



Uso de La Modelación Hidráulica de crecientes como herramienta de gestión para la elaboración de planes y estrategias para reducir el peligro de inundaciones

Autor:
Andrés Mauricio Álvarez Rengifo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Tutores:
Carlos Alberto Palacio Tobón, Doctor en Ingeniería
Eisinhower Rincón Vargas, Msc. Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	(Álvarez Rengifo, A. M. 2022)
Referencia	Álvarez Rengifo, A. M. (2022). <i>Uso de La Modelación Hidráulica de crecientes como herramienta de gestión para la elaboración de planes y estrategias para reducir el peligro de inundaciones</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

AGRADECIMIENTOS

Mi propia historia familiar paterna me involucra con el majestuoso Nudo de Paramillo, son oriundos de Tierralta Córdoba, la cual visité por última vez hace 26 años, aunque mi identificación no me contextualiza, si me ubica en una prerrogativa profunda. El río son los Emberá, que en su idioma significa ‘gente’, hacia el Alto Sinú, en la zona montañosa limítrofe con el departamento de Antioquia, precisamente esto posibilitó la migración de mi familia paterna hacia mi municipio natal: Apartadó Antioquia, mi padre me describía el río de su niñez como una paraíso terrenal, lleno de cocodrilos, aves de toda clase, iguanas, canoas enteras de bocachico y demás bestias que en el imaginario de un niño se potenciaban, además mi abuelo les tenía prohibido ir a orillas del río solos, precisamente por lo agreste (1962). En medio de mi carrera entendí lo verosímil de sus palabras, el río Sinú otorgaba una fertilidad excepcional, en el recorrido de 415 kilómetros desde su nacimiento a 3.500 metros sobre el nivel del mar, hasta desembocar en Boca de Tinajones. Posee un elevado número de colonizadores antioqueños y de la costa caribe, se dedican a la explotación acuífera, a la ganadería, a la agricultura, a la pesca y al jornaleo, y otros, al comercio. Sin embargo, entiendo hoy que ese río de 1962 que narra mi padre está desapareciendo, y yo lo evidencio con el río que me vio nacer (río Apartadó), y esto es debido a que esos ríos que nacen en esas hermosas serranías, tuvieron que recorrer un camino macondiano hacia el olvido, tanto estatal como de todos nosotros los colombianos.

Muchas gracias a mi hijo Marco por hacerme entender con una mirada, que la única forma de sumergirme en la Ingeniería de manera plena, era a través de mi contribución Ambiental; por su paciencia a la hora de posponer un poco el tiempo a su lado para este gran propósito. Muchas gracias a mi esposa Paulis, quien sabe cómo encarnar la tranquilidad en palabras de aliento cuando todo parece estar perdido, y sabe cómo reír y hacerme reír en cualquier estación del año. Muchas gracias a mi mamá Betty, mi beatita, y su maravillosa fe inquebrantable en mis capacidades, y su amor incondicional, te amo más allá de mis palabras. Muchas gracias a mi papá, Rafa, gracias por tus enseñanzas de vida, por el amor que me heredaste para adentrarme en la selva, en el río, y en el deporte, enseñándome las ventajas de la disciplina diaria. Muchas gracias a mis asesores Carlos Palacio y Eisenhower Rincón, quienes fueron una luz de claridad en medio de tantas incertidumbres, gracias por sus incalculables y maravillosos aportes en esta investigación. Muchas gracias hermanita Lilo, por ser mi compañera de juegos de niñez, por tus palabras de aliento, y por hacerme el tío más feliz del planeta. Muchas gracias a mis tías Patty y Silvia, siempre ahí, aconsejándome. Muchas gracias Tita y Tito, bisabuelos de mi hijo, por sus consejos de vida y sus recuerdos interminables y llenos de sonrisas. Muchas gracias a María Elena y a Edgar, siempre los he visto como un maravilloso ejemplo académico y de vida. Muchas gracias Universidad de Antioquia, por la oportunidad que me diste, y que me volviste a dar, en medio de los ires y venires de mi vida, conocí la pluralidad del universo gracias a tus aulas, y quisiera que me permitieras seguir conociéndolo a través de ti. Muchas gracias vida por bendecir mi alma, mi cuerpo, mis ideas y mis acciones.

El presente trabajo de grado se llevó sin duda un pedacito de mi alma, justo detrás del río Apartadó en el tramo que amenazaba el barrio de la casa de mi abuela María Inocencia, gracias por inspirarme abuela.

La educación siempre ha merecido mis grandes y profundos pensamientos, por lo cual le agradezco a través de esta composición:

<https://www.youtube.com/watch?v=2MVC1FUf6N8&t=1s>

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN.....	8
2	Introducción	9
3	Objetivos	9
3.1	Objetivo general	9
3.2	Objetivos específicos.....	9
4	Marco Teórico.....	10
4.1	Conceptos generales	10
5	Estado del arte	11
6	Métodos y datos	12
6.1	Descripción de la zona de Estudio.....	13
6.1.1	Análisis batimétrico encontrado en el tramo específico utilizado para modelar hidráulicamente.	15
6.1.2	Aspectos geotécnicos en la literatura en el tramo específico utilizado para modelar hidráulicamente.	15
6.2	Descripción del Modelo HEC-RAS	16
6.3	Modelo digital del terreno	17
6.3.1	Quemado de la red de corrientes en la capa DEM inicial en QGIS	18
6.3.2	Recorte del DEM quemado en QGIS, para HEC-RAS.....	19
6.4	Datos.....	20
6.4.1	Geomorfología de la cuenca hidrográfica río Apartadó subcuenca del río León 20	
7	Resultados y análisis	27
7.1	Análisis geométrico de la cuenca del río Apartadó	27
7.2	Análisis geométrico de la cuenca del río León.....	28
7.3	Tiempo de concentración (T_c).	29
7.4	Comparativo de parámetros morfométricos del río Apartadó según la literatura con parámetros hallados en la presente investigación.	30
7.5	Análisis Geomorfológico de la cuenca.....	30
7.6	Tramo del río Apartadó utilizado para Modelación hidráulica	31
7.7	Modelación hidráulica	40
7.7.1	Dominio de modelación y área de estudio	40
7.7.2	Condiciones de frontera del modelo hidráulico y rugosidad.....	40
7.7.3	Simulación de caudal constante	40
8	Conclusiones y recomendaciones.....	59
9	Referencias bibliográficas	61

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Orden de los Cauces en la Cuenca del Río León.	14
Figura 2. Esquema de Preissman o de los cuatro puntos.	16
Ecuación 1. Ecuación del esquema implícito en diferencias finitas de Preissmann.	16
Figura 3. DEM Cuenca rio Apartadó.	18
Figura 4. Cauce Principal Corregido del rio Apartadó con OpenStreetMap.	19
Figura 5. Recorte Burned para Hec Ras.	20
Figura 6. Divisoria y Red de Drenaje de la Cuenca.	21
Figura 7. Divisoria rio León vs Divisoria Subcuenca rio Apartadó.	22
Figura 8. Red de Drenaje rio León y corte Dem Hec Ras.	22
Figura 9. Curva Hipsométrica.	23
Figura 10. Área Curvas de Nivel.	24
Figura 11. Perfil altimétrico.	25
Figura 12. Sectorización Geomorfológica de Tramo Modelado Hidráulicamente de rio Apartadó.	32
Figura 13. Puente de San Fernando que atraviesa el Tramo Modelado Hidráulicamente de rio Apartadó.	32
Figura 14. Sectores del Tramo Modelado Hidráulicamente de rio Apartadó.	33
Figura 15. Evaluación multitemporal entre sector Consejo y San Fernando del rio Apartadó.	33
Figura 16. Cara Occidental del puente de San Fernando del rio Apartadó.	34
Figura 17. Cara Oriental del Puente de San Fernando del rio Apartadó.	35
Figura 18. Cancha de futbol de San Fernando – Apartadó.	35
Figura 19. Capa Vegetal entre la vista Oriental de puente hasta la Cancha de Futbol de San Fernando.	36
Figura 20. Curva sector Cancha del Consejo.	36
Figura 21. Flow Paths Iniciales según Testimonios de Habitantes del Sector.	37
Figura 22. Extracción de Arena en la Zona.	37
Figura 23. Obra Existente en el Barrio López, izq. vista aguas arriba, der. vista aguas abajo.	38
Figura 24. Falla en el muro de Gaviones.	38
Figura 25. Problemática del Barrio San Fernando.	39
Figura 26. Entrega de alcantarillado en el barrio La Esperanza.	39
Figura 27. Geometría Creada desde Ras Mapper.	41
Figura 28. Sección Transversal 1807m Aguas Arriba Sector El Consejo.	42
Figura 29. Sección Transversal 1275m Sector López.	43
Figura 30. Sección Transversal 888m Sector Cancha de San Fernando.	43
Figura 31. Sección Transversal 631 m, ubicada a 120 m del puente de San Fernando.	44
Figura 32. Sección Transversal 48 m Aguas Abajo, Sector la Esperanza.	44
Figura 33. Simulación de Inundación para el Periodo de Retorno de 100 años.	45
Figura 34. Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años.	47
Figura 35. Comparativa Ras Mapper Versión 5.0.7. vs Versión 6.	48
Figura 36. Comparativa Sección Transversal 631m, Versión 5.0.7. vs Versión 6.	48
Figura 37. Datos de Google Earth Ingresados para Simular el puente de San Fernando.	49
Figura 38. Secciones 747m y 775m en Ras Mapper para Simular el puente de San Fernando.	49

Figura 39. Resultados de Periodo de Retorno de 100 años de Secciones 747m y 775m que Enmarcan el puente de San Fernando.	50
Figura 40. Simulación de Inundación para el Periodo de Retorno de 100 años con el Puente de San Fernando.	50
Figura 41. Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años con el Puente de San Fernando.	53
Figura 42. Hidrógrafa en Caudal Variable.	54
Figura 43. Hidrógrafa Plot Data en Caudal Variable.	54
Figura 44. Simulación de Inundación con Hidrógrafa y el Puente de San Fernando.	55
Figura 45. Simulación de Inundación con Hidrógrafa y el Puente de San Fernando.	55
Figura 46. Zonas que en el pico de 207 m ³ /s de la hidrógrafa se inundan.	58
Figura 47. Zonas que en el pico de 207 m ³ /s de la Hidrógrafa que se inundan, Vista DEM 3D.	58
Figura 48. Enmallado 2D en Geometría Data.	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Perfil Estratigráfico Zona de Estudio Río Apartadó.	16
Tabla 2. Ordenamiento de Horton –Strahler.	25
Tabla 3. Parámetros morfométricos de la cuenca del rio Apartadó.	26
Tabla 4. Resumen de Resultados de analices de frecuencias-Estación Rio Apartadó, tomado de tabla 35.	26
Tabla 5. Resultados de los Caudales Máximos, Rio Apartadó.	27
Tabla 6. Parámetros Geométricos de la Cuenca del Rio Apartadó.	27
Tabla 7. Parámetros Geométricos de la Cuenca del rio León.	28
Tabla 8. Métodos de Concentración.	29
Tabla 9. Resultados de Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años.	45
Tabla 10. Resultados de Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años con Puente de San Fernando en la Simulación.	51
Tabla 11. Resultados de Perfil para flujo con Hidrógrafa con el Puente de San Fernando en la Simulación.	56

ANEXOS

Anexo 1. Cálculos para la Geomorfología de la cuenca hidrográfica rio Apartadó subcuenca del rio León.	66
Anexo 2 Externo. Datos Geomorfología y Tablas resultados HEC-RAS Andrés Álvarez Modelación Hidráulica Crecientes.	
Anexo 3 Externo. Mapas extraídos de QGIS Andrés Álvarez Modelación Hidráulica Crecientes.	

ABSTRACT

The Colombian territory has natural factories of water resources, strategically located in the Andean zone, under the abundant rains, producing a runoff that gives rise to streams and rivers, with permanent and variable flows. Particularly, the Apartadó river is born in the Serranía de Abibe, located in the western Colombian Andes, and it is a territory that has changed over the last years due to demographic growth. The middle part of the basin is highly susceptible to floods, and considering the increase of extreme events caused by climate change, adaptation and mitigation strategies are urgently required for decision-making processes. In this research work, an hydraulic modeling approach was applied to assess the hydraulic behavior of a specific reach of the Apartadó river under flood conditions. The hydraulic model HEC-RAS was implemented, and the geoprocessing work was addressed using open-source software like QGIS and GRASS-GIS. The results indicate that in the analyzed reach, the river overflow is not the direct cause of flooding, and other factors should play an essential role in the flooding process, such as an inadequate hydraulic operation of the sewage drainage and rainwater drainage systems. Indeed, the high presence of solid waste in the surrounding areas could aggravate the malfunctioning of these hydraulic structures. This work intends to warn the local authorities about the importance of including the modeling as a fundamental source of information to think in the future cities we want to live in.

Keywords: Extreme rainfall, Hydraulic modelling, Flood mitigation, One-dimensional, Bathymetric mole.

1 RESUMEN

El territorio colombiano posee fabricas naturales de recursos hídricos, estratégicamente ubicadas por la zona Andina, bajo las abundantes lluvias, produciendo una escorrentía que da origen a arroyos y ríos, con caudales permanentes y variables. Es allí donde se demarca el Nudo de Paramillo, y su Serranía de Abibe, donde nace el río Apartadó objeto del presente estudio, territorio que a través de los años ha cambiado por el crecimiento demográfico de la zona, por el incesante cambio climático, que se ha visto reflejado en los periodos de sequía y lluvia, generándose zonas con alta susceptibilidad a inundaciones. Provocando la necesidad del desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación para abordar los impactos antrópicos, como la aplicación de modelos numéricos para predecir cómo respondería su sistema hidráulico bajo diferentes condiciones de precipitación en términos del caudal o el nivel del río, para estimar la posible erosión o inundaciones. El presente trabajo de investigación utilizó modelaciones que pueden ayudar a mitigar los impactos ocasionados por las inundaciones, así como prever posibles escenarios de desastres con pérdidas incalculables.

El entendimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca se hizo inicialmente con ayuda de diagnósticos previos de tipo batimétrico, geotécnico, de caudales máximos anuales, mensuales, y sus períodos de retorno, reportados por el municipio. A su vez se hizo indagaciones con habitantes del sector afectado para hacer una aproximación preliminar en la modelación hidráulica. Luego se esquematizó la geometría simplificada de la zona utilizando las herramientas de procesamiento QGIS por medio de su sistema GRASS, arrojando los datos geomorfológicos y de variabilidad hidráulica. Y de esta manera se pudo conocer cómo sería las respuestas bajo condiciones específicas de frontera de tipo geomorfológico, fluctuando y reconociendo sus comportamientos hidrográficos en un análisis minucioso. Estos datos se utilizaron como insumos para diseñar por medio del modelo hidráulico HEC-RAS (versión 6 y 5.0.7), posibles escenarios que permitieron dilucidar la problemática al confrontar los puntos críticos. Además, se hizo la corrección topo batimétrica, identificando los puntos bajos o altos dentro del alineamiento definido. Logrando entre otros el modelado de análisis de flujo de inundación según hidrógrafa con periodos de retorno del IDEAM, incluyendo la simulación del puente de San Fernando, que atraviesa el cauce. Arrojando como resultados que la cuenca del río Apartadó se encuentra afectada por la tala de árboles en sus riveras, el constante arrojado de desechos a su afluente, y el deterioro a través de la extracción de material del lecho asociado para la construcción como mecanismo de sustento de sus habitantes. Los resultados de las modelaciones muestran que el río no es la causa directa de las inundaciones en sectores demarcados como críticos por eventos pasados, es posiblemente debido al inadecuado funcionamiento hidráulico de los sistemas de drenados de aguas negras y de desagüe de aguas lluvias, lo que posibilitaría una adecuada presunción de comportamiento de la escorrentía en épocas de lluvias, constantes en la zona en la cancha de San Fernando, agudizándose por la basura acumulada en el fondo del lecho que se vuelven material sedimentario, y cuyos datos numéricos no están incluidos en las modelaciones obtenidas, se sugirió por ello un estudio de este valor de material de desecho, arrojados al río sin ningún proceso de filtrado.

Estas modelaciones hidráulicas de diferentes crecientes obtenidas con modelos de lluvia-escorrentía, y los resultados y recomendaciones adquiridas bajo la presente metodología procuran alentar a las autoridades del municipio de Apartadó para implementar de manera eficaz la modelación numérica hidrodinámica como herramienta constante de Auditoria y gestión Ambiental.

Palabras clave: Lluvia extrema, Modelado hidráulico, Mitigación de inundaciones, Unidimensional, Topo batimétrico.

2 Introducción

El desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación para abordar los impactos antrópicos y del cambio climático está convirtiéndose en una prioridad en las zonas propensas a inundaciones o sequías (Comino et al., 2020). Además, debido a las condiciones del relieve de nuestro territorio, existen zonas en toda Colombia que tienen alta susceptibilidad a inundaciones. Actualmente, existen alternativas desde el campo de la ingeniería que pueden mitigar los impactos ocasionados por las inundaciones, así como prevenir desastres con pérdidas incalculables (UNGRD, 2019). Una de ellas, es la aplicación de modelos numéricos para predecir cómo respondería un sistema hidráulico bajo diferentes condiciones de precipitación en términos del caudal o el nivel del río, para estimar la posible erosión o inundaciones asociadas a ese evento de precipitación.

En este contexto analítico se enmarca la física de las inundaciones bajo diferentes escenarios, complementándose con un análisis de los daños causados por las inundaciones y los resultados se integran en mapas de riesgo a través de sistemas de información geográfica (SIG) (Barrios et al., 2017). Una aplicación cada vez más frecuente es la simulación de inundaciones en diferentes períodos de retorno a través del modelo HEC-RAS (Torres, 2017), siendo de gran utilidad para desarrollar una mejor comprensión del afluente específico de cualquier río analizado.

Este estudio pretende implementar el software HEC-RAS en el río Apartadó, para la modelación de las variables hidráulicas de diferentes crecientes obtenidas con modelos de lluvia-escorrentía. Los resultados presentados en este estudio, procuran alentar a las autoridades del municipio de Apartadó para emplear la modelación numérica como herramienta de gestión para la elaboración de planes y estrategias en busca de reducir el peligro de inundaciones y la degradación de la tierra en la subcuenca del río León llamada: río Apartadó.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Modelar hidráulicamente un tramo del río Apartadó bajo condiciones de creciente.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar un análisis geomorfológico de la cuenca del río Apartadó, para identificar las zonas recurrentes de desbordamientos.
- ✓ Determinar las variables hidráulicas en diferentes tramos del río Apartadó y plantear un modelo conceptual de la respuesta del cauce ante el tránsito de las crecientes.
- ✓ Implementar un modelo hidráulico computacional (HEC-RAS) que permita proveer la magnitud de posibles eventos en las zonas inundables.
- ✓ Estimar de manera aproximada la amenaza por inundación en diferentes tramos del río Apartadó, acorde a las parametrizaciones topográficas establecidas.

4 Marco Teórico

4.1 Conceptos generales

El mapeo de las zonas de llanuras aluviales inundadas de un río asociado con tormentas de diseño seleccionadas, es un ejercicio importante relacionado tanto para la planificación territorial como para la gestión de cuencas hidrográficas (Daneshfar, B et al., 2006). Para determinar la extensión de la inundación se requiere el procesamiento de grandes cantidades de datos hidráulicos y espaciales, que generalmente se logra a través de modelos numéricos (Daneshfar, B et al., 2006). Un modelo numérico que ha sido ampliamente usado en la delimitación de llanuras aluviales es el modelo HEC-RAS (USACE, 1991). HEC-RAS es un modelo hidráulico unidimensional o bidimensional que permite analizar la evolución de la lámina del agua en el tiempo y el espacio en eventos de inundación. HEC-RAS permite calcular estados permanentes y no permanentes, y estimar el transporte de sedimentos y de contaminantes. Dicho modelo fue desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers. (U.S. Corps of Engineers, 2003, Tate et al., 1999).

Para nuestro caso de estudio, la aplicación de un modelo numérico para describir el comportamiento del flujo de agua se convierte en una herramienta óptima debido a que existe la necesidad de predecir estos fenómenos naturales para anticipar ciertas medidas preventivas y correctivas sobre la zona de influencia al paso del agua. En muchos casos, los modelos numéricos se ajustan adecuadamente a una representación unidimensional (1D), esto es, basan su aplicación en que el flujo simulado tiene un comportamiento marcadamente 1D, al considerar la componente de la velocidad en la dirección del flujo. Además, se puede obtener el nivel y el caudal de cada sección transversal modelada de un río, siendo esta aproximación el método más sencillo para representar flujo en canales, reduciendo toda la teoría en una dimensión, (Environment Agency UK, 2010). Sin embargo, en el caso particular de nuestro objeto de estudio, resulta un poco limitante para conocer el comportamiento del agua con mayor precisión; puesto que no se ajusta adecuadamente a la morfología del terreno por donde circula agua. Hoy gracias al esquema en dos dimensiones (2D), donde predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical, se reconoce con mayor precisión las variables hidráulicas cuantificables (calado, velocidad, caudal, etc.) sobre la planicie de influencia al paso del agua.

En general, en modelos y métodos aplicados en estudios recientes sobre inundaciones en llanuras aluviales se pueden clasificar en tres tipos principales: modelos hidrodinámicos, modelos no basados en ecuaciones físicas y métodos empíricos (Teng et al., 2017). Entre los paquetes de modelos hidrodinámicos disponibles, se encuentra el sistema de código abierto HEC-RAS, que se ha utilizado ampliamente en el modelado de inundaciones (Ackerman, 2011; Casas et al., 2006; Cook y Merwade, 2009; Horritt y Bates, 2002; Sanders, 2007).

En la modelación hidrológica, se tiene como objetivo principal estimar la cantidad (volumen) de agua que puede ingresar al sistema que se está estudiando, mientras que la modelación hidráulica busca determinar o representar cómo es el movimiento de la misma dentro del sistema, llámese tramo del río o zona de inundación demarcada (IDEAM, 2018). Y de esta manera adquiere importancia las variables como el nivel de altura o profundidad del agua, la velocidad, el caudal, la temperatura del agua, la curva granulométrica para calcular la erosión sedimentaria y la socavación, permitiendo determinarlas en diversos puntos de interés de forma espacial y temporal. En este sentido, es posible conocer las variaciones del nivel a medida que se transita una onda o caudales a través de hidrógrafa, desde su entrada hasta su salida en un

tramo específico del río modelado. Existen herramientas que permiten integrar o acoplar modelos hidrológicos e hidráulicos de forma simultánea, o en esquemas tipo serie o paralelo (Acosta, J. Bernal, F. et al. 2018). Por ejemplo, la herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT versión 2012) y (HEC-RAS versión 5.0.7), en donde se ha utilizado SWAT para generar la lluvia efectiva necesaria para ejecutar simulaciones hidrodinámicas bidimensionales de lluvia en la red HEC-RAS, los resultados de la calibración del modelo muestran la utilidad potencial de acoplar SWAT y HEC-RAS utilizando un enfoque de modelado integrado. (Hubbart y Zeiger, 2021).

5 Estado del arte

La cuantificación del riesgo por inundación se ha convertido en una práctica cada vez más recurrente, y su importancia es debido principalmente a la planeación urbana y a la mitigación de desastres (Balica et al., 2012). Cuantificar el riesgo por inundación es una tarea compleja por las variables involucradas y su estado evolutivo, donde las metodologías de análisis de riesgo por inundación se pueden dividir en dos grupos: deterministas o cuantitativos, y paramétricos o cualitativos (Balica et al., 2012); siendo la base de los modelos deterministas el uso de la modelación numérica para reproducir la física de las inundaciones bajo diferentes escenarios (Barrios et al., 2017). Además, las modelaciones numéricas pueden complementarse con un análisis de costos de los daños causados por las inundaciones y los resultados se integran en mapas de riesgo a través de sistemas de información geográfica (SIG) (Barrios et al., 2017).

El método REM, también conocido como el método plano / bañera, es un modelo no basado en las ecuaciones físicas; el cuál utiliza datos de altura del terreno para crear una pendiente de la superficie del agua y para calcular la elevación relativa entre la llanura de inundación y la superficie del canal del río (Greco et al., 2008; Jones, 2006; Teng et al., 2017). Estudios de llanuras aluviales han utilizado con éxito los modelos REM o HEC-RAS, pero sus usos combinados son poco frecuentes. Varias variables pueden capturar relaciones entre el río y la llanura de inundación, como el área de inundación, volumen inundado y conectividad de esfacelo, pero la mayoría de los estudios cuantifican uno o dos respuestas de la llanura aluvial a las inundaciones en lugar de todas estas (Chen et al., 2020).

Existen diversas técnicas de captación y regulación de aguas lluvias como estrategia de adaptación y mitigación a inundaciones, por ejemplo, la recolección autóctona de aguas lluvias de microcuencas (más utilizada en las regiones subsaharianas), que ayudan a reducir el pico de caudal y con la reducción del volumen de agua a escala de campo y cuenca (Comino et al., 2020). Adicionalmente se pueden parametrizar los hietogramas para replicar las extremas precipitaciones (como es el caso de los países del Sahel) durante las temporadas de lluvias. Además, se han hecho simulaciones hidrodinámicas en 2D en los países africanos de regiones subsaharianas (Comino et al., 2020). Por medio de un modelo hidráulico implementando una serie de geometrías artificiales utilizando las herramientas de procesamiento de QGIS. Arrojando como resultado que las geometrías artificiales en forma de medias lunas colocadas con una configuración escalonada, tienen los mejores rendimientos en la reducción de la escorrentía; la modelación hidráulica se hizo a través de HEC-RAS como modelo de lluvia-escorrentía, estudio que permitió contribuir a disminuir el peligro de inundaciones y la degradación de la tierra que oprime las áreas áridas y semiáridas de grandes regiones de África (Comino et al., 2020).

Otra aplicación frecuente del HEC-RAS es la simulación de inundaciones para el estudio de las inundaciones en diferentes períodos de retorno, como se realizó en la cuenca del Río Frío, en Cundinamarca (Torres, 2017). Dando como resultado el perfil de flujo, láminas de agua y número de Froude. En este estudio se presentaron los mapas de inundación para los períodos de retorno de 50 y 100 años, por considerarlos los más críticos (Torres, 2017).

Con respecto al dominio seleccionado para este estudio, el río León, en la literatura se reporta que ha sido modelado con el *software* HEC-RAS (CORPOURABA, 2019). Por medio de una simulación de un flujo permanente a diferentes períodos de retorno para asignar una condición crítica de flujo y posterior superficie total ocupada por la inundación. Dadas las dificultades, y sobre todo los costos de un amplio trabajo de campo de tipo batimétrico en los ríos, el uso de modelos en conjunto con imágenes satelitales y georreferenciadas pueden complementar esas mediciones de campo, lo que conduce a mejores interpretaciones, y optimización de los recursos.

De la revisión del estado del arte, se puede concluir que el *software* HEC-RAS puede ser de gran utilidad para desarrollar una mejor comprensión del afluente específico del río Apartadó para evaluar procesos y patrones particulares de inundación. En el contexto de eventos como las crecientes, se producen en el canal niveles muy altos. Dichos niveles sobrepasan la banca e inundan las zonas ribereñas, y en casos como el que se presenta en el municipio de Apartadó, generan daños económicos, ponen en riesgo vidas humanas y trastornan toda la actividad social y económica de la región (Baltazar, W. Gallego, S. et al. 2018). Los procesos geomorfológicos que han evolucionado con el tiempo en la zona, su sedimentación y las perturbaciones actuales, nos colocan en una perspectiva interesante frente a las posibles decisiones administrativas para el manejo del agua y la gestión de la misma, que puede, en principio, partir del desarrollo de una línea base para futuras investigaciones.

6 Métodos y datos

El entendimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca se hizo por medio de diagnósticos previos de la misma, tanto de tipo batimétrico, como geotécnico, con una revisión de bases de datos de eventos relacionados con información de inundaciones, que permitieron identificar las zonas propensas a este fenómeno, y así nutrir los estudios de amenaza por susceptibilidad a inundación. También se realizó un análisis de la literatura para la obtención de caudales máximos, partiendo de los registros de caudales máximos anuales y mensuales de cada medición encontrada, generando las magnitudes de caudales a diferentes períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 años, según datos reportados oficialmente por el IDEAM para la alcaldía del municipio de Apartadó.

Por medio de investigaciones previas realizadas por el municipio, donde se adelantaron modelaciones hidrológicas e hidráulicas en la zona urbana del municipio de Apartadó, se permitió identificar las características principales de la cuenca con el fin de entender su comportamiento hidrológico e hidráulico y las alteraciones antrópicas de la cuenca hidrográfica reportada en la literatura, como las características físicas. En el transcurso de este proceso se hizo indagación con habitantes del sector afectado por las inundaciones en la zona delimitada para hacer una aproximación más exacta en la modelación hidráulica.

Se procesó la información geoespacial realizando la modelación conceptual, es decir se esquematizó la geometría simplificada de la zona específica utilizando las herramientas de procesamiento de QGIS por medio de su sistema GRASS, por las cuales se corrigió el correcto paso del afluente en la sección específica que se demarcó, que permitió realizar las aproximaciones sucesivas de la amenaza por inundación. Luego se realizó un análisis Geomorfología de la cuenca hidrográfica río Apartadó subcuenca del río León, a través de QGIS, permitiendo el comparativo de los datos obtenidos con respecto a la literatura.

Se realizó la parametrización de los cortes transversales con mediciones previas sobre las múltiples direcciones que toma la cuenca, esto por medio de La modelación hidráulica en HEC-RAS, lo cual arrojó la magnitud del evento en la zona inundable con características fundamentales tales como el nivel máximo alcanzado por la lámina de agua, velocidad máxima, duración, carga de sedimentos, entre otras, lo anterior según los alcances del proyecto. Y también por medio de HEC-RAS se hizo la corrección topo batimétrica necesaria (principalmente, identificando los puntos bajos o altos dentro del alineamiento definido por cada uno de los cauces principales presentes dentro de la zona delimitada estudiada).

Se analizó los resultados donde se centra la extracción y manipulación de los niveles del modelo hidráulico y su distribución en el espacio permitiendo así, la caracterización de la amenaza por inundación.

6.1 Descripción de la zona de Estudio

La región del Urabá, y en particular el municipio de Apartadó, se desarrolló en la planicie y se encuentra emplazado en ambas márgenes del río León, en las cuales es notable el crecimiento de asentamientos humanos en los últimos años, ocupando las tierras más cercanas al cauce permanente del río. El municipio de Apartadó tiene aproximadamente una población de 134.572 habitantes, considerando las zonas rural y urbana, y está ubicada a 25 msnm, con una temperatura anual promedio de 28 °C y precipitación anual de 3.200 mm/año. De acuerdo a este contexto, dicho municipio ha vivido intensos episodios de inundaciones en las que las autoridades municipales han declarado alerta roja frente a la afectación de más de 5.000 personas de 13 barrios, 2 veredas y 3 corregimientos, con un enfoque principal entre el sector puente primero de mayo hasta el puente principal municipal, e incluso en el barrio Ortiz (UNGRD, 2019). La cuenca hidrográfica del río León se localiza en jurisdicción de la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA), más específicamente en el territorial centro, la cual comprende los municipios de Mutatá, Chigorodó, Carepa, Apartadó y Turbo del departamento de Antioquia, como se puede observar en la figura 1.

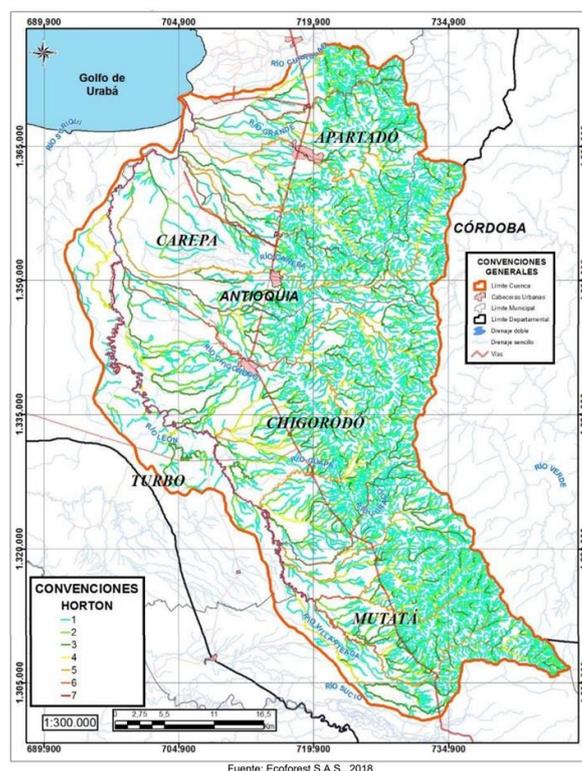


Figura 1. Orden de los Cauces en la Cuenca del Río León (CORPOURABA, 2019).

La cuenca tiene un área de 2201,3782 km² y presenta como sus principales afluentes los ríos Grande, Carepa, Chigorodó, Guapa, Juradó, Villarteaga y Apartadó, en este último afluente de esta gran cuenca es donde se centrará nuestro caso de estudio. En el periodo comprendido entre los años de 1997 al 2009, se encuentra que la población en situación de desplazamiento que salió del municipio corresponde a 28.562 personas, en comparación a la población en condición de desplazamiento que ha llegado al municipio 38.125 personas (CORPOURABÁ, 2019). Lo cual constituye una masiva población flotante, que evidencia una latente y amplia situación de vulnerabilidad, generando una mayor población de damnificados cuando hay un desbordamiento del afluente a estudiar.

La zonificación de vulnerabilidad de la zona, en el 48.48% del área estudiada es susceptible en algún grado a los procesos de inundación fluvial (Carvajal, 2011). Dichos procesos corresponden al 100% de las áreas activas y de planicies propensas a anegación, entre tanto que el 28.52% pueden considerarse exentas de este fenómeno, la zona de media equivale al 23% del área total respectivamente, esta zona se compone de un abanico aluvial coalescente y fluviotorrencial los cuales son frentes montañosos por la unión de abanicos aluviales asociados a flujos torrenciales de los afluentes del río León (Carvajal, 2011). Lo cual nos contextualiza para iniciar con la construcción y puesta en marcha de un posible sistema de alerta temprana.

6.1.1 Análisis batimétrico encontrado en el tramo específico utilizado para modelar hidráulicamente.

Debido a la imposibilidad generada por el desplazamiento en tiempos de pandemia Covid 19, fue imposible hacer un análisis batimétrico de tipo presencial en la zona, sin embargo, si se hizo indagaciones preliminares en la zona con habitantes del sector para determinar de manera más exacta los posibles niveles de inundación manifestados por personas afectadas directamente. Además, Batimetría dispuesta por el mismo municipio y de carácter libre en la zona específica se utilizó como insumo de análisis en los datos preliminares en la presente investigación. Donde los levantamientos topográfico y batimétrico se enfocaron en localizar las estructuras existentes a lo largo del tramo de estudio, definir el lecho y las márgenes de los ríos, y junto con la georreferenciación hicieron una mayor exactitud en el modelado hidráulico.

6.1.2 Aspectos geotécnicos en la literatura en el tramo específico utilizado para modelar hidráulicamente.

Al demarcar la zona de estudio, se evidencia que se encuentra en su totalidad en depósitos aluviales no consolidados asociados al abanico del río Apartado, adicionalmente terrazas bajas y depósitos aluviales recientes. Dichas series de abanicos están formados por los ríos que viene de la Serranía de Abibe, los cuales rellenan la planicie con material no consolidado. El abanico está compuesto por arcillas, limos, arenas y en menor proporción conglomerados, se encuentran ubicado a alturas que varían entre 25 y 50m y delimitan lateralmente las planicies aluviales. En el sector de Apartadó se presenta disectados por el cauce del río Apartadó. Esto conforma una secuencia en donde predominan las arenas gruesas a finas, observables en todos los taludes y en ambas márgenes del río que lleva el mismo nombre; esta arena está en contacto hacia la base, con lentes conglomeráticas solo observados en la zona del punto de estudio El Concejo 1, y con lentes arcillosos en el resto de los puntos en la mayoría de afloramientos. Las arenas presentan intercalaciones de estratos limosos (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

Con respecto a la estratigrafía para el río Apartado se puede decir que:

Capa de lleno: Hay 2 tipos de lleno, ambos con material arenoso y uno de ellos con mezclas heterogéneas de cuercos y basuras. Espesores entre 0.4 y 2.5m (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

Capa de suelo arena arcillosa: Esta capa de distribución más o menos homogénea a lo largo del río Apartado en la zona urbana presenta espesores entre 1.5 y 3.5 m. Es de color pardo amarillenta, ligeramente cohesiva, generalmente con raicillas (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

Capa de suelo limoso, areno limoso y limoarenoso: Esta capa con espesor promedio entre 0.2 y 2.5m es de color café y tiene presencia de raicillas. Las arenas se presentan finas, medias y gruesas y a veces con capas lenticulares que muestran la variación granulométrica (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

Capa arcilla: Se presenta generalmente en la base de los taludes que conforman las márgenes del río Apartado. Es de color gris y establece un control litológico a la dinámica fluvial del río, se localizan los 3.5 m y presenta espesores variables entre 0.5 y 3.5 m (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

Capas conglomeráticas: Solo observable en la zona del Concejo está caracterizada por presentar por fragmentos frescos, redondeados a subredondeados de 5 cm en promedio, en

matriz arenosa fina color café, a profundidad el tamaño llega a 10cm (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018). La cual se puede observar en la tabla 1 obtenida de estudio realizado por el municipio de Apartadó.

Tabla 1. Perfil Estratigráfico Zona de Estudio Río Apartado (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

CAPA	SITIO DE ESTUDIO					
	CONCEJO 1	CONCEJO 2	ALFONSO LOPEZ	SAN FERNANDO	LA ESPERANZA 1	LA ESPERANZA 2
Lleno 1	0	2	2.5	0	0.4	0
Lleno 2	0	0	0	0	0.8	0
Arena arcillosa pardo amarillenta	1.85	1.8	2	3.5	0	0
Arena limosa	0	0	0	0.2	0	0.8
limo café	0	0	0	0.2	0	0
Arena fina parda	1.65	0.2	0	0.1	0	0
Arcilla gris	0.05	0.5	2.5	1.9	0	0.3
Arena fina	0.1	0	0	0	0	0
Arena media	0.35	0	0	0	0	0
Conglomerado	0.2	0	0	0	0	0
ESPESOR COLUMNA	4.2	4.5	7	5.9	1.2	1.1

6.2 Descripción del Modelo HEC-RAS

Si bien HEC-RAS es un modelo que fue diseñado, inicialmente, para realizar modelado en una dimensión, hoy en día ha evolucionado y puede realizar cálculos bidimensionales de la superficie del agua tanto para canales naturales como artificiales, además, puede generar una gama de respuestas hidráulicas para un sistema fluvial ingresando solo su geometría y datos de flujo (Burnner y CEIWR-HEC, 2010).

HEC-RAS utiliza las ecuaciones de Saint Venant, a través de la solución del esquema de diferencias finitas de Preissmann o esquema de los cuatro puntos como se ve en la figura 2. Dicho esquema (implícito) aproxima a una función $f(x, t)$ cualquiera en un cierto punto p de (x, t) como:

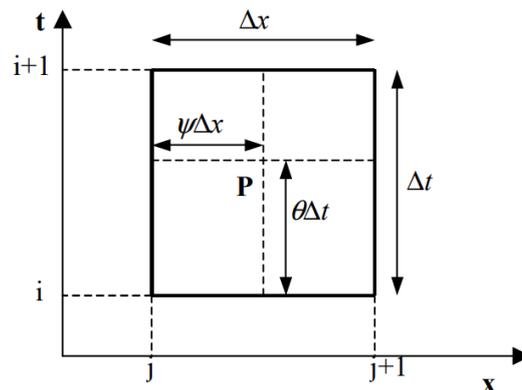


Figura 2. Esquema de Preissman o de los cuatro puntos (Bladé, E. Cea, L. 2008).

$$f(x, t) = \theta \left[\psi f_{j+1}^{i+1} + (1 - \psi) f_j^{i+1} \right] + (1 - \theta) \left[\psi f_{j+1}^i + (1 - \psi) f_j^i \right]$$

Ecuación 1. Ecuación del esquema implícito en diferencias finitas de Preissmann (Bladé, E. Cea, L. 2008).

En donde el parámetro θ localiza el punto p de aproximación de las derivadas en el tiempo, mientras que el parámetro ψ lo hace en el espacio (USACE 1991). Por lo cual al aplicar este esquema a las ecuaciones de Saint Venant para un tramo de cauce dividido en N secciones, en cada una de las cuales hay dos incógnitas (caudal Q y calado y), se obtienen $2(n-1)$ ecuaciones. Se requieren por lo tanto otras dos ecuaciones, una en el extremo aguas arriba del tramo y otra en el extremo aguas abajo, para poder resolver el sistema, estas dos ecuaciones pueden ser o bien las condiciones de contorno (caudal o hidrograma de entrada, nivel dado de la superficie del agua), o en caso de nodos donde confluyen tres canales, la ecuación de conservación de la energía, para resolver el sistema de ecuaciones en el río y en las llanuras de inundación, en cada intervalo de tiempo, son necesarias unas condiciones iniciales, que pueden ser un caudal o una cota de la lámina de agua. Debido a que el método de Preissmann presenta inestabilidades en la solución de la ecuación de momentum cuando el calado se encuentra en valores iguales o cercanos al calado crítico, HEC-RAS implementó el algoritmo Local Partial Inertia (LPI), el cual introduce un factor de reducción ($\sigma < 1$) a los términos inerciales de la ecuación de cantidad de movimiento, eliminando los términos de aceleración de dicha ecuación que son los que producen la inestabilidad (USACE 1991).

HEC-RAS es una herramienta que ha venido evolucionando, y que a la fecha en su versión 6.0 nos permite simular el flujo de agua combinando modelos 1D/2D, así como totalmente 2D; lo novedoso de esta nueva versión, es que incorpora la ventana de interface *RasMapper* en la cual el usuario incorpora el modelo digital del terreno, lo cual es fundamental para la simulación en 2D, la evaluación de esta nueva versión de HEC-RAS nos permite entender sus capacidades y limitaciones que puedan encontrarse al desarrollar alguna simulación hidráulica, las diferencias en su aproximación al problema (interfaz, método de mallado, importación de datos georreferenciados, etc.), condicionan su potencial en cuanto a tipologías de problema a estudiar y resultados obtenidos.

6.3 Modelo digital del terreno

Por medio de la página web <https://search.asf.alaska.edu/#/> y usando “ALOS PALSAR”, Se obtuvo varios modelos de elevación digital con una resolución espacial de 12,5 m de la cuenca río Apartadó. PALSAR fue uno de los tres instrumentos del Satélite de Observación Terrestre Avanzado-1 (ALOS), también conocido como DAICHI, desarrollado para contribuir a los campos del mapeo, la observación precisa de la cobertura terrestre regional, el monitoreo de desastres y la prospección de recursos. ALOS era una misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). y su nombre viene del acrónimo de sus siglas en inglés: “ALOS Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar”, entre 2006 a 2011 produjo observaciones detalladas de día y noche para todo tipo de clima, así como interferometría de paso repetido (ASF Data Search Vertex. 2021). Luego, con el sistema de información geográfico de código abierto QGIS, se cortó el DEM (modelo digital de elevación, por sus siglas en inglés) y, a partir de este, se obtuvieron los rásteres de acumulación y dirección de drenaje (esto se hizo utilizando el conjunto de herramientas de GRASS que permiten delimitar automáticamente una cuenca hidrográfica, como (*r.watershed.* y *r.water.outtle*). GRASS es un software SIG bajo licencia GNU *General Public License* (GPL). Adicionalmente puede soportar información tanto *ráster* como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes, y su nombre viene de las siglas en inglés: “*Geographic Resources Analysis Support System*” (Athán, T. et al. 2020). De esta manera, se pudo obtener el DEM para la cuenca específica (se presenta en la Figura 3).

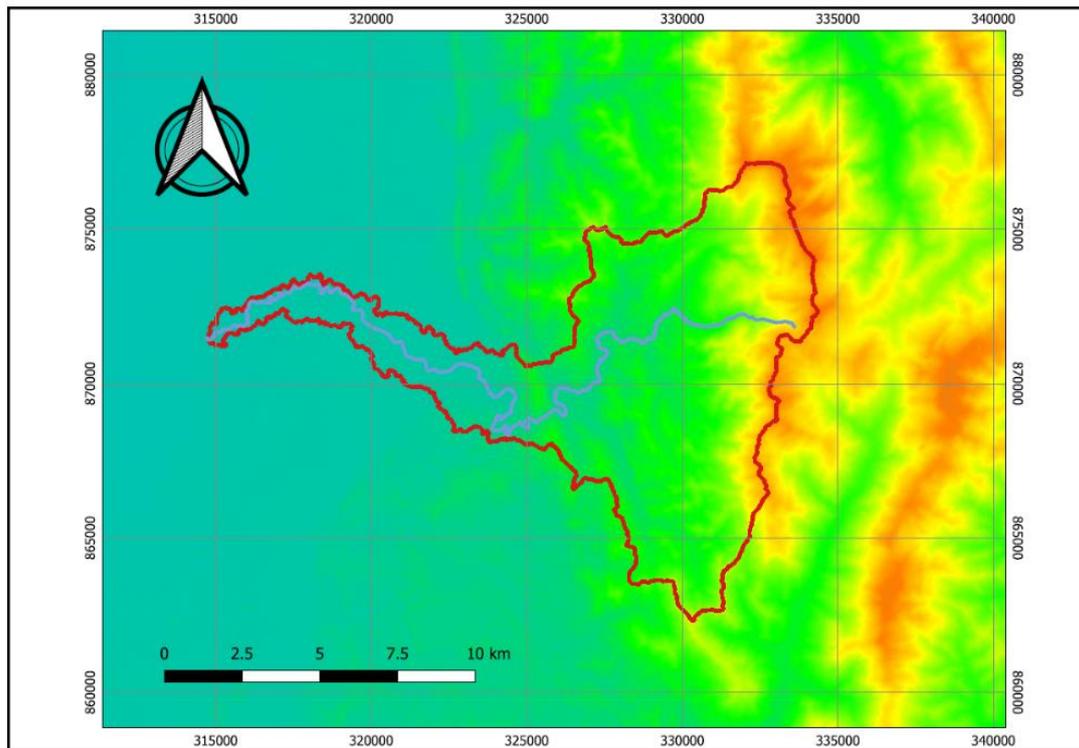


Figura 3. DEM Cuenca río Apartadó.

6.3.1 Quemado de la red de corrientes en la capa DEM inicial en QGIS

En el proceso de demarcación de la divisoria, y del cauce principal del río Apartadó, se evidenció que el cauce principal en la zona media urbana que arrojaba QGIS a través de su sistema GRASS, no coincidía perfectamente con el paso a modelar hidráulicamente a través de HEC-RAS, razón por la cual se decidió determinar mecanismos con dicha herramienta que garantizaran un sistema de llenado más eficiente y que pudiera incluir el correcto rumbo del cauce principal.

La primera gran variante para obtener datos más ceñidos a la realidad geográfica de la cuenca del casco urbano del municipio de Apartadó fue hacer un DEM mosaico de raster de cuatro descargas desde la ya mencionada plataforma ALOS PALSAR, para poder abarcar desde el análisis inicial la cuenca global del río León, puesto que esta podría ser una de las razones por las cuales no se ajustaba la ubicación real de la subcuenca del río Apartadó. La solución para combinar varias capas ráster es realizar una fusión ráster, también conocida como mosaico ráster. QGIS utiliza la herramienta de fusión GDAL, que es una herramienta muy rápida y eficiente, para fusionar varias capas ráster. Con ello se hizo la delimitación de la cuenca, quemando el río Apartadó en un DEM para forzar al agua a seguir la hidrografía principal. Descargando los datos del río de OpenStreetMap, para luego procesarlos. El algoritmo GRASS “r.carve” de la caja de herramientas de procesamiento se utilizó para quemar el río en el SRTM

DEM. Permitiendo obtener el correcto paso del cauce principal del río Apartadó, que se puede evidenciar en la figura 4.

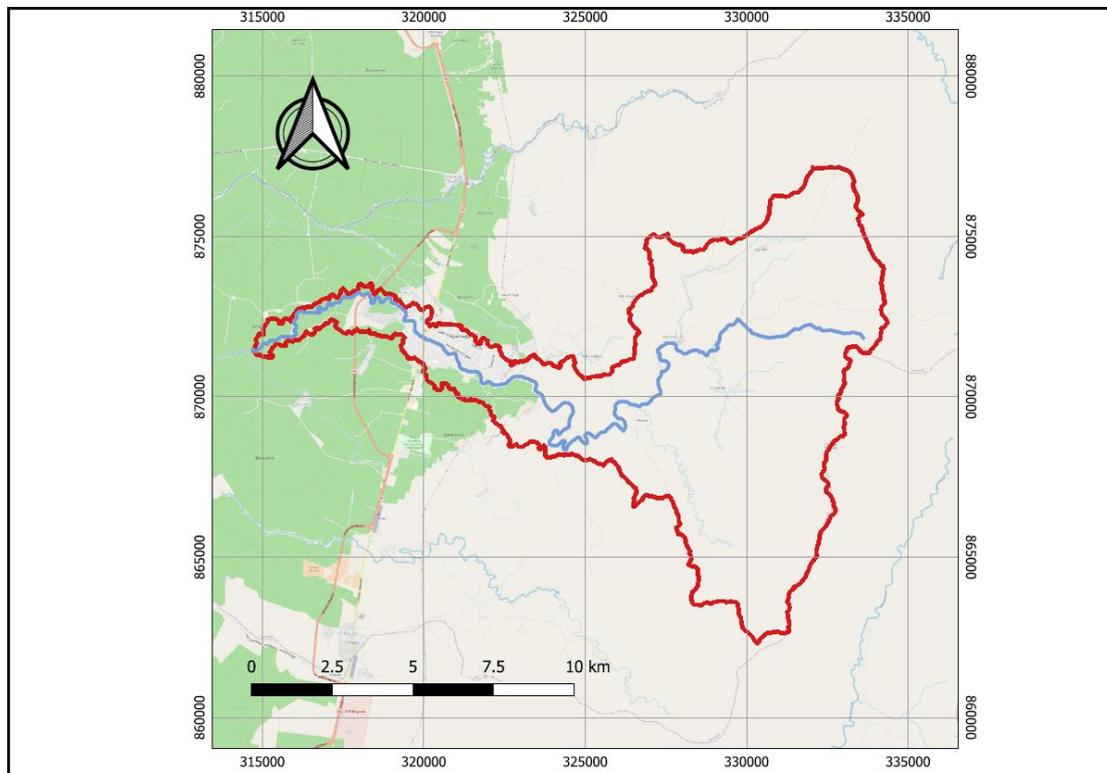


Figura 4. Cauce Principal Corregido del río Apartadó con OpenStreetMap.

6.3.2 Recorte del DEM quemado en QGIS, para HEC-RAS.

Para no sobrecargar la capacidad de procesamiento del programa HEC-RAS, se hace un recorte del DEM obtenido del quemado anterior, donde se encuentre solamente el cauce principal del río Apartadó, el cual se puede observar en la figura 5. Para luego utilizarlo en la modelación hidráulica del tramo seleccionado.

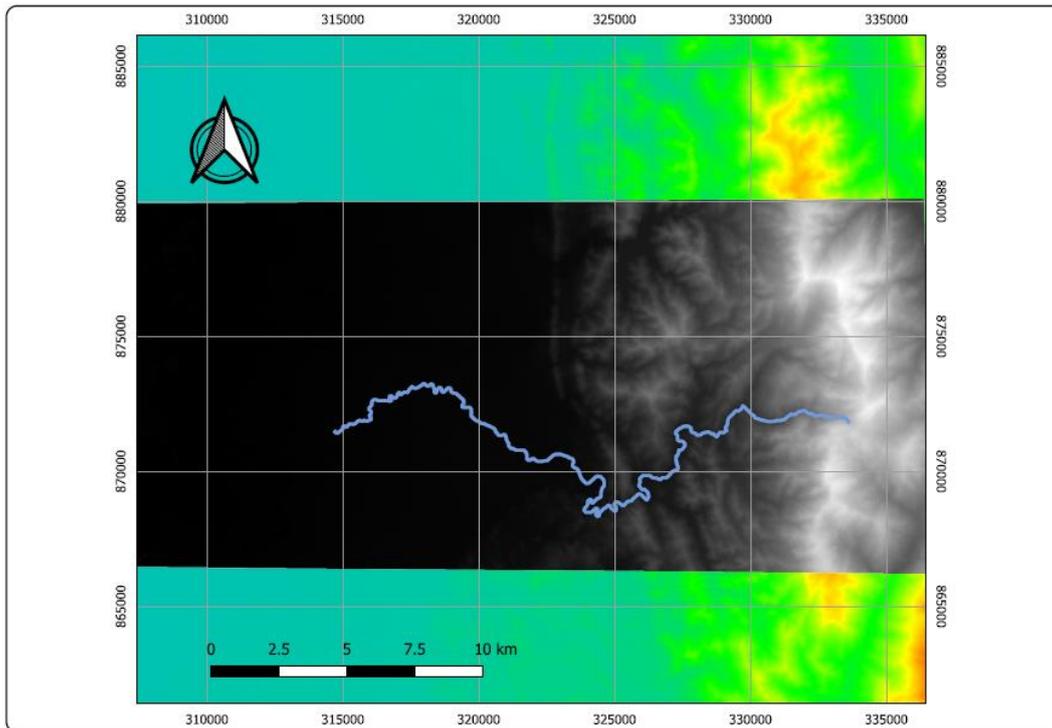


Figura 5. Recorte Burned para Hec Ras.

6.4 Datos

6.4.1 Geomorfología de la cuenca hidrográfica río Apartadó subcuenca del río León

Se analizó inicialmente las características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica, con el fin de saber cómo puede responder a eventos de precipitación, además entender como es el relieve de esta. Para ello se utilizan los parámetros geométricos y a partir de estos, poder obtener datos cuantificables que aporten información de su geometría. Inicialmente, se realizó una delimitación de la cuenca (a la que se le llama línea divisoria), para luego hacer el análisis geométrico y de forma de la misma, donde se estimaron parámetros como la escala, el área, perímetro, longitud y ancho, además de factores que dieron un indicio de la forma de la cuenca. Para hacer el análisis geométrico de la cuenta se hicieron cálculos de los parámetros como la pendiente, elevación promedio de la cuenca, con los cuales se realizó una curva hipsométrica de la cual se pueden sacar conclusiones acerca de la cuenca. Finalmente, la red de drenaje de la cuenca fue analizada con la estimación de parámetros como densidad de drenaje, sinuosidad, pendiente y perfil del cauce principal, también se realizó el ordenamiento y clasificación de todos los cauces que conforman la red hídrica de la cuenca. Para la realización de este trabajo se utilizó la ayuda de QGIS (sistema de información geográfica), además, a través de la información sobre caudales máximos proporcionada por la autoridad ambiental competente, CORPOURABA, se halló el caudal máximo anual de 2 y 100 años como periodos de retorno.

6.4.1.1 Divisoria de aguas de la cuenca

La divisoria de la cuenca se trazó con la ayuda de QGIS, esta se evidencia como la línea roja, la cual se describe en la leyenda de la Figura 6. Donde el punto de cierre de la cuenca se demarcó justo antes de recibir el afluente del río Churidó, en las coordenadas X: 314723.771, Y: 871459.482. puesto que si se tomaba el punto de cierre hasta donde desemboca el río Apartadó al mar, la divisoria que se traza es la cuenca completa del río León. Sin embargo, en la figura 7 se puede observar también la comparativa de ambas divisorias, tanto de la cuenca del río León, como su subcuenca del río Apartadó. Ambos modelados geomorfológicos, se encuentran completos en archivos QGIS con GRASS, anexos al presente documento.

Una vez trazada la divisoria de aguas, se logró medir el área de la cuenca, donde se encontró que dicha área tiene un valor aproximado de 96,19 km², Con respecto al perímetro de la cuenca que es igual a la longitud de la línea divisoria de aguas, se obtuvo un valor de 100,55 km, así mismo se encontró que la longitud de la cuenca fue de 19,43 km; también en la figura 6 podemos observar la red de Ordenamiento de Horton –Strahler. De igual forma es importante mencionar que todos los mapas aquí expuestos se encuentran en formato Pdf en archivos anexos al presente documento. Y los cálculos concernientes a los datos morfológicos e hidrológicos de la cuenca se encuentran en el documento de Excel anexo.

Adicionalmente en la figura 8 se puede observar la divisoria de la cuenca de río León, junto con todos sus afluentes, haciendo un comparativo con el recorte del DEM quemado, que fue utilizado para la modelación hidráulica.

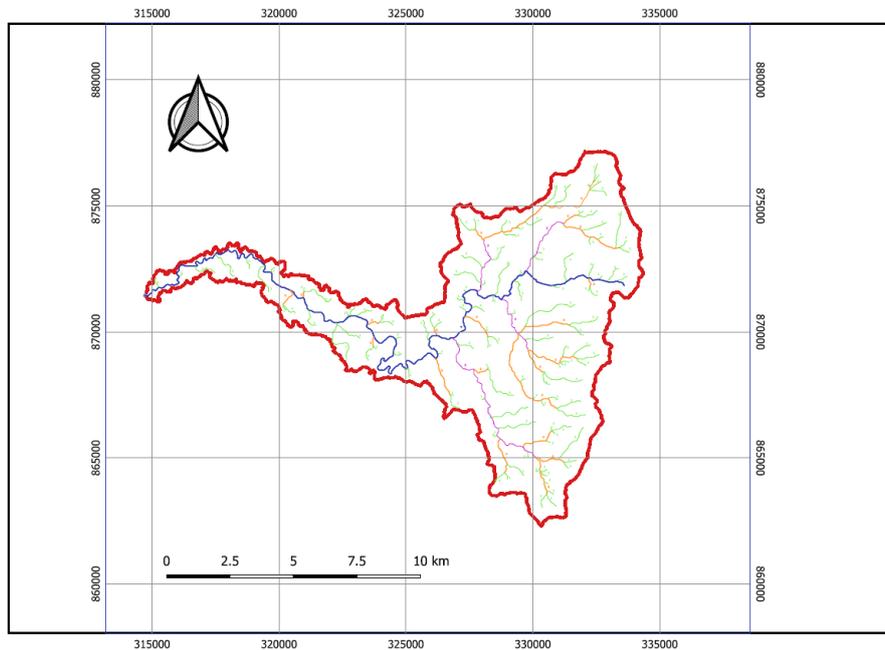


Figura 6. Divisoria y Red de Drenaje de la Cuenca.

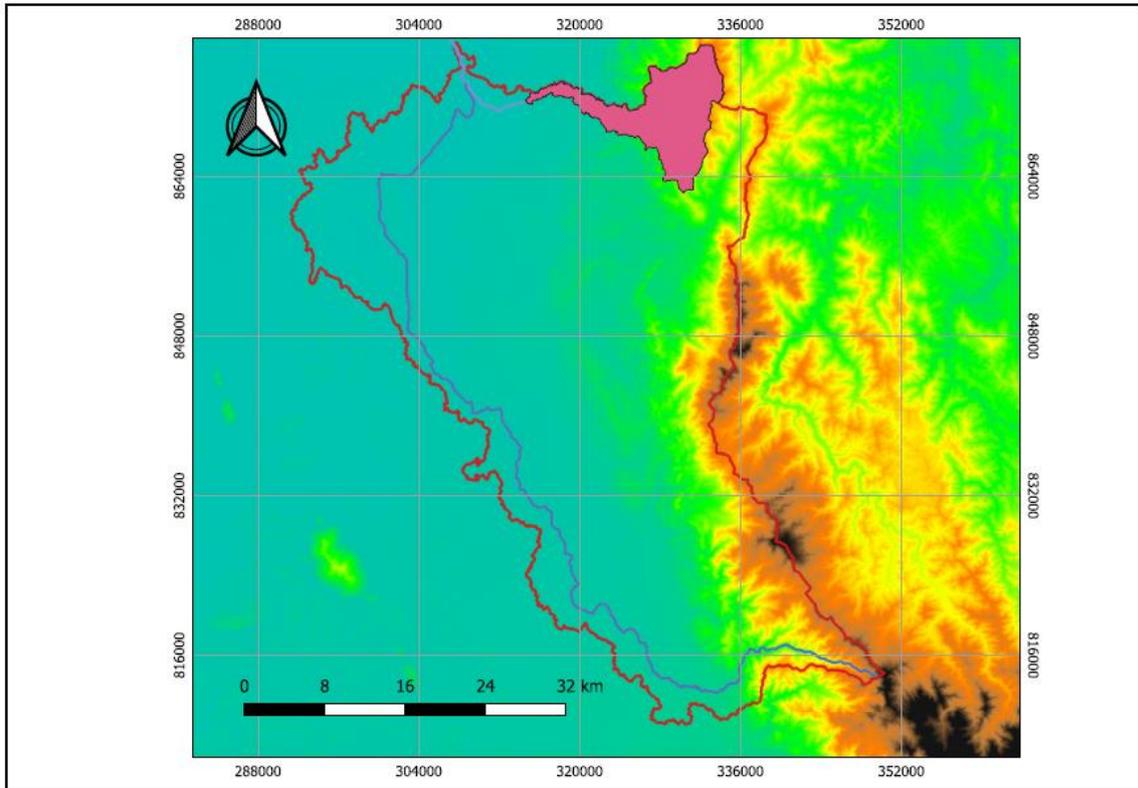


Figura 7. Divisoria rio León vs Divisoria Subcuenca rio Apartadó.

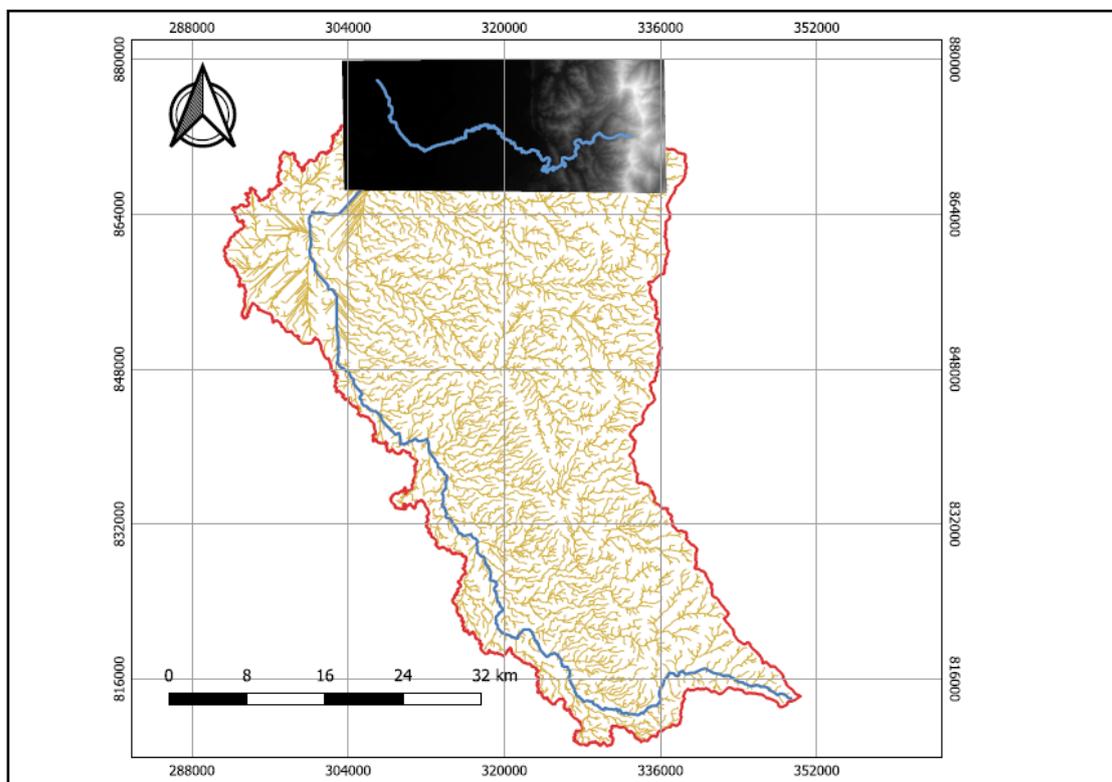


Figura 8. Red de Drenaje rio León y corte Dem Hec Ras.

6.4.1.2 Curva hipsométrica de la cuenca

Es una representación gráfica del relieve de la cuenca. Representa la variación del área de drenaje de la cuenca con la altura. Esta curva representa en el eje de las ordenadas, las elevaciones en metros sobre el nivel del mar (%) y en el eje de las abscisas, le corresponde el valor del área en km^2 (%), que queda por encima de la elevación indicada. Para la tabulación de los datos se halló el área entre cotas con ayuda de QGIS y se llevó la información recolectada a Excel desde donde se obtuvo la gráfica de la curva.

En la figura 9 se observa la distribución altitudinal del área entre las cotas y el porcentaje que estas representan en la cuenca río Apartadó. La media de altitud para el área de la curva es de 346,8920553 msnm. La mayor área de la cuenca se encuentra entre las cotas 200 y 300 msnm. Además, gracias a la curva hipsométrica se evidencia que estamos ante un río joven (Musy, A. Higy, C. 2010).

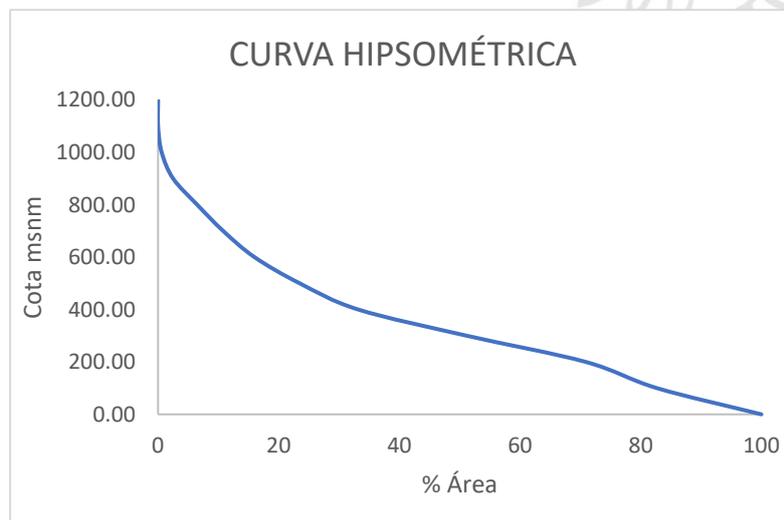


Figura 9. Curva Hipsométrica.

6.4.1.3 Curvas de nivel

Sabiendo que el parámetro de la pendiente es un factor importante para determinar la respuesta de la cuenca a eventos de precipitación y que la curva hipsométrica representa la variación del área de drenaje de la cuenca con la altura, y a su vez entendiendo el relieve que se representa mediante curvas de nivel, y que la altitud es la altura de un lugar en el terreno respecto al nivel del mar, entonces en un mapa la altitud se indica mediante las curvas de nivel, y a su vez estas curvas son líneas que unen puntos con la misma altitud, siendo el dibujo entre un plano horizontal y el relieve, dichas curvas son proyectadas en un solo plano horizontal: el mapa a escala. Cada curva lleva asociado un número que representa la altitud a la que se encuentra (Monsalve, et al., 1999). El valor de ese número se denomina cota, se obtienen mediante procesos fotogramétricos (medición en fotografías) en los que se emplean fotografías aéreas e información de bancos de nivel, en esta parte del presente trabajo se utilizó la herramienta QGIS, como lo muestra el mapa en la figura 10.

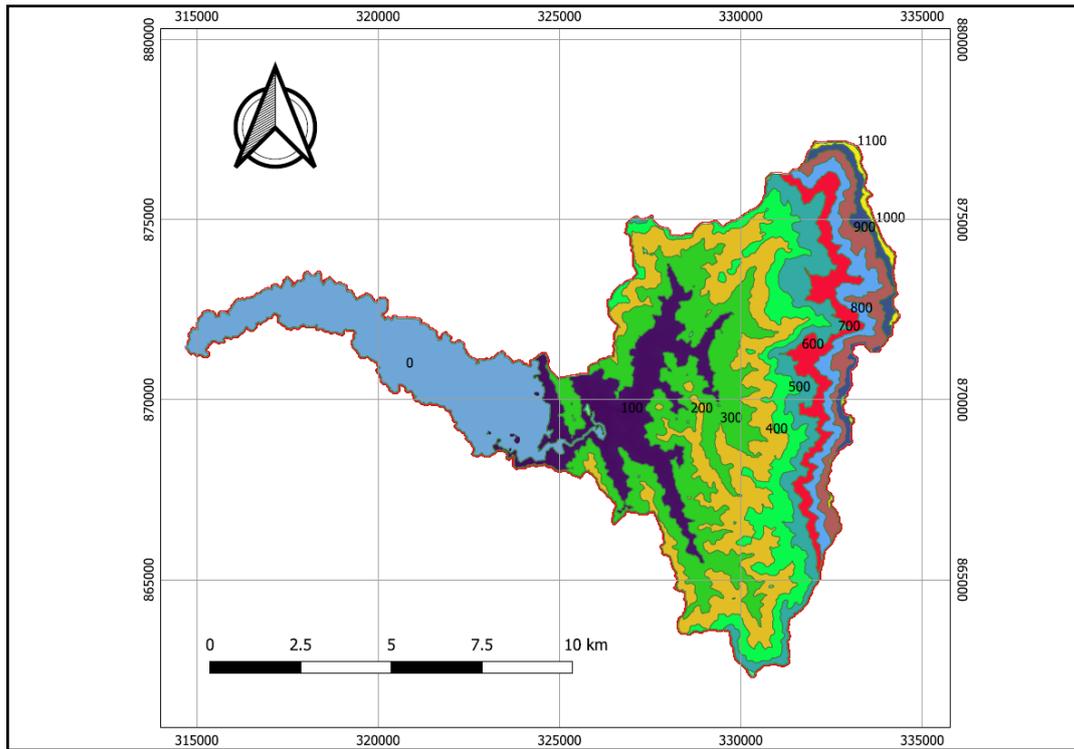


Figura 10. Área Curvas de Nivel.

6.4.1.4 Perfil altimétrico y pendiente(\underline{S}) del cauce principal

La pendiente del cauce principal indica la relación directa en la respuesta de la cuenca antes los eventos de precipitación. Para describir este parámetro se realiza un gráfico en Excel del perfil del cauce relacionando la longitud del cauce principal con la altura como se muestra en la figura 11. Los datos tabulados en Excel son recolectados a través de QGIS, siendo esta longitud del cauce entre puntos en intervalos de cotas. Para la pendiente del cauce principal se halla la pendiente media en cada tramo y luego se halla mediante ecuación (Monsalve, et al., 1999).

$$\underline{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (2)$$

$$\underline{S} = 2,206927$$

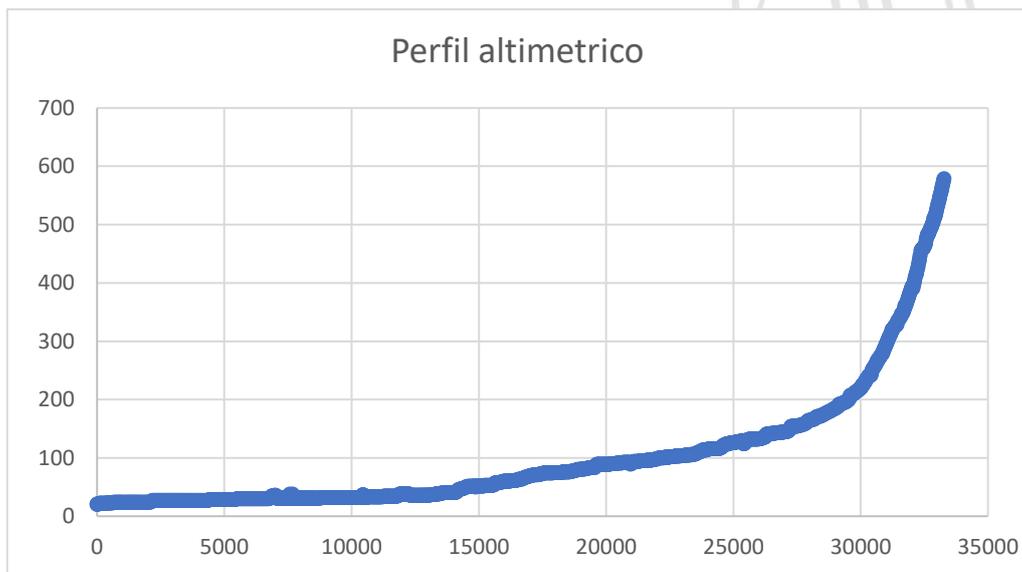


Figura 11. Perfil altimétrico.

6.4.1.5 Ordenamiento de Horton –Strahler

El ordenamiento de Horton-Strahler se presenta en la tabla 2 permitiendo la organización de todos los segmentos de corrientes de la red de drenaje (Monsalve et al., 1999).

Tabla 2. Ordenamiento de Horton –Strahler.

Red drenaje Horton - Strahler	
w	Nu
1	120
2	21
3	4
4	1
Sumatoria Nu	146

6.4.1.6 Parámetros morfométricos del río Apartadó según la literatura.

En la Tabla 3 se presenta los valores de los Parámetros morfométricos de la cuenca del río Apartadó, otorgados por el Municipio de Apartadó (Baltazar, W. Gallego, S. et al. 2018).

Tabla 3. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Apartadó (Baltazar, W. Gallego, S. et al. 2018).

PARÁMETRO	APARTADÓ
Área [km ²]	87.036
Perímetro cuenca [Km.]	73.668
Longitud cauce principal [km]	21.569
Longitud al punto más alejado [km]	13.356
Longitud al Centroides [km]	13.065
Longitud del río hasta la divisoria [km]	21.754
Cota mayor río [msnm]	1089
Cota menor río [msnm]	25
Cota mayor cuenca [msnm]	1089
Cota menor cuenca [msnm]	25
Pendiente río (%)	4.933
Pendiente de la cuenca (%)	30.307

6.4.1.7 Análisis de frecuencias y Caudales máximos (Q_t) según la literatura.

En la Tabla 4 se presenta los resultados sobre caudales máximos que proporciona la autoridad ambiental CORNARE.

Tabla 4. Resumen de Resultados de analisis de frecuencias-Estación Río Apartadó, tomado de tabla 35 (CORPOURABA, 2019).

TR años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR	EV3
2	62,29	57,71	61,46	56,31	56,10	54,39
2,33	69,89	65,98	69,10	64,45	62,98	61,71
5	87,57	88,43	87,29	86,91	82,43	82,95
10	100,80	108,77	101,28	107,27	100,82	102,78
20	111,72	128,28	113,08	126,58	119,06	121,69
25	114,90	134,46	116,56	132,64	124,97	127,63
50	124,01	153,53	126,63	151,15	143,55	145,69
100	132,20	172,45	135,83	169,28	162,61	163,26
200	139,69	191,30	144,35	187,11	182,27	180,42
500	148,77	216,18	154,83	210,33	209,29	202,59
Chi 2	61,18	36,83	47,93	36,50	50,12	55,02

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2018

La estimación de caudales máximo se obtuvo a partir de la información sobre caudales máximos que proporciona la autoridad ambiental IDEAM, como lo muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de los Caudales Máximos, Rio Apartadó (IDEAM, 2012).

TR	P=1/TR	F(X)=1-P	Zt	Q max norma	Kt lognormal	Q max lognor	Kt Gumbel	Qmax Gumbel	Kt pearson	Qmax Pearso	Promedio	
2.33	0.42918455	0.57081545	0.18	67.82	-0.04	61.14	0.00	62.48	0.15	66.94	64.59	67.82
5	0.2	0.8	0.84	87.51	0.67	82.47	0.72	83.91	0.83	87.20	85.27	87.51
10	0.1	0.9	1.28	100.63	1.28	100.67	1.30	101.37	1.30	101.15	100.96	101.37
25	0.04	0.96	1.75	114.65	2.08	124.58	2.04	123.42	1.81	116.46	119.78	124.58
50	0.02	0.98	2.05	123.60	2.69	142.73	2.59	139.78	2.15	126.44	133.14	142.73
100	0.01	0.99	2.33	131.95	3.34	162.05	3.14	156.02	2.46	135.92	146.49	162.05
500	0.002	0.998	2.87	148.06	4.85	207.00	4.39	193.55	3.09	154.62	175.81	207.00

7 Resultados y análisis

7.1 Análisis geométrico de la cuenca del río Apartadó

De acuerdo con las ecuaciones anteriormente mencionadas y sus respectivos conceptos se obtuvieron las siguientes características geomorfológicas, que se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros Geométricos de la Cuenca del Rio Apartadó.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	OBSERVACIONES
Área de la cuenca [km ²]	A	96.19	
Perímetro de la cuenca [km]	P	100.55	
Longitud del cauce principal [km]	L _m	34.07	
Longitud de la cuenca [km]	L _b	19.43	
Factor de forma	R _f	0.26	Alargada
Razón de elongación	R _e	1.79	Circular
Razón de circularidad	R _c	0.12	Estado desarrollo joven
Diferencia de altura del cauce principal	H	752	
Pendiente media del cauce principal	S _c	2.21	
Número de cauces	N _u	146	
Razón de bifurcación	R _{bprom}	5.65	
Frecuencia de drenaje	F _u	1.52	Indican un mayor recorrido de la escorrentía para alcanzar un cauce.
Longitud total de los cauces	L _u	164.28	
Densidad de drenajes	D _d	1.71	moderada
Longitud de flujo terrestre	L _o	0.29	valor moderado

Razón de textura	T	1.45	aspero
Constante de mantenimiento de canales	C	0.59	medio
Índice de Gravelius	C _c	2.89	rectangular
Relieve de la cuenca	H _c	1085.84	
Razón de relieve	R _h	0.06	
Número de robustez	R _n	0.09	
Número de infiltración	I _f	2.59	
sinosidad	s	1.37	Canal transicional
Pendiente media de la cuenca (J)	J	29.98	tipo de relieve Accidentado
Punto de cierre de la cuenca	x	314723.771	
	y	871459.482	
Ancho de la cuenca	W _c	4.95	
Elevacion media	msnm	346.89	
Cota Maxima	msnm	1106	
Cota Salida	msnm	20.16	
Longitud hasta la divisoria	Km	34.52	
Cota Máxima del cauce principal	msnm	772	
Cota Mínima del cauce principal	msnm	20	
Longitud valle del cauce principal	Km	24.93	

7.2 Análisis geométrico de la cuenca del río León

Aunque nuestro tramo a modelar hidráulicamente no se ve afectado directamente por el complejo entramado de afluentes del gran río León que atraviesa desde parte de la cordillera occidental colombiana, hasta las planicies específicas de la región de Urabá, es importante reconocer la cuenca completa para poder dimensionar el comportamiento de la cuenca en su forma global, esto lo reconocemos en la tabla 7. Y de la misma manera que lo hicimos con nuestra subcuenca específica, de acuerdo con las ecuaciones anteriormente mencionadas y sus respectivos conceptos se obtuvieron sus características geomorfológicas.

Tabla 7. Parámetros Geométricos de la Cuenca del río León.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Área de la cuenca [km ²]	A	1950.88
Perímetro de la cuenca [km]	P	425.68
Longitud del cauce principal [km]	L _m	125.74
Longitud de la cuenca [km]	L _b	71.75
Factor de forma	R _f	0.379

Razón de elongación	R_e	2.18
Razón de circularidad	R_c	0.13
Diferencia de altura	H	1246
Pendiente media del cauce principal	S_c	0.99
Elevación media	msnm	210.92
Cota Máxima Cuenca		1864
Cota Salida Cuenca		3
Longitud total de los cauces	L_u	3845.09
Densidad de drenajes	D_d	1.97
Longitud de flujo terrestre	L_o	0.25
Ancho		27.19
Constante de mantenimiento de canales	C	0.51
Índice de Gravelius	C_c	2.72
Relieve de la cuenca	H_c	1861
Razón de relieve	R_h	0.03
Número de robustez	R_n	0.05
Pendiente media Cuenca	%	15.59
Longitud Cause principal hasta la divisoria		126.28
Punto de cierre de la cuenca	x	307492.423
	y	877028.353
punto de descarga de la cuenca		3
Cota máxima del cauce principal		1246
Cota mínima del cauce principal		0

7.3 Tiempo de concentración (T_c).

En la tabla 8 se muestran los tiempos de concentración hallados con las diferentes ecuaciones planteadas, sin embargo, se seleccionó el valor obtenido por la metodología de Témez debido a que esta considera la pendiente y la longitud del cauce principal (Lugo, 1999).

Tabla 8. Métodos de Concentración.

Método	T_c
Bransby-Williams [h]	11,26
Kirpich [h]	4,35
Témez [h]	9,05
Passini [h]	10,80
Valencia y Zuluaga [h]	4,42

$$Tc = 0.3 * \left[\frac{L_m}{S_c \left(\frac{m}{m} \right)^{0.25}} \right]^{0.76} \quad (3)$$

$$Tc = 9,05$$

7.4 Comparativo de parámetros morfométricos del río Apartadó según la literatura con parámetros hallados en la presente investigación.

En este contexto es importante enmarcar las diferencias en datos georreferenciados por el presente documento investigativo y los datos suministrados por el Municipio de Apartadó, que manifiestan valores tales como un área de 87.036 Km² vs 96.19 Km² arrojadas por la presente investigación, esta diferencia se debe al evaluar ciertos tramos de la cuenca del río Apartadó como Vijagual de 16.224 Km², y la victoria de 7.462 Km² por separado, pero como partes anexas de la misma cuenca del Río Apartadó (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018). Por el contrario, en los modelos obtenidos a través de QGIS y la herramienta GRASS en esta investigación, todas esas subcuencas fueron tenidas en cuenta de manera unificada. El perímetro de la cuenca varía igual entre la literatura reportada de un 73.668 Km vs 100.55 Km de los datos obtenidos de manera experimental. El relieve de la cuenca y sus pendientes arrojaron datos similares estadísticamente comparables con la literatura reportada.

El fin de hacer este experimento de georreferenciación de manera propia en un estudio Hidráulico, es poder tener una visión más asertiva en los datos que nos pedirá el software HEC-RAS en el proceso de modelado hidráulico, aunque lo más importante son las correcciones de tipo topográfico y de georreferenciación del tramo a modelar, y esto, se hizo al hacer una modelación adicional, debido a que las fotos satelitales eran de datos liberados del año 2011, y se tuvo que corregir el paso del río en cierta parte de la zona urbana, pues los sistemas satelitales de este año, no ubicaban el río en la parte exacta de su cauce, esto se explicó con más detalle en la corrección del tramo del cauce principal gracias a la divisoria final del río León obtenida por QGIS.

7.5 Análisis Geomorfológico de la cuenca

A través de los datos obtenidos de la cuenca del río Apartadó, se puede decir que por su área en Km² es una microcuenca, se pudo evidenciar con facilidad los datos con respecto a la geometría de la misma, y en la cual según su forma circular, relieve débil y al ser alargada tiene una sensibilidad mayor a la erosión, tiene procesos de escorrentía moderado en términos de eficiencia, siendo peligroso en escenarios puntuales de crecidas, además al tener un razón de bifurcación promedio de 5,6547, Las estructuras geológicas determinan el patrón de drenaje, se puede observar también que al ser una densidad de drenaje moderada refleja una cuenca drenada moderadamente que responde relativamente rápido al influjo de la precipitación, pero quizás en circunstancias específicas no pueda solventar dicha respuesta, se obtiene que es una cuenca ubicada en un rango altitudinal entre 1106 y 20 msnm, la pendiente del cauce principal está en el rango entre 1-5, por lo cual es suave y tiene una respuesta un poco más lenta ante eventos de precipitación, esto se puede ver en el hidrograma, según el índice de Gravelius es rectangular, al ser un valor no tan cerca a la unidad esta cuenca no es tan propensa a crecientes por eventos de precipitación.

También, posee un tipo de drenaje dendrítico según imagen arrojada por QGIS figura 6 se desarrolla en materiales aproximadamente homogéneos en composición, en los que no existe un control estructural. Las corrientes de agua son muy pequeñas, cortas e irregulares, y tienen la posibilidad de moverse en todas las direcciones y desembocar en una corriente principal con cualquier ángulo; este tipo de drenaje se forma en aquellas zonas de inicio de ladera con pendiente moderada y con baja permeabilidad, mediana pluviosidad, poca cobertura vegetal y caudales líquidos pequeños. El material por el que discurre la escorrentía se encuentra litológicamente alterado. Según la razón de textura es una cuenca áspera por lo cual hay infiltración baja en la cuenca, que también se puede denotar en el número de infiltración, Por otro lado, la constante de mantenimiento es de 0,5855, entonces podría decirse que es media, todavía tiene cobertura vegetal y los tipos de rocas son un poco débiles, teniendo una capacidad media para controlar la transmisión de flujo de materiales de la cuenca. Por último, según su número de robustez, posee un valor bajo que se asocia a pendientes bajas y paisajes suavizados (Botero, 2010. Musy, A. Higy, C. 2010. Schumm, 1963).

Es importante reconocer que tanto los caudales máximos para periodos de retorno variables como los niveles de intensidad de precipitación otorgados por el IDEAM, se utilizaron como información base para las modelaciones hidráulicas en la cuenca río Apartadó ya analizada igualmente en este trabajo de manera geomorfológica. Además, en un proyecto real, se debe tomar el valor de la intensidad de la precipitación utilizando las curvas regionales para cada cuenca, lo cual hicimos con estos valores de CORNARE, puesto que son más cercanos a la realidad de la cuenca frente a posibles datos manuales que quisiéramos incluir para aproximarnos a la exactitud de periodo de retorno inicial de 100 años (Schumm, 1963. Botero, 2010. Córdoba, 2016).

7.6 Tramo del río Apartadó utilizado para Modelación hidráulica

El tramo específico utilizado para la modelación hidráulica, está comprendido desde una curva crítica del sector consejo, pasando por Alfonso López, San Fernando, atravesando el puente que comunica el barrio san Fernando con la parte de atrás del barrio pueblo nuevo (se puede observar el puente en la figura 13). Hasta la primera curva del sector la Esperanza, y son 1800 m en total en el tramo elegido para modelar hidráulicamente. El cual se puede observar completo y de manera detallada en la figura 12, allí están las líneas de bancos en rojo, y en verde están las secciones transversales, y por supuesto el tramo azul es el recorrido principal del cauce modelado. El cual está caracterizado por un cauce meándrico con sinuosidades amplias, con formación de barras de arenas centrales y laterales que de manera continua han sido objeto de explotación por los habitantes del sector para extraer material de construcción. Es importante decir que tiene exposición de un perfil de arenas en la parte alta del talud y un nivel persistente de arcillas grises en la base a nivel del lecho del cauce. En este tramo son frecuentes los procesos de socavación y acumulación. En algunos tramos la margen izquierda tiene mayor altura y taludes más verticales que los de la margen derecha, la sección del río es en “V” asimétrica, los taludes de la margen derecha son más tendidos, la geología que se observa básicamente son las mismas arenas y se observan más o menos 3 m de material de lleno de color café con basuras a unión de raíces raicillas y hacia la parte de abajo el material que es como arenoso (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

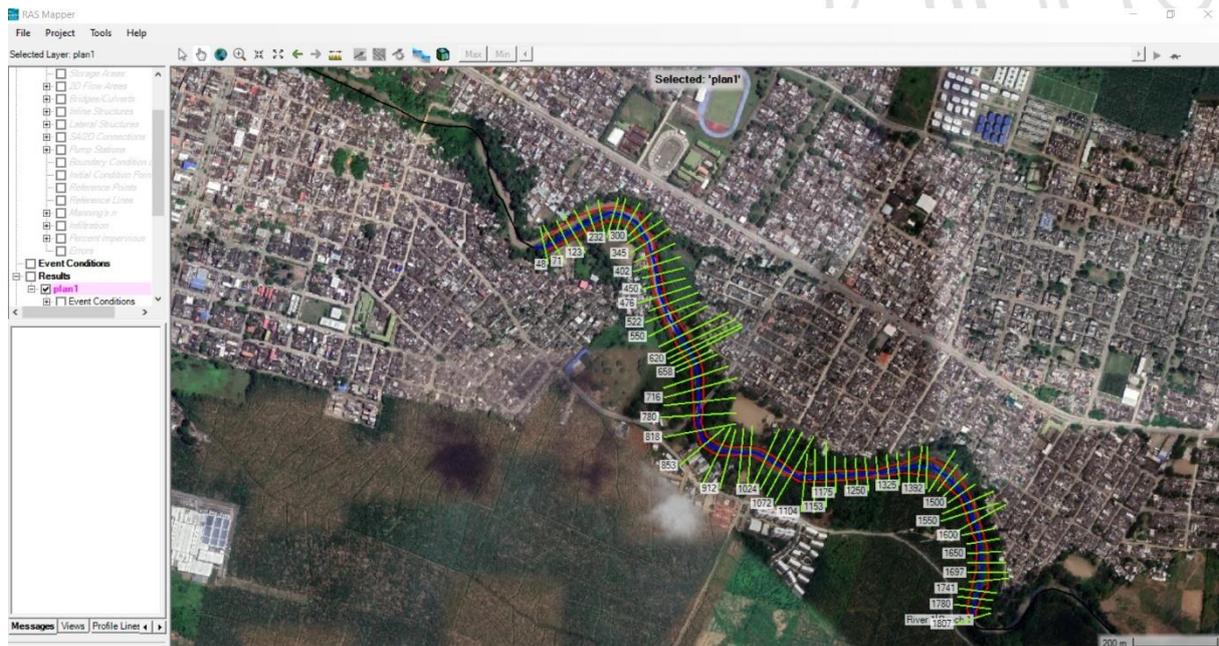


Figura 12. Sectorización Geomorfológica de Tramo Modelado Hidráulicamente de río Apartadó (Hec Ras y Google Earth, 2021).



Figura 13. Puente de San Fernando que atraviesa el Tramo Modelado Hidráulicamente de río Apartadó (Google Earth, 2021).

Las tres curvas completas que comprende el tramo modelado hidráulicamente, se pueden identificar en la figura 14, con nombres de los barrios en contacto directo. Además, en la figura 15 podemos ver un comparativo temporal realizado por el municipio de Apartadó, a través de fotos de imágenes satelitales de diferentes años tomados de Google Earth, las cuales fueron analizadas utilizando la herramienta ArGis, donde se evidencia los cambios del río en nuevas barras laterales y centrales, destruyendo otras, abandonando antiguos canales y generando otros con diferentes recorridos (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018). Donde entre los sitios específicos del consejo y San Fernando el cauce del río presenta una dinámica fluvial muy activa, esto debido quizás por la invasión urbanística de la margen derecha del río, presionando su desplazamiento hacia la margen contraria donde están ubicadas las bananeras, mostrando mucha más evidencia de esta fluctuación y retorno justo antes del inicio del tramo de la zona

escogida, específicamente en el sector consejo, zona que marcó muchas dificultades para poder obtener secciones transversales estables en el modelado en HEC-RAS.

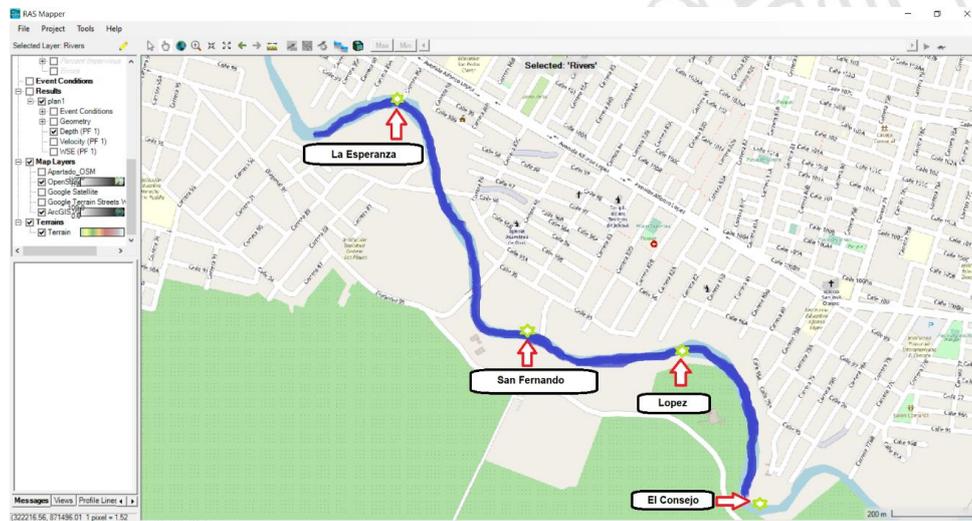


Figura 14. Sectores del Tramo Modelado Hidráulicamente de río Apartadó (HEC-RAS, OSM 2021).



Figura 15. Evaluación multitemporal entre sector Consejo y San Fernando del río Apartadó (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

Las limitaciones debido a las restricciones implícitas en la pandemia provocada por el Covid 19 no imposibilitó por completo poder hacer un recorrido *in situ*, lo cual se encuentra evidenciado en las siguientes fotos determinadas en las figuras 16, 17, 18, 19 y 20, de la zona específica. Durante el recorrido en campo se pudo indagar de manera directa con pobladores de la zona sobre el comportamiento del río en épocas de lluvias, quienes, a través de sus testimonios, indicaron unos sectores y niveles críticos, donde, en el último gran evento de inundación en la zona, se vieron comprometido sus hogares (ocurrido en el año 2019 en el mes de octubre). Los “Flow paths” iniciales con el que se empezó las modelaciones hidráulicas se

obtuvieron gracias a estos testimonios (las líneas exteriores azules, que nos demarcan la zona hasta donde subió el agua en ese evento específico representados en la figura 21 obtenida gracias a la herramienta HEC-RAS). Ahora bien, al ser esto un testimonio, estuvo sujeto a comprobación por medio de la misma herramienta, pero se comprobó que fue una excelente información para las simulaciones iniciales.



Figura 16. Cara Occidental del puente de San Fernando del río Apartadó.



Figura 17. Cara Oriental del Puente de San Fernando del rio Apartadó.



Figura 18. Cancha de fútbol de San Fernando – Apartadó.



Figura 19. Capa Vegetal entre la vista Oriental de puente hasta la Cancha de Futbol de San Fernando.



Figura 20. Curva sector Cancha del Consejo.

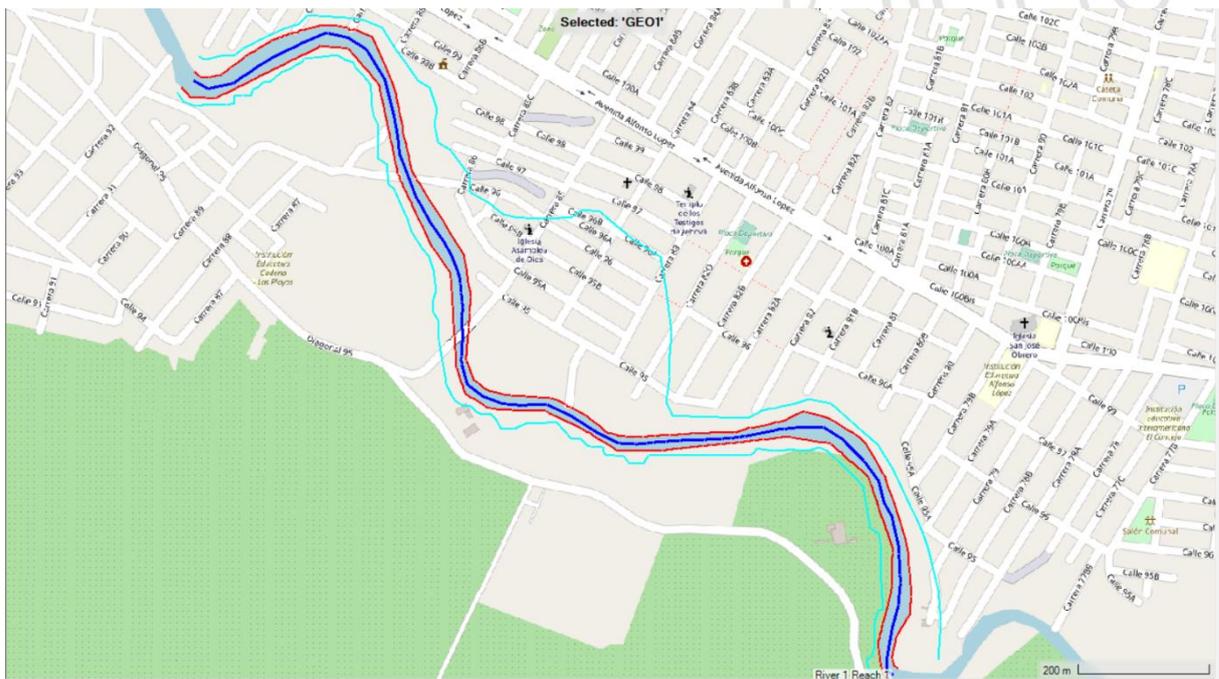


Figura 21. Flow Paths Iniciales según Testimonios de Habitantes del Sector (Hec Ras, OSM 2021).

Algunos pobladores llevan a cabo la extracción de materiales aluviales como mecanismo de subsistencia (como se puede observar en la figura 22), por medio de volquetas y con ayuda de tracción animal (en algunas ocasiones son forzados a ingresar a la parte cóncava de la curva para lograr la extracción de arenas finas) favoreciendo el proceso erosivo (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018). A demás, se puede observar en la figura 22 una estructura de contención en gaviones recubierta en concreto, a la altura de la cancha del consejo (que, aunque no es la zona específica del tramo modelado, puede dar una idea de la inestabilidad del talud). Por otro lado, en el sector de López también se puede observar un muro en gaviones recubierto en concreto, que se muestra en la figura 23, este muro esta fundado sobre bolsacretos, estas obras de contención fueron diseñadas por (GOTTA INGENIERIA S.A.S., 2013).



Figura 22. Extracción de Arena en la Zona (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).



Figura 23. Obra Existente en el Barrio López, izq. vista aguas arriba, der. vista aguas abajo. (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

En la parte posterior al muro en López, se puede ver una zona saturada, resultado de las descargas de alcantarillados que pueden haber contribuido de manera directa al volcamiento de este, pues no se observa ninguna obra de drenaje que permita la evacuación de estas aguas al río (aunque la roca con la que conformaron el gavión se encuentra cubierta por un geotextil no tejido, se puede suponer que es a modo de filtro, sin embargo, todo el muro está revestido en concreto sin drenajes, lo que se puede observar en la figura 24. Lo anterior, pudo contribuir a la inestabilidad del talud por sobrepresiones hidrostáticas en época de crecientes (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).



Figura 24. Falla en el muro de Gaviones (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

En el sector de San Fernando se presenta la misma situación de extracción de material aluvial por parte de habitantes del sector como mecanismo de sustento. También se observa un proceso erosivo por socavación entre 70 m a 80 m, y una obra de descarga al río que fallo, en forma de canal escalonado, esto se puede evidenciar en la figura 25 (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).



Figura 25. Problemática del Barrio San Fernando (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

La zona de la cancha de San Fernando es una zona, que, según los habitantes del sector, se inunda constantemente en temporadas de crecidas (en la figura 21, donde se ve los trazados iniciales de los “*Flow paths*”, se muestra que la inundación ha podido llegar cuatro cuadras arriba hasta la calle 96, de acuerdo con los testimonios de los habitantes del sector).

En el sector La Esperanza, el principal motivo de socavación es la descarga inadecuada de aguas residuales, lo cual no permite la adecuada disipación de energía asociada a la entrega de alcantarillado (se puede evidenciar en la figura 26) (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).



Figura 26. Entrega de alcantarillado en el barrio La Esperanza. (Balcázar, W. Gallego, S. et al. 2018).

7.7 Modelación hidráulica

Se realizó el análisis hidráulico por medio del software HEC-RAS 6 (el cual superó su versión Beta este año), y se hizo un comparativo con la versión inmediatamente anterior HEC-RAS 5.0.7.

7.7.1 Dominio de modelación y área de estudio

Se delimitó como dominio de trabajo el presentado en la Figura 5, y se utilizaron los datos topográficos obtenidos del análisis Geomorfológico modelado en QGIS de la cuenca del río Apartadó, para este dominio. Específicamente, el dominio para la modelación hidráulica corresponde al tramo del río entre la última curva del sector el Consejo (aguas arriba), hasta la curva de la Esperanza.

7.7.2 Condiciones de frontera del modelo hidráulico y rugosidad

Se definieron las condiciones de frontera para la entrada y salida del agua en los extremos del dominio aguas arriba y aguas abajo. La rugosidad se definió por zonas: se optó por una rugosidad de Manning de 0.045 para la faja de retiro de la corriente (que corresponde a corrientes en planicies, limpias, serpenteantes, con pozos y bancos de arena, con algunos matorrales y piedras, Chow, 2004) y para el lecho de la corriente (Main Channel) un número de Manning de 0.040 (que corresponde a bancos de arenas y arbustos ligeros, Chow, 2004)

7.7.3 Simulación de caudal constante

Inicialmente, y con la intención de comparar los resultados entre las versiones HEC-RAS 6 y HEC-RAS 5.0.7, se realizó la modelación asumiendo el caudal permanente de 162.05 m³/s, el cual se obtuvo del periodo de retorno de 100 años que suministró el IDEAM (Tabla 5).

7.7.3.1 Creación de geometría

La geometría para la modelación hidráulica se creó con ayuda de la herramienta Ras Mapper. Primero debemos posicionarnos de manera coherente con el casco urbano, esto se hace a través de capas de mapas conexas desde la web con el mismo Ras Mapper, están son: 'OpenStreetMaps', 'Google Satellite' e incluso 'Google Terrain Streets Water', además, se importó una capa del cauce principal del río Apartadó desde QGIS, llamada: 'Apartado_OSM'. El paso inicial es crear una geometría nueva a través de un 'river line' que es el cauce principal, guiado por 'bank lines', que son las líneas de los bancos laterales, y una zona de inundación demarcada manualmente con 'Flow Paths', para darle paso a las 'Cross sections' que son las secciones transversales que se utilizan para simular en líneas específicas como si fueran estaciones batimétricas virtuales, la profundidad y los datos de profundidad del lecho del río. Esto lo podemos observar en la figura 27.

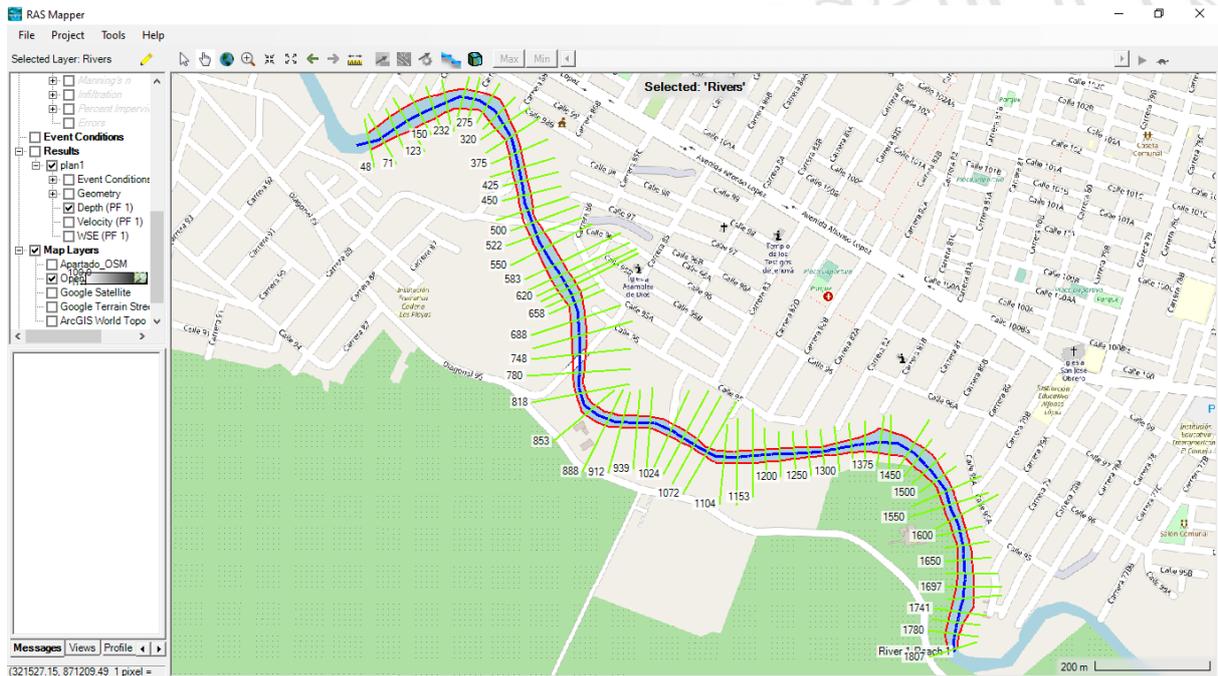


Figura 27. Geometría Creada desde Ras Mapper.

7.7.3.2 Análisis de secciones transversales

El proceso de la creación de la geometría y de las secciones transversales en la modelación hidráulica es un proceso iterativo, y a medida que se hacen simulaciones, se va corrigiendo las secciones transversales en la modelación, para hacer el modelo más estable y más cercano a la realidad física del cauce. Por esto, lo primero es identificar posibles zonas de desbordes (principalmente, definir las dimensiones adecuadas del ancho del cauce en las zonas específicas, para que el flujo base no supere estos bordes). A su vez que se deben ingresar manualmente desde la sección de 'Geometric Data', los coeficientes de Manning adecuados para las secciones creadas. En la figura 28 se representa la sección transversal de aguas arriba de la modelación, donde el borde lateral izquierdo alcanza una altura de 48 m.s.n.m. y un piso de fondo de 36.8 m.s.n.m. Además, el 'Main channel' se representa con los puntos rojos. El borde derecho tiene una altura máxima de 40.43 m.s.n.m. siendo este lado más propenso a desborde en posibles crecidas, esta curva donde se encuentra la primera sección transversal, situada en el sector el Consejo. La simulación mostró que las secciones de aguas arriba generaban islas irregulares en el lado izquierdo en las primeras corridas, precisamente, por el meandro tan vertiginoso en el cual se encuentran ubicados.

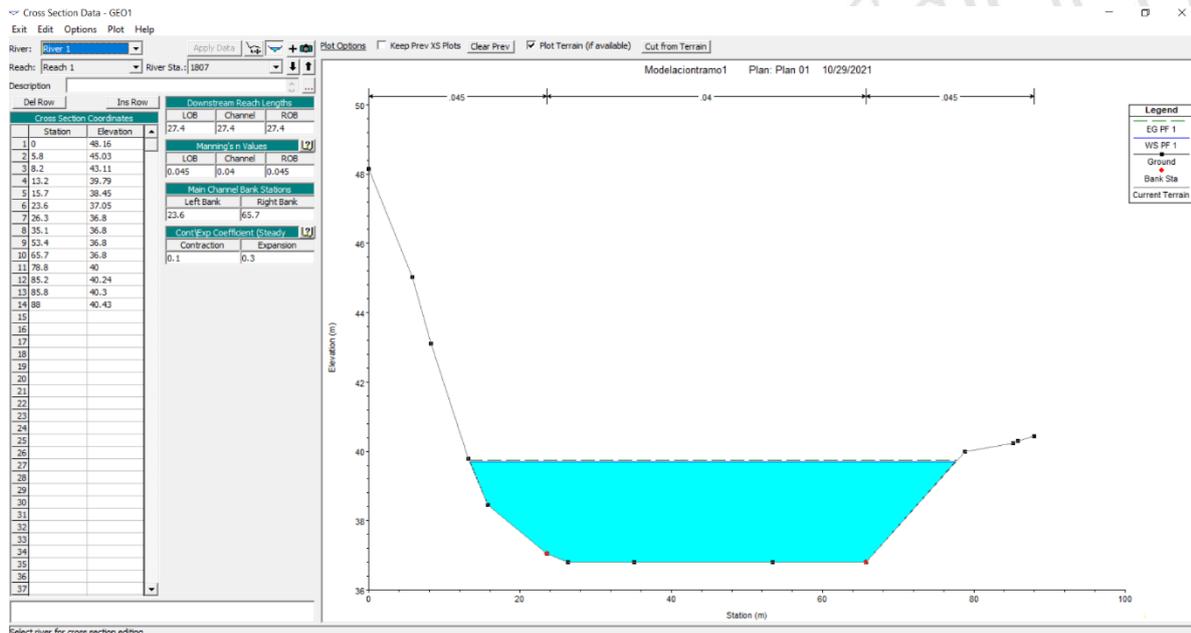


Figura 28. Sección Transversal 1807m Aguas Arriba Sector El Consejo.

En la figura 29 se puede observar la sección transversal de 1275m, ubicada en el sector López, donde el borde lateral izquierdo alcanza una altura de 41.1 m.s.n.m. y un piso de fondo de 36.71 m.s.n.m. El borde derecho tiene una altura máxima de 41.58 m.s.n.m.

La figura 30 muestra la sección transversal de 888 m, justo al lado de la chancha de San Fernando, esta nos evidencia un hecho muy peculiar, tanto por el costado Izquierdo que tiene una altura de 45.68 m.s.n.m. como por el costado derecho que tiene una altura máxima de 44.63 m.s.n.m. nos enmarcan unas secciones del rio muy altas en ambos extremos, por lo cual en esta zona es poco probable que el rio desborde directamente. El piso de fondo de 36.64 m.s.n.m.

La figura 31 se muestra la sección transversal 631 m en la zona empezando el sector la esperanza, 120 m después del puente de San Fernando, esta genera una zona de inundación, que se hizo reiterativa en todas las corridas hechas, generando un canal adicional en el margen derecho con una altura máxima de 39.77 m.s.n.m. y profundidad de fondo de 38.01m.s.n.m. El cauce principal de esta sección trasversal tiene un piso de fondo de 36.6 m.s.n.m; normalizándose 5 secciones después en la 550 m.

En la figura 32 se puede observar la sección transversal de 48m, aguas abajo, ubicada en el sector la Esperanza, donde el borde lateral izquierdo alcanza una altura de 41.55 m.s.n.m. y un piso de fondo de 36.5 m.s.n.m. El borde derecho tiene una altura máxima de 40.76 m.s.n.m.

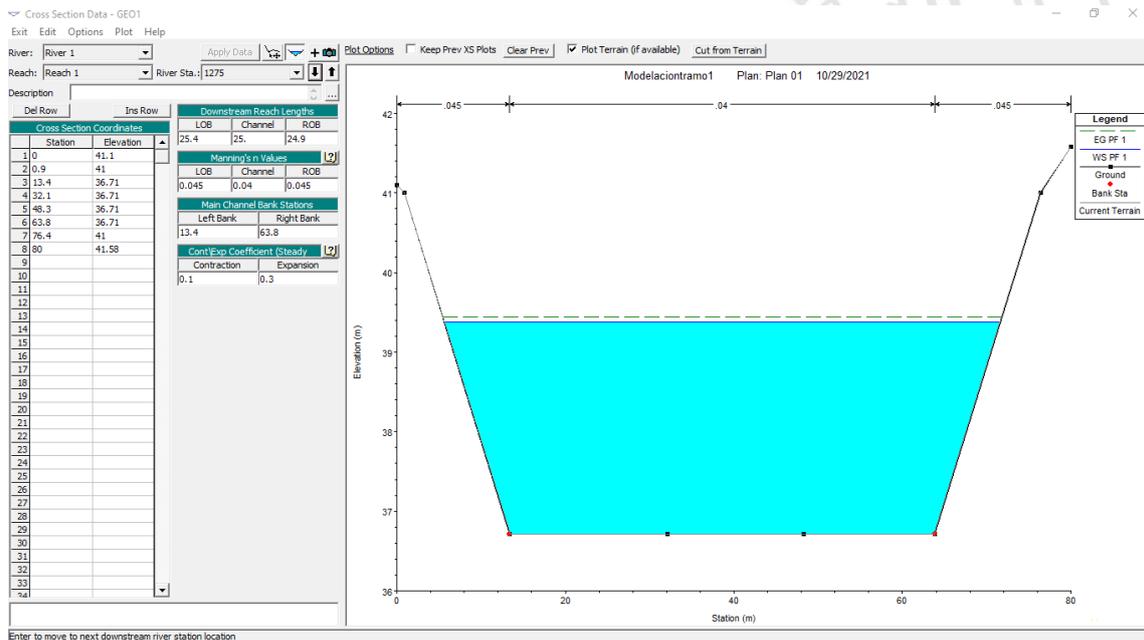


Figura 29. Sección Transversal 1275m Sector López.

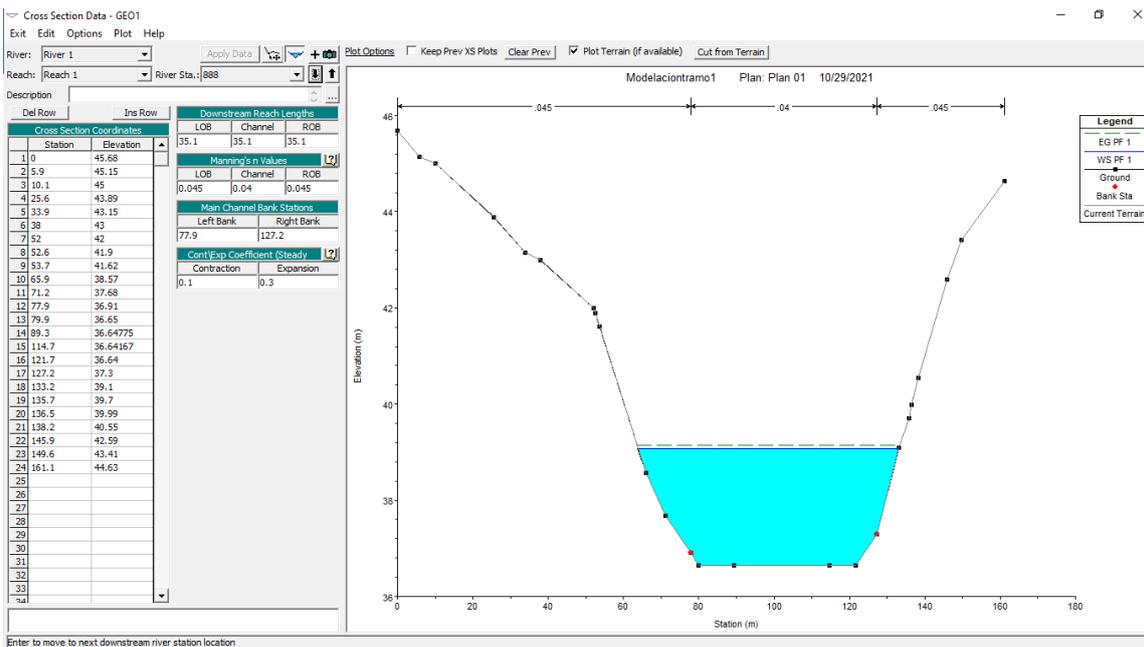


Figura 30. Sección Transversal 888m Sector Cancha de San Fernando.

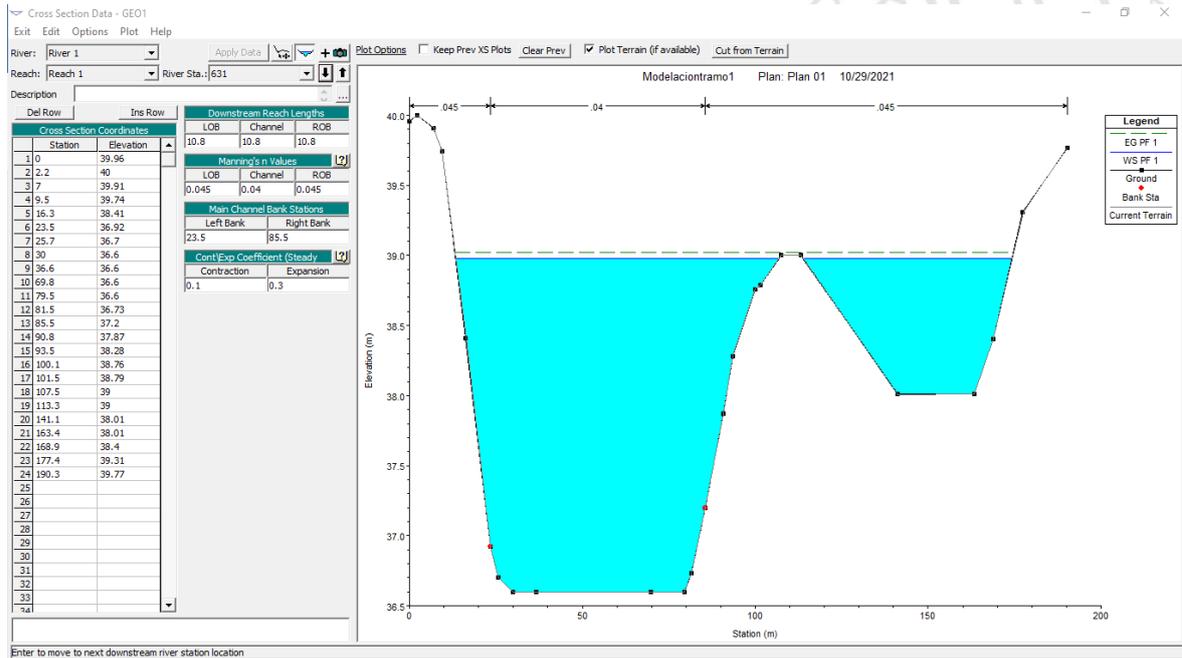


Figura 31. Sección Transversal 631 m, ubicada a 120 m del puente de San Fernando.

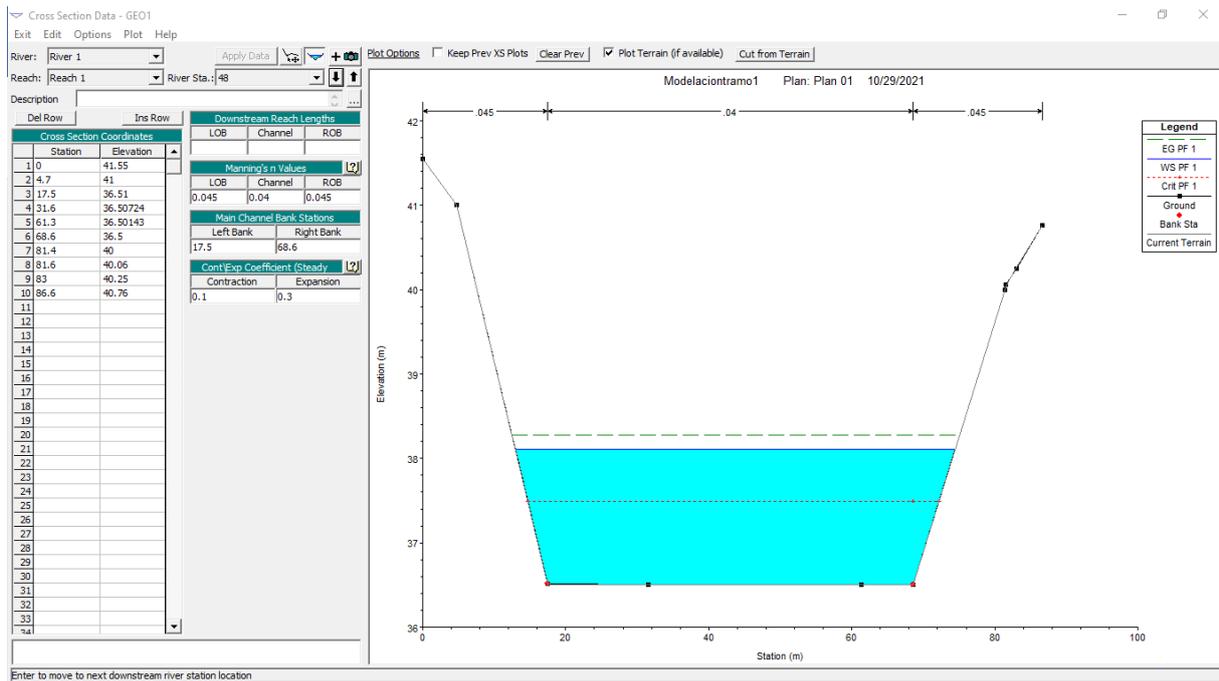


Figura 32. Sección Transversal 48 m Aguas Abajo, Sector la Esperanza.

7.7.3.3 Análisis de flujo de inundación según periodo de retorno de IDEAM de 100 años

Para el análisis hidráulico del tramo del río Apartadó modelado, se utilizó el caudal del periodo de retorno de 100 años de 162.05 m³/s. En la figura 33 podemos observar la simulación de inundación para este periodo, donde la zona que se evidencia como punto de desbordamiento es a unos 120 m aguas abajo del puente San Fernando del río Apartadó, esta simulación no tiene en cuenta ningún valor de desagüe de aguas negras ni aguas lluvias, de ninguno de los barrios aledaños, por lo cual este valor de periodo de retorno puede variar considerablemente, si se hace un estudio minucioso con esos factores excluidos en esta investigación, recordando a su vez que las estructuras bolsacreto en el margen izquierdo antes de llegar al puente de San Fernando, y el muro de contención después del puente por posible socavación, tampoco han sido simulados en el presente trabajo. Ahora bien, si se pudo crear una simulación teniendo en cuenta la altura del puente de San Fernando, la cual se mostrará más adelante.

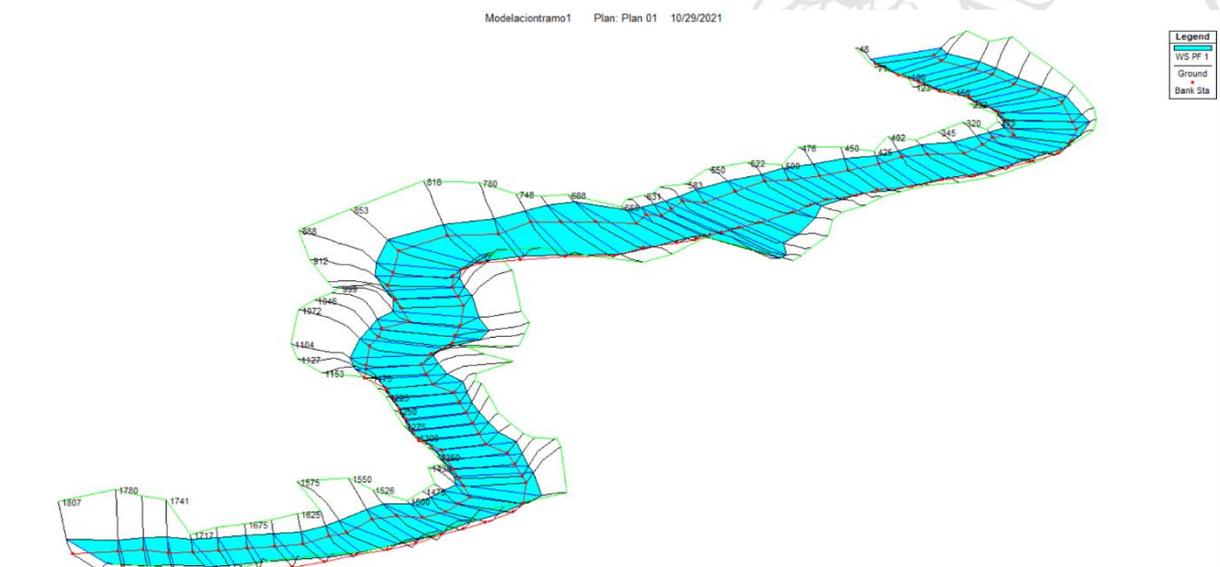


Figura 33. Simulación de Inundación para el Periodo de Retorno de 100 años.

En la tabla 9, podemos observar los resultados de este periodo de retorno de 100 años, las velocidades, pendientes en cada sección, el área de flujo, el ancho superior, la lámina del agua, fondo de cauce, el caudal, y el número de Froude asociado, incluso la cota de tirante crítico. Se evidencia en todas las secciones un número de Froude menor a 1, lo cual indica un flujo subcrítico, es decir es un flujo tranquilo. Con una pendiente ciertamente pequeña, 0.003, la cual se obtuvo de un promedio de las últimas dos estaciones transversales.

Tabla 9. Resultados de Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años.

	Caudal (m ³ /s)	Fondo de cauce (m.s.n.m.)	Lamina del agua (m.s.n.m.)	Cota de tirante crítico	Cota de línea de energía	Pendiente (m/m)	Velocidad (m/s)	Área de flujo (m ²)	Ancho superior (m)	Froude
1807	162.05	36.8	39.69		39.75	0.000516	1.15	155.33	64.16	0.22
1780	162.05	36.79	39.66		39.74	0.000662	1.29	140.05	59.76	0.24

1760	162.05	36.79	39.67		39.72	0.000437	1.05	164	64.94	0.2
1741	162.05	36.79	39.64		39.71	0.000556	1.19	153.83	66.37	0.22
1717	162.05	36.78	39.64		39.69	0.000425	1.04	166.53	66.05	0.2
1697	162.05	36.78	39.63		39.68	0.000437	1.05	164.54	65.42	0.2
1675	162.05	36.77	39.62		39.67	0.000453	1.07	160.29	62.74	0.2
1650	162.05	36.77	39.61		39.66	0.000453	1.07	160.48	62.91	0.2
1625	162.05	36.77	39.59		39.65	0.000545	1.15	151.03	62.27	0.22
1600	162.05	36.76	39.57		39.64	0.000564	1.13	150.32	67.25	0.22
1575	162.05	36.76	39.57		39.62	0.000475	1.08	164.39	71.51	0.21
1550	162.05	36.75	39.57		39.6	0.000323	0.86	194.9	82.83	0.17
1526	162.05	36.75	39.54		39.59	0.000469	1	170.65	81.93	0.2
1500	162.05	36.74	39.51		39.58	0.000626	1.22	144.69	64.2	0.24
1475	162.05	36.74	39.5		39.56	0.000569	1.17	154.69	65.9	0.23
1450	162.05	36.74	39.49		39.55	0.000472	1.07	166.41	70.42	0.21
1430	162.05	36.73	39.48		39.54	0.000486	1.08	167.75	73.33	0.21
1392	162.05	36.73	39.46		39.52	0.000513	1.1	155.69	64.28	0.21
1375	162.05	36.73	39.45		39.51	0.000514	1.1	155.38	63.9	0.21
1350	162.05	36.72	39.44		39.49	0.000514	1.1	156.6	65.62	0.21
1325	162.05	36.72	39.43		39.48	0.000499	1.08	160.68	68.61	0.21
1300	162.05	36.71	39.39		39.46	0.000757	1.32	137.66	62.92	0.26
1275	162.05	36.71	39.38		39.44	0.000532	1.11	155.6	66.04	0.22
1250	162.05	36.7	39.36		39.43	0.000565	1.14	149.54	62.04	0.22
1225	162.05	36.7	39.35		39.41	0.000589	1.16	145.9	60.03	0.23
1200	162.05	36.7	39.33		39.4	0.000591	1.16	147.23	62	0.23
1175	162.05	36.69	39.32		39.38	0.000584	1.15	149.34	63.8	0.23
1153	162.05	36.69	39.26		39.36	0.000982	1.47	121.27	56.4	0.29
1127	162.05	36.68	39.27		39.33	0.000593	1.15	151.47	67.23	0.23
1104	162.05	36.68	39.24		39.32	0.000768	1.28	138.44	66.11	0.26
1072	162.05	36.67	39.22		39.29	0.000702	1.2	144.56	70.07	0.25
1046	162.05	36.67	39.22		39.27	0.000509	1.02	171.79	91.26	0.21
1024	162.05	36.66	39.21		39.26	0.000422	0.95	186.6	92.56	0.19
999	162.05	36.66	39.16		39.24	0.000782	1.29	142.03	70.43	0.26
960	162.05	36.65	39.14		39.21	0.000705	1.22	140.8	63.62	0.25
939	162.05	36.65	39.12		39.19	0.000714	1.22	140.18	63.22	0.25
912	162.05	36.64	39.11		39.17	0.000666	1.18	146.57	67.31	0.24
888	162.05	36.64	39.08		39.16	0.000771	1.24	140.96	69.29	0.26
853	162.05	36.63	39.08		39.13	0.000436	0.94	184.78	88.05	0.19
818	162.05	36.63	39.07		39.11	0.000414	0.91	189.64	90.35	0.19
780	162.05	36.62	39.05		39.09	0.000449	0.96	183.14	88.39	0.2
748	162.05	36.62	39.05		39.08	0.000347	0.8	210.9	108.68	0.17
716	162.05	36.61	39.04		39.07	0.000241	0.69	252.92	128.7	0.14
688	162.05	36.61	39.03		39.06	0.000351	0.82	219.4	120.23	0.17
658	162.05	36.6	38.99		39.04	0.000598	1.09	162.58	81.12	0.23
646	162.05	36.6	38.98		39.03	0.000603	1.05	160.18	81.68	0.22
631	162.05	36.6	38.98		39.02	0.000459	0.94	210.35	154.06	0.2
620	162.05	36.59	38.98		39.01	0.000438	0.91	218.25	158.05	0.19

604	162.05	36.59	38.97		39.01	0.000432	0.87	212.67	135.14	0.19
583	162.05	36.59	38.97		39	0.00038	0.85	221.24	132.27	0.18
550	162.05	36.58	38.94		38.98	0.000505	0.95	184.17	110.15	0.2
522	162.05	36.58	38.91		38.97	0.000634	1.07	157.93	88.4	0.23
500	162.05	36.57	38.89		38.95	0.000633	1.1	162.07	87.33	0.23
476	162.05	36.57	38.87		38.94	0.000729	1.15	149.11	78.14	0.25
450	162.05	36.56	38.85		38.92	0.000758	1.2	150.93	82.29	0.25
425	162.05	36.56	38.83		38.9	0.000803	1.19	142.22	75.08	0.26
402	162.05	36.55	38.79		38.87	0.001043	1.27	130.4	73.94	0.29
375	162.05	36.55	38.78		38.84	0.000748	1.14	150.19	81.64	0.25
345	162.05	36.55	38.72		38.82	0.001117	1.38	125.35	69.54	0.3
320	162.05	36.54	38.7		38.79	0.001086	1.35	126.13	68.28	0.3
300	162.05	36.54	38.69		38.76	0.000911	1.23	135.82	71.34	0.27
275	162.05	36.53	38.61		38.73	0.001452	1.55	111.88	62.77	0.34
250	162.05	36.53	38.6		38.69	0.001198	1.4	123.64	69.09	0.31
232	162.05	36.53	38.57		38.67	0.001221	1.41	122.45	67.78	0.31
200	162.05	36.52	38.52		38.63	0.001354	1.44	116.55	66.09	0.33
175	162.05	36.52	38.47		38.59	0.001693	1.53	107.19	62.8	0.36
150	162.05	36.52	38.38		38.54	0.002315	1.79	96.45	61.03	0.42
123	162.05	36.51	38.36		38.47	0.001658	1.51	110.85	66.99	0.36
100	162.05	36.51	38.31		38.43	0.001833	1.58	107.36	66.21	0.38
71	162.05	36.5	38.17		38.36	0.003117	1.95	88.07	59.89	0.48
48	162.05	36.5	38.11	37.49	38.28	0.003003	1.88	90.21	61.53	0.47

En la figura 34 podemos observar el perfil de flujo del periodo de retorno de 100 años.

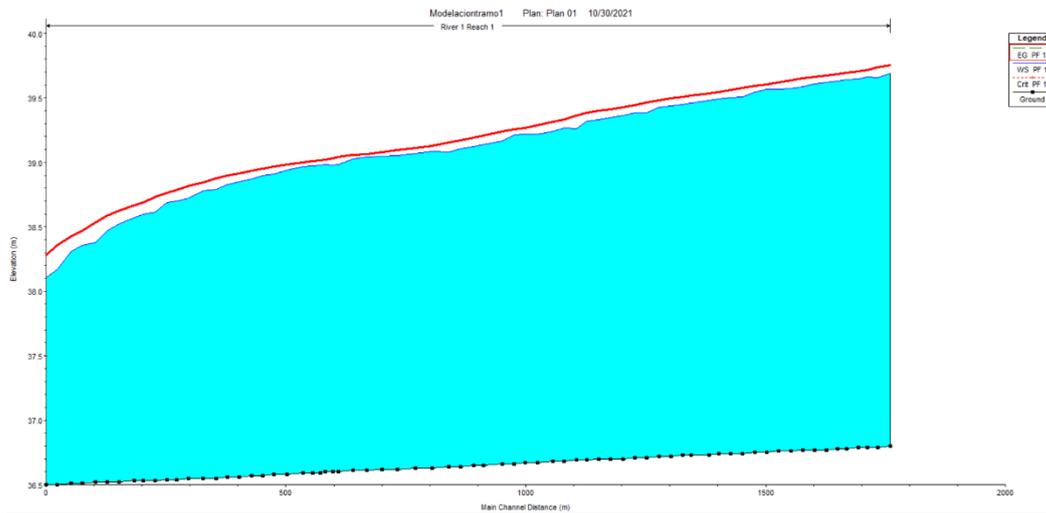


Figura 34. Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años.

7.7.3.4 Análisis Comparativo HEC-RAS 5.0.7. y HEC-RAS 6. con periodo de retorno de IDEAM de 100 años

Se realizó un análisis comparativo de los resultados para las versiones HEC-RAS5.0.7. y HEC-RAS 6. para la modelación de caudal permanente de periodo de retorno de IDEAM de 100 años. En la figura 35 se muestran los resultados respectivamente para la versión 5.0.7 y para la versión 6. Se puede ver, que, en términos generales, el crecimiento de las manchas de inundación en ambas simulaciones es bastante similares. En la figura 36 se observa la comparación de la zona transversal más crítica en ambas versiones, que sería la de 631m, siendo el parámetro de la ubicación del Main channel lo único que cambio, lo cual se puede equiparar de forma manual, moviendo los puntos rojos que lo demarcan, quedando de esta manera ambas versiones de manera similar.



Figura 35. Comparativa Ras Mapper Versión 5.0.7. vs Versión 6.

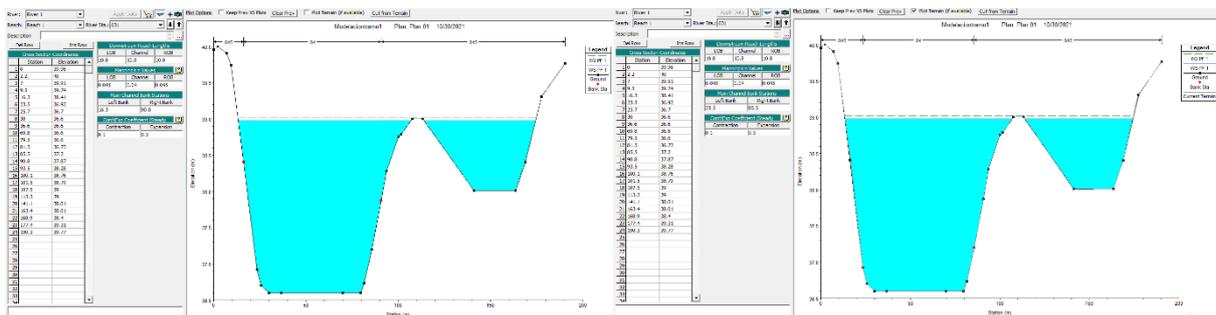


Figura 36. Comparativa Sección Transversal 631m, Versión 5.0.7. vs Versión 6.

7.7.3.5 Análisis de flujo de inundación para el periodo de retorno de IDEAM de 100 años, incluyendo en la geometría del modelo el puente de San Fernando.

El análisis de los resultados sugirió que para entender un poco las dinámicas justo después del área del puente de San Fernando, a unos 120 metros, donde se presenta un desbordamiento (que, en varias simulaciones con caudales mayores, se veía como el área donde se iba acumulando el agua, como en una batea natural) era necesario incluir la estructura del puente dentro del modelo. Se pretendía con esto contestar a la pregunta si ¿la altura del puente era suficiente para evitar que las aguas sobrepasaran la estructura?, lamentablemente no se pudo contar con los planos del puente, sin embargo, con ayuda de herramientas de Google Earth, se logró tener unas mediciones aproximadas de ancho, largo, y la altura. En la figura 37 se ve los datos ingresados en el programa.

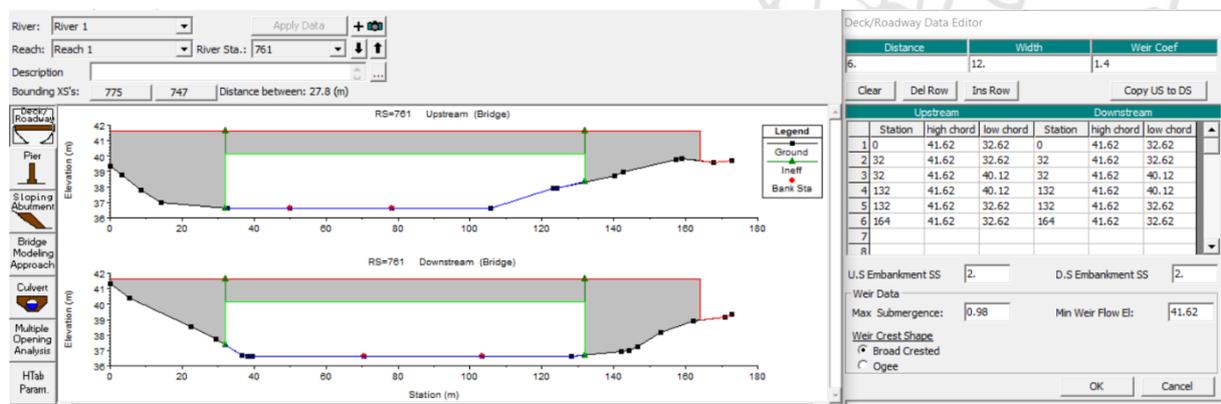


Figura 37. Datos de Google Earth Ingresados para Simular el puente de San Fernando.

En la figura 38, vemos las dos secciones transversales no perpendiculares al río que se tomaron en cuenta, que fueron las 775 m y la 747 m, y en la mitad se creó el puente como la sección 761m, y tiene un ancho de 12 metros.



Figura 38. Secciones 747m y 775m en Ras Mapper para Simular el puente de San Fernando.

En la figura 39 se muestran los resultados del modelo aguas arriba y aguas abajo del puente sin incluir la estructura del puente (secciones transversales 775m y 747m), para un periodo de retorno de 100 años. Se puede observar que en ninguna de las dos secciones el agua supera las dimensiones del puente en altura, puesto que la altura del puente en ambas secciones está representada por dos flechas verdes.

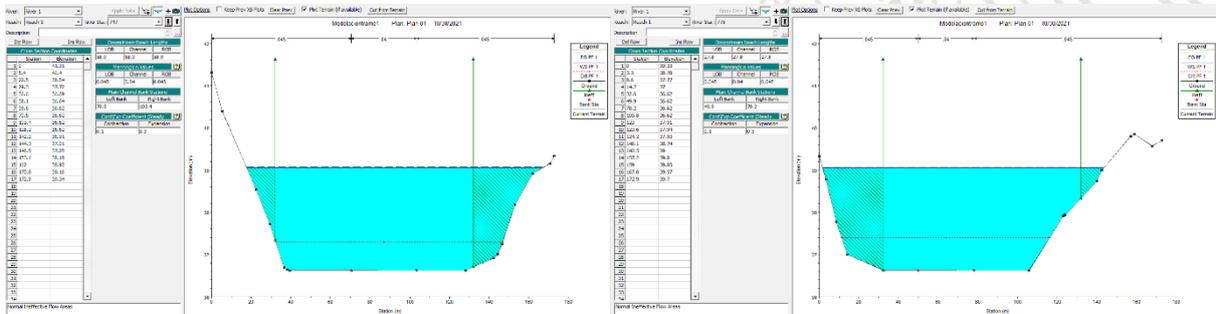


Figura 39. Resultados de Periodo de Retorno de 100 años de Secciones 747m y 775m que Enmarcan el puente de San Fernando.

De la misma manera como se hizo sin considerar la estructura del puente, se realizó una simulación con el puente de San Fernando, en la figura 40 podemos observar la simulación de inundación para este periodo de retorno de 100 años, donde la zona que se evidencia como punto de desbordamiento es igualmente a unos 120 m aguas abajo del puente de San Fernando.

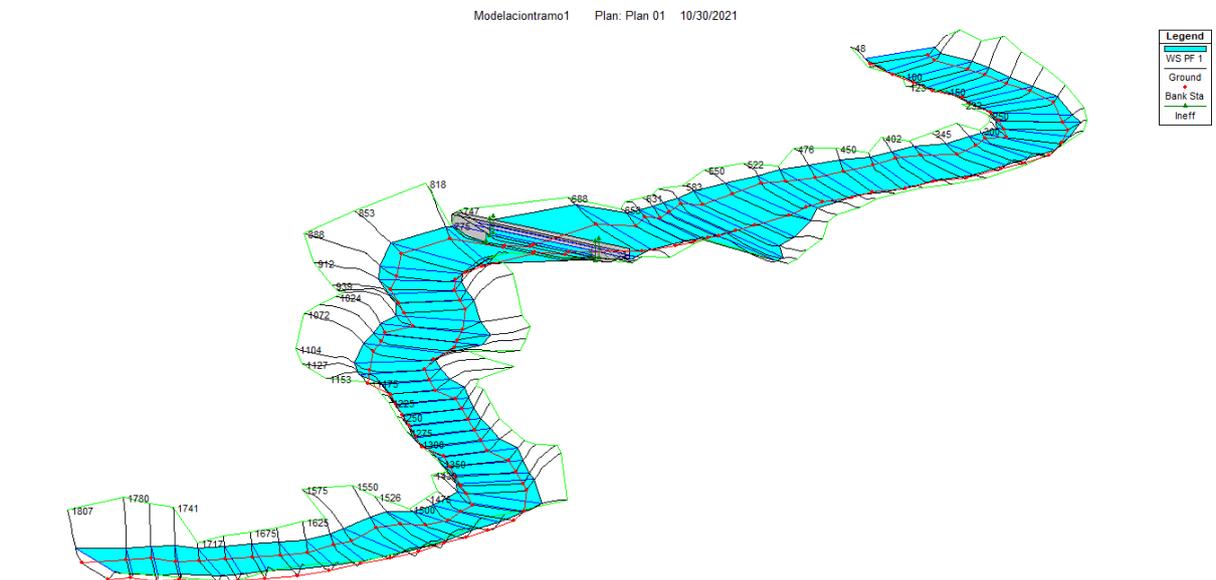


Figura 40. Simulación de Inundación para el Periodo de Retorno de 100 años con el Puente de San Fernando.

En la Tabla 10, se pueden observar los resultados (para un periodo de retorno de 100 años) con el puente simulado.

Tabla 10. Resultados de Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años con Puento de San Fernando en la Simulación.

	Caudal (m³/s)	Fondo de cauce (m.s.n.m.)	Lamina del agua (m.s.n.m.)	Cota de tirante critico	Cota de línea de energía	Pendiente (m/m)	Velocidad (m/s)	Area de flujo (m2)	Ancho superior (m)	Froude
1807	162.05	36.8	39.69		39.75	0.000518	1.15	155.2	64.14	0.22
1780	162.05	36.79	39.66		39.73	0.000663	1.29	139.93	59.73	0.24
1760	162.05	36.79	39.66		39.72	0.000438	1.05	163.86	64.93	0.2
1741	162.05	36.79	39.64		39.71	0.000558	1.19	153.69	66.32	0.22
1717	162.05	36.78	39.64		39.69	0.000426	1.04	166.39	66.04	0.2
1697	162.05	36.78	39.63		39.68	0.000438	1.05	164.4	65.4	0.2
1675	162.05	36.77	39.62		39.67	0.000455	1.07	160.15	62.73	0.2
1650	162.05	36.77	39.61		39.66	0.000454	1.07	160.34	62.9	0.2
1625	162.05	36.77	39.58		39.65	0.000547	1.15	150.89	62.26	0.22
1600	162.05	36.76	39.57		39.63	0.000566	1.13	150.16	67.22	0.22
1575	162.05	36.76	39.56		39.62	0.000476	1.08	164.22	71.49	0.21
1550	162.05	36.75	39.57		39.6	0.000324	0.86	194.7	82.81	0.17
1526	162.05	36.75	39.54		39.59	0.000471	1	170.45	81.9	0.2
1500	162.05	36.74	39.51		39.58	0.000628	1.22	144.53	64.18	0.24
1475	162.05	36.74	39.5		39.56	0.000571	1.17	154.52	65.88	0.23
1450	162.05	36.74	39.49		39.54	0.000473	1.07	166.22	70.4	0.21
1430	162.05	36.73	39.48		39.53	0.000487	1.08	167.56	73.3	0.21
1392	162.05	36.73	39.45		39.51	0.000514	1.11	155.51	64.26	0.21
1375	162.05	36.73	39.45		39.51	0.000516	1.11	155.21	63.89	0.21
1350	162.05	36.72	39.43		39.49	0.000516	1.1	156.42	65.6	0.21
1325	162.05	36.72	39.42		39.48	0.000501	1.09	160.49	68.59	0.21
1300	162.05	36.71	39.38		39.46	0.00076	1.33	137.47	62.9	0.26
1275	162.05	36.71	39.38		39.44	0.000534	1.11	155.4	66.02	0.22
1250	162.05	36.7	39.36		39.43	0.000567	1.14	149.34	62.03	0.22
1225	162.05	36.7	39.34		39.41	0.000591	1.16	145.71	60.02	0.23
1200	162.05	36.7	39.33		39.4	0.000593	1.16	147.03	61.99	0.23
1175	162.05	36.69	39.32		39.38	0.000587	1.15	149.13	63.79	0.23
1153	162.05	36.69	39.26		39.36	0.000987	1.47	121.07	56.38	0.29
1127	162.05	36.68	39.27		39.33	0.000596	1.15	151.24	67.2	0.23
1104	162.05	36.68	39.23		39.31	0.000772	1.28	138.2	66.07	0.26
1072	162.05	36.67	39.22		39.29	0.000706	1.2	144.3	70.04	0.25
1046	162.05	36.67	39.21		39.26	0.000512	1.02	171.44	91.2	0.21
1024	162.05	36.66	39.21		39.25	0.000425	0.96	186.24	92.5	0.19
999	162.05	36.66	39.16		39.24	0.000787	1.29	141.74	70.38	0.26
960	162.05	36.65	39.13		39.2	0.00071	1.22	140.53	63.59	0.25
939	162.05	36.65	39.12		39.19	0.000719	1.22	139.91	63.2	0.25
912	162.05	36.64	39.1		39.17	0.00067	1.18	146.26	67.28	0.24
888	162.05	36.64	39.08		39.15	0.000776	1.24	140.63	69.25	0.26

853	162.05	36.63	39.08		39.12	0.000439	0.94	184.37	88	0.19
818	162.05	36.63	39.07		39.11	0.000417	0.91	189.21	90.32	0.19
775	162.05	36.62	39.06	37.39	39.09	0.000354	0.85	219.28	141.91	0.17
761	Bridge									
747	162.05	36.62	39.05	37.29	39.08	0.000261	0.73	241.2	149.06	0.15
688	162.05	36.61	39.03		39.06	0.000351	0.82	219.4	120.23	0.17
658	162.05	36.6	38.99		39.04	0.000598	1.09	162.58	81.12	0.23
646	162.05	36.6	38.98		39.03	0.000603	1.05	160.18	81.68	0.22
631	162.05	36.6	38.98		39.02	0.000459	0.94	210.35	154.06	0.2
620	162.05	36.59	38.98		39.01	0.000438	0.91	218.25	158.05	0.19
604	162.05	36.59	38.97		39.01	0.000432	0.87	212.67	135.14	0.19
583	162.05	36.59	38.97		39	0.00038	0.85	221.24	132.27	0.18
550	162.05	36.58	38.94		38.98	0.000505	0.95	184.17	110.15	0.2
522	162.05	36.58	38.91		38.97	0.000634	1.07	157.93	88.4	0.23
500	162.05	36.57	38.89		38.95	0.000633	1.1	162.07	87.33	0.23
476	162.05	36.57	38.87		38.94	0.000729	1.15	149.11	78.14	0.25
450	162.05	36.56	38.85		38.92	0.000758	1.2	150.93	82.29	0.25
425	162.05	36.56	38.83		38.9	0.000803	1.19	142.22	75.08	0.26
402	162.05	36.55	38.79		38.87	0.001043	1.27	130.4	73.94	0.29
375	162.05	36.55	38.78		38.84	0.000748	1.14	150.19	81.64	0.25
345	162.05	36.55	38.72		38.82	0.001117	1.38	125.35	69.54	0.3
320	162.05	36.54	38.7		38.79	0.001086	1.35	126.13	68.28	0.3
300	162.05	36.54	38.69		38.76	0.000911	1.23	135.82	71.34	0.27
275	162.05	36.53	38.61		38.73	0.001452	1.55	111.88	62.77	0.34
250	162.05	36.53	38.6		38.69	0.001198	1.4	123.64	69.09	0.31
232	162.05	36.53	38.57		38.67	0.001221	1.41	122.45	67.78	0.31
200	162.05	36.52	38.52		38.63	0.001354	1.44	116.55	66.09	0.33
175	162.05	36.52	38.47		38.59	0.001693	1.53	107.19	62.8	0.36
150	162.05	36.52	38.38		38.54	0.002315	1.79	96.45	61.03	0.42
123	162.05	36.51	38.36		38.47	0.001658	1.51	110.85	66.99	0.36
100	162.05	36.51	38.31		38.43	0.001833	1.58	107.36	66.21	0.38
71	162.05	36.5	38.17		38.36	0.003117	1.95	88.07	59.89	0.48
48	162.05	36.5	38.11	37.49	38.28	0.003003	1.88	90.21	61.53	0.47

En la figura 41 podemos observar el perfil de flujo del periodo de retorno de 100 años con el puente de San Fernando, donde se corrobora que no supera la altura del puente.

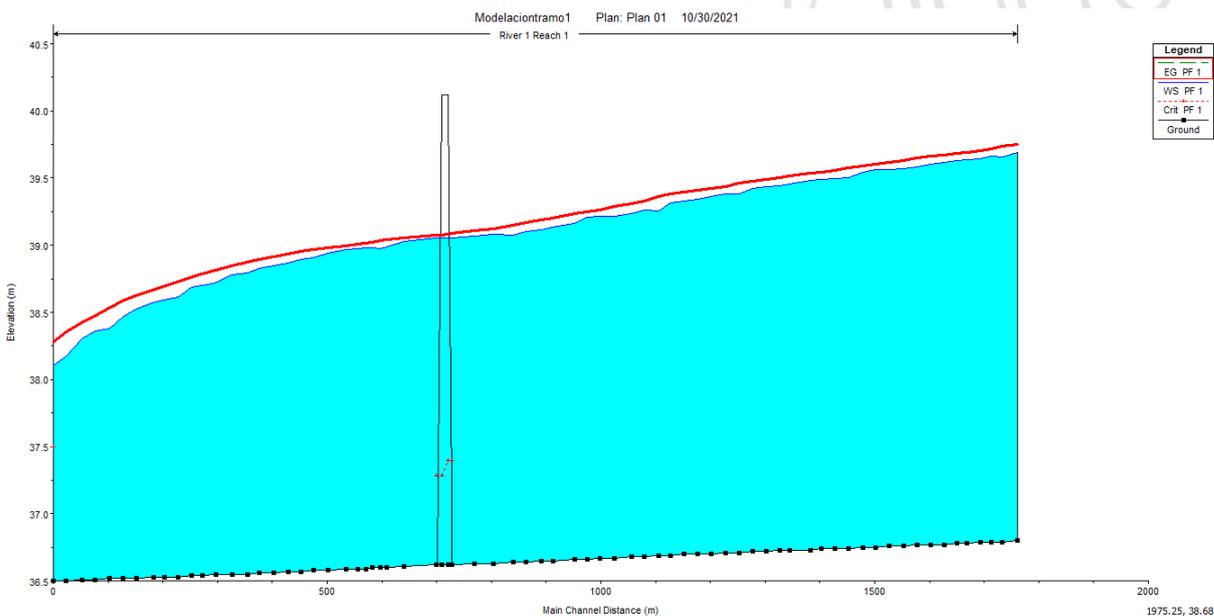


Figura 41. Perfil de flujo para el Periodo de Retorno de 100 años con el Puente de San Fernando.

7.7.3.6 Análisis de flujo de inundación según hidrógrafa estable con periodos de retorno de IDEAM simulando puente de San Fernando

Para conocer el comportamiento del cauce ante una onda de creciente, se realizó la modelación de flujo no permanente, a través de una hidrógrafa sintética, utilizando los diferentes valores de crecientes obtenidos por el IDEAM para diferentes períodos de retorno. La hidrógrafa utilizó los valores de periodo de retornos del IDEAM que van desde 67.82 m³/s en 2.33 años, a 162.05 m³/s en 100 años, y 207 m³/s a 500 años. La hidrógrafa así construida se puede ver en la figura 42, y el 'Plot data' graficado del hidrograma en la figura 43. La hidrógrafa alcanza un pico de caudal a las 4 horas y luego bajó linealmente hasta llegar al menor valor a las 7 horas, permaneciendo estable hasta las 12 horas, es decir, que se usó el tiempo de simulación igual que el tiempo de compilación, y este fue de doce horas en total.

En esta simulación, se utilizó, la misma geometría utilizada para el caso de flujo permanente, con los mismos datos modelados del puente de San Fernando

En la figura 44 se muestra el análisis de caudal variable ingresado a HEC-RAS, empezando a la 1 am, y terminando a la 1 pm, con intervalos de salida de 10 minutos, intervalo computacional de 2 segundos, y mapeando cada 2 minutos.

En la figura 45 podemos observar la simulación de inundación, donde la zona que se evidencia como punto de desbordamiento se repite a unos 120 m aguas abajo del puente de San Fernando.

En la tabla 11, se evidencian los resultados de la hidrógrafa con el puente simulado, donde de nuevo observamos las velocidades, pendientes en cada sección, el área de flujo, el ancho superior, la lámina del agua, fondo de cauce, el caudal, y el número de froude asociado, y la cota de tirante crítico. Donde el número de Froude está dado por la relación de las fuerzas inerciales respecto a las fuerzas gravitacionales, lo cual representa el régimen del flujo. Y ninguna sección transversal supera la unidad en el número de froude, es subcrítico.

Flow Hydrograph

River: River 1 Reach: Reach 1 RS: 1807

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 09OCT2021 Time: 01:00

Fixed Start Time: Date: Time:

No. Ordinates

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	09Oct2021 0100	00:00:00	67.82
2	09Oct2021 0200	01:00:00	67.82
3	09Oct2021 0300	02:00:00	114.213
4	09Oct2021 0400	03:00:00	160.607
5	09Oct2021 0500	04:00:00	207
6	09Oct2021 0600	05:00:00	160.607
7	09Oct2021 0700	06:00:00	114.213
8	09Oct2021 0800	07:00:00	67.82
9	09Oct2021 0900	08:00:00	67.82
10	09Oct2021 1000	09:00:00	67.82
11	09Oct2021 1100	10:00:00	67.82
12	09Oct2021 1200	11:00:00	67.82
13	09Oct2021 1300	12:00:00	67.82
14	09Oct2021 1400	13:00:00	
15	09Oct2021 1500	14:00:00	

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: 0.0005 TW C

Figura 42. Hidrógrafa en Caudal Variable.

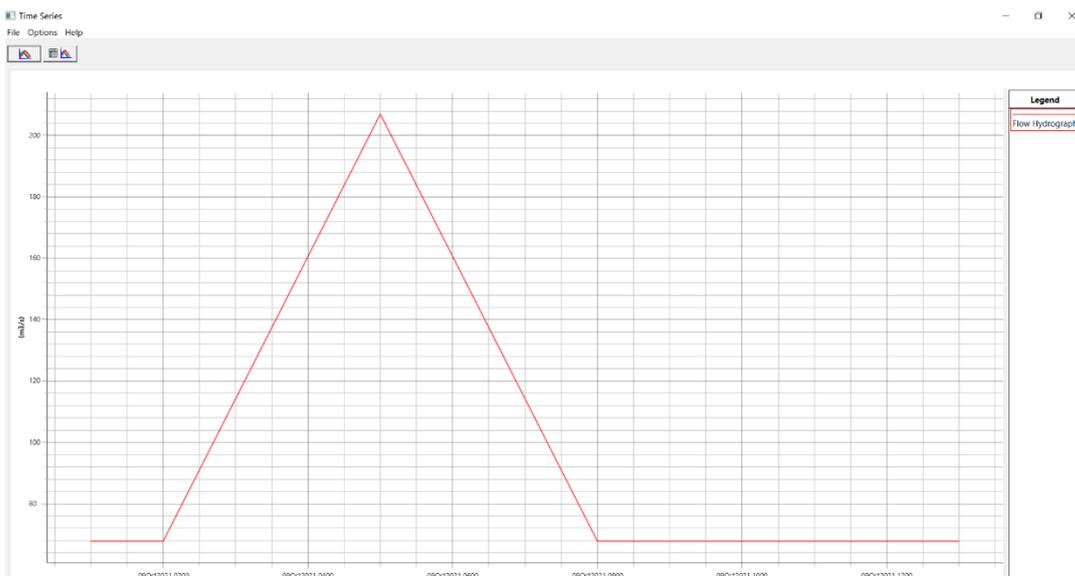


Figura 43. Hidrógrafa Plot Data en Caudal Variable.

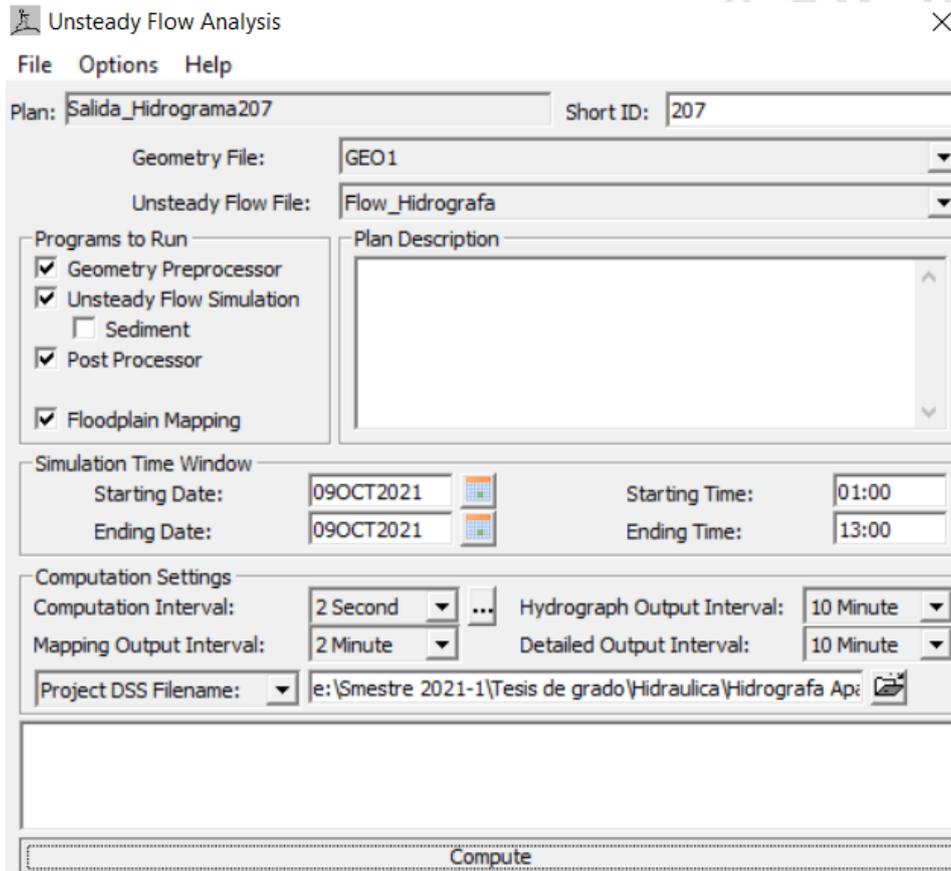


Figura 44. Simulación de Inundación con Hidrógrafa y el Puente de San Fernando.

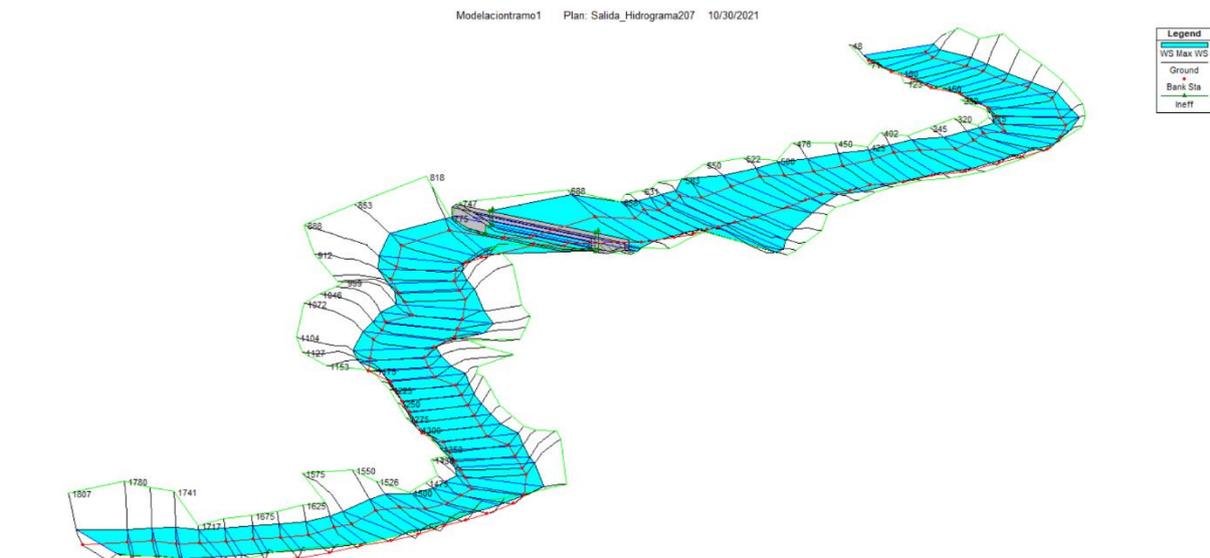


Figura 45. Simulación de Inundación con Hidrógrafa y el Puente de San Fernando.

Tabla 11. Resultados de Perfil para flujo con Hidrógrafa con el Puente de San Fernando en la Simulación.

	Caudal (m ³ /s)	Fondo de cauce (m.s.n.m.)	Lamina del agua (m.s.n.m.)	Cota de tirante critico	Cota de línea de energía	Pendiente (m/m)	Velocidad (m/s)	Area de flujo (m ²)	Ancho superior (m)	Froude
1807	204.96	36.8	39.92		40	0.000627	1.33	170.19	65.48	0.24
1780	204.71	36.79	39.88		39.99	0.000808	1.5	153.69	62.09	0.27
1760	204.86	36.79	39.9		39.97	0.000532	1.22	179.23	66.15	0.22
1741	204.69	36.79	39.87		39.96	0.000686	1.39	169.82	74.5	0.25
1717	204.68	36.78	39.87		39.94	0.000516	1.21	182.04	67.33	0.22
1697	204.61	36.78	39.86		39.93	0.000531	1.22	179.77	66.66	0.22
1675	204.55	36.77	39.85		39.92	0.000553	1.24	174.68	63.76	0.23
1650	204.52	36.77	39.83		39.91	0.000554	1.24	174.75	63.92	0.23
1625	204.39	36.77	39.81		39.89	0.000663	1.34	164.98	63.56	0.25
1600	204.33	36.76	39.79		39.88	0.000678	1.31	165.36	70.06	0.25
1575	204.33	36.76	39.79		39.86	0.000572	1.24	180.5	73.49	0.23
1550	204.38	36.75	39.8		39.85	0.000386	0.99	214.14	84.87	0.19
1526	204.25	36.75	39.77		39.84	0.000548	1.15	189.53	84.4	0.22
1500	203.92	36.74	39.73		39.82	0.000752	1.4	159.12	66.65	0.26
1475	203.94	36.74	39.72		39.8	0.000683	1.35	169.5	67.17	0.25
1450	203.94	36.74	39.72		39.79	0.000566	1.23	182.41	72.01	0.23
1430	203.9	36.73	39.71		39.78	0.000583	1.25	184.44	75.96	0.23
1392	203.76	36.73	39.67		39.75	0.000621	1.28	169.76	65.43	0.24
1375	203.73	36.73	39.66		39.74	0.000624	1.28	169.23	64.97	0.24
1350	203.56	36.72	39.65		39.73	0.000623	1.28	170.7	66.83	0.24
1325	203.47	36.72	39.64		39.71	0.000603	1.25	175.38	70.05	0.23
1300	202.99	36.71	39.59		39.7	0.000905	1.52	150.81	64.41	0.29
1275	202.93	36.71	39.59		39.67	0.000639	1.28	169.73	67.28	0.24
1250	202.68	36.7	39.57		39.66	0.000681	1.32	162.52	62.95	0.25
1225	202.46	36.7	39.55		39.64	0.000713	1.34	158.21	60.78	0.25
1200	202.34	36.7	39.53		39.62	0.000713	1.34	159.83	62.96	0.25
1175	202.32	36.69	39.52		39.6	0.000706	1.33	162.21	64.86	0.25
1153	201.81	36.69	39.46		39.59	0.001179	1.69	132.28	58.15	0.32
1127	202	36.68	39.48		39.56	0.000703	1.31	165.58	68.61	0.25
1104	201.81	36.68	39.44		39.54	0.000901	1.46	152.14	68.05	0.28
1072	201.69	36.67	39.42		39.51	0.000816	1.36	159.04	71.66	0.27
1046	201.77	36.67	39.43		39.49	0.000579	1.15	191.58	94.19	0.23
1024	201.76	36.66	39.43		39.48	0.000486	1.08	206.88	96	0.21
999	201.51	36.66	39.37		39.47	0.000905	1.46	157.12	73.74	0.28
960	201.28	36.65	39.34		39.43	0.000828	1.39	153.88	64.79	0.27
939	201.25	36.65	39.32		39.42	0.00084	1.4	152.98	64.29	0.27
912	201.14	36.64	39.31		39.39	0.000779	1.34	160.26	68.58	0.26
888	201.02	36.64	39.28		39.38	0.000892	1.41	154.91	70.9	0.28

853	201.14	36.63	39.29		39.35	0.000501	1.06	203.55	90.33	0.21
818	201.11	36.63	39.28		39.33	0.000475	1.03	208.73	92.08	0.2
775	201.13	36.62	39.28	37.51	39.31	0.000398	0.96	241.07	147.22	0.19
761	Bridge									
747	201.09	36.62	39.28		39.31	0.000299	0.83	263.49	156.4	0.16
688	201.07	36.61	39.25		39.29	0.00039	0.92	247.26	129.64	0.18
658	200.96	36.6	39.2		39.27	0.000689	1.24	180.97	89.81	0.25
646	200.96	36.6	39.19		39.26	0.000674	1.18	178.11	84.2	0.24
631	200.97	36.6	39.21		39.26	0.000471	1.02	247.53	164.26	0.2
620	200.99	36.59	39.21		39.25	0.000444	0.97	255.09	162.28	0.2
604	201	36.59	39.2		39.24	0.000457	0.96	244.91	146.63	0.2
583	200.97	36.59	39.19		39.23	0.000403	0.93	251.87	136.74	0.19
550	200.94	36.58	39.16		39.22	0.000542	1.05	209.59	114.91	0.22
522	200.93	36.58	39.13		39.2	0.000697	1.19	178.84	100.33	0.24
500	200.94	36.57	39.12		39.19	0.000699	1.23	181.8	91.08	0.25
476	200.9	36.57	39.09		39.17	0.000817	1.3	167.14	90.45	0.26
450	200.91	36.56	39.07		39.15	0.000839	1.34	169.11	85.73	0.27
425	200.89	36.56	39.04		39.13	0.000893	1.34	158.37	77.43	0.28
402	200.86	36.55	39		39.1	0.001136	1.42	146.06	76.48	0.31
375	200.87	36.55	39		39.08	0.000822	1.27	168.06	84.57	0.26
345	200.85	36.55	38.93		39.05	0.00123	1.55	140.18	71.75	0.32
320	200.85	36.54	38.9		39.02	0.0012	1.51	140.42	69.6	0.32
300	200.85	36.54	38.9		38.99	0.001004	1.37	151.05	72.69	0.29
275	200.84	36.53	38.82		38.96	0.001593	1.73	124.99	64.28	0.37
250	200.84	36.53	38.81		38.93	0.0013	1.56	138.64	71.09	0.33
232	200.83	36.53	38.78		38.9	0.00133	1.57	136.93	69.4	0.33
200	200.83	36.52	38.73		38.86	0.001474	1.61	130.33	67.81	0.35
175	200.82	36.52	38.67		38.82	0.001828	1.7	119.86	64.29	0.38
150	200.82	36.52	38.58		38.77	0.00247	1.98	108.61	62.35	0.45
123	200.82	36.51	38.57		38.71	0.001741	1.67	125.2	68.37	0.37
100	200.82	36.51	38.52		38.67	0.001914	1.73	121.48	67.63	0.39
71	200.82	36.5	38.38		38.6	0.003168	2.13	100.65	61.34	0.5
48	200.82	36.5	38.32	37.64	38.52	0.003004	2.04	103.43	62.91	0.48

7.7.3.7 Modelación 2D para flujo no permanente.

En esta sección, se analizarán los resultados obtenidos al realizar una modelación 2D del dominio. Para lo cual, con la ayuda de la herramienta Ras Mapper, se creó una geometría llamada 'Area_Apartado2D', con una malla en dos dimensiones, como se puede ver en las figuras 46 como 48. En la figura 46 se pueden ver los resultados en planta para el pico de la creciente, de 207 m³/s que se presenta en la 4ta hora de la simulación. En esta figura 46 se muestra la mancha de inundación, donde se observa que la cancha de San Fernando no se inunda, pues tiene una altura que imposibilita al río llegar hasta estas dimensiones (sin embargo, se debe anotar que esta área es la que manifiestan los vecinos del sector que es la que primero se inunda, junto con la cara norte del puente de san Fernando, probablemente debido a la precipitación directa, por no tener un adecuado drenaje en la zona, y no por efecto de desbordamiento del río).

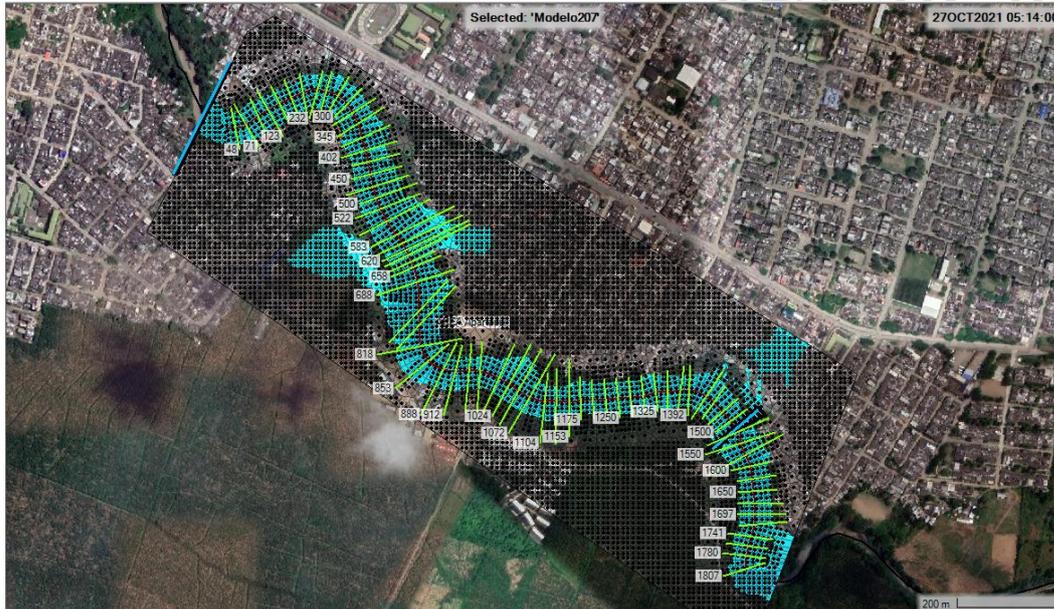


Figura 46. Zonas que en el pico de 207 m³/s de la hidrógrafa se inundan.

En la figura 47 se observa la simulación del pico de 207 m³/s de la Hidrógrafa, a través de la vista DEM 3D.



Figura 47. Zonas que en el pico de 207 m³/s de la Hidrógrafa que se inundan, Vista DEM 3D.

En la figura 48 se ve el enmallado creado a través de la vista de ‘geometría data’.

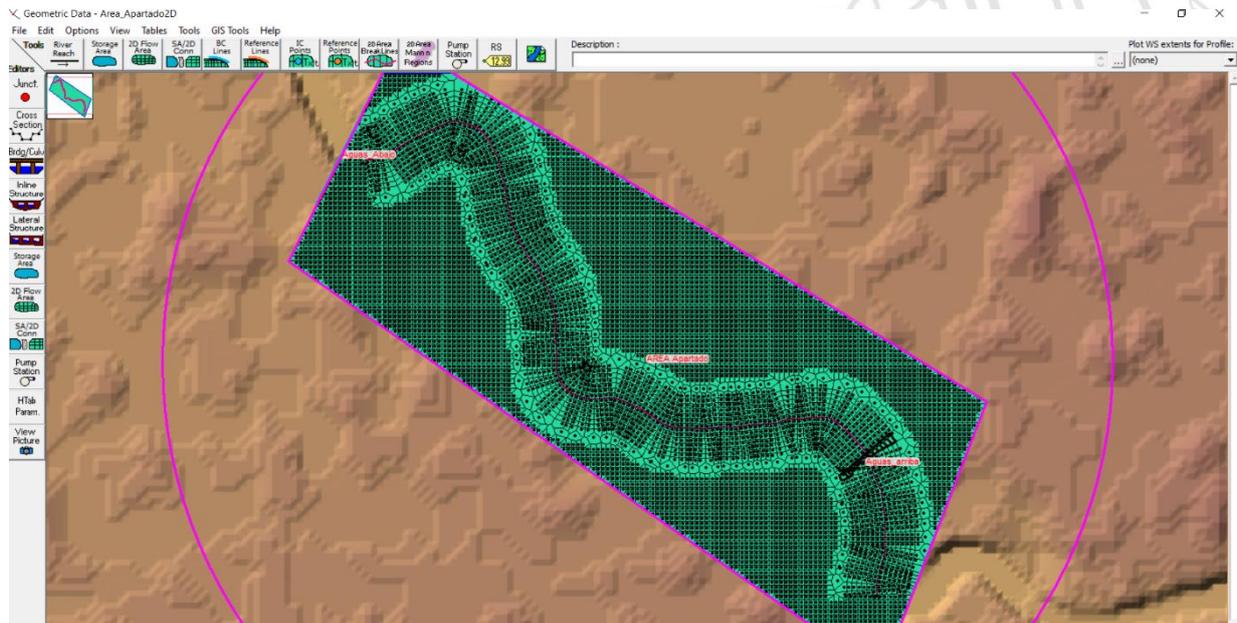


Figura 48. Enmallado 2D en Geometría Data.

8 Conclusiones y recomendaciones

Al analizar el comportamiento del tramo elegido para la modelación hidráulica del río Apartadó, se puede concluir que las inundaciones presentadas en la zona no son debido directamente al desbordamiento del río. Los resultados de las modelaciones muestran que el río no es la causa directa de las inundaciones en inmediaciones de la cancha de San Fernando. En las distintas modelaciones estructuradas con el modelo de elevación, se evidencia una altura de la cancha de unos 42 m.s.n.m. hasta unos 47.5 m.s.n.m, lo cual no permite que el margen derecho del río sobrepase esta altura en ninguna modelación ejecutada, sin embargo, después de esa altura máxima al costado lateral derecho del río (y más adentro de la cancha de san Fernando), se ve una disminución de altura topográfica, formando una batea, que, si bien es difícil de superar, una vez superada, el agua allí depositaba forma una piscina natural difícil de evacuar.

La zona crítica donde se presenta las inundaciones naturales del río es a los 120 metros luego de haber sobrepasado aguas abajo el puente de San Fernando, lo que se evidencia en las corridas con caudal variable y constantes, muy a pesar que posee una estructura de concreto en ese margen (presumiblemente construida sobre bolsacreto) se evidencia en la figura 16, en donde el río comienza a llenar de manera natural ese borde, llegando hasta la cara noroccidental justo antes de empezar el río (del lado del barrio San Fernando, corroborando los testimonios de vecinos del sector, sin embargo no se explica con estas simulaciones los relatos de los habitantes del por qué la cancha de San Fernando procede en casi la mayoría de circunstancias a inundarse justo después de llenarse este espacio que muestra la simulación). Por otro lado, después de los 120 metros de aguas abajo del puente de San Fernando, pero esta vez por el margen izquierdo, se presenta también un área de inundación natural, un poco mayor, según nos muestra el modelo

en la versión con malla 2D, determinando de manera clara un área crítica a ambos lados del lecho del río como se observó en la figura 46.

En la revisión de campo se observó que en la zona lateral izquierda 50 metros aguas arriba del puente de San Fernando se construyó una estructura en forma de muro (posiblemente para contener las erosiones en esa ladera, esto se puede ver en la figura 17), sin embargo, de acuerdo a los resultados de las modelaciones hidráulicas realizadas acá, se puede notar que existe una zona de mayor riesgo después del puente de San Fernando aguas abajo, que no se encuentra protegida.

Es evidente la erosión y socavación en las laderas de ambos lados del río en el tramo de estudio, posiblemente estimulada por la constante remoción de material del lecho del río (para sustento de construcción), y por los desagües de aguas negras y lluvias colapsados en varios puntos del tramo elegido (cuyos datos anexos al caudal del río, no fueron incluidos en este trabajo investigativo). Se recomienda, hacer una revisión del funcionamiento hidráulico de los sistemas de drenados de aguas negras y de desagüe de aguas lluvias en la zona, lo que posibilitaría una adecuada presunción de comportamiento de la escorrentía en épocas de lluvias, constantes en la zona en la cancha de San Fernando.

Se recomienda con respecto a solucionar la constante inundación de la cancha de San Fernando, crear un sistema adecuado de drenaje por medio de un estudio para implementarlo, el margen derecho lateral del río que limita con la cancha tiene una altura máxima de 45,94 m, siendo esta altura una barrera natural, evitando que el río se desborde, e imposibilitando que la cancha inundada por posibles aguas pluviales se evacue hacia el río, por lo cual un drenaje adecuado, aliviaría rápidamente la batea que se forma en este sector.

Se sugiere que se realicen cronogramas habituales de mantenimiento y revisión de las estructuras de descarga de aguas negras y de aguas lluvia, garantizando que permanezcan libres de objetos de mediana y gran envergadura, asociados al material de arrastre, basuras o troncos habituales en la corriente del afluente, optimizando así su funcionamiento hidráulico.

La basura acumulada en el fondo del lecho, que desde las fotos obtenidas *in situ* se observan, es evidencia de los constantes desechos sólidos de gran magnitud arrojados indiscriminadamente al río, ejemplo de esto se ve en la figura 16, donde se ve llantas y bolsas de basura, que se vuelven material sedimentario en análisis de este tipo, sugiriéndose un estudio minucioso de este valor agregado, de material de desecho por mes arrojados al río de manera directa y sin ningún proceso de filtrado.

Ahora bien, en el contexto meandrónico del tramo del río elegido, se evidencia, que, en la curva más pronunciada, que es la de aguas arriba, en el sector caracterizado por la presente investigación como el Consejo, el cauce tiende a modificar su estado de equilibrio dinámico, aunque su forma de planta en evidencia en la literatura cambia su cauce en el tiempo, lo cual se

puede observar en la figura 15, el río Apartadó siempre ha buscado la manera de autoequilibrarse.

El río Apartadó en la mitad del siglo 20 era un ecosistema lleno de vida, con biomas totalmente saludables, como partes de la cuenca en la cual se encuentra sumergido ‘Cuenca del río León’ (ejemplo podría ser de esas épocas saludables de la subcuenca investigada, el también afluente ‘río Mutatá’, el cual todavía posee estas dinámicas robustas limnológicamente hablando). Considero que la principal herramienta de recuperación ecológica del río es la reforestación constante, de hecho, esta sería la primera herramienta para la cohesión de las laderas del tramo modelado hidráulicamente. Los ecosistemas de estas aguas están bajo una tensión crítica, provocando un estrés enmarcado en la fertilización excesiva o eutrofización, cuyo sedimento selecciona organismos con la capacidad de sobrevivir en aguas con poco oxígeno, como son los gusanos *tubificidos* y las larvas de *dípteros quironómidos*. Paradójicamente, aunque el río eutrófico es más productivo, una mayor fracción de su producción se invierte en bacterias y en fauna del fondo, por lo cual no favorece precisamente la producción pesquera. Todo esto asociado en la contaminación de los ríos, problema a todas luces de transporte, donde las aguas tratan de oxidar una cantidad excesiva de material, tanto orgánico que viene con los cascos urbanos o las cloacas, como el generado en las propias aguas por fertilización con fósforo y nitrógeno. Es importante reconocer que donde hay mucha materia orgánica oxidable, allí donde el potencial de reducción – oxidación (redox) es tan bajo, las plantas no podrán hacer fotosíntesis, ósea que la revegetación debe estar enmarcada en ese contexto interdisciplinario con biólogos que puedan ayudar a una investigación más exhaustiva en este contexto.

9 Referencias bibliográficas

- Ackerman, C.T. (2011). HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS Using ArcGIS® User's Manual (Version 4.3.93). U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Acosta, J. Bernal, F. Loaiza, J. Martínez, O. Plazas, C. Urrego, J. Valencia, M. Vargas, N. (2018). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales-IDEAM. 59 páginas. Bogotá. Recuperado de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf
- Agudelo, R., Fajardo, D., Simulación de calidad del agua en la sub-cuenca río alto Bogotá durante el periodo 2014-2016 haciendo uso de HEC-RAS. (2019). Revista Colombiana de ciencia animal. Universidad de Sucre. Vol. 11 Núm. 2. Julio-diciembre de 2019. Recuperado el 21 de septiembre de 2019 de: <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/view/Articulo720>
- Arora, V., Kouwen, N., Seglenieks, F., Soulis, E. (2001). Scaling aspects of river flow routing. *Hydrological Processes*, 15, 3, 461-477, DOI: 10.1002/hyp.161.
- ASF Data Search Vertex. (2021). EarthData. Recuperado de: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

- Athan, T. Goddard, E. Homann, M. Manganelli, L. Mano, A. Winstrup, M. et al. (2004-2020). Guía del usuario para el software QGIS de sistema de información geográfica (SIG) QGIS. Recuperado de:
https://docs.qgis.org/3.16/es/docs/user_manual/index.html
- Balcázar, W. Gallego, S. Guevara, G. Laverde, D. Mejía, E. Rojas, D. Sánchez, E. Suárez, D. Valencia, O. (2018). Estudios hidrológicos, hidráulicos, geológicos y geotécnicos en sectores críticos del río Apartadó y el río vijagual como estrategia de mitigación de emergencias y desastres por inundaciones en el municipio de Apartadó. Antioquia.
- Balica, S. Beevers, L. Wright, N. (2012). Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison. *Environmental Modelling & Software*. Volumen 41. Marzo. Páginas 84-92.
- Barrios, H. Hernández, R. Ramírez, A. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología ciencia agua*. Vol. 8. No. 3. Monterrey. México. Recuperado de:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222017000300005
- Benito, G., Casas, A., Thorndycraft, V., Rico, M. (2006). The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surf. Process. Landf.* 31 (4), 444–456.
- Bladé, E. Cea, L. (2008). Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. España
- Botero, A. Velez, J. (2010). Tiempos de concentración artículo. Estimación del tiempo de concentración y tiempo De rezago en la cuenca experimental urbana de La quebrada san Luis, Manizales. Medellín.
- Burns, M.J., Fletcher, T., Walsh C.J., (2012). Escorrentía de aguas pluviales urbanas: una nueva clase de problema de flujo ambiental. *PloS One*, 7. Artículo e45814
- Cano, J., Farias, S., Vásquez, J. (2008). Consorcio Zonificación. Zonificación de amenazas y riesgos en las áreas urbanas de los municipios de Apartadó y Carepa, en el departamento de Antioquia. Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá. Informe final Apartadó Carepa. Recuperado de:
<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19686>
- Chen, Y., Mossa, J., Singh, K. (2020) Floodplain response to varied flows in a large coastal plain river. Department of Geography. University of Florida. Gainesville.

FL 32611. USA. Center for Geospatial Analytics. North Carolina State University. Raleigh. NC 27695. USA

Chow V.T. Hidráulica de canales abiertos, Primera edición, McGRAW-HILL, 1994.

Chow V,T. Maidment, D. Mays, L. Hidrologia aplicada. McGraw-Hill.

Comino, E. Rosso, M. Tamagnone, P. (2020). Rainwater harvesting techniques as an adaptation strategy for flood mitigation. *Journal of Hydrology*. Torino. Italia.

Coordinación de atlas de riesgo de Colombia. Ingeniar: Risk Intelligence. Apoyo técnico de UNGRD. Corporación OSSO. DIMAR. SGC. IDEAM. IGAC. (2018). Atlas de Riesgo de Colombia: Revelando los desastres latentes. Bogotá. Colombia. Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/62193_atlasriesgo1.pdf

Cook, A. Coonrod, J. Merwade, V. (2008). GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environ.Model Softw.* 23 (10), 1300–1311.

Córdova, M. (2016). Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas. Prontubeam. Recuperado de: https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26

CORPOURABA. (2019). Ajuste del plan de ordenación y manejo de la cuenca del río León (1201) localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de la corporación para el desarrollo sostenible del Urabá. Recuperado de: <http://corpouraba.gov.co/wp-content/uploads/Cap-5.-1.-Caracterizaci%C3%B3n-condiciones-de-riesgo.pdf>

Croke, B.F.W., Dutta, D., Jakeman, A.J., Kim, S., Teng, J., Vaze, J. (2017). Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environ. Model Software.* 90, 201–216.

Daneshfar, B. Townsend, R. Yang, J. (2006). Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Canada

Environment Agency UK. (2010). Fluvial Design Guide. Chapter 7. Recuperado de: <https://www.gov.uk/flood-and-coastal-erosion-risk-management-research-reports/fluvial-design-guide>

GOOTA Ingeniería S.A.S. (2013). Evaluación y diseño de las obras de protección contra procesos erosivos en el río Apartadó, el río Chigorodó y la Quebrada Ripea. Medellín. Colombia.

Greco, S.E., Girvetz, E.H., Larsen, E.W., Lowney, C., Mann, J.P., Tuil, J.L. (2008). Relative elevation topographic surfacemodelling of a large alluvial river floodplain and applications for the study and management of riparian landscapes. *Landsc. Res.* 33 (4), 461–486.

- Horritt, M.S., Bates, P.D., (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *J. Hydrol.* 268 (1), 87–99.
- Hubbart, J.A, Zeiger, S.J, (2021). Medición y modelación de caudales ambientales basados en eventos: una evaluación de las simulaciones de lluvia en la red HEC-RAS 2D. *Revista de Gestion Ambiental.* Volumen 285.
- IDEAM. (2018). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. 59 páginas. Bogotá D.C. Recuperado de:
http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf
- Jones, J.L. (2006). Side channel mapping and fish habitat suitability analysis using LIDAR topography and orthophotography. *Photogramm. Eng. Remote. Sens.* 71 (11), 1202–1206.
- Lugo Hubp, J. (1999). Cartografía geomorfológica básica y aplicada. *Investigaciones geográficas*, (40):164–165.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo (2014). Guía Técnica para la formulación de los POMCAS. Technical report.
- Modelamiento hidráulico fluvial con HEC-RAS y HEC-GeoRAS. Prevention Web, the knowledge platform for disaster risk reduction. Recuperado el 26-29 de noviembre de 2012 de: <https://www.preventionweb.net/events/view/29510?id=29510>
- Monsalve, G. et al. (1999). Hidrología en la ingeniería. Ed. Alfaomega. Bogotá. Colombia. (F, C, D).
- Musy, A. Higy, C. (2010). *Hydrology: A Science of Nature*. Taylor & Francis.
- OMM. CRED. UCL. Atlas de la mortalidad y las pérdidas económicas provocadas por fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos. Comunicado de prensa No 998. Recuperado el 11 de julio de 2014 de:
<https://public.wmo.int/es/media/press-release/ommcreducl-%E2%80%93-atlas-de-la-mortalidad-y-las-p%C3%A9rdidas-econ%C3%B3micas-provocadas-por>
- OMM. (2019). Diversos organismos destacan en un informe las crecientes señales y consecuencias del cambio climático en la atmósfera, la tierra y los océanos. Comunicado de prensa No 10032020. Recuperado de 10 de marzo de 2020 de:
<https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/diversos-organismos-destacan-en-un-informe-las-crecientes-se%C3%B1ales-y>
- Poff, N.L. (2018). ¿Más allá del régimen de flujo natural? Ampliación de la base hidroecológica para hacer frente a los desafíos de los caudales ambientales en un mundo no estacionario. *Freshw. Biol.* 63 (8), págs. 1011 – 1021.

- Sanders, B.F., 2007. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Adv. Water Resour.* 30 (8), 1831–1843.
- Schumm, S. (1963). Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74(9):1089.
- Singh, V. (1988). *Hydrologic Systems: Rainfall-runoff Modeling, Volume 1*, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, N.J.
- Torres, M. (2017). Modelación hidrológica para el estudio de inundación, en el departamento de Cundinamarca, del río Frío a la altura del Municipio de Chía (tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
Recuperado de:
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14636/1/Trabajo%20de%20grado%20final.pdf>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2019). UNGRD coordina la respuesta y atención de la emergencia ocasionada por la creciente súbita del río Apartadó en Antioquia. Boletín de prensa. Editorial UNGRD. Boletín No. 198. Recuperado el 29 de octubre de 2019 de:
<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/28271>
- USACE. (1991). HEC-2: water surface profiles, user's manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.
- US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Recuperado de:
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- World Meteorological Organization. (2014). Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes. Floods. Recuperado de:
<https://public.wmo.int/en/our-mandate/water/floods>

ANEXOS

ANEXO 1:

1. Cálculos para la Geomorfología de la cuenca hidrográfica río Apartadó subcuenca del río León

1.1 Longitud de la cuenca (Lb)

La longitud de la cuenca es igual a la distancia en línea recta (km) entre la desembocadura del cauce principal y el punto más lejano de la divisoria de la cuenca. (este es un criterio muy representativo de la cuenca).

Lb = 19,43 km

1.2 Ancho de la cuenca (Wc)

Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud de ésta. Se determina mediante ecuación (Horton, 1945. Strahler, 1957).

$$Wc = \frac{Ac}{Lc} (1)$$

$$Wc = \frac{96,19}{19,43} (1)$$

Wc = 4,95 km

1.3 Área de la cuenca (Ac)

Es el área de la proyección de la superficie del terreno en la cuenca. En este caso este dato es tomado de la herramienta QGIS.

Ac = 96,19 km²

1.4 Perímetro de la cuenca (P)

Longitud total de la divisoria de aguas, que conforma el contorno del área de la cuenca. Cuando se compara cuencas de la misma área, este parámetro es útil para diferenciar la forma de la cuenca. Este parámetro fue posible calcularlo con ayuda de QGIS.

P = 100,55 Km

1.5 Análisis de la forma de la Cuenca

1.5.1 Coeficiente de compacidad (Kc)

Relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo de igual área que la cuenca. Se calcula mediante ecuación (Horton, 1945).

$$Kc = 0,282 \frac{Pc}{\sqrt{Ac}}(2)$$

$$Kc = 0,282 \frac{100,55Km}{\sqrt{96,19km^2}}(2)$$

$$Kc = 2,891120685$$

El valor que da este parámetro se determina según el índice de Gravelius, y para ello se utilizan los valores de la **Tabla 1**.

Tabla 1. Índice de Gravelius (Coeficiente de Compacidad).

KC	Forma
1 – 1,25	Redonda – Oval redonda
1,25 – 1,5	Oval redonda – Oval oblonga
1,5 – 1,7	Oval oblonga – Rectangular oblonga
> 1.75	Rectangular

1.5.2 Coeficiente de forma (Kf)

Es uno de los parámetros que explica la elongación de una cuenca. Se expresa como la relación entre el área de la cuenca y la longitud de la misma. El parámetro está definido por la siguiente expresión:

$$Kf = \frac{Ac}{L_b^2}(3)$$

$$Kf = \frac{96,19km^2}{(19,43km)^2}(3)$$

$$Kf = 0,255$$

Tabla 2. Índice de Coeficiente de forma.

Kf	Forma
< 0.22	Muy alargada.
0.22 - 0.3	Alargada.
0.3 - 0.37	Ligeramente alargada.

0.37 - 0.45	ni alargada ni ensanchada.
0.45 - 0.6	Ligeramente ensanchada.
0.6 - 0.8	Ensanchada.
0.8 - 1.20	Muy ensanchada.
> 1.2	Rodeando el desagüe

1.6 Análisis del relieve de la cuenca

1.6.1 Pendiente media del cauce principal) y pendiente media de cuenca (J)

Pendiente media del cauce principal: diferencia de altura entre el punto de descarga de la cuenca y la cabecera del cauce principal, es decir cota máxima y mínima del cauce principal. Según datos proporcionados por el software QGIS, dividido sobre la longitud del cauce principal, mediante la fórmula:

$$S_c = \frac{H_2 - H_1}{L_m} * 100\% \quad (4_a)$$

$$S_c = \frac{\frac{(772-20)m}{34,074529Km} * 1Km}{1000m} * 100\% = 2,206927057\%$$

Pendiente media de la cuenca: brinda información de la velocidad de escorrentía. Las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones al aumentar los caudales.

$$J = 100 * \frac{\Sigma(L_i * E)}{A} \quad (4_b)$$

Este valor se obtuvo a partir de la modelación del terreno

$$J = 29.9764542146\%$$

Tabla 3. Tipo de Relieve según su Pendiente de Cuenca.

PENDIENTE (%)	Tipo de relieve
0-3	Plano
3-7	Suave
7-12	Mediano
12-35	Accidentado
35-50	Fuerte
50-75	Muy fuerte
>75	Escarpado

Por lo tanto, al encontrarse en los parámetros entre 12 a 35 % es considerado un tipo de relieve accidentado (Schumm, 1963).

1.6.2 Relieve de la cuenca (H_c)

Este parámetro nos evidencia la diferencia de elevación entre la cota más alta y la cota más baja de la cuenca.

$$H_c = R - r \quad (5)$$

$$H_c = 1106\text{m} - 20,1588\text{m}$$

$$H_c = 1085,841149\text{m}$$

1.6.3 Razón de relieve (R_h)

Relación entre el relieve de la cuenca y la longitud de la cuenca. Denota el grado de inclinación de la cuenca e indica la intensidad de los procesos de erosión que ocurren en las laderas (Schumm, 1963).

$$R_h = \frac{H_c}{L_b} \quad (6)$$

$$R_h = \frac{1.085,841148}{19,43}$$

$$R_h = 0,055878884$$

1.7 Análisis de la red de drenaje de la cuenca

1.7.1 Longitud total de los cauces (L_u), Densidad de drenaje de la cuenca (D_d):

La longitud total es un dato determinado a través del software QGIS:

$$\sum_{i=1}^n L_i = \text{Longitud total de los cauces} = L_u = 164,280646 \text{ Km}$$

La densidad de drenaje es un parámetro que indica la relación entre la longitud total de los cursos de agua irregulares y regulares de la cuenca y la superficie total de la misma. Valores mínimos de esta relación están asociados a regiones con materiales de suelo poco erosionables, baja cubierta de vegetación y pendientes planas. Mientras que, valores altos refieren a que las precipitaciones intervienen rápidamente sobre las descargas de los ríos (Horton, 1945). Generalmente, estas regiones tienen suelos impermeables y pendientes fuertes. Se expresa con la siguiente ecuación:

$$D_d = \frac{L_u}{Ac}(7)$$

$$D_d = 1,7078 \frac{Km}{Km^2}$$

Tabla 2. Índice de la densidad de drenaje.

D_d	Clasificación
< 1	Baja.
1 - 2	Moderada.
2 - 3	Alta.
> 3	Muy alta.

1.7.2 Densidad hidrográfica de la cuenca (F_u)

Se define como el número de corrientes por unidad de área. Y es directamente proporcional con la densidad de drenaje (Monsalve et al., 1999. Horton, 1945).

$$F_u = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{Ac} (8)$$

$$F_u = 1,51784409$$

Tabla 3. Índice de la densidad hidrográfica.

F_u	Clasificación
>3.5/km ²	Altos valores de cauces
<2.5/km ²	Valores bajos de cauces

Los valores bajos, <2.5/km², indican un mayor recorrido de la escorrentía para alcanzar un cauce (qué es el caso de la cuenca de estudio) .

1.7.3 Sinuosidad del cauce principal

La sinuosidad se define como la relación entre la longitud del valle y la longitud de la corriente. Se halla mediante ecuación (Schumm, 1963).

$$\underline{S} = \frac{L_{cauceppal}}{L_{valle}}(9)$$

$$\underline{S} = \frac{34,07}{24,934679}$$

$$\underline{S} = 1,366551$$

Al conocer este valor, se puede determinar el tipo de canal que posee la cuenca mediante la Tabla 2 (Schumm, 1963).

Tabla 4. Clasificación del canal de la cuenca por sinuosidad

Tipo de sinuosidad	Sinuosidad
Canal rectilíneo	1- 1,2
Canal transicional	1,2- 1,5
Canal regular	1,5- 1,7
Canal irregular	1,7-2,1
Canal tortuoso	> 2,1

Canal transicional ya que su sinuosidad esta entre 1,2- 1,5.

1.7.4 Relación de bifurcación (R_b).

Describe una relación existente a partir de la división entre el número de cauces de un orden dado y el número de cauces del orden superior, y luego hallamos un promedio de las sumas de las relaciones (Córdova, 2016).

$$R_b = \frac{n_w}{n_w+1} \quad (10)$$

$$R_{b1,2} = \frac{120}{21} = 5,714285714$$

$$R_{b2,3} = \frac{21}{4} = 5,25$$

$$R_{b3,4} = \frac{4}{1} = 4$$

$$R_{bprom} = \frac{R_{b1,2}+R_{b2,3}+R_{b3,4}}{3} = 5,654761905 \quad (11)$$

Tabla 5. Índice de Relación de Bifurcación.

R_b	Clasificación
< 3	las estructuras geológicas no presentan influencia en el patrón de drenaje.
3.0 - 5.0	valores bajos indican cuencas más planas. Valores altos indican cuencas montañosas.
> 5	Las estructuras geológicas determinan el patrón de drenaje.

1.7.5 Número de robustez (R_n).

Producto entre la razón del relieve y la densidad de los drenajes. Indica el grado de inclinación de las pendientes y lo escarpado que se encuentra el terreno (Botero, 2010. Musy, A. Higy, C. 2010. Schumm, 1963).

$$R_n = D_d \frac{R_h}{1000} \quad (12)$$

$$R_n = \frac{1,7078 * 55,878}{1000}$$

$$R_n = 0.095435165$$

1.7.6 Número de infiltración (I_f).

Producto entre la densidad de drenajes y la frecuencia de drenajes, representa un indicador del comportamiento de la permeabilidad, de los procesos de escorrentía y la infiltración potencial de la cuenca. Presenta una relación inversa con la erosionabilidad (Botero, 2010. Musy, A. Higy, C. 2010. Schumm, 1963).

$$I_f = D_d * F_u \quad (13)$$

$$I_f = 2,592315$$

1.7.7 Longitud del flujo terrestre (L_0), Razón de textura (T), constante de mantenimiento de canales (C), Razón de elongación (R_b), Razón de Circularidad (R_c)

- La longitud del flujo terrestre es un indicador de la cantidad de agua que se escurre sobre el suelo antes de concentrarse en los drenajes, y se asocia directamente con la forma del relieve y las condiciones de pendiente presentes en la cuenca.

$$L_0 = \frac{1}{2D_d} = 0,292758 \quad (14)$$

Al ser L_0 entre **0.2 - 0.3** es Moderado, lo cual indica un relieve medio, un recorrido medio de la escorrentía y media infiltración, implica entonces baja y algunas veces puntuales alta vulnerabilidad a crecidas.

- La razón de textura es la relación entre el total de drenajes sobre el perímetro de la cuenca. Indicador de factores naturales de la cuenca como la litología, el tipo de suelo y la infiltración de la cuenca.

$$T = \frac{N_u}{P} = 1,452013 \quad (15)$$

Puesto que se encuentra <4 es áspero.

- La constante de mantenimiento de canales indica el área de necesaria para mantener una unidad de longitud de cauce. Describe la erosionabilidad y la capacidad de controlar la transmisión de flujo de materiales de la cuenca.

$$C = \frac{1}{D_a} = 0,585516 \text{ (16)}$$

Es media por lo cual se asocian a permeabilidad intermedia, cobertura vegetal y tipos de roca media.

- La razón de elongación se asocia con la forma de la cuenca, y corresponde a la razón entre el diámetro de un círculo de la misma área de la cuenca con la longitud máxima de la cuenca.

$$R_e = 2 * \frac{\sqrt{A * \pi}}{l_b} = 1,789 \text{ (17)}$$

Es circular puesto que $R_e > 0.9$

- La razón de circularidad es la relación entre el área de la cuenca con el área de un círculo de perímetro igual al perímetro de la cuenca. Es un indicador relacionado con la etapa de desarrollo de la cuenca (Palacio, 2021).

$$R_c = \frac{4 * \pi * A}{P^2} = 0,119556 \text{ (18)}$$

Al encontrarse en valores bajos, se encuentra en un estado joven, congruente con la curva hipsométrica.