500 años respectivamente.

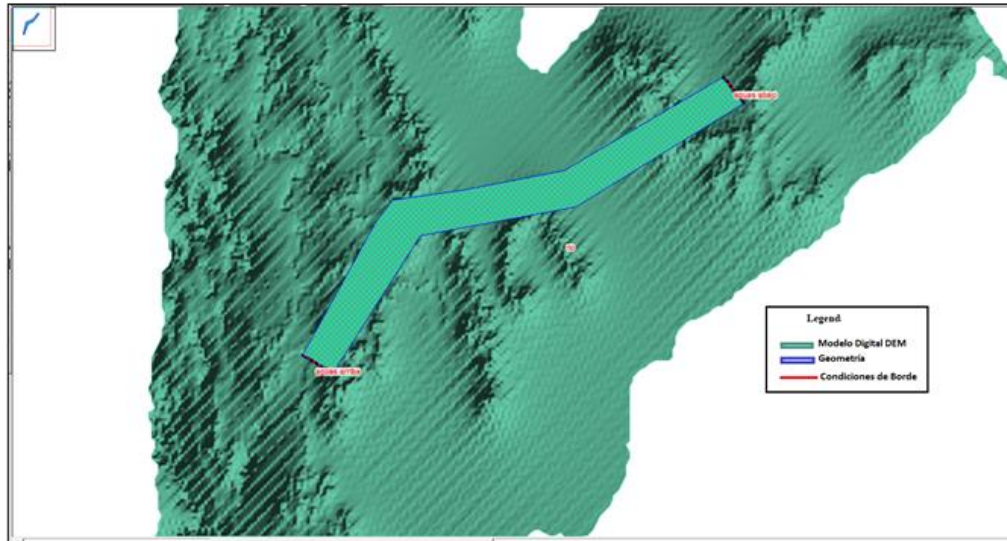
A continuación, se describirá el proceso llevado a cabo para realizar el modelo dinámico y el mapa para el evento de inundación del 2020, resaltando que el proceso para todos fue el mismo; Para visualizar los modelos dinámicos de inundación en el software HEC-RAS y los mapas de inundación en el software QGIS, dirigirse al *Apéndice 9. Modelos dinámicos de inundación HEC-RAS* y al *Apéndice 10. Mapas de inundación QGIS*, respectivamente.

Como primer paso, fue necesario exportar el modelo digital de elevación DEM al software HEC-RAS, para lo cual cómo se pudo observar y se mencionó en la fase 1, *figura 8*, el norte en el programa QGIS estaba en la dirección sur debido a las coordenadas trabajadas en el proyecto las cuales eran EPSG: 32640 WGS 84 / UTM zone 40, ya que no fue posible cargar al software HEC-RAS el modelo digital de elevación DEM en coordenadas de Colombia, por lo cual se tuvo que trabajar todo desde un inicio en las mismas coordenadas geográficas.

Seguidamente, al exportar el DEM al programa ya se contaba con la capa base para poder crear la geometría o la información geométrica “Geometric Data” por sus siglas en inglés, la cual fue necesaria para delimitar en dicho DEM el recorrido del afluente principal de la microcuenca, cabe resaltar que, la delimitación no se realizó en la totalidad del recorrido del Río Frío debido a la magnitud de la geometría o grilla y por ende a la cantidad de datos que se tendrían que procesar en el programa, sino que, se abarcaron las áreas de interés de esta investigación, es decir que se delimitó desde la cota 1200 la cual comprende una parte de la zona rural del sector la corcova hasta la cota 750 que representa las inmediaciones de la planta de tratamiento del Río Frío ubicada en el anillo vial.

Después de delimitar el área del cauce principal, se crearon las condiciones de borde o por sus siglas en inglés “Boundary conditions” las cuales fueron nombradas “aguas arriba” y “aguas abajo” ya que, como su nombre lo indica, estas dos condiciones definieron el curso o la dirección hidrológica dentro del modelo. A continuación, en la *figura 14* se presenta el DEM exportado, la geometría definida y las condiciones de borde creadas:

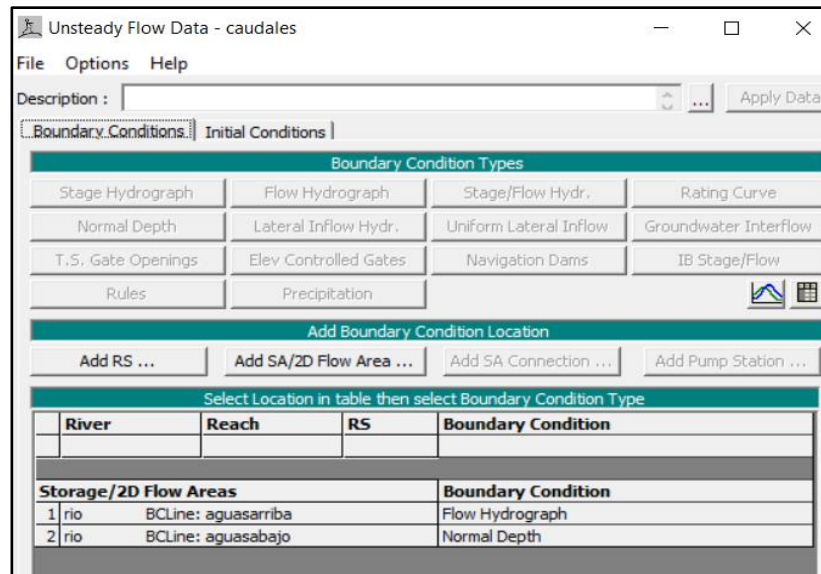
**Figura 14.** *Geometría, condiciones de borde y DEM en el software HEC-RAS*



*Nota:* información general del río para utilización de Software HEC- RAS

Terminado el proceso anterior y con las condiciones de borde definidas, se introdujeron datos de flujo variante o “Unsteady Flow Data” por sus siglas en inglés, los cuales corresponden a los caudales diarios obtenidos del HEC-HMS, dirigirse al *Apéndice 7. Caudales diarios de la microcuenca del Río Frío*, que fueron introducidos solamente a la condición de aguas arriba ya que a partir de ahí se generaría el hidrograma de flujo “Flow hydrograph”; por su parte la condición de aguas abajo se consideró como profundidad normal o “Normal Depth” al ser un terreno más plano.

**Figura 15.** *Ventana de trabajo HEC-RAS – Datos de flujo variable*



*Nota:* edición de condiciones de borde para generación de eventos

La *figura 15*, ilustra la ventana de trabajo donde se editaron las condiciones de borde mencionadas anteriormente y donde se introdujeron los caudales, resaltando que no se pudieron introducir las precipitaciones de todo el año ya que por defecto el programa permitía un número limitado de datos; las fechas de los eventos de inundación fueron el 28 de enero del 2020 y el 12 de febrero del 2005. A continuación, en la *figura 16* se muestra la ventana “Flow hidrograph” en donde se introdujeron los caudales diarios del año 2020 para modelar el evento de inundación, definiendo el intervalo de tiempo de 1 día, así como la fecha final del modelo la cual fue el día en que se presentó dicho evento de inundación.

**Figura 16.** Ventana de trabajo HEC-RAS – Hidrograma de Flujo o caudales diarios



Flow Hydrograph

SA: no BCLine: aguasarriba

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Day

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 25DEC2004 Time: 00:00

Fixed Start Time: Date: 27DEC2019 Time: 00:00

No. Ordinates

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time	Flow
		(hours)	(m3/s)
87	24Jan2020 1600	688:00	0.30
88	24Jan2020 2400	696:00	0.30
89	25Jan2020 0800	704:00	0.95
90	25Jan2020 1600	712:00	1.00
91	25Jan2020 2400	720:00	4.36
92	26Jan2020 0800	728:00	8.20
93	26Jan2020 1600	736:00	16.32
94	26Jan2020 2400	744:00	20.15
95	27Jan2020 0800	752:00	44.00
96	27Jan2020 1600	760:00	45.54
97	27Jan2020 2400	768:00	72.36
98	28Jan2020 0800	776:00	85.00
99	28Jan2020 1600	784:00	85.50
100	28Jan2020 2400	792:00	150.50

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

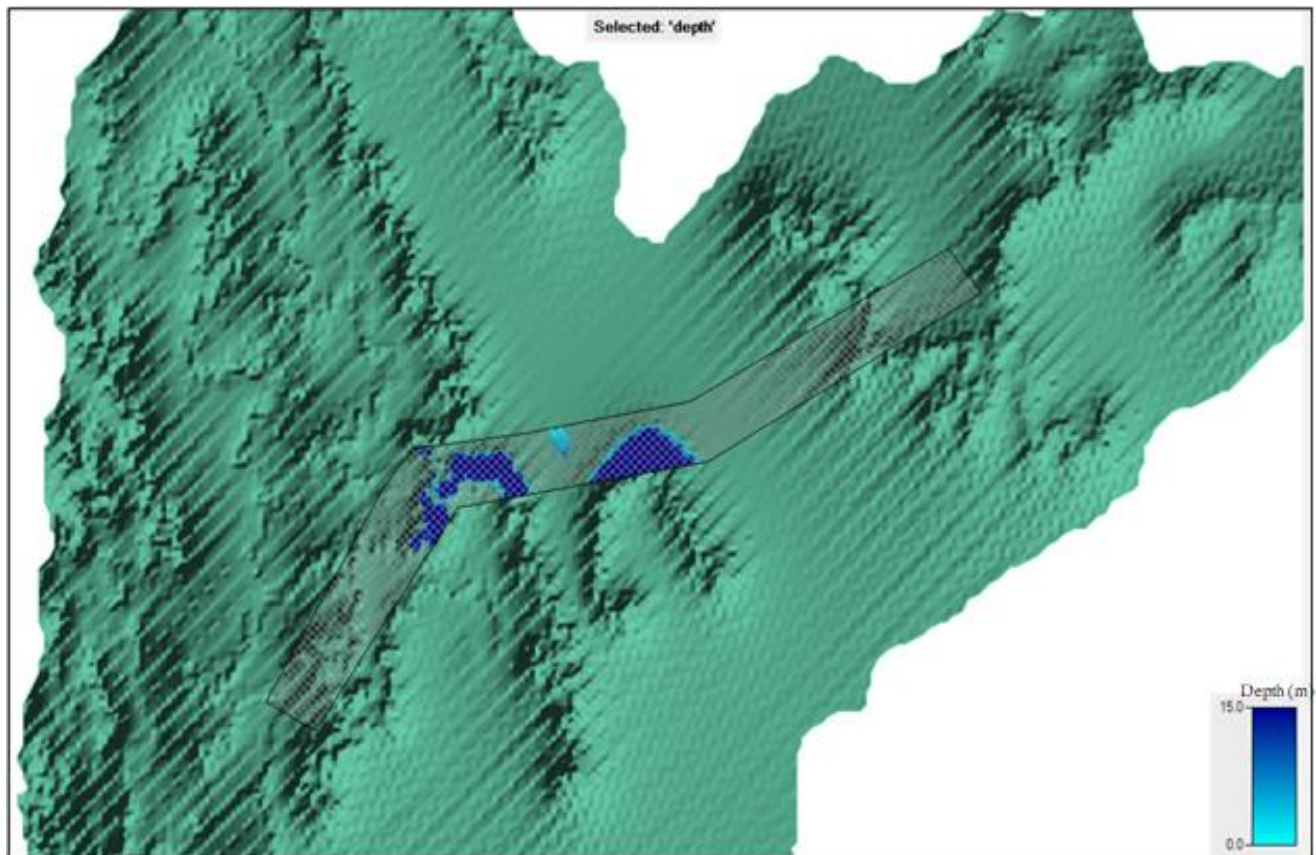
Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow:  Multiplier:  EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.02  TW C

*Nota:* Introducción de caudales diarios, condiciones de flujo para la generación de eventos.

Una vez introducidas las condiciones de flujo y con la geometría del modelo, se ejecutó el programa usando la herramienta "Run – Unsteady Flow Analysis", obteniendo el modelo dinámico de inundación para el evento del 2020, en donde se obtuvo una representación aproximada del comportamiento de dicho evento gracias a los caudales proporcionados al programa. La *figura 17*, ilustra el modelo del día en el que se dio lugar el evento de inundación, sin embargo, para visualizar el mapa completo del modelo dinámico de las inundaciones del 2005 y 2020 y del periodo de retorno seleccionado junto con su comportamiento a través del tiempo, dirigirse al *Apéndice D. Mapa 2. Modelo dinámico inundación 2020; Apéndice E. Mapa 3. Modelo dinámico inundación 2005. Apéndice F. Mapa 4. Modelo dinámico inundación periodo de retorno 100 años. Apéndice G. Mapa 5. Modelo dinámico inundación periodo de retorno 500 años. Apéndice H. Mapa 6. Mapa de inundación datos de campo.*

**Figura 17.** Modelo dinámico inundación 28 de enero del 2020

*Nota:* Representación del modelo dinámico del evento del 2020 en el software HEC-RAS.

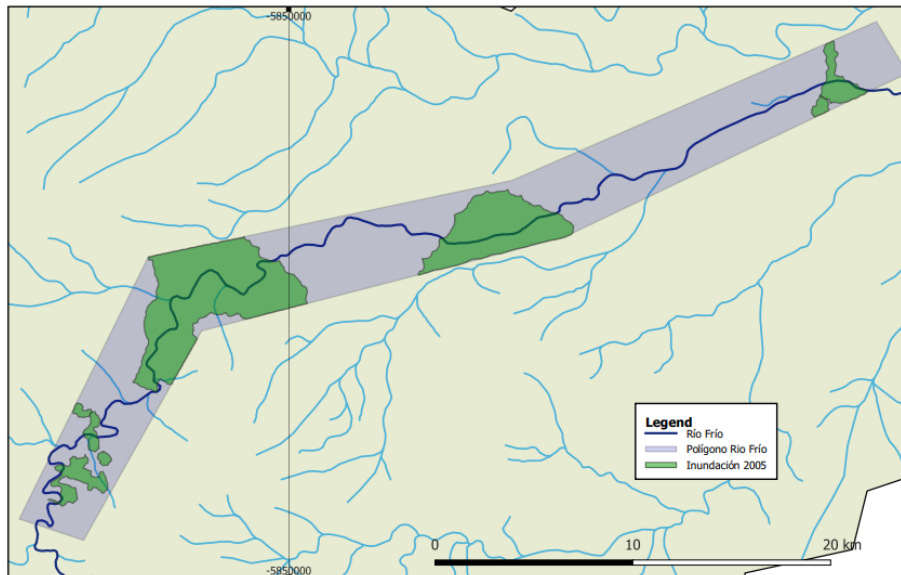
Finalizado el proceso en HEC-RAS, se dibujaron en el software QGIS los eventos de inundación obtenidos, además de esto se dibujó el mapa para la inundación del 2020 pero a partir de datos basados en la información teórica recogida de los registros y antecedentes de dichas inundaciones, la percepción de algunas personas que habitan en el sector y que fueron afectadas por dicho evento, también con algunas medidas o puntos de referencia tomados en campo en el lugar más afectado por la inundación, el cual fue el sector de Santa Coloma- Villa piedra del sol y sus alrededores, lo cual permitió tener medidas un poco más aproximadas y de esta manera poder dibujar la inundación.

Es de gran importancia mencionar que este mapa a diferencia de los realizados a partir de los datos reales de las bases de datos es de un nivel muy empírico el cual se realizó con la finalidad de analizar y relacionar la percepción de las personas hacia estos eventos de inundación con los mapas que son obtenidos de las bases de datos y de las herramientas que actualmente existen para llevar a cabo los estudios de análisis de riesgo por inundaciones urbanas.

#### 4.5 Análisis comparativo de datos digitales

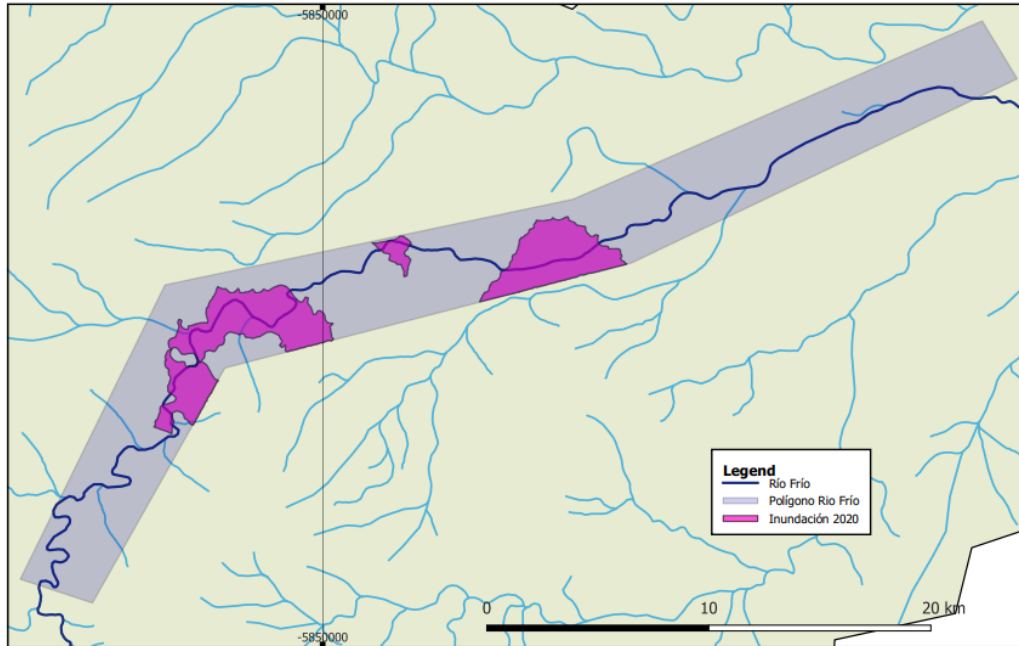
Una vez obtenidos todos los modelos dinámicos y de inundación realizados en HEC-RAS se analizan por medio de las superposiciones de los mapas de los diferentes eventos de inundación ya descritos.

**Figura 18.** *Evento inundación 2005*



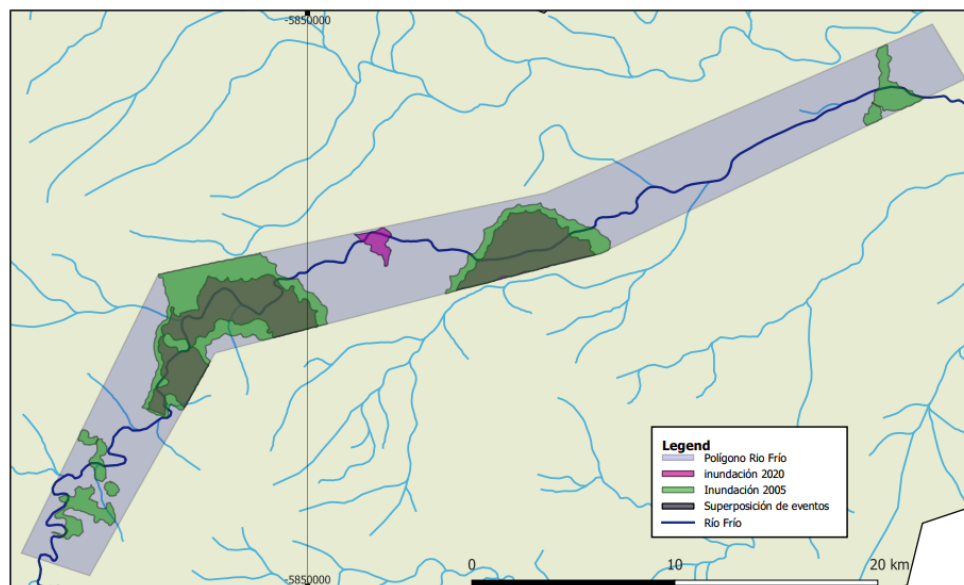
*Nota:* generación del evento de inundación del 2005 en el software QGIS gracias a los datos obtenidos por HEC-RAS.

**Figura 19.** *Evento inundación 2020*



*Nota:* generación del evento de inundación del 2020 en el software QGis gracias a los datos obtenidos por HEC-RAS.

**Figura 20.** Superposición eventos 2005 y 2020

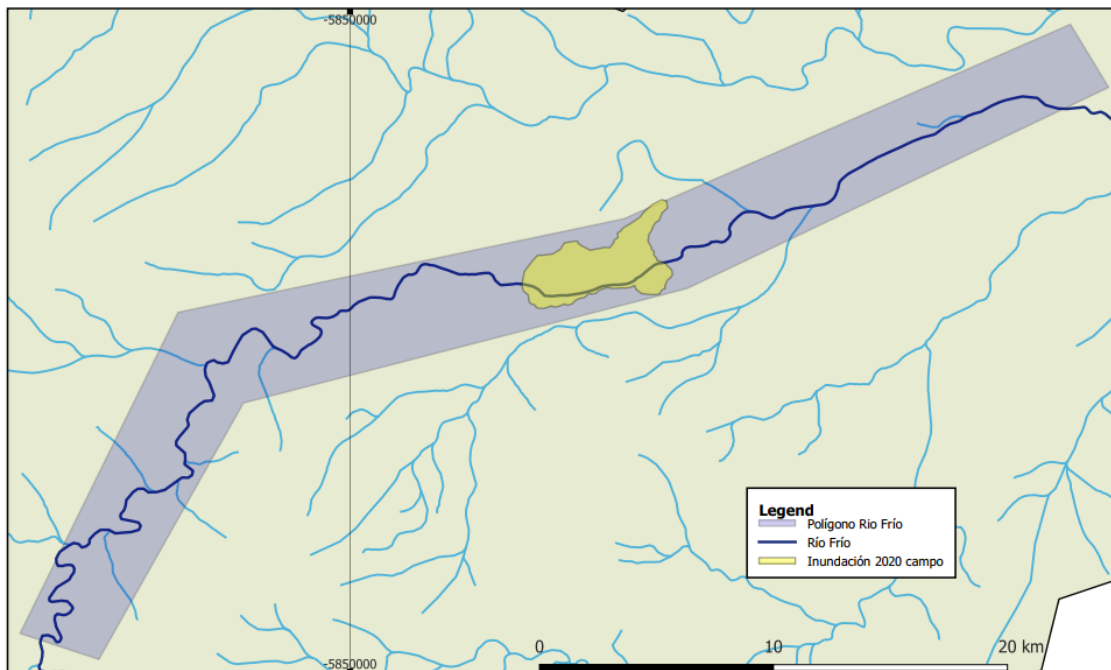


*Nota:* superposición de eventos de inundación de los años 2005 y 2020 para análisis del comportamiento de las precipitaciones.

Con esto se puede observar que la inundación ocurrida en el evento del 2005 es superior en área que la ocurrida en el 2020, esto se ve reflejado desde el inicio donde se obtuvieron precipitaciones mayores para evento del 2005, por ende, su caudal sería superior que en el 2020 y por consecuencia las áreas inundadas.

A su vez, el evento ocurrido del 2020 se analizó según datos obtenidos en campo para poder comprobar y determinar la veracidad de los datos obtenidos por las diferentes bases de datos y las inundaciones arrojadas por los softwares. Estos datos en campo fueron recogidos información otorgada por los habitantes del sector y por fuentes de información de los diferentes medios de comunicación los cuales nos ayudaron a obtener una idea clara de la inundación real ocurrida en el sector de estudio en el 2020.

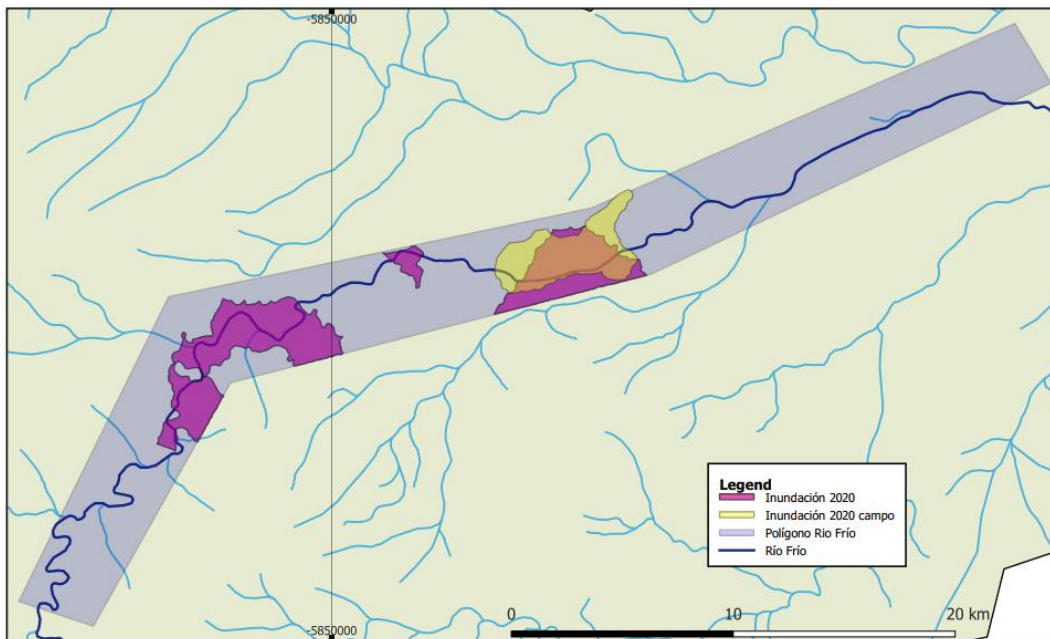
**Figura 21.** *Evento 2020 datos con información recolectada*



*Nota:* generación del mapa de inundación del 2020 gracias a los datos recolectados para posterior comparación con datos recogidos de estaciones.

Comparación eventos de inundación con información obtenida en campo e información obtenida por los datos descargados.

**Figura 22.** *Superposición eventos recopilado y 2020*



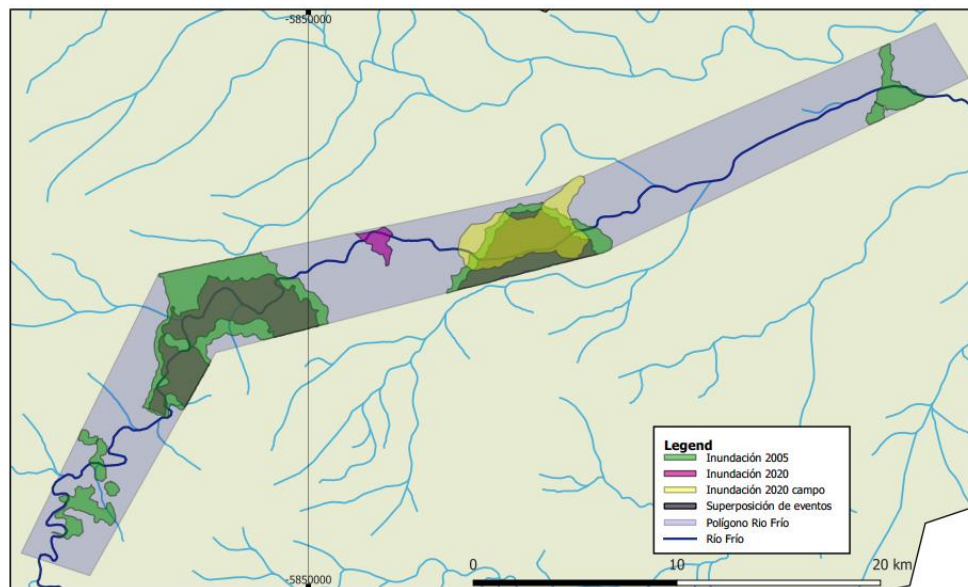
*Nota:* análisis de los eventos generados por medio de recolección de datos de campo y estaciones.

Con esta superposición de datos podemos observar principalmente, un sector con similitudes de las áreas de inundación en la información obtenida por ambos métodos corroborando así la veracidad de información en las precipitaciones descargas y la recurrencia de inundación en este sector, sin embargo, estas varían debido a que las estaciones de las precipitaciones no se encuentran exactamente en el lugar de estudio por ende la información es solo una aproximación al evento realmente ocurrido y esto es apreciado en dicho mapa.



Superposición del evento del 2005, evento del 2020 y evento del 2020 por información recogida en campo.

**Figura 23.** Superposición evento 2005, 2020 e información recopilada



*Nota: superposición de los eventos generados en el software QGis para posterior análisis de la zona.*

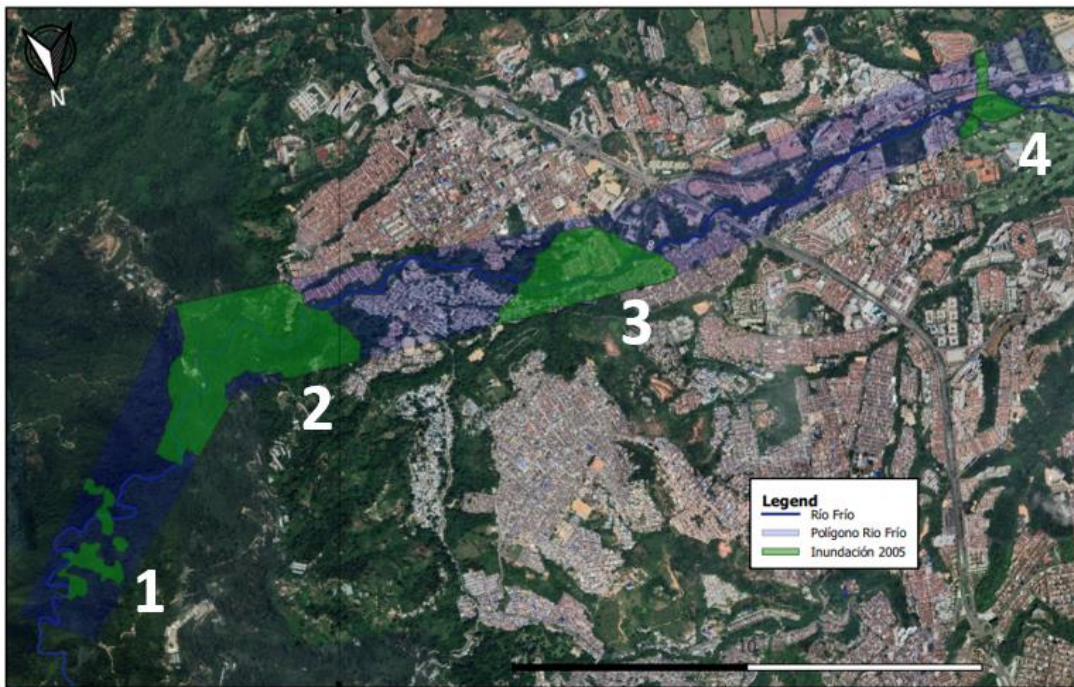
#### 4.5.1 Identificación de áreas de inundación

Gracias a los mapas de inundación obtenidos y a las capas de Google Satélite utilizadas en el Software QGis se pueden determinar un aproximado real de áreas inundadas en los diferentes eventos. Para determinar con exactitud las direcciones y lugares de inundación se utilizó ayuda de Google Maps.

- *Evento 2005.* Las inundaciones ocurridas por este evento se ven reflejadas en cuatro diferentes polígonos de los cuales solo tres de ellos pudieron llegar a afectar zonas urbanas con su inundación. Para determinar con exactitud las áreas se analizaron los polígonos por separado

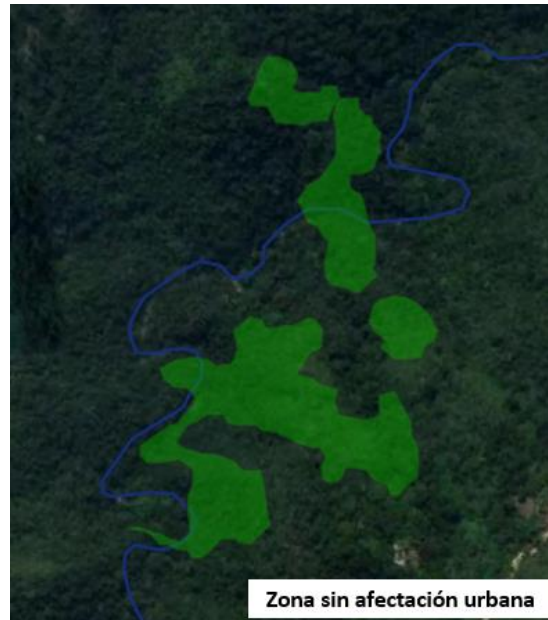
divididos de la siguiente manera. Las figuras que se me muestran a continuación corresponden a los números de polígonos correspondientes de la Figura 24.

**Figura 24.** *Polígonos evento 2005*



*Nota:* sobreposición de los polígonos generados del evento del 2005 con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.



**Figura 25.** *Polígono primero áreas*

*Nota:* sobreposición primer polígono generados del evento del 2005 con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.

**Figura 26.** *Polígono segundo áreas*

*Nota:* sobreposición segundo polígono generados del evento del 2005 con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.

**Figura 27.** Tercer polígono evento 2005 con áreas

*Nota:* sobreposición tercer polígono generados del evento del 2005 con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.

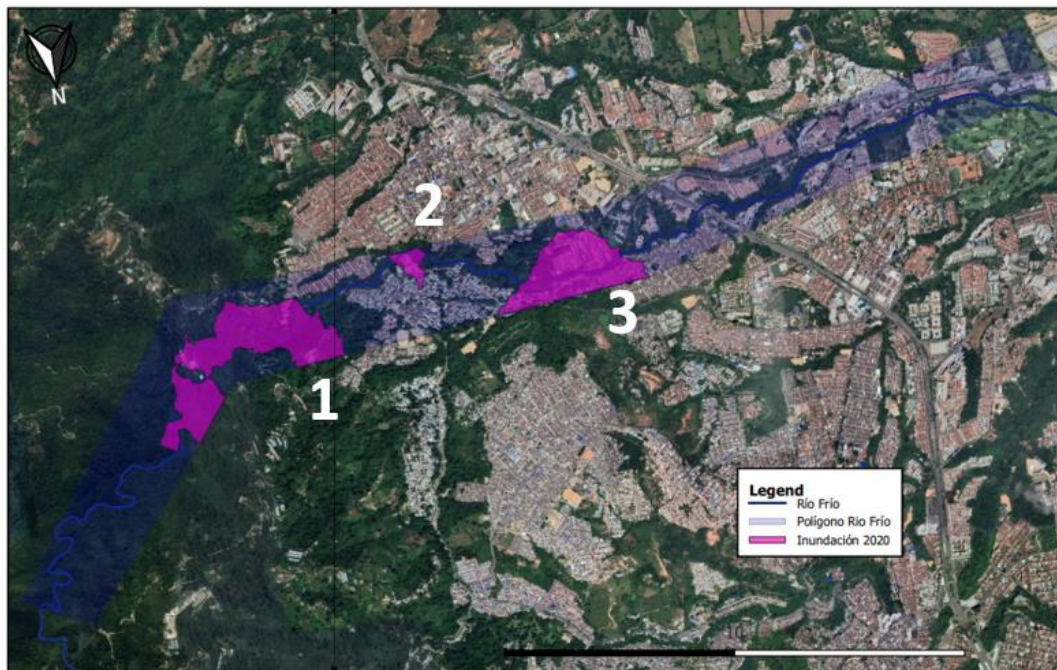
**Figura 28.** Cuarto polígono evento 2005 con áreas

*Nota:* sobreposición cuarto polígono generados del evento del 2005 con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.



- *Evento 2020.* Con este evento se analizaron cuatro polígonos de áreas inundadas de los cuales solo tres lograron inundar sectores urbanos. Al igual que con el evento del 2005, se utilizó las diferentes herramientas que nos brinda Google Maps para determinar áreas con exactitud. Las figuras que se me muestran a continuación corresponden a los números de polígonos correspondientes de la Figura 29.

**Figura 29.** Polígonos evento 2020



*Nota:* sobreposición de los polígonos generados del evento del 2020 con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.





**Figura 32.** Tercer polígono evento 2020 con áreas



*Nota:* sobreposición tercer polígono generados del evento del 2020 con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.

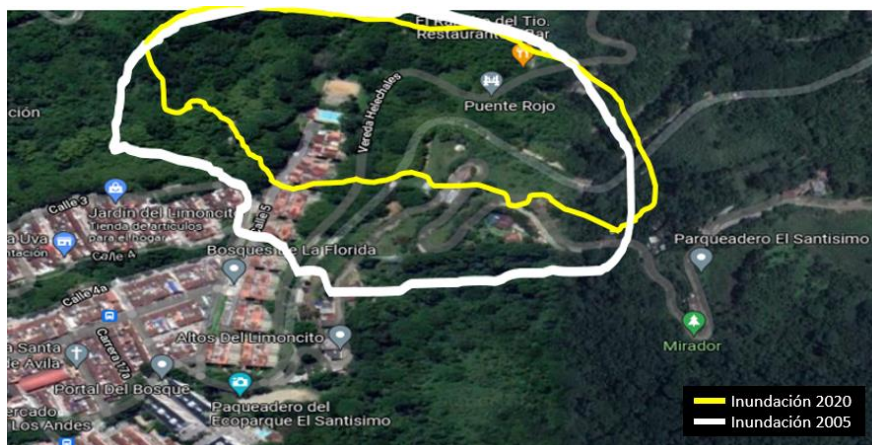
- *Evento 2020 datos campo.* Según los datos obtenidos en campos se obtiene un solo polígono de inundación en el sector el cual determina las siguientes áreas inundadas. La figura que se muestra a continuación corresponde a los números de polígonos correspondientes de la Figura 33.





obtiene un sector o polígono en común de área del evento del 2005, 2020 y 2020 con datos recopilados. Áreas en común para el evento del 2005 y 2020:

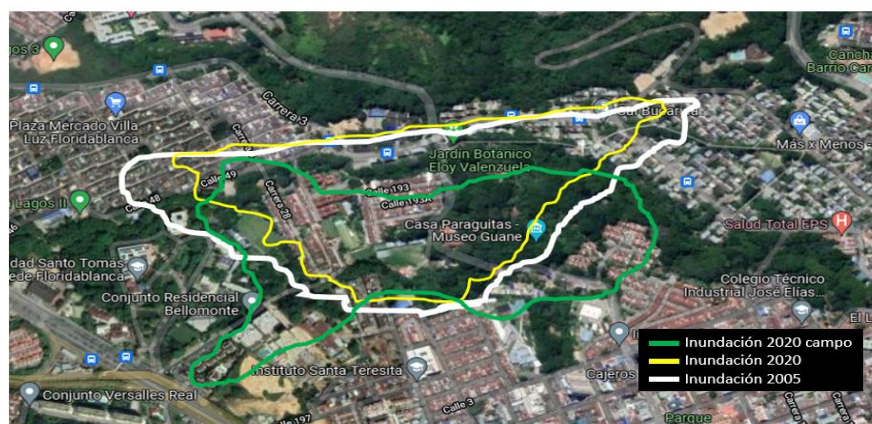
**Figura 35.** Superposición polígonos similares eventos 2020 y 2005



*Nota:* sobreposición de los polígonos generados del evento del 2020 y 2005 de zonas similares con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.

Áreas en común para el evento del 2005, 2020 y 2020 con datos recopilados

**Figura 36.** Superposición de áreas polígonos eventos 2020, 2005 y 2020 información recopilado







*Nota:* sobreposición de los polígonos generados del evento del 2005, 2020 y 2020 en campo de zonas similares con respecto a la zona real de las posibles afectados usando Google Earth para obtener dichas aproximaciones.

### 4.5.3 Categorización de nivel de amenaza y probabilidad para eventos de inundación

Se determinará su nivel de amenaza por inundación del sector teniendo en cuenta la incidencia de inundación de los diferentes eventos de inundación que se pudieron determinar en los periodos de retorno de 100 años y 500 años, con los eventos ocurridos se determinó el siguiente mapa de categorización y probabilidad de la zona, este se generó en el Software Qgis con los datos descargados anteriormente, se obtuvo colores que determina el nivel de amenaza por inundación del sector en color rojo, amarillo y verde.

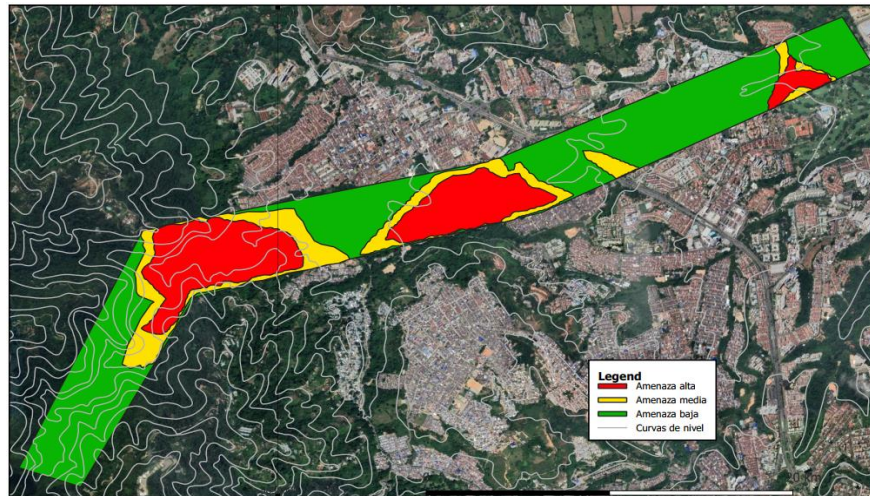
**Tabla 16.** *Tabla de convenciones figura 37*

Tabla de convenciones figura 37	
Amenaza alta	
Amenaza media	
Amenaza baja	
Curvas de nivel	

*Nota:* Los colores determinan el nivel de amenaza por inundación (rojo = alta, amarillo = media, verde = baja). Las convenciones presentadas equivalen a la clasificación de la zona de amenaza para los periodos de retorno de 100 y 500 años.



**Figura 37.** Categorización alta, media, baja sector



*Nota:* según precipitaciones obtenidas en los diferentes eventos de inundación junto a los periodos de retorno generados se hace la clasificación de las zonas afectadas en bajo, medio y alto.

En el mapa se refleja los sectores más inundados del municipio y de la Microcuenca del Río Frío, estos sectores son los ya estipulados anteriormente por ende con el mapa se puede corroborar una vez más la veracidad y la concurrencia de los sectores más vulnerables del cauce del Río, en este sector no solo se obtienen afectaciones por los caudales generados por las precipitaciones, también, el sector cuenta con una topografía de poca pendiente como se puede observar en la Figura 37, por lo que la acumulación de precipitaciones generan estancaciones para una mayor facilidad de inundaciones, esto también fue demostrado en el modelo digital de elevación donde se evidenció que la zona oeste de la microcuenca presentaba las zonas de menores elevaciones.

El mapa fue generado teniendo en cuenta los datos descargados de los eventos analizados y se tiene en general en el sector diferentes probabilidades de inundaciones los cuales varían dependiendo de la categorización de inundación, según, Avendaño A y Cadena Y, se considera

probabilidad de 70% a 80% de inundación a una zona de peligro alta, una probabilidad media para sectores entre 50% y 60% y una probabilidad baja para sectores entre 20% y 40%.

**Tabla 17.** Convenciones de clasificación de amenaza de la zona

Probabilidad	Convención	Amenaza
20% - 40%		Baja
50% - 60%		Media
70% - 80%		Alta

*Nota:* Los colores determinan el nivel de amenaza por inundación (rojo = alta, amarillo = media, verde = baja). Se realiza la categorización de la zona por medio de las probabilidades presentadas según estudios realizados.

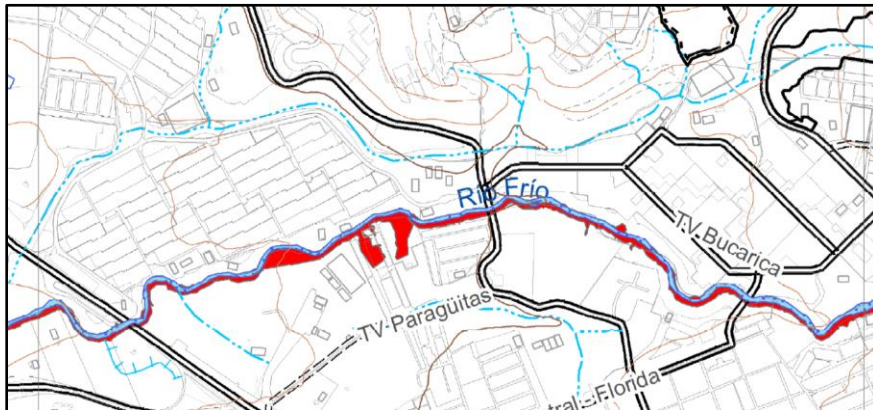
Una vez determinados el nivel de amenaza y la probabilidad de inundación para las diferentes zonas de la microcuenca del Río Frío basados en los resultados de los mapas y los modelos dinámicos de inundación, se realizó la comparación de dichos resultados obtenidos en esta investigación con la información consignada en el POT en vigencia del municipio de Floridablanca sobre los estudios realizados para la amenaza por inundación en este municipio.

En la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial se expresa que, el único estudio disponible para el análisis de este fenómeno de inundación realizado por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) determinó que se pueden presentar graves afectaciones por amenaza alta o media en los periodos de retorno entre 100 y 500 años específicamente en los sectores llamados Villa Piedra del Sol, Bucarica Sector 18, Villa Jardín, Santa Coloma, y Colegio Agustiniano [37] lo cual es un factor predictivo que coincide con los resultados del proyecto ya que como se pudo observar en la *Tabla 15. Caudales máximos*

*calculados y variación estándar*, presentada en los cálculos realizados, el caudal más crítico fue el del periodo de retorno de 100 años y en su mapa de inundación, Apéndice F. *Mapa 4. Modelo dinámico inundación periodo de retorno 100 años*, se infieren las mismas zonas afectadas que fueron mencionadas en el POT; es importante mencionar que en el mapa obtenido en esta investigación las zonas afectadas por el evento son mayores a las mencionadas en el POT.

Además de esto en la revisión general del POT se expresa que la CDMB mediante el software HEC-RAS determinó la zona del sector de lagos 2 y el puente de Floridablanca- anillo vial, como una zona con grandes áreas de inundación debido a que presenta muy pocas pendientes y el agua se queda estancada [37]; estas zonas también se encuentran abarcadas en las áreas inundadas obtenidas no solo en el mapa del periodo de retorno de 100 años, si no también, en los mapas de las inundaciones de los años 2005 y 2020. Visualizar figura 20.

A continuación, se presenta una imagen extraída y adaptada de la Revisión General del POT, acerca de la delimitación de amenaza alta por inundación del Río Frío donde se puede observar que la zona más afectada es el sector inmediato de Santa Coloma, Villa piedra del sol, la cual se puede comparar con la figura 37 con el fin de poder observar las diferencias entre los resultados usados en el POT y los resultados de inundación de la presente investigación.

**Figura 38.** Mapa de amenaza por inundación POT

Adaptado de “Plan de ordenamiento territorial revisión general Floridablanca”, por Alcaldía de Floridablanca, 2018.

Teniendo en cuenta lo anterior, comparando la figura 37 con los resultados de las zonas de inundación obtenidos, se pueden observar que ambos resultados presentan como zona afectada o zona crítica el sector de Santa Coloma, Villa piedra del sol, Colegio Agustiniano, Parte del barrio Lagos 2, Bucarica y demás sectores aledaños pero también se puede observar que son mucho más grandes las zonas de inundación obtenidas en la presente investigación, lo cual se le atribuye a distintos factores o variables que pueden generar cierto porcentaje de error o de variación en los resultados.

Según esto, se puede decir que el porcentaje de error o variación con respecto a los resultados utilizados en el POT, está sujeto inicialmente a los datos de las precipitaciones ya que como se mencionó en la fase de recolección de datos, las estaciones dentro de la microcuenca del Río Frío no se encontraban activas hasta la fecha, por lo cual se tuvo que utilizar unas más lejanas y a partir de ahí generar por medio de cálculos, las precipitaciones para las estaciones que sí se encontraban dentro del objeto de estudio; además, también podemos mencionar que dentro del alcance no estaba el análisis y estudio a detalle del suelo existente en la microcuenca, lo cual es

una variable que influye en la remoción en masa o arrastre de sedimentos en un fenómeno de inundación modificando de cierta manera los resultados para los eventos de inundación.

## 5. Discusión

La finalidad de la investigación consistió en analizar las zonas urbanas con mayor amenaza por inundación de la microcuenca del Río Frío del municipio de Floridablanca específicamente en Sector de Santa Coloma y zonas cercanas mediante el uso de las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica, permitiendo la identificación de las zonas con mayor amenaza y probabilidad de inundación en dicho sector estudiado; esto permite la comparación con diferentes estudios desarrollados en las diversas microcuencas o incluso cuencas existentes en el país, algunos de los cuales coinciden con los análisis realizados, pero también hubo discrepancias con otros autores.

Avendaño y Cadena, 2014, en su estudio Uso de Sistemas de Información Geográfica en la determinación de amenazas por inundación en el municipio de Chía obtienen que un factor desfavorable en las inundaciones presentadas es la localización en la que se encuentra el municipio ya que es un terreno con poca pendiente lo que dificulta la escorrentía y evacuación del agua [27].

Por lo anterior, en esta investigación se puede corroborar lo anteriormente expuesto ya que, en la superposición de todos los mapas de los eventos de inundación se puede observar que la mayoría de las zonas inundadas son zonas con poca pendiente representando dichas zonas con una mayor probabilidad de inundación.

Por otra parte, se obtiene un valor de 330,01 m<sup>3</sup>/seg para el caudal proyectado del periodo de retorno de 100 años, pero Fuentes, 2017, en su investigación llamada Generación de Áreas Inundables Mediante SIG en la cuenca baja del Río Anchicayá Valle del Cauca, obtiene como

resultado del caudal proyectado para el periodo de retorno de 100 años el valor de 126,419 m<sup>3</sup>/seg, lo cual es casi la mitad del calculado en esta investigación [18], esta diferencia en los resultados de proyección puede deberse a un aumento en los valores de precipitación utilizados en los análisis realizados para calcular los caudales del proyecto, ya que dichos datos pluviométricos no fueron extraídos directamente de los registros de las estaciones meteorológicas dentro de la microcuenca, sino que, fueron calculados a partir de los datos pluviométricos de otras estaciones más lejanas al objeto de estudio.

Además de lo anterior, es de gran importancia resaltar el valor de la superposición de los eventos o mapas de inundación como se realiza en el presente estudio lo cual es una característica esencial en la metodología llevada a cabo en la investigación de Garnica y Alcántara, 2004, acerca de los riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del Río Tecolutla, Veracruz, en donde mencionan que la combinación de las bandas (Capas) 4-3-2, permitió observar en tonos rojos la zona de impacto de inundación del año 1999 y así mismo en otro tono la zonificación de la inundación del año 1989 permitiendo identificar la similitud de las zonas afectadas de los dos eventos representados [38].

El Documento Diagnostico amenaza de inundación y erosión en el Río de oro en el sector del puente Lenguerke en el municipio de Girón Santander [39], el cual es específicamente el punto donde desemboca el río frío y por ende donde se cierra la microcuenca, presentó como caudal máximo un valor de 236 m<sup>3</sup>/seg, cuyo valor es muy similar al valor obtenido en esta investigación (220,55 m<sup>3</sup>/seg), demostrando la similitud entre los caudales en el mismo año estudiado (2005) de dichos afluentes principales los cuales se conectan en algún punto de su recorrido presentando valores similares en dichos caudales.

A parte de lo anterior, es importante resaltar la pertinencia de las herramientas del software Qgis en esta investigación, como lo demuestran Mancusi, Albano y Sole, 2015, en su estudio llamado Flood Risk : a Qgis Plugin for flood consequences estimation [40], en el cual destacan que dicho software por medio de la integración de datos digitales “input data” y “Output Data” es de gran precisión para representar posibles eventos de inundación y así mismo la identificación de las áreas afectadas por dicho evento, permitiendo de esta forma evaluar sus consecuencias.

De la misma forma, Pasquier, He y Hiscock, 2017, en su estudio llamado An integrated 1D–2D hydraulic modelling approach to assess the sensitivity of a coastal region to compound flooding hazard under climate change [41], demuestran la importancia y pertinencia del software HEC-RAS en la modelación hidráulica de los eventos de inundación con el fin de analizar las variables y las amenazas de dichos eventos, en este estudio se demostró la utilidad de la modelación 2D permitiendo unos tiempos de ejecución de simulación más bajos y con áreas más grandes.

Finalmente, en la presente investigación entre los productos obtenidos se representaron los posibles eventos de inundación para los periodos de retorno de 100 y 500 años los cuales arrojaron que las zonas con mayor amenaza de inundación pertenecían al sector de Santa Coloma y Lagos 2, las cuales coinciden con las áreas críticas que fueron obtenidas en la práctica empresarial en la empresa Torres ingeniería S.A.S. [34], realizada por Zaraza, 2011, en la que se determina el área del sector Santa Coloma como un área de mayor desbordamiento del Río Frío.

## **6. Conclusiones**

Por medio de las diferentes fuentes de datos y softwares se pudieron determinar e identificar las características cartográficas e hidrológicas de la microcuenca del Río Frío gracias a

la generación de capas vectoriales en QGis y la descarga de datos por medio del IDEAM, con esto, se confirma que el río a estudiar es el Río Frío, el cual se tomó desde la cota 2650 msnm y hasta el punto de cierre establecido en la cota 700 msnm Río de Oro con una longitud total de 32.836 Km con un área total de 113.243 Km<sup>2</sup>, así mismo, se logró determinar que en esta se presentan mayores alturas en la parte este y las zonas de menores elevaciones o planicies en la zona oeste, además, esta, cuenta con una pendiente media de 0,5% clasificándola como una microcuenca de relieve suave con un tiempo de concentración de 10.34 horas.

Con los datos hidrológicos se evidenció principalmente la necesidad del buen funcionamiento continuo de las diferentes estaciones hidrológicas debido a que se debió realizar un aproximado de las precipitaciones reales de dicha zona debido a que no se encontraron registros actualizados de las estaciones del sector. Los datos obtenidos de las estaciones disponibles arrojaron datos variantes de los diferentes años, sin embargo, no se contó con los datos completos para todos los años por lo que fue necesario hacer un relleno de datos por diferentes métodos ya mencionados para la posterior obtención de caudales, se obtuvieron en total de veinte tres mil trescientos setenta y seis (23376) datos pluviométricos de los cuales solo setecientos setenta y nueve (779) fueron rellenos lo que refleja un gran porcentaje de datos reales utilizadas para garantizar veracidad en el estudio.

Una vez teniendo las precipitaciones completas se realiza un promedio de estas para la realización del modelo meteorológico para la ejecución de caudales por año para un periodo de 15 años, se obtuvo los caudales máximos para los eventos de mayor afectación del sector los cuales fueron en el 2005 y 2020 con caudales de 220.55 m<sup>3</sup>/seg y 150.5 m<sup>3</sup>/seg respectivamente, de igual manera, se calcularon los caudales de diseño para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años de los cuales se obtuvo caudales de 148.27, 212.97, 259.54, 294,77 y 330,01 m<sup>3</sup>/seg



respectivamente los cuales nos representan un estimativo de probabilidad de ocurrencia de posibles eventos para los años estipulados.

Con los datos de los caudales máximos de la microcuenca del Río Frío se generaron mapas de inundación para los eventos del 2005 y 2020 de los cuales se pudieron observar similitudes en las áreas de inundación teniendo en cuenta que el evento del 2005 abarcó mayor área de inundación debido a que presentaba valores superiores en los caudales, los sectores más afectados fueron los sectores del este de la microcuenca del Río Frío la cual presentaba menores pendientes por lo que genera una mayor probabilidad de estancamiento de precipitaciones, estos sectores hacen parte de Bosques de La Florida, parte de Lagos 2, Santa Coloma, parte de Bucarica, Mediterrané y demás sectores en las cuales se hizo énfasis en el estudio.

Este estudio de análisis de datos descargados fue comparado con información obtenida del evento real ocurrido en el 2020 en el cual se pudo evidenciar y corroborar la veracidad de la información obtenida, además, el estudio fue de gran importancia debido a que comparado con el POT se evidenció la falencia o la falta de información actualizada debido a que en este no se contemplaba la posibilidad de un nuevo evento luego del 2005 y aunque en la actualidad el municipio de Floridablanca no cuenta con información actualizada de precipitaciones se puede establecer y obtener futuros eventos para así prevenir futuros desastres y esto también puede ser observado en el mapa de riesgo de inundación donde presenta los niveles de amenaza que presenta el sector, es por esto que, el municipio de Floridablanca requiere de actualización del funcionamiento de las estaciones meteorológicas para prevenir posibles eventos y así realizar un Plan de Ordenamiento Territorial más acertado y verídico para contemplar todas las posibles posibilidades de eventos de inundación en el sector y poder evitarlos a futuro.

### Referencias

- [1] QGIS, “Datos Vectoriales,” 2021.  
[https://docs.qgis.org/2.8/es/docs/gentle\\_gis\\_introduction/vector\\_data.html](https://docs.qgis.org/2.8/es/docs/gentle_gis_introduction/vector_data.html).
- [2] BRIDGE and UICN, “Cuenca Hidrográfica.”  
[https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/cuenca\\_hidrografica.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/cuenca_hidrografica.pdf).
- [3] GEAGIS, “¿Qué es HEC-RAS y para qué sirve?,” 2021, [Online]. Available:  
<https://www.geasig.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>.
- [4] MINAMBIENTE, “GUÍA METODOLÓGICA PARA LA FORMULACIÓN DE LOS PLANES DE MANEJO AMBIENTAL DE MICROCUENCAS – PMAM.,” 2008.
- [5] Geo Innova, “¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica?,” 2021.  
<https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/>.
- [6] QGIS, “QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio,” 2021.  
<https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>.
- [7] S. A. Alvarado, “Uso De Un Sistema De Información Geográfica Para El Análisis De Amenaza Por Inundaciones En La Cuenca Alta Del Río Bogotá-Municipio De Cota-Límites Localidad De Suba.” p. 66, 2014, [Online]. Available:  
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1800/1/Uso-SIG-para-análisis-amenaza-inundaciones-cuenca-alta-río-Bogotá.pdf>.
- [8] República de Colombia, *Resolución 1284 de 2009*. 2009.
- [9] C. N. de P. de D. CENAPRED, “Inundaciones.” 2004, [Online]. Available:  
<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>.

- [10] O. M. M. OMM., “Atlas de la mortalidad y las pérdidas económicas provocadas por fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos.” 2014, [Online]. Available: <https://public.wmo.int/es/media/press-release/ommcreducl—atlas-de-la-mortalidad-y-las-pérdidas-económicas-provocadas-por>.
- [11] U. de G. del R. de F. UNGRD, “Desbordamiento de río por fuertes lluvias en Floridablanca, Santander,” 2020.
- [12] O. G. Rodríguez, “Estudio para prevenir y reducir las vulnerabilidades de la comunidad de la melba ante los desastres naturales.” 2014, [Online]. Available: <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/3495/OrlandoGarcellRodríguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [13] R. G. A. MARCELO, “Aplicación de herramientas de sistemas de información geográfica para la gestión de riesgos y desastres, ante la amenaza de inundación en la parroquia pascuales del cantón de guayaquil,” *La Evasión Tributaria E Incidencia En La Recaudación Del Impuesto a La Renta De Personas Naturales En La Provincia Del Guayas, Periodo 2009-2012*, no. PROYECTO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y FINANCIERA DEL CULTIVO DE OSTRA DEL PACÍFICO EN LA PARROQUIA MANGLARALTO, CANTÓN SANTA ELENA, PROVINCIA DE SANTA ELENA. p. 136, 2016.
- [14] M. S. Khattak, F. Anwar, T. U. Saeed, M. Sharif, K. Sheraz, and A. Ahmed, “Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcGIS: A Case Study of Kabul River,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, no. 4. pp. 1375–1390, 2016, doi: 10.1007/s13369-015-1915-3.
- [15] L. Rivas and J. Carrera, “Zonificación de la amenaza por inundaciones en la planicie aluvial

- del río Borburata, estado Carabobo, Venezuela.” 2016, [Online]. Available: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1010-29142016000100011](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142016000100011).
- [16] R. G. Lorenzo and C. C. García, “Estimación De Caudales De Avenida Y Delimitación De Áreas Inundables Mediante Métodos Hidrometeorológicos E Hidráulicos Y Técnicas S.I.G., Estudio Aplicado Al Litoral Sur De La Región De Murcia,” *Papeles de Geografía*, vol. 0, no. 53–54. pp. 107–123, 2011, [Online]. Available: <https://revistas.um.es/geografia/article/view/143471/128751>.
- [17] A. P. Brugal and J. F. Weber, “Importancia de los modelos digitales del terreno en la simulación hidráulica de inundaciones,” vol. 1, no. 3. pp. 51–60, 2010, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/263580011\\_Importancia\\_de\\_los\\_modelos\\_digita les\\_del\\_terreno\\_en\\_la\\_simulacion\\_hidraulica\\_de\\_inundaciones](https://www.researchgate.net/publication/263580011_Importancia_de_los_modelos_digita les_del_terreno_en_la_simulacion_hidraulica_de_inundaciones).
- [18] G. A. F. AGUIRRE, “GENERACIÓN DE MAPA DE ÁREAS INUNDABLES MEDIANTE SIG EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO ANCHICAYÁ VALLE DEL CAUCA.” pp. 13–14, 2017, [Online]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14585/1/DOCUMENTO GENERACION DE MAPA DE AREAS DE INUNDACION MEDIANTE SIG EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO ANCHICAYÁ VALLE DEL CAUCA.pdf>.
- [19] M. Campos-Vargas, A. Toscana-Aparicio, and J. Campos Alanís, “Riesgos sicionaturales: vulnerabilidad socioeconómica, justicia ambiental y justicia espacial,” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, vol. 24, no. 2. pp. 53–69, 2014, doi: 10.15446/rcdg.v24n2.50207.
- [20] Instituto Distrital de Gestión de Riesgos - IDIGER, “Documento técnico de soporte. Estudios Básicos. ‘Amenaza por inundación en perspectiva de Cambio Climático,’” vol. 2.

- p. 306, 2018, [Online]. Available: [http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/4-DOCUMENTO-TECNICO-DE-SOPORTE/Gestion del Riesgo. Amenazas inundacion Urbano.pdf](http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/4-DOCUMENTO-TECNICO-DE-SOPORTE/Gestion%20del%20Riesgo.%20Amenazas%20inundacion%20Urbano.pdf).
- [21] IDEAM, “Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación,” *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación, Colombia*. p. 110, 2014, [Online]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38247>.
- [22] DGTD, “Metodología del conocimiento de riesgo para diferentes escenarios amenazantes en.” 2018, [Online]. Available: <https://www.santander.gov.co/index.php/gobernacion/administracion/oficinas/direccion-de-gestion-del-riesgo/category/500-direccion-de-gestion-del-riesgo>.
- [23] D. 1076, “Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible,” *Decreto 1076 2015*, pp. 1–648, 2015, [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>.
- [24] J. G. Lozano, V. V. Tristán, M. R. Rodríguez, M. De Jesús Aguirre Bortoni, J. M. P. De La Cruz, and H. T. S. Espinoza, “Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México,” *Investigaciones Geograficas*, vol. 76. pp. 20–33, 2011, doi: 10.14350/rig.29871.
- [25] Ecuador documents, “Caudales máximos.” <https://fdocuments.ec/document/capitulo-6b-55ab5841d6e44.html>.
- [26] D. E. Sanches Angulo, “ESTUDIO MORFOMÉTRICO DEL CAÑO EL BEJUCO AFLUENTE DEL RÍO TOCORAGUA DEPARTAMENTO DE CAUCA.”
- [27] Miniambiente, “Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río La Vieja,” 2017.

- [28] J. Á. Díaz, “Análisis De Aspectos Que Incrementan El Riesgo De Inundaciones En Colombia,” *Luna Azul*, no. 37. pp. 219–238, 2013, doi: 10.17151/luaz.2013.37.13.
- [29] A. Z. A. CIPAGAUTA and Y. K. C. MELO, “USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA DETERMINACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIÓN EN EL MUNICIPIO DE CHÍA,” 2014.
- [30] W. Mora and R. Ochoa, “Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ARCGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales - Paz del Rio a lo largo del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá,” *Aristizábal Murillo, Mauricio. «Modelos hidrológicos e hidráulicos de zonificación de la amenaza por inundación en la Dorada Caldas.»* 2012. p. 97, 2016, [Online]. Available: <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1677>.
- [31] J. C. G. VELANDIA, “LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN LAS INUNDACIONES DE COLOMBIA: UNA MIRADA CRÍTICA,” 2014.
- [32] P. de O. T. POT., “Plan de Ordenamiento Territorial,” no. 5. 2019.
- [33] C. M. de Floridablanca, “Informe ambiental anual del municipio de Floridablanca.” 2018, [Online]. Available: [https://contraloriamunicipal-de-floridablanca.micolombiadigital.gov.co/sites/contraloriamunicipal-de-floridablanca/content/files/000084/4163\\_informe-ambiental-2018.pdf](https://contraloriamunicipal-de-floridablanca.micolombiadigital.gov.co/sites/contraloriamunicipal-de-floridablanca/content/files/000084/4163_informe-ambiental-2018.pdf).
- [34] C. A. Peña zaraza, “Práctica Empresarial En La Empresa Torres Ingeniería S.a.S. Para El Estudio De Zonificación De Amenaza Por Inundación En La Cuenca Baja Y Media Del Rio Frio(Municipio De Floridablanca) , De Acuerdo Con Las Especificaciones Técnicas Establecidas Por La CDM,” 2011.
- [35] Universidad de Oviedo, “Conceptos, construcción del MDE.”

- <https://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema1/Page16.html>.
- [36] Presidencia de la Republica, “Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio,” *“Por Medio Del Cual Se Expide El Decreto Único Reglam. Del Sect. Vivienda, Ciudad Y Territ.”*, vol. 2015, no. Diario oficial No. 49523, pp. 1–733, 2015, [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216#1077>.
- [37] Alcaldía municipal de Floridablanca, “Plan de Ordenamiento Territorial, municipio de Floridablanca,” 2018.
- [38] R. J. Garnica Peña and I. Alcántara Ayala, “Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz,” *Inst. Geogr. UNAM*, 2004.
- [39] CDMB and Geotecnología Ltda, “Documento de Diagnóstico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro,” 2005.
- [40] L. Mancusi, "FloodRisk: a QGIS plugin for flood consequences estimation", thesis, University of Basilicata, Matera, Italy, University of Basilicata, Potenza, Italy, 2015.
- [41] U. Pasquier, Y. He, S. Hooton, M. Goulden, "An integrated 1D–2D hydraulic modelling approach to assess the sensitivity of a coastal region to compound flooding hazard under climate change", <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3462-1>, 30 August 2018

## Apéndices

Apéndice A. Valores de  $Y_n$  y  $\delta N$ 

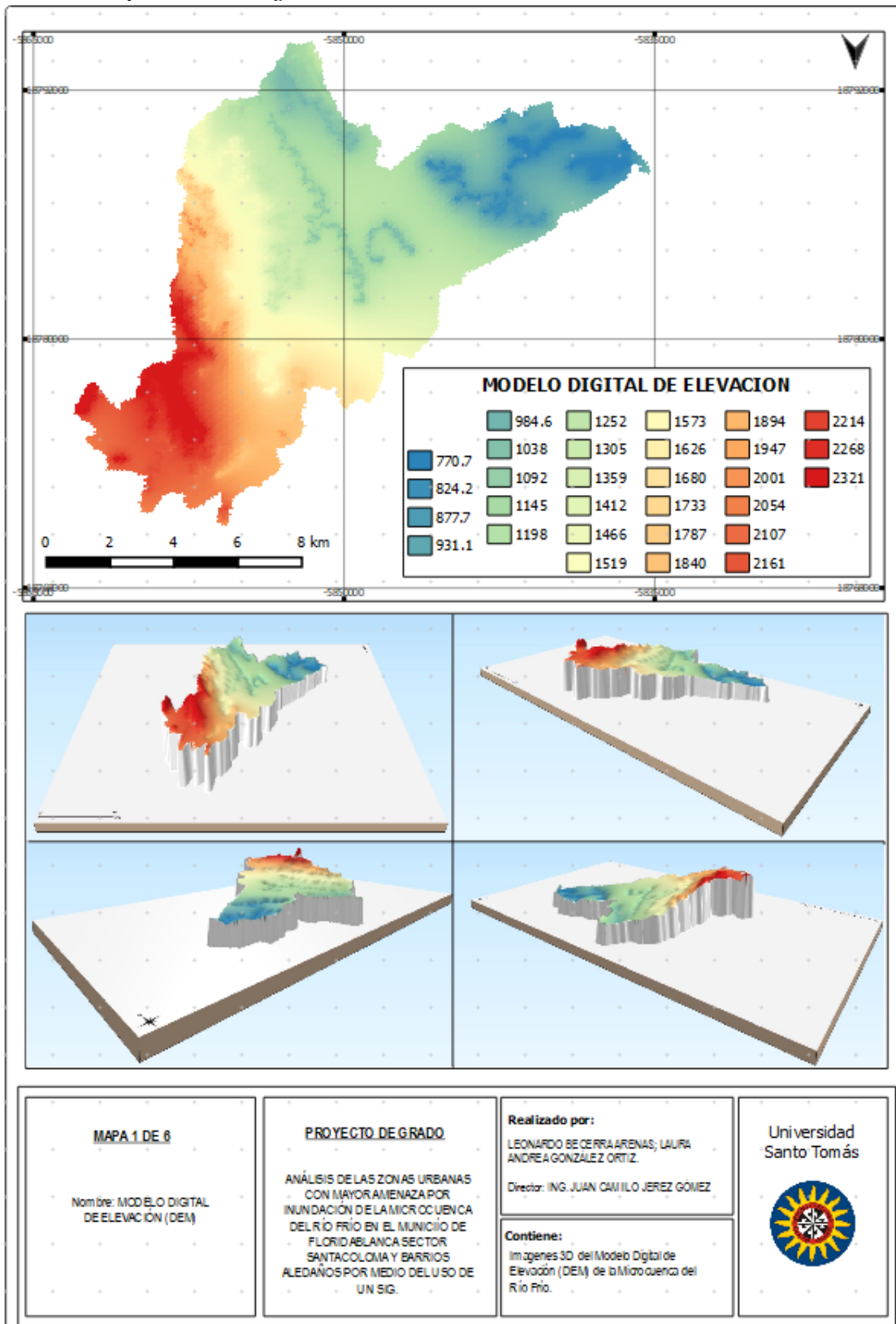
$N$	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$	$N$	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$	$N$	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$
8	0.4843	.9043	35	0.54034	1.12847	64	0.5533	1.1793
9	0.4902	0.9288	36	0.5410	1.1313	66	0.5538	1.1814
10	0.4952	0.9497	37	0.5418	1.1339	68	0.5543	1.1834
11	0.4996	0.9676	38	0.5424	1.1363	70	0.55477	1.18536
12	0.5053	.9833	39	0.5430	1.1388	72	0.5552	1.1873
13	0.5070	0.9972	40	0.54362	1.14132	74	0.5557	1.1890
14	0.5100	1.0095	41	0.5442	1.1436	76	0.5561	1.1906
15	0.5128	1.02057	42	0.5448	1.1458	78	0.5565	1.1923
16	0.5157	1.0316	43	0.5453	1.1480	80	0.55688	1.19382
17	0.5181	1.0411	44	0.5458	1.1499	82	0.5572	1.1953
18	0.5202	1.0493	45	0.5463	1.15185	84	0.5576	1.1967
19	0.5268	1.0566	46	0.5468	1.1538	86	0.5580	1.1980
20	0.5283	1.06283	47	0.5473	1.1557	88	0.5583	1.1994
21	0.5296	1.0696	48	0.5477	1.1574	90	0.5586	1.20073
22	0.53086	1.0754	49	0.5481	1.1590	92	0.5589	1.2020
23	0.5320	1.0811	50	0.54854	1.16066	94	0.5592	1.2032
24	0.5296	1.0864	51	0.5489	1.1623	96	0.5595	1.2044
25	0.53086	1.09145	52	0.5493	1.1638	98	0.5598	1.2055
26	0.5320	1.0961	53	0.5497	1.1653	100	0.56002	1.20649
27	0.5332	1.1004	54	0.5501	1.1667	150	0.56461	1.22534
28	0.5343	1.1047	55	0.5504	1.1681	200	0.56715	1.23598
29	0.5353	1.1086	56	0.5508	1.1696	250	0.56878	1.24292
30	0.53622	1.11238	57	0.5511	1.1708	300	0.56993	1.24786
31	0.5371	1.1159	58	0.5515	1.1721	400	0.57144	1.25450
32	0.5380	1.1193	59	0.5518	1.1734	500	0.57240	1.25880
33	0.5388	1.1226	60	0.55208	1.17467	750	0.57377	1.26506
34	0.5396	1.1255	62	0.5527	1.1770	1000	0.57450	1.26851



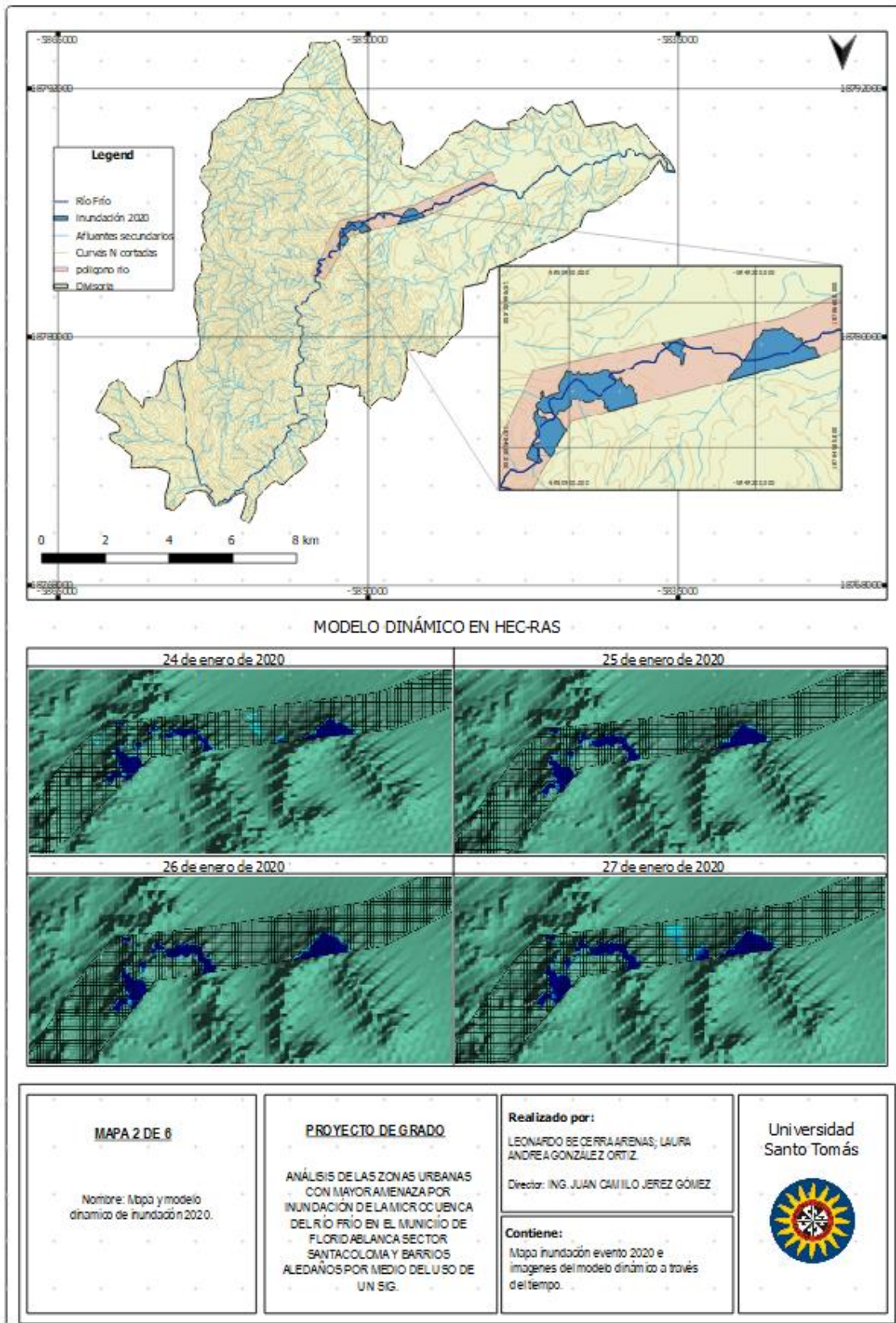
**Apéndice B.** Valores de  $\sqrt{N\alpha} \delta_m$  en función de  $\Phi$

$\phi$	$\sqrt{N\alpha\sigma_m}$
0.01	(2.1607)
0.02	(1.7894)
0.05	(1.4550)
0.10	(1.3028)
0.15	1.2548
0.20	1.2427
0.25	1.2494
0.30	1.2687
0.35	1.2981
0.40	1.3366
0.45	1.3845
0.50	1.4427
0.55	1.5130
0.60	1.5984
0.65	1.7034
0.70	1.8355
0.75	2.0069
0.80	2.2408
0.85	2.5849
0.90	(3.1639)
0.95	(4.4721)
0.98	(7.0710)
0.99	(10.000)

Apéndice C. Mapa Modelo Digital de Elevación DEM

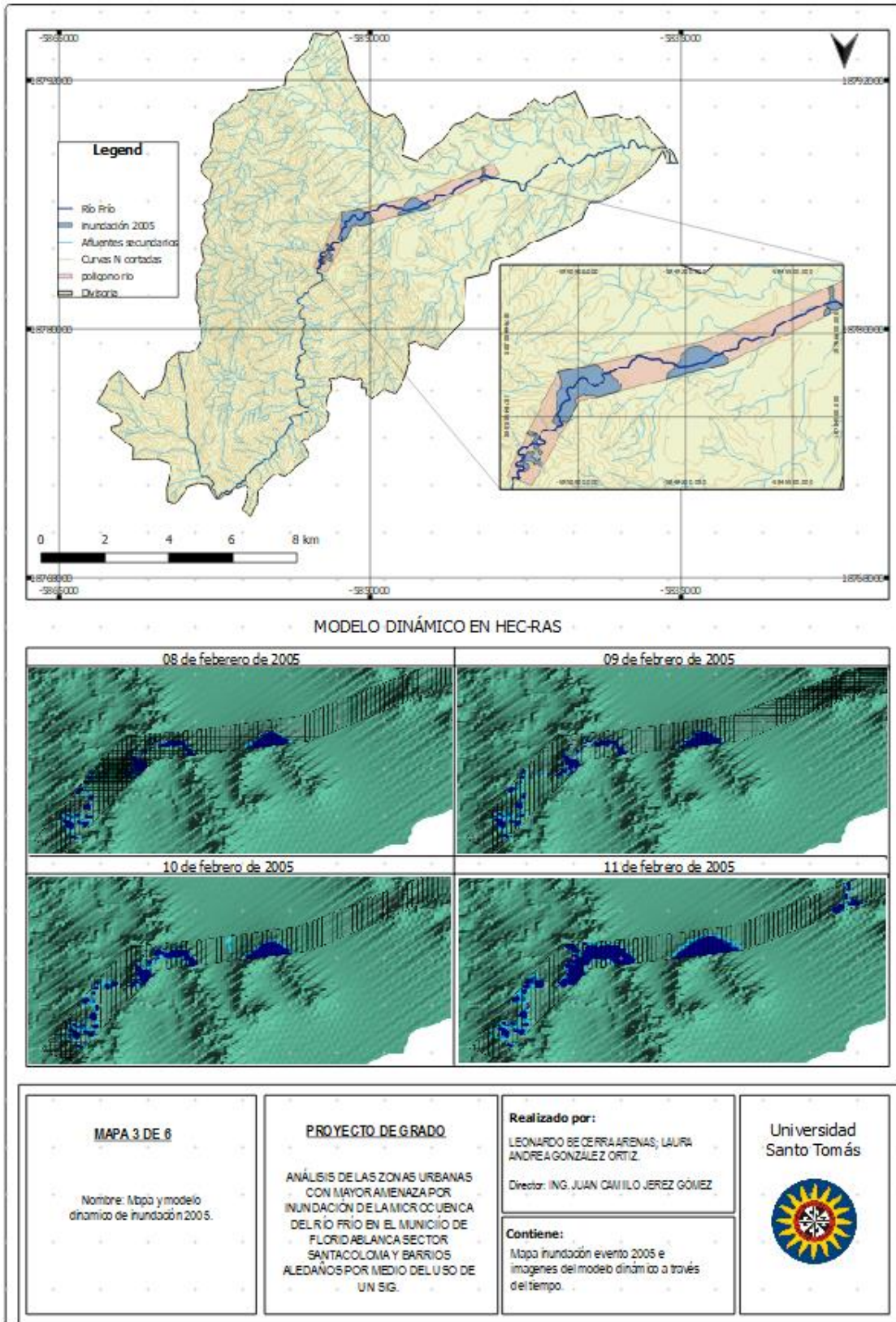


Apéndice D. Modelo dinámico inundación 2020

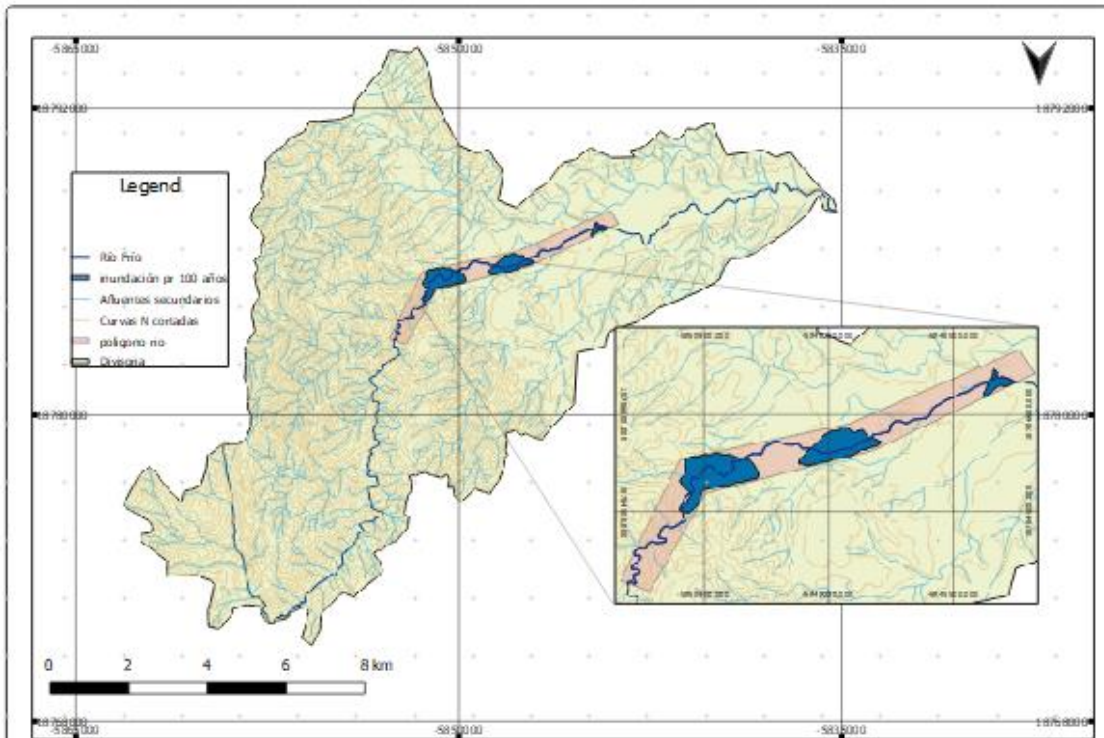




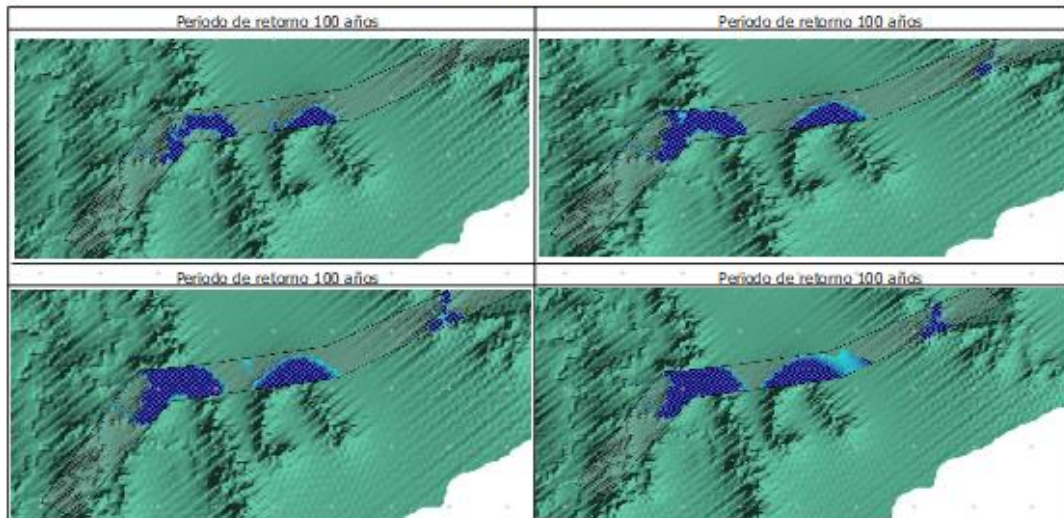
Apéndice E. Modelo dinámico inundación 2005




Apéndice F. Modelo dinámico inundación periodo de retorno 100 años



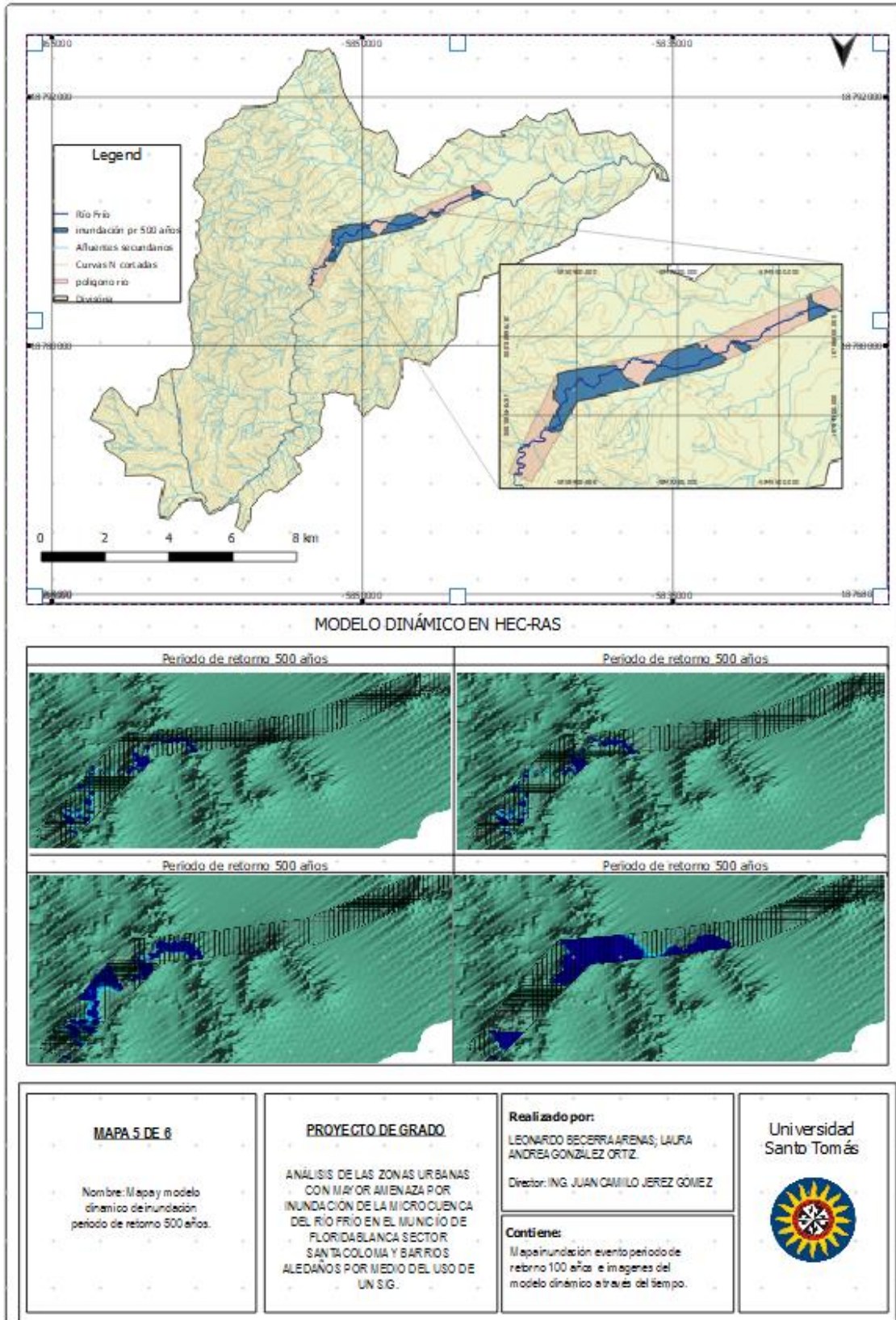
MODELO DINÁMICO EN HEC-RAS



<p><b>MAPA 4 DE 6</b></p> <p>Nombre: Mapas y modelo dinámico de inundación periodo de retorno 100 años.</p>	<p><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> <p>ANÁLISIS DE LAS ZONAS URBANAS CON MAYOR AMENAZA POR INUNDACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO FRÍO EN EL MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA SECTOR SANTACOLOMA Y BARRIOS ALEDAÑOS POR MEDIO DEL USO DE UN SIG.</p>	<p><b>Realizado por:</b> LEONARDO BECERRA ARENAS; LAURA ANDREA GONZÁLEZ ORTIZ.</p> <p><b>Director:</b> ING. JUAN CAMILO JEREZ GÓMEZ</p> <p><b>Contiene:</b> Mapa inundación evento periodo de retorno 100 años e imágenes del modelo dinámico a través del tiempo.</p>	<p>Universidad Santo Tomás</p> 
---	--	--	--



Apéndice G. Modelo dinámico inundación periodo de retorno 500 años



Apéndice H. Mapa de inundación datos de campo

