



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de la dinámica fluvial del río Guamal con el fin de valorar y proponer obras de mitigación de las inundaciones para el municipio de Guamal, departamento del Meta.

Julián Andrés Díaz Aguirre

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Departamento de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2024

Analysis of the fluvial dynamics of the Guamal river in order to evaluate and propose flood mitigation works for the municipality of Guamal, department of Meta

Julián Andrés Díaz Aguirre

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar por al título de:

Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

Phillipe Chang PhD.

Línea de Profundización:

Hidráulica fluvial

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Departamento de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2024

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Julián Andrés Díaz Aguirre

Fecha 19/01/2024

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo fue una experiencia gratificante y a la misma vez un reto en el que puse a prueba mis habilidades académicas y profesionales, pero también mi fortaleza emocional y en cierta medida física para sacarlo adelante.

Aun así, su desarrollo integral no hubiera sido posible sin el apoyo de las personas que me acompañaron en el transcurso de esta aventura. Es por esto que quiero extender un agradecimiento especial en primer lugar a mi director, Philippe Chang PhD, por su total colaboración y disposición en todo momento para orientarme durante la ejecución del proyecto, brindándome una guía permanente para la correcta elaboración de mi tesis.

A mi padre, a mi madre y a mi compañera incondicional, por impulsarme a creer en mí y acompañarme en los instantes de desanimo brindándome palabras de apoyo y alentándome en todo momento. Este logro también es de ustedes.

Resumen

El río Guamal hace parte de los afluentes más importantes de la región del departamento del Meta. Su gran potencial hídrico ha sido una fuente de desarrollo clave para las poblaciones que se encuentran asentadas en sus riberas. Sin embargo, históricamente ha representado una amenaza significativa para los habitantes de la zona debido a su tendencia a desbordarse y a producir inundaciones fluviales. Con el objetivo de proponer y evaluar diferentes soluciones que permitan contrarrestar las inundaciones producidas sobre un sector específico localizado en las proximidades del casco urbano del municipio de Guamal, en el desarrollo del presente documento se exponen los resultados de un estudio detallado del comportamiento hidráulico de la corriente del río Guamal, el cual se ha enfocado en la estimación de sus parámetros geomorfológicos, hidrológicos y fluviales y en la evaluación de sus condiciones hidrodinámicas a través del modelo hidráulico bidimensional IBER. A partir de los resultados obtenidos ha sido posible vincular los desbordamientos producidos con la configuración de cauce trenzado del río y la carga alta de sedimentos transportados y depositados en el fondo y se ha podido evidenciar la situación problema de manera práctica en el modelo IBER. Así mismo, se ha desarrollado un análisis multicriterio de las diferentes alternativas existentes para contrarrestar la amenaza de inundación y se han evaluado en el modelo las más adecuadas para contrarrestar el problema. Con base en el análisis de resultados globales, se ha establecido la construcción de un dique longitudinal en material artificial como la mejor alternativa para mitigar las inundaciones producidas en la zona de estudio.

Palabras clave: Cauce, inundación, cuenca, trenzado, IBER, obras de mitigación.

Abstract

Guamal River is one of the most important tributaries in the region of Meta department. Its huge hydric potential has been a development source for the settlements along its banks. Nevertheless, historically it has represented a significant threat to the residents of the area due to its propensity to overflow and cause river flooding. Aiming to propose and evaluate possible solutions to avoid floods produced in a specific sector located near to the urban center of the municipality of Guamal. This document presents the results of a detailed study of the hydraulic behavior of the Guamal River, the above-mention report has been focused on the estimation of its geomorphological, hydrological and fluvial parameters and the assessment of hydrodynamic conditions by applying the bi-dimensional hydraulic model IBER. Based on the obtained results it has been possible to link the overflows with the braided channel pattern of the river and the high sediment load transported and deposited in the river bottom, besides it has been possible to identify the problem situation in a practical way on the IBER model. In addition, a multi-criteria analysis has been developed for the different available alternatives to counteract the flood hazard, The most appropriate ones to counteract the issue have been evaluated in the model. According to the analysis of overall results the construction of an artificial material longitudinal dike is the best alternative to mitigate flooding in the study area.

Keywords: Riverbed, flood, basin, braided, IBER, mitigation works.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Abstract	VI
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1 Localización	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Metodología	4
1.5 Conclusión	6
2. Estado del Arte	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Clasificación de los cauces	8
2.2.1 Clasificación según su edad	9
2.2.2 Clasificación según su patrón de drenaje	10
2.2.3 Clasificación de acuerdo a su trazado en planta.....	11
2.2.4 Clasificación con base en su libertad para ajustar su forma y pendiente	13
2.2.5 Clasificación según Rust.....	16
2.2.6 Descripción Culbertson.....	16
2.3 Caracterización geomorfológica y pluviométrica.....	18
2.3.1 Parámetros de forma	18
2.3.2 Parámetros de red de drenaje	20
2.3.3 Parámetros de relieve.....	22
2.3.4 Precipitaciones y caudales	25
2.4 Control de inundaciones.....	29
2.4.1 Tipos de medidas estructurales	29
2.4.2 Comparación de alternativas	33
2.5 Modelación hidráulica de ríos.....	37
2.5.1 Modelo IBER	38
2.6 Conclusión	44
3. Caracterización y Resultados	46
3.1 Introducción.....	46

3.2	Contexto histórico río Guamal.....	47
3.2.1	Identificación multitemporal de orillas	47
3.2.2	Eventos antecedentes.....	49
3.2.3	Obras ejecutadas	55
3.3	Caracterización geomorfológica.....	56
3.3.1	Corriente hídrica.....	57
3.3.2	Delimitación cuenca hidrográfica.....	57
3.3.3	Parámetros de forma.....	59
3.3.4	Parámetros de red de drenaje	60
3.3.5	Parámetros de relieve	61
3.3.6	Resumen parámetros.....	65
3.4	Caracterización pluviométrica	65
3.4.1	Precipitaciones	68
3.4.2	Caudales.....	71
3.5	Resultados plan de simulación.....	78
3.5.1	Dominio.....	78
3.5.2	Geometría de mallado.....	79
3.5.3	Modelo de elevación digital	80
3.5.4	Rugosidades del suelo	80
3.5.5	Condiciones de contorno.....	82
3.5.6	Calibración	82
3.5.7	Zona de calibración	83
3.5.8	Geometría de mallado y modelo de elevación digital.....	83
3.5.9	Rugosidades del suelo	84
3.5.10	Condiciones de contorno.....	85
3.5.11	Escenarios de simulación.....	85
3.6	Resultados modelación hidráulica.....	86
3.6.1	Calibración	86
3.6.2	Escenario I	89
3.6.3	Escenario II	90
3.6.4	Escenario III	92
3.6.5	Escenario IV.....	95
3.6.6	Escenario V.....	99
3.7	Resultados clasificación del cauce.....	103
3.7.1	Clasificación según su edad.....	104
3.7.2	Clasificación según su patrón de drenaje	104
3.7.3	Clasificación de acuerdo a su trazado en planta.....	105
3.7.4	Clasificación con base en su libertad para ajustar su forma y pendiente	105
3.7.5	Clasificación según Rust	106
3.8	Conclusión.....	106
4.	Análisis y Discusión	108
4.1	Introducción	108
4.2	Análisis	108
4.1	Discusión	115
5.	Conclusión	122
	Referencias Bibliográficas	127

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Localización general zona de estudio.	1
Figura 1-2: Localización específica zona de estudio.	2
Figura 2-1: Patrones de drenaje típicos de las zonas montañosas.	10
Figura 2-2: Esquema cauce recto.	11
Figura 2-3: Esquema cauce meándrico.	12
Figura 2-4: Esquema cauce trezado.	13
Figura 2-5: Relación entre carga de fondo y pendiente en ensayo de laboratorio	14
Figura 2-6: Clasificación de cauces según tipo de carga de sedimentos.	15
Figura 2-7: Clasificación de cauces aluviales de Rust.	16
Figura 2-8: Curvas hipsométricas en función del ciclo de erosión.	23
Figura 2-9: Esquema sección transversal dique natural.	30
Figura 2-10: Esquema sección transversal dique longitudinal.	30
Figura 2-11: Configuración típica de gaviones.	31
Figura 2-12: Estructura geo contenedores.	31
Figura 2-13: Esquema funcionamiento canal de alivio y desvió temporal.	32
Figura 3-1: Vista aérea año 1969 y año 1985.	47
Figura 3-2: Vista aérea año 2002 y año 2010.	47
Figura 3-3: Vista aérea año 2015 y año 2021.	48
Figura 3-4: Identificación multitemporal de orillas.	48
Figura 3-5: Número de eventos antecedentes de inundación – DESINVENTAR.	52
Figura 3-6: Número de eventos de antecedentes de inundación – Otros medios.	54
Figura 3-7: Número de eventos antecedentes de inundación – Total registrado.	54
Figura 3-8: Localización obras ejecutadas.	56
Figura 3-9: Delimitación cuenca hidrográfica río Guamal.	57
Figura 3-10: Vista tridimensional cuenca río Guamal.	58
Figura 3-11: Longitud axial cuenca río Guamal.	59
Figura 3-12: Red de drenaje cuenca río Guamal.	60
Figura 3-13: Elevaciones en la cuenca del río Guamal.	61
Figura 3-14: Pendientes en la cuenca del río Guamal.	62
Figura 3-15: Curva hipsométrica cuenca.	62
Figura 3-16: Tipos del suelo en la cuenca del río Guamal.	64

Figura 3-17:	Localización estaciones pluviométricas.	66
Figura 3-18:	Influencia estaciones pluviométricas sobre cuenca del río Guamal.	67
Figura 3-19:	Precipitaciones medias mensuales a nivel multianual.	69
Figura 3-20:	Precipitaciones medias máximas en 24 h mensuales a nivel multianual.	70
Figura 3-21:	Localización estación hidrológica.	71
Figura 3-22:	Delimitación cuenca hidrográfica punto estación hidrológica.	73
Figura 3-23:	Histograma de caudales medios mensuales a nivel multianual.	74
Figura 3-24:	Histograma de caudales medios, mínimos y máximos históricos.	75
Figura 3-25:	Ajuste caudales máximos.	76
Figura 3-26:	Zona de evaluación.	78
Figura 3-27:	Geometría de mallado modelo hidráulico.	79
Figura 3-28:	Modelo digital de elevación zona de evaluación.	80
Figura 3-29:	Asignación de rugosidades del suelo.	81
Figura 3-30:	Elementos asignados con condición de contorno de entrada y salida del dominio.	82
Figura 3-31:	Zona de calibración.	83
Figura 3-32:	Geometría y modelo de elevación digital de calibración.	84
Figura 3-33:	Asignación de rugosidades del suelo calibración.	84
Figura 3-34:	Profundidades hidráulicas zona de calibración.	87
Figura 3-35:	Corte sección localización Estación Altos de Corozal para $Q=284.50 \text{ m}^3/\text{s}$	87
Figura 3-36:	Profundidades de flujo zona calibración con variación en "n".	88
Figura 3-37:	Profundidades de flujo Escenario I.	89
Figura 3-38:	Profundidades de flujo Escenario II.	90
Figura 3-39:	Cortes transversales.	91
Figura 3-40:	Sección transversal C1 – Escenario II.	91
Figura 3-41:	Sección transversal C2 – Escenario II.	92
Figura 3-42:	Sección transversal C3 – Escenario II.	92
Figura 3-43:	Sección transversal C4 – Escenario II.	92
Figura 3-44:	Profundidades de flujo Escenario III.	93
Figura 3-45:	Sección transversal C1 – Escenario III.	94
Figura 3-46:	Sección transversal C2 – Escenario III.	94
Figura 3-47:	Sección transversal C3 – Escenario III.	94
Figura 3-48:	Sección transversal C4 – Escenario III.	94
Figura 3-49:	Alineamiento central dique proyectado.	95
Figura 3-50:	Dimensiones geo sintético relleno y sección transversal dique.	96
Figura 3-51:	Inclusión dique longitudinal en modelo hidráulico.	96
Figura 3-52:	Profundidades de flujo Escenario IV.	97
Figura 3-53:	Sección transversal C1 – Escenario IV.	98
Figura 3-54:	Sección transversal C2 – Escenario IV.	98
Figura 3-55:	Sección transversal C3 – Escenario IV.	98
Figura 3-56:	Sección transversal C4 – Escenario IV.	98
Figura 3-57:	Zonas modificadas con el dragado.	99
Figura 3-58:	Modificación superficie para dragado.	100

Figura 3-59:	Profundidades de flujo Escenario V.	101
Figura 3-60:	Sección transversal C1 – Escenario V.	102
Figura 3-61:	Sección transversal C2 – Escenario V.	102
Figura 3-62:	Sección transversal C3 – Escenario V.	102
Figura 3-63:	Sección transversal C4 – Escenario V.	102
Figura 3-64:	Vista área cauce río Guamal (1/3).	103
Figura 3-65:	Vista área cauce río Guamal (2/3).	103
Figura 3-66:	Vista área cauce río Guamal (3/3).	104
Figura 3-67:	Clasificación geológica cauce zona de estudio.	105

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1:	Fuentes eventos antecedentes de inundaciones fluviales del río Guamal.... 4
Tabla 1-2:	Información base. 5
Tabla 1-3:	Obras hidráulicas de mitigación contra la inundación..... 6
Tabla 1-4:	Insumos modelación hidráulica. 6
Tabla 2-1:	Relación radio – ancho en un meandro..... 12
Tabla 2-2:	Clasificación de cauces aluviales según Schumm (1977). 15
Tabla 2-3:	Clasificación de cauces aluviales de Rust..... 16
Tabla 2-4:	Clasificación general de cauces..... 17
Tabla 2-5:	Clasificación de cuencas de acuerdo con su índice de Gravelius. 19
Tabla 2-6:	Clasificación de cuencas de acuerdo con su factor de forma..... 20
Tabla 2-7:	Clasificación de cuencas de acuerdo con su densidad de drenaje..... 21
Tabla 2-8:	Clasificación de cuencas de acuerdo con su pendiente media. 22
Tabla 2-9:	Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua. 27
Tabla 2-10:	Alternativas de mitigación de la inundación. 30
Tabla 2-11:	Cuadro comparativo alternativas de mitigación de la inundación..... 33
Tabla 2-12:	Coeficientes de rugosidad de Manning..... 43
Tabla 2-13:	Condiciones de contorno implementadas en los contornos. 44
Tabla 3-1:	Eventos antecedentes de inundación – DESINVENTAR. 50
Tabla 3-2:	Eventos antecedentes – Otros medios de información. 52
Tabla 3-3:	Eventos de inundación por meses. 55
Tabla 3-4:	Obras ejecutadas históricamente..... 55
Tabla 3-5:	Localización obras coordinadas planas. 56
Tabla 3-6:	Coordenadas geográficas río Guamal..... 57
Tabla 3-7:	Parámetros base de forma..... 59
Tabla 3-8:	Parámetros base red de drenaje..... 60
Tabla 3-9:	Tiempos de concentración. 63
Tabla 3-10:	Tiempos de concentración seleccionados. 63
Tabla 3-11:	Tipos del suelo cuenca del río Guamal..... 64
Tabla 3-12:	Parámetros de caracterización geomorfológica de la cuenca y del río Guamal. 65
Tabla 3-13:	Localización estaciones pluviométricas 66

Tabla 3-14:	Influencia estaciones pluviométricas cuenca del río Guamal.	66
Tabla 3-15:	Características estaciones pluviométricas.	67
Tabla 3-16:	Precipitación media mensual a nivel multianual (mm).....	68
Tabla 3-17:	Precipitación media máxima en 24 h mensual a nivel multianual (mm)..	70
Tabla 3-18:	Características estación hidrológica.	72
Tabla 3-19:	Caudales medios, mínimos y máximos mensuales en la E. Alto Corozal	72
Tabla 3-20:	Caudales medios, mínimos, y máximos anuales en la Estación Alto Corozal.	72
Tabla 3-21:	Caudales medios, mínimos y máximos mensuales en la zona de estudio. 74	74
Tabla 3-22:	Caudales medios, mínimos, y máximos anuales en la zona de estudio.	75
Tabla 3-23:	Criterios de ajuste.....	77
Tabla 3-24:	Proyección de caudales para diferentes periodos de retorno.....	77
Tabla 3-25:	Caudales y niveles máximos registrados por la Estación Alto Corozal...	85
Tabla 3-26:	Escenarios de simulación hidráulica.	85

1. Introducción

1.1 Localización

En el departamento del Meta (Colombia) se pueden encontrar varios ejemplos de poblaciones asentadas en cercanías de los ríos, los cuales de manera conjunta hacen parte de la cuenca hidrográfica del río Orinoco que bordea al país en su costado oriental en sentido Sur – Norte y sirve como frontera con Venezuela.

El río Guamal, es uno de los grandes afluentes de la cuenca del río Orinoco. Presenta su nacimiento en la cordillera oriental de Colombia y hace parte del conjunto de ríos que se desprenden del Piedemonte Llanero. A lo largo de su recorrido, su cauce atraviesa los municipios de Acacias, Guamal, Castilla la Nueva y San Carlos de Guaroa hasta llegar a su desembocadura sobre el río Metica como se puede observar en la **Figura 1-1** y en la **Figura 1-2**.

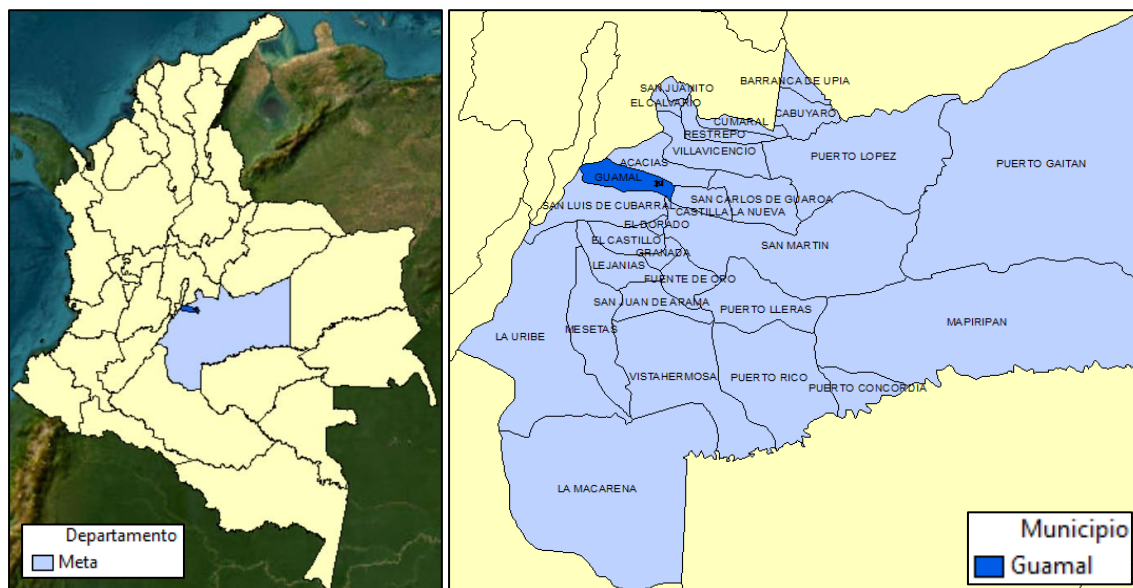


Figura 1-1: Localización general zona de estudio.

Fuente: Google Earth – IGAC.

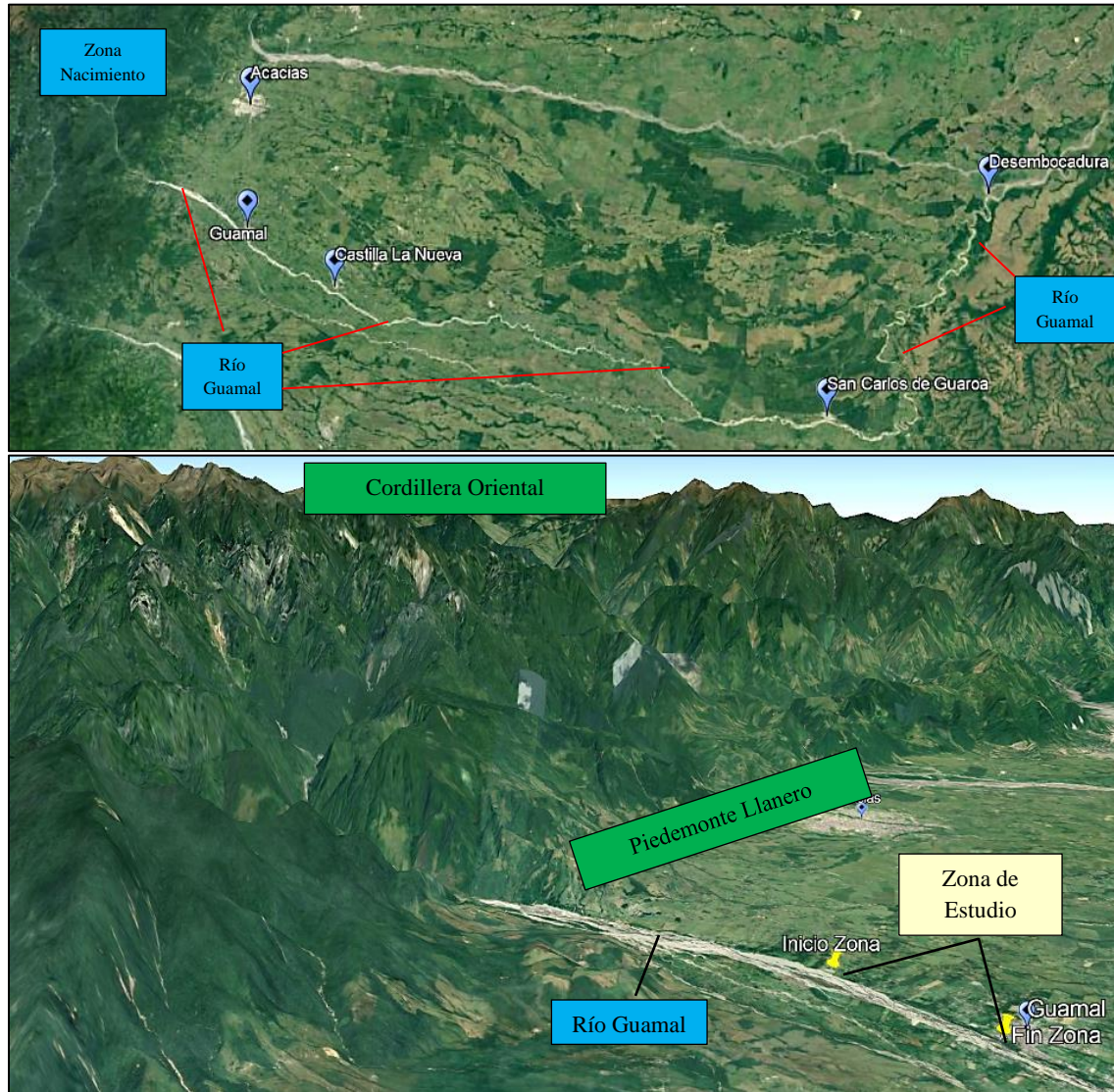


Figura 1-2: Localización específica zona de estudio.

Fuente: Google Earth.

1.2 Descripción del problema

Cuando se presentan fuertes períodos invernales en el departamento, se producen desbordamientos de los principales ríos en los diferentes municipios metenses, causando inundaciones fluviales en las zonas aledañas. El río Guamal, considerado uno de los ríos más grandes y caudalosos del departamento, hace parte de los cauces que al desbordarse han ocasionado graves problemas a los habitantes del casco urbano del municipio de Guamal localizado sobre su margen izquierda y de algunas veredas y centros poblados del municipio de Castilla la Nueva, por donde transita su corriente principal.

Este río, como muchos otros de la región llanera, tiene un comportamiento peculiar, ya que no cuenta con un cauce definido, por el contrario, se presenta una multiplicidad de cauces por los cuales transitan corrientes de agua. Adicionalmente, a lo largo de su recorrido se puede evidenciar un alto transporte de sedimentos. Según Varón Gutiérrez & Cuervo (2019), este tipo de cauces provenientes del piedemonte llanero debido a sus “*características sedimentológicas, hidrológicas e hidráulicas, generan cauces trenzados con múltiples canales que varían en número y dimensión en un lecho mayor, dependiendo de las condiciones climáticas de la región*” a las que se encuentren expuestos. El presente proyecto se realiza con el fin de plantear una solución estable a los problemas asociados a las inundaciones fluviales producto del desbordamiento de la corriente del río Guamal. Para esto, se busca realizar un análisis de las características principales del cauce y realizar una evaluación de su comportamiento a partir de una modelación hidráulica sobre la zona de estudio delimitada en la **Figura 1-2**. Siendo así, se plantean los siguientes objetivos requeridos para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Analizar la hidráulica del río Guamal a la altura de la cabecera municipal de Guamal, en el departamento del Meta para proponer obras de mitigación de las inundaciones.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar las causas y consecuencias de los eventos recientes de inundaciones que han ocurrido en el municipio de Guamal, Meta debido al desbordamiento del río Guamal.
- Caracterizar hidrológica y geomorfológicamente las condiciones de la cuenca y la hidráulica fluvial del río Guamal.
- Evaluar las obras hidráulicas de mitigación de inundaciones existentes en la zona de estudio.
- Estudiar las diferentes obras hidráulicas que permitan mitigar las afectaciones por inundación a las poblaciones ribereñas.

- Evaluar mediante modelación hidráulica un tramo específico del río Guamal con el fin de evidenciar las condiciones hidráulicas generadas, considerando varios escenarios de caudal y obras de mitigación de la inundación.

1.4 Metodología

Se ha dividido la ejecución del proyecto en cuatro (4) fases principales encaminadas al desarrollo de los objetivos planteados.

I. Recolección de información y antecedentes

Inicialmente se indagó acerca de los eventos de inundaciones fluviales a los que se han visto expuestos los habitantes del municipio de Guamal como producto de los desbordamientos del río, es decir, se recolectó y recopiló la información existente en donde se evidencian las situaciones de emergencia, con sus respectivas consecuencias y pérdidas producidas para la comunidad del municipio. Para lograr esto, el autor se apoyó en las dos fuentes de información presentadas en la **Tabla 1-1** en las que se asocian este tipo de eventos antecedentes.

Tabla 1-1: Fuentes eventos antecedentes de inundaciones fluviales del río Guamal.

Tipo de Fuente	Fuente
Bases de datos	DESINVENTAR
Televisión, radio, periódicos.	Caracol Noticias, W Radio, El Tiempo, Periódico del Meta, El Espectador, otros periódicos

Fuente: Autor.

II. Análisis de las características de la cuenca y el río Guamal

En esta fase se efectuó un análisis de la dinámica fluvial, las condiciones geomorfológicas y las condiciones pluviométricas de la cuenca e hidrológicas del río Guamal con base en el procesamiento de la información desarrollado en hojas de cálculo y el software de tipo GIS-ArcGIS. Para esto el autor se apoyó en los tipos de información plasmados en la **Tabla 1-2** donde se presenta un resumen de la información base usada para realizar las diferentes caracterizaciones de la cuenca del río Guamal.

Tabla 1-2: Información base.

Tipo de Información	Descripción	Fuente	Fin
Climatológica	Estaciones pluviométricas: Acacias [35010020], Caño Hondo [35010040], Guamal [35010070], Manzanares [35020030], Primavera [35020340], Puerto Angosturas [32060100]	IDEAM	Efectuar caracterización climatológica, específicamente pluviométrica de la cuenca del río Guamal
Hidrológica	Estación hidrométrica Alto Corozal [35017030]	IDEAM	Obtener caudales del río Guamal
Cartográfica	Capas de drenajes sencillos y drenajes dobles tipo shapefile escala 1:25000 y 1:100000	IGAC	Reconocer los cursos hídricos para acompañar la delimitación de la cuenca del río Guamal
	Capas de uso y cobertura del suelo tipo shapefile	IGAC	Caracterizar el uso del suelo de la cuenca del río Guamal
Topográfica	Archivos MDE de resolución 4.77 x 4.77	LAND VIEWER	Caracterizar geomorfológicamente la cuenca del río Guamal y el río Guamal
Cartográfica	Imágenes satelitales	GOOGLE EARTH	Evidenciar cambios en la corriente del río Guamal con el paso de los años.

Fuente: Autor.

III. Conocimiento de tipos de obras hidráulicas de mitigación del riesgo de inundación y obras existentes

Para plantear una solución al problema de la inundación sobre las orillas del cauce, se realizó una investigación y un filtro entre las medidas existentes de carácter hidráulico a las que se puede recurrir actualmente. Las opciones elegidas se integraron a la modelación hidráulica con el fin de corroborar su funcionalidad frente al evento de inundación simulado y escoger la más adecuada acorde a las condiciones in situ del proyecto y los resultados de los análisis desarrollados. De igual manera, dentro de esta fase se efectuó una recolección de la información disponible de las medidas en contra de la inundación que se han ejecutado a lo largo de la corriente del río Guamal. Para esto, el autor se basó en la búsqueda de información bibliográfica presentada en el siguiente capítulo y en la recopilación de la información publicada en las páginas de contratación estatal como se observa en la **Tabla 1-3**.

Tabla 1-3: Obras hidráulicas de mitigación contra la inundación.

Fuente base	Objetivo
Estado del arte	Investigación cualitativa/descriptiva de obras hidráulicas de mitigación contra el riesgo de inundación usadas hoy día para posterior propuesta de uso en la corriente del río Guamal
Contratación estatal	Recopilación medidas desarrolladas al día de hoy contra la inundación existentes a lo largo de la corriente del río Guamal

Fuente: Autor.

IV. Modelación hidráulica de la corriente del río Guamal

Para llevar a cabo el desarrollo de la modelación hidráulica del cauce se usó el modelo hidráulico bidimensional IBER. Se eligió IBER como software de simulación por encima de otros softwares conocidos como HEC RAS y FLOW 2D teniendo en cuenta la gran acogida en la modelación de zonas de inundabilidad que ha tenido este (Ortega & Rebolledo, 2020) y el hecho de que sea un software de uso libre y gratuito. La modelación hidráulica se generó con base en un levantamiento topográfico realizado sobre la corriente del río Guamal por un colaborador del autor que dono el levantamiento y una fotografía área de alta resolución tomada a finales del año 2022 para la zona de estudio. Los insumos requeridos, junto con el uso dado y la fuente base de información se exponen en la **Tabla 1-4**.

Tabla 1-4: Insumos modelación hidráulica.

Insumo	Uso	Fuente
Curvas de nivel	Generación de superficie del cauce en la zona de estudio.	Levantamiento topográfico realizado por colaborador.
Tipos del suelo	Asignación de rugosidades en función de los tipos de suelo evidenciados en la zona de estudio.	Fotografía aérea de alta resolución desarrollada por colaborador.
Condiciones de frontera	Caudales de simulación para la zona de estudio.	IDEAM

Fuente: Autor.

1.5 Conclusión

Mediante este capítulo introductorio, fue posible presentar la problemática con la que conviven las poblaciones asentadas en las riberas de los ríos que se desprenden del piedemonte llanero, tomando como caso de estudio una zona específica del río Guamal. Siguiendo la metodología planteada se pretende analizar el conjunto de las características geomorfológicas, hidrológicas e hidráulicas de la corriente del río, con el fin de entender la

relación existente entre estas características y la generación de las inundaciones fluviales y así mismo, a partir de los diferentes análisis realizados presentar la alternativa más adecuada para contrarrestar la problemática generada en la zona de estudio.

Así es como en los siguientes capítulos se guiará al lector a través de la revisión de la literatura necesaria para entender los conceptos básicos del desarrollo del proyecto, la cual ha sido plasmada en el segundo capítulo por medio de un estado del arte. Posteriormente en el tercer capítulo se exponen los resultados asociados a la caracterización del cauce y a la modelación hidráulica de la corriente de estudio ante diferentes escenarios de simulación. Seguido de estos resultados, en el cuarto capítulo se presenta un análisis y discusión de los resultados obtenidos, junto con la elección de la alternativa más adecuada para la mitigación de las inundaciones en la zona de estudio. Finalmente, se presenta una visión global acerca del desarrollo del proyecto y de los aspectos más relevantes a tener en cuenta a través de un capítulo de conclusión final.

2. Estado del Arte

2.1 Introducción

El presente capítulo representa la parte conceptual y teórica considerada necesaria para la correcta ejecución de los objetivos del proyecto. Así, se presentan los conceptos requeridos para el análisis de las condiciones hidrodinámicas de un cauce a través de su caracterización y la posterior proyección de obras de mitigación contra la inundación. Teniendo en cuenta que las inundaciones fluviales surgen del aumento de los niveles de un cauce como consecuencia de una creciente y que la recurrencia de las crecidas e inundaciones fluviales se encuentra ligada a las características geomorfológicas y al régimen pluviométrico que se presente en la zona (Ferrando, 2006) se presenta el siguiente desarrollo teórico. Inicialmente se presentarán las clasificaciones de los tipos de cauces existentes según diferentes investigadores, luego se expondrán los parámetros más comunes en una caracterización geomorfológica y pluviométrica de una cuenca y su cauce, posteriormente se expondrán las ventajas y desventajas de las diferentes medidas de control de la inundación fluvial usadas actualmente y finalmente se detallarán los componentes principales del modelo hidráulico seleccionado para evaluar las condiciones hidrodinámicas de un cauce.

2.2 Clasificación de los cauces

La clasificación de los cauces ha sido estudiada por diversos autores. Muchos investigadores reconocen tres clases principales de cauces: rectos, meándricos y trenzados (L. Leopold & Wolman, 1957). Otros autores han realizado clasificaciones con base en los patrones del cauce y la manera de asociarse entre ellos (Culbertson et al., 1967). De igual manera, se ha encontrado que la clasificación presentada por Schumm (1977), (aluviales y rocosos) es una de las más usadas para clasificar los cauces con base en su libertad para ajustar su forma y

su pendiente motriz. Teniendo en cuenta que con un correcto análisis de los diferentes tipos de clasificaciones se pueden comprender las causas y consecuencias de problemas asociados con las inundaciones fluviales en función del tipo de cauce y de sus parámetros - geomorfológicos, dicho factor toma relevancia a la hora de realizar la caracterización de un cauce específico para la proyección de obras de mitigación del riesgo de inundación. Así, se presentan de manera descriptiva las clasificaciones propuestas por diferentes autores, entre las que destacan: Clasificación de los cauces de acuerdo a su edad (Gracia & Maza, 1997), clasificación de los cauces de acuerdo a su patrón de drenaje (Howard, 1967), clasificación de los cauces de acuerdo a su configuración en planta (L. Leopold & Wolman, 1957), clasificación de los cauces con base en la libertad para ajustar su forma y su pendiente motriz (Schumm, 1977) y la clasificación de cauces aluviales de Rust (1978).

2.2.1 Clasificación según su edad

Esta clasificación permite clasificar un cauce en función de sus características geológicas a lo largo del desarrollo de su corriente (Gracia & Maza, 1997).

- **Cauces jóvenes:** Pueden encontrarse en las zonas montañosas, donde se cuenta con altos valores de pendientes y un recorrido compuesto por varias caídas en la elevación de su terreno. Los procesos erosivos en este tipo de cauces son más recurrentes en el lecho.
- **Cauces maduros:** Se generan en las zonas del río con valles amplios y valores de pendientes bajas sin caídas ni cambios bruscos. Los procesos erosivos son desplazados a sus márgenes.
- **Cauces viejos:** Se encuentran en valles mucho más amplios con planicies de 15 – 20 veces el ancho de los meandros, pendientes muy bajas y suelen ser los más propensos al desarrollo de procesos de sedimentación en el fondo y erosión en las orillas, lo que conlleva la formación de diques naturales longitudinales y zonas pantanosas a los lados. (Gracia & Maza, 1997).

2.2.2 Clasificación según su patrón de drenaje

Los patrones de drenaje son una manera de clasificar los sistemas de drenaje a nivel general, con base en las formas de sus efluentes y afluentes. Los patrones se encuentran asociados principalmente a las características geológicas e hidrológicas de la zona, ya que estas son las que definen el tipo de patrón que se desarrollará en la red fluvial conforme a las características mencionadas. El patrón de la red indica la configuración de un río o un sistema de drenaje como si este fuera fotografiado desde un avión (L. B. Leopold et al., 1992). Howard, (1967) presentó el método de clasificación, para clasificar los sistemas de drenaje en función de su patrón de drenaje entre alguno de los grupos que se presentan en la **Figura 2-1**.

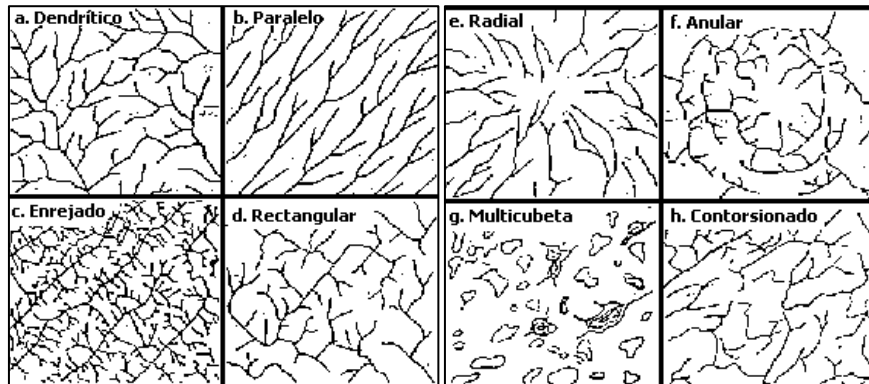


Figura 2-1: Patrones de drenaje típicos de las zonas montañosas.

Fuente: (Howard, 1967).

Rodríguez, (2010) los describe de la siguiente manera:

- **Dendrítico:** Corrientes de agua cortas e irregulares, con movimiento en todas las direcciones y desemboque en un cauce principal con ángulos de entrega variados.
- **Paralelo:** Corrientes paralelas entre sí.
- **Enrejado:** Corrientes de agua con tributarios secundarios casi perpendiculares a los tributarios primarios y paralelos al cauce principal.
- **Rectangular:** Corrientes de agua con tributarios secundarios con ángulos variados y tributarios primarios perpendiculares al cauce principal.

- **Radial:** Corrientes de agua que fluyen a partir de un punto central y se desprenden de manera análoga a un cono volcánico en su parte superior.
- **Anular:** Corrientes de agua que fluyen a partir de un punto central y se desprenden de manera análoga a un cono volcánico en su zona media.
- **Multicubeta:** Sistema de drenaje irregular asociado a llanuras de inundación.
- **Contorsionado:** Sistema de drenaje irregular modificado por la acción de una cuenca sobre otra.

2.2.3 Clasificación de acuerdo a su trazado en planta

La clasificación de los cauces de acuerdo a su trazado ha sido estudiada por diversos autores que los han agrupado entre los siguientes tres grupos:

- **Cauces rectos:** Son poco frecuentes, ya que pueden llegar a desarrollarse, pero únicamente en tramos muy cortos. Como se puede observar en la **Figura 2-2**, los cauces rectos presentan procesos de sedimentación con depósitos de material arrastrado sobre las orillas y procesos erosivos en el trayecto de las partes más profundas que lo conforman (pozos).

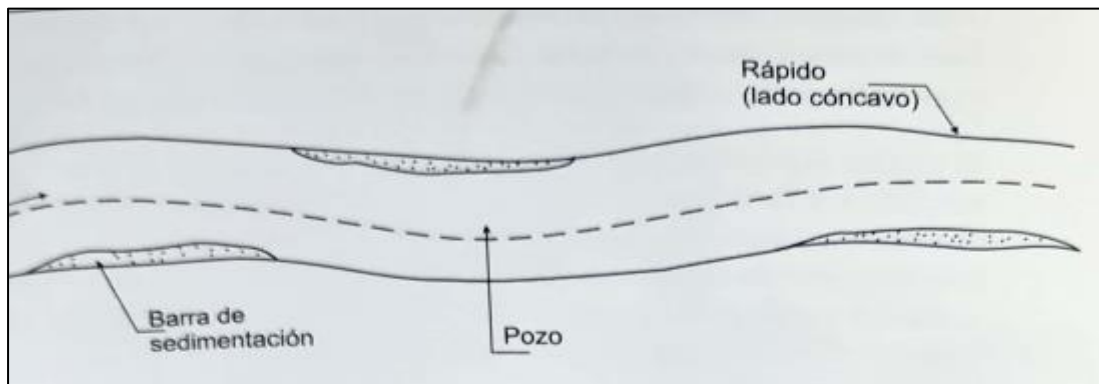


Figura 2-2: Esquema cauce recto.

Fuente: (Rodríguez, 2010).

Como su nombre lo dice, al ser recto, la sinuosidad de los cauces de este tipo es baja, presentando un valor inferior a 1.2 (Schumm, 1963). La sinuosidad de un cauce puede ser cuantificada con ayuda de la siguiente ecuación propuesta por L. Leopold & Wolman (1957).

$$S = \frac{L_t}{L_v} \quad (2-1)$$

Donde

S = Factor de sinuosidad.

L_t = Longitud del cauce principal (m).

L_v = Longitud en línea recta del valle (m).

- **Cauces meándricos:** Son tal vez el tipo de cauces más frecuentes en la naturaleza, se encuentran conformados por una serie de curvas o como su propio nombre lo dice, meandros de manera alterna. Se clasifica un cauce como meándrico, cuando la sinuosidad presenta un valor superior a 1.5. La forma del trazado generado puede ser evidenciada en la curvatura del cauce expuesto en la **Figura 2-3**.

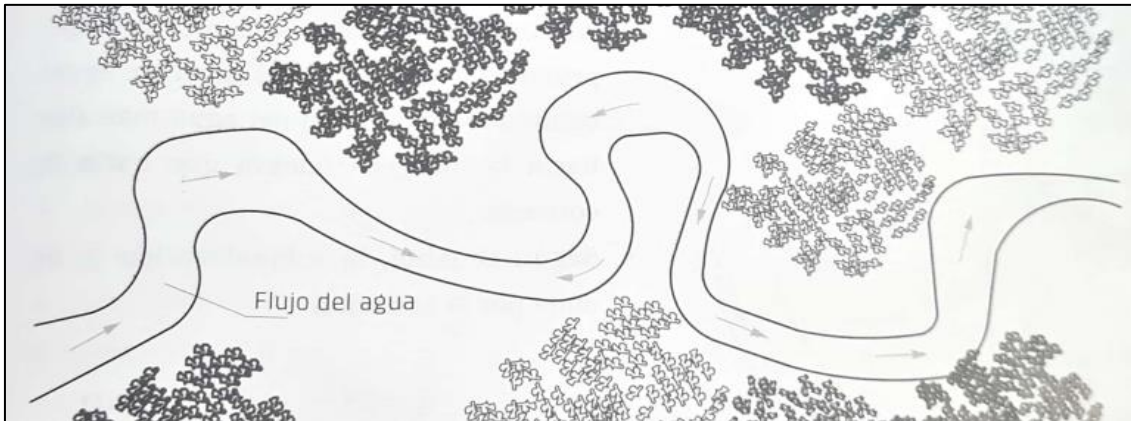


Figura 2-3: Esquema cauce meándrico.

Fuente: (Fracassi, 2019).

Generalmente, en este tipo de cauces los procesos erosivos se presentan en la parte cóncava de la curva, lo que genera la sedimentación del material erosionado en la curva siguiente aguas abajo en su parte convexa, desarrollando el comportamiento meándrico a lo largo del cauce. Richardson et al.(1974) clasificaron las curvas de los cauces naturales acorde a la relación del radio de curvatura “r” y el ancho de la superficie sin agua (B) presentada en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1: Relación radio – ancho en un meandro.

Tipos de curvas	r/B
Limitadas	7 -8
Libres	4.5 - 5
Forzadas	2.5 - 3.5

Fuente: (Richardson, 1975).

- **Cauces Trenzados:** Comúnmente son encontrados en las partes planas del río. Como su nombre lo dice, se encuentran conformados por un entrelazamiento de múltiples cauces que se unen y se separan a lo ancho del cauce, formando pequeñas islas o barras de grava gruesa, las cuales han sido depositadas por el arrastre y la acumulación de sedimentos, los que a su vez pueden ser arrastrados con facilidad durante las crecientes, dando forma a nuevos cauces o canales menores (Rodríguez, 2010). En la **Figura 2-4** se observa como el flujo transita por varios canales formados por la deposición de los sedimentos.

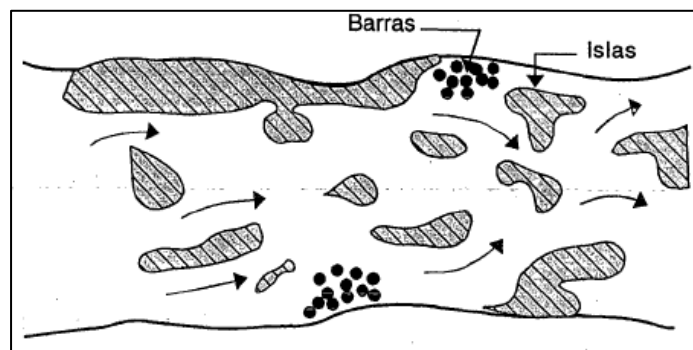


Figura 2-4: Esquema cauce trenzado.

Fuente: (Gracia & Maza, 1997).

Las corrientes de agua pueden ser desviadas hacia alguno de los cauces menores, los cuales no siempre cuentan con la capacidad suficiente para transportar el flujo del cauce principal, produciendo inundaciones sobre las márgenes cuando el río abandona un canal central para ocupar uno localizado a las orillas del cauce principal.

2.2.4 Clasificación con base en su libertad para ajustar su forma y pendiente

Una de las clasificaciones más conocidas en el medio es la propuesta por Schumm (1977), donde se clasificaron los ríos en función de su libertad para variar sus condiciones geomorfológicas, en dos grupos principales:

- **Cauces con lechos rocosos:** Como su nombre lo dice, al contar con un lecho rocoso, las condiciones geomorfológicas del cauce son definidas por el material del afloramiento rocoso y su forma y pendiente son resistentes al cambio.

- **Cauces aluviales:** Contrario al grupo anterior, el fondo y las márgenes de este tipo de cauces, se encuentran conformadas por el material transportado por el río, lo que permite la variación de la morfología fluvial del cauce, ya sea en su forma o pendiente. Por medio de ensayos de laboratorio, Schumm (1977) también relacionó los cauces aluviales en función de la carga de sedimentos transportados, encontrando que, a medida que aumentaba o disminuía el porcentaje de la carga de sedimentos en el cauce, se generaban cambios en su estabilidad, lo que a su vez modificaba la pendiente y la sinuosidad del cauce tal y como se observa en la **Figura 2-5**.

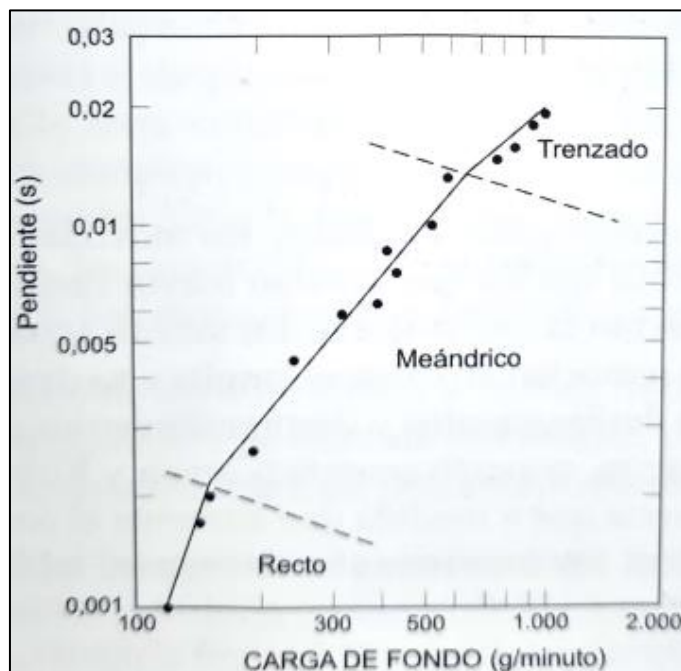


Figura 2-5: Relación entre carga de fondo y pendiente en ensayo de laboratorio
Fuente: (Schumm, 1977).

Los cambios generados sobre la estabilidad del cauce en función de la carga de fondo, se presentan en la **Tabla 2-2**, donde se establecen tres clases de cauces principales (estable, sedimentable y erosionable) y tres subclases en función del modo de transporte del sedimento (en el fondo, mixto y en suspensión). Esta variación de los cauces aluviales presentada puede ser representada de manera gráfica a partir de la **Figura 2-6**.

Tabla 2-2: Clasificación de cauces aluviales según Schumm (1977).

Modo de transporte de sedimentos	M (%)	C (%)	Estabilidad del Cauce		
			Estable	En sedimentación	En erosión
Carga suspendida: 85 - 100%	100	< 3	Relación ancho/profundidad < 7 Sinuosidad > 2.1 Pendiente baja	La mayor sedimentación ocurre en las márgenes, lo que causa estrechamiento del cauce. La sedimentación en el fondo es menor.	Predomina la erosión en el lecho; Poca ampliación de márgenes.
Carga mixta: carga suspendida del 65% - 85%; carga de fondo del 15% - 35%	30	3 - 11	25 > Relación ancho/profundidad > 7 1.5 < Sinuosidad < 2.1 Pendiente moderada	Sedimentación en las márgenes, pero también se inicia el proceso en el lecho	Erosión en el fondo y ampliación de las márgenes.
Carga de fondo: 35% - 70%	0	> 11	Relación ancho/profundidad > 25 1 < Sinuosidad < 1.5 Pendiente alta	Sedimentación en el lecho y formación de islas.	Poca erosión del fondo; predomina la ampliación de las márgenes.

Donde:

M = Porcentaje de limo – arcilla en el perímetro mojado del cauce. El cual se define como la longitud de la línea de intersección de la superficie del cauce mojada en un plano transversal perpendicular a la dirección del flujo (Chow, 1959)

C = Relación entre la carga de fondo y la carga total.

Fuente: (Schumm, 1977).

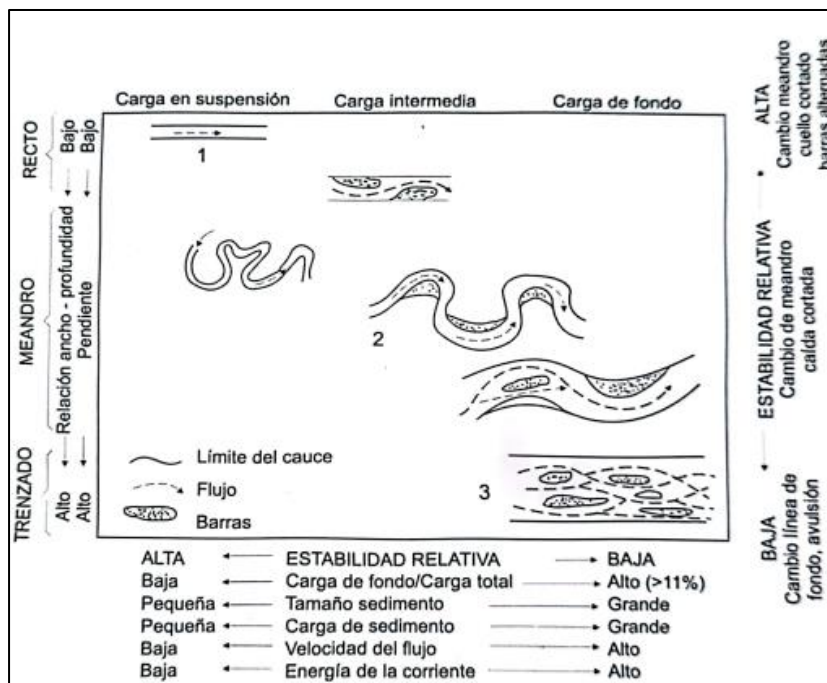


Figura 2-6: Clasificación de cauces según tipo de carga de sedimentos.

Fuente: (Schumm, 1981).

2.2.5 Clasificación según Rust

Rust (1978), decidió clasificar los cauces en alguno de los grupos presentados por Leopold y sus colaboradores (1957) en función de la sinuosidad y de la existencia de cauces menores a lo largo de la corriente principal, para lo cual propuso la clasificación presentada en la **Tabla 2-3**.

Tabla 2-3: Clasificación de cauces aluviales de Rust.

Sinuosidad	Un solo cauce definido a lo ancho de la corriente	Mas de un cauce definido a lo ancho de la corriente
Sinuosidad Baja (<1.5)	Recto	Entrelazado
Sinuosidad Alta (>1.5)	Meándrico	Anastomosado

Fuente: (Rust, 1978).

De acuerdo con la tabla anterior, se puede observar la variación de la morfología del cauce de manera gráfica en la **Figura 2-7**, donde los cauces con sinuosidades más altas pueden ser catalogados como meándricos y anastomosados y los de sinuosidad baja como rectos y entrelazados. A su vez los cauces con un solo cauce definido pueden ser catalogados como rectos o meándrico y los que cuentan con más de un cauce definido como entrelazados y anastomosados.

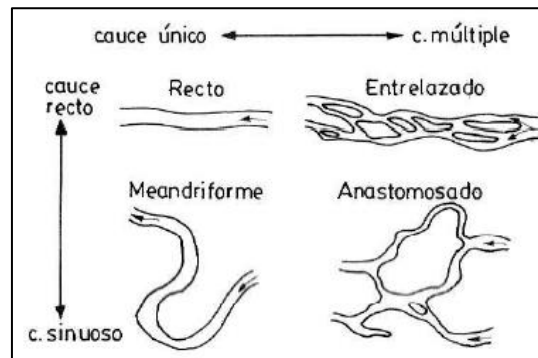


Figura 2-7: Clasificación de cauces aluviales de Rust.

Fuente: (Rust, 1978).

2.2.6 Descripción Culbertson

Culbertson con ayuda de sus colaboradores (1967) presentó la variación de características generales de los cauces de acuerdo a su clasificación dentro de los siguientes cuatro grupos de cauces: cauces con ancho uniforme y sinuosos, cauces con barras de grava y sinuosos, cauces trenzados con barras y cauces trenzados con barras e islas. Las características de estas clasificaciones se presentan en la **Tabla 2-4**.

Tabla 2-4: Clasificación general de cauces.

Características	Cauces sinuosos y de ancho uniforme	Cauces sinuosos y con barras	Cauces trezados y con barras	Cauces trezados con barras e islas
Hidrograma	Las pendientes de las ramas ascendentes y descendentes son más fuertes que para los cauces sinuosos con barras y más suaves que para los cauces trezados.	La tasa de cambio de las pendientes de las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma son menores que para los cauces sinuosos de ancho uniforme y cauces trezados con barras.	Las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma son muy empinadas debido a la baja sinuosidad, pendiente pronunciada y llanura de inundación angosta.	La duración del pico del hidrograma es larga. Si el trezado está asociado con pendientes pronunciadas, la tasa de ascenso y descenso del hidrograma puede ser empinada.
Llanura de inundación	El cauce puede formarse en una llanura de inundación ancha o angosta.	Una llanura de inundación, asociada con este tipo de cauce siempre será ancha.	Generalmente la llanura de inundación más joven es angosta.	La llanura de inundación puede ser angosta si la pendiente del cauce es empinada, y puede ser ancha si la pendiente es plana.
Sinuosidad	Baja ($S < 1.5$), moderada ($1.5 < S < 2$) o alta ($S > 2$)	Moderada ($1.5 < S < 2$) o alta ($S > 2$)	Baja ($S < 1.5$) o moderada ($1.5 < S < 2$)	Baja ($S < 1.5$)
Vegetación	Se presenta un cinturón angosto de vegetación densa a lo largo de ambas bancas del cauce. El crecimiento de vegetación, principalmente en el lado interior de las curvas del cauce, está asociado con alta sinuosidad.	En la llanura de inundación se puede presentar una vegetación que va desde despreciable hasta muy densa.	Cuando los cauces tienen pendientes empinadas, el crecimiento de vegetación es normalmente despreciable a lo largo de ambas bancas del cauce	La forma de vegetación que se encuentra es generalmente densa a lo largo de las áreas de flujo, o inexistente en zonas áridas.
Altura de las bancas	Las bancas están formadas por material cohesivo y resistente a la erosión. Las alturas de las bancas van desde bajas (1m) hasta altas (5m o más).	Las bancas son relativamente menos cohesivas que para el caso de cauces sinuosos de ancho uniforme. Las alturas de los bancos van de moderadas a altas.	Las bancas son menos cohesivas y pueden ser bajas a moderadamente altas.	Los bancos son generalmente bajos y no cohesivos.
Madreviejas	Generalmente no se forman, a menos que la sinuosidad sea muy grande.	Generalmente forman lagos en herradura. Corresponden a las madreviejas como tales.	El cauce no forma madreviejas.	No es de esperar la presencia de madreviejas.
Diques naturales	La banca moderada o alta esta comúnmente asociada con diques naturales.	Comúnmente se presentan los diques naturales en el lado cóncavo de las curvas.	No se forman diques naturales por la acción dinámica del cauce.	No se forman los diques naturales.

Características	Cauces sinuosos y de ancho uniforme	Cauces sinuosos y con barras	Cauces trezados y con barras	Cauces trezados con barras e islas
Volutas de meandros	Las volutas concéntricas y regulares están asociadas con una alta sinuosidad. Los canales de baja sinuosidad están acompañados de volutas poco desarrolladas.	Las volutas de meandro regulares, concéntricas y poco separadas están asociadas a este tipo de cauces.	Las volutas de meandros están ausentes o poco desarrolladas.	Las volutas de meandro están casi siempre ausentes o muy pobremente desarrolladas.
Trenzado	Trenzado ausente.	Trenzado ausente.	Trenzado de barras o islas sencillas.	Trenzado de barras o islas múltiples.
Modo de transporte	Los sedimentos son transportados principalmente en forma suspendida y están constituidos tanto por el material de fondo como por los sedimentos lavados de llanuras de inundación	El transporte es similar al de los cauces sinuosos y de ancho uniforme. Los sedimentos son transportados en forma suspendida.	El sedimento es transportado principalmente como carga de fondo. Buena parte del material proviene del cauce.	Si las pendientes son pronunciadas, el modo de transporte de sedimento es similar al de los cauces trezados y con barras. Si las pendientes son suaves, el sedimento es transportado en forma suspendida.

Fuente: (Culbertson et al., 1967).

2.3 Caracterización geomorfológica y pluviométrica

La caracterización geomorfológica y pluviométrica de una cuenca se vuelve importante, ya que, permite conocer factores y parámetros necesarios para evaluar sus problemas (Gaspari et al., 2012). Una correcta caracterización se encuentra orientada a la obtención y evaluación de tres tipos de parámetros: Parámetros de forma, parámetros de la red de drenaje y parámetros del relieve (López, 1998). Adicionalmente para valorar y relacionar el régimen pluviométrico, es necesario evaluar el comportamiento de sus precipitaciones y sus caudales.

2.3.1 Parámetros de forma

La forma de una cuenca influye en gran medida en las características del hidrograma de escorrentía de un cauce (Monserrat, 1985). Es un elemento de caracterización que depende de su superficie, perímetro, longitud y amplitud, cuatro conceptos generales que han sido definido de la siguiente manera:

Área (A): Se define como la proyección horizontal del área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido hacia un mismo cauce natural.

Perímetro (P): Se define como la medida sobre un plano horizontal de la divisoria de aguas de una cuenca.

Longitud axial (La): Existen algunas diferencias entre autores para definir este parámetro; sin embargo, Schumm (1957) lo define como la distancia entre la desembocadura de una cuenca y el punto más alejado de su divisoria.

Ancho o amplitud media (B): Se encuentra definido por la relación entre el área de la cuenca (A) y su longitud axial (La) (Ver Ecuación (2-2)).

$$B = \frac{A}{La} \quad (2-2)$$

Con base en estos factores se han propuesto algunos índices usados para caracterizar la forma de la cuenca (A. Romero & López, 1987). Entre ellos se destacan, el índice de Gravelius y el factor de forma, ambos adimensionales:

- **Índice de Gravelius (Ig):** Presentado por Gravelius, se define como la relación existente entre el perímetro de una cuenca (P) y la longitud de la circunferencia de un círculo de área (A) igual a la de la cuenca. (Ver Ecuación (2-3)).

$$Ig = \frac{P}{2\sqrt{\pi A^2}} \quad (2-3)$$

Donde:

Ig = Índice de Gravelius.

P = Perímetro de la cuenca hidrográfica (m).

A = Área de la cuenca hidrográfica (m²).

A medida que la magnitud del coeficiente (Ig) se acerca a 1.0, la cuenca tiende a ser redonda, lo que aumenta la presencia de avenidas torrenciales. Se puede categorizar la forma de la cuenca con base en la magnitud del índice de Gravelius de acuerdo con la **Tabla 2-5**.

Tabla 2-5: Clasificación de cuencas de acuerdo con su índice de Gravelius.

Valores de Ig	Forma
1-1.25	Redonda a oval redonda
1.25-1.5	De oval redonda a oval oblonga
>1.5	De oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (1985)

- **Factor de forma (Kf):** Horton definió el factor de forma (Kf) como la relación existente entre el ancho medio (B) y la longitud axial (La) de la cuenca hidrográfica. Lo que es equivalente al área (A) sobre la longitud axial (La) al cuadrado. (Ver Ecuación (2-4)). Este factor intenta medir que tan alargada puede ser una cuenca. Si es menor a la unidad, la cuenca tendrá más baja susceptibilidad a generar avenidas en comparación a si es mayor. La forma de una cuenca se puede clasificar en función de su factor de forma (Kf) de acuerdo con la **Tabla 2-6**.

$$Kf = \frac{A}{La^2} \quad (2-4)$$

Donde:

Kf = Factor de forma.

A = Área de la cuenca hidrográfica (m²).

La = Longitud axial de la cuenca (m).

Tabla 2-6: Clasificación de cuencas de acuerdo con su factor de forma.

Kf	Forma
<0.22	Muy alargada
0.22 - 0.30	Alargada
0.30 - 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 - 1.2	Muy ensanchada
>1.2	Rodeando el desagüe

Fuente: (Pérez, 1979).

2.3.2 Parámetros de red de drenaje

Los parámetros del sistema de drenaje se encuentran enfocados en la descripción de manera cuantitativa de las características de los cauces tributarios y del cauce principal que hacen parte de una cuenca hidrográfica (Monsalve, 1999) a través de parámetros como el orden de la corriente, la densidad de drenaje y la extensión media de la cuenca:

- **Orden de la corriente:** Consiste en la asignación de un orden numérico a las redes que conforman el sistema de drenaje. Este orden es un método para identificar y clasificar los tipos de arroyos basado en la cantidad de afluentes. El método original fue desarrollado por Horton (1945); sin embargo, Strahler (1969) realizó modificaciones al método, convirtiéndolo en el más usado hoy en día para realizar

el ordenamiento de los tributarios de la cuenca. El método maneja los siguientes criterios: i) Los cauces que no cuentan con afluentes son definidos como cauces de primer orden. ii) Cuando dos cauces del mismo orden “i”, se intersecan, dan lugar a un cauce de segundo orden. iii) Cuando se intersecan dos canales de distinto orden, dan lugar a un cauce que conserva el mayor de los órdenes. Finalmente, el orden de la cuenca, es el asociado al mayor orden del sistema evaluado. Entre más alto es el orden de la cuenca indica un drenaje más eficiente para el desalojo del agua a través de los cauces.

- **Densidad de drenaje (Dd):** Se define como la relación entre la longitud total de los cursos hídricos que conforman la cuenca ($\sum Li$) y el área total de la cuenca (A) (Horton, 1945). (Ver Ecuación (2-5)).

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} \quad (2-5)$$

Donde:

Dd = Densidad de drenaje (km/km²)

$\sum Li$ = Sumatoria de las longitudes de los cauces de la cuenca hidrográfica (km).

A = Área de la cuenca hidrográfica (km²).

Se encuentra ligada a las características físicas de los materiales sobre los cuales se ha desarrollado, además, aclara el grado de relación entre el tipo de red de drenaje y la clase de escurrimiento dominante. Entre mayor sea la magnitud de la densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de evacuación de avenidas torrenciales de la cuenca (Gaspari et al., 2012). Una cuenca se puede clasificar con base en la magnitud de su densidad de drenaje de acuerdo con la **Tabla 2-7**.

Tabla 2-7: Clasificación de cuencas de acuerdo con su densidad de drenaje.

Dd (km/km²)	Clase
<1	Baja
1-2	Moderada
2-3	Alta
>3	Muy Alta

Fuente: Delgadillo & Páez (2008).

- **Extensión media (Es):** Esta definida como la distancia promedio que tendría que recorrer el agua precipitada sobre una cuenca, hasta el punto más próximo de uno de

sus tributarios (Chavarro, 2017). (Ver Ecuación (2-6)). Valores altos de este parámetro son indicativos de cuencas con mayor amenaza de deslizamiento superficial.

$$Es = \frac{A}{4 \sum Li} (2-6)$$

Donde:

Es = Extensión media (km).

$\sum Li$ = sumatoria de las longitudes de los cauces de la cuenca hidrográfica (km).

A = área de la cuenca hidrográfica (km²).

2.3.3 Parámetros de relieve

Son considerados por varios investigadores como los parámetros de mayor importancia para la caracterización geomorfológica de una cuenca, ya que, el relieve de una cuenca influye de manera directa en el tipo de drenaje, la forma de los cauces, la velocidad, su potencial erosivo o sedimentable y su infiltración (A. Romero & López, 1987) Los parámetros más representativos son: La pendiente media de la cuenca y del cauce principal, la curva hipsométrica y el tiempo de concentración:

- **Pendiente media:** Como su nombre lo indica, es la variación e inclinación promedio del terreno en toda la superficie de la cuenca. Diversos autores han desarrollado métodos para la obtención de su magnitud, como el método de las curvas de nivel Alvord, el método de la cuadrícula de Horton y el método de Nash (Chow, 1994). Sin embargo, hoy en día con ayuda de los sistemas de información geográfica se facilita su obtención a través de la aplicación de herramientas sobre modelos de elevación digital. De acuerdo con la magnitud de su pendiente media las cuencas se pueden clasificar como se observa en la **Tabla 2-8**.

Tabla 2-8: Clasificación de cuencas de acuerdo con su pendiente media.

Pendiente media (%)	Tipo de relieve
0-2	Plano
2-5	Suave
5-10	Medianamente accidentado
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente accidentado
25-50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: Pérez (1979).

- **Pendiente cauce principal (S):** De manera llana, se puede definir como la relación entre la variación vertical y horizontal entre el punto de nacimiento del cauce principal y su desembocadura. Existen algunos métodos para encontrar su magnitud, se destaca el método de Taylor & Schwarz (1952). Sin embargo, al igual que para la obtención de la pendiente media de la cuenca, el uso de sistemas de información geográfica facilita su obtención. La magnitud de las pendientes medias de la cuenca y del cauce principal, influyen de manera directamente proporcional las velocidades en las corrientes de agua e inversamente proporcional la magnitud de los tiempos de concentración. Esto a su vez puede aumentar o disminuir los procesos erosivos y sedimentables que suceden en los cauces.
- **Curva hipsométrica:** Es la representación gráfica del relieve de la cuenca en donde se representa el estudio de la variación de los varios terrenos de la cuenca (Monsalve, 1999). El método de cálculo y obtención fue sugerido por Langbein et al., (1947) con el fin de presentar información sintetizada sobre la altitud de la cuenca. De acuerdo con Strahler (1957): “*cuenas con mayor parte del área con elevación por encima de los valores medios de la misma, son consideradas cuencas con gran potencial erosivo (cuenas inmaduras), de lo contrario son consideradas cuencas maduras o sedimentarias*”. Lo anterior, se puede representar en la **Figura 2-8**.

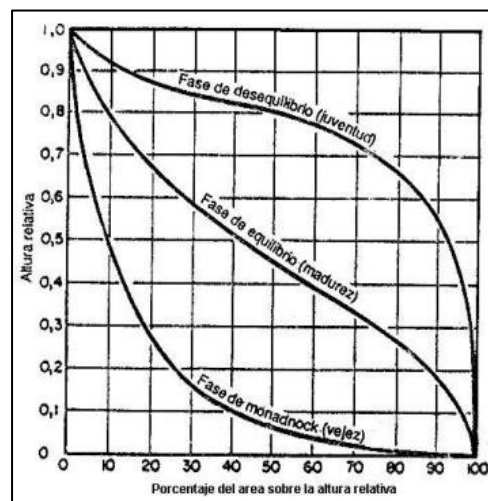


Figura 2-8: Curvas hipsométricas en función del ciclo de erosión.
Fuente: Strahler (1952).

Así, las cuencas con curvas hipsométricas con formas similares a la fase de desequilibrio, se encuentran asociadas a cuencas con potencial erosivo, mientras que las cuencas con

curvas similares a la fase de vejez, se encuentran asociadas a cuencas con alta deposición de sedimentos. A partir de ella se puede obtener la elevación media de la cuenca; un parámetro que se ha relacionado con el comportamiento de las precipitaciones y las temperaturas dentro de la cuenca (Diaz et al., 1999).

- **Tiempo de concentración:** Es uno de los parámetros más usados en la hidrología, ya que hace parte de las variables necesarias para obtener el flujo máximo esperado sobre un territorio determinado. El tiempo de concentración puede ser definido como el tiempo que tarda el flujo en recorrer desde el punto más alejado de la desembocadura hasta un punto de desagüe específico (Chow, Maidment, et al., 1994), aunque según Vélez & Botero (2011), esta hipótesis no siempre es cierta, ya que, dependiendo de las condiciones meteorológicas y geomorfológicas de la zona, pueden existir puntos dentro de la cuenca en los que el flujo tarde más en llegar al desagüe en comparación del más alejado. Actualmente existen múltiples ecuaciones empíricas para la obtención del tiempo de concentración, incluyendo las siguientes:

$$Tc(\text{min}) = 3.9780 L^{0.77} S_o^{-0.385} \rightarrow \text{Kirpich (1940) (2-7)}$$

$$Tc(\text{h}) = 0.3 \left(\frac{L}{S_o^{0.25}} \right)^{0.75} \rightarrow \text{Temez (1991) (2-8)}$$

$$Tc(\text{h}) = \frac{4\sqrt{A}+1.5L}{25.3\sqrt{LS_o}} \rightarrow \text{Glandiotti (1997) (2-9)}$$

$$Tc(\text{h}) = 0.273 \left(\frac{L}{S_o^{0.5}} \right)^{0.64} \rightarrow \text{Ven T Chow (1997) (2-10)}$$

$$Tc(\text{h}) = 0.28 \left(\frac{L}{S_o^{0.25}} \right)^{0.76} \rightarrow \text{Cuerpo de Ingenieros (1997) (2-11)}$$

$$Tc(\text{h}) = 0.683 \left(\frac{LA^{0.4}}{\sqrt{\frac{4A}{\pi}} S_o^{0.2}} \right) \rightarrow \text{Bransby - Williams (1977) (2-12)}$$

$$Tc(\text{h}) = 2.6 \left(\frac{L}{1000S_o^{0.5}} \right)^{0.5} \rightarrow \text{Johnstone Cross (1949) (2-13)}$$

$$Tc(\text{h}) = 0.947 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \rightarrow \text{Ranser (1111) (2-14)}$$

$$Tc(\text{h}) = \left(\frac{0.87L^3}{H} \right)^{0.385} \rightarrow \text{California (1942) (2-15)}$$

$$Tc(\text{h}) = 0.108 \left(\frac{\sqrt[3]{AL}}{S_o^{0.5}} \right) \rightarrow \text{Passini (1942) (2-16)}$$

Donde:

L = Longitud del cauce principal (km).

So = Pendiente total del cauce principal (m/m).

S = Pendiente total del cauce principal (%).

A = Área de la cuenca (km²).

H = diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente principal (m).

Fuente: (Vélez & Botero, 2011)

2.3.4 Precipitaciones y caudales

Se denomina precipitación a todas las formas de humedad emanadas de la atmósfera y depositadas sobre la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, neblina y nieve. ((Monsalve, 1999). Considerando las condiciones climáticas de la región y el objetivo del proyecto, las precipitaciones sobre la zona de estudio están asociadas puramente a las lluvias. Por su parte el caudal es uno de los términos más importantes en la hidráulica fluvial, ya que hace alusión a la magnitud del volumen de agua que fluye por un cauce en un instante determinado. De esta manera, la obtención del caudal que transita por un cauce se convierte en un factor sumamente relevante para realizar el diseño de las obras de mitigación contra la inundación fluvial (Gil et al., 2019)

El registro y medición de las precipitaciones sobre una cuenca y los caudales sobre un río es realizado comúnmente por estaciones climatológicas tipo pluviométricas – limnimétricas por medio de instrumentos de medición como pluviómetros, pluviómetros y limnimetros. En Colombia, las entidades principales encargadas de realizar esta función son el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), la CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca), la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca) y las corporaciones regionales adicionales en el país (Otalora, 2016), las cuales cuentan con una red de estaciones meteorológicas instaladas sobre la superficie del terreno colombiano. A partir de los datos registrados por las estaciones se pueden generar series de datos e histogramas para evaluar y representar gráficamente los patrones de lluvia y caudal de la zona de evaluación. Entre las series más usadas se destacan las siguientes:

- Precipitación media mensual a nivel multianual
- Precipitación media máxima en 24 horas a nivel mensual multianual
- Precipitación total a nivel multianual
- Precipitación máxima en 24 horas a nivel multianual
- Caudal medios, máximos y mínimos a nivel mensual multianual
- Caudal medios, máximos y mínimos a nivel multianual

En Colombia, en cuencas grandes es común contar con más de una estación pluviométrica localizada sobre la superficie de la cuenca hidrográfica, por lo que el comportamiento de las lluvias precipitadas no se ajusta a los datos registrados por una única estación. Para dar solución a este problema y obtener la precipitación media de la cuenca se han desarrollado métodos de estimación como los polígonos de (Thiessen, 1911) y el uso de los mapas de isoyetas. Según Vélez (2020) el método de los polígonos de Thiessen es totalmente objetivo en comparación con la subjetividad que conlleva el uso de mapas de isoyetas.

- **Polígonos de Thiessen:** Establece que en cualquier punto dentro de la cuenca la lluvia es igual a la que registra en la estación más cercana (Chow, Maidment, et al., 1994). De esta manera, el método consiste en atribuir un factor de peso a las estaciones de acuerdo al área de influencia de cada una (Monsalve, 1999), lo que se resume en el siguiente procedimiento: I. identificación de estaciones pluviométricas de la zona del proyecto. II. Unión con línea recta de las estaciones. III. Trazado de las mediatrices de las líneas rectas. IV. Identificación áreas formadas. V. Aplicación de la Ecuación (2-17).

$$\overline{Pm} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2-17)$$

Donde:

Pm = Precipitación media (mm).

n = Número de estaciones pluviométricas.

Ai = Área de influencia asociada a la estación respectiva.

Pi = Precipitación registrada en la estación respectiva (mm).

De manera paradójica, según datos abiertos del IDEAM el número de estaciones activas de medición de caudal (1751) es bajo en comparación al número de estaciones de medición de precipitaciones (3051), esto considerando la cifra tan alta de cursos hídricos con la que cuenta el país. Por esta razón no siempre se cuenta con estaciones limnométricas sobre las corrientes de los cauces, es decir, no existen datos o mediciones registradas para los sectores de evaluación. Para contrarrestar este hecho, se han desarrollado otro tipo de metodologías indirectas más sencillas para la estimación de los caudales transitados sobre una corriente, entre los cuales destaca el método de la transposición de caudales.

- **Transposición de caudales:** Partiendo de la noción de regionalización en hidrología, donde se suele fraccionar una región entre subregiones con características homogéneas de tipo geomorfológico, climatológico y orográfico. Se puede asumir un proceso hidrológico como estadísticamente homogéneo si su estructura espacial permanece similar a ella misma ante cambios de escala (Mesa Sánchez et al., 2002). Considerando este concepto, este método supone que el flujo en función del área y la precipitación de una cuenca con respecto a otra, es aproximadamente igual para un periodo de tiempo determinado (Arumi et al., 2000) siempre y cuando exista un grado de similitud entre las dos cuencas evaluadas, considerando parámetros morfométricos, climáticos e hidrogeológicos (Ruiz, 2016), ya que de esto dependerá que se presenten resultados confiables (Duitama et al., 2015). El método se encuentra definido por la Ecuación (2-18) (Gulliver & Arndt, 1991).

$$Q_s = \left(\frac{A_s}{A_c}\right) Q_c \quad (2-18)$$

Donde

Q_s = Caudal de la cuenca sin información registrada (m³/s).

A_s = Área de la cuenca sin información registrada (km²).

Q_c = Caudal de la cuenca con información registrada (m³/s).

A_c = Área de la cuenca con información registrada (km²).

A partir de los datos de precipitaciones y caudales históricos registrados en las estaciones, con el fin de obtener criterios de diseño para las obras de mitigación contra la inundación se debe desarrollar una proyección estadística hacia un horizonte de diseño. Lo que se resume en un periodo de retorno, definido como el tiempo estimado al cabo del cual un evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez (Monsalve, 1999) y cuya magnitud es establecida en función del tipo de obra a ejecutar, como se observa en la **Tabla 2-9** propuesta por (Chow, Maidment, et al., 1994).

Tabla 2-9: Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua.

Tipo de estructura	Periodo de retorno (años)
<i>Diques</i>	
En fincas	2-50
Alrededor de ciudades	50-200

Fuente: (Chow, Maidment, et al., 1994)

Estas proyecciones son elaboradas por medio de un análisis de frecuencias, el cual se encuentra ligado al periodo de retorno y se define como un procedimiento realizado para estimar la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de eventos pasados y/o futuros (Monsalve, 1999) a partir de funciones de probabilidad. Entre las funciones más conocidas se destacan: Distribución Normal (Gauss), distribución Gumbel y Log Gumbel (Gumbel 1941), distribución GEV (Valores Extremos Generalizados) (Jenkinson, 1955) y la distribución TCEV (Valores Extremos con Dos Componentes) (Rossi et al., 1984) presentadas por la WMO (1989) (Organización Meteorológica Mundial) en la publicación titulada “*Distribución estadística para el análisis de frecuencia de las inundaciones*”.

El desarrollo de estas funciones se puede realizar a través de las ecuaciones que las definen (WMO, 1989) aplicando las bases estadísticas e hidrológicas de cada función, para encontrar la que mejor ajuste presente a la serie de datos analizada. Sin embargo, hoy en día existen modelos estadísticos que facilitan su resolución para la estimación de los parámetros estadísticos con el fin de efectuar una comparación entre ellas y escoger la mejor alternativa de ajuste. Uno de ellos corresponde al modelo estadístico AFINS (Análisis de Frecuencia de Extremos con Información Sistemática y No Sistemática), desarrollado el 7 de junio del 2006 por el grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente a cargo del profesor Félix Francés García.

El modelo AFINS se encuentra basado en la obtención de los parámetros estadísticos óptimos de las funciones de probabilidad mediante algoritmos de máxima verosimilitud (Botero & Frances, 2006). Su uso se destaca en los trabajos de (Peña, 2021), (Ocampo, 2012), (Muñoz, 2012) (Francés et al., 2011). De acuerdo con Vélez (2020), la elección de la función de ajuste más adecuada para la serie de datos proyectada se puede realizar con base en el siguiente criterio de elección. I. Elección de la función que presente un mejor ajuste gráfico a nivel visual. II. Si existe similitud gráfica, elección de la función que presente el valor máximo de verosimilitud. III. Si existe similitud en la verosimilitud, elección de la función que presente las magnitudes más altas para un mismo periodo de retorno (si se busca obtener condiciones de diseño elevadas). IV. Si persiste la similitud, elección de la función que presente un menor número de parámetros.

2.4 Control de inundaciones

Considerando estrategias que permiten controlar el aumento de los caudales y niveles de los cauces, dejando de un lado los problemas asociados a la erosión y socavación, se pueden presentar dos grupos principales de soluciones a la problemática del proyecto: medidas estructurales y medidas no estructurales. El alcance del presente proyecto se encuentra enfocado en la evaluación de las medidas netamente estructurales. Las medidas no estructurales no actúan directamente sobre la modificación de las características hidráulicas o hidrológicas del cauce, sino que se encuentran enfocadas a la disminución de la susceptibilidad de la zona ante un evento de inundación (García, 2014). Lo anterior se ve reflejado mediante el uso de políticas, advertencias, recopilación de información, procesos legislativos y de participación pública que permitan una mejor preparación de las poblaciones ante un evento de inundación (United Nations, 2009).

2.4.1 Tipos de medidas estructurales

Son medidas que involucran la construcción de cualquier tipo de estructura hidráulica, es decir, consisten en una construcción efectuada para reducir o evitar las inundaciones, por medio de medidas ingenieriles y construcción de estructuras resistentes al peligro de inundación por medio de la protección de orillas (Escuder et al., 2010). Generalmente, este tipo de medidas son diseñadas para controlar las inundaciones hasta un determinado período de retorno (Schumann, 2017). Entre las más usadas y que podrían llegar a ser aplicadas al caso de estudio se encuentran las siguientes:

Obras longitudinales:

- Diques naturales.
- Diques artificiales.

Alteración del cauce:

- Dragados y canalizaciones.

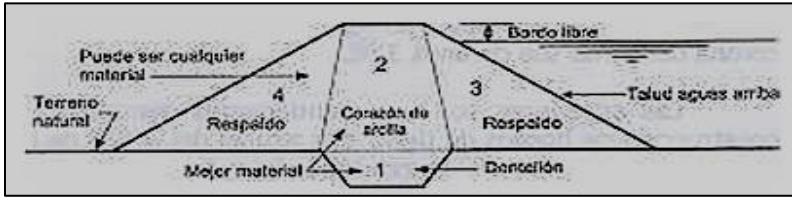
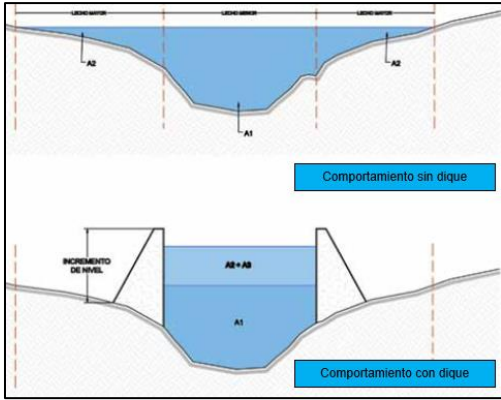
Desviación de inundaciones:

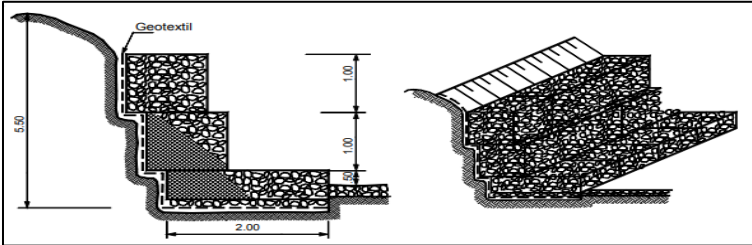
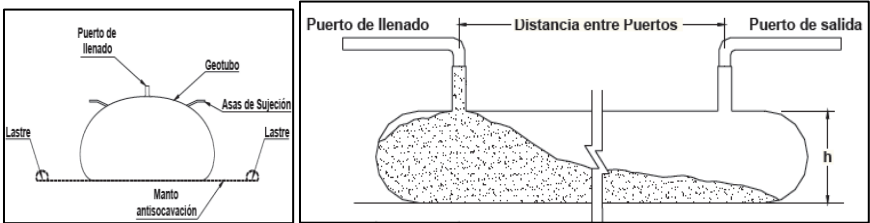
- Canales de alivio.
- Desvíos temporales.

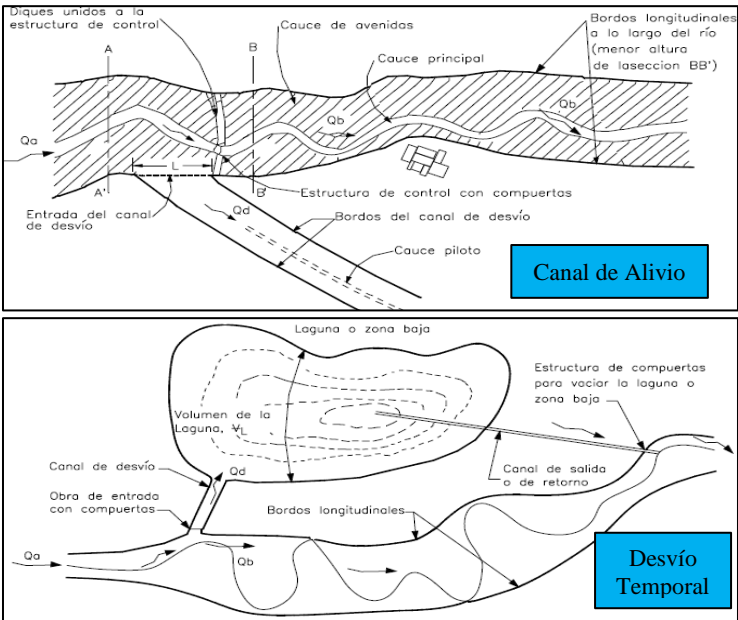
Fuente: Tomado y adaptado de (Andjelkovic, 2001).

A continuación, se presenta una breve descripción de las medidas estructurales expuestas:

Tabla 2-10: Alternativas de mitigación de la inundación.

Alternativa	Descripción	Funcionamiento
<p>Diques naturales</p>	<p>Son formados a partir de numerosos depósitos de inundaciones que generan crestas sinuosas de sedimentos gruesos a lo largo de los canales de los ríos (Hudson, 2007).</p>	<p>Pueden ser construidos por medio de terraplenes formados con materiales naturales como la arcilla y la arena. Actúan como medida de mitigación, reteniendo el agua durante un período de tiempo determinado mientras las precipitaciones cesan y los niveles de agua bajan. En la Figura 2-9 se observa una sección representativa de este tipo de diques. Se evidencia la importancia del núcleo de arcilla para retener el agua durante el aumento de los niveles de agua en el cauce.</p>  <p>Figura 2-9: Esquema sección transversal dique natural. Fuente:(Portillo, 2003).</p>
<p>Diques artificiales</p>	<p>Se encuentran construidos de manera paralela al cauce a manera de frontera vertical con la zona a proteger, de tal forma que puedan soportar las fuerzas y velocidades desarrolladas por el agua. Pueden ser construidas en diferentes materiales, dependiendo de las características del cauce analizado y de la zona a proteger; usualmente suelen ser construidas en concreto, gaviones, geo – sintéticos rellenos y demás (Nava & Cortes, 2009).</p> <p>Gaviones: Son elementos de malla metálica tejida a doble torsión, formando hexágonos, producida con alambre metálico revestido en caliente con una aleación de zinc – aluminio y una capa de material plástico extruido (Fracassi, 2019). Generalmente las mallas armadas cuentan con dimensiones iguales en todos los</p>	<p>Se enfocan en contener el agua entre las dos márgenes del cauce e impedir el desbordamiento sobre las orillas. Se presenta en la Figura 2-10 un esquema en el que se evidencia como se evita el ensanchamiento del flujo y retiene el volumen de agua entre una zona definida.</p>  <p>Figura 2-10: Esquema sección transversal dique longitudinal. Fuente: (Duran et al., 2011).</p>

Alternativa	Descripción	Funcionamiento
	<p>ejes o con una relación 1:2 entre su dimensión horizontal y su dimensión vertical, tal y como se expone en la Figura 2-11.</p> <p>Geo-sintéticos rellenos: Se encuentran conformados por un contenedor de geotextil con forma rectangular o tubular que es cocido de manera industrial utilizando hilo de poliéster o polipropileno de alta resistencia.</p>	<p>Los gaviones son rellenos con cantos rodados o piedras de cantera, siempre teniendo cuidado de no emplear materiales que contengan altos índices de óxido de hierro, alcalinidad o compuestos salinos, ya que estos pueden contribuir de gran forma al deterioro del alambre (Suarez, 2001).</p>  <p>Figura 2-11: Configuración típica de gaviones.</p> <p>Fuente: (Suarez, 2001).</p> <p>Los geo – sintéticos son llenados por medios mecánicos con suelo o arena del sitio de trabajo, con el fin de obtener unidades de gran masa y volumen que se adapten y acomoden a las condiciones de nivelación del terreno (Espinosa & Torres, 2015), su configuración sigue el esquema proyectado en la Figura 2-12.</p>  <p>Figura 2-12: Estructura geo contenedores.</p> <p>Fuente: (Espinosa & Torres, 2015).</p>
<p>Dragados y canalizaciones</p>	<p>El dragado del cauce es usado para aumentar la capacidad hidráulica liberándolo de la carga de sedimentos y de la vegetación. La canalización consiste en realizar un recubrimiento general sobre el lecho con algún material para alterar las condiciones naturales del cauce.</p>	<p>El dragado permite que el agua pueda fluir con mayor facilidad y los niveles de las láminas de agua se mantengan bajos ante el aumento de los caudales. La canalización disminuye la rugosidad del lecho y elimina los obstáculos existentes a lo largo del tramo evaluado para que de esta manera los niveles de agua en el río disminuyan.</p>

Alternativa	Descripción	Funcionamiento
<p>Canales de alivio y Desvíos Temporales</p>	<p>Corresponde a la extracción de volúmenes importantes de agua de la corriente principal, con el fin de disminuir los niveles de agua en el cauce. El agua extraída es conducida a través de cauces o canales de alivio hacia algún punto en donde su descarga no presente inconveniente alguno para las poblaciones, ya sea alguna laguna, otro cauce o el mar si se encuentra cerca de este. Con esto se genera la reducción del hidrograma de la creciente y a su vez es posible disminuir la altura de otro tipo de obras de protección que puedan localizarse aguas abajo (Salas, 2014).</p> <p>Por su parte, los desvíos temporales actúan de manera similar a la de los canales de alivio, ya que se realiza la construcción de un canal sobre la orilla del cauce, con el objetivo de disminuir el flujo de la corriente principal y a su vez los niveles de agua aguas abajo de la obra; Sin embargo, la diferencia radica en la temporalidad de la solución.</p>	<p>Se efectúa la apertura de un canal con ancho “L” para que una parte del caudal transportado por el cauce principal “Qa” ingrese por este canal y la magnitud del caudal aguas abajo “Qb” disminuya. El canal de alivio proyectado debe contar con la capacidad hidráulica para transportar un caudal “Qd” hacia algún punto de descarga definido de acuerdo a lo citado previamente. En el caso de los canales de desvío, el agua que ingresa por este canal es conducida hacia una “zona inundable”, la cual debe contar con la capacidad de almacenar el volumen de agua captado durante la duración del hidrograma, para después retornar el volumen de agua hacia la corriente principal una vez hayan bajado los niveles de agua en él y haya disminuido la intensidad de la lluvia. En la Figura 2-13 se observan los procesos descritos para cada uno de los casos.</p>  <p>Figura 2-13: Esquema funcionamiento canal de alivio y desvío temporal.</p> <p>Fuente: (Gracia & Maza, 1997)</p>

Fuente: Autor.

2.4.2 Comparación de alternativas

Con el fin de presentar una visión y reconocimiento general de las medidas estructurales expuestas, se presenta a continuación un cuadro comparativo en el que se resaltan las ventajas y desventajas de cada una de las medidas, junto con los factores de evaluación más importantes a tener en cuenta en el momento de la elección de la alternativa de mitigación contra la inundación en la zona de estudio.

Tabla 2-11: Cuadro comparativo alternativas de mitigación de la inundación.

Aspecto	Obras longitudinales		Alteración del cauce		Desviación de inundaciones	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Económico	<p>Cuando las obras son construidas con materiales provenientes del lecho del río o de la zona, los costos directos, de operación y mantenimiento pueden disminuir, ya que no exigen grandes cantidades de materiales adicionales, ni equipos de instalación especiales.</p> <p>Generalmente, cuando se realiza la construcción de este tipo de obras no se requiere la compra de predios privados, ya que el eje longitudinal de las obras se proyecta sobre las orillas del cauce o inmerso en este mismo, haciendo parte del lecho activo de la corriente.</p>	<p>Cuando este tipo de obras son construidas a partir de materiales artificiales como lo puede ser el concreto o los gaviones, los costos directos, de operación y mantenimiento pueden llegar a ser muy elevados, ya que se requiere mano de obra calificada para la construcción e instalación del tipo de material seleccionado. Para su ejecución se requieren equipos de instalación especiales y uso de maquinaria pesada.</p>	<p>Al no involucrarse directamente con la construcción de una estructura o componente estructural en ningún material (dragados), los costos directos de su ejecución pueden ser menores en comparación a las obras longitudinales para una misma longitud de estudio, ya que solo se incurre en el uso de maquinaria pesada para la ejecución de las obras.</p> <p>La ejecución de las labores de alteración del cauce no requiere la compra de predios privados, ya que estas actividades se realizan directamente sobre el lecho del cauce.</p>	<p>Se recomienda aplicar el dragado únicamente en situaciones en las que no se cuente con altas cargas de sedimentos aguas arriba de la zona dragada, ya que, de ser así, será una medida temporal y cada vez que se produzca el depósito de los sedimentos será necesario realizar procesos de dragado continuos para evitar que el río vuelva a sus condiciones iniciales, lo que la convierte en una medida costosa y de un constante mantenimiento en tramos largos para que la solución pueda ser aceptable</p>	<p>Teniendo en cuenta que se cuenta con zonas de inundación cercanas al cauce, lo que se traduce en longitudes menores para los canales de alivio y desvíos temporales, puede considerarse como la más económica de las propuestas presentadas, ya que su ejecución al igual que las alteraciones del cauce no requieren grandes construcciones de infraestructura para funcionar.</p>	<p>Por el contrario, si no se cuenta con zonas de inundación cercanas, es decir, longitudes muy elevadas para los canales de alivio y los desvíos temporales, el costo de la construcción puede llegar a ser el más elevado de las alternativas expuestas.</p> <p>La selección de esta alternativa requiere la compra de predios privados para poder ejecutar la construcción de los canales de alivio y los desvíos temporales. El costo se elevará en función del número de predios privados requeridos.</p>

Aspecto	Obras longitudinales		Alteración del cauce		Desviación de inundaciones	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Técnico	<p>Debido a la gran magnitud de las obras, presenta una mayor confiabilidad y seguridad para las poblaciones ante los eventos que generen el aumento de los niveles de agua en el cauce.</p> <p>La diversidad de materiales en los que pueden ser construidos, permite una elección del tipo de material en función de los factores propios de la zona y de la disponibilidad de estos mismos a nivel regional.</p> <p>Partiendo de una buena ejecución de la obra, el mantenimiento que se debe realizar a la obra por factores externos una vez haya sido ejecutada es menor en comparación al de las demás alternativas.</p> <p>Si se opta por desarrollar las obras longitudinales con materiales provenientes del lecho del río, los tiempos de ejecución de la obra serán bajos.</p>	<p>En comparación con alternativas más prácticas, se requiere de un alto grado de conocimientos técnicos para poder estimar las dimensiones más óptimas de la obra, ya que de lo contrario se puede incurrir en un sobredimensionamiento o en su defecto en una falla de funcionalidad, generando un detrimento patrimonial y/o poniendo en riesgo la vida de los habitantes.</p> <p>Requiere una mano de obra más calificada para la ejecución de las obras, en especial si estas van acompañadas con alguna protección especial contra otros problemas fluviales como la erosión y socavación.</p> <p>Si la obra es construida a partir de materiales artificiales, se genera una dependencia de factores y entidades externas necesarias para el desarrollo de la obra.</p>	<p>Se presenta tal vez como la solución más rápida y “sencilla” de ejecutar, teniendo en cuenta que no se requiere una mano de obra especializada para ejecutar las actividades de dragado.</p> <p>El dragado permite aumentar las profundidades del cauce en algunas zonas, lo que a su vez incrementa la capacidad de transporte del agua y disminuye el riesgo de inundación.</p> <p>El dragado y la canalización de un cauce eliminan los montículos y obstáculos que se puedan presentar en este y que generen un represamiento de la corriente en algunos puntos, permitiendo un flujo laminar y uniforme.</p>	<p>Como se mencionó previamente, si la carga de sedimentos aguas arriba de la zona de dragado es muy alta, se requerirá de un mantenimiento continuo en tramos largos para que la solución pueda ser aceptable.</p> <p>La canalización de los cauces, puede generar el aumento de las velocidades en el cauce, las cuales pueden elevarse de tal manera que se generen nuevos problemas fluviales asociados a la erosión y la sedimentación.</p> <p>Los picos de las crecientes instantáneas pueden ser trasladados aguas abajo y terminar afectando alguna otra zona habitable que recibirá esta creciente de manera abrupta</p>	<p>Si se cuenta con el espacio adecuado y las zonas inundables requeridas, puede actuar como una medida rápida y eficiente para evitar las inundaciones en un sitio específico sin trasladar el problema a otro punto aguas abajo.</p> <p>Las zonas elegidas como zona de inundación pueden estar asociadas a zonas agrícolas y ganaderas que no se verán afectadas en gran medida ante un evento de inundación.</p> <p>Puede funcionar como una obra secundaria para disminuir las dimensiones y/o volúmenes de una obra principal.</p>	<p>Si la elevación de las zonas de inundación definidas para los canales se encuentra muy por encima del lecho del cauce, no será viable su ejecución.</p> <p>Los desvíos temporales pueden actuar como soluciones momentáneas, es decir, si se presentan crecientes instantáneas de manera continua en un lapso de tiempo corto, se producirá un desbordamiento general en la zona, que debe ser considerado a nivel de diseño.</p> <p>Para asegurar el correcto funcionamiento de la obra, se debe acompañar la construcción de los canales con otro tipo de estructuras y generar un mantenimiento continuo si se produce un taponamiento de las entradas.</p>

Aspecto	Obras longitudinales		Alteración del cauce		Desviación de inundaciones	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Ambiental	<p>Si la obra es construida con materiales provenientes del lecho del río, la generación de contaminantes y la demanda de recursos requerida no será elevada.</p> <p>En comparación con el dragado y las canalizaciones, la construcción de una obra longitudinal no afecta la biodiversidad a lo ancho del cauce, es decir el área superficial afectada será menor para una misma longitud de desarrollo.</p>	<p>Por el contrario, si la obra es construida a partir de materiales artificiales, la demanda de recursos naturales y el impacto ambiental producido por el proceso que lleva la generación e instalación de los materiales y las labores de construcción, será considerable.</p> <p>Los desechos producidos por los procesos constructivos y la disposición final de estos pueden afectar severamente el medio ambiente si no se realiza de manera adecuada y monitoreada el proceso de recolección y evacuación de desechos sólidos.</p>	<p>En comparación con las demás alternativas, la ejecución de las actividades de dragado, no requieren en gran medida del uso de materiales contaminantes.</p> <p>En el proceso de dragado se pueden remover desechos tóxicos y contaminantes que se encuentren afectando el ecosistema del cauce.</p>	<p>Si la zona dragada o canalizada abarca un gran volumen de vegetación, de una u otra manera se estaría incurriendo en un detrimento ambiental importante, ya que se atenta contra la biodiversidad existente sobre el lecho del cauce.</p> <p>La destrucción del hidro sistema o hábitat fluvial, producida por la canalización, puede afectar severamente la presencia de peces en la zona. De igual manera, debido a la resuspensión de los sedimentos producida por el dragado, los organismos que se alimentan por filtración directa se verán afectados.</p>	<p>Algunos cultivos pueden verse beneficiados al estar localizados en la zona destinada como zona de inundación.</p> <p>La construcción sobre las orillas de canales de alivio o desvíos temporales no afecta en gran medida el ecosistema y la biodiversidad del cauce a lo largo y ancho de su corriente.</p>	<p>Puede producirse un impacto ambiental negativo importante si la longitud de los canales de alivio o desvíos temporales se extiende en gran magnitud y se desarrolla sobre predios compuestos por extensiones de vegetación, cultivos agrícolas y zonas ganaderas que se verán afectadas por las labores de construcción.</p> <p>Los trámites legales ante las autoridades ambientales para hacer uso de espacios con fines de inundabilidad pueden llegar a tonarse complejos y de larga duración.</p>

Aspecto	Obras longitudinales		Alteración del cauce		Desviación de inundaciones	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Social y Gestión del Riesgo	<p>En la construcción de este tipo de obras no se presenta una afectación importante a predios privados adyacentes, teniendo en cuenta que el alineamiento del eje principal de la obra se localiza sobre el cauce activo del río o sobre sus orillas.</p> <p>Debido a que la construcción puede contemplar el uso de diferentes materiales y componentes estructurales, genera una activación importante en la economía de la región.</p> <p>La ejecución de las actividades de obra en esta alternativa requiere de una cantidad más elevada de ayudantes de obra durante un tiempo más prolongado en comparación a las demás alternativas, lo que generara una mayor tasa de empleo para los habitantes de la zona.</p>	<p>Debido al volumen de las obras a ejecutar, se puede requerir de vehículos de carga pesada para el transporte de los materiales de construcción, lo que puede llegar afectar las vías y el flujo vehicular de la zona de estudio.</p> <p>Si las obras son construidas a partir de materiales provenientes del lecho del cauce, estas pueden ser susceptibles ante movimientos en masa y eventos de sismos importantes.</p> <p>Existe una mayor confiabilidad por parte de la población de la zona ante este tipo de obras, lo que puede incitar al desarrollo y construcción de viviendas en zonas que aún pueden estar en riesgo.</p>	<p>Un cauce que se ha sometido a un proceso de canalización, cuenta con orillas limpias en mejor estado que a su vez permiten realizar actividades sociales a los habitantes de la zona.</p> <p>Este tipo de alternativas al encontrarse sobre el lecho activo del cauce y no conformar ningún elemento estructural (para los dragados), no se encuentran ante un riesgo de afectación por eventos de sismos.</p> <p>La canalización produce un aspecto estético a nivel visual que puede resultar agradable ante los ojos de los habitantes de la zona.</p>	<p>Al ser una construcción que puede ser desarrollada a través de maquinaria pesada con recursos del mismo lecho del río, la activación económica no será elevada en comparación a las demás alternativas.</p> <p>Los materiales y desechos recolectados en el dragado suelen ser dispuestos en zonas no adecuadas que terminan afectando la calidad de vida de la comunidad.</p>	<p>Las lagunas artificiales generadas pueden actuar como fuente de captación o riego temporal mientras se presenta el hidrograma de creciente.</p> <p>Acompañados de un diseño urbanístico y arquitectónico, los canales de alivio pueden funcionar como atractivo turístico y comercial a lo largo de su desarrollo.</p>	<p>La intervención necesaria de predios puede generar inconvenientes de tipo legal con la comunidad asentada sobre y a alrededores de los canales construidos.</p> <p>En un evento de falla del sistema las comunidades asentadas en la zona se verán mucho más afectadas por la cercanía de la inundación producida sobre los canales de alivio y desvíos temporales.</p> <p>Sin el debido seguimiento, mantenimiento y revisión, los canales se pueden convertir en un punto de descarga de otro tipo de desechos que terminaran convirtiéndose en un problema social para los implicados.</p>

Fuente: Autor.

2.5 Modelación hidráulica de ríos

La modelación implica la simulación de un fenómeno real, de tal manera que este sea conceptualizado y simplificado para posteriormente ser descrito y cuantificado (Universidad de Piura 2006, citado por (J. Romero, 2015), p.24). Enfocada en el área de la hidráulica fluvial, esta nos permite simular situaciones específicas de los ríos a través de modelos hidráulicos desarrollados para representar los diferentes tipos de flujo existentes en la naturaleza. (Chow, 1959)de manera general define los siguientes tipos de flujo:

- **A = Flujo permanente:** La profundidad de flujo no varía en función del tiempo.
- **B = Flujo no permanente:** La profundidad de flujo varía en función del tiempo.

Se reconocen tres tipos de modelos hidráulicos con los que se pueden representar los tipos de flujo presentados, como los son: los modelos físicos, los modelos analógicos y los modelos matemáticos (Aristizábal, 2020). En la ejecución de este proyecto se hará uso de un modelo matemático para representar la problemática expuesta. En general, los modelos matemáticos buscan desarrollar soluciones eficientes a las ecuaciones de Saint Venant, las cuales describen el comportamiento del flujo con base en los principios hidráulicos de continuidad e impulso (IDEAM, 2018). Para el estudio de los efectos de la propagación de avenidas en ríos existen herramientas de modelación matemática – numérica que permiten desarrollar simulaciones con aproximaciones unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) (Bladé Castellet et al., 2014). Se destacan los trabajos comparativos de Li et al., (2021), Martínez (2013), Cuervo (2012), Timbe & Willems (2011) y Cea & Bladé, (2008). A nivel general, los modelos 1D y 2D son los más usados para efectuar las simulaciones de inundaciones fluviales (Bladé et al., 2014)

Así mismo, existen algunas investigaciones en las que se ha hecho uso del modelo IBER en la comparación de modelos 1D y 2D para obtener la llanura de inundación de una corriente, como lo son los trabajos de Kaira et al.,(2021), Ortega & Rebolledo (2020), (Burboa,2018), Ochoa et al., (2016) y Collazos et al., (2018). Los resultados generales de estos y otros trabajos consideran al modelo bidimensional IBER como una herramienta idónea para la modelación de cauces para la obtención de zonas de inundabilidad.

2.5.1 Modelo IBER

IBER es un modelo matemático bidimensional horizontal de uso libre usado para ejecutar simulaciones hidráulicas. Fue desarrollado en España (2010) de manera conjunta por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA – Universidad de Coruña), el Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), el Instituto Flumen (Universidad de Catalunya y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) y suscitado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Entre sus aplicaciones se encuentra la simulación de flujo libre en cauces, la obtención de manchas de inundación, el cálculo hidráulico de encauzamientos y redes de canales en lamina libre, el cálculo de corrientes de marea en estuarios y la evaluación de los procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular (Bladé et al., 2014). Como su nombre lo expresa, los modelos bidimensionales funcionan en un dominio bidimensional con tres variables definidas en cada punto del dominio: La profundidad de la lámina de agua y las dos componentes de la velocidad horizontal (García, 2017), dando lugar a ecuaciones que representan la evolución de dichas variables a través del tiempo y que son conocidas como ecuaciones de Saint Venant bidimensionales; Dichas ecuaciones no son resolubles de manera analítica en casos prácticos, por lo que se requiere de métodos numéricos para poder encontrar su solución. El modelo hidrodinámico IBER combina los módulos de sus aplicaciones utilizando el método numérico de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones completas de Saint Venant en 2D (Huber et al., 2020), es decir, las ecuaciones de onda dinámica.

- **Ecuaciones de Saint Venant:** También conocidas como ecuaciones de aguas poco profundas, son obtenidas a partir del desarrollo de las leyes físicas (conservación de la masa y cantidad de movimiento) de manera conjunta con las dos primeras leyes de la termodinámica, las cuales en primera instancia para un fluido incompresible e isótropo se traducen en las ecuaciones de Navier – Stokes y en segundo lugar considerando variables medias a través del tiempo, en las ecuaciones de Reynolds (Bladé, 2005) las cuales representan un flujo tridimensional y cuya resolución exige un esquema numérico complejo y con un costo computacional muy elevado (Ver Ecuaciones (2-19) y (2-20)).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-19)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dx_i} + \bar{b}_i + \frac{1}{\rho} \frac{d}{dx_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho u'_i u'_j \right) \quad (2-20)$$

Donde:

$\bar{u}_{i,j,k}$ = Promedio temporal de las componentes de la velocidad.

$u'_{i,j,k}$ = Fluctuaciones turbulentas de las componentes de la velocidad $u_{i,j,k}$.

$\mu(\partial \bar{u}_i / \partial x_j)$ = Tensiones laminares.

$-\rho \overline{u'_i u'_j}$ = Tensiones turbulentas o tensiones de Reynolds.

Para contrarrestar esta complejidad y poder representar las condiciones de un cauce a través de un flujo bidimensional, se puede efectuar una integración en la variable de la profundidad para eliminar la dimensión vertical (teniendo en cuenta que el valor de las variables cambia poco en una misma vertical) y realizar algunas simplificaciones bajo los siguientes supuestos: Se asume un predominio de la dimensión horizontal sobre la vertical, pendientes del fondo del cauce suaves y una distribución hidrostática de las presiones en la dimensión vertical (Blade & Gómez, 2006). Aplicando la integración a las ecuaciones de Reynolds expuestas desde la cota del fondo hasta la superficie libre y considerando las fuerzas de la gravedad y la rotación de la tierra, se da lugar a las Ecuaciones de Saint Venant bidimensionales (expresadas en forma conservativa) que se exponen a continuación en las Ecuaciones (2-21), (2-22) y (2-23).

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial h u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial h u_2}{\partial x_2} = 0 \quad (2-21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h u_1) + \frac{\partial}{\partial x_1} (h u_1^2) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h u_1 u_2) = -g h \frac{\partial}{\partial x_1} (h + z_0) - \frac{\tau_{0x_1} + \tau_{sx_1}}{\rho} + f h u_2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_1} (h T_{x_1 x_1}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_2} (h T_{x_1 x_2}) \quad (2-22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h u_2) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h u_2^2) + \frac{\partial}{\partial x_1} (h u_1 u_2) = -g h \frac{\partial}{\partial x_2} (h + z_0) - \frac{\tau_{0x_2} + \tau_{sx_2}}{\rho} + f h u_1 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_1} (h T_{x_1 x_2}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_2} (h T_{x_2 x_2}) \quad (2-23)$$

Donde:

u_1, u_2 = Componentes de velocidad.

h = Lámina de agua.

g = Aceleración de la gravedad.

ρ = Densidad del agua.

τ_s = Tensores de tensión contra la superficie libre.

τ_0 = Tensores de tensiones contra el fondo.

Z_0 = Cota del fondo.

f = Coeficiente de Coriolis.

$T_{x_i x_j}$ = Tensores de esfuerzos turbulentos de Reynolds

Si se deja de un lado la fuerza de Coriolis, teniendo en cuenta que para los cauces de los ríos no suele ser significativa (Bladé, 2005), se cambia la notación u_1 e u_2 por U_x y U_y y se reorganiza considerando los efectos de la turbulencia y el rozamiento superficial del viento, se tendrán las ecuaciones de Saint Venant definidas por el modelo IBER las cuales serán resueltas a partir del método de volúmenes finitos. (Ver Ecuaciones (2-24), (2-25) y (2-26)).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (2-24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(h U_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(h U_x^2 + g \frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(h U_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \quad (2-25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(h U_y) + \frac{\partial}{\partial x}(h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2}\right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \quad (2-26)$$

Donde:

U_x, U_y = Velocidades horizontales promedio en dirección z.

Z_b = Cota del fondo.

τ_s = Fricción en la superficie libre debida al rozamiento por el viento.

τ_b = Fricción debida al rozamiento del fondo.

ν_t = Viscosidad turbulenta.

Los tensores de fricción en el fondo y en la superficie se pueden evaluar a partir de las ecuaciones de Manning y de Van Dorn (a 10 m de altura) respectivamente. (Ver Ecuaciones (2-27) y (2-28)).

$$\tau_{b,x} = pgh \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^3}; \tau_{b,y} = pgh \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^3} \quad (2-27)$$

$$\tau_{s,x} = pC_{VD} |V_{10}| V_{x,10}; \tau_{s,y} = pC_{VD} |V_{10}| V_{y,10} \quad (2-28)$$

Donde:

n = Coeficiente de Manning.

$[U]$ = Modulo de la velocidad.

$V_{x,10}, V_{y,10}$ = Componentes de la velocidad del viento a 10 m de altura.

$[V_{10}]$ = Modulo de la velocidad del viento a 10 m de altura.

C_{VD} = Coeficiente de arrastre superficial en función de la velocidad del viento.

Por su parte, la viscosidad turbulenta es calculada a partir del promedio en profundidad de los tres modelos de turbulencia que incluye el modelo IBER: modelo parabólico (Ver Ecuación (2-29)) el cual considera únicamente la turbulencia generada por la fricción de fondo; modelo de longitud de mezcla (Ver Ecuaciones (2-30)) el cual considera la turbulencia generada por la fricción de fondo y la turbulencia generada como consecuencia de los gradientes horizontales de velocidad y el modelo k- ϵ de Rastogi y Rodi (Ver

Ecuaciones (2-31), (2-32) y (2-33)) el cual al ser el más completo de todos, relaciona la energía cinética turbulenta “k” con la tasa de disipación de energía turbulenta “ε” considerando la turbulencia generada debido a la fricción en el fondo, los gradientes de velocidad y de disipación y el transporte convectivo. (García, 2017).

Modelo parabólico

$$v_t = 0.068\sqrt{gn}|U|h^{\frac{5}{6}} \rightarrow (2-29)$$

Modelo de longitud de mezcla

$$v_t = |\min(0.267\kappa h, \kappa d_{wall})|^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{u_f}{\kappa h}\right)^2}; S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right); u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{p}} \rightarrow (2-30)$$

Modelo de Rastogi y Rodi

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon \quad (2-31)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-32)$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; c_k = c_f^{-\frac{1}{2}}; c_\varepsilon = 3.6c_k^2 c_{\varepsilon 2} c_\mu^{\frac{1}{2}}; c_f = \frac{\tau_b}{p} \frac{1}{|U|^2} \quad (2-33)$$

$$c_\mu = 0.09; c_{\varepsilon 1} = 1.44; c_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1.31$$

Donde:

S_{ij} = Tensor de deformación.

u_f = Velocidad de fricción de fondo.

K = Constante de Von Karman (0.41).

d_{wall} = Distancia hasta la pared más cercana.

k = Energía cinética turbulenta.

ε = Tasa de disipación de energía turbulenta.

$c_\mu, c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ = Coeficientes método Rastogi y Rodi.

Ahora bien, si se desprecia la fuerza de Coriolis, el rozamiento superficial por viento y las tensiones turbulentas, las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant a resolver por el módulo hidrodinámico del modelo IBER quedaran expresadas de la siguiente manera (Ver Ecuaciones (2-34), (2-35) y (2-36)). Vale la pena mencionar que a medida que se realizan simplificaciones, el modelo asume condiciones de onda cinemática u onda difusiva (Caro, 2015)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (2-34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x^2) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} \quad (2-35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_y^2) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} \quad (2-36)$$

La resolución de estas ecuaciones, permitirá conocer la evolución del calado y de las componentes de la velocidad en cada punto de cálculo a través del tiempo. Para resolver las ecuaciones diferenciales de Saint Venant 2D por medio del método de volúmenes finitos, el modelo requiere una discretización espacial del dominio de evaluación (Rincón et al., 2017), lo que se traduce en la definición de geometría de mallado y unas condiciones de contorno.

- **Geometría de mallado:** Para realizar la discretización espacial, es necesario dividir el dominio en celdas de menor tamaño (volúmenes finitos), en donde cada celda representa el valor medio de las variables dependientes en un instante “t” (C.B. Vreugdenhi, 1994) que al unirse conforman una malla de cálculo. Dicha malla puede ser estructurada o no estructurada y regular o irregular, ya que el modelo permite que la discretización este conformada por celdas con forma triangular y cuadrilateral. Caro (2015) recomienda que para su utilización en hidráulica fluvial esta sea de tipo no estructurada, debido a la facilidad de adaptación a la geometría introducida y la optimización en el número de elementos en función del tamaño requerido. Adicionalmente, cada una de las celdas asociadas al dominio definido en el mallado debe contar con una elevación y una rugosidad definida, para lo cual se puede hacer uso de exportación de modelos digitales de elevación de la zona y del coeficiente de rugosidad de Manning asociado a los tipos de suelo del dominio.

Modelo de elevación digital: Conocido de manera abreviada como DEM (Digital Elevation Model) o MDT (Modelo Digital del Terreno) hace referencia a una matriz de datos que representa la distribución de las cotas de elevación en un territorio delimitado, es decir, una forma de representar la superficie del cauce (Giménez, 2002). Hoy en día puede ser generado con ayuda de las herramientas de los sistemas de información geográficos y exportado a la interfaz de IBER para su uso.

Coficiente de rugosidad de Manning (n): El modelo IBER solicita la asignación de las rugosidades de Manning (n) de los diferentes tipos de suelo existentes sobre el tramo de simulación. Para asignar los valores de los coeficientes de rugosidad de Manning (n), Chow, (1959) recopiló magnitudes del coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes tipos de canales y los clasificó y valoró como se expone en la **Tabla 2-12**.

Tabla 2-12: Coeficientes de rugosidad de Manning.

Tipo de Canal y descripción	$n_{\text{mín}}$	n_{prom}	$n_{\text{máx}}$
1. Cursos de agua menores (ancho crecida < 30 m)			
<i>a. Cursos de agua en planicie</i>			
1. Limpio, recto, con el caudal máximo y sin montículos ni pozas profundas.	0.025	0.03	0.033
2. Igual al anterior, pero con mayor presencia de piedras y maleza.	0.03	0.035	0.04
3. Limpio, serpenteante, con algunas pozas y bancos de arena.	0.033	0.04	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras.	0.035	0.045	0.05
5. Igual al anterior, pero con niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes.	0.04	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras.	0.045	0.05	0.06
7. Tramos lentos con malezas y pozas profundas.	0.05	0.07	0.08
8. Tramos con muchas malezas, pozas profundas y canales de crecientes con muchos árboles y arbustos bajos	0.075	0.1	0.15
<i>b) Torrentes de montaña sin vegetación en el cauce, orillas generalmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las orillas sumergidas en niveles altos.</i>			
1. Fondo: grava, guijarros y algunas rocas.	0.03	0.04	0.05
2. Fondo: guijarros y rocas grandes.	0.04	0.05	0.07
2. Planicies de inundación			
<i>a) Pastizales sin matorrales</i>			
1. Con pasto corto.	0.025	0.03	0.035
2. Con pasto alto.	0.03	0.035	0.05
<i>b. Áreas cultivadas</i>			
1. Sin cultivo.	0.02	0.03	0.04
2. Cultivos en hileras maduros.	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros.	0.03	0.04	0.05
<i>c. Matorrales</i>			
1. Matorrales esparcidos, mucha maleza.	0.035	0.05	0.07
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno.	0.034	0.05	0.06
3. Pocos matorrales y árboles, en verano.	0.04	0.06	0.08
4. Matorrales medios a densos, en invierno.	0.045	0.07	0.11
5. Matorrales medios a densos, en verano.	0.07	0.1	0.16
<i>d. Árboles</i>			
1. Saucos densos, rectos y en verano.	0.11	0.15	0.2
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños.	0.03	0.04	0.05
3. Igual al anterior, pero con una gran cantidad de retoños.	0.05	0.06	0.08
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, poco crecimiento de matorrales y nivel del agua por debajo de las ramas.	0.08	0.1	0.12
5. Igual al anterior, pero con nivel del agua por encima de las ramas.	0.1	0.12	0.16
3. Cursos de agua mayores (ancho crecida > 30 m)			
<i>a. Sección regular, sin cantos rodados ni materiales.</i>	0.025	-	0.06
<i>b. Sección irregular y rugosa.</i>	0.035	-	0.1

Fuente: (Chow, 1959)

- Condiciones de contorno:** Para poder solucionar las ecuaciones de Saint Venant 2D, la geometría de mallado debe estar bajo algunas condiciones impuestas en los contornos del dominio de calculo que la define. Dichos contornos pueden ser cerrados o abiertos, cuya diferencia radica en el impedimento de entrada y salida de agua al dominio para los contornos cerrados y en la permisividad de entrada y salida de agua para los dominios abiertos (Cea, et al., 2018). En la **Tabla 2-13** se presentan las condiciones de contorno recomendadas para realizar las simulaciones en el modelo hidráulico.

Tabla 2-13: Condiciones de contorno implementadas en los contornos.

Contorno	Régimen		Condiciones Impuestas
Entrada	Caudal total	Subcrítico/Critico	Caudal total en dirección normal
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico/Critico	Caudal específico en dirección normal
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal y calado b) Caudal específico en dirección normal y cota de agua
Salida	Subcrítico		a) Calado
			b) Cota de agua
			c) Vertedero
			d) Curva de gasto
	Supercrítico/Critico		Nada

Fuente: (Cea, et al., 2018).

- **Otros parámetros:** Entre otros parámetros a considerar en la modelación hidráulica, se pueden mencionar los parámetros de tiempo de simulación, los parámetros de cálculo y la visualización y exportación de resultados en formato ASCII (García, 2017), los cuales tomaran importancia a la hora de desarrollar las simulaciones proyectadas.

2.6 Conclusión

Por medio del presente capítulo se presentaron las consideraciones teóricas relevantes al momento de abordar de manera integral y detallada aspectos fundamentales para comprender y desarrollar la proyección de obras de mitigación contra la inundación fluvial en un cauce. Los conceptos explorados se enfocaron principalmente en función de cuatro puntos principales: La clasificación de los cauces, la caracterización geomorfológica y pluviométrica de una cuenca y su cauce, las diferentes medidas existentes para hacer frente a las inundaciones fluviales y las características principales del modelo hidráulico bidimensional IBER.

Fue posible evidenciar la variedad de clasificaciones de un cauce, estudiadas por diversos autores en función de diferentes características (edad, trazado, carga de fondo, sinuosidad y demás) y reconocer los parámetros más influyentes en la caracterización geomorfológica de una cuenca y su cauce (parámetros de forma, parámetros de red de drenaje y parámetros de

relieve) los cuales de manera conjunta con la evaluación de las precipitaciones y los caudales, permitirán obtener un enfoque holístico de la problemática expuesta. Debido a que se presentó un enfoque netamente sobre las medidas estructurales, se identificaron tres tipos de medidas principales para hacer frente al desafío que impone una inundación fluvial: obras longitudinales, alteración del cauce y desviación de las inundaciones y posteriormente se realizó un análisis descriptivo y comparativo entre estas. Finalmente se reconocieron los tipos de modelos hidráulicos existentes (físicos, analógicos y matemáticos) usados para representar los diferentes tipos de flujo generados en la naturaleza y por medio de la recopilación de algunos trabajos desarrollados en el área de la hidráulica fluvial, se evidenció el gran acogimiento que ha tenido el modelo hidráulico matemático bidimensional de libre acceso IBER para la obtención de manchas de inundación en cauces, el cual ejecuta la resolución de las ecuaciones de Saint Venant 2D a partir del método numérico de volúmenes finitos, acompañado de una serie de condiciones de entrada al modelo como geometría de mallado y condiciones de contorno.

De esta manera, se espera que con los conceptos expuestos en este capítulo, el lector haya podido conocer y comprender los aspectos más relevantes necesarios para la resolución y análisis de los dos capítulos posteriores, en donde se pondrá en práctica la aplicación de la teoría presentada a través del desarrollo de las metodologías planteadas para efectuar los análisis de resultados de cada uno de los campos estudiados, iniciando con la exposición de los resultados obtenidos presentados en el siguiente capítulo.

3. Caracterización y Resultados

3.1 Introducción

En esta sección se planea desarrollar los conceptos teóricos expuestos en el capítulo anterior necesarios para entender las causas del desbordamiento del río Guamal y comprender el comportamiento hidráulico de su corriente. Para esto, se han establecido los puntos principales para dictaminar los factores más influyentes en la inundación fluvial de la zona de estudio y plantear las alternativas preliminares para hacer frente a este problema. Por consiguiente, se iniciará con la presentación de la información recopilada de la corriente del río por medio de un contexto histórico en el que se evidencie la problemática expuesta y las soluciones que se han desarrollado a través del tiempo sobre su cauce. Seguido de esto, se exhiben los parámetros de caracterización geomorfológica y pluviométrica de la cuenca y del río. A partir de los parámetros de caracterización expuestos, se expone el plan de simulación proyectado para ejecutar las simulaciones hidráulicas en el modelo hidráulico bidimensional IBER, en donde se definen las condiciones de entrada del modelo, para la obtención y evaluación de una serie de parámetros hidráulicos de salida. Posteriormente, se presenta una exposición de los resultados obtenidos a través del desarrollo de la modelación hidráulica de cada uno de los escenarios de simulación definidos en el plan de simulación, con el fin de evidenciar de manera práctica el fenómeno de la inundación fluvial en la zona de estudio. Finalmente se realiza la clasificación del tipo de cauce según los conceptos teóricos presentados y a partir de una evaluación y análisis conjunto de los resultados globales obtenidos poder seleccionar la alternativa de mitigación contra la inundación más óptima en el capítulo posterior.

3.2 Contexto histórico río Guamal

Se presenta una identificación multitemporal de las orillas del río, acompañada de una recopilación de eventos antecedentes de inundación fluvial del río y de una recopilación y descripción de las obras ejecutadas sobre el cauce.

3.2.1 Identificación multitemporal de orillas

Con el fin de observar la variación fluvial de las orillas de la corriente del río a través del tiempo en la zona de estudio, se efectuó una identificación multitemporal de las orillas del cauce con base en la información satelital histórica disponible en Google Earth. Se presentan a continuación una serie de fotografías aéreas de los años 1969 y 1985 (**Figura 3-1**), 2002 y 2010 (**Figura 3-2**) y 2015 y 2021 (**Figura 3-3**).

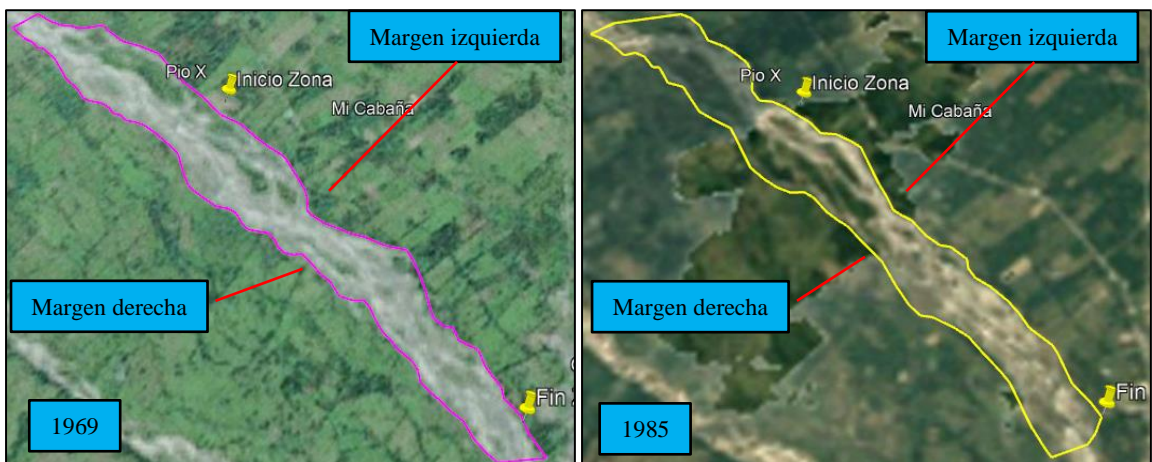


Figura 3-1: Vista aérea año 1969 y año 1985.

Fuente: Google Earth.

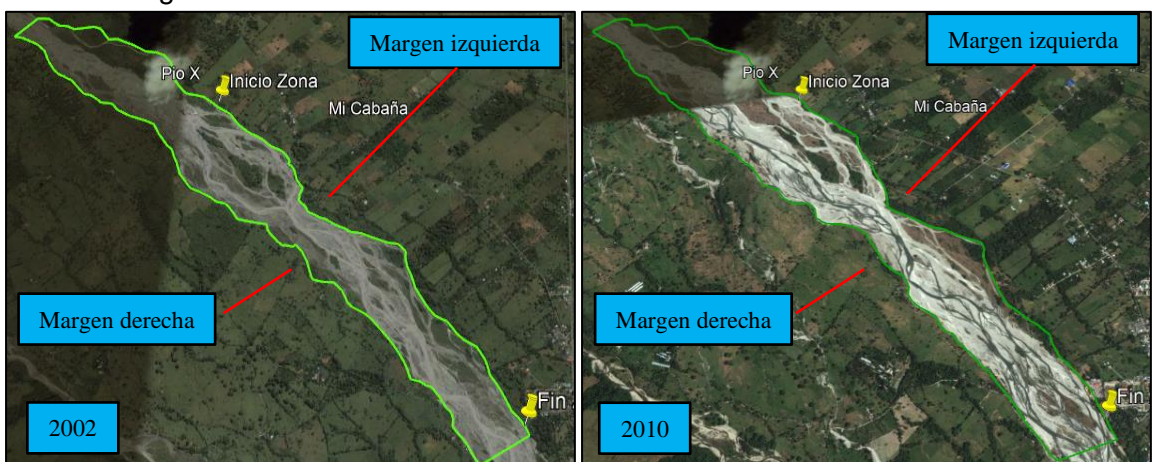


Figura 3-2: Vista aérea año 2002 y año 2010.

Fuente: Google Earth.

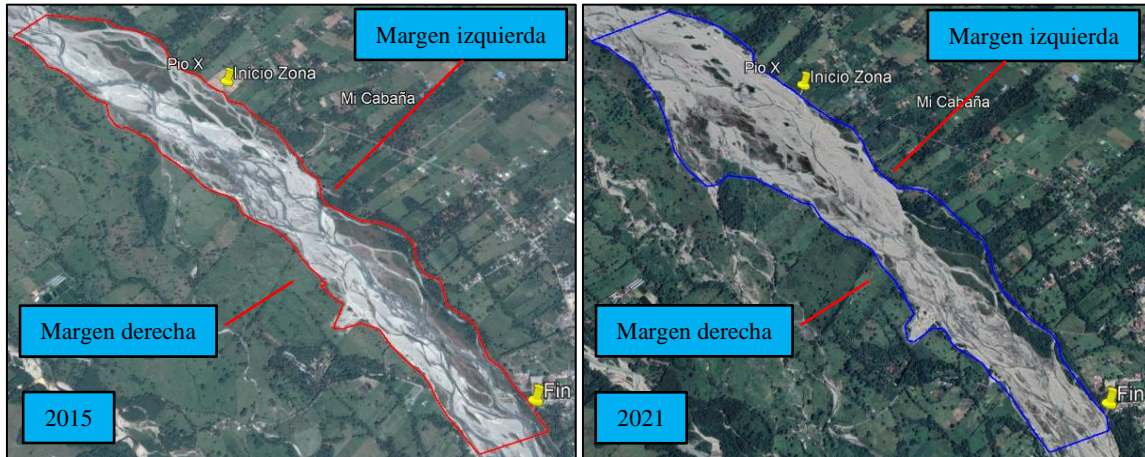


Figura 3-3: Vista aérea año 2015 y año 2021.

Fuente: Google Earth.

Una vez identificadas las orillas del río en cada periodo de manera independiente, se realizó una unificación en una sola imagen, para observar con mayor claridad el alcance de las variaciones en las márgenes del río a través del tiempo, tal y como se observa en la **Figura 3-4**.

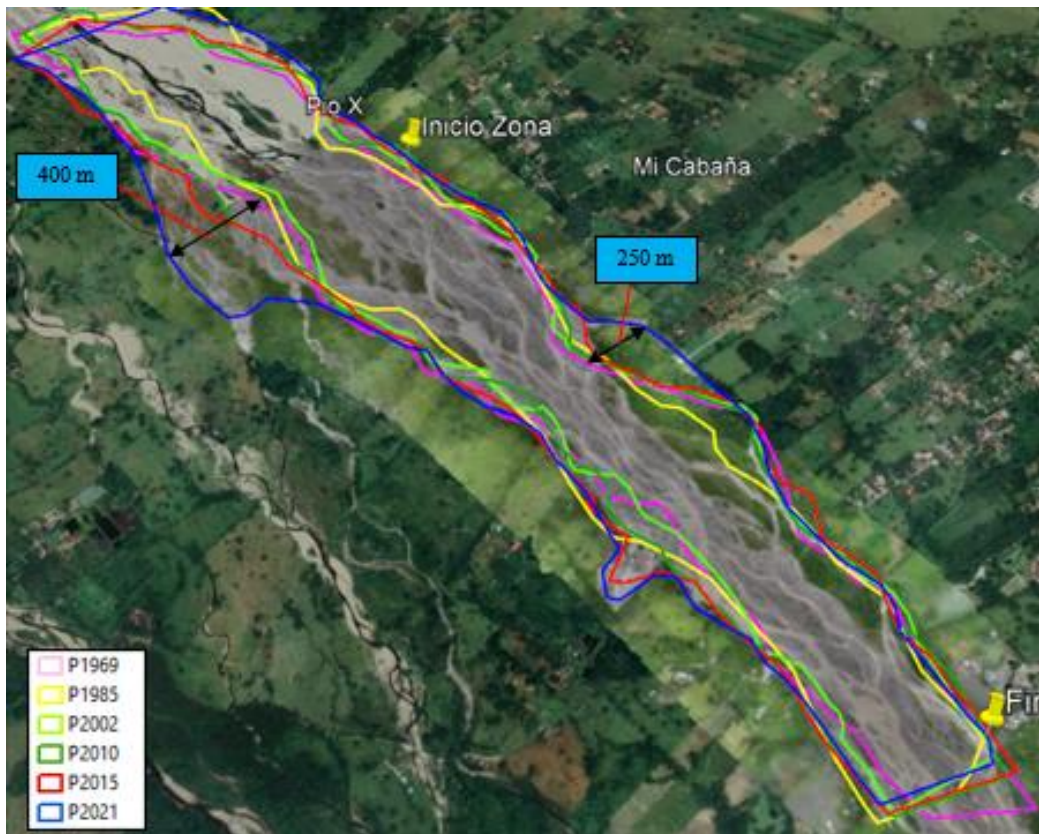


Figura 3-4: Identificación multitemporal de orillas.

Fuente: Google Earth.

3.2.2 Eventos antecedentes

Como fuente de información se usó la base de datos de la herramienta DESINVENTAR y la información plasmada en diferentes medios de comunicación.

- **Base de datos DESINVENTAR**

Se presenta en la **Tabla 3-1** una descripción de las características principales de los eventos de inundación producidos por el desbordamiento del río Guamal de los cuales se tienen registros en la base de datos de DESINVENTAR.

- **Base de datos medios de información**

Con el fin de ampliar la base de datos de DESINVENTAR, se realizó una recolección de la información plasmada en diferentes medios de comunicación en los cuales se han expuesto los eventos de inundación fluvial producidos en el municipio. En la **Tabla 3-2** se presenta la recopilación de los sucesos, junto con la descripción expresada por el medio y el título otorgado a la noticia.

Tabla 3-1: Eventos antecedentes de inundación – DESINVENTAR.

N°	Fecha			Casas destruidas	Casas Dañadas	Afectados indirectamente	Sectores afectados	Descripción Evento
	Día	Mes	Año					
1	8	6	1978				Transporte	El desbordamiento del río Guamal arrasa con numerosas viviendas localizadas en los predios rurales; La inundación en la cabecera municipal ocasiona cuantiosos daños en tiendas de víveres graneros y especialmente en la Cooperativa de Caficultores de Guamal. El tránsito automotor hacia los municipios de San Martín y Granada es interrumpido por más de tres horas dado que la magnitud de las aguas del río Guamal amenazan con arrastrar el puente que comunica al municipio con distintas regiones del Ariari.
2	28	10	1979					Desbordamientos continuos del río Guamal dejan un número no establecido de personas damnificadas y se inicia un censo para determinar el tipo de medidas que deben tomarse para auxiliar a los campesinos afectados.
3	6	4	1979				Transporte y Agricultura	Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
4	6	4	1979					Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
5	23	4	1981				Transporte y Agricultura	Desbordamiento del río Guamal produce daños graves a cementeras; A su vez el desbordamiento de un brazo del río Guamal produce el deterioro de una banca de la carretera que une al municipio de Guamal con el municipio de Castilla La Nueva; Por lo menos 40 familias campesinas tienen que ser aisladas por vía terrestre a causa de los daños producidos en las carreteras.
6	9	6	1985				Transporte	Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
7	3	4	1987				Agricultura y Ganadería	Desbordamiento de brazo del río Guamal deja un saldo de por lo menos 40 familias campesinas seriamente afectadas sobre la vereda la Isla. La violenta inundación causa daños en cementeras viviendas y cuantiosas pérdidas por la desaparición de semovientes especialmente ganado; Las aguas se llevaron parte de la banca de algunos tramos de carretera y se produjo el aislamiento de viviendas, y múltiples daños en los cultivos.

N°	Fecha			Casas destruidas	Casas Dañadas	Afectados indirectamente	Sectores afectados	Descripción Evento
	Día	Mes	Año					
8	6	6	1990				Agricultura	Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
9	16	10	1991			120	Transporte y Agricultura	Desbordamiento del río Guamal deja un saldo de 40 familias y 6 veredas afectadas. Este arrasó con varias hectáreas de cultivos y causó la muerte de numerosos animales de ganado vacuno, equino, porcino y de aves, así como la destrucción de pastos
10	4	4	1993				Transporte y Otros sectores	
11	15	5	1994			60	Transporte y Educación	
12	26	11	1998			5		
13	16	12	1999	1	10	141	Transporte y Educación	Desbordamiento del río Guamal afecta tres vías municipales.
14	5	11	2004		3	15		Desbordamiento del río Guamal en la Vereda El Carmen.
15	31	5	2004	5		150	Suplementos de agua	Desbordamiento del río Guamal, afecta gravemente el casco urbano y la vereda Pio XII
16	6	10	2005			100		Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
17	12	6	2006		3	13		Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
18	7	4	2007		3	15		Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
19	6	11	2008		32	160		
20	27	5	2008		2	7		
21	8	4	2009		16	80		Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
22	13	6	2009	3	14	85		Desbordamiento del río Guamal deja personas afectadas sin cuantificar.
23	1	12	2011	1		5		Creciente del río Guamal produce el arrastre de una persona que fue rescatada con éxito.
24	22	5	2017		4	20	Transporte	Desbordamiento del río Guamal produce inundación en las veredas PXII, El Carmen, San Miguel , allí se evacuan 4 familias y son trasladadas a un hogar de paso.
25	26	4	2017		15	75		Desbordamiento del río Guamal produce inundación en la vereda San Miguel; En promedio son 15 viviendas afectadas en donde el agua alcanzo a entrar.

Fuente: DESINVENTAR.

De acuerdo con la **Tabla 3-1**, al día de hoy se encuentran registrados 25 eventos de desbordamiento del río Guamal entre los años 1978 y 2017 ocurridos en varios sectores a lo largo de su recorrido, registrando años sin desbordamientos y años de hasta tres desbordamientos importantes de la corriente del río. En la **Figura 3-5** se presenta un gráfico de barras en función del número de eventos de inundación fluvial generados anualmente, de los cuales se tiene registro.

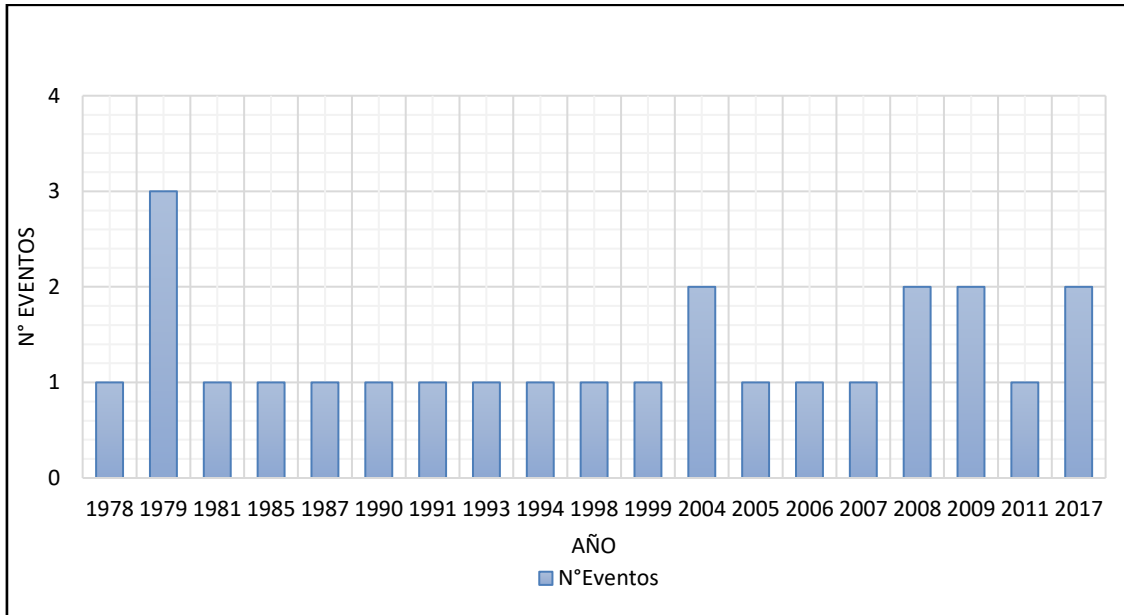


Figura 3-5: Número de eventos antecedentes de inundación – DESINVENTAR.
Fuente: DESINVENTAR.

Tabla 3-2: Eventos antecedentes – Otros medios de información.

N°	Fecha			Titulo	Fuente	Descripción
	Día	Mes	Año			
1	17	12	1999	Inundación En Guamal	El Tiempo	Desbordamiento de brazo del río Guamal. Saldo de 500 personas damnificadas, 60 viviendas afectadas, pérdidas representativas en animales y enseres. 40 menores de edad y 20 ancianos fueron reubicados.
2	4	1	2005	Se agrava problema por el río Guamal	El Tiempo	Desbordamiento del río Guamal inunda sector de las veredas la Isla y Montecristo afectando las vías veredales y dejando incomunicados a los habitantes.
3	22	5	2017	Río Guamal se llevó carretera en el Meta	W Radio	El fuerte caudal del afluente se llevó parte de la carretera que comunica con las veredas la Isla y Santa Teresa.
4	25	5	2018	Ejército Nacional evacúa familias afectadas por inundaciones en el Meta	CGFM	Desbordamiento del río Guamal afecta sectores de Puente Amarillo, la Isla, San Miguel, la Playita y Pio XII dejando 600 personas damnificadas.
5	16	6	2018	Emergencia en el municipio de Guamal, por el desbordamiento de un río	RCN	Desbordamiento del río Guamal deja más de 1500 personas damnificadas en ocho veredas, parte del casco urbano, fincas y cultivos de frutales y cítricos quedaron bajos las aguas.
6	22	8	2018	Se desbordó el río Guamal	Informando	Desbordamiento del río Guamal produjo inundaciones en la vía hacia el municipio de San Martín

Nº	Fecha			Título	Fuente	Descripción
	Día	Mes	Año			
7	2	9	2019	Emergencia por desbordamiento del río Guamal	Suram	Desbordamiento del río Guamal causo estragos en cerca de 150 viviendas y calles del centro y los barrios Las ferias y los Fundadores .
8	27	6	2020	Desbordamiento del Río Guamal deja grandes pérdidas económicas y varias familias afectadas	Nuestro llano	Desbordamiento del río Guamal produjo inundaciones en los barrios Pio XII, la Isla, el Centro y Las Villas, generando afectaciones a cientos de viviendas y alrededor de 5000 familias del municipio.
9	28	6	2020	Emergencia en el Meta por desbordamiento de río Guamal	El colombiano	Desbordamiento de brazo del río Guamal dejó más de 500 familias de los barrios Pio XII, la Isla, el Centro y las Villas.
10	5	7	2020	Lluvias dejan 1.000 familias damnificadas y 10 municipios afectados en el Meta	RCN	Desbordamientos continuos del río Guamal generan decreto de alerta roja para el municipio afectando las veredas la Isla, Pio XII y la Paz; se evacuaron seis familias, se reportaron 60 damnificados, 10 viviendas averiadas, daños pecuarios, agrícolas y piscícolas.
11	30	7	2020	Cruz Roja Meta atendió trece emergencias durante el mes de julio	Cruz roja	Desbordamiento del río Guamal deja un saldo de 60 familias afectadas.
12	15	4	2021	"Guamal se puede volver el segundo Mocoa": Alarma por riesgo de creciente de río en Meta	Caracol	Desde la vereda San Miguel, en Guamal (Meta), la ciudadanía alerta de una problemática que se viene presentando por el río Guamal. Afirman que las constantes crecientes amenazas con graves afectaciones que incluso podrían costar vidas.
13	26	5	2022	Vereda la Isla, en Guamal, sigue en condiciones de riesgo en temporadas de lluvias	Periódico del Meta	La comunidad de este municipio alertó sobre la creciente del afluente cuando en la noche del jueves generó inundación en la vereda Pío XII. Además de la vereda Pío XII, sectores como la Isla, que está a la mitad de un brazo del río Guamal presentan riesgo para las casi 40 familias que habitan ahí.
14	11	7	2022	Fuertes lluvias mantienen en alerta a 17 municipios en el Meta	Radio Nacional	Las lluvias, que se generan con mayor intensidad desde el pasado fin de semana, tienen en riesgo a alrededor de 17 municipios del departamento del Meta, donde los distintos organismos de socorro realizan la atención de la población afectada.

Fuente: Medios de comunicación.

En la recopilación de información de los medios de comunicación acerca de las inundaciones fluviales que ha sufrido la comunidad como consecuencia del desbordamiento del río Guamal, se encontraron registros de 14 eventos producidos entre los años 1999 y 2022 con cuatro de ellos generados en el año 2020. Al igual que para los eventos expuestos previamente en la base de datos de DESINVENTAR, se describe el fuerte daño producido a lo largo de los años en la sociedad y sus diferentes componentes como consecuencia de estas inundaciones, en especial las afectaciones producidas a las viviendas y la cantidad de damnificados considerables en cada evento. Esta información se representa gráficamente en la **Figura 3-6**, en donde es notable la ocurrencia continua de los desbordamientos e inundaciones fluviales para el periodo 2017 – 2022, es decir, un fenómeno recurrente que con el pasar de los años sigue afectando al municipio en diferentes aspectos

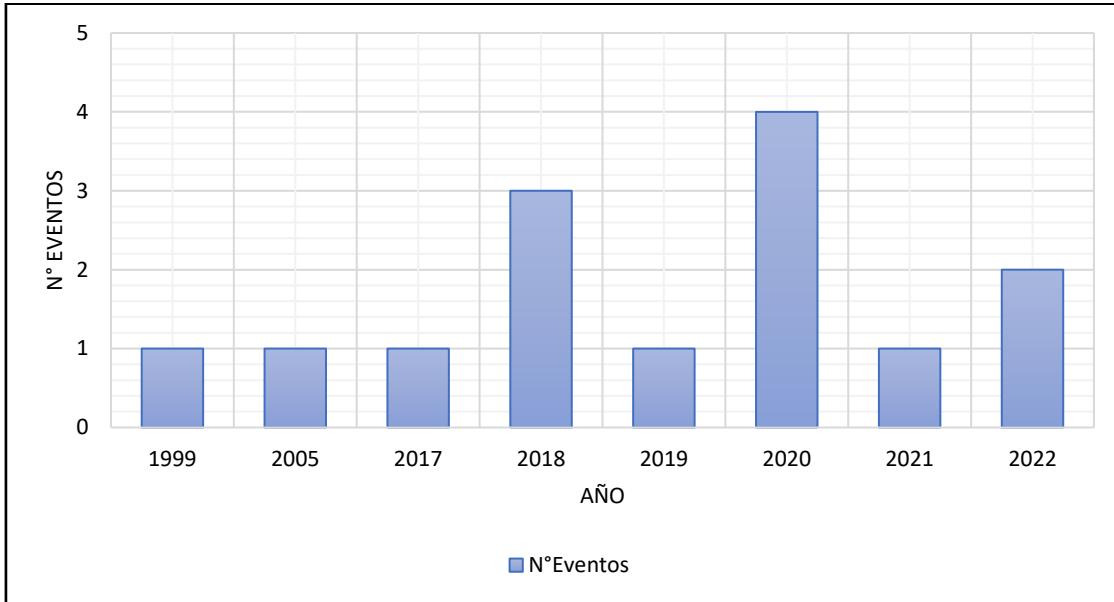


Figura 3-6: Número de eventos de antecedentes de inundación – Otros medios.
Fuente: Medios de comunicación.

A manera de contraste entre las dos bases de datos recopiladas, se ha realizado la unificación de los eventos de inundación registrados de manera independiente, obteniendo un total de 37 eventos de inundaciones fluviales entre el periodo 1978 – 2022 cuyo gráfico se presenta en la **Figura 3-7** resaltando los meses en los que se generó el evento e indicando sobre las barras los meses adicionales para los años con más de un evento.

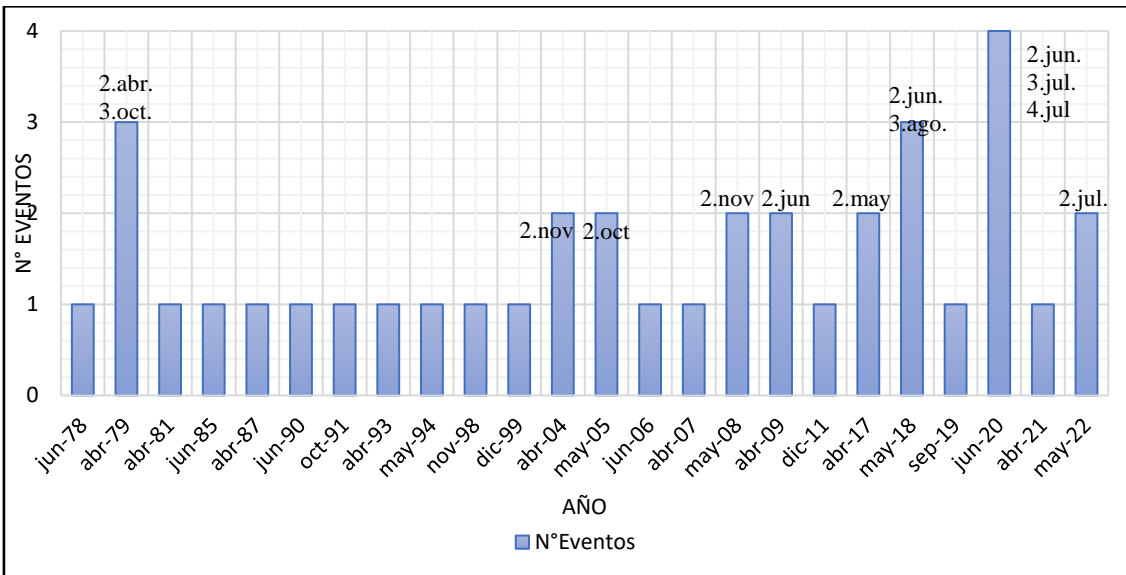


Figura 3-7: Número de eventos antecedentes de inundación – Total registrado.
Fuente: DESINVENTAR & Medios de comunicación.

Un hallazgo importante obtenido a partir de la **Figura 3-7**, se encuentra asociado a los periodos de recurrencia histórica a lo largo del año de las inundaciones generadas. Esta apreciación se presenta a manera de porcentaje en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3: Eventos de inundación por meses.

Mes	N° Eventos	%
enero	0	0.0
febrero	0	0.0
marzo	0	0.0
abril	10	27.0
mayo	6	16.2
junio	8	21.6
julio	3	8.1
agosto	1	2.7
septiembre	1	2.7
octubre	3	8.1
noviembre	3	8.1
diciembre	2	5.4
Total	37	100

Fuente: DESINVENTAR & Medios de comunicación.

3.2.3 Obras ejecutadas

De igual manera, se realizó una recopilación de los proyectos estatales de obras de construcción que han sido desarrollados en diferentes puntos del río Guamal a lo largo de su recorrido, para hacer frente a las inundaciones repetitivas sobre las zonas vulnerables. Se presenta de manera cualitativa en la **Tabla 3-4** una descripción del año y del objeto del proyecto desarrollado y en la **Tabla 3-5** su localización inicial y el tipo de obra ejecutado.

Tabla 3-4: Obras ejecutadas históricamente.

N°	Inicio	Objeto	Fin	Obra
1	2009	Construcción de obras de protección y obras biomecánicas en los ríos Guamal y Humadea, en desarrollo del proyecto 2008501500123.	2009	Gaviones
2	2010	Construcción obras de protección y obras biomecánicas en los ríos Guamal, Humadea y caño Grande Etapa 2, en desarrollo del proyecto 2008501500123.	2011	Gaviones
3	2011	Construcción de obras de protección y obras biomecánicas en los ríos Guamal y Humadea Etapa 3, en desarrollo del proyecto 2008501500123.	2012	Gaviones
4	2011	Construcción del dique 1 y culminación del dique 2 de las obras de mitigación del riesgo por inundación a través del manejo y control de crecientes y socavación en la margen derecha del río Guamal, municipio de Guamal - Meta.	2013	Gaviones
5	2016	Construcción de obras de protección sobre la margen derecha del río Guamal, en el sector San Antonio en el municipio de Castilla la Nueva.	2017	Gaviones
6	2016	Construcción de obras de protección sobre la margen derecha del río Guamal, en el sector Puente Hormiga en el municipio de Castilla la Nueva.	2017	Gaviones
7	2019	Construcción de obras de protección en las márgenes del río Guamal en el sector La Playita del municipio de Castilla la Nueva - Meta.	2021	Gaviones

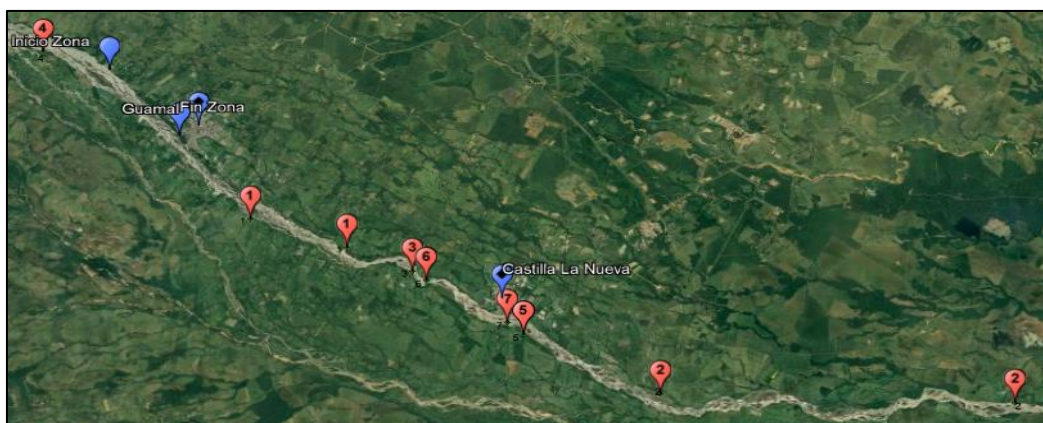
Fuente: SECOP.

Tabla 3-5: Localización obras coordenadas planas.

Id	Descripción obra	L (m)	X	Y
1	Gaviones 2.0X1.0X1.0 en malla triple torsión calibre 12" de acuerdo a INCONTEC 5333.	200	1038546.00	916690.00
			1035760.00	917640.00
2		250	1057391.00	911571.00
			1047454.00	911848.00
3		N/A	1040423.00	915884.00
4		750	1029511.70	923400.46
5		N/A	1043601.46	913795.65
6	140	1040825.00	915579.00	
7	860	1043138.52	914183.79	

Fuente: SECOP.

En la **Figura 3-8** se presenta la localización de las obras ejecutadas. Vale la pena mencionar que en algunos de los proyectos desarrollados se han ejecutado obras en dos puntos diferentes dentro del mismo contrato.

**Figura 3-8:** Localización obras ejecutadas.

Fuente: SECOP – Google Earth.

Una vez reconocida la existencia de la problemática expuesta, junto con las soluciones que se han desarrollado para hacer frente al fenómeno de la inundación fluvial, se continuó con el desarrollo de la caracterización geomorfológica de su cuenca y cauce para poder establecer los parámetros más influyentes en la generación de está.

3.3 Caracterización geomorfológica

A continuación, se presenta la caracterización de las condiciones geomorfológicas de la cuenca hidrográfica del río Guamal. Para esto, se efectuó inicialmente una descripción cualitativa de la corriente del río Guamal y posteriormente se definió la delimitación de la cuenca para continuar con la evaluación.

3.3.1 Corriente hídrica

El río Guamal presenta su nacimiento en la parte alta de las montañas de la cordillera oriental a una distancia aproximada de 30 km en dirección Noroeste del punto de estudio tal y como se observa en la **Figura 3-10**. El desarrollo de la corriente hídrica hasta la zona de evaluación se encuentra únicamente sobre la superficie territorial del municipio de Guamal. A partir de allí continua en dirección Sureste para realizar su desemboque al río Metica a una distancia aproximada de 50 km aguas abajo de la zona de evaluación. En la **Tabla 3-6** se presentan las coordenadas geográficas del nacimiento del río Guamal y la zona en donde se desarrollará la proyección de las obras de mitigación.

Tabla 3-6: Coordenadas geográficas río Guamal.

Sitio	N	O
Nacimiento río Guamal	4°5'40.20"	73°57'24.66"
Inicio zona evaluación	3°53'51.91"	73°47'38.55"
Final zona evaluación	3°52'37.54"	73°46'29.59"

Fuente: Autor.

3.3.2 Delimitación cuenca hidrográfica

La delimitación de la cuenca hidrográfica del río Guamal se realizó a partir de un DEM de resolución de 4.77x4.77 pixeles, presentado en la **Figura 3-9** a través del sistema de información geográfico ArcGIS:

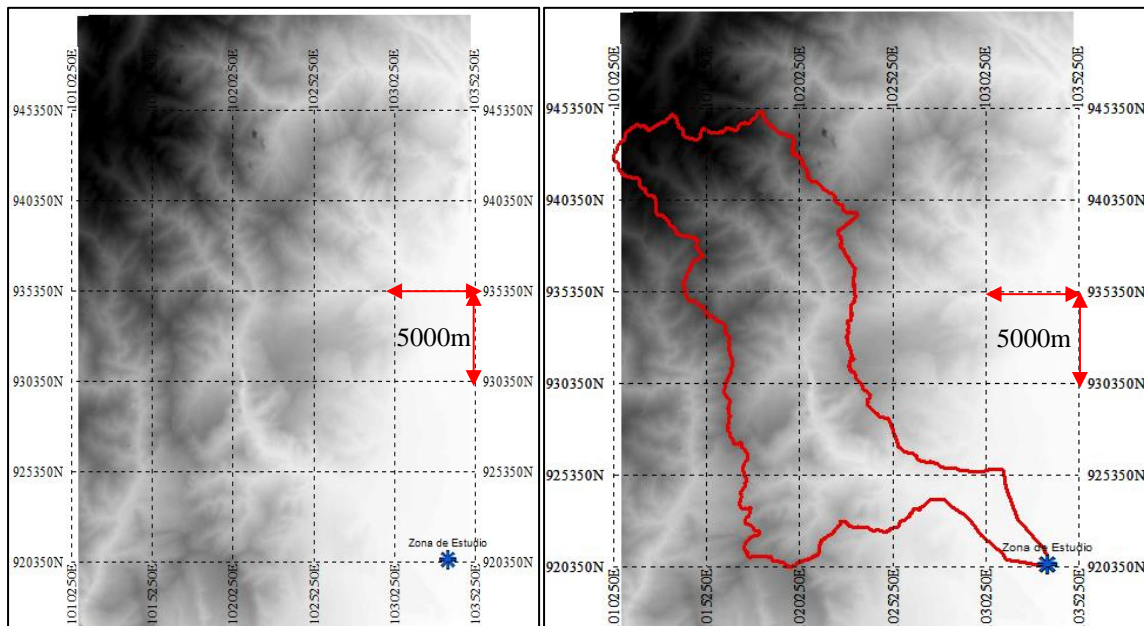


Figura 3-9: Delimitación cuenca hidrográfica río Guamal.

Fuente: LandViewer – Apoyado en ArcGIS.

Se puede observar cómo sobresale la red de drenaje en el modelo de elevación digital. Con el fin de visualizar de manera más acertada la variación del terreno en la cuenca, se presenta en la **Figura 3-10** la vista tridimensional de la cuenca delimitada.

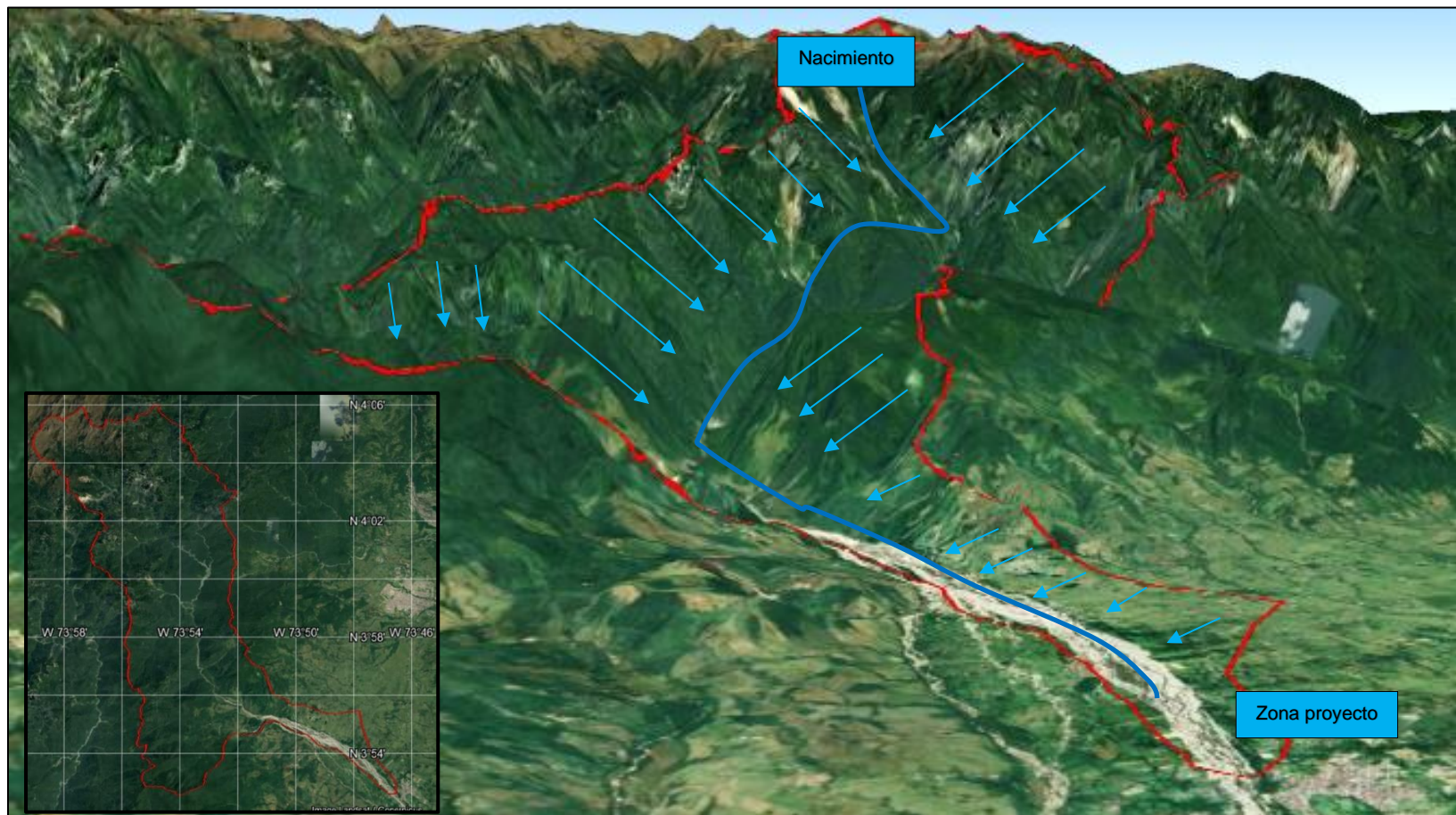


Figura 3-10: Vista tridimensional cuenca río Guamal.

Fuente: Autor – Apoyado en ArcGIS y Google Earth.

3.3.3 Parámetros de forma

Los parámetros de forma fueron obtenidos con base en las ecuaciones (2-3) y (2-4), calculadas a partir de la magnitud del área, el perímetro, la longitud axial y el ancho medio (2-2). Los valores de los parámetros base se consignan en la **Tabla 3-7** y en la **Figura 3-11** se representa la variación de la magnitud de la longitud axial en la cuenca.

Tabla 3-7: Parámetros base de forma.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Área	211.13	km ²
Perímetro	101.61	km
Longitud axial	35.39	km
Ancho medio	5.97	km

Fuente: Autor – Apoyado en ArcGIS.

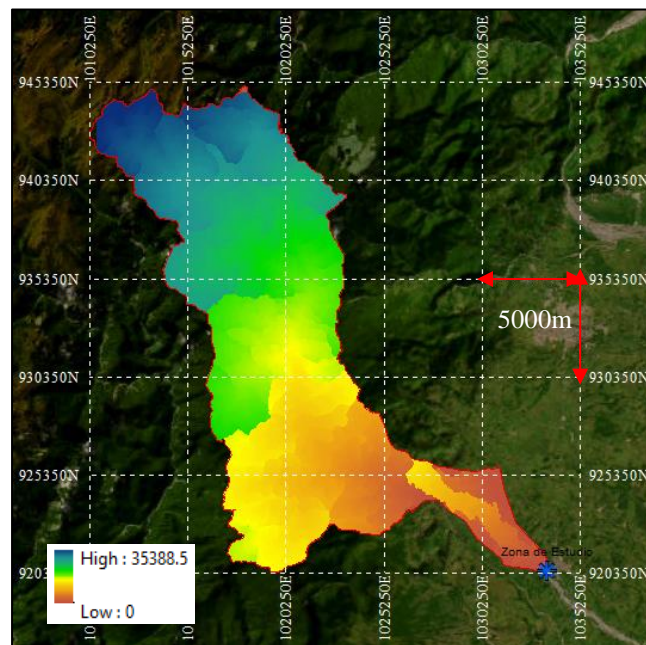


Figura 3-11: Longitud axial cuenca río Guamal.

Fuente: Autor – Apoyado en ArcGIS.

- **Índice de Gravelius (Ig):** Aplicando la ecuación (2-3) que define el Índice de Gravelius (Ig) se obtuvo un coeficiente de 1.97, por lo tanto, la cuenca pertenece al rango oval oblonga – rectangular oblonga.
- **Factor de forma (Kf):** De igual manera, desarrollando la ecuación (2-4), la magnitud del factor de forma (Kf) es de 0.17. Clasificando la cuenca como “muy alargada” en la clasificación de Pérez (1979).

3.3.4 Parámetros de red de drenaje

Los parámetros de red de drenaje fueron obtenidos a partir de las ecuaciones (2-5) y (2-6) calculadas a partir de los valores de la longitud del cauce principal, la longitud del valle y de los cauces tributarios del sistema de drenaje, los cuales se presentan en la **Tabla 3-8**

Tabla 3-8: Parámetros base red de drenaje.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Longitud cauce principal	43.37	km
Longitud del valle	31.39	km
Suma longitudes corrientes	636.90	km

Fuente: Autor – Apoyado en ArcGIS.

- **Orden de la corriente:** De acuerdo con la clasificación de Strahler (1964) la red de drenaje de la cuenca cuenta con un orden de drenaje igual a 4.
- **Densidad de drenaje (Dd):** Con base en la ecuación (2-5) se obtuvo una magnitud de 3.02 km/km^2 para la cuenca evaluada.
- **Extensión media (Es):** Aplicando la ecuación (2-6) se encontró un valor de 0.08 km para la magnitud de la extensión media (Es). Se presenta en la **Figura 3-12**, una apreciación del sistema de drenaje que compone la cuenca, resaltando su cauce principal y sus afluentes principales.

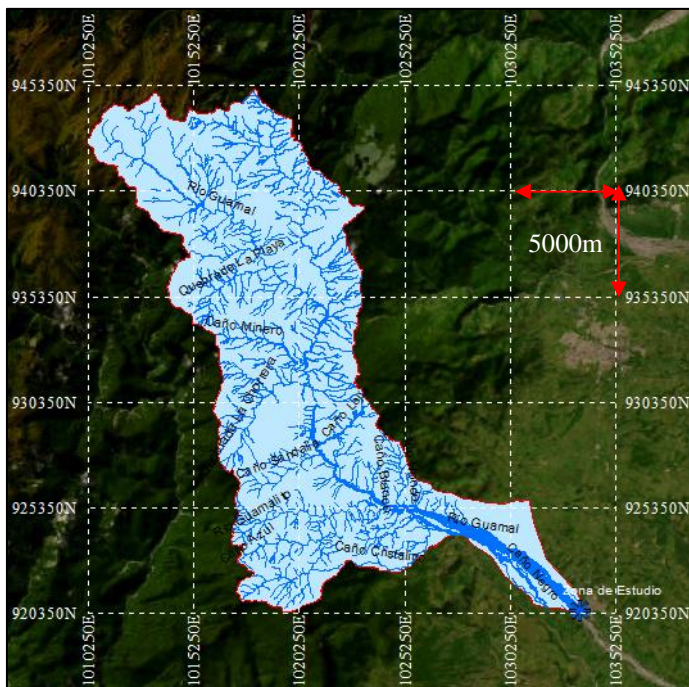


Figura 3-12: Red de drenaje cuenca río Guamal.

Fuente: IGAC – Apoyado en ArcGIS.

3.3.5 Parámetros de relieve

Se efectuó el cálculo de los parámetros de relieve, considerados como los más influyentes en la caracterización geomorfológica de la cuenca. Se obtuvieron por medio de las herramientas de procesamiento del sistema de información geográfica ArcGIS siguiendo la metodología presentada.

- **Curva hipsométrica:** La curva hipsométrica fue obtenida con base en el mapa de elevaciones representado en la **Figura 3-13** desarrollando el método presentado por Langbein (1947). Se generan variaciones en las elevaciones de la cuenca con cotas entre 520 msnm y 3800 msnm.

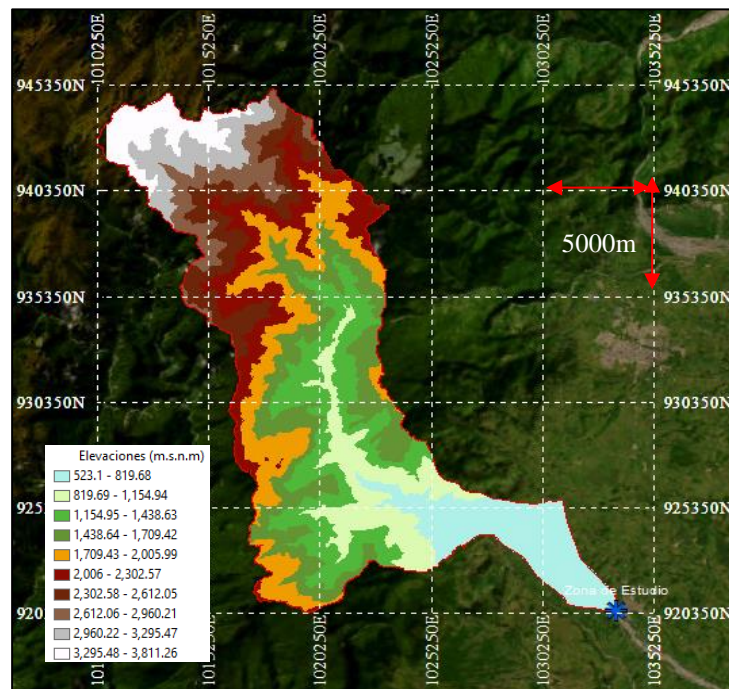


Figura 3-13: Elevaciones en la cuenca del río Guamal.

Fuente: LandViewer – Apoyado en ArcGIS.

- **Pendiente media de la cuenca:** Se determinó una pendiente media del 52.91% y por lo tanto pertenece al grupo “Escarpado” con tendencia a “Muy Escarpado” de acuerdo con la clasificación presentada por Pérez (1979). En la **Figura 3-14** se presenta la variación de la pendiente en la superficie de la cuenca, evidenciando valores promedios entre el 60% y el 150% para la mayor parte del terreno en la zona alta y media de la cuenca y valores menores al 20% para la zona baja donde se localiza la zona de estudio.

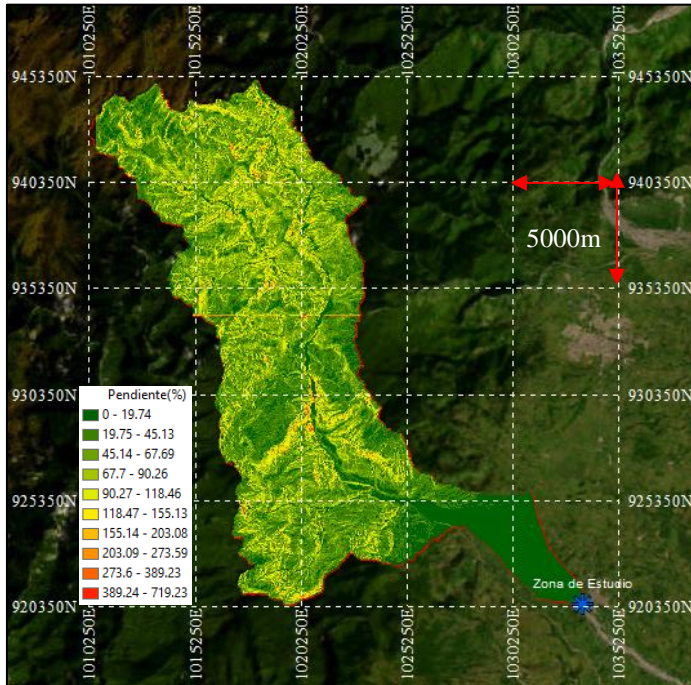


Figura 3-14: Pendientes en la cuenca del río Guamal.

Fuente: Autor – Apoyado en ArcGIS.

Con base en las elevaciones y en el área acumulada entre rangos de elevaciones se realizó la gráfica de la curva hipsométrica presentada en la **Figura 3-15**.

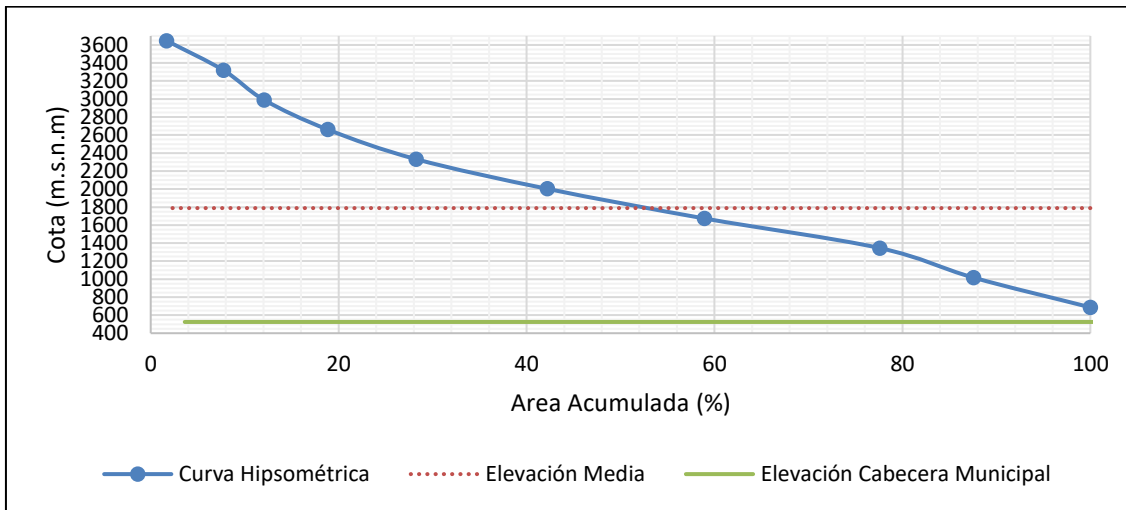


Figura 3-15: Curva hipsométrica cuenca.

Fuente: Autor.

La forma de la curva indica que se trata de una cuenca vieja (Strahler, 1952) y una elevación media de 1788.93 msnm, la cual oscila entre los 500 y 600 msnm.

- **Pendiente media de la corriente principal (S%):** Se desarrolló el método de Taylor – Schwartz a partir del mapa de elevaciones presentado, siguiendo el alineamiento del cauce principal, obteniendo una pendiente media en la zona alta de la cuenca cercana al 9% y una pendiente promedio del 3% luego del cambio brusco presentado en el piedemonte llanero. Generando así una pendiente media del cauce principal del 5.96%.
- **Tiempo de concentración (Tc):** Tal y como evidenció la teoría, existe un rango de ecuaciones muy amplio a la hora de calcular el tiempo de concentración. Desarrollando las ecuaciones presentadas en el apartado 2.3.3, se obtuvieron los resultados expuestos en la **Tabla 3-9**.

Tabla 3-9: Tiempos de concentración.

Formula	Tc (min)	Tc (h)	Formula	Tc (min)	Tc (h)
Kirpich	214.66	3.58	Jhonstone & Cross	369.70	6.16
Temez	539.77	9.00	Ranser	204.31	3.41
Glandiotti	181.63	3.03	Ventura Heras	217.66	3.63
Ven Te Chow	450.78	7.51	California	187.70	3.13
Cuerpo de Ingenieros	503.79	8.40	Passini	555.13	9.25
Williams	645.32	10.76	Promedio	370.04	6.17

Fuente: Autor.

Del grupo total de ecuaciones evaluadas, se obtuvo un tiempo de concentración promedio de 370.04 min (6.07 h). Sin embargo, siguiendo un criterio conservador, se prefiere el uso de las ecuaciones cuyo resultado es menor al promedio total obtenido. Por lo que se desecharon algunas ecuaciones y se recalculo el promedio con base en las ecuaciones seleccionadas en la **Tabla 3-10**, obteniendo una magnitud de 201.2 min (3.35) h para el tiempo de concentración (Tc). Esta magnitud indica el tiempo que tomaría para que se generara un aporte pluvial de toda la superficie a la corriente principal en un evento de lluvias continuas.

Tabla 3-10: Tiempos de concentración seleccionados.

Formula	Tc (min)	Tc (h)
Kirpich	214.66	3.58
Glandiotti	181.63	3.03
Ranser	204.31	3.41
Ventura Heras	217.66	3.63
California	187.70	3.13
Promedio	201.19	3.35

Fuente: Autor.

- **Tipos de suelo:** A partir de la información cartográfica base del IGAC, fue posible clasificar los diferentes tipos de suelo existentes a lo largo de la superficie de la cuenca. Se representa el porcentaje asociado a cada tipo de suelo a través de la **Tabla 3-11** y la **Figura 3-16**.

Tabla 3-11: Tipos del suelo cuenca del río Guamal.

Tipo	Área (Km ²)	%
Territorios agrícolas	22.46	10.63%
Territorios artificializados	0.03	0.01%
Bosques y áreas seminaturales	182.34	86.36%
Ríos	6.31	3%
Total	211.13	100.00%

Fuente: IGAC – Autor.

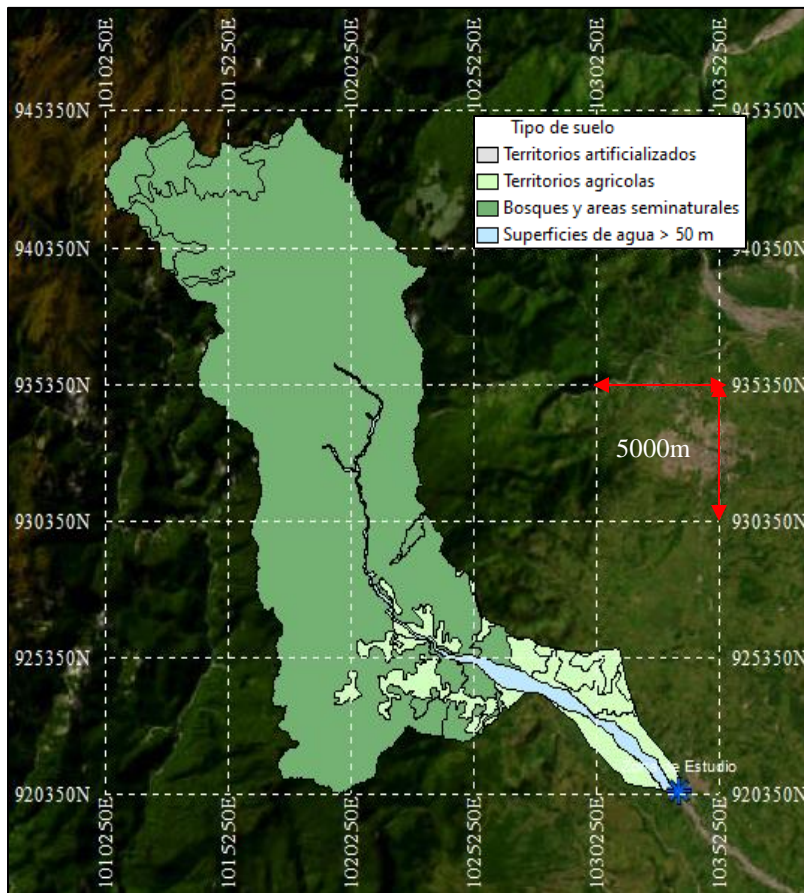


Figura 3-16: Tipos del suelo en la cuenca del río Guamal.

Fuente: IGAC – Apoyado en ArcGIS.

Se pudo evidencia una proliferación de bosques densos en la zona montañosa de la cuenca y un mayor porcentaje de cultivos y pastos en la zona baja, localizados en cercanías de la cabecera municipal.

3.3.6 Resumen parámetros

Con base en la caracterización geomorfológica realizada, se presenta en la **Tabla 3-12** un resumen de la magnitud de los parámetros obtenidos.

Tabla 3-12: Parámetros de caracterización geomorfológica de la cuenca y del río Guamal.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Parámetros base		
Área (A)	211.13	km ²
Perímetro (P)	101.60	km
Longitud axial de la cuenca (La)	35.39	km
Ancho medio (B)	5.97	
Longitud del cauce principal (Lc)	43.37	km
Longitud del valle (Lv)	31.39	km
Longitud red de drenaje (ΣLi)	636.90	km
Cota máxima de cauce principal	3460.93	m.s.n.m
Cota mínima de cauce principal	523.10	m.s.n.m
Parámetros de forma		
Índice de Gravelius (Ig)	1.97	-
Factor de forma (Kf)	0.17	-
Parámetros de drenaje		
Orden de corriente	4	
Densidad de drenaje (Dd)	3.02	km/km ²
Extensión media (Es)	0.08	km
Parámetros de relieve		
Elevación media cuenca	1788.93	m.s.n.m
Pendiente media de la cuenca (Sc)	52.91	%
Pendiente cauce principal (S)	5.96	%
Tiempo de concentración (Tc)	201.2	min

Fuente: Autor.

3.4 Caracterización pluviométrica

La caracterización pluviométrica de la cuenca fue realizada con base en las mediciones históricas de precipitaciones anuales y precipitaciones máximas en la zona de estudio, a partir de los registros recopilados por las estaciones pluviométricas a cargo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Inicialmente, se localizaron las estaciones pluviométricas que se encuentran ubicadas alrededor de la cuenca del río Guamal, sus coordenadas geográficas en decimales de localización y código de referencia se presentan en la **Tabla 3-13** y en la **Figura 3-17**.

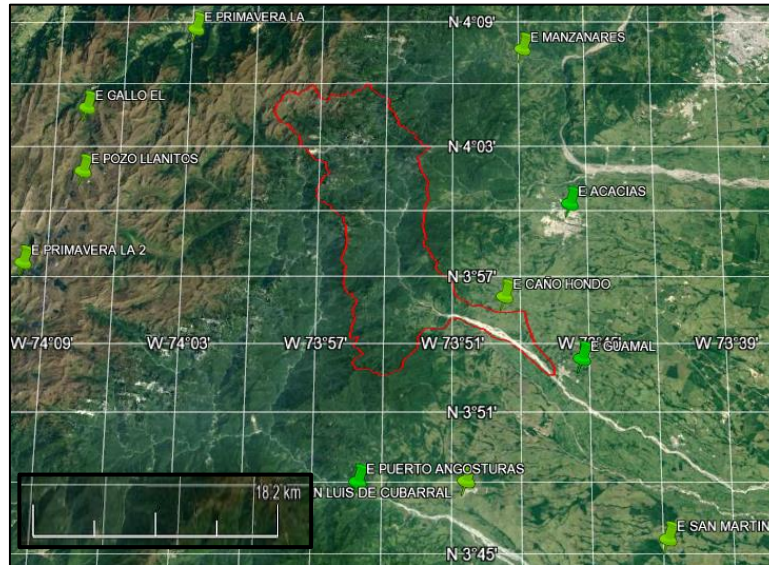


Figura 3-17: Localización estaciones pluviométricas.

Fuente: IDEAM.

Tabla 3-13: Localización estaciones pluviométricas .

Código	Nombre	Longitud	Latitud	Código	Nombre	Long	Latitud
35010090	San Martín	-73.70	3.75	35020340	Primavera I	-74.05	4.13
35010020	Acacias	-73.77	3.99	35020030	Manzanares	-73.80	4.12
32060100	Puerto Angosturas	-73.92	3.79	35010140	Primavera II	-74.17	3.95
35010040	Caño Hondo	-73.81	3.92	35020430	Gallo I	-74.13	4.07
35010070	Guamal	-73.76	3.88	35020410	Pozo Llanitos	-74.13	4.02
32060030	San Luis de Cubarral	-73.84	3.79				

Fuente: IDEAM.

Posteriormente mediante el método de los polígonos de Thiessen (1911), se identificaron las estaciones que realmente tienen influencia sobre las precipitaciones generadas en la superficie de la cuenca del río Guamal, tal y como se evidencia en la **Tabla 3-14** y en la **Figura 3-18**.

Tabla 3-14: Influencia estaciones pluviométricas cuenca del río Guamal.

Código	Estación	%	Código	Estación	%
35020340	E Primavera	15.10%	35010090	San Martín	0
35020030	E Manzanares	17.19%	32060030	San Luis de Cubarral	0
35010020	E Acacias	0.78%	35010140	Primavera II	0
35010040	E Caño Hondo	63.80%	35020430	Gallo I	0
35010070	E Guamal	1.80%	35020410	Pozo Llanitos	0
32060100	E Puerto Angosturas	1.33%			

Fuente: Autor.



Figura 3-18: Influencia estaciones pluviométricas sobre cuenca del río Guamal.
Fuente: Autor – IDEAM.

De acuerdo con los porcentajes de influencia expuestos en la **Tabla 3-14**, se estima que las precipitaciones dentro de la mayor parte de la superficie de la cuenca se pueden inclinar más hacia los datos registrados por la Estación Caño Hondo, teniendo en cuenta su elevado porcentaje de influencia en comparación con las demás estaciones. Igualmente, la zona alta de la cuenca se ve más dominada por las estaciones Primavera y Manzanares, mientras que la parte más baja de la cuenca cerca de la zona de evaluación, se ve más afectada por los datos registrados por la Estación Guamal. Finalmente, la influencia de las estaciones Puerto Angosturas y Acacias sobre las mediciones de las lluvias sobre la cuenca es mínima. En la **Tabla 3-15** se presentan los parámetros principales de las estaciones seleccionadas para realizar el análisis de las precipitaciones sobre la cuenca del río Guamal.

Tabla 3-15: Características estaciones pluviométricas.

Código Estación	35020340	35020030	35010020	35010040	35010070	32060100
Nombre	Primavera L	Manzanares	Acacias	Caño Hondo	Guamal	Puerto Angosturas
Tipo	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional
Categoría	Pluviométrica	Pluviométrica	Pluviométrica	Pluviométrica	Pluviométrica	Pluviométrica
Estado	Activa	Suspendida	Activa	Activa	Activa	Activa
Departamento	Cundinamarca	Meta	Meta	Meta	Meta	Meta
Municipio	Gutiérrez	Acacias	Acacias	Guamal	Guamal	Cubarral
Latitud	4.13	4.12	3.99	3.92	3.88	3.7907

Longitud	-74.05	-73.80	-73.77	-73.81	-73.76	-73.92
Altitud	2300	1200	525	800	525	745
Fecha Instalación	15/01/1985	15/08/1968	15/04/1961	14/11/1968	15/04/1978	14/03/2001
Fecha Suspensión	-	30/04/2002	-	-	-	-

Fuente: Autor – IDEAM.

Para evaluar el comportamiento de las precipitaciones sobre la cuenca con base en las estaciones seleccionadas, se tabularon y representaron gráficamente a través de histogramas los registros de las mediciones históricas.

3.4.1 Precipitaciones

▪ Precipitación media mensual a nivel multianual

Corresponden a las precipitaciones promedio de cada uno de los meses a lo largo del rango de información disponible para cada estación. Los resultados tabulados se presentan en la **Tabla 3-16**.

Tabla 3-16: Precipitación media mensual a nivel multianual (mm).

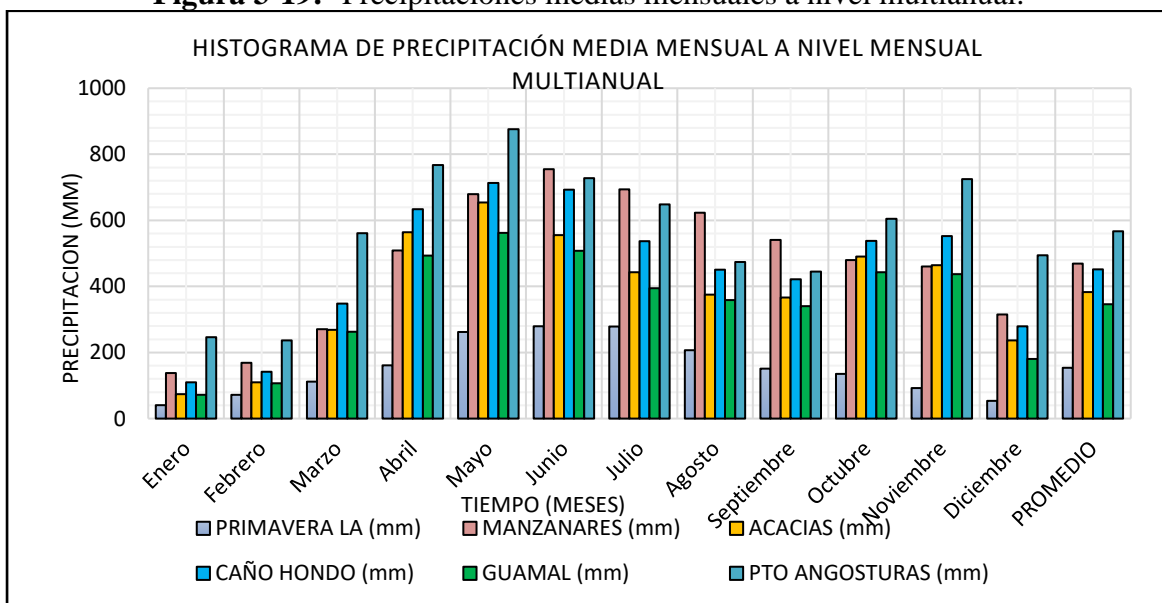
Mes	E. Primavera	E. Manzanares	E. Acacias	E. Caño Hondo	E. Guamal	E. Puerto Angosturas
Enero	40.60	137.51	73.66	109.88	72.03	246.53
Febrero	71.91	168.79	109.31	142.09	106.93	236.53
Marzo	111.85	270.17	269.08	347.79	262.67	561.30
Abril	161.19	509.01	564.45	634.15	493.82	767.05
Mayo	262.17	679.68	653.88	712.84	561.70	876.05
Junio	279.47	755.29	555.35	693.13	507.82	727.75
Julio	278.65	694.17	442.51	536.87	394.50	648.40
Agosto	206.97	623.22	375.24	451.07	358.96	474.37
Septiembre	151.20	540.70	366.56	421.39	340.30	444.65
Octubre	135.31	479.64	490.25	537.80	442.78	604.30
Noviembre	92.38	460.02	464.05	552.70	437.26	724.58
Diciembre	53.67	315.00	236.66	278.80	180.33	494.39
Promedio	153.78	469.43	383.42	451.54	346.59	567.16
Anual	1845.37	5633.20	4600.99	5418.52	4159.09	6805.89

Fuente: Autor – IDEAM.

Se observa que las precipitaciones más altas son presentadas en la Estación Puerto Angosturas con 6805.99 mm anuales y las precipitaciones más bajas fueron registradas en la Estación Primavera I con un total de 1845.37 mm anuales. La diferencia de las lluvias anuales entre estas dos estaciones es de 4960.53 mm, un valor bastante elevado que indicaría una variabilidad alta de las precipitaciones a lo largo de la superficie de la cuenca. Sin embargo, recordando la **Tabla 3-14** se desacredita este hecho considerando la poca

influencia de la Estación Puerto Angosturas sobre la superficie de la cuenca. Teniendo en cuenta que las lluvias sobre la zona alta de la cuenca se rigen por el comportamiento de las estaciones Primavera y Manzanares en un porcentaje similar, al comparar sus registros con los de la Estación Caño Hondo, se evidencian valores más altos para esta última, lo que indicaría que sobre la zona media-alta y media-baja de la cuenca las lluvias son más intensas que en la parte alta. Así mismo, se evidencia un decrecimiento de las lluvias en la zona más baja de la cuenca, donde las precipitaciones se ven influenciadas por la Estación Guamal, produciendo un valor promedio anual de 4159.09 mm. Para representar el comportamiento de las precipitaciones medias mensuales en cada una de las estaciones de manera gráfica, se presenta la **Figura 3-19**.

Figura 3-19: Precipitaciones medias mensuales a nivel multianual.



Fuente: Autor – IDEAM.

El comportamiento de las precipitaciones medias registradas en las estaciones seleccionadas sigue el mismo patrón, como se observa en la **Figura 3-19** se registran los valores de precipitación más bajos para el mes de enero, a excepción de la Estación Puerto Angosturas la cual presenta su registro más bajo para el mes de febrero. De igual manera, cuatro de las seis estaciones presentan los registros más altos en el mes de mayo y las dos restantes, la Estación Primavera I y la Estación Manzanares presentan sus picos en el mes de junio. La precipitación mensual mínima se registró en el mes de enero sobre la Estación Primavera I, con una magnitud de 40.60 mm y la precipitación mensual máxima registró un valor de 876.05 mm para el mes de mayo sobre la Estación Puerto Angosturas.

▪ Precipitación media máxima en 24 horas a nivel multianual

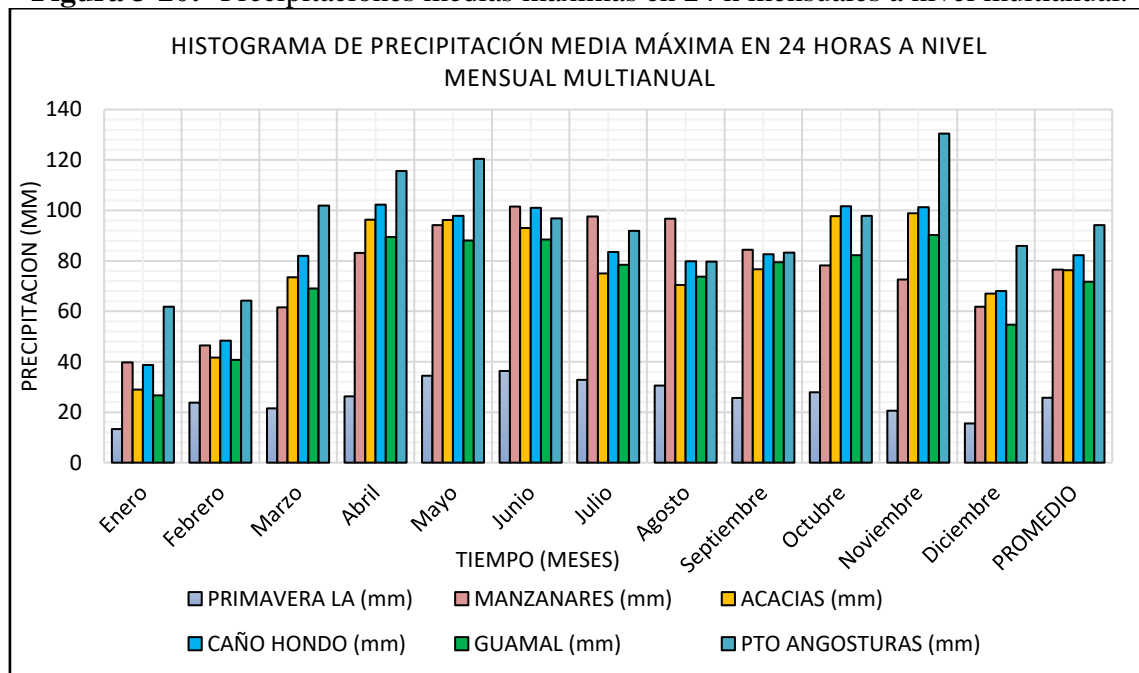
En la **Tabla 3-17** se presentan las precipitaciones promedio máximas registradas en un día completo para cada uno de los meses a lo largo del rango de información disponible para cada estación. De igual manera, en la **Figura 3-20** se representa de manera gráfica el comportamiento asociado a estas precipitaciones.

Tabla 3-17: Precipitación media máxima en 24 h mensual a nivel multianual (mm).

Mes	E. Primavera	E. Manzanares	E. Acacias	E. Caño Hondo	E. Guamal	E. Puerto Angosturas
Enero	13.32	39.72	28.98	38.75	26.66	61.79
Febrero	23.79	46.48	41.69	48.36	40.77	64.26
Marzo	21.53	61.52	73.47	81.98	69.04	101.90
Abril	26.29	83.20	96.30	102.34	89.50	115.65
Mayo	34.46	94.18	96.23	97.84	88.11	120.45
Junio	36.35	101.56	93.07	101.01	88.43	96.85
Julio	32.83	97.66	75.08	83.54	78.40	91.95
Agosto	30.57	96.72	70.47	79.84	73.76	79.70
Septiembre	25.66	84.43	76.65	82.60	79.44	83.25
Octubre	27.90	78.14	97.70	101.67	82.31	97.90
Noviembre	20.60	72.65	98.81	101.31	90.19	130.50
Diciembre	15.54	61.77	66.98	68.01	54.73	85.94
Promedio	25.74	76.50	76.29	82.27	71.78	94.18
Max	36.35	101.56	98.81	102.34	90.19	130.50

Fuente: Autor – IDEAM.

Figura 3-20: Precipitaciones medias máximas en 24 h mensuales a nivel multianual.



Fuente: Autor – IDEAM.

Los registros expuestos reiteran el hecho de que las precipitaciones máximas más altas son presentadas en la Estación Puerto Angosturas con 130.50 mm en un día y las precipitaciones máximas más bajas fueron registradas en la Estación Primavera I con una magnitud de 36.35 mm. Sin embargo, debido a la poca influencia de las mediciones registradas por la Estación Puerto Angosturas sobre la superficie de la cuenca, se desprecia. La segunda en la lista es la Estación Caño Hondo con 102.34 mm de lluvia registrados en un día. Teniendo en cuenta el alto porcentaje de influencia de esta estación sobre la cuenca, se puede deducir que las precipitaciones máximas en la zona media baja de la cuenca estarán rondando esta magnitud.

3.4.2 Caudales

Para estimar el caudal de la corriente del río Guamal se recopilaron las mediciones registradas en la única estación hidrológica localizada sobre la corriente del río. La cual se encuentra definida por las características presentadas en la **Tabla 3-18** y en la **Figura 3-21**.

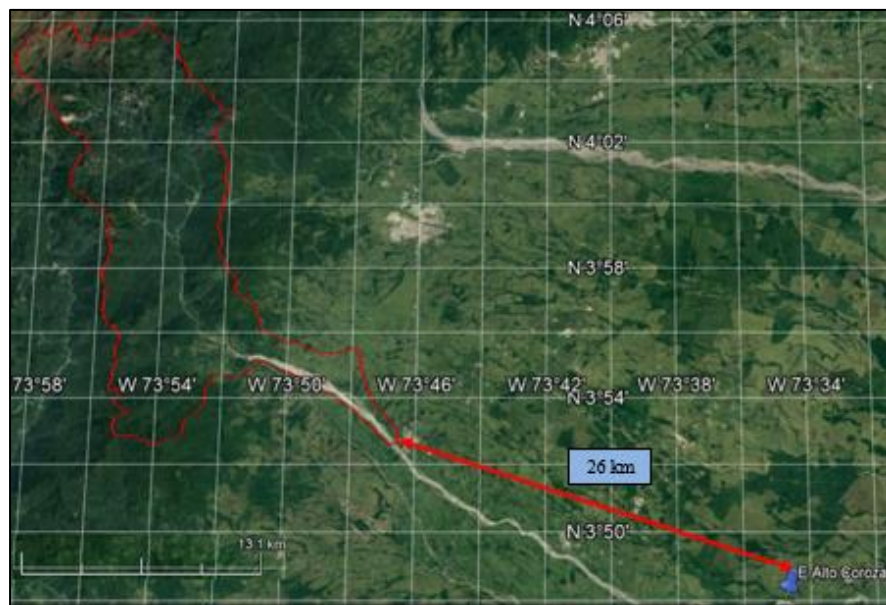


Figura 3-21: Localización estación hidrológica.

Fuente: Autor – IDEAM.

Al igual que para las precipitaciones, se efectuó una tabulación de las series de datos de los caudales mínimos, medios y máximos registrados por la Estación Alto Corozal, obteniendo los resultados plasmados en la **Tabla 3-19** para los caudales promedios mensuales y los resultados plasmados en la **Tabla 3-20** para los caudales históricos anuales.

Tabla 3-18: Características estación hidrológica.

Código Estación	35017030
Nombre	ALTO COROZAL
Tipo	Convencional
Categoría	Limnimetrica
Estado	Suspendida
Departamento	Meta
Municipio	Guamal
Latitud	3.8
Longitud	-73.58
Altitud	331
Fecha Instalación	15/05/1979
Fecha Suspensión	15/01/1990

Fuente: Autor – IDEAM.

Tabla 3-19: Caudales medios, mínimos y máximos mensuales en la E. Alto Corozal

Mes	Qmin (m³/s)	Qmedio (m³/s)	Qmax (m³/s)
Enero	9.56	14.61	42.60
Febrero	8.63	16.44	46.74
Marzo	9.73	18.59	63.47
Abril	13.53	32.72	131.47
Mayo	18.86	35.43	97.96
Junio	21.91	40.72	121.17
Julio	26.15	46.31	96.33
Agosto	18.40	35.04	107.16
Septiembre	18.88	32.01	91.60
Octubre	19.30	34.48	104.26
Noviembre	16.35	32.78	96.79
Diciembre	12.82	23.17	70.00
Promedio	16.18	30.19	89.13

Fuente: Autor – IDEAM.

Tabla 3-20: Caudales medios, mínimos, y máximos anuales en la Estación Alto Corozal.

Año	Qmin (m³/s)	Qmedio (m³/s)	Qmax (m³/s)
1979	2.15	22.17	163.00
1980	1.30	22.45	174.00
1981	1.70	30.47	284.50
1982	2.00	31.87	178.40
1983	12.30	31.96	129.10
1984	15.80	43.38	205.10
1985	5.50	26.54	148.60
1986	4.70	29.11	207.00
1987	6.40	33.77	138.80
Promedio	5.76	30.19	180.94

Fuente: Autor – IDEAM.

Como se pudo observar en la **Figura 3-21** la Estación Alto Corozal se encuentra localizada a 26 km de distancia aguas abajo de la zona de estudio. Para poder contrarrestar este hecho, se hizo uso del método de transposición de caudales (Gulliver & Arndt, 1991) definido en la ecuación (2-18) y desarrollado a partir de la relación de áreas de drenaje existente entre la cuenca hidrográfica caracterizada previamente (**3.3.2**) y la cuenca hidrográfica delimitada hasta la desembocadura asociada a la localización de la estación hidrológica, la cual se presenta en la **Figura 3-22**.



Figura 3-22: Delimitación cuenca hidrográfica punto estación hidrológica.
Fuente: Autor – IDEAM.

El área de la cuenca hidrográfica delimitada hasta la Estación Alto Corozal, tiene una magnitud de:

$$A_c = 329.58 \text{ km}^2$$

Aplicando la ecuación (2-18) y recordando la magnitud del área de la cuenca de estudio presentada en la **Tabla 3-7** se obtuvo la siguiente relación de áreas:

$$Q_s = \frac{211.13}{329.58} Q_c = 0.64 Q_c$$

Donde:

Q_s = Caudal de la cuenca sin información registrada (m³/s).

Q_c = Caudal de la cuenca con información registrada (m³/s).

El resultado obtenido, indica que la magnitud de los caudales de la corriente del río Guamal en la zona de estudio, es de aproximadamente el 64% de la magnitud del caudal registrado en la Estación Alto Corozal. Así, afectando los datos de la **Tabla 3-19** por el factor de transposición calculado, se obtuvieron los caudales mensuales presentados en la **Tabla 3-21**. Al igual que con las precipitaciones sobre la cuenca, se generaron histogramas con la información disponible con el fin de observar la variabilidad de los caudales y corroborar los picos obtenidos en el análisis de las lluvias. En la figura **Figura 3-23** se representan gráficamente los resultados obtenidos.

Tabla 3-21: Caudales medios, mínimos y máximos mensuales en la zona de estudio.

Mes	Qmin (m ³ /s)	Qmedio (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)
Enero	6.12	9.36	27.29
Febrero	5.53	10.53	29.94
Marzo	6.23	11.91	40.66
Abril	8.67	20.96	84.22
Mayo	12.08	22.70	62.75
Junio	14.03	26.08	77.62
Julio	16.75	29.67	61.70
Agosto	11.79	22.44	68.64
Septiembre	12.10	20.50	58.68
Octubre	12.36	22.08	66.79
Noviembre	10.47	21.00	62.00
Diciembre	8.21	14.84	44.84
Promedio	10.36	19.34	57.09

Fuente: Autor – IDEAM.

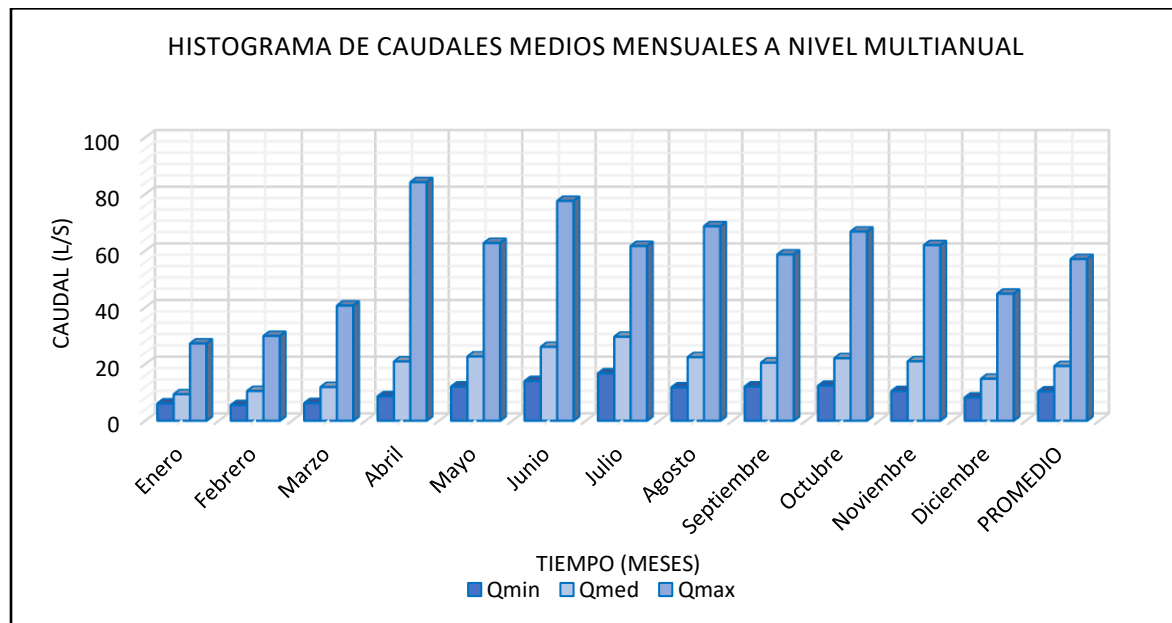


Figura 3-23: Histograma de caudales medios mensuales a nivel multianual.

Fuente: Autor – IDEAM.

Con base en la transposición de caudales desarrollada, el caudal promedio máximo presentado en la zona de evaluación tiene una magnitud de 84.22 m³/s y corresponde al promedio de los caudales desarrollados históricamente para el mes de abril. En el otro extremo, se encuentran los caudales promedios mínimos, del cual se destaca una magnitud mínima de 5.53 m³/s para el mes de febrero. De igual manera a lo largo del año, se presenta un caudal promedio mensual de 19.34 m³/s. Asimismo, se hizo uso de los caudales anuales para desarrollar el análisis de distribución de frecuencias con el fin de obtener la proyección de caudales en la corriente del río para posteriormente desarrollar el modelo hidráulico. Los caudales anuales expuestos en la **Tabla 3-20** fueron afectados por el factor del 64% obtenido y se presentan en la **Tabla 3-22** y de manera gráfica en la **Figura 3-24**.

Tabla 3-22: Caudales medios, mínimos, y máximos anuales en la zona de estudio.

Año	Qmin (m ³ /s)		Qmedio (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	
1979	1.38	Diciembre	14.20	104.41	Agosto
1980	0.83	Febrero	14.38	111.46	Junio
1981	1.09	Enero	19.52	182.25	Abril
1982	1.28	Marzo	20.41	114.28	Octubre
1983	7.88	Febrero	20.47	82.70	Mayo
1984	10.12	Marzo	27.79	131.38	Agosto
1985	3.52	Febrero	17.00	95.19	Noviembre
1986	3.01	Septiembre	18.65	132.60	Abril
1987	4.10	Febrero	21.63	88.91	Julio
Promedio	3.69		19.34	115.91	

Fuente: Autor – IDEAM.

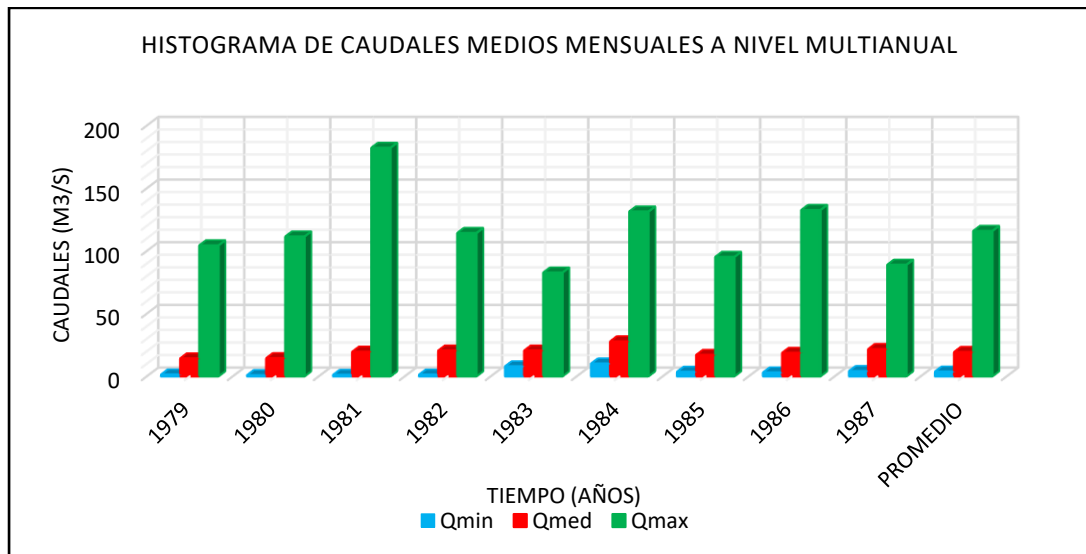


Figura 3-24: Histograma de caudales medios, mínimos y máximos históricos.

Fuente: Autor – IDEAM.

La figura anterior expone la variación histórica de los caudales anuales mínimos, medios y máximos sobre la corriente del río Guamal. Fue posible evidenciar un caudal mínimo promedio de $3.69 \text{ m}^3/\text{s}$, un caudal medio de $19.34 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal máximo promedio de $115.91 \text{ m}^3/\text{s}$. Centrándonos en los valores extremos se presenta un caudal mínimo histórico de $0.83 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de febrero del año 1980 y un caudal máximo histórico de $182.25 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de abril del año 1981. Los datos de los caudales máximos tabulados en la **Tabla 3-22** fueron seleccionados para servir como datos de entrada en el modelo hidrológico AFINS 2.0. usado para desarrollar el análisis de frecuencias de extremos hidrológicos, en este caso, de los caudales máximos de la corriente. Las funciones de probabilidad sin límite superior evaluadas fueron: la función GUMBEL, la función TCEV, la función GEV y la función LOG GUMBEL, cuyos resultados de ajuste grafico se presentan en la **Figura 3-25**.

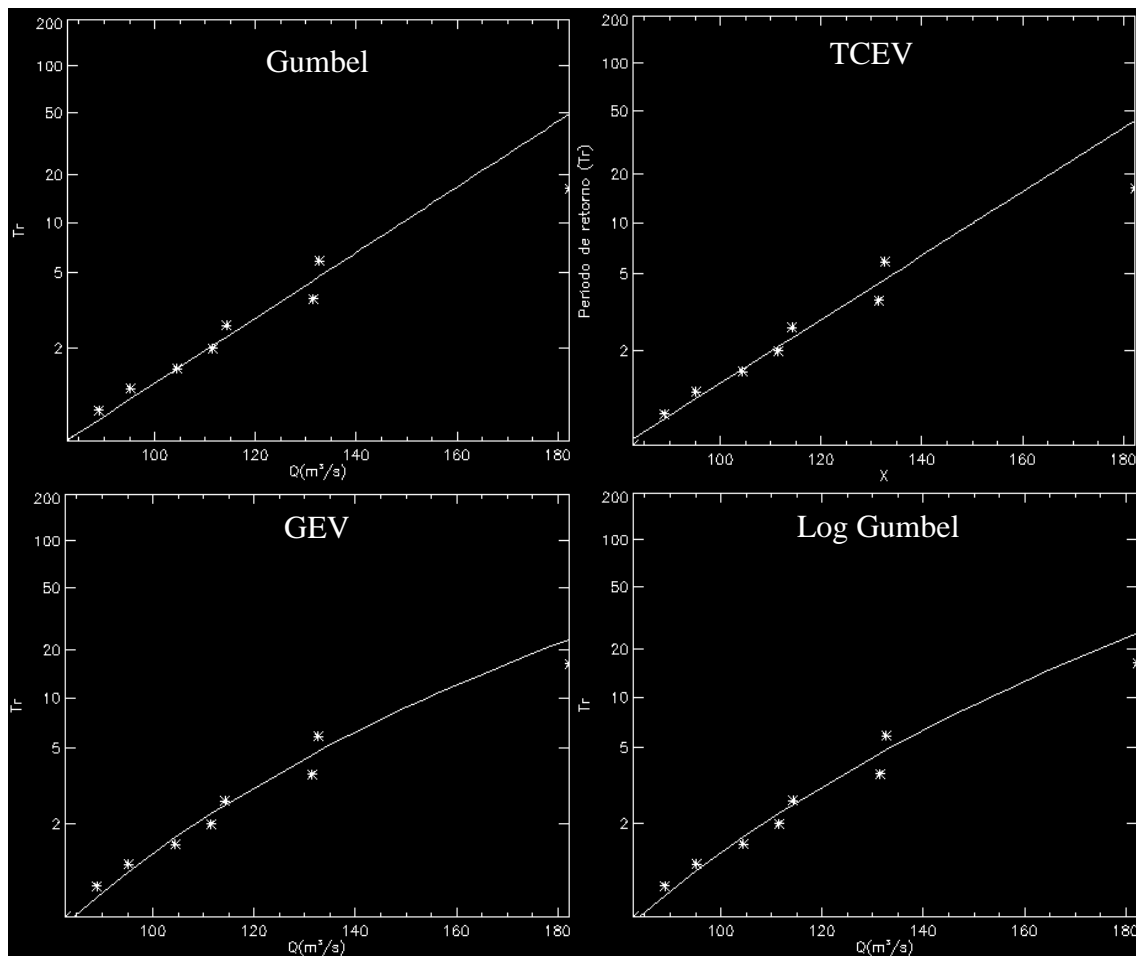


Figura 3-25: Ajuste caudales máximos.

Fuente: Autor – AFINS 2.0.

Del mismo modo, para la proyección de los caudales medios se desarrolló la función de ajuste log normal, cuyos resultados se exponen en la **Tabla 3-24**. De igual manera, se presenta en la **Tabla 3-23** la verosimilitud obtenida y el número de parámetros estimados de cada función.

Tabla 3-23: Criterios de ajuste.

Función de Ajuste	Número de parámetros estimados	Verosimilitud
Gumbel	2	-41.6726
TCEV	4	-41.6979
GEV	3	-41.4751
Log Gumbel	2	-41.4765

Fuente: Autor – AFINS 2.0.

El método usado para la selección de la función de ajuste, fue el expuesto en el apartado **2.3.4** según las recomendaciones de Vélez (2020), así, con base en los criterios presentados se seleccionó la función de ajuste Log Gumbel para el desarrollo de la proyección de caudales. Los caudales proyectados por el modelo estadístico AFINS se presentan en la **Tabla 3-24**.

Tabla 3-24: Proyección de caudales para diferentes periodos de retorno.

TR(Años)	Qmax (m³/s)	Qmed (m³/s)
1.01	76.68	13.34
2	108.46	19.66
3	119.66	21.34
5	133.49	23.08
10	153.15	25.10
20	174.73	26.90
25	182.20	27.44
50	207.25	29.07
100	235.52	30.62
200	267.52	32.11

Fuente: Autor – AFINS.

Una vez obtenidos los parámetros de caracterización geomorfológica, pluviométrica y los caudales de diseño, se procedió con el desarrollo del plan de simulación proyectado para ejecutar el modelo hidráulico bidimensional.

3.5 Resultados plan de simulación

El plan de simulación se desarrolló en el módulo de simulación de flujo libre en cauces. Para la obtención de la mancha de inundación en la zona de estudio, fue necesario definir los siguientes componentes iniciales: Dominio de evaluación, la geometría de mallado para dicha zona, el modelo de elevación digital (DEM) de la zona, las rugosidades de los tipos de suelo en la zona y las condiciones de frontera a la entrada y salida de la zona. Posteriormente se definieron los escenarios de simulación a desarrollar.

3.5.1 Dominio

La evaluación de las condiciones hidrodinámicas del río Guamal por medio del modelo hidráulico se desarrolló en un tramo específico del río comprendido entre las siguientes coordenadas geográficas y expuesto en la **Figura 3-26**.

- **Inicio:** $3^{\circ}53'51.91''\text{N}$. – $73^{\circ}47'38.55''\text{O}$.
- **Fin:** $3^{\circ}52'37.54''\text{N}$. – $73^{\circ}46'29.59''\text{O}$.



Figura 3-26: Zona de evaluación.

Fuente: Autor – Google Earth.

3.5.2 Geometría de mallado

La geometría de mallado fue generada a partir de la delimitación de la zona de evaluación, con base en una malla no estructurada de área igual a 2.11 km^2 y un perímetro de 7.33 km , la cual fue fraccionada por celdas triangulares de tamaño 11 m , generando un total de 39742 triángulos a partir de la creación de 20205 nodos. El ancho del cauce en la parte inicial de la zona de evaluación es de 933 m y en la parte final es de 531 m , evidenciando una disminución de aproximadamente un 57% debido a que en la zona final de evaluación se encuentra localizada la cabecera municipal. La zona de evaluación se extiende en aproximadamente 3 km como se puede observar en la **Figura 3-27**. Una vez generada la geometría de mallado de la zona de estudio, se procedió con la asignación de las elevaciones y las rugosidades de cada una de las celdas a través del modelo digital de elevación y de los coeficientes de rugosidad de Manning.

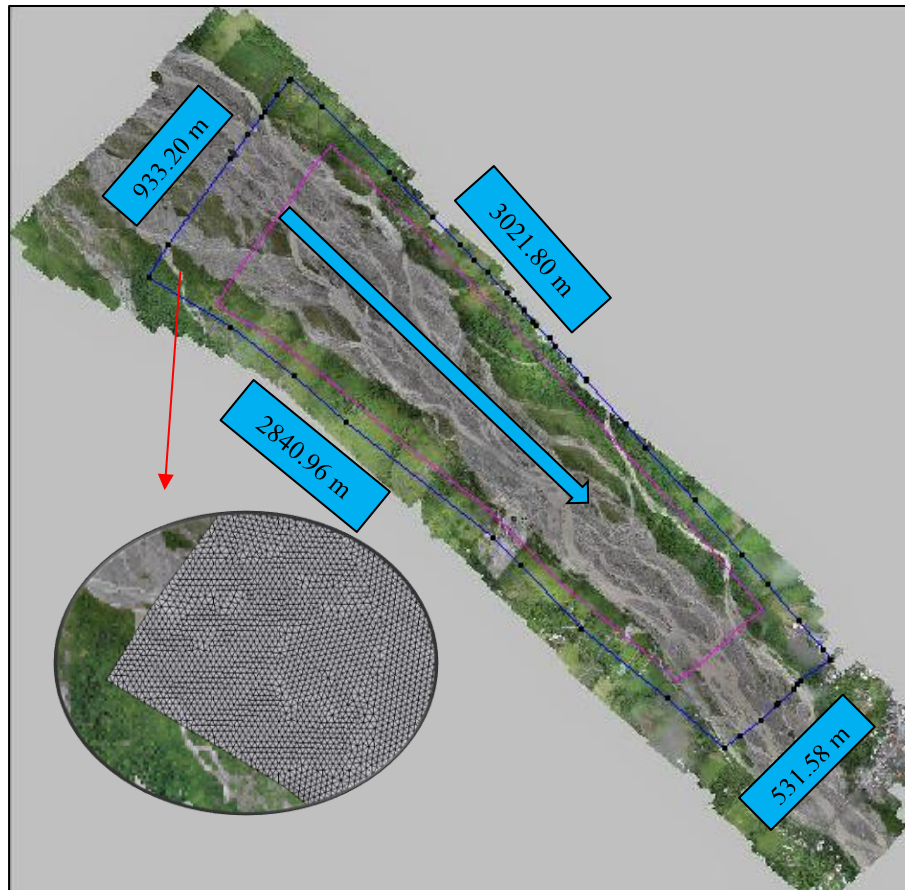


Figura 3-27: Geometría de mallado modelo hidráulico.

Fuente: Autor – IBER.

3.5.3 Modelo de elevación digital

A partir de la topografía realizada se generó el modelo digital de elevación y se asignó una cota de elevación a cada una de las celdas del mallado definido, generando la superficie de simulación en la zona de estudio. En la **Figura 3-28** se puede observar cómo sobresale sobre la superficie definida el comportamiento entrelazado del cauce y la formación de las islas y barras de material granular. De acuerdo con los límites de elevación superiores e inferiores, se observa una variación en sus magnitudes de 564.181 msnm a 519.6 msnm, es decir, una diferencia aproximada de 44 m en una longitud en plano horizontal estimada de 3000 m. Siendo así, la pendiente promedio del lecho en la zona de estudio es de aproximadamente 1.4%.

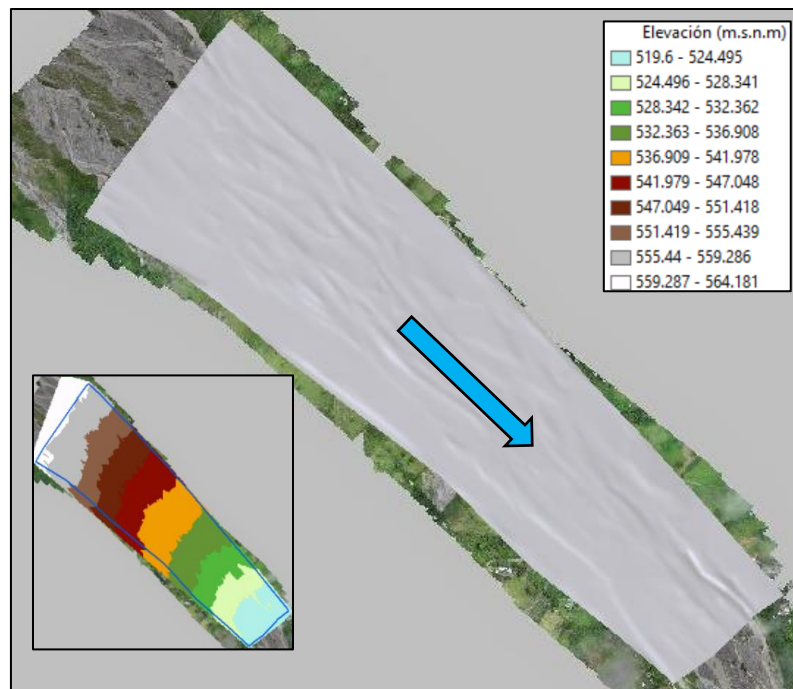


Figura 3-28: Modelo digital de elevación zona de evaluación.

Fuente: Autor – ArcGIS, IBER.

3.5.4 Rugosidades del suelo

Los tipos de suelo evidenciados en la zona de estudio fueron clasificados en cuatro grupos principales, denominados de la siguiente manera: I. Cauce. II. Drenaje. III. Vegetación. IV. Pastos. Los valores de los coeficientes de rugosidad para cada uno fueron asignados con base en la descripción con los tipos de suelo expuestos en la **Tabla 2-12**. En la **Figura 3-29**,

se representa de manera grafica la asignación de estos valores, con las siguientes magnitudes:

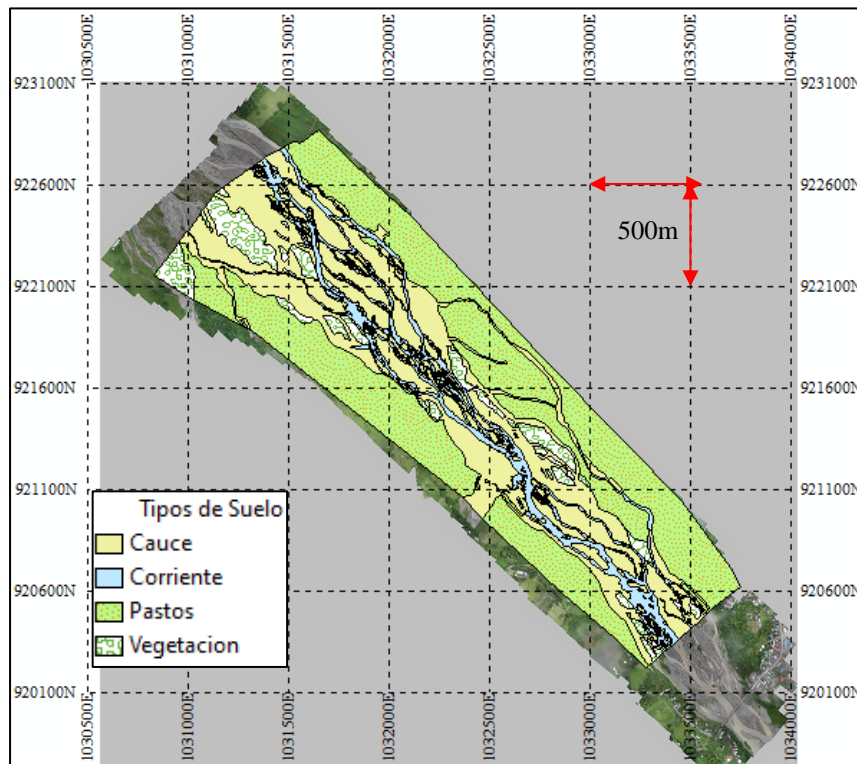


Figura 3-29: Asignación de rugosidades del suelo.

Fuente: Autor – ArcGIS

- **Cauce:** Se agrupó en este tipo de suelo, todo aquel material granular que hace parte del lecho del río Guamal y por el cual no transitan corrientes de agua. Se vinculó con los cursos de agua en planicie, serpenteante con bancos de arena. $n = 0.05$.
- **Corriente:** En este grupo, se incluyeron las redes de drenaje fluvial que se pueden evidenciar en la fotografía aérea por las cuales transitan corrientes de agua. Se relacionó con cursos de agua mayores. $n = 0.04$.
- **Vegetación:** Se unificaron las islas desarrolladas sobre el cauce activo del río Guamal y los montículos y/o rastros de formaciones de vegetación. Se relacionó con cursos de agua en planicie, serpenteante con matorrales y piedras. $n = 0.055$.
- **Pastos:** Se agruparon todos aquellos suelos que se encuentran por fuera de las márgenes naturales del río. Se vinculó con planicies de inundación con matorrales y árboles. $n = 0.06$.

3.5.5 Condiciones de contorno

Teniendo en cuenta la magnitud de la pendiente obtenida para el tramo de evaluación de apenas 1.4% y buscando simular un escenario de inundación, se desarrollaron las simulaciones a partir de la definición de un régimen de flujo subcrítico. Las condiciones de entrada fueron asignadas con base en los caudales proyectados de la corriente del río en función de los periodos de retorno definidos en la **Tabla 2-9**. Las condiciones de salida fueron definidas con el fin de simular un escenario de inundación, en condición subcrítica. Los elementos del dominio dentro del modelo a los que se les asignaron las condiciones se exponen en la **Figura 3-30**.

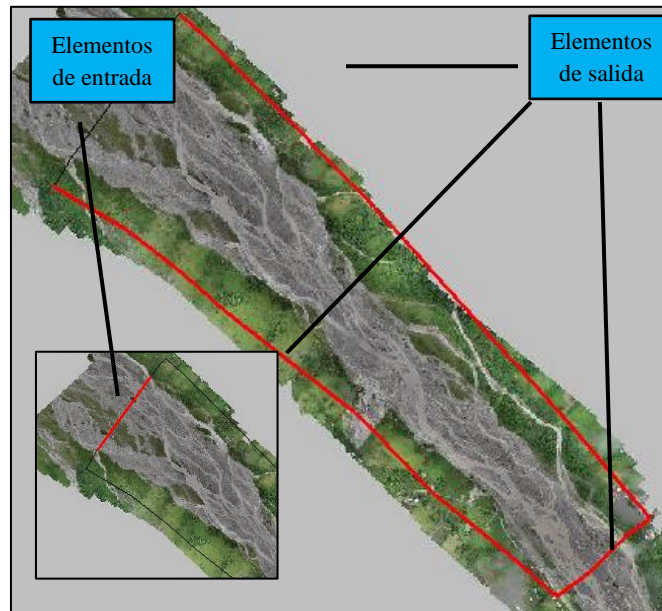


Figura 3-30: Elementos asignados con condición de contorno de entrada y salida del dominio.

Fuente: Autor – IBER.

3.5.6 Calibración

Se llevo a cabo el mismo plan de simulación, pero enfocado en la zona de localización de la Estación Alto Corozal. Esta simulación hidráulica fue desarrollada con el fin de obtener la magnitud de las profundidades hidráulicas, para posteriormente realizar una comparación con los valores registrados de los niveles de agua en la Estación Alto Corozal, validar su funcionamiento para la corriente del río Guamal y obtener el margen de error y el grado de sensibilidad del modelo.

3.5.7 Zona de calibración

El desarrollo de la calibración del modelo hidráulico para la corriente del río Guamal se efectuó en un tramo específico del río comprendido entre las coordenadas geográficas expuestas en la **Figura 3-31**.

- **Estación Alto Corozal:** 3°48'0.00"N. – 73°34'48.00"O.
- **Inicio:** 3°47'51.11"N. – 73°35'8.75"O.
- **Fin:** 3°47'51.12"N. – 73°34'25.36"O.

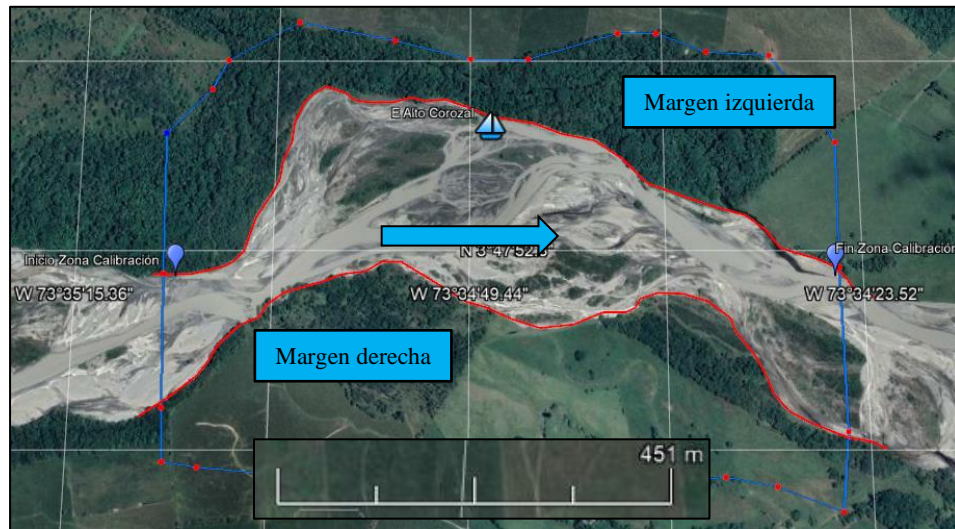


Figura 3-31: Zona de calibración.

Fuente: Autor – Google Earth.

3.5.8 Geometría de mallado y modelo de elevación digital

La geometría de mallado fue generada a partir de la delimitación de la zona de calibración definida, con base en una malla no estructurada de área igual a 2.01 km² y un perímetro de 5.67 km, la cual fue fraccionada por celdas triangulares de tamaño 10 m, generando un total de 108845 triángulos a partir de la creación de 54861 nodos. De igual manera se generó el modelo digital de elevación de la zona con resolución 4.77 x 4.77 a partir de un DEM obtenido de la imagen satelital de la herramienta EOSDA LandViewer. De acuerdo con los límites de elevación superiores e inferiores a lo largo del alineamiento principal, se observa una variación en sus magnitudes de 335.5 msnm a 329 msnm, es decir, una diferencia aproximada de 6.5 m en una longitud estimada de 1500 m. Siendo así, la pendiente promedio del lecho en la zona de estudio es de aproximadamente 0.43%. Las apreciaciones relatadas se exponen en la **Figura 3-32**.

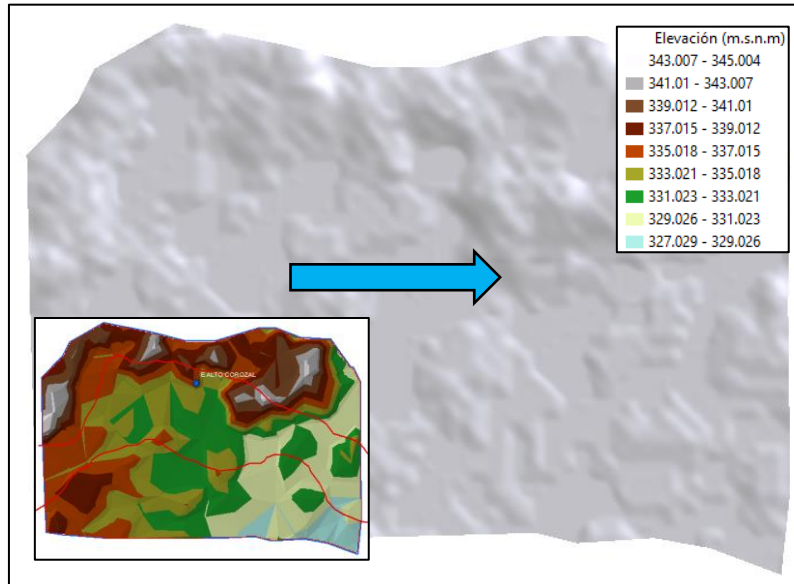


Figura 3-32: Geometría y modelo de elevación digital de calibración.

Fuente: Autor – IBER.

3.5.9 Rugosidades del suelo

Los tipos de suelos fueron asignados siguiendo la misma ideología de la zona de evaluación e incorporando un nuevo tipo de suelo (Bosques), en el cual se agruparon todos aquellos suelos que se encuentran por fuera de las márgenes naturales del río y cuyo relieve sobresale en forma de arbustos. Se vinculó con planicies de inundación con matorrales y árboles en invierno. $n = 0.065$. La distribución de los tipos de suelo para la zona de calibración se expone en la **Figura 3-33**.

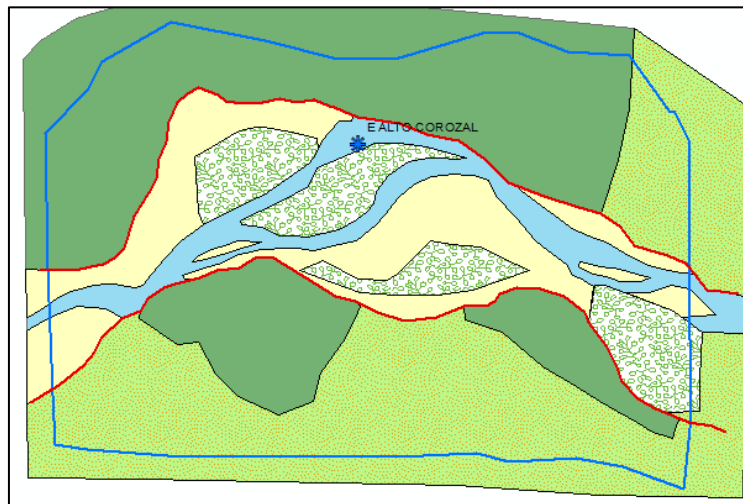


Figura 3-33: Asignación de rugosidades del suelo calibración.

Fuente: Autor – ArcGIS

3.5.10 Condiciones de contorno

Teniendo en cuenta la magnitud de la pendiente obtenida para el tramo de evaluación de apenas 0.43% se desarrollaron las simulaciones a partir de la definición de un régimen de flujo subcrítico. La calibración del modelo fue desarrollada a partir de los datos medidos en la Estación hidrométrica Alto Corozal [35017030]. Para desarrollar el ejercicio de calibración se eligió el caudal máximo registrado en la estación con una magnitud de 284.50 m³/s, el cual se encuentra asociado a una profundidad hidráulica de 0.38 m. Los niveles máximos registrados por la estación se presentan en la **Tabla 3-25**.

Tabla 3-25: Caudales y niveles máximos registrados por la Estación Alto Corozal.

Caudal (m ³ /s)	Nivel (cm)	Mes
163.00	240.00	agosto
174.00	250.00	junio
284.50	380.00	abril
178.40	284.00	octubre
129.10	230.00	mayo
205.10	308.00	agosto
148.60	250.00	noviembre
207.00	310.00	abril
138.80	240.00	julio

Fuente: Autor – IDEAM

3.5.11 Escenarios de simulación

Teniendo en cuenta los criterios de simulación expuestos en esta sección, en función de los componentes plasmados en el plan de simulación, se proyectan los escenarios de simulación presentados en la **Tabla 3-26**.

Tabla 3-26: Escenarios de simulación hidráulica.

Escenario	Condición	TR (años)	Caudal (m ³ /s)	Dominio
I	Sin obra	2	19.66	Todo el cauce
II	Sin obra	200	267.52	Todo el cauce
III	Sin obra	200	267.52	Margen izquierda
IV	Dique longitudinal	200	267.52	Todo el cauce
V	Dragado	200	267.52	Todo el cauce

Fuente: Autor.

Buscando simular una situación crítica, en el escenario III se redujo la amplitud del dominio y se condujo la totalidad del flujo a través de un sector específico del cauce, simulando la divagación de la corriente principal por uno de los cauces menores de la margen izquierda del cauce donde se presenta la zona de estudio. Para este escenario todos los parámetros

plasmados en el plan de simulación serán comunes, exceptuando el dominio y la malla generada, los cuales tendrán una menor dimensión en la amplitud del cauce. Para todos los escenarios se definió un tiempo de simulación de 12000 s – 3.33 h teniendo en cuenta el tiempo de concentración obtenido en el apartado **3.3.5**. Vale la pena mencionar que no fue posible realizar la simulación de una alternativa que considerase canales de alivio o desvío, ya que no fue posible contar con la información topográfica requerida y no se evidenciaron zonas inundables en cercanías a la zona de estudio (Ver Análisis y Discusión).

3.6 Resultados modelación hidráulica

Se desarrollo la modelación hidráulica de cada uno de los escenarios de simulación presentados en el apartado anterior. Se exhibe el desarrollo de la calibración del modelo hidráulico a partir de los datos registrados por la Estación Alto Corozal, con el fin de validar y certificar el uso del modelo para el desarrollo de las simulaciones. Seguido de esto, se realiza la presentación de los resultados de manera individual, exponiendo las profundidades hidráulicas obtenidas para cada escenario.

3.6.1 Calibración

El desarrollo de la calibración del modelo hidráulico se efectuó a partir de las condiciones hidrológicas registradas en la Estación Alto Corozal, en donde se registró un caudal máximo de 284.50 m³/s y un nivel de aguas de 0.38 m asociado a dicho caudal. Con el fin de comparar el valor registrado por la estación, se realizó un corte transversal en la zona de la localización de la estación y se evaluó la profundidad de flujo obtenida a través de la simulación. Los resultados obtenidos se presentan en la **Figura 3-34** y **Figura 3-35**. La simulación desarrollada para la calibración indica una profundidad máxima de 4.4 m en la zona de entrada al tramo de evaluación, lo que puede deberse a la inmersión instantánea del flujo mientras se desarrolla. En general a lo largo del tramo se presentan profundidades promedio de 1.6 m sobre las zonas definidas como corrientes (Ver **Figura 3-33**) y profundidades menores a 1 m para las zonas ocupadas por las barras de material granular y algunas islas de vegetación. También se evidencia desarrollo de inundación sobre la margen derecha del cauce en esta zona.

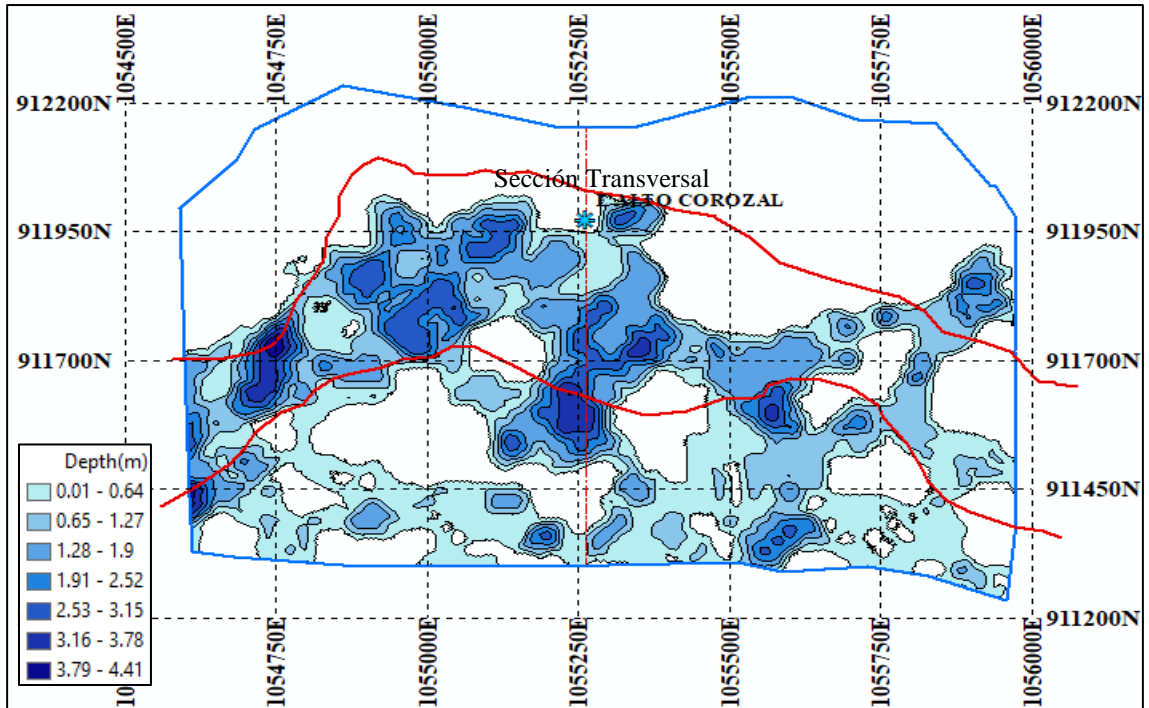


Figura 3-34: Profundidades hidráulicas zona de calibración.

Fuente: Autor – IBER.

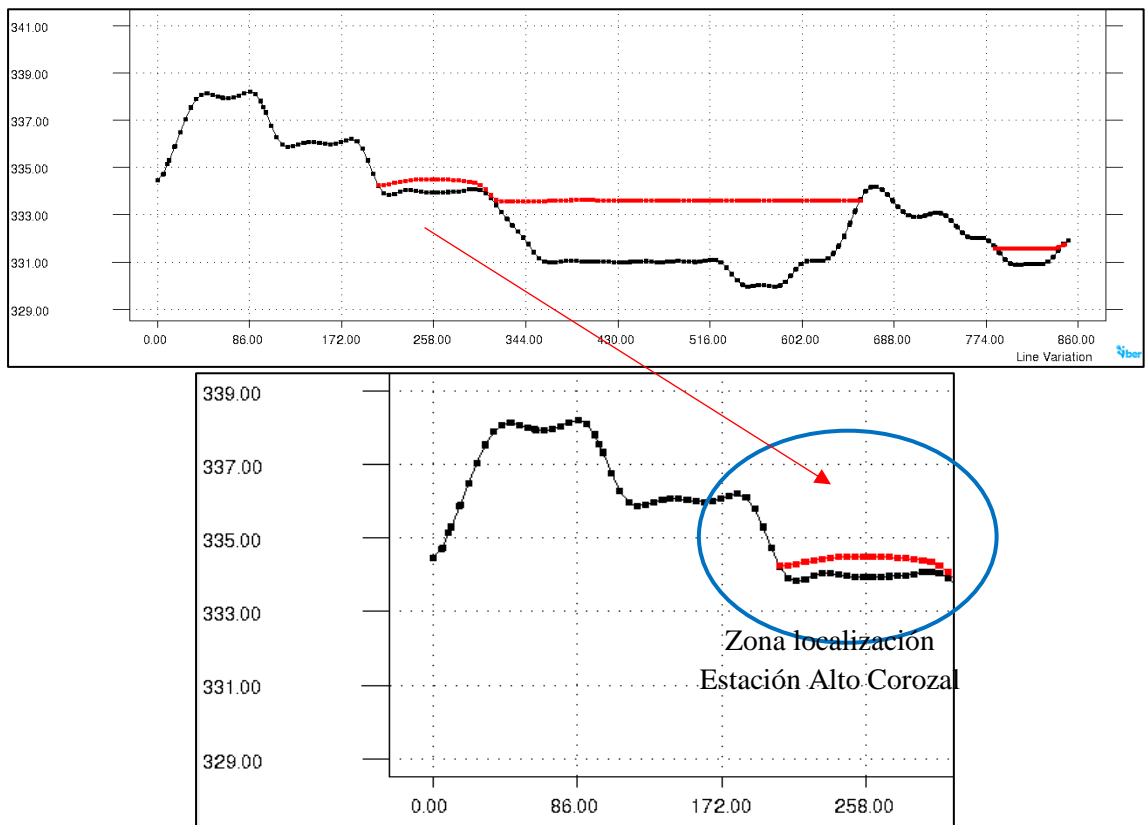


Figura 3-35: Corte sección localización Estación Altos de Corozal para $Q=284.50 \text{ m}^3/\text{s}$
Fuente: Autor – IBER.

Para la zona de localización de la estación hidrométrica las profundidades alcanzan un valor máximo de 0.56m y un promedio total de 0.43 m; El valor obtenido se asemeja en gran magnitud al valor registrado por la estación para ese caudal (0.38 m), encontrando una diferencia del 13% con respecto a las mediciones realizadas por la estación. El resultado obtenido permite validar el uso del modelo hidráulico bidimensional IBER para el cauce del río Guamal y nos permite avanzar hacia los resultados de cada uno de los escenarios proyectados. Para evaluar la sensibilidad del modelo se generó un cambio en la rugosidad asignada, otorgándole un grado de coeficientes más bajos (disminución en 0.01) para evaluar la variación producida a nivel general en las profundidades hidráulicas. Se presentan los resultados en la **Figura 3-36**.

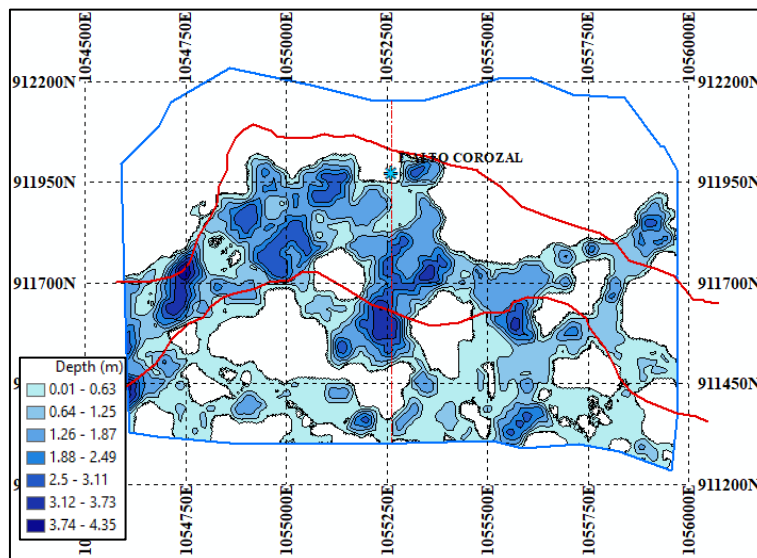


Figura 3-36: Profundidades de flujo zona calibración con variación en “n”.
Fuente: Autor – IBER.

Las profundidades obtenidas al efectuar la disminución en un grado ($n-0.01$) del coeficiente de rugosidad de Manning para los tipos del suelo no presentan cambios considerables en comparación a la simulación anterior. La profundidad máxima ha disminuido de 4.5 m a 4.35 m, representando un cambio de apenas un 3%. Por lo que se puede decir que el grado de sensibilidad del modelo es bajo al relacionar las rugosidades con las profundidades, sin embargo, si se pretendiera evaluar las velocidades de flujo y los problemas asociados a estas, la sensibilidad podría ser mayor en función del coeficiente de rugosidad de Manning. Se procede entonces con la presentación de los resultados de las simulaciones desarrolladas de acuerdo al plan de simulación presentado.

3.6.2 Escenario I

Con el fin de valorar un escenario frecuente, el primer escenario contempla el desarrollo del modelo hidráulico para las condiciones de flujo asociadas al caudal medio de $19.66 \text{ m}^3/\text{s}$ en las condiciones naturales del cauce en la zona de evaluación, es decir sin ningún tipo de obra incluida. Se presenta en la **Figura 3-37** la magnitud de las profundidades estimadas.

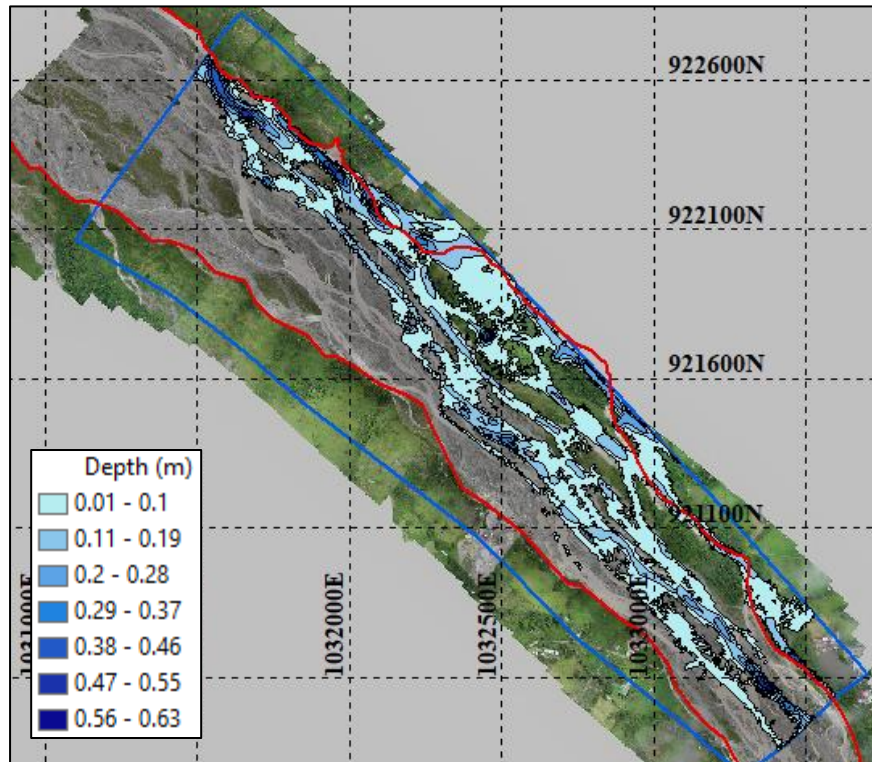


Figura 3-37: Profundidades de flujo Escenario I.

Fuente: Autor – IBER.

Las profundidades máximas obtenidas para este escenario llegan hasta magnitudes de 0.64 m para la zona localizada en la parte final del tramo evaluado y cercanas a los 0.5 m en la zona inicial del tramo. La mayor parte del cauce presenta valores promedio de 0.30 m para las zonas de tránsito de los cauces menores y de entre 0.1 m para las zonas de ocupación de vegetación y formaciones de barras. De igual manera, una gran parte del sector de la margen derecha del cauce no se ve afectada por el caudal simulado, es decir, para estas condiciones topográficas, la magnitud del cauce no es lo suficientemente alta para transitar en toda la extensión de este. Sin embargo, bajo estas solicitaciones hidrológicas ya se produce una inundación sobre la margen izquierda del cauce, entre los primeros 600 m – 1000 m y entre los 1700 m – 2400 m, de aproximadamente 0.15 m, por lo que se proseguirá con el desarrollo de los eventos extremos para analizar sus resultados.

3.6.3 Escenario II

El segundo escenario contempla el desarrollo del modelo hidráulico para las condiciones de flujo asociadas a un periodo de retorno de 200 años, lo que se traduce en un caudal de 267.52 m³/s en las condiciones naturales del cauce en la zona de evaluación, es decir sin ningún tipo de obra incluida. Se presenta en la **Figura 3-38** la magnitud de las profundidades estimadas.

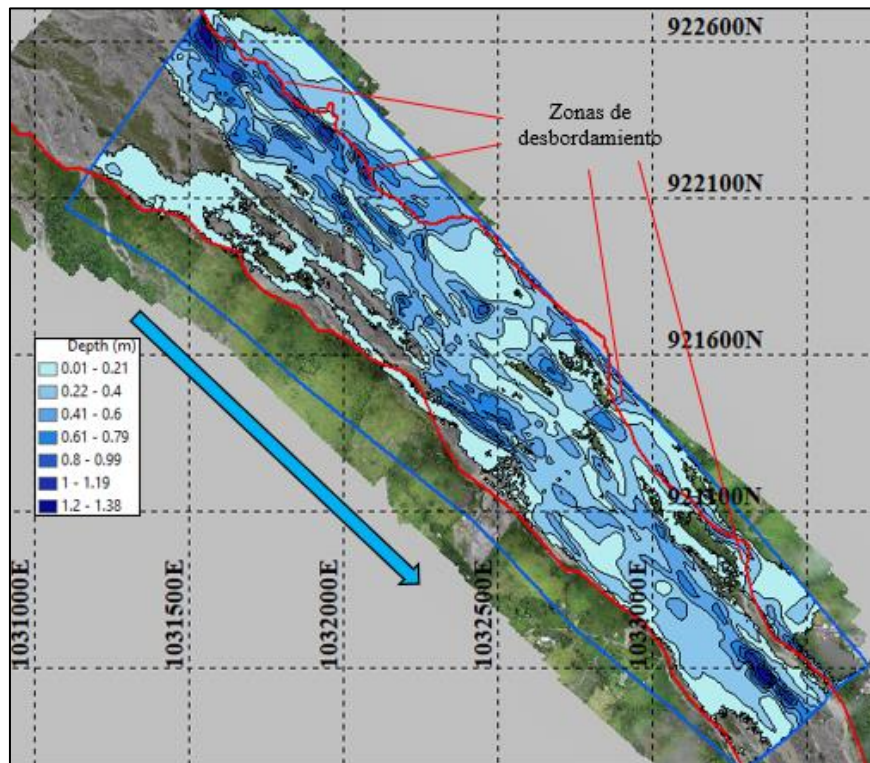


Figura 3-38: Profundidades de flujo Escenario II.

Fuente: Autor – IBER.

Las profundidades máximas obtenidas alcanzan magnitudes de 1.38 m para la zona localizada en la parte final del tramo evaluado y cercanas a los 1.2 m en la zona inicial del tramo, también se destaca para la zona central profundidades promedio de 1 m. A lo largo del tramo evaluado la mayor parte del cauce presenta valores que oscilan entre de 0.60 – 0.80 m para las corrientes de los cauces menores (Ver **Figura 3-29**) y de entre 0 – 0.5 m para las zonas de ocupación de vegetación y formaciones de barras. Las profundidades obtenidas para la inundación producida sobre la margen izquierda presentan magnitudes cercanas a los 0.80 m. Con base en los resultados obtenidos se definieron cuatro cortes

transversales al eje longitudinal del cauce en las zonas donde se desarrolló el trasvase del flujo sobre su margen izquierda con el fin de plantear las características de las alternativas de mitigación. Los cortes transversales realizados se presentan en la **Figura 3-39**.

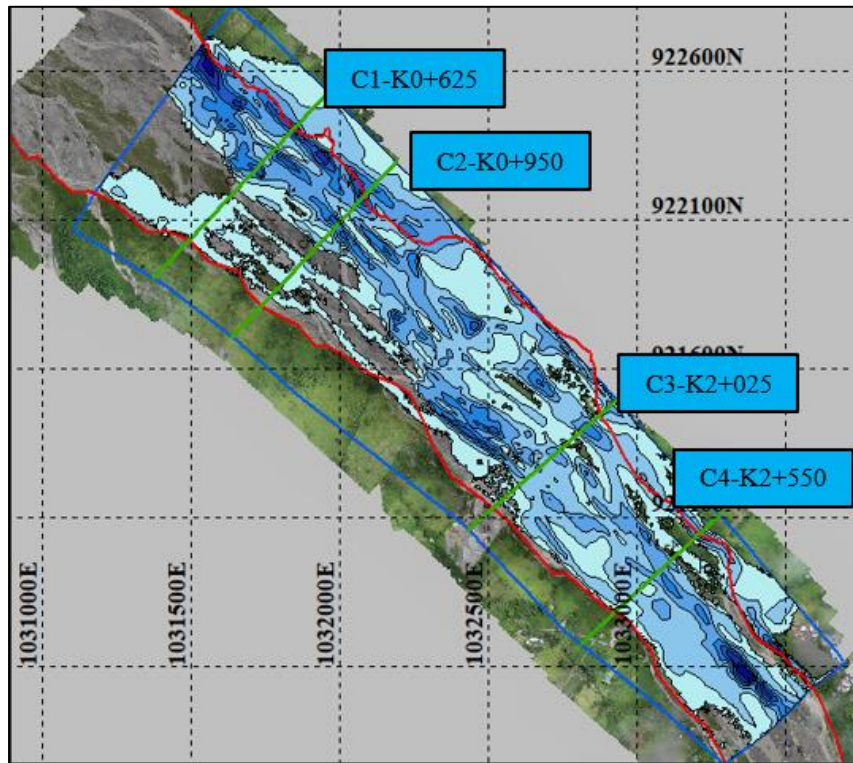


Figura 3-39: Cortes transversales.

Fuente: Autor – IBER.

De esta manera fue posible revisar el comportamiento hidráulico en las secciones determinadas a partir de los parámetros de entrada del primer escenario. Los resultados obtenidos se presentan a continuación (Ver **Figura 3-40** a **Figura 3-43**).

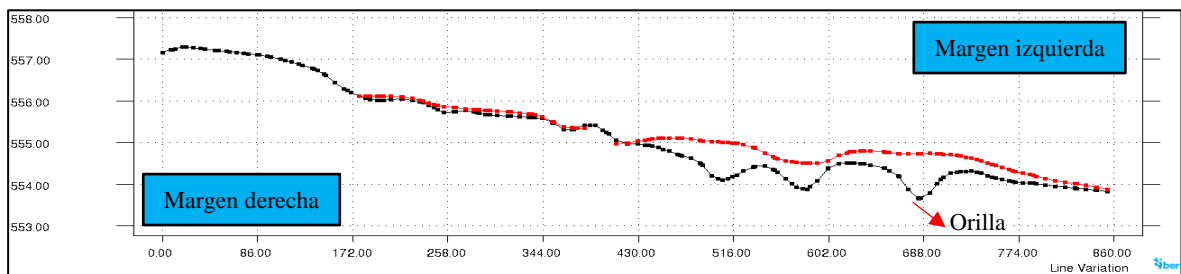


Figura 3-40: Sección transversal C1 – Escenario II.

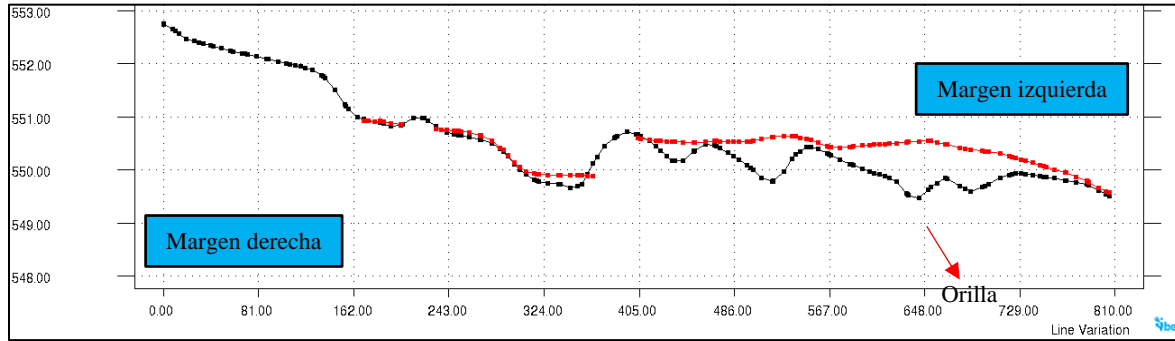


Figura 3-41: Sección transversal C2 – Escenario II.

Fuente: Autor – IBER.

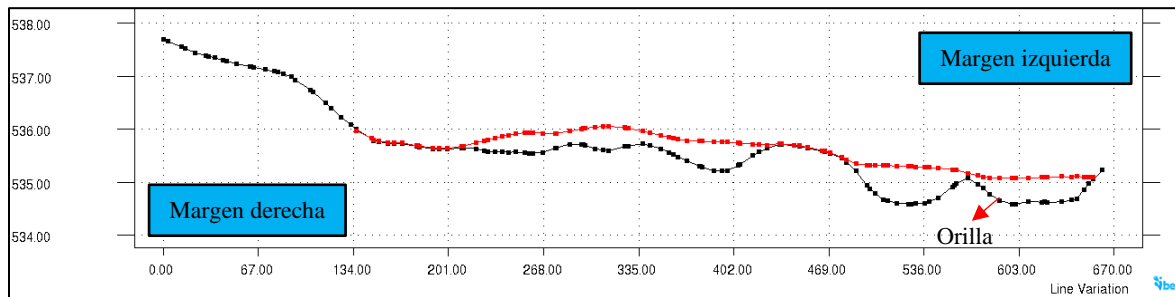


Figura 3-42: Sección transversal C3 – Escenario II.

Fuente: Autor – IBER.

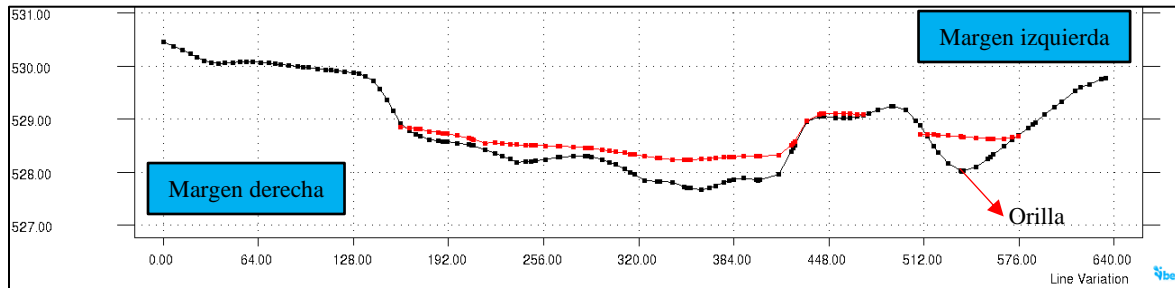


Figura 3-43: Sección transversal C4 – Escenario II.

Fuente: Autor – IBER.

Fue posible observar las profundidades de flujo desarrolladas sobre la orilla como causa de la inundación en estos sectores, obteniendo magnitudes cercanas a 1 m para la zona inicial y de 0.80 m para la zona final.

3.6.4 Escenario III

Se ha considerado necesaria la simulación de una situación en donde se vea reflejado el hecho existente de las divagaciones presentadas por la corriente hacia la margen izquierda del cauce. Así, este escenario simula los requerimientos del anterior, pero se reduce el dominio del flujo de la simulación de tal manera que este solo fluya sobre la margen afectada

y se puedan generar condiciones un poco más críticas y adaptadas a la realidad. Así, en la **Figura 3-44** se puede evidenciar que las profundidades son superiores a las obtenidos en el escenario anterior, aunque la diferencia no es elevada, se desarrollan profundidades de hasta 1.44 m y se evidencia un tránsito por zonas en las que no se generaba acumulación de flujo en el escenario anterior. Este resultado era esperado, teniendo en cuenta que los cauces menores cuentan con una capacidad hidráulica máxima, es decir, profundidades máximas para las mismas zonas evaluadas en el escenario anterior. La gran diferencia en este caso, radica en la magnitud de las inundaciones producidas sobre la margen izquierda, las cuales pueden aumentar hasta 1.20 m en la zona inicial y hasta 1.40 m en la zona final.

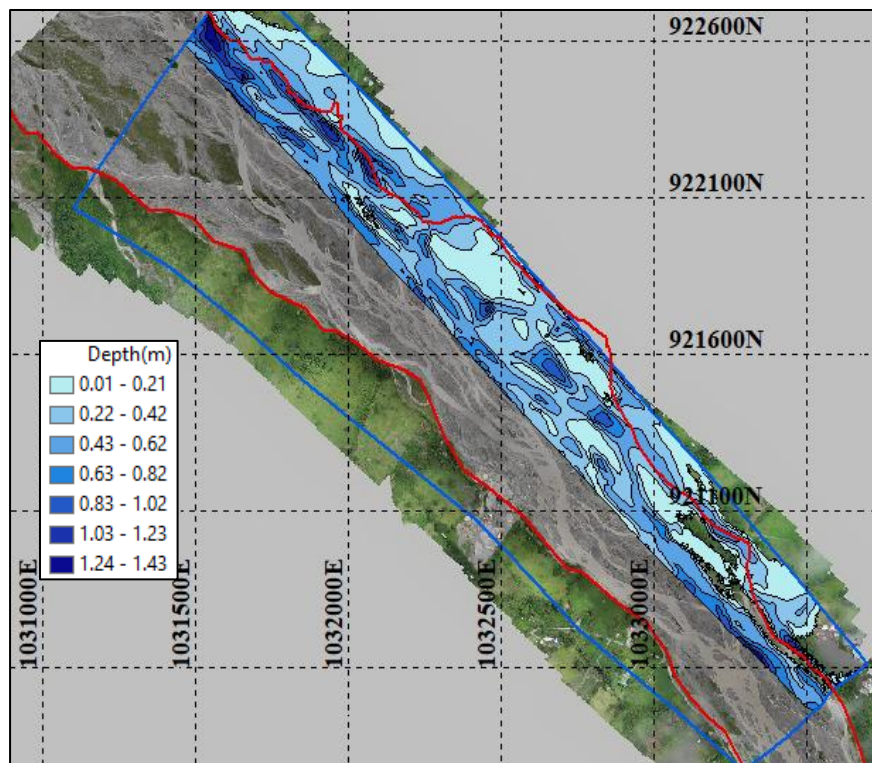


Figura 3-44: Profundidades de flujo Escenario III.

Fuente: Autor – IBER.

Para este caso, también se realizó la evaluación de las secciones transversales definidas en el segundo escenario, con el fin de visualizar la variación con respecto al anterior y tener en cuenta el aumento en las láminas generadas para la definición de las características de las alternativas de mitigación. (Ver **Figura 3-45** a **Figura 3-48**).

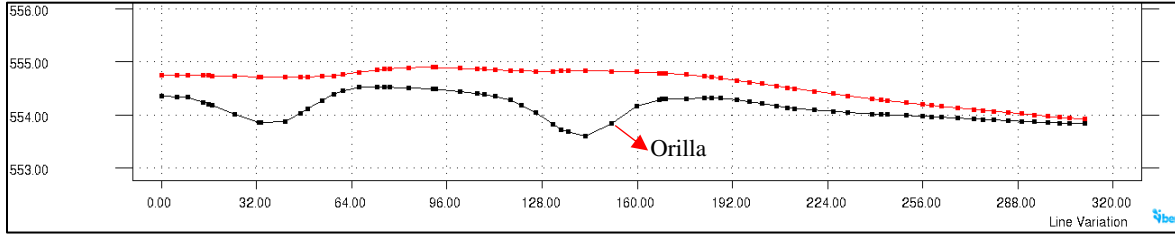


Figura 3-45: Sección transversal C1 – Escenario III.

Fuente: Autor – IBER.

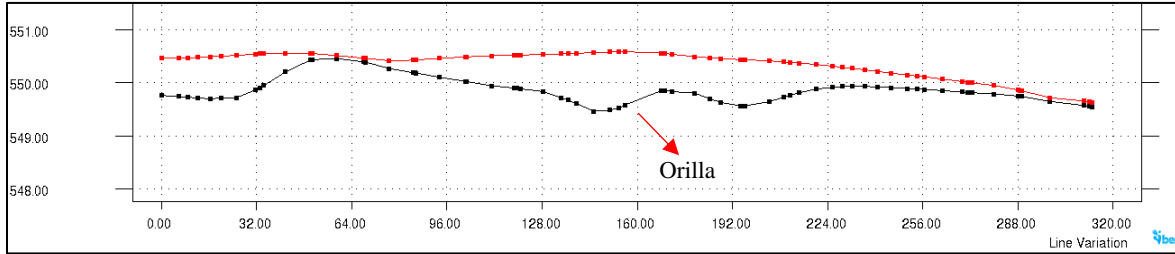


Figura 3-46: Sección transversal C2 – Escenario III.

Fuente: Autor – IBER.

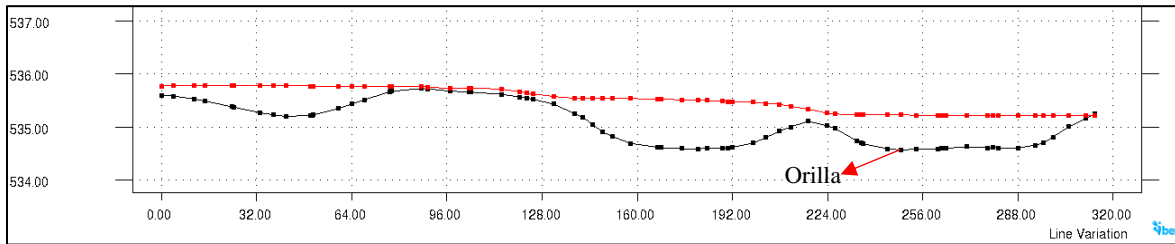


Figura 3-47: Sección transversal C3 – Escenario III.

Fuente: Autor – IBER.

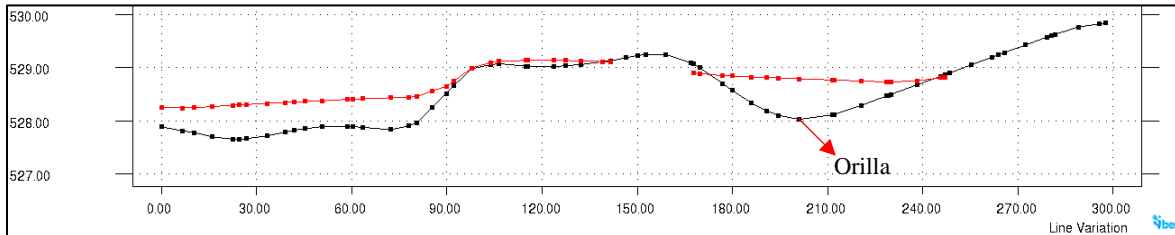


Figura 3-48: Sección transversal C4 – Escenario III.

Fuente: Autor – IBER.

Se evidencia un aumento general sobre toda la margen izquierda, inclusive no solo en la zona de inundación sino en la zona de tránsito habitual del cauce alcanzando láminas de 1.40 m en concordancia con los resultados expuestos en la **Figura 3-44**.

3.6.5 Escenario IV

Una vez desarrolladas las simulaciones previas con el fin de conocer la magnitud de las profundidades en el cauce del río Guamal ante los caudales máximos y las condiciones geométricas y topológicas expuestas, se procedió con el cuarto escenario de simulación de acuerdo a lo previsto, en donde se planteó la mitigación de la inundación producida sobre la margen izquierda del río a través de la proyección de un dique longitudinal conformado por geo sintéticos rellenos. Para esto, se definieron las siguientes características principales de la obra proyectada:

- **Dique longitudinal.**

Se definió el alineamiento del eje central de la obra en una longitud aproximada de 3200 m, con base en las manchas de inundación obtenidas previamente para los escenarios más críticos. Se proyectó una obra intrusiva en algunas zonas dentro del cauce activo del río, con el fin de generar un encauzamiento del cauce a través de su sector central y disminuir la divagación hacia la orilla. En la **Figura 3-49** se presenta el alineamiento definido.

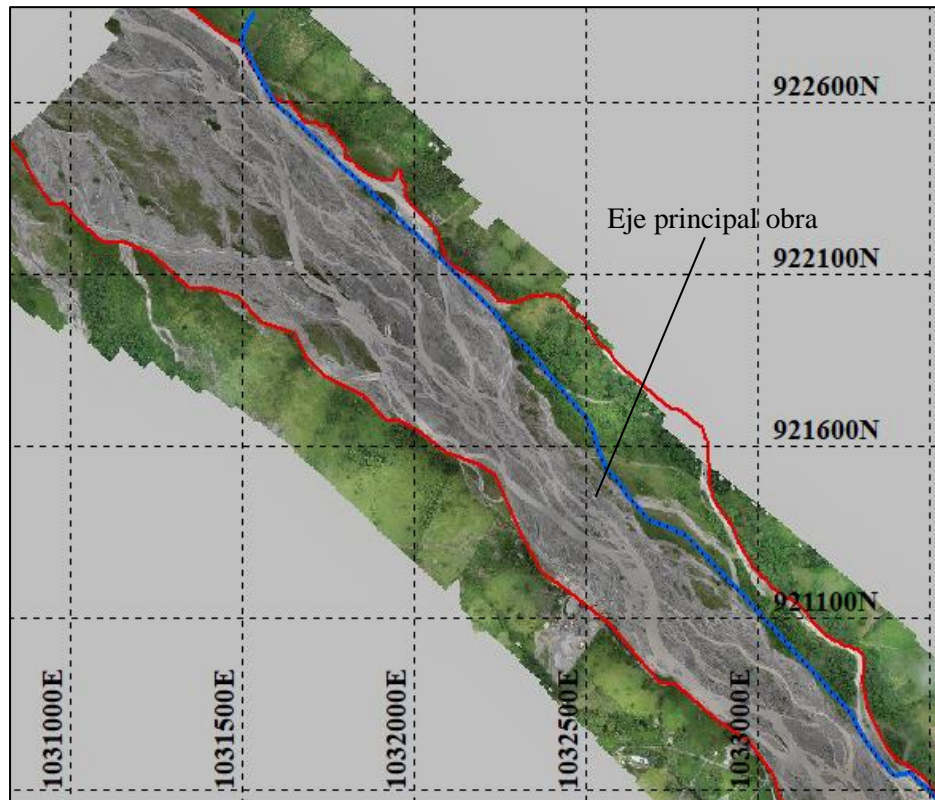


Figura 3-49: Alineamiento central dique proyectado.

Fuente: Autor – ArcGIS.

La definición de la altura general del dique se realizó con base en las profundidades evidenciadas sobre la margen izquierda en la **Figura 3-48**, pero también con base en la inclinación prominente del terreno hacia dicha margen evidenciada en la **Figura 3-40** y **Figura 3-41**. Siendo así, se buscó generar una igualdad entre las elevaciones de las márgenes derecha e izquierda del cauce, para así evitar el trasvase futuro del cauce sobre la margen izquierda debido al incremento entre esta diferencia existente. Se optó por el uso de geosintéticos rellenos, los cuales a nivel comercial se presentan en bloques de 1.5 m de altura; se definieron 2 hileras principales de bloques individuales de dimensiones 2.1 m x 1.5 m x 4.5 m tal y como se observa en la **Figura 3-50**.

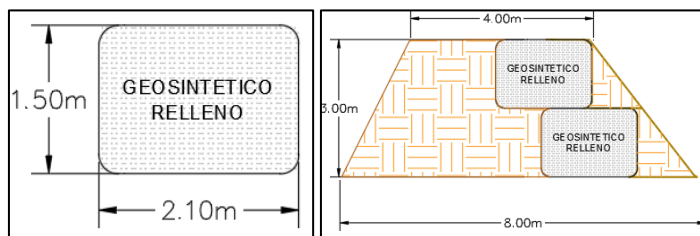


Figura 3-50: Dimensiones geosintético relleno y sección transversal dique.

Fuente: Autor – Comercializadora.

A partir de las coordenadas de localización y de las cotas de elevación de la obra proyectada, se efectuó la inclusión del dique longitudinal (Ver **Figura 3-51**) en el modelo hidráulico para poder desarrollar la simulación asociada al escenario IV.

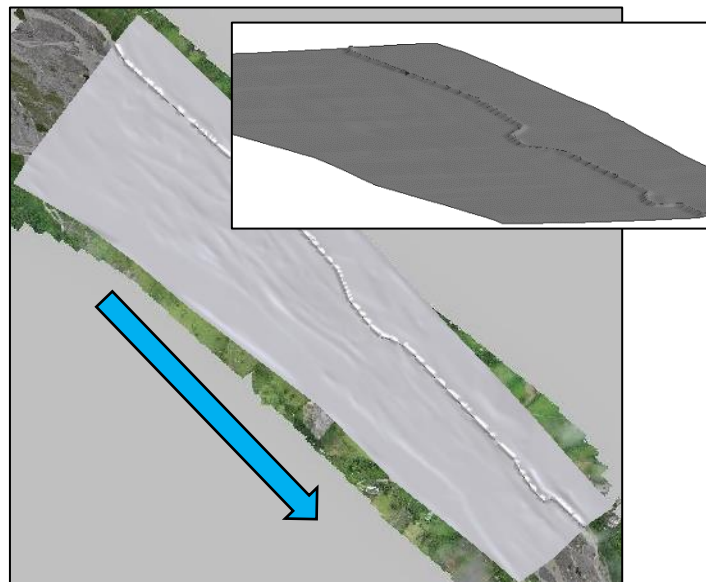


Figura 3-51: Inclusión dique longitudinal en modelo hidráulico.

Fuente: Autor – IBER.

Se desarrolló la simulación hidráulica para un caudal de $267.52 \text{ m}^3/\text{s}$, con el fin de obtener las profundidades y la mancha de inundación asociada a las condiciones hidrológicas expuestas en el segundo escenario de la corriente y la respuesta hidráulica de esta ante la inclusión del dique longitudinal proyectado sobre la margen izquierda. Los resultados obtenidos se presentan en la **Figura 3-52**.

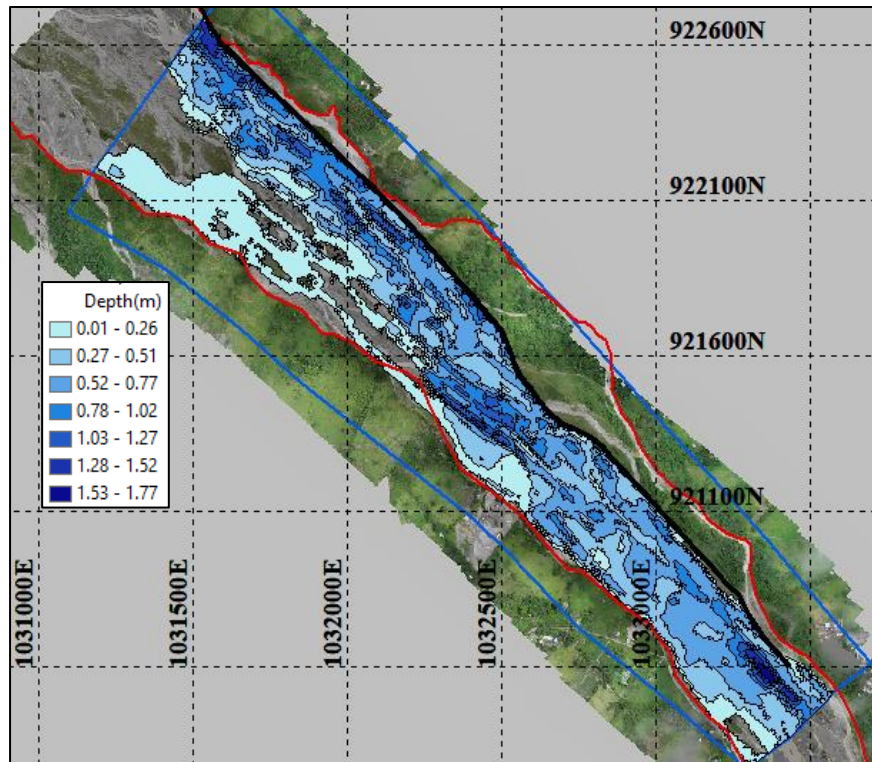


Figura 3-52: Profundidades de flujo Escenario IV.

Fuente: Autor – IBER.

Evidentemente, debido a la inclusión de la obra de mitigación contra la inundación, las profundidades hidráulicas han variado en su magnitud ante las mismas solicitaciones hidrológicas presentadas en (3.6.3). Se desarrollan profundidades máximas de 1.77 m para la zona final del tramo de evaluación y cercanas a los 1.5 m para la zona inicial. Sobre las corrientes hídricas definidas, las profundidades oscilan entre los 0.7 m – 1 m para el sector izquierdo del cauce y se mantienen inferiores a los 0.25 m para la mayor parte del sector derecho en los primeros 1000 m, alcanzando hasta 0.50 m en los siguientes 2000 m. Aunque el caudal de simulación de este escenario es el mismo que el de los escenarios II y III, es notable el incremento de las profundidades en más del 50% en el costado derecho del cauce en comparación con ellos como consecuencia de la inclusión de la obra de mitigación en el

costado izquierdo. A continuación, se exponen las secciones transversales definidas previamente con el fin de visualizar y evaluar el comportamiento presentado tras la inclusión de esta obra (Ver **Figura 3-53** a **Figura 3-56**).

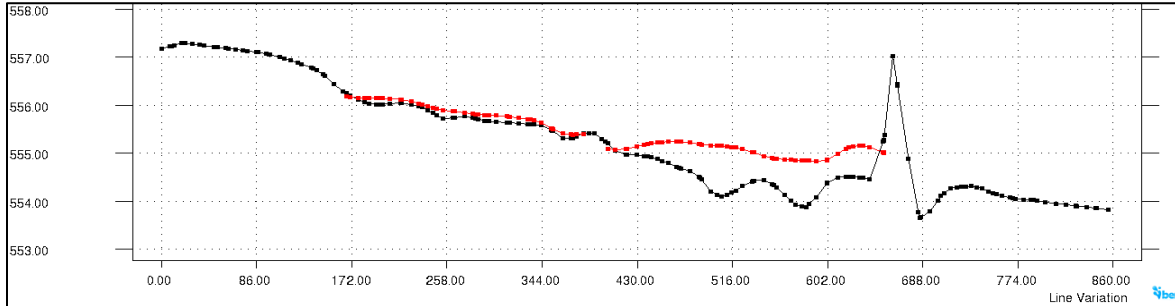


Figura 3-53: Sección transversal C1 – Escenario IV.

Fuente: Autor – IBER.

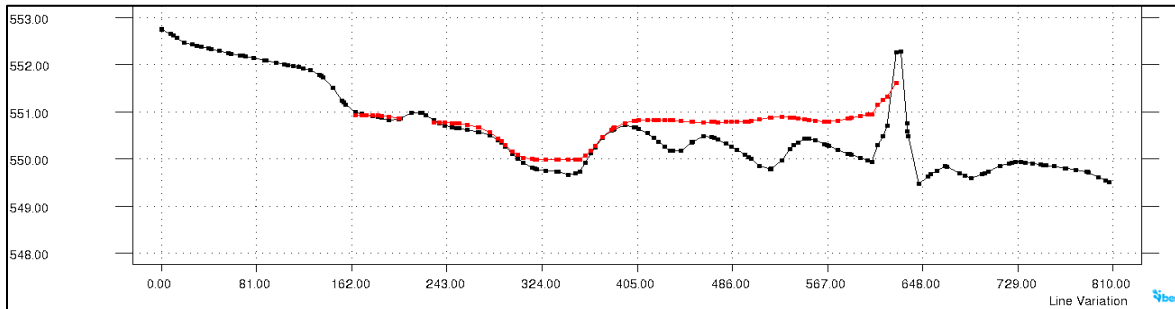


Figura 3-54: Sección transversal C2 – Escenario IV.

Fuente: Autor – IBER.

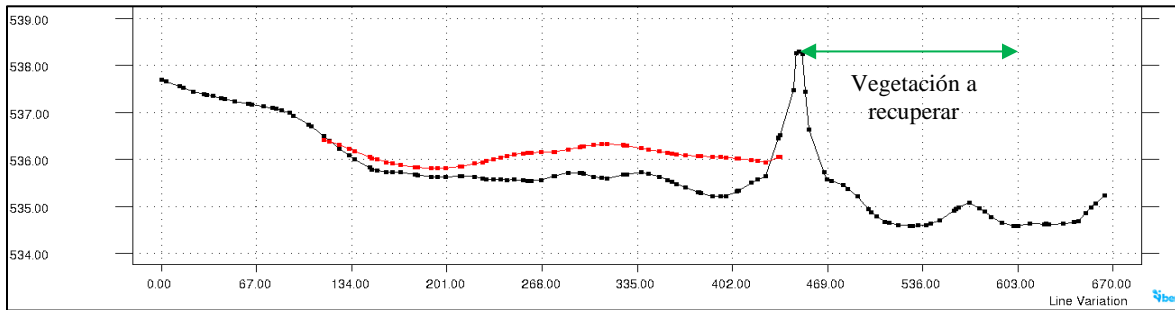


Figura 3-55: Sección transversal C3 – Escenario IV.

Fuente: Autor – IBER.

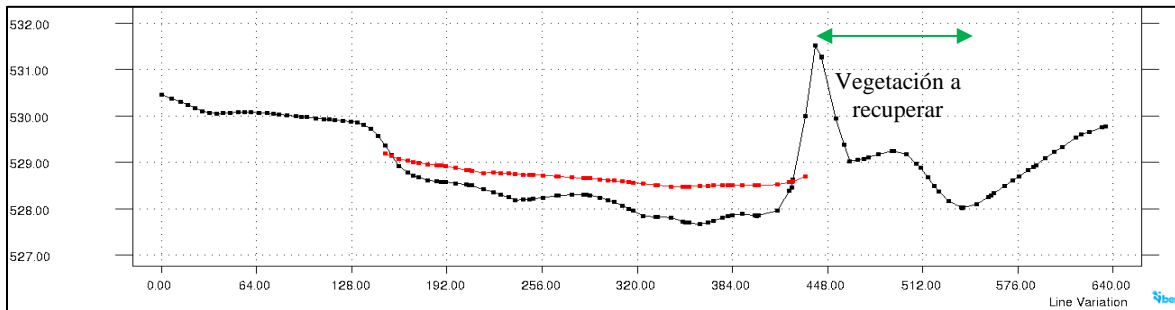


Figura 3-56: Sección transversal C4 – Escenario IV.

Fuente: Autor – IBER.

3.6.6 Escenario V

Una vez evaluados los resultados obtenidos a través de la inclusión del dique longitudinal, se procedió con el ultimo escenario de simulación, en donde se planteó la mitigación de la inundación producida sobre la margen izquierda del río a través de un dragado sobre el terreno natural para generar una canalización que permita una repartición más equitativa del flujo a lo ancho del cauce. Para esto, se definieron las siguientes características principales de la obra proyectada:

- **Dragado sobre terreno natural**

Para representar esta medida en el modelo hidráulico, se partió de la modificación del terreno natural del cauce a partir de los resultados obtenidos en la **Figura 3-38**. Como se observó en la **Figura 3-38** existen algunas zonas en la parte central del cauce en las que no se desarrolla el flujo. Es probable que este suceso se deba a que son zonas que cuentan con una alta capa de sedimentos y/o vegetación depositados sobre ellas que elevan el terreno de una manera considerable y actúan como barrera desviando el drenaje hacia los puntos más bajos. Estas zonas se representan en la **Figura 3-57**.

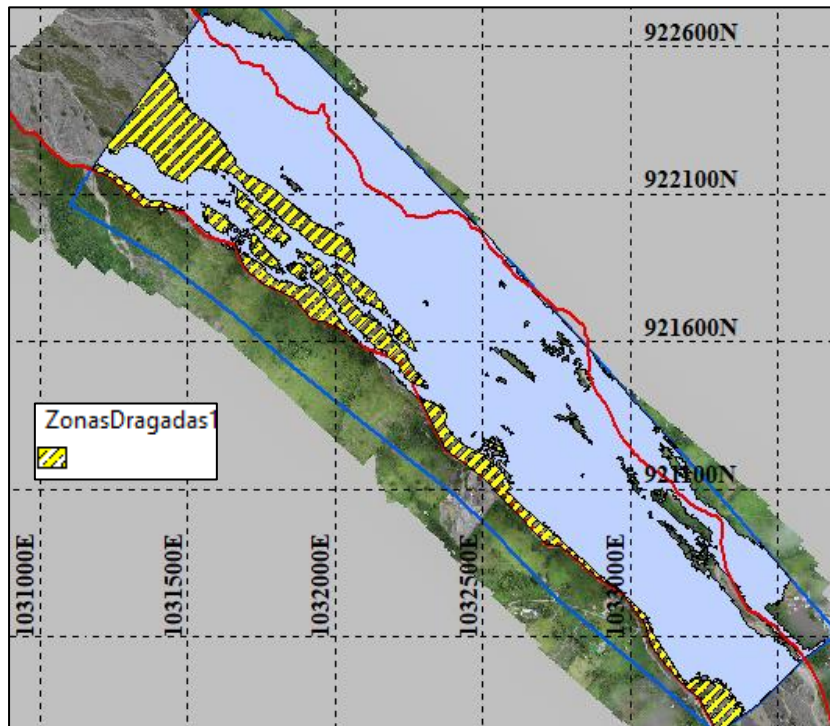


Figura 3-57: Zonas modificadas con el dragado.

Fuente: Autor – ArcGIS.

Se seleccionaron estas zonas para realizar alteraciones en su nivelación teniendo en cuenta que el cauce se encuentra recostado sobre el sector contrario, por lo que no se consideró adecuado el incrementar la profundidad del lecho a lo ancho de todo el cauce. A raíz de las profundidades hidráulicas desarrolladas en las condiciones naturales del cauce, se consideró una excavación promedio de 1.2 m de profundidad en las zonas seleccionadas. Para esto, fue necesario modificar el modelo digital de elevación y las rugosidades en esta zona, obteniendo la superficie presentada en la **Figura 3-58**.



Figura 3-58: Modificación superficie para dragado.

Fuente: Autor – IBER.

Siguiendo los lineamientos previos se desarrolló la simulación hidráulica para un caudal de $267.52 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados obtenidos se presentan en la **Figura 3-59**.

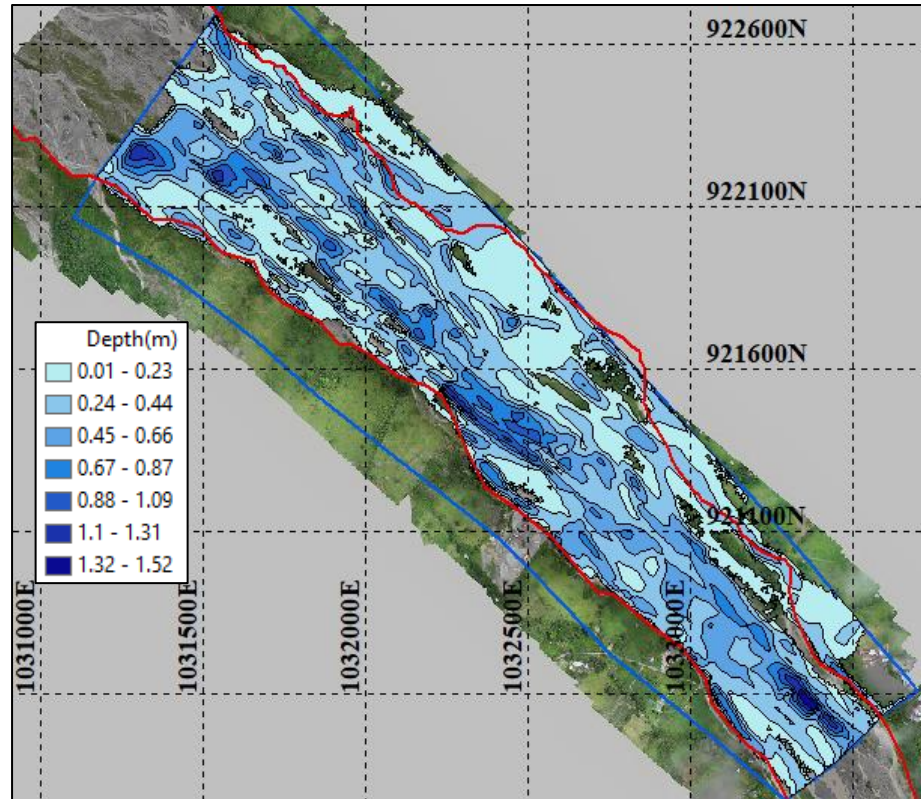


Figura 3-59: Profundidades de flujo Escenario V.

Fuente: Autor – IBER.

Debido al dragado realizado sobre las zonas expuestas previamente se evidencia una alteración del cauce en todo su recorrido. Las profundidades hidráulicas máximas han sido trasladadas a la zona central y final del cauce con magnitudes de hasta 1.5 m e inclusive hacia la zona inicial de la margen derecha, alcanzando valores de 1.3 m. Es notable la presencia de flujo sobre zonas en las que no se generaba tránsito de las corrientes hídricas (3.6.3). Las profundidades a lo largo del tramo evaluado presentan un valor promedio de 0.80 y se encuentran distribuidas por la corriente central del cauce. Así mismo es destacable la disminución de la profundidad a lo largo de la margen izquierda en donde antes se presentaban las mayores profundidades. Para observar la variación presentada en las secciones transversales estudiadas en los escenarios anteriores, se presentan las siguientes figuras. (Ver **Figura 3-60** a **Figura 3-63**).

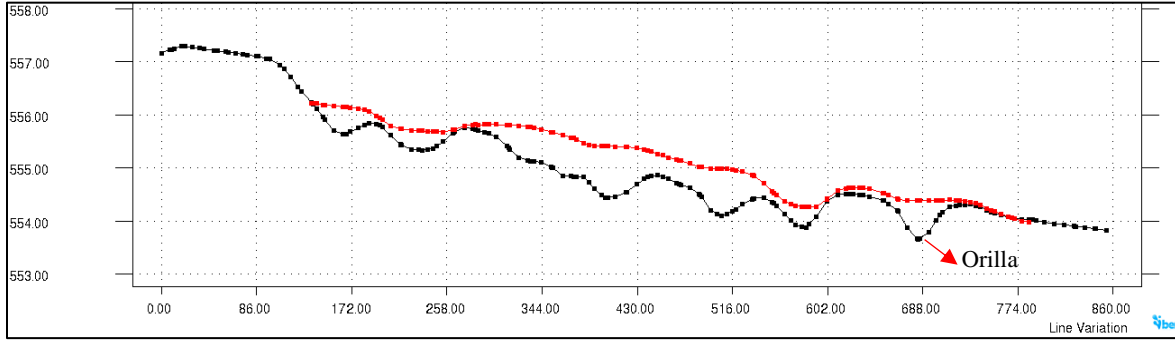


Figura 3-60: Sección transversal C1 – Escenario V.

Fuente: Autor – IBER.

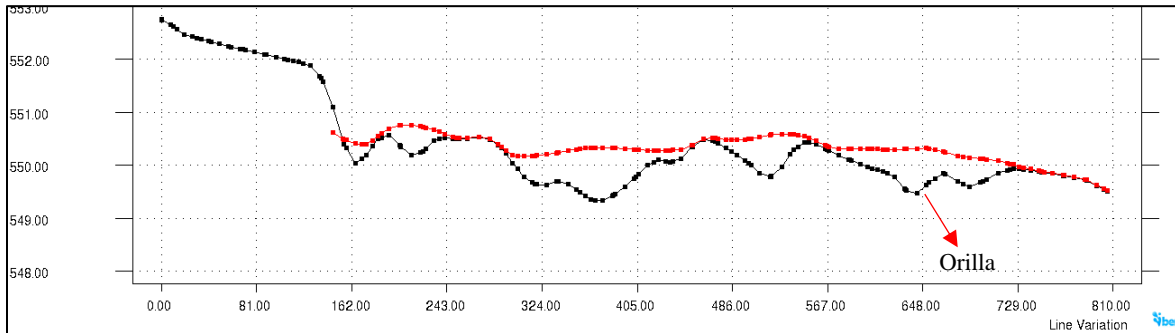


Figura 3-61: Sección transversal C2 – Escenario V.

Fuente: Autor – IBER.

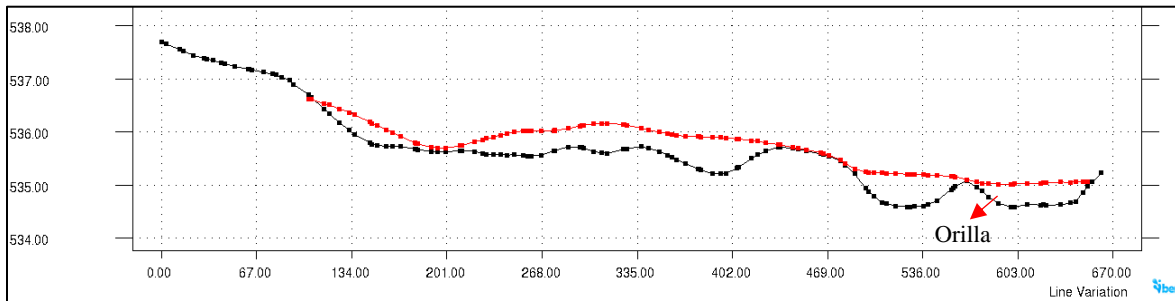


Figura 3-62: Sección transversal C3 – Escenario V.

Fuente: Autor – IBER.

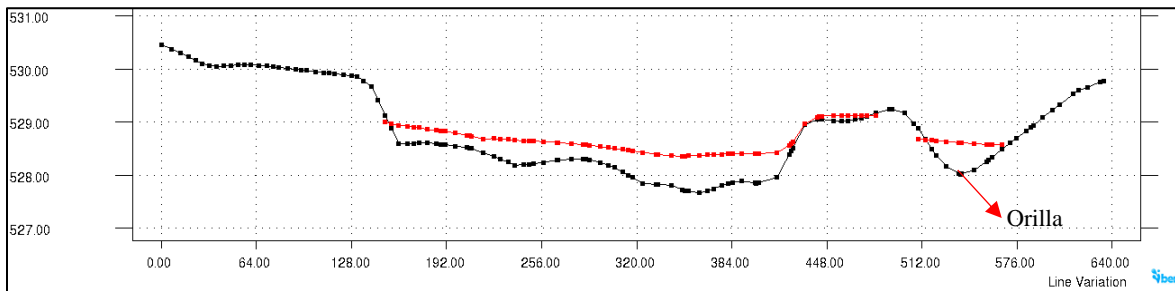


Figura 3-63: Sección transversal C4 – Escenario V.

Fuente: Autor – IBER.

Con el fin de contar con una valoración del comportamiento del río a partir de los conceptos teóricos estudiados, se presentan los resultados derivados de la clasificación del cauce.

3.7 Resultados clasificación del cauce

Siguiendo con los lineamientos presentados, se busca ahora relacionar el comportamiento de la corriente descrito en los apartados anteriores a partir de una apreciación de la morfología del cauce con respecto a las diferentes clasificaciones descritas. Para esto, en la **Figura 3-64**, **Figura 3-65** y **Figura 3-66** se presentan sectores de una fotografía aérea de alta resolución desarrollada con un dron, donde se exponen los componentes principales del cauce en la zona de evaluación.



Figura 3-64: Vista área cauce río Guamal (1/3).

Fuente: Autor.

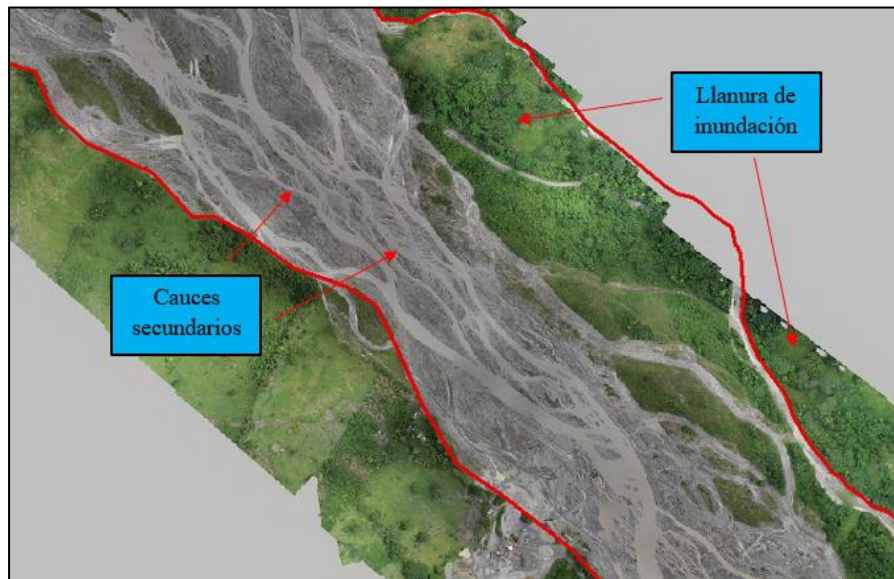


Figura 3-65: Vista área cauce río Guamal (2/3).

Fuente: Autor.

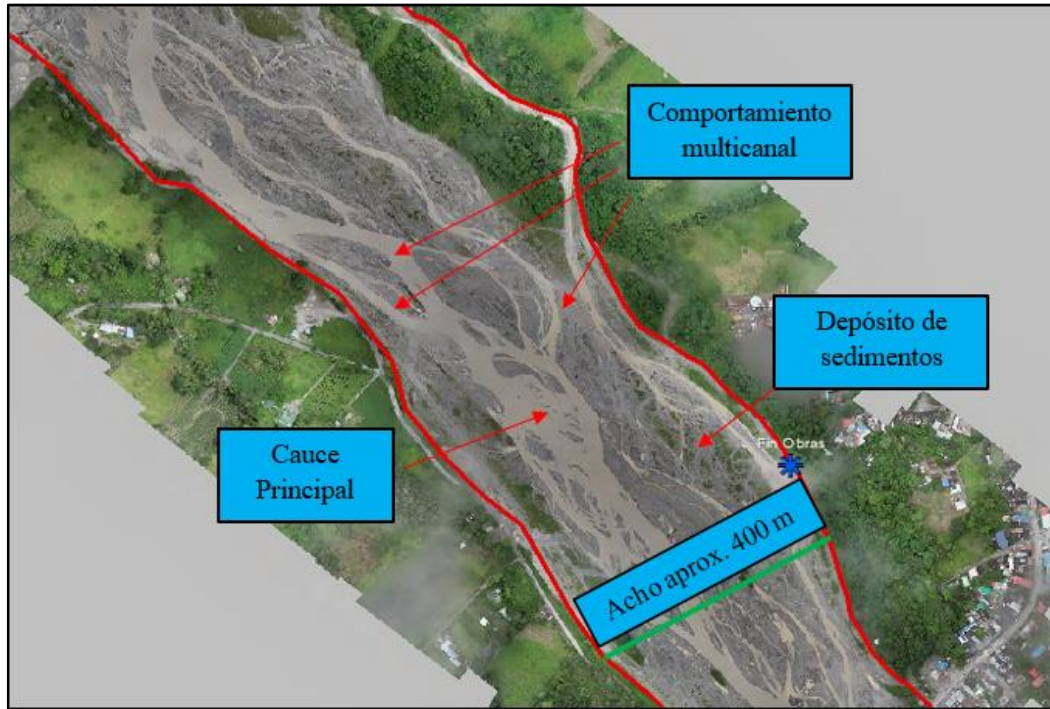


Figura 3-66: Vista área cauce río Guamal (3/3).

Fuente: Autor.

3.7.1 Clasificación según su edad

A lo largo del recorrido del cauce principal hasta la zona de estudio, este se puede clasificar de dos maneras de acuerdo a su edad con base en las definiciones de Gracia & Maza (1997). En la zona montañosa de la cuenca se puede clasificar como un cauce joven, ya que es formado a partir de la escorrentía continua junto con los demás cauces menores. Ahora, después de atravesar el piedemonte llanero, el cauce cuenta con un valle amplio y se encuentra la zona de la cuenca con las pendientes más bajas. Esta característica, sumada a los procesos de sedimentación, la formación de barras naturales y de zonas inundables a los lados (**Figura 3-64** y **Figura 3-65**) y los resultados obtenidos en la curva hipsométrica (**Figura 3-15**) permiten clasificar este cauce como un cauce viejo.

3.7.2 Clasificación según su patrón de drenaje

Teniendo en cuenta la red de drenaje definida para la cuenca del río Guamal (Ver **Figura 3-12**) y de acuerdo con la clasificación presentada por Howard (1967), se puede clasificar el sistema de drenaje de la zona montañosa como un patrón de drenaje sub - dendrítico.

3.7.3 Clasificación de acuerdo a su trazado en planta

Con base en las figuras expuestas en el desarrollo de la identificación multitemporal de las orillas efectuado en el 3.2.1 y en la similitud de las características y los componentes de la corriente del río evidenciados en las figuras previas con los expuestos por Gracia & Maza (1997) en la **Figura 2-4** en donde se evidencia la formación de islas y barras de grava y la acumulación de sedimentos, se puede clasificar el cauce del río Guamal como un cauce trezado.

3.7.4 Clasificación con base en su libertad para ajustar su forma y pendiente

Como primera medida, considerando las características geológicas del cauce en la zona de estudio evidenciadas en **Figura 3-67**, este se puede clasificar como un cauce aluvial.



Figura 3-67: Clasificación geológica cauce zona de estudio.

Donde

Q1-ca = Abanicos aluviales disectados.

Q - al = Depósitos aluviales y de llanuras aluviales

Fuente: Gómez et al. (2020).

Ahora, centrándonos en la zona de estudio, teniendo en cuenta la pendiente promedio de la zona baja de la cuenca y el alto contenido de sedimentos, el cauce se puede clasificar como un cauce trezado con base en los ensayos de laboratorio desarrollados por Schumm (1977) expuestos en la **Figura 2-5**. Una manera de corroborar lo anterior es calculando la relación ancho(b)/profundidad(d) del cauce y clasificándola entre los grupos expuestos en la **Tabla 2-2**. Partiendo de un ancho promedio del cauce en la zona de estudio de 500 m (**Figura 3-64** y **Figura 3-66**) desconociendo la magnitud de las profundidades del cauce en la zona de estudio, se plantean las siguientes dos hipótesis:

$$\frac{a}{d} < 7 \rightarrow \frac{500}{d} < 7 \rightarrow 500 < 7d \rightarrow d > 71.4 \text{ m} \rightarrow \text{Imposible}$$

$$\frac{a}{d} > 25 \rightarrow \frac{500}{d} > 25 \rightarrow 500 > 25d \rightarrow d < 2 \text{ m} \rightarrow \text{Posible}$$

Donde

a = Ancho del cauce (m).

d = Profundidad del cauce (m).

Es imposible que la profundidad del cauce en la zona de estudio sea mayor a 71.4m. Por el contrario, es bastante probable que las profundidades del cauce en la zona de estudio sean menores a 2 m. Así, con base en la misma **Tabla 2-2** se puede estimar que el comportamiento del cauce en esta zona se encuentra asociado a una carga de fondo de entre **35% – 70%**.

3.7.5 Clasificación según Rust

Descartando el primero de los grupos propuesto por Rust (1978) (rectos y meándricos) debido a la inexistencia de un solo cauce definido a lo ancho de la corriente (**Figura 3-65**), se efectuó el cálculo de la sinuosidad para el tramo de estudio a partir de la ecuación (2-1) obteniendo un valor de 1.3, lo cual de acuerdo con la **Tabla 2-3** agrupa el cauce de estudio dentro del grupo de los entrelazados. Esta clasificación puede llegar a ser un poco subjetiva, ya que el resultado puede variar en función del cauce que sea considerado como cauce principal, lo que puede arrojar múltiples resultados y aun así clasificar en los mismos grupos (entrelazado, anastomosado). Para este caso, la clasificación obtenida se ajustó a los comportamientos presentados en las **Figura 3-64** a **Figura 3-66**.

3.8 Conclusión

A lo largo del presente capítulo fue posible poner en práctica los principios teóricos esenciales para la comprensión de las inundaciones fluviales producidas por el comportamiento hidráulico del río Guamal y la evaluación de las alternativas de mitigación de estas inundaciones para la zona de estudio. De esta manera, siguiendo los lineamientos presentados en la teoría, se resolvieron los aspectos principales para el entendimiento de la situación a partir de la ejecución de los siguientes parámetros: El estudio de los antecedentes históricos de la corriente del río asociados a las inundaciones fluviales y las medidas usadas para contrarrestarlas, la identificación de los parámetros geomorfológicos, pluviométricos e

hidrológicos (caudal) desarrollados sobre la cuenca del río, los requerimientos necesarios para llevar a cabo el desarrollo de una simulación hidráulica de flujo libre para un cauce por medio del modelo hidráulico bidimensional de tipo horizontal IBER plasmados en un plan de simulación para ser desarrollado partiendo de unos supuestos iniciales en la zona de estudio, la exposición de los resultados obtenidos en la modelación hidráulica ejecutada (específicamente de las profundidades de flujo) al verse expuesta a los requerimientos definidos de cada escenario plasmado en el plan proyectado y la clasificación asignada a cauce del río Guamal teniendo en cuenta los diferentes tipos de clasificación estudiados.

De esta manera, en el siguiente capítulo se presenta el análisis de los resultados globales obtenidos considerando los conceptos teóricos y prácticos expuestos en estos tres capítulos con el fin de seleccionar la alternativa de mitigación más viable para el caso de estudio y continuar con la discusión y conclusión final del proyecto.

4. Análisis y Discusión

4.1 Introducción

A través del presente capítulo se pretende realizar una profundización exhaustiva de los resultados obtenidos en el estudio de la dinámica fluvial del río Guamal desarrollada en el capítulo previo. De esta manera se presentarán y analizarán de manera sistemática los hallazgos derivados en los diferentes componentes evaluados, tales como: El contexto histórico de la corriente del río Guamal, las caracterizaciones realizadas a la cuenca y al cauce y las simulaciones hidráulicas desarrolladas con el modelo IBER. Los resultados obtenidos a lo largo del proyecto permitirán conocer la complejidad y la relación de los factores que contribuyen a la vulnerabilidad de la zona de estudio, brindando un marco integral a partir del cual se puedan identificar patrones, relaciones y tendencias que faciliten la comprensión de la dinámica fluvial del cauce para que a partir de una reflexión crítica y analítica se proporcione un argumento sólido base para la definición e implementación de la solución más óptima para hacer frente a la situación problema planteada en este documento.

4.2 Análisis

Tomando como base la información recopilada por la herramienta DESINVENTAR se evidenció de manera notable la necesidad que ha tenido el municipio históricamente para contrarrestar las inundaciones fluviales producidas por el desbordamiento del río y como estas han generado múltiples afectaciones a los habitantes del municipio, a sus bienes y a sus servicios, ocasionando daños morales y pérdidas económicas a los agricultores, ganaderos, cementeros, comerciantes y en el peor de los casos a las propias viviendas de la comunidad urbana y rural dejando un número importante de damnificados en cada evento,

que inclusive en ocasiones no ha podido ser cuantificado con exactitud. De la misma manera fue posible evidenciar el daño generado sobre las vías principales y terciarias de la región, motivo por el cual el municipio ha quedado incomunicado en varias ocasiones con el resto del departamento, trayendo falta de desarrollo continuo y disminuyendo la calidad de vida de los Guamalunos.

Esta información fue constatada en las fotografías presentadas a partir de la información satelital histórica disponible (**Figura 3-1 – Figura 3-4**) en donde se pudieron observar las formaciones de “islas” y de zonas conformadas por playas y barras de sedimentos depositados en varias zonas de la corriente. Asimismo, se identificaron los múltiples cursos de drenaje desarrollados históricamente con el paso del tiempo para la misma zona de evaluación, lo cual al parecer ha generado la desviación de la corriente principal, siendo esta conducida de la zona central hacia alguna de las dos márgenes y viceversa. De igual manera, se consiguió evidenciar a través de un análisis multitemporal de orillas (**Figura 3-4**) la variación que ha tenido la topología del cauce del río Guamal en los últimos 50 años, donde se aprecia un aumento significativo en el ancho del cauce de aproximadamente 250 m hacia la margen izquierda y de 400 m en la margen derecha, reflejando la expansión y el desplazamiento de ambas orillas en donde inclusive se ha visto reemplazada la capa vegetal por el material granular transportado y depositado. Dicho proceso se encuentra relacionado con la generación y la formación de islas o barras que han modificado el trazado del cauce y desviado la corriente principal por alguno de los cauces secundarios generados.

En aras de conocer las acciones que se han tomado hoy día frente a estos fenómenos de inundación se recopiló la información de las obras que han sido ejecutadas por las entidades estatales sobre el cauce del río Guamal con el fin de proteger sus márgenes y evitar el desbordamiento e inundación de los sectores afectados (**Tabla 3-4**). Allí se realizó un hallazgo particular, el cual establece que todas las obras a gran escala que se han ejecutado sobre el cauce del río Guamal se han enfocado en la construcción de un dique longitudinal compuesto por gaviones. De la misma forma, gran parte de las obras han sido desarrolladas en la zona del municipio de Castilla y sobre la margen derecha del río. Por el contrario, no se evidenció la construcción de obras de protección contra la inundación sobre la margen

izquierda en la zona de estudio, un dato intrigante teniendo en cuenta que esta ha sido una de las zonas más afectadas por las inundaciones fluviales históricamente y considerando su importancia debido a la cercanía con el casco urbano del municipio de Guamal. Con el fin de comprender y relacionar estos antecedentes históricos con los conceptos teóricos estudiados se realizaron una serie de procedimientos en donde fue posible obtener la información que se expone a continuación:

A partir de los valores obtenidos para los parámetros de forma (Índice de Gravelius y el factor de forma) se puede inferir que la cuenca del río Guamal es una cuenca poco susceptible a la torrencialidad en la cual no es común que se generen avenidas instantáneas debido a los fenómenos de la precipitación continua, es decir, cuando se presenten avenidas torrenciales, los niveles del agua en el cauce aumentarían, pero no será de manera instantánea, lo que ha permitido a lo largo de la historia realizar las evacuaciones pertinentes en algunos casos y tomar medidas especiales para hacer frente a las crecientes.

Este fenómeno pudo ser ratificado con los resultados de los parámetros de la red de drenaje teniendo en cuenta los valores obtenidos para el orden de la corriente, la densidad de drenaje y la extensión media para la cuenca del río Guamal. Acorde sus valores y tomando como referencia los conceptos de Strahler (1994) y la clasificación presentada por Delgadillo & Páez (2008), la cuenca del río Guamal se puede clasificar como una cuenca con una alta capacidad para evacuar las avenidas torrenciales que se puedan generar con el aumento de las precipitaciones, indicando que el sistema de drenaje de la cuenca cuenta con una respuesta rápida para posibles eventos de crecientes instantáneas y que la distancia que tendría que recorrer el agua a través de los cauces tributarios en un evento de precipitaciones continuas, será corta.

Las variaciones en las elevaciones obtenidas para la cuenca exhiben las cumbres escarpadas localizadas antes del cambio de pendiente en el piedemonte llanero y la zona de desarrollo del valle en cercanías a la cabecera municipal, donde se presentan las inundaciones fluviales. De hecho, en la **Figura 3-10** es notable a nivel visual como se presenta el cambio brusco de la inclinación del terreno entre la zona montañosa en la que el cauce principal presenta un

encauzamiento definido y empieza a desarrollar una serie de cauces menores en la zona del ensanchamiento al presentar la variación en el terreno sobre la zona del piedemonte llanero. Hecho revalidado con la forma de la curva hipsométrica obtenida para la cuenca, la cual indica que se trata de una cuenca vieja (Thriller, 1952) con tendencia a la deposición de sedimentos, valles extensos y cumbres escarpadas. Lo anterior avala el alto grado de respuesta a las precipitaciones dentro de la cuenca demostrado en los parámetros anteriores y permite intuir el desarrollo de altas velocidades en la zona, con tendencia a generar procesos erosivos y de socavación en las cumbres escarpadas generando una carga de sedimentos considerable, los cuales posteriormente son depositados en las zonas con elevaciones más bajas.

El patrón de drenaje de la cuenca del cauce del río Guamal fue clasificado como sub dendrítico (Howard, 1967). Este tipo de sistemas, se encuentra desarrollado en materiales homogéneos en la zona montañosa con poca permeabilidad y en donde no existe un control litológico que permita controlar la escorrentía superficial. Así mismo el cauce del río Guamal en la zona de estudio pudo ser clasificado como un cauce viejo (Gracia & Maza, 1997) y trezado (Leopold & Wolman, 1957). Lo que indica que el cauce es formado en las zonas planas de la corriente, entre las barras generadas por el depósito continuo de sedimentos. Así, en el momento en que las corrientes de agua transitan por los cauces menores localizados en las orillas, se puede producir el desbordamiento del cauce hacia las zonas colindantes, produciendo la inundación fluvial y afectando a las comunidades instaladas en las riberas. Estos supuestos fueron ratificados de acuerdo a las clasificaciones de Schumm (1977) y Rust (1978) y validados a partir de las características presentadas por Culbertson y sus colaboradores (1967) en donde fue posible catalogar al cauce del río Guamal como un cauce trezado con alta carga de transporte y deposición de sedimentos en el lecho, formaciones de barras e islas, llanuras de inundación anchas, valores de sinuosidad por debajo de 1.5 (bajo), grandes rastros de vegetación en la parte central del cauce, taludes con poca altura y sin presencia de madre viejas, meandros ni diques naturales.

Con base en la recopilación de la información unificada de los eventos antecedentes de inundación y desbordamiento del cauce (**Figura 3-7**) fue posible demostrar una repetición

constante de los eventos de inundación generados en el río para los meses de abril, mayo y junio y una repetición menos frecuente para los meses de julio, octubre y noviembre. De esta manera, realizando un análisis de manera trimestral, es evidente como el 65% de las inundaciones fluviales se han generado en el periodo abril – junio, con una hegemonía del mes de abril (27%). Un 13.5% de los eventos se han producido en el periodo julio – septiembre y un 21.6% en el periodo octubre – diciembre, con equivalencias para los meses de julio, octubre y noviembre (8.1%). Finalmente se registraron 0 eventos de inundaciones para el periodo enero – marzo. Este patrón de inundaciones previas fue valorado y evaluado a través de la caracterización pluviométrica y el análisis de caudales de la corriente del río Guamal tal y como se presenta a continuación:

El patrón de lluvia expuesto en la **Figura 3-19** permitió conocer el régimen de lluvias existente sobre la superficie de la cuenca, resumido de la siguiente manera: pocas lluvias para el periodo diciembre – febrero con tendencia a aumento de la pluviosidad un poco para el mes de marzo y alcance de su pico máximo entre el periodo abril – julio seguido de una breve disminución para el mes de agosto y luego un nuevo incremento para el periodo septiembre – noviembre con pico en octubre y disminución paulatina de las lluvias a medida que se acerca diciembre. Así mismo, siguiendo el patrón de distribución de las precipitaciones máximas (**Figura 3-20**) se encontró que los eventos de precipitaciones con intensidades más fuertes se presentan en el periodo abril – junio y septiembre – octubre. De esta manera, estos resultados justifican y sustentan la periodicidad de los eventos históricos evidenciados en el análisis histórico, ya que los periodos asociados a los eventos de inundación, corresponden de manera casi que idéntica a los periodos de intensidades máximas de las precipitaciones y los periodos con nula inundación corresponden a los intervalos de más baja pluviosidad desarrollados dentro de la cuenca.

A su vez a partir del mismo patrón de lluvias (**Figura 3-19**) se lograron relacionar los picos de las precipitaciones sobre la cuenca con los picos de los caudales de la corriente obtenidos en los histogramas realizados para los caudales medios, mínimos y máximos mensuales en la zona de estudio (**Figura 3-23**), ya que, los caudales mensuales máximos se han presentado durante el periodo abril – junio y los caudales mensuales mínimos durante el periodo enero

– marzo, siendo estos periodos los mismos determinados en el análisis efectuado al comportamiento de la pluviosidad en la cuenca. La relación anterior respalda en gran medida el uso de los caudales registrados en la Estación Alto Corozal y los resultantes de la transposición de caudales realizada para el cálculo de los caudales de simulación, evidenciando que los meses en los que se presentaron los eventos extremos se relacionan fuertemente con las precipitaciones generadas sobre la cuenca y los caudales medidos en la Estación Alto Corozal.

De acuerdo con los análisis realizados sobre la superficie de la cuenca y del cauce del río Guamal, fue posible evidenciar los causantes principales de la problemática expuesta. Así, se pudo demostrar que la cuenca del río Guamal cuenta con un alto grado de respuesta hidrológica a las precipitaciones de lluvia continuas, lo que minimiza la aparición de crecientes instantáneas que puedan producir inundaciones repentinas, ya que permite una rápida evacuación de la escorrentía superficial a través de sus tributarios. A pesar de esto, la variación abrupta del terreno en la zona del piedemonte llanero, acompañado de grandes caudales en los lechos de tipo granular, donde la cuenca tiene una transición de cumbres escarpadas donde se generan procesos erosivos como consecuencia de las altas velocidades alcanzadas por la elevada magnitud de la pendiente, hacia el desarrollo de un valle amplio con bajas pendientes, culminan en la generación de procesos de sedimentación debido a la disminución de la velocidad en esta zona. Estos materiales depositados se sedimentan en forma de barras y puntas ocasionando el desarrollo de cauces menores rodeados por islas en donde se propicia el crecimiento de la vegetación. Adicional a esto, debido al cambio brusco de la pendiente, se provoca un ensanchamiento del cauce al abandonar el encauzamiento definido con suelo rocoso con el que viene de la cordillera y pasar a fluir a través de un suelo aluvial, con pendientes y orillares bajos donde se produce una divagación de su cauce hacia las márgenes fácilmente inundables.

Si bien el cauce principal del río Guamal presenta variaciones en su pendiente y forma predominante a lo largo de su recorrido, para la zona de estudio se puede definir como un cauce de tipo trenzado que presenta desbordes adyacentes e inundaciones sobre sus márgenes en especial para los periodos de abril – junio y octubre – noviembre.

Habiendo demostrado las causas y consecuencias de la situación problema a partir del desarrollo de los conceptos teóricos y la recopilación de información histórica antecedente, se procedió con la simulación de los hechos de manera práctica con el fin de evidenciar la situación problema a través del modelo hidráulico IBER. Así, fue posible ejecutar las simulaciones planteadas en el plan de simulación con el fin de analizar la respuesta hidráulica del cauce, al verse expuesta a los requerimientos asociados de cada escenario. En total fueron cinco (5) escenarios de simulación desarrollados en los cuales se observó la variación de las profundidades a lo largo y a lo ancho de la zona de evaluación. El modelo fue calibrado a partir de los datos de caudales y niveles registrados en la Estación hidrológica Alto Corozal, desarrollando la simulación hidráulica en la zona de localización de la estación y comparando los resultados obtenidos a través del modelo hidráulico con las lecturas consignadas en la Estación. Se obtuvo un error para la calibración del 13% para el caudal máximo registrado y se evaluó la sensibilidad del modelo a través de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning para los tipos de suelo definidos en la zona, presentando cambios mínimos con relación a la profundidad.

En las tres primeras simulaciones fue posible evidenciar la inundación producida sobre la margen izquierda del cauce y un sector mínimo de la margen derecha, dejando claro que las profundidades de flujo obtenidas en el sector inicial de la margen derecha del cauce se encuentran muy por debajo de las del sector de la margen izquierda, respaldando variabilidad de las condiciones topográficas debido a la deposición de sedimentos y la divagación producida de la corriente principal producto de su comportamiento trenzado. Igualmente, mediante la identificación de las secciones transversales de los cortes realizados, se pudo mostrar una inminente inclinación del terreno hacia la margen izquierda para la parte inicial de la zona de evaluación, con una diferencia de hasta 2.5 m entre márgenes opuestas, generando una conducción del cauce hacia la margen izquierda y a su vez el desbordamiento y la inundación fluvial sobre esta margen, ya que el flujo es conducido hacia este sector por acción propia del terreno. Ante estas eventualidades se realizó una evaluación de la funcionalidad de las alternativas de mitigación de la inundación estudiadas, considerando una alternativa por cada tipo de medida estructural.

Para la alternativa asociada a la construcción de un dique longitudinal, tal y como se pudo observar en la **Figura 3-52**, se presentó un resultado satisfactorio al evitar la inundación generada, es decir, la obra de mitigación proyectada impidió el paso del agua sobre la orilla del río en la margen izquierda y generó un encauzamiento del flujo por la parte central del cauce, frenando una divagación exagerada hacia alguno de los costados. Este hallazgo fue verificado en los cortes de las secciones transversales efectuados a lo largo del cauce, en donde se evidenció como la inclusión del dique evito la inundación sobre la margen izquierda para todas las secciones. De esta manera la obra proyectada se encarga de impedir el tránsito del agua por encima de la margen y de la manera que ha sido proyectada se encuentra aproximadamente a nivel de la orilla contraria para generar un efecto de encauzamiento por la parte central y disminuir la posibilidad de que el flujo se desarrolle hacia alguna de las dos márgenes.

Por otro lado, para la alternativa asociada a la alteración del cauce, como se pudo observar en la **Figura 3-59** se presentó un resultado insatisfactorio al evitar la inundación generada, es decir, aun con el dragado realizado de 1.2 m sobre las zonas definidas, siguió presentándose la inundación sobre la margen izquierda del cauce. Los cortes transversales demostraron una mejor repartición del flujo a lo ancho del cauce en todas las secciones en comparación con las condiciones presentadas en el terreno natural. Sin embargo, para el caso puntual de la sección C1 se siguió evidenciando una inclinación (en menor medida) hacia la margen izquierda del cauce, la cual siguió generando el desbordamiento del cauce sobre dicha margen. Por otro lado, para las otras secciones la alteración del cauce por medio del dragado parece haber surgido efecto en la mayor parte de las zonas, aun así, no es suficiente para impedir el trasvase del agua sobre la margen izquierda por completo ya que se siguen generando inundaciones en el sector, eso sí, con magnitudes menores a las evidenciadas en los escenarios previos, rondando entre los 0.20 m – 0.50 m.

4.1 Discusión

A partir de los resultados obtenidos para las dos alternativas de mitigación es necesario mencionar primeramente que cualquier ejecución y desarrollo de obra civil dentro de un

cauce, alterara las condiciones aguas abajo o a lo ancho del mismo cauce, por lo que, a nivel general, es importante contar con medida y análisis de los efectos adversos que pueda producir el desarrollo de una medida estructural sobre las diferentes zonas de un cauce. Por fortuna en este caso, el cambio generado en las condiciones hidráulicas del cauce, no conllevó un problema importante para las zonas aguas abajo o del otro costado del cauce de las cuales se tienen conocimiento. Teniendo en cuenta los conceptos desarrollados a través de las secciones previas de este capítulo, fue posible evidenciar una serie de características y comportamientos del cauce del río Guamal, los cuales fueron la base para la selección de la alternativa de mitigación contra la inundación fluvial más óptima considerando la zona de estudio. Como se mencionó en el desarrollo teórico, las medidas estructurales son desarrolladas para mitigar y/o evitar las inundaciones fluviales a través de la construcción de obras longitudinales, la alteración del cauce y la desviación de las inundaciones.

Las obras longitudinales se consideran el tipo de obras más prominente en problemas asociados al desbordamiento e inundación fluvial sobre las márgenes de un río. Como se expuso en el estado del arte, pueden estar conformadas por materiales naturales o artificiales. Si bien a nivel de simulación los resultados hubieran sido muy similares sin importar el tipo de material planteado para el dique longitudinal, se buscó ser lo más específico posible en la definición del material de la obra con el fin de presentar la alternativa más óptima para el caso real.

En ese sentido, un dique natural presenta una debilidad notoria ante las características hidrodinámicas del río Guamal, considerando la fuerza con la que cuenta este para arrastrar sedimentos de gran tamaño, por lo que en eventos de avenidas torrenciales podría fácilmente desestabilizar la obra proyectada mediante el lavado continuo de los terraplenes. Adicional a lo anterior, al retener el agua durante un periodo determinado, esta medida actúa como medida de acción temporal y de acuerdo a la evidencia presentada en la ocurrencia continua de los eventos de inundación fluvial en un mismo mes, tal vez su tiempo de recuperación no sería lo suficientemente alto para desalojar el agua retenida, inhabilitando su funcionalidad ante un evento seguido de otro. Por esto y mas, los diques artificiales ofrecen una mayor resistencia ante las fuerzas que pueda generar el río sobre la obra. De igual manera, al contar

con un núcleo sólido permiten la contención del agua durante los eventos recurrentes evitando el ensanchamiento del flujo en una zona definida. Adicionalmente, se pudo evidenciar su uso histórico sobre el cauce del río Guamal como alternativa de mitigación contra la inundación. Sin embargo, tal y como se expuso en el estado del arte, una debilidad en comparación con las demás alternativas es el costo económico elevado que puede llegar a tener debido a su composición estructural, es por esto que, contrastando con las obras ejecutadas históricamente sobre el cauce y considerando la variabilidad en el material en el que puede ser desarrollado se presentó una composición a partir de geotextiles rellenos. Opción que se considera adecuada para la zona de estudio, teniendo en cuenta que estos son llenados a partir de material del sitio de trabajo, con el que casualmente debido al alto porcentaje de carga de fondo del cauce se cuenta en la zona de estudio.

Las medidas estructurales de tipo “alteración del cauce” se muestran como una de las alternativas que más ventajas presenta frente a las demás opciones. El hecho de que no se requiera una mano de obra especializada al nivel de las demás y que los tiempos de ejecución sean más cortos la convierten en una de las alternativas más usadas cuando se requieren soluciones rápidas y eficientes. Teniendo en cuenta la enorme amplitud del cauce del río Guamal y las desventajas a nivel técnico y ambiental con las que cuenta una canalización para este cauce, se descartó la evaluación de una canalización y se seleccionó el dragado como una alternativa de este mismo tipo de medida, considerada más adecuada de acuerdo con las condiciones actuales del cauce y su entorno.

De esta manera, contemplando el alto porcentaje de carga de sedimentos con el que cuenta el cauce del río Guamal, evidenciado en el componente de clasificaciones del cauce de diferentes maneras, el dragado del cauce se posiciona como una de las alternativas más adecuadas para mitigar la inundación producida por el desbordamiento del río. Esto debido a que lo desprende y libera de la alta carga de sedimentos y de la vegetación desarrollada como consecuencia de la formación de islas expuesta, permitiendo así la disminución de los niveles de agua y la libertad de flujo en los eventos de precipitación continua por la parte central del cauce, es decir, es una de las mejores maneras de “atacar” su comportamiento trezado. Sin embargo, de acuerdo a las diferentes desventajas a nivel técnico expuestas en

el estado del arte, esta medida se recomienda en situaciones en las que la carga de sedimentos no sea tan alta aguas arriba de la zona estudiada, ya que, en tal caso, actuara como medida temporal al verse afectada continuamente por la deposición de sedimentos, requiriendo un dragado constante e incrementando los costos económicos de ejecución del proyecto. Infortunadamente la zona de estudio se encuentra a solo 6 km del piedemonte llanero, lo que la convierte en una zona con una alta probabilidad de deposición de sedimentos en la que la obra no actuaría con la mayor funcionalidad.

Con respecto a las medidas estructurales que involucran la desviación de inundaciones, es importante mencionar, que lamentablemente como se pudo evidenciar en el estudio del contexto histórico del cauce para la zona de estudio, sobre la margen izquierda del cauce (donde se produce la inundación) se encuentra asentada una gran parte de la población rural del municipio, esto sin dejar de un lado las actividades agrícolas y ganaderas que desarrollan en esta zona y que hacen parte de los bienes y servicios que les permiten contar con un sustento económico para subsistir. De hecho, sobre los últimos 500 metros de la zona de evaluación se encuentra el casco urbano del municipio. Este factor que no se puede pasar por alto fue suficiente para impedir la proyección de canales de alivio o canales de desvío a través de la margen izquierda del cauce, ya que no fue posible contar con una zona cercana inhabitada para disponer el agua captada por el canal de desvío. Por tal razón, el uso de este tipo de medidas para la evaluación de su funcionalidad en el modelo hidráulico fue descartada.

Partiendo de los resultados obtenidos en el desarrollo de las simulaciones de los escenarios IV y V y de los análisis globales expuestos en el presente capítulo, se prefiere la proyección del dique longitudinal por encima de la alteración del cauce a través del dragado de algunas zonas, ya que presentó mejores resultados y demostró que puede evitar la inundación de la margen izquierda, caso contrario a los resultados generados por el dragado. Esto sin dejar de un lado la proximidad de la zona de evaluación con el piedemonte llanero donde se intensifica el proceso de sedimentación y transporte de cargas de fondo, lo que genera que la alternativa de dragado pierda eficiencia al convertirse en una labor de mantenimiento continua y no de mitigación permanente. De esta manera, el dique proyectado se encuentra

conformado por dos hileras de bloques de geo – sintéticos rellenos de dimensiones individuales de 2.1 m de ancho, 4.5 m de largo y 1.5 m de altura. Teniendo en cuenta los antecedentes presentados en el contexto histórico del río Guamal y buscando una equidad a nivel de elevación entre las dos márgenes opuestas de la zona de evaluación, se estimó que una sola hilera de 1.5 m de altura no sería suficiente para hacer frente a las profundidades de flujo desarrolladas a lo largo del tramo evaluado, por lo cual se definió una altura total de 3 m para los geo – sintéticos los cuales pueden ser rellenos con material depositado proveniente de los mismos sedimentos transportados y depositados por el cauce.

A pesar de que se considera que el desarrollo del proyecto fue exitoso abarcando los componentes principales expuestos anteriormente, sería faltar a la verdad e ir en contra de los conceptos teóricos de la hidráulica y la hidrología el decir que no se contó con inconvenientes en el desarrollo del proyecto y que los resultados obtenidos no podrían ser más aceptables. Se hace esta mención considerando dos puntos claves en la ejecución del proyecto, encaminados ambos en la obtención de los caudales de la modelación para los que fueron desarrollados los escenarios de simulación. El primero de estos se encuentra asociado a la falta de datos reales de campo tomados en la zona de evaluación, ya que, como se presentó a lo largo del documento, los datos de los caudales registrados en la corriente del río Guamal, se encuentran asociados a la única estación hidrológica existente sobre la corriente, la Estación Alto Corozal [35017030]. El hecho de que la estación no se encuentre relativamente cerca de la zona de estudio (25 km) requirió del uso del método de transposición de caudales, el cual, aunque se encuentra respaldado teóricamente, no deja de ser un método de aproximación y sus resultados no podrían ser exactamente iguales a los que se tendrían si se contara con una estación de medición de caudales en la zona de estudio. Sin embargo, para este caso en específico, se espera que el margen de error haya sido mínimo, considerando que las condiciones geomorfológicas, climatológicas y antrópicas entre el punto de evaluación y la zona de localización de la estación hidrológica son muy similares ya que la cuenca relacionada en el método es la misma, caso contrario a las veces en las que el método es usado para relacionar caudales entre dos cuencas diferentes.

En segundo lugar, es necesario mencionar la amplitud del rango de información disponible de los caudales registrados en la Estación Alto Corozal [35017030], la cual cuenta con apenas nueve años de mediciones, presentando su último registro para el periodo del año 1987. Este suceso, evidentemente genera un grado de incertidumbre en los resultados obtenidos para la proyección de los caudales realizada, ya que lo más recomendable es contar por lo menos con 15 años de registros de datos al momento de desarrollar el ajuste a las diferentes funciones de probabilidad. Adicional a lo anterior, el hecho de que su último registro haya sido hace tanto tiempo, no considera los eventos extremos hidrológicos presentados en este siglo, los cuales de acuerdo a la evidencia plasmada en el contexto histórico han tenido magnitudes lo suficientemente altas para generar inundaciones fluviales en varios puntos de la corriente. De acuerdo con los dos puntos mencionados, el autor considera que es bastante probable que, de haber realizado la proyección de caudales, con datos de caudales históricos registrados para la zona de estudio en donde se contemplara un rango de registros más amplio y reciente, se obtendrían magnitudes para los caudales proyectados muy diferentes y tal vez superiores a los presentados en este estudio. Para contrarrestar esta incertidumbre, se tomaron criterios de diseño lo más conservadores posibles, siendo esta una de las razones por las que se decidió adicionar una hilera superior a la obra proyectada como dique longitudinal compuesto por geo sintéticos rellenos, de tal manera que se contara con un “factor de seguridad” para la ocurrencia de eventos hidrológicos superiores.

Adicionalmente, existen una serie de hallazgos y recomendaciones que el autor considera pertinentes mencionar y se encuentran enfocadas básicamente en la disponibilidad de información al momento de desarrollar un proyecto de este tipo. Si bien fue posible contar con evidencia asociada a los eventos de inundación históricos que se han desarrollado sobre las márgenes del cauce del río Guamal, esto fue posible gracias a la recopilación de información realizada parte del autor a través de las bases de datos de la muy útil herramienta DESINVENTAR y de la información plasmada en los diferentes medios de comunicación expuestos. Sin embargo, el autor considera que un municipio de la importancia regional a nivel departamental como lo es el municipio de Guamal, debería contar con una base de datos propia en la que se recopile con claridad la fecha, magnitud, localización, pérdidas

cuantificables y demás características de este tipo de eventos de inundación, con el fin de llevar un registro ordenado de los sucesos y contar con bases sólidas para efectuar análisis estadísticos, sociales, económicos...etc. y preparar al municipio de una mejor manera para hacer frente a estas condiciones por medio de la ejecución de medidas estructurales y no estructurales basadas en los acontecimientos pasados. Lo anterior es mencionado, debido a que se presentó una solicitud a la administración municipal para poder contar con una muestra de datos más numerosa y precisa, pero infortunadamente no se consiguió una respuesta exitosa, debido a que actualmente no cuentan con ningún departamento encargado de recopilar este tipo de información.

En segunda medida, se trae a colación de nuevo la falta de información disponible asociada a los caudales históricos que transitan sobre la corriente del río Guamal, lo que se resume en la inexistencia de una Estación hidrológica activa que permita realizar análisis hidrológicos y proyecciones de diferentes tipos para contar con un mayor rango de confiabilidad en los proyectos que se desarrollen sobre su cauce. No se concibe el hecho de que uno de los afluentes más grandes de la cuenca del Orinoco, como lo es el río Guamal, el cual atraviesa la superficie de cuatro municipios a lo largo de su recorrido, no cuente con una estación hidrométrica activa para evaluar sus caudales y niveles a lo largo de la corriente. Por lo que se recomienda la implementación inmediata de una estación de este tipo para mejorar cualquier tipo de análisis que se desarrolle en torno al río Guamal. También vale la pena mencionar que la falta de información hidrológica disponible en el territorio nacional, en especial para las regiones de la Orinoquia y la Amazonia es uno de los factores más negativos con el que se cuenta a la hora de ejecutar proyectos de este tipo, siendo una ironía considerando el gran potencial hídrico con el que cuentan las regiones.

5. Conclusión

A lo largo del presente documento fue posible desarrollar a través de cuatro capítulos principales el proyecto enfocado en el análisis del comportamiento hidráulico del río Guamal con el objetivo general de seleccionar una alternativa de obra de mitigación contra la inundación producida en un sector específico de la corriente. En función de alcanzar esta meta se trazó un plan de trabajo que permitiera integrar los conocimientos teóricos y prácticos plasmados en el documento, con las causas y consecuencias de los eventos relacionados con las inundaciones fluviales generadas en el municipio históricamente. Todo esto con el fin de unificar esta integración con información cuantitativa y cualitativa registrada sobre la corriente, para desarrollar una simulación del fenómeno real de la inundación a través de un modelo hidráulico y realizar un análisis exhaustivo y detallado de las condiciones generadas a partir de una serie de solicitudes y requerimientos iniciales. Finalmente, con base en los diferentes resultados obtenidos proponer la mejor alternativa de desarrollo de obra de mitigación en contra de la inundación y dar solución a la problemática expuesta.

De esta manera, los componentes principales del proyecto fueron encaminados en la consecución de cinco objetivos secundarios, a consideración del autor necesarios para comprender la globalidad de la problemática expuesta y brindar una solución aceptable que reuniera todos los hallazgos obtenidos en el desarrollo de estos. Fue así como se consideró primordial realizar una investigación detallada que expusiera primeramente las diferentes alternativas existentes hoy en día para poder hacer frente a la situación problema. Para lograrlo, se desarrolló un marco teórico descriptivo de las alternativas existentes de la mitigación contra la inundación encontradas en la literatura, en donde fuera posible

identificar y comparar sus características, ventajas y desventajas en función de aspectos económicos, técnicos, ambientales y sociales, que acompañadas de los resultados globales posteriores permitieran seleccionar la mejor alternativa para la mitigación de las inundaciones en la zona de estudio. Seguido de esto se presentaron las evidencias de la situación problema a partir de la recopilación y clasificación de la información disponible asociada a las inundaciones fluviales históricas de la zona y las consecuencias producidas por esta.

Ahora, como en todo proceso resolutivo, una vez evidenciadas las consecuencias de la problemática, se buscó encontrar el conjunto de componentes que de manera individual o integrada fueran los causantes principales del problema desarrollado. Para esto, se desarrolló de manera detallada una caracterización geomorfológica y pluviométrica de la cuenca del río Guamal, con el fin de extraer los parámetros principales que permitieran inferir y sustentar el comportamiento evidenciado en la exposición de los antecedentes. Esto por sí solo no fue suficiente, ya que, si bien fue posible conocer algunos de los detonantes de la situación problemática, hacía falta ser más minucioso para poder relacionar los parámetros obtenidos en la caracterización de la cuenca, con el comportamiento desarrollado por el cauce. Por consiguiente, se efectuó un estudio de las características dinámicas principales del cauce a través de diferentes clasificaciones estudiadas por diversos autores a lo largo de la historia, donde se pudiera obtener un factor común o repetitivo, el cual, actuando de manera conjunta con la caracterización de la cuenca, propiciara la ocurrencia de las inundaciones fluviales en la zona de estudio. Habiendo enlazado el contexto histórico (consecuencias) de la corriente del río Guamal, con la caracterización y el análisis de la dinámica fluvial del río (causas) y presentado las diferentes alternativas de mitigación contra la inundación fue posible dar solución a los dos primeros objetivos específicos, el cuarto y una parte del tercero, planteados al inicio del documento.

Una vez desarrollada la primera parte de carácter práctico del proyecto en donde se evidencio y caracterizó la problemática expuesta a partir de los conceptos teóricos y la información disponible, el paso a seguir en la consecución y alcance del objetivo general fue la reproducción de la situación problema a través del modelo hidráulico bidimensional

seleccionado, en donde se pudo demostrar por medio de los resultados obtenidos en las simulaciones hidráulicas planteadas la problemática presentada. Los parámetros obtenidos en el desarrollo de los objetivos anteriores, fueron claves para encaminar la modelación hidráulica hacia la reproducción de los eventos de inundación más críticos acorde a la información recolectada. Con el fin de analizar una variabilidad de las condiciones de entrada al modelo hidráulico, se presentaron varios escenarios de simulación en función de algunos parámetros iniciales basados en los resultados previos. De igual manera, entre los escenarios de simulación desarrollados se incluyeron algunas de las alternativas de mitigación estudiadas para realizar una evaluación de su funcionalidad frente a las inundaciones desarrolladas.

Finalmente, a través de un análisis detallado de los resultados globales obtenidos para cada una de los componentes estudiados y de los criterios teóricos y prácticos expuestos a lo largo del documento, fue posible seleccionar la alternativa de mitigación contra la inundación más adecuada para la zona de estudio, siendo esta la construcción de un dique longitudinal conformado por geo – sintéticos rellenos. Habiendo desarrollado la evaluación de las condiciones hidráulicas generadas sobre la corriente para varios escenarios y considerando que una de las alternativas evaluadas sigue los mismos fundamentos de las obras ejecutadas en otros puntos de la corriente del río Guamal (diques longitudinales en gaviones) de acuerdo con el contexto histórico, se culminaba con el quinto y último objetivo de desarrollo y la parte faltante del tercero.

Teniendo en cuenta el enfoque del proyecto ejecutado, en donde se definió el desarrollo del proyecto con base en un caso tipo, la mayor parte de la literatura consultada fue desarrollada con fines prácticos, aplicativos y descriptivos, es decir, con el fin de exponer las ecuaciones, los fundamentos y los conceptos necesarios para llevar a cabo la caracterización de la cuenca del río, la categorización del cauce y la identificación de los tipos de medidas para hacer frente al problema expuesto. De esta manera, la sección en la que, si se hizo gran uso de los resultados de investigaciones previas desarrolladas por otros autores, fue en la elección del modelo hidráulico seleccionado para desarrollar las simulaciones. Si bien el hecho de que el modelo IBER sea un software de libre uso y acceso puesto a disposición del público fue uno

de los factores que influyó en su preferencia a la hora de elegir modelo para la ejecución del proyecto. Los resultados presentados por los trabajos de Kaira et al., (2021), Ortega & Remedios, (2020), Burboa, (2018), Ochoa et al., (2016) y Collazos, (2012), los cuales tienen un punto en común y es la buena aceptación del modelo si se trata de obtener manchas de inundación de los cauces, fueron el otro factor clave para la selección del modelo. A partir de los resultados obtenidos en la calibración y post – evaluación desarrollada en este estudio, se puede decir que el autor concuerda con el punto expuesto por los investigadores, ya que el modelo presentó un porcentaje de error bajo y se desarrolló conforme a lo que se esperaba para la zona de evaluación de acuerdo con el contexto histórico expuesto.

Aun así, se considera que la literatura disponible acerca del uso del modelo IBER específicamente en corrientes con un comportamiento trezado como el demostrado para el río Guamal es muy baja y que aún hay mucho campo por expandir y estudiar en lo que respecta a este tipo de cauces. Esto teniendo en cuenta que el comportamiento del río Guamal no es único de la región. Como se mencionó en el capítulo introductorio y se demostró en el capítulo tres, este comportamiento es típico de los cauces que se desprenden del piedemonte llanero, los cuales debido a los cambios bruscos que existen por el cambio de pendiente en esta zona se ven expuestos a la deposición del material erosionado que escurre por las cumbres escarpadas de las montañas y que al disminuir la velocidad en la zona de cambio hacia los valles planos y extensos, generar la sedimentación del material granular y con el paso del tiempo y en conjunto con las precipitaciones de lluvia, forman las barras y puntas granulares ocasionando el desarrollo de cauces menores rodeados por islas. Por lo que el desarrollo de este proyecto, puede sentar las bases para que se desarrolle la evaluación de las características de los cauces de la región con comportamientos que se asemejen de manera práctica al trezado a través del modelo hidráulico IBER con el fin de expandir, comparar y validar los resultados aquí obtenidos.

Para futuras investigaciones de carácter propio o a quien pueda interesarle, teniendo en cuenta que por el momento no será posible contar con información adicional disponible de los registros históricos de caudales sobre la corriente del río Guamal y que la problemática expuesta no es propia de la zona de evaluación, sino que por el contrario es prominente en

varios puntos de la corriente, con el fin de contar con una proyección de caudales de diseño con un menor grado de incertidumbre, se puede recomendar el desarrollo de modelos lluvia – escorrentía para obtener el caudal de producción de la cuenca para diferentes periodos de retorno. Teniendo en cuenta el amplio rango de información histórica y reciente asociada a los registros pluviométricos y la cantidad de estaciones de medición de lluvia identificadas sobre la cuenca del río Guamal, los resultados obtenidos brindarían un grado de confiabilidad más alto en el cálculo del caudal, por lo que si se quiere desistir de los datos registrados por la Estación Alto Corozal esta se presenta como la mejor alternativa. Vale la pena mencionar que este tipo de modelos también solicitan otro tipo de parámetros adicionales y en algunos casos más complejos, que deben ser tenidos en cuenta para que no se genere un grado alto de incertidumbre y el desarrollo sea exitoso. Se hace la aclaración de que no se consideró ninguno de estos modelos lluvia – escorrentía en la ejecución del proyecto, teniendo en cuenta el enfoque hidrológico que se genera en torno a ellos y que merecía ser explicado y desarrollado con claridad, lo que probablemente hubiera duplicado la extensión del documento y hubiera reducido el enfoque hidráulico que se buscó manejar.

Aunque el desarrollo de este proyecto nació a partir de una investigación de tipo académica, también fue propuesto con ánimos de brindar una solución a la problemática expuesta que el autor, como habitante de la región, ha podido evidenciar a lo largo de los años de manera práctica y que hasta el momento desconocía todo el trasfondo teórico que giraba en torno a ella. Así, se espera que, con las herramientas puestas a disposición a lo largo del documento, se pueda corroborar la relación existente entre los objetivos planteados y la situación problema y se pueda validar la alternativa de mitigación contra la inundación proyectada en la zona de estudio teniendo en cuenta los criterios hidráulicos e hidrológicos establecidos.

Referencias Bibliográficas

- Andjelkovic, I. (2001). Guidelines on non-structural measures in urban flood management. International Hydrological Programme (IHP), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Arumi R., José Luis, Jara R., Jorge y Salgado S., Luis (2000) Análisis hidrológico [En línea]. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad de Concepción. Temuco: INIA. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/39933>.
- Bladé Castellet, E. (2005). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Bladé Castellet, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 68. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). IBER: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Botero, B. A. & Francés, F. (2006). AFINS Versión 2.0 – Análisis de frecuencia de extremos con información sistemática y no sistemática. Valencia: Research Group on Hydraulic and Hydrology. Department of Hydraulic Engineering and Environment, Politechnical University of Valencia.
- Burboa, (2018). Comparación de modelos numéricos 1d y 2d en simulaciones de rotura de presa. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina.
- Caro Camargo, C. A. (2016). Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos. Tesis Doctoral, Programa de Doctorado en Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cea, L., & Bladé, E. (2008). Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. Jornadas técnicas sobre hidráulica fluvial, CEDEX – Ministerio de Fomento.

- Cea, L., Bermúdez, M., & Sobral, B. (2018). Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. ISBN: 978-84-9749-683-4. DOI: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497496834>.
- C.B. Vreugdenhi, (1994). Numerical methods for shallow-water flow. Water Science and Technology Library.
- Chavarro, J. A. (2017). Modelamiento estocástico de variabilidad hidrológica a escalas de alta resolución temporal. [Maestría en Hidrosistemas]. Universidad Javeriana.
- Chow, V. T. (1959). Open channel hydraulics (First). McGraw-Hill.
- Chow, V. Te., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill.
- Collazos, G., Villanueva, I., Briceño, N., Cazenave, G., Guevara, C., & Blanco, M. (2018, September). Modelo bidimensional de inundación urbana de la ciudad de Azul (Argentina) con herramientas de uso libre. In XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina (pp. 2064-2075).
- Cuervo, A. (2012). Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Culbertson, D. M., Young, L. E., & Brice, J. C. (1967). Scour and fill in alluvial channels with particular reference to bridge sites.
- Delgadillo, A., & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas, bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocoties. Mérida: FUNDAPRIS.
- Diaz, C., Mamadou, K., Iturbe, A., Esteller, M., & Reyna, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: Caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva.
- Duitama, F., Moreno, L., & Zamudio, E. (2015). Estimación de caudales en la cuenca media del Río Magdalena empleando el método de transposición de caudales. Revista Tekhne, 12(1), 39–48.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tekhne/issue/view/748>

- Duran, A., Rodríguez, C., Sáenz, J., & Silva, G. (2011). Recomendación de acciones que deben emprenderse para manejar y controlar a corto, mediano y largo plazo la vulnerabilidad de la infraestructura nacional frente al cambio climático.
- Escuder, I., Matheu, E., & Castillo, J. (2010). Análisis y evaluación de riesgos de inundación: estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales.
- Espinosa, C. E., & Torres, O. L. (2015). Tubos Geotextil, características, conceptos, materiales y aspectos de análisis. XV Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá.
- Farias, H. D., Brea, J. D., & García, C. M. (2011). Las inundaciones en Colombia. Medidas estructurales y no-estructurales.
- Ferrando, F. J. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo*, 15, 25. <http://revistas.uchile.cl/index.php/RU/index>
- Fracassi, G. (2019). Defensas ribereñas con gaviones y geo sintéticos. Ediciones de la U.
- Francés, F., Garcíal, R., Bussi, G., Salinas, J. L., & Fernández, E. (2011). Diseño hidrológico de alto período de retorno mediante generación sintética de eventos de crecida.
- García, A. (2014). Medidas estructurales y medidas no estructurales de defensa frente a inundaciones.
- García Mendivelso, D. A. (2017). Comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D. Tesis de Maestría. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Gaspari, F. J., Rodriguez, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augm Domus*, 4, 143–158. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/issue/view/937>
- Gil, C., Rodríguez, P., Torres, J., & Velasco, R. (2019). Obras de infraestructura para el control de inundaciones. Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería.
- Giménez, J. C. (2002). Extracción de parámetros geomorfológicos a partir de un modelo digital del terreno. *Cuad. Soco Esp. Cien. For*, 13, 113–118.
- Gómez, J. & Montes, N.E., compiladores. (2020). Mapa geológico de Colombia en relieve 2020. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá

- Gracia, J., & Maza, J. A. (1997). Capítulo 11: Morfología de ríos. In Instituto de Ingeniería de UNAM (Ed.), *Manual de Ingeniería de Ríos* (Vol. 590).
- Gulliver, J. S., & Arndt, R. E. A. (1991). *Hydropower engineering handbook* (Peggy Lamb, Ed.; 1st ed.). McGraw-Hill.
- Horton, R. E. "Erosional development of streams and their drainage basing: Hidrophysical approach to quantitative morphology". *Geol, Soc. America Bull*, 1(1945): 88-108.
- Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: A Summation. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 51(11), 2246–2259.
- Huber, M., Portal, C., Cañón Barriga, J. E., & Cea, L. (2020). The use of IBER as learning tool for two-dimensional channel flow analysis. *Revista Educación En Ingeniería*, 16(31), 72–78. <https://doi.org/10.26507/rei.v16n31.1126>
- Hudson, P. (2007). Natural levees. In *Encyclopedia of Water Science, Second Edition* (Print Version) (pp. 763–767). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/noe0849396274.ch183>
- Langbein, W.B. (1947) Topographic characteristics of drainage basins. USGS Water Supply Paper, 947-C. 157 p.
- IDEAM. (2018). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica.
- Kaira, A., Joshi, N., Baral, S., Pradhan, S., Mambepa, M., Paudel, S., Xia, C., & Gupta, R. (2021). Coupled 1D and 2D HEC-RAS floodplain modeling of Pecos River in New Mexico. *World Environmental and Water Resources Congress 2021: Planning a resilient future along*, 165–178.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1992). *Fluvial processes in geomorphology* (2nd ed.). Dover Publications, INC.
- Leopold, L., & Wolman, G. (1957). River channel patterns: braided, meandering and straight (282; B).
- Li, D., Chen, S., Zhen, Z., Bu, S., & Li, Y. (2021). Coupling a 1D-local inertia 2D hydraulic model for flood dispatching simulation in a floodplain under joint control of multiple gates. *Natural Hazards*, 109(2), 1801–1820. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04899-z>
- López Cadenas del Llano, F. (1998). Restauración hidrológico forestal y control de la erosión. *Ingeniería Ambiental*.

- Loyola Gómez, C., Rivas Maldonado, J., & Gacitúa Rojas, M. J. (2015). Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(1), 73-86.
- Lux Cardona, B. (2016). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas. *Maestría en Energía y Ambiente. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala*.
- Martinez, E. (2013). Modelación 1d, 2d y 3d de un tramo en curva del canal de laboratorio PAC-UPC [Master's thesis]. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Mesa Sánchez, O. J., Ignacio, J., Upegui, V., Diego, J., Osorio, G., Isabel, D., & Tejada, Q. (2002). Adaptación del método del multi escalamiento para la estimación de caudales máximos en Colombia. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. (2nd ed.). Alfaomega.
- Montserrat, J. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, XIX, 41–68.
- Muñoz Leiva, J. H. (2012). Contraste de métodos estadísticos para estimación de caudales pico en una red de drenaje urbano.
- Nava, A., & Cortes, D. (2009). *Hidráulica de ríos, morfología, técnicas de medición y muestreo en ríos*. [Doctoral dissertation]. *Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura*.
- Ocampo, L. (2012). Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático [Doctoral dissertation]. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., Garcia, M., Labaque, M., & Diaz, J. (2016). Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2), 95–101.
- Ortega, J. C., & Rebolledo, R. (2020). 2) Análisis de herramientas de modelización hidráulica bidimensional.
- Perez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. *Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela*. PP 38.
- Portillo, A. (2003). *Presas tierra y bordos* [Doctoral dissertation]. *Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura*.

- Richardson, E. V. (1975). *The Administration in highways in the river environment, hydraulic and environmental design considerations: Training and Design Manual (i)*.
- Rincón, J., Pérez, M., Delfín, G., Freitez, C., & Martínez, F. (2017). Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes. *Revista Gaceta Técnica*. 17(1), 9–28.
- Rodríguez, H. A. (2010). *Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones*. Socavación. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Romero, A., & López, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir. In *física No (Vol. 12)*. págs.
- Romero, J. (2015). Efecto de la modelación 1D y 2D en el diseño de jarillones – caso de estudio: sector sabana de Bogotá. [Área de Recursos Hídricos e Hidro informática]. Universidad de los Andes.
- Ruiz, J. A. (2016). *Evaluación de metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales en la zona del piedemonte del departamento del Casanare* [Doctoral dissertation]. Universidad Nacional de Colombia.
- Rust, B. R. (1978). A classification of alluvial channel systems. Miall, A.D., Ed., *Fluvial Sedimentology*, Can. Soc. Petrol. Geol. Mem., 187–198.
- Salas, M. (2014). *Obras de protección contra inundaciones*. In V. Ramos (Ed.), *Cuadernos de Investigación (II, Vol. 49)*. Centro Nacional De Prevención De Desastres.
- Schumann, A. (2017). Flood safety versus remaining risks - Options and limitations of probabilistic concepts in flood management. *Water Resources Management*, 31(10), 3131–3145. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1700-z>
- Schumm, S. A., & Hadley, R. F. (1957). Arroyos and the semiarid cycle of erosion [Wyoming and New Mexico]. *American Journal of Science*, 255(3), 161-174.
- Schumm, S. A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74(9), 1089-1100.
- Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system (1st ed.)*. Wiley Interscience.
- Schumm, S. A. (1981). Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 31, 19–29. <https://doi.org/10.2110/pec.81.31.0019>

- Strahler, A. (1952). "Hypsometric (area-altitud) analysis of erosional topography".
Bulletin of Geological Society of America, 63, 1117- 1142.
- Strahler, A. N., & Strahler, A. H. (1969). Exercises in physical geography.
- Suarez, J. (2001). Control de erosión. Universidad Industrial de Santander.
- Thiessen, A. H. (1911, July). Climatological data for july. Monthly Weather Review.
- Timbe, L., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. Maskana, 2(1), 91–98.
- United Nations, 2009. UNISDR Terminología sobre reducción del riesgo de desastres.
- Varón Gutiérrez, S. D., & Cuervo, G. V. (2019). Analysis of susceptibility to flooding associated with the dynamics of the Guatiquia river in Villavicencio, Colombia. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 28(1), 152–174.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.70856>
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. Dyna, 78(165), 58-71.
- WMO. (1989). World Meteorological Organization Statistical Distributions For Flood Frequency Analysis.
- Apuntes de clases tomados de Otalora (2016), Vélez (2020), Zambrano (2020), Aristizábal (2020)