



Análisis hidrológico y fluvial del caño Picuño mediante SIG para mitigación de inundaciones en la vereda la Isla Guamal, Meta

Jaiber Augusto Morales Velásquez

Iván Darío Rodríguez Otálora

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Tutor: Carlos Marcelo Jaramillo Echeverry, Especialista (Esp) en Sistemas de información geográfica

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Iván Rodríguez & Jaiber Morales 2025)
Referencia	Iván Rodríguez & Jaiber Morales (2025). <i>Análisis hidrológico y fluvial del caño Picuño mediante SIG para mitigación de inundaciones en la vereda la Isla Guamal, Meta</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo

Línea de Investigación Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo - CIMAD.

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

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

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo con profundo agradecimiento y cariño:

A nuestras familias, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser nuestro motor en los momentos más difíciles. Gracias por creer en nosotros incluso cuando dudábamos.

A nuestros compañeros y compañeras de estudio, por compartir este camino, por las enseñanzas mutuas y por el compañerismo que nos impulsó a seguir adelante.

A nuestros amigos, por su paciencia, comprensión y palabras de aliento que tantas veces nos ayudaron a recobrar fuerzas.

Y, de manera muy especial, a los clientes que confiaron en nuestra labor profesional desde el inicio. Su confianza y colaboración nos motivaron a crecer y superarnos constantemente.

Este logro es también de ustedes.

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
1. Planteamiento del problema	13
1.1 Formulación del problema	16
1.2 Antecedentes	16
2. Justificación.....	24
3. Objetivos	26
3.1 Objetivo general	26
3.2 Objetivos específicos.....	26
4. Hipótesis.....	27
4.1 Hipótesis de trabajo.....	27
4.1.1 Hipótesis nula.....	27
4.1.1.1 Hipótesis alterna.....	27
4.1.1.1.1 Variable independiente.....	27
4.1.1.1.2 Variable dependiente.....	27
4.1.1.1.3 Variable interviniente.....	27
5. Marco teórico	28
6. Metodología	33
6.1 Enfoque metodológico	33
6.2 Tipo de estudio	34
6.3 Procedimiento.....	34
7. Resultados	39
7.1 Delimitación del área de estudio	39

7.2 Georreferenciación	39
7.3 Levantamiento topo – batimétrico.....	40
7.4 Análisis de la geomorfología local en base a la evolución del caño Picuño	41
7.5 Análisis de riesgo – identificación de amenazas	42
7.6 Caracterización geomorfológica	44
7.6.1 Análisis de precipitaciones	45
7.6.2 Modelo de elevación digital del terreno de la cuenca.....	47
7.6.3 Pendientes de la cuenca.....	50
7.7 Modelación en HEC – HMS	52
7.7.1 Cálculo de caudales en la cuenca en HEC-HMS	52
7.7.2 Evaluación del caudal para la zona de estudio (caño Picuño).....	54
7.7.3 Valor final del caudal para el área de estudio (caño Picuño).....	59
7.8 Estudio y modelación hidráulica	60
7.8.1 Implementación del modelo hidráulico	60
7.8.2 Calibración del modelo hidráulico.....	61
7.8.3 Evaluación hidráulica puente Hormiga río Guamal.....	65
7.8.4 Evaluación de parámetros hidráulicos	66
7.8.5 Control de inundaciones	69
8. Análisis y Discusión de los resultados	73
8.1 Discusión.....	74
9. Conclusiones	76
10. Recomendaciones.....	78
11. Referencias	80

Lista de tablas

Tabla 1.	35
Tabla 2.	36
Tabla 3.	37
Tabla 4.	58
Tabla 5.	58
Tabla 6.	59
Tabla 7.	60
Tabla 8.	62

Lista de figuras

Figura 1.	39
Figura 2.	40
Figura 3.	41
Figura 4.	42
Figura 5.	43
Figura 6.	43
Figura 7.	44
Figura 8.	45
Figura 9.	46
Figura 10.	46
Figura 11.	47
Figura 12.	48
Figura 13.	49
Figura 14.	50
Figura 15.	51
Figura 16.	52
Figura 17.	53
Figura 18.	54
Figura 19.	55
Figura 20.	56
Figura 21.	57
Figura 22.	61

Figura 23.	63
Figura 24.	64
Figura 25.	65
Figura 26.	66
Figura 27.	67
Figura 28.	68
Figura 29.	69
Figura 30.	70
Figura 31.	71
Figura 32.	72

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SIG	sistemas de informacion geografica
MDE	Modelo de elevacion digital
DPN	Departamento nacional de planeación
UNGRD	Unidad nacional para la gestion de riesgo de desastres
UNESCO	Organizacion de las naciones unidad para la educacion, ciencia y cultura
IGAC	Intituto geográfico agustin codazzi
SENT	Servicio nacional de estudios territoriales
IDEAM	Instituto de hidrologiam meteorologia y estudios ambientales

Resumen

El río Guamal hace parte de los afluentes más importantes de la región del departamento del Meta, su potencial hídrico ha sido una fuente de desarrollo clave para las poblaciones que se encuentran asentadas en sus riberas. Sin embargo, históricamente ha presentado una amenaza significativa para los habitantes debido a su tendencia a desbordarse y producir inundaciones fluviales.

El caño Picuño por ser uno de los cauces alimentados por el río Guamal, se convierte en un área vulnerable a inundaciones por lo cual, el objetivo del presente estudio es realizar un análisis integral del comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño ubicado en la vereda la Isla, con el propósito de evaluar el riesgo de inundación en la zona y proponer soluciones estructurales. Este análisis se elabora mediante unas fases metodológicas que implica la georreferenciación, modelación hidráulica y uso de los SIG con el fin de obtener un enfoque preciso y detallado del comportamiento de las aguas en el área de estudio.

El estudio incluye una evaluación de riesgo basada en la combinación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de inundación y los impactos potenciales en la población y la infraestructura. A partir de los resultados obtenidos, se desarrollan propuestas de soluciones estructurales que dan respuesta a la proyección de una obra (puente) que comunique la vereda la Isla con el municipio y también se establece la construcción de una obra de protección (dique longitudinal) como la mejor alternativa para mitigar las inundaciones producidas en la zona de estudio.

Palabras clave: cauce, inundación, obras de mitigación, sistemas de información geográfica y modelación hidráulica.

Abstract

The Guamal River is part of the most important tributaries of the region of the department of Meta. Its water potential has been a key source of development for the populations that are settled on its banks. However, it has historically posed a significant threat to inhabitants due to its tendency to overflow and produce river flooding.

The Picuño channel, being one of the channels fed by the Guamal River, becomes an area vulnerable to flooding, which is why the objective of this study is to carry out a comprehensive analysis of the hydrological and fluvial behavior of the Picuño channel located in the village of La Island, with the purpose of evaluating the risk of flooding in the area and proposing structural solutions that mitigate the impacts on the community. This analysis is carried out through methodological phases that involve georeferencing, hydraulic modeling and geographic information systems (GIS) in order to obtain a precise and detailed approach to the behavior of the waters in the study area. The study includes a risk assessment based on the combination of the probability of occurrence of extreme flood events and the potential impacts on the population and infrastructure. Based on the results obtained, proposals for structural solutions are developed that respond to the projection of a work (bridge) that connects the island path with the municipality and the construction of a protection work (gabions or longitudinal dam) as the best alternative to mitigate floods produced in the study area.

Keywords: channel, flood, mitigation works, geographic information systems and hydraulic modeling.

Introducción

Las dinámicas fluviales juegan un papel fundamental en la configuración de los territorios y en la interacción entre los ecosistemas y las comunidades humanas. Sin embargo, los cambios en el comportamiento hidrológico y morfológico de los cauces pueden generar riesgos significativos, especialmente en zonas donde las inundaciones y la erosión representan amenazas recurrentes. En este contexto, el presente proyecto tiene como propósito realizar un análisis integral del comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño, ubicado en la vereda La Isla municipio de Guamal departamento del Meta, con el fin de evaluar el riesgo de inundación y proponer soluciones estructurales que contribuyan a la mitigación de los impactos sobre la comunidad.

El desarrollo de este trabajo se sustenta en el uso de herramientas avanzadas de georreferenciación, modelación hidráulica y Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permitirán obtener un diagnóstico preciso sobre la evolución del caño Picuño y su relación con el río Guamal. Para ello, se plantea un enfoque metodológico que abarca tres objetivos específicos: en primer lugar, se analizará la variación fluvial y la evolución cronológica del cauce mediante georreferenciación, levantamiento topo-batimétrico y el uso de ortofotos. En segundo lugar, se llevará a cabo un análisis de riesgo, identificando eventos recientes de inundación y evaluando su impacto para establecer medidas preventivas y de mitigación. Finalmente, se realizará un estudio hidrológico y una modelación hidráulica de un tramo específico del caño, con el propósito de determinar el caudal máximo de descarga y proponer obras hidráulicas que reduzcan el riesgo de inundación y mejoren la conectividad de la vereda La Isla con el municipio de Guamal.

La relevancia de este estudio radica en la necesidad de generar estrategias para la gestión del riesgo y la planificación territorial, considerando tanto los aspectos físicos del sistema hídrico como las implicaciones sociales y económicas para la comunidad afectada. Se espera que los resultados obtenidos contribuyan a la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades locales y permitan la implementación de medidas que favorezcan la seguridad y el bienestar de los habitantes de la vereda y región en general.

1. Planteamiento del problema

La vereda la Isla ubicada sobre el caño Picuño en el municipio de Guamal Meta, enfrenta recurrentemente el desafío de inundaciones, lo que afecta gravemente la calidad de vida de sus habitantes y la sostenibilidad de sus actividades económicas. A pesar de la vulnerabilidad de la región, existe una escasez de estudios para el análisis y la gestión del riesgo de inundación. En este contexto, el análisis integral del comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño con la utilización de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y modelación hidráulica se presenta como una solución fundamental para recopilar, analizar y visualizar datos geoespaciales, con el fin de evaluar el riesgo de inundación y proponer soluciones estructurales para mitigar los impactos en la comunidad.

Este capítulo con base a la formulación del problema, examina las causas y consecuencias de las inundaciones en la vereda la Isla y justifica la necesidad imperante de un enfoque basado en tecnologías que permitan evaluar las amenazas por inundaciones con base a la gestión del riesgo.

En la actualidad, con base a estudios del Fondo Mundial para la Reducción y Recuperación de Desastres la distribución del nivel de exposición indica que en Colombia el 36% del territorio está en situación de amenaza sísmica alta, el 28% en alto potencial de inundación y el 8% en amenaza alta por movimientos en masa. Dicho esto, Colombia enfrenta grandes retos con respecto al tema de la gestión del riesgo por inundaciones debido a factores como el conflicto en el uso de los suelos, la ubicación de asentamientos humanos en zonas de alta vulnerabilidad por inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales. Las ocurrencias de estos eventos en el territorio pueden implicar la pérdida de vidas humanas, infraestructura y el retraso del desarrollo del país (GFGRR, 2012).

Con base en esto, el informe sobre el análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia por DPN y la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres UNGRD, muestra cuatro factores por los cuales el riesgo está aumentando, destacando que esto se debe más a la inadecuada gestión territorial y sectorial, que por factores externos como el cambio climático.

Los cuatro factores que marcan la tendencia del crecimiento del riesgo en Colombia se deben a que los avances conceptuales sobre la relación entre gestión del riesgo y desarrollo, no han sido incorporados como parte integral de gestión pública. El riesgo se está acumulando permanentemente en los municipios y en las áreas rurales, debido a la falta de aplicación y control de políticas, herramientas e instrumentos de ordenamiento territorial municipal y la insuficiencia en el análisis de riesgo para la planificación del territorio. Sumado a esto, los vacíos en el tema de la gestión del riesgo de desastres en los planes sectoriales amenazan la sostenibilidad de las inversiones tanto de sectores productivos como de servicios, contribuyendo así, al aumento de la exposición y la vulnerabilidad (Wilches Chau, 2018).

No obstante, la gestión del riesgo actualmente se presenta como una serie de políticas orientadas a la prevención, alerta, intervención en situaciones de emergencia y recuperación luego del desastre. Sin embargo, la falta de articulación y esta misma gestión con la planificación del territorio y conocimientos producidos por los expertos trae como resultado una serie de políticas ineficaces. Una vez dicho lo anterior, el municipio de Guamal ubicado en el departamento del Meta, es denominado como el municipio de mayor riqueza predial; sin embargo, con base a datos de la Alcaldía Municipal, se evidencia el auge de problemáticas debido a la desconexión de las vías terciarias, pues estas se encuentran en mal estado ocasionando con ello la dificultad de comunicación del casco urbano con sus zonas rurales, limitando así el desarrollo económico de la región.

Cabe mencionar, que estas problemáticas se deben a la incorrecta planificación del territorio en zonas de vulnerabilidad, es decir, en las épocas de invierno el problema se agudiza debido al trasvase del río Guamal sobre Caño Picuño vereda la Isla, siendo este sector el más afectado por desastres naturales (inundaciones) según datos arrojados por la Unidad para la Gestión del Riesgo de Desastres – Consolidado Anual de Emergencias.

Es decir, la vereda la Isla ha experimentado en los últimos años un aumento significativo en los eventos de inundación, los cuales han afectado tanto a la población como a la infraestructura local. Estos eventos ocasionados por fenómenos climáticos extremos, son una preocupación creciente para las autoridades locales y los habitantes de la zona, quienes enfrentan daños

recurrentes a sus viviendas, cultivos y medios de vida. Sin embargo, los estudios previos sobre los comportamientos hidrológicos y fluviales de esta área han sido limitados, lo que impide una comprensión adecuada de las dinámicas de flujos de agua y de los factores que contribuyen a los riesgos de inundación.

A pesar de las iniciativas locales para mitigar el impacto de las inundaciones, no se cuenta con un análisis integral que combine los datos hidrológicos, la dinámica fluvial y las características geográficas de la zona. La falta de un modelo predictivo adecuada para los caudales y los posibles escenarios de inundación dificulta la toma de decisiones informadas sobre las intervenciones necesarias y la implementación de estrategias efectivas para reducir los riesgos.

El comportamiento hidrológico y fluvial del Caño Picuño es complejo y está influenciado por diversos factores, como las precipitaciones, las características del terreno, el uso del suelo y las infraestructuras existentes (como box culvert y canales). Además, las variaciones en el comportamiento de las aguas durante los eventos de lluvia y las crecidas del río Guamal, que alimenta al caño Picuño, requieren un análisis detallado que permita simular diferentes escenarios de inundación y evaluar el riesgo de manera precisa.

Para abordar esta problemática, es fundamental utilizar herramientas tecnológicas avanzadas, como la georreferenciación, la modelación hidráulica y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permitirán obtener una visión más clara y precisa del comportamiento fluvial en la región, así como de los riesgos asociados a las inundaciones. Estas herramientas permitirán generar modelos predictivos basados en datos históricos de precipitación y caudal, así como en la topografía y el uso del suelo, con el fin de identificar las áreas de mayor vulnerabilidad y proponer soluciones estructurales para mitigar los efectos de las inundaciones.

Sin un análisis hidrológico y fluvial integral, y sin la implementación de modelos adecuados para prever el comportamiento de los caudales y el riesgo de inundación, las medidas de mitigación seguirán siendo insuficientes, lo que continuará poniendo en riesgo la seguridad de los habitantes de la Isla y el desarrollo sostenible de la región. Por lo tanto, es urgente realizar un estudio que

permita entender con mayor precisión los factores que influyen en las inundaciones y desarrollar estrategias efectivas para reducir sus impactos a través de soluciones estructurales adecuadas.

1.1 Formulación del problema

¿Cómo influye el comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño en el sector de la vereda la Isla en el riesgo de inundación, y de qué manera las herramientas del sistema de información geográfica (SIG) y la modelación hidráulica pueden contribuir a este riesgo y proponer soluciones estructurales para mitigar los impactos en la comunidad?

1.2 Antecedentes

En el mundo, las inundaciones son consideradas como el desastre natural más dañino y peligroso, según datos de la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO, 2002), los desastres que se presentan en el orbe relacionados con el agua, el 50% corresponde a inundaciones, por encima de hambrunas, sequías y epidemias. El número de eventos ha crecido a una velocidad vertiginosa, particularmente en áreas rurales, impactando de manera negativa el funcionamiento normal de estos sectores en cuanto a economía, servicios y comunicación territorial, dejando en mayor vulnerabilidad a la población con menos recursos (Benjamín, 2008).

Por ende, existe a nivel internacional un sinnúmero de estudios que abordan esta problemática como eje central de investigación, siendo las entidades gubernamentales generalmente las llamadas a realizar este tipo de estudios y en otros casos, las universidades a nivel académico existen gran cantidad de publicaciones tanto a nivel de tesis, monografías o simplemente artículos que exponen estudios en casos específicos.

En referencia a esto, las inundaciones son los desastres naturales más peligrosos en Marruecos, la frecuencia y el impacto de las inundaciones provoca importantes pérdidas de vidas y daños materiales, como el incidente ocurrido en el valle de Ourika en 1995 que causó más de 200 muertes (Karmaoui, Balica y Messouli, 2016). Por este motivo, (Akallouch y Mashoud, 2024)

desarrollaron un estudio exhaustivo por la necesidad de comprender los peligros de la erosión fluvial, especialmente su amenaza para el área urbana de “Al-Maidar”. una zona de expansión urbana continua cerca de las riberas del río. Su metodología consistió en el aprovechamiento de los avances en teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), buscando mejorar las capacidades de mapeo de inundaciones y evaluación de riesgos. Utilizaron un método estadístico para convertir las mediciones de campo en mapas SIG. Además, los dibujos hidrográficos son fundamentales para el modelado de cuencas hidrográficas y el diseño de infraestructuras de gestión de aguas pluviales.

Este estudio proporcionó a identificación meticulosa de estructuras con mayor vulnerabilidad a posibles inundaciones, El uso estratégico de un modelo digital de elevación (MDE) ha revelado la elevación del valle, que se sitúa aproximadamente a 387 metros sobre el nivel del mar siendo esto fundamental para la implementación de soluciones de ingeniería en pro a reforzar la infraestructura para que sea resiliente a los daños por inundaciones y modernizar los sistemas de drenaje para gestionar eficazmente los caudales extremos.

Por otro lado, el estado de Kansas – Estados Unidos, sufrió un impacto significativo debido a importantes inundaciones en el Medio Oeste (Servicio Meteorológico Nacional, 2022). Por ende, (Demissie, Rimal y Dutta, 2024) desarrollaron un estudio hacia el análisis de los eventos de inundaciones enfocado al aumento considerable en el caudal máximo y las áreas de inundación, junto con el aumento en la elevación del agua, para la cuenca para escenarios futuros; utilizando la herramienta de superposición ponderada de ArcGIS pro, se generaron mapas de susceptibilidad a inundaciones. Como la superposición ponderada se basa en la escala de medición común, los mapas ráster que representan los factores de control de inundaciones se reclasificaron utilizando valores de 1 a 1.

Así mismo, (Hudson P y Colditz R , 2003) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de delimitar la extensión por inundaciones en un valle aluvial grande y complejo, cuenca baja del Pánuco, México, donde determina que la extensión por inundaciones es una función importante de la comunidad de investigación hidrológica y proporciona un servicio vital a los planificadores e ingenieros. Este estudio combina un enfoque de teledetección y geomorfológico para delinear la

extensión de un gran evento de inundación generado por un huracán en la cuenca baja de Pánuco. Las fuentes de datos incluyeron datos Landsat y datos topográficos, trabajos de campo y análisis de laboratorio. Obteniendo con esto, fragmentos de sección donde se evidencia las delimitaciones de inundaciones y complejidad de las llanuras aluviales por medio de mapeos realizados con las herramientas de SIG, pasando al preprocesamiento de estos datos. Este estudio proporciona información sobre la influencia de la geomorfología de la llanura de inundación en el mapeo de inundaciones para un gran valle aluvial. La combinación de detección remota y análisis topográficos ilustra la interacción entre los entornos de llanura de inundación y los procesos de inundaciones.

(Soldano A, Giraut M y Goniadzki D , 2007) realizaron un estudio con un objetivo particular enfocado a realizar un análisis de evolución del medio físico natural frente a una situación de inundaciones, acompañado de objetivos específicos claves los cuales están direccionados a determinar la evolución del fenómeno (escala horizontal) relacionado con las variables hidrometeorológicas registradas (escala vertical), para un mismo evento y generar una zonificación de la susceptibilidad del territorio ante un evento de amenaza de excesos hídricos. Es decir, en este estudio se propuso el desarrollo de una metodología utilizando la técnica de percepción remota y de SIG para dar paso a la elaboración de la cartográfica de susceptibilidad rural ante excesos hídricos.

El material utilizado para la realización de este trabajo consistió en información vectorial y raster de diversos orígenes. En particular, se utilizó información cartográfica analógica de estudios anteriores, además se realizó un levantamiento de puntos de control (topográfico) sobre el terreno utilizando un navegador satelital de geo posicionamiento (GPS) y se llevó a cabo un modelo digital de elevación (DEM) para obtener una imagen con asignación de altimetrías relativas al SRTM bidimensional. Este trabajo aporta elementos para la identificación y la cuantificación de las variables espaciales rurales a priorizar en la determinación de la susceptibilidad o exposición ante un evento de inundación, para así llevar a cabo recomendaciones de intervención dando respuesta oportuna a estos eventos de riesgo.

En Latinoamérica se ha venido desarrollando este tipo de estudios en áreas con alto grado de susceptibilidad a este tipo de riesgos entre los cuales cabe destacar el trabajo realizado por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET, 2003) donde llevo a cabo un estudio con el objetivo de analizar el riesgo por inundaciones y deslizamiento de tierra en la microcuenca del Arenal de Montserrat en San Salvador.

Es así, como este proyecto tiene como propósito integrar el conocimiento existente sobre la ocurrencia de fenómenos y el uso de técnicas de geo-información en la zonificación de amenazas por eventos naturales y la transferencia a instituciones involucradas en la toma de decisiones en el ordenamiento y desarrollo territorial. La metodología estuvo direccionada con la utilización de un equipo informático para el procesamiento y reproducción de la información, fotografías aéreas e imágenes de satélite, mapas topográficos y temáticos; así como literatura de estudios ya existentes y complementándola con información recopilada en campo.

Determinado así, que este riesgo por inundaciones y deslizamientos de tierra en la microcuenca Arenal de Montserrat ha aumentado debido al crecimiento urbanístico dentro de la cuenca, por ende, estos estudios dan la capacidad de análisis y sustentan mejor la toma de decisiones en la ejecución de proyectos de infraestructura, enfocados hacia un ordenamiento y desarrollo del territorio municipal y territorial, generando las medidas legales que permitan cumplir las metas y planes establecidos.

Seguido a esto, se analiza el estudio realizado por (Cárdenas P, Aldo, 2014), 2014) el cual esta direccionado en aplicar los SIG como herramientas de análisis hidráulico y modelamiento espacial para evaluar el impacto de posibles inundaciones en un sector de la cuenca baja del rio Lurín. Para ello se integró el software de análisis hidráulico HEC-RAS con el software SIG ArcView, generando como resultado un mapa de inundación, para un perfil de flujo de 50 y 100 años, donde se puede cuantificar y visualizar la magnitud de la inundación. Con el mapa de inundación se realizó un análisis de impacto de los recursos del suelo, uso actual de la tierra y geológico - geomorfológico en condiciones de inundación.

Para el caso colombiano, los estudios de gran amplitud se han realizado a través de las entidades estatales como el IDEAM, antiguo INGEOMINAS, IGAC y DANE, enmarcados en algunos de los proyectos como lo son el estudio de Geomorfología y Susceptibilidad a la inundación del valle fluvial del Magdalena, en el cual con un mayor nivel de resolución evalúa la susceptibilidad de inundación en zonas aledañas al río Magdalena a través de un análisis de la geomorfología de la zona, la dinámica fluvial del valle del río Magdalena y de imágenes satelitales.

Por otro lado, el estudio del programa de investigación y zonificación geotécnica regional y urbana la zonificación geológica y geotecnia de la cuenca del río Cesar, que permitió evaluar las inundaciones y desbordamientos en el curso del río y proponer alternativas de solución para evitar la afectación en la población y sus bienes y por último y no menos importante el estudio enfocado hacia el monitoreo de zonas inundadas con tecnologías geoespaciales, convenio realizado entre Colombia Humanitaria y el IGAC, cuyo objetivo es adquirir imágenes de sensores remotos para generar, mapear y monitorear la capa geográfica afectada por inundación mediante el uso de tecnologías geoespaciales, con el fin de fortalecer las entidades miembro del Sistema Nacional de la Prevención y Atención de Desastres (Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas Mineras (INGEOMINAS), 2005).

Igualmente, se cuenta con gran variedad de trabajos que han sido publicados, dado su carácter de relevancia e importancia para el estudio del riesgo de inundación en el país. En el cual, se evidencia el trabajo realizado por (Ordoñez, 2016) cuyo objetivo es analizar los riesgos por inundación utilizando herramientas SIG para la cuenca del río Quito acompañado de objetivos específicos los cuales direccionan a buscar y estudiar metodologías generadas en el departamento del Choco para análisis de los riesgos por inundación, generar la cartografía base y la temática de la zona de estudio que permita estimar los riesgos por inundación en la Cuenca del río Quito y describir los mapas de riesgos por inundación.

Este trabajo se realizó en referencia a estudios de tipo aplicativo en base a 4 fases metodológicas que direccionaron a obtener resultados como mapa de pendientes, mapas de geología, mapa de geomorfología, mapa de conflicto de usos, precipitaciones de la zona, susceptibilidad en la cuenca del río Quito y el análisis de riesgo por inundación en la cuenca. Todo

este estudio presentó una clasificación de amenaza baja, influenciado principalmente por las bajas pendientes que predominan en esta zona; sin embargo, recomiendan realizar estudios hidrológicos, hidráulicos y fluviales para estimar las inundaciones en las zonas ribereñas dada a las condiciones de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo.

Por otro lado, se analiza el estudio realizado por (Cipagauta y Cadena, 2014) el cual se centra en determinar la amenaza por inundación en el municipio de Chía – Cundinamarca por medio de cartografía, haciendo uso de los sistemas de información geográfica (SIG) para proporcionar datos que ayuden al análisis de este fenómeno geográfico, esto con énfasis en recopilar información sobre la topografía, las características del suelo y la hidrología del municipio, generar un mapa a partir de los datos recopilados que identifique posibles zonas de inundación y representar de manera lógica y ordenada la información correspondiente al fenómeno de inundaciones en Chía. Este estudio cuantitativo cuenta con un diseño metodológico el cual está direccionado a definir el área de intervención, consecución de los mapas, georreferenciación y digitalización y ponderación de mapas para así analizar la información

A nivel departamental, se evidencia un estudio realizado por (Gutiérrez V, Dudei S y Cuervo G , 2019) donde su objetivo principal es analizar la susceptibilidad por inundaciones asociadas a la dinámica fluvial del río Guatiquia en la ciudad de Villavicencio – Meta. Este estudio presenta el análisis del comportamiento morfodinámico de un río tropical como base para la evaluación de la susceptibilidad por inundaciones en una población ribereña, el estudio se realiza mediante el análisis de información histórica consultada en reportes técnicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del Servicio Geológico Colombiano; el estudio de series hidrológicas, el procesamiento e interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélites multiespectrales en un periodo de 78 años; así como a través de la elaboración de cartografía geológica y geomorfología con controles de campo. Se determinó por un lado el comportamiento dinámico de los cauces trenzados dentro del límite del lecho mayor del sistema fluvial y, por otro, la susceptibilidad a las inundaciones en la ciudad de Villavicencio con 64,7 Ha en categoría media-alta y 17,9 Ha en categoría alta.

Respecto a nivel municipal, se evidencian diversos estudios que abordan el tema del riesgo por inundaciones entre los cuales se puede analizar el trabajo realizado por (Tibavija W y Villar E, 2011) que tiene como objetivo formular un plan de gestión del riesgo de inundación del río Guamal en el sector urbano del municipio de Guamal, a partir de un Sistema de Información Geográfica con base en determinar en forma participativa las zonas vulnerables del área de estudio, determinar las estrategias para mitigar el riesgo en zonas previamente establecidas y crear un esquema de seguimiento y evaluación del plan. Este estudio está enfocado hacia una investigación cuantitativa de tipo descriptivo – experimental, la metodología implementada da respuesta a una observación directa, en donde se identifican las fases de la propuesta que son, recopilación de información “diagnostico”, síntesis de la información “formulación del plan” y seguimiento y evaluación del plan de gestión.

A nivel local no existen antecedentes ni estudios técnicos documentados que analicen los riesgos asociados al caño Picuño, el cual surgió en el año 2002 como consecuencia de un trasvase del río Guamal. Desde su aparición, este cuerpo de agua ha experimentado un crecimiento progresivo en su caudal. Este incremento, en combinación con el aumento de las precipitaciones, ha ocasionado desbordamientos periódicos durante la temporada invernal, afectando a la comunidad de la vereda la Isla.

Ante estas emergencias, las intervenciones realizadas por la comunidad, como la construcción de obras hidráulicas improvisadas para facilitar el paso vehicular hacia la vereda La Isla, carecieron de respaldo técnico y no respondieron a un análisis integral del comportamiento hidrológico del caño. Estas acciones, aunque útiles en el corto plazo, no han sido suficientes para enfrentar los riesgos generados por la variabilidad del caudal y la falta de infraestructura adecuada. La ausencia de estudios locales se explica, en parte, por el carácter emergente y no planificado del caño Picuño, así como por la limitada capacidad institucional y técnica disponible en la zona para abordar este tipo de investigaciones. En consecuencia, resulta urgente desarrollar investigaciones que permitan comprender a fondo la dinámica del caño Picuño, evaluar los riesgos existentes y proponer soluciones orientadas a la gestión del recurso hídrico y la protección de los habitantes de la vereda la Isla.

Con base a esto, la relación entre los antecedentes de inundaciones pasadas y los actuales es crucial para una mejor comprensión de los factores que contribuyen a las inundaciones, las estrategias de mitigación y las lecciones aprendidas para la reducción de estos riesgos. Todos estos estudios antes mencionados servían como base para construir modelos más complejos que consideran factores como la topografía, estudios de suelo, clima, estudios hidrológicos e hidráulicos; todo ello en pro de hacer uso de las herramientas del sistema de información geográfica ya que resultan relevante, crucial y necesario el análisis del riesgo de desastres, por lo que a su vez deber ser aplicados para generar mayores beneficios en la planificación del territorio, prevención y mitigación de ocurrencia de estos eventos por inundación.

2. Justificación

La gestión del riesgo en contextos vulnerables, como la vereda la Isla en el municipio de Guamal, Meta es fundamental para garantizar la seguridad y el bienestar de sus habitantes. Esta zona enfrenta de manera recurrente el riesgo de inundaciones que afectan a la población, la vulnerabilidad de esta comunidad se ha incrementado por la falta de estudios técnicos e integrales que permitan entender a fondo las dinámicas hidrológicas y fluviales del área, lo que dificulta la implementación de soluciones eficaces para mitigar estos impactos.

En este contexto, el análisis integral del comportamiento hidrológico y fluvial del Caño Picuño es de suma importancia. Este caño es una vía de escurrimiento natural que, por su relación con el río Guamal y las precipitaciones que recibe, se ve directamente afectado por las crecidas y el flujo de agua durante períodos de lluvias intensas. Sin embargo, el comportamiento de los caudales, el impacto de las variaciones topográficas, el uso del suelo y la infraestructura hidráulica existente no ha sido analizado con el nivel de detalle necesario para comprender las causas y efectos de las inundaciones.

La utilización de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelación hidráulica ofrece la posibilidad de integrar diversos tipos de datos geospaciales (como precipitaciones, caudales, topografía y uso del suelo), creando una visión holística y precisa del comportamiento del sistema hidrológico de la cuenca. Estas tecnologías permiten no solo entender cómo interactúan los diferentes factores que afectan el flujo de agua, sino también simular distintos escenarios de inundación y predecir los riesgos asociados bajo diferentes condiciones climáticas. Además, los SIG facilitan la elaboración de mapas detallados que identifican las áreas de mayor vulnerabilidad, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones informadas.

El riesgo de inundación en la vereda la Isla, si no se mitiga adecuadamente, puede seguir afectando la calidad de vida de los habitantes, causando daños materiales en viviendas, caminos, cultivos y en la infraestructura hidráulica existente. Además, los costos asociados a las pérdidas económicas y los esfuerzos de respuesta ante las emergencias son cada vez mayores. Por lo tanto,

realizar un análisis preciso y detallado de estos riesgos es clave para implementar estrategias de mitigación efectivas.

El propósito de esta investigación es proporcionar a las autoridades locales y a la comunidad herramientas científicas y prácticas para la gestión del riesgo de inundación, basadas en datos empíricos y modelos predictivos. A través del análisis hidrológico y fluvial, se podrá identificar con precisión las zonas más vulnerables y determinar los caudales máximos de descarga, lo que permitirá diseñar soluciones estructurales específicas, como puentes y obras de protección. Estas soluciones contribuirán no solo a la protección de la comunidad, sino también a la sostenibilidad a largo plazo de las actividades económicas en la región, reduciendo la vulnerabilidad de la vereda la Isla frente a fenómenos climáticos extremos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar un análisis integral del comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño en el sector de la vereda la Isla, utilizando herramientas de georreferenciación, modelación hidráulica y SIG, con el fin de evaluar el riesgo de inundación y proponer soluciones estructurales para mitigar los impactos en la comunidad

3.2 Objetivos específicos

Analizar variación fluvial y la evolución cronológica del cauce del río Guamal, con énfasis en el caño Picuño en el sector de la vereda la Isla, mediante georreferenciación, levantamiento topo-batimétrico y el uso de ortofotos.

Realizar un análisis de riesgo del caño Picuño, sector vereda la Isla, identificando eventos recientes de inundación y evaluando su impacto, con el fin de establecer medidas preventivas y de mitigación.

Elaborar un estudio hidrológico y realizar la modelación hidráulica de un tramo específico del caño Picuño, utilizando herramientas SIG para determinar el caudal máximo de descarga y proponer obras hidráulicas adecuadas que mitiguen los riesgos de inundación y mejoren la conectividad de la vereda la Isla con el municipio de Guamal.

4. Hipótesis

El uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite identificar adecuadamente las zonas de riesgo de inundación del caño Picuño, lo cual contribuye a implementar estrategias de mitigación en la vereda La Isla, Guamal, Meta.

4.1 Hipótesis de trabajo

El análisis hidrológico y fluvial del caño Picuño realizado mediante SIG permite delimitar zonas de inundación con una precisión mayor al 90%, facilitando la planificación de medidas de mitigación en la vereda La Isla, Guamal, Meta.

4.1.1 *Hipótesis nula*

El uso de SIG en el análisis hidrológico y fluvial del caño Picuño no mejora significativamente la identificación de zonas de riesgo de inundación ni contribuye a una mejor planificación de estrategias de mitigación en la vereda La Isla, Guamal, Meta.

4.1.1.1 Hipótesis alterna. El uso de SIG en el análisis hidrológico y fluvial del caño Picuño mejora significativamente la identificación de zonas de riesgo de inundación y contribuye a una mejor planificación de estrategias de mitigación en la vereda La Isla, Guamal, Meta.

4.1.1.1.1 Variable independiente. aplicación de herramientas SIG (mapas temáticos, modelos de elevación y análisis espacial).

4.1.1.1.2 Variable dependiente. Precisión y cobertura en la delimitación de zonas de inundación.

4.1.1.1.3 Variable interviniente. Características físicas del terreno y régimen hídrico.

5. Marco teórico

Los Sistema de Información Geográfica (SIG) son tecnologías que incluyen conocimientos científicos de la geografía. Además, la ciencia aplicada también emplea la experiencia y la idoneidad adquiridas para la resolución de problemas en materia de planeación urbana, rural y de ordenamiento territorial (Principi, Buzai y Baxendale, 2015). El enfoque sistémico y multidisciplinario (Garcia , 2006) de los SIG para el análisis especial mediante el tratamiento, estudio descriptivo y exploratorio de datos geoespaciales, así como la aplicación de estadística y modelado espacial, permite plantear diferentes escenarios útiles para la toma de decisiones (Buzai et, 2015).

En el caso del análisis de riesgo de inundación, se identifican los factores que inducen y generan el riesgo con base en las condiciones rurales y las corrientes de agua, información que se procesa a través de capas temáticas en formatos (Chen, 2022). Por otra parte, las simulaciones hidrológicas y modelos digitales de elevación, permiten optimizar el cálculo de escenarios y la comparación de resultados más precisos para representar flujos y acumulación de agua (Jafarzadegan & Merwade, 2017).

En este sentido, los programas informáticos como HEC-RAS 5 de simulación hidrológica de corrientes (Moya-Quiroga, 2016) QGIS o ArcGIS, posibilitan el análisis de la extensión de las inundaciones. Los flujos de agua y la formación de socavación mediante la superposición de capas de inundación calculadas a partir de modelos matemáticos (Schubert y Sanders, 2012). Además, para el análisis se aplican las condiciones de vulnerabilidad mediante la relación de las variables físicas y sociales en asentamientos rurales.

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Los (SIG) son herramientas esenciales en la gestión de riesgos, ya que permiten la recopilación, almacenamiento, análisis y visualización de datos espaciales y geoespaciales para comprender mejor los fenómenos que pueden poner en peligro a una población o un terreno. En el análisis de gestión de riesgos, los SIG se utilizan para identificar, evaluar, mapear y monitorear

riesgos en tiempo real facilitando la toma de decisiones y la planificación de estrategias de mitigación y respuesta (Sendra B y Garcia R, 2000). Es así, como uno de los casos específicos del uso de las herramientas SIG es en el riesgo por inundaciones, el análisis de cuencas hidrográficas y la simulación de lluvias extremas a través de SIG pueden prever las áreas más susceptibles a inundaciones y ayudar en la gestión de sistemas de drenaje o la construcción de barreras de protección.

La implementación de un SIG para el análisis de inundaciones debe ser sustentada en una combinación de teorías sobre Sistemas de Información Geográfica, hidrología, riesgos naturales y planificación territorial. Teniendo en cuenta lo anterior, (Burrough, P.A, 1986) en su obra "Principles of Geographical Information Systems" argumenta lo fundamental para la comprensión de los Sistemas de Información Geográfica, tanto en términos teóricos como prácticos. Burrough describe los principios esenciales de los SIG, abordando la forma en que estos sistemas permiten la recopilación, almacenamiento, análisis y visualización de datos geoespaciales, lo que enfatiza que es una herramienta poderosa para el manejo de información territorial. Es así, como uno de los conceptos claves abordados en esta teoría son:

- **Datos espaciales:**

Son un tipo de información que está vinculada a una ubicación geográfica específica y se utiliza en diversas áreas, como la geografía, la cartografía, la planificación urbana, entre otras. Los datos espaciales pueden describir tanto las características de la superficie terrestre como los objetos que la componen, y pueden ser presentados en diferentes formas, ya sea mediante capas vectoriales (puntos, líneas, polígonos) o raster (Cuadrículas de datos continuos). Esto es especialmente útil en el estudio de fenómenos como las inundaciones, donde se deben integrar datos sobre topografía, uso del suelo, clima y otros factores relacionados.

- **Análisis espacial:**

Burrough introduce técnicas como el análisis de proximidad, la superposición de capas, el modelado de redes y la interpolación espacial. Estos métodos permiten simular y analizar eventos geográficos, como la propagación de inundaciones en función de variables como la pendiente del terreno, las precipitaciones y la capacidad de absorción del suelo.

- **Visualización:**

Una de las aportaciones clave de los SIG es la capacidad de representar gráficamente los datos, la visualización de mapas temáticos permite identificar patrones espaciales y tomar decisiones informadas sobre la gestión del territorio, lo cual es crucial en situaciones de emergencia o planificación urbana.

A esta obra, se le suma la teoría Geographic Information Systems and Science de (Longley, Goodchild, Maguire y Rhind, 2005) en la cual proporcionan una exploración profunda de la teoría y la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, destacando su relevancia en diversos campos y aborda una amplia gama de aspectos claves que incluyen:

- **Fundamentos de los SIG:**

La obra cubre desde los principios básicos de los SIG, como la estructura y representación de datos espaciales hasta los procesos complejos de análisis y modelado. En donde profundizan la gestión de datos espaciales, la topología y la integración de información geográfica para la toma de decisiones, lo cual es crucial para comprender como los SIG pueden usarse para modelar y mitigar los riesgos por inundaciones.

- **Teoría y aplicación en ciencias ambientales:**

Los autores exploran como los SIG se utilizan para estudiar y gestionar fenómenos naturales, como el cambio climático, la erosión del suelo, la deforestación y, por supuesto, las inundaciones. Detallan como los SIG permiten la integración de datos de diferentes fuentes (por ejemplo, mapas de elevación, imágenes satelitales, datos meteorológicos y modelos hidrológicos) para analizar áreas propensas a inundaciones, evaluar impactos y desarrollar estrategias de gestión del riesgo.

- **Gestión de riesgos naturales:**

En este contexto, se profundiza en como los SIG son herramientas poderosas para la gestión de desastres naturales, incluyendo inundaciones. Los SIG permiten realizar modelos predictivos, identificar zonas vulnerables, mapear áreas de evacuación, y optimizar el uso de los recursos

durante situaciones de emergencia. Además, se aborda la importancia de los SIG para la planificación a largo plazo y el desarrollo de infraestructuras resilientes a inundaciones.

- **Análisis espacial avanzado:**

Longley y sus colaboradores también exploran técnicas más avanzadas de análisis espacial que se aplican específicamente a la gestión de inundaciones, como el análisis de cuencas hidrográficas, el modelado de inundaciones con simulaciones hidrológicas, y el análisis de riesgos en áreas urbanas y rurales. Estas técnicas permiten simular como un cambio en las condiciones ambientales como las lluvias extremas pueden afectar la región y prever los impactos.

Estos dos autores presentan la forma de aplicación de los SIG en el estudio de inundaciones que permite integrar diferentes tipos de datos espaciales (topográficos, meteorológicos, hidráulico, etc.) para modelar y simular el comportamiento de las inundaciones en una zona específica. A través de la interrelación de capas de información, es posible realizar análisis y predicciones sobre las áreas vulnerables.

- **Modelos hidrológicos y de inundación**

Chow en su libro *Open Channel Hydraulics* proporciona una descripción detallada de los principios de la hidráulica de canales abiertos, donde aborda aspectos para el estudio y la gestión de fenómenos como las inundaciones, especialmente en lo que respecta a la dinámica del flujo superficial de los ríos, arroyos y otros cuerpos de agua abiertos (Chow, 2009).

Con base a esta teoría, Chow explica cómo se determina el flujo de agua en canales de diferentes formas y condiciones, lo cual es esencial para modelar fenómenos de inundación y calcular la capacidad de transporte de agua de los ríos y otras corrientes. Es así, como se determinan las clases de flujos en canales abiertos: flujo subcrítico (lento) y flujo supercrítico (rápido), esta clasificación es importante para entender cómo se comporta el agua en los canales durante diferentes condiciones, como en situaciones de inundación, cuando el flujo puede cambiar de subcrítico a supercrítico debido a aumentos repentinos en el caudal.

A partir de eso describe las ecuaciones fundamentales para calcular el flujo, el cálculo de la capacidad de los canales y control de inundaciones y el impacto de la topografía y la geometría del canal. En relación a esto, el modelo raster propuesto por Bates y de Roo en "A simple raster-based model for flood inundation simulation" (2000) representa una contribución significativa a la modelización de inundaciones, particularmente por su simplicidad, accesibilidad y capacidad para ser integrado en plataformas SIG. Este enfoque es utilizado en la gestión de inundaciones y la planificación del territorio. Al proporcionar una herramienta computacionalmente eficiente para simular inundaciones, permite realizar análisis de riesgo más accesibles y efectivos, especialmente en contextos donde los recursos y el tiempo son limitados (Bates P y Roo D, 2000).

- **Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo**

Cardona en su obra "Análisis de riesgo y gestión del desastre" define la vulnerabilidad como la condición de un sistema que lo hace susceptible a sufrir daño debido a un peligro o amenaza, esta condición no solo depende de la magnitud del evento, sino también de la capacidad del sistema para prevenir, resistir o recuperarse de los efectos del evento. La vulnerabilidad no se limita a la exposición al riesgo, sino que incluye factores como la capacidad de adaptación, las condiciones socioeconómicas y las políticas de gestión (Cardona , 2005).

Este concepto es un marco fundamental para comprender como los desastres, como las inundaciones afectan a las comunidades y los ecosistemas, no solo en términos de exposición física, sino también a través de factores sociales, económicos e institucionales. Este enfoque integral permite un análisis más profundo de las causas del riesgo y fomenta una gestión de desastres que no solo se centra en mitigar los impactos, sino también en fortalecer la resiliencia de las personas y las instituciones ante futuros eventos de riesgo.

Por otro parte, los SIG permiten una gestión integrada de los recursos hídricos, incluyendo la identificación de fuentes de agua, cuencas hidrográficas, uso del suelo y otras variables, estos datos se integran para analizar como las inundaciones afectan el paisaje y como podrían mitigarse mediante el manejo adecuado del territorio y de las infraestructuras de drenaje.

6. Metodología

Este capítulo se describen los procedimientos, técnicas y actividades a implementar necesarias para el desarrollo de la investigación. Por otro lado, aquí se indica el proceso metodológico, el tipo de estudio y el procedimiento propuesto para la obtención de los resultados.

6.1 Enfoque metodológico

La investigación aplicada busca resolver problemas prácticos y específicos generando así nuevas tecnologías o soluciones prácticas (Cívicos A y Hernández M, 2007). Por ello, partiendo de la idea, formulación y propuesta de este proyecto se determinó que corresponde a una investigación de tipo aplicada con énfasis en la investigación de “Sistemas de Información Geográfica” y “Análisis de Riesgos por inundaciones”. Por lo tanto, la aplicación práctica de los SIG en campos como el monitoreo ambiental, la gestión de emergencias y evaluación del impacto ambiental resultan fundamental para resolver problemas prácticos en áreas como la mitigación de riesgos (Maguire, D.J , 1991).

En referencia a lo antes mencionado, los SIG son utilizados en investigación aplicada utilizando métodos cuantitativos para abordar cuestiones como la planificación urbana – rural y la gestión ambiental, también los Sistemas de Información Geográfica permiten recopilar y analizar datos geoespaciales de manera eficiente, utilizando modelos estadísticos y algoritmos para analizar simulaciones, identificar patrones especiales y prever cambios en el uso del suelo en pro de mitiga riesgos (Longley P, 2015). En este sentido, el enfoque metodológico seleccionado es el cuantitativo, el cual se centra en la recopilación y análisis de datos numéricos para entender y modelar el fenómeno de las inundaciones en la vereda la Isla. Al centrarse en la recopilación y análisis de datos numéricos, este enfoque permite modelar de manera precisa el riesgo de inundaciones y contribuye a la formulación de estrategias de mitigación y prevención basadas en evidencia (Rivas A, 2016).

6.2 Tipo de estudio

La investigación descriptiva consiste en la recopilación de datos que describen los acontecimientos y luego organiza, tabula, representa y describe los datos obtenidos (Glass y Hopkins, 1984). Es decir, esta investigación tiene como propósito principal identificar patrones, tendencias y características de un fenómeno en su contexto natural donde el investigador se enfoca en observar, registrar y describir el fenómeno tal como ocurre en su entorno natural (Creswell, 2012). Por lo tanto, el tipo de estudio de este proyecto corresponde a una investigación descriptiva enfocada hacia la recolección y análisis de datos para caracterizar la problemática de las inundaciones en la vereda la Isla y el contexto en el que se desarrollan, proporcionando una imagen precisa de la realidad.

Ahora bien, el objetivo de la investigación descriptiva en este proyecto consiste en analizar el comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño para así describir los principales factores que contribuyen a las inundaciones en la zona, luego de esto analizar datos históricos incluyendo la frecuencia, duración e impacto de estos eventos en la comunidad para así poder evaluar la vulnerabilidad de la población considerando aspectos como la infraestructura, la preparación y la capacidad de respuesta ante emergencias como las inundaciones.

6.3 Procedimiento

Para el debido procedimiento de este estudio se ha dividido la ejecución del proyecto en 3 fases metodológicas encaminadas al desarrollo de los objetivos planteados.





1. Recolección y análisis de datos geoespaciales

En esta fase mediante la implementación del programa ArcGIS se genera una serie de mapas donde se identificará la localización veredal e hídrica del proyecto. Para así, llevar a cabo la georreferenciación, levantamiento topo-batimétrico y generación de ortofotos que permitirá obtener datos precisos sobre la geometría del terreno y las características del cauce caño Picuño. Una vez esto, se analiza de la dinámica fluvial del cauce caño Picuño por medio de mapas históricos.

Para lograr esto, se requiere de personal capacitado y equipos técnicos presentados en la **tabla 1** los cuales son fundamentales para el desarrollo de esta fase.

Tabla 1.

Equipos técnicos para georreferenciación y delimitación topográfica

Equipo	Imagen	Cantidad
Gps de Precisión HI TARGET		3
Estación tota FOIF RTS 102		1
Drone Phantom 4 PRO OBSIDIAN		1
Toyota Fortuner		1

Fuente: Elaboración propia

2. Análisis de características del cauce

Principalmente se realizó una revisión exhaustiva de información ambiental mediante mapas de la zona de estudio que permitirá la elaboración del análisis de riesgo para identificar y analizar las amenazas presentes. Por otro lado, se llevará a cabo la indagación sobre eventos de inundaciones fluviales a los que se han visto expuestos los habitantes de la Vereda la Isla como productos de los desbordamientos del caño Picuño. Para lograr esto, se busca el apoyo en las fuentes de información presentadas en la **Tabla 2** en las que se asocia este tipo de eventos de antecedentes.

Tabla 2.

Fuentes eventos antecedentes de inundaciones fluviales caño Picuño

Tipo de fuente	Fuente
Mapas	Geoportal – Servicio Geológico Colombiano
Base de datos	DESINVENTAR y Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - NGRD

Fuente: Elaboración propia

3. Hidrología y modelación hidráulica del cauce

En esta fase, se implementó las herramientas SIG para el análisis del estudio hidrológico determinando con esto el caudal máximo de descarga en el trasvase del río Guamal hasta el caño Picuño. El cálculo de los caudales comprende la modelación con el HEC-HMS corriendo para este modelo la siguiente metodología:

- **Método de pérdidas: SCS NUMERO DE CURVA:** El número de Curva (CN) del método SCS es el parámetro que cuantifica el escurrimiento superficial basado en el uso del suelo, la cobertura vegetal, las condiciones hidrológicas y el estado de humedad antecedentes.
- **Método de transformaciones: SCS HIDROGRAMA UNITARIO:** en una representación hidrológica que modela la respuesta de una cuenca a una unidad de exceso de precipitación (1 mm) uniformemente distribuida en el tiempo y espacio.
- **Método de transformaciones: SNYDER HIDROGRAMA UNITARIO:** funciona como modelo sintético que estima la respuesta hidrológica de una cuenca ante una lluvia unitaria, se basa en parámetros empíricos como el tiempo de retardo (T_i) y el coeficiente de pico (C_p), los cuales permitieron ajustar la forma del hidrograma según las características físicas de la cuenca.
- **Meteorologic Models:** Hietograma según T_r años: representa la distribución temporal de la precipitación durante un evento de lluvia con un periodo de retorno (T_r) específico. Se

construya utilizando curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y refleja cómo se distribuyen las intensidades de lluvia en intervalos de tiempo.

- **Control Specifications:** Intervalo de tiempo 5 minutos: se utilizó en el análisis hidrológico para descargar datos de lluvia o flujo en periodos breves. Es ideal para estudiar los eventos de alta resolución temporal, como tormentas intensas, ya que permite capturar variaciones rápidas en la intensidad de la precipitación o en la respuesta hidrológica de una cuenca.
- **Precipitation Gages-, Hietogramas según Tr año y curvas IDF:** combina la distribución temporal de precipitación para un evento con un periodo de retorno (T_r) y los valores de intensidad, duración y frecuencia obtenidos de las curvas IDF. Estos hietogramas permiten representar como se distribuyen en intervalos específicos.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, la **Tabla 3** presenta la información base usada para realizar las diferentes caracterizaciones del cauce caño Picuño.

Tabla 3.

Información base para caracterización hidrológica del cauce

Tipo de Información	Descripción	Fuente	Fin
Climatología	Estaciones pluviométricas Caño Hondo [35010040]	IDEAM	Efectuar caracterización climatológica, específicamente del cauce del caño Picuño
Hidrológica	Estaciones pluviométricas Caño Hondo [35010040] y Guamal [35010070]	IDEAM	Obtener caudales del río Guamal en base al caño Hondo
Topográfica	Archivos DWG y MDE	LAND VIWER	Caracterizar geomorfológicamente el cauce Caño Picuño
Cartografía	Imágenes satelitales	Google Earth	Evidenciar cambios del cauce del caño Picuño por medio del análisis cronológico

Modelación hidráulica	Metodo de SCS (Número de curva) y Modelo del hidrograma UNITARIO SNYDER	Software HEC- HMS 4.6	Estimar los caudales en distintos periodos de retorno para obtener la modelación hidráulica de la cuenca caño Picuño.
--------------------------	---	-----------------------------	--

Fuente: Elaboración propia

Seguido a esto se desarrolla la modelación hidráulica del cauce por medio del software HEC-RAS 6.5 (Hydrologic Engineering Center – River Análisis System), el cual tiene la capacidad de modelar hidráulicamente flujos de subcríticos, supercríticos y mixtos. Para así plantear una obra como solución al problema de inundaciones sobre las orillas del cauce, integrándola a la modelación hidráulica con el fin de corroborar su funcionalidad frente al evento de inundación.

La modelación hidráulica se generó con base en el levantamiento topo-batimétrico previamente realizado en la fase I y una ortofoto área de alta resolución para la zona de estudio

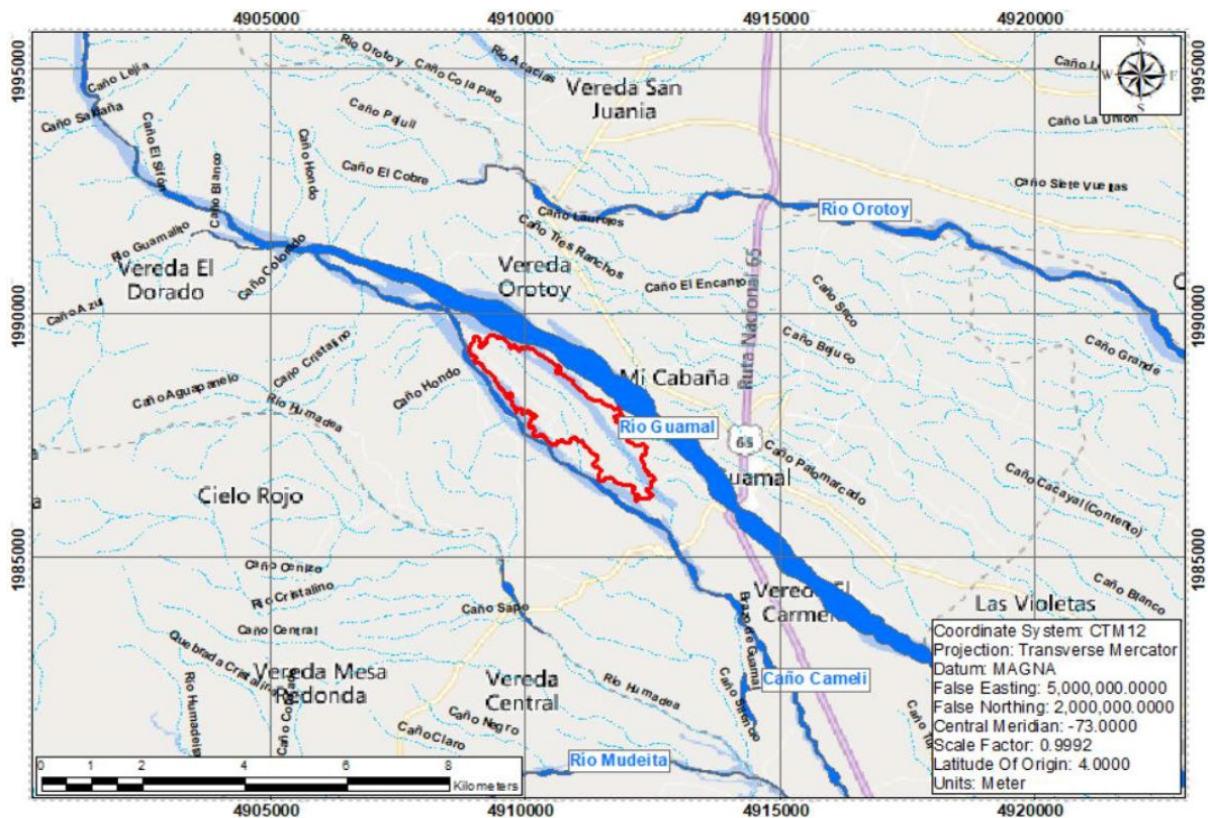
7. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del desarrollo de las fases metodológicas que van direccionadas a dar respuesta a los objetivos específicos, los cuales son necesarios para entender las causas del desbordamiento del caño Picuño y comprender el comportamiento hidráulico y fluvial de su corriente.

7.1 Delimitación del área de estudio

Figura 1.

Localización Hídrica del proyecto - caño Picuño



Fuente: Elaboración propia

7.2 Georreferenciación

Para llevar a cabo la georreferenciación, se instaló una pareja de mojones con placa de aluminio marcadas como GPS-01 y GPS-02. Posterior a esto, se ubicó un mojón certificado del

IGAC (GPS-A38-SE-1) se armó en HPS HI TARGET y se dio inicio a la captura de datos en un periodo de 2 horas, garantizando así la recepción de los satélites.

Figura 2.

Lectura con GPS Hi Target Estático GPS01 y GPS02

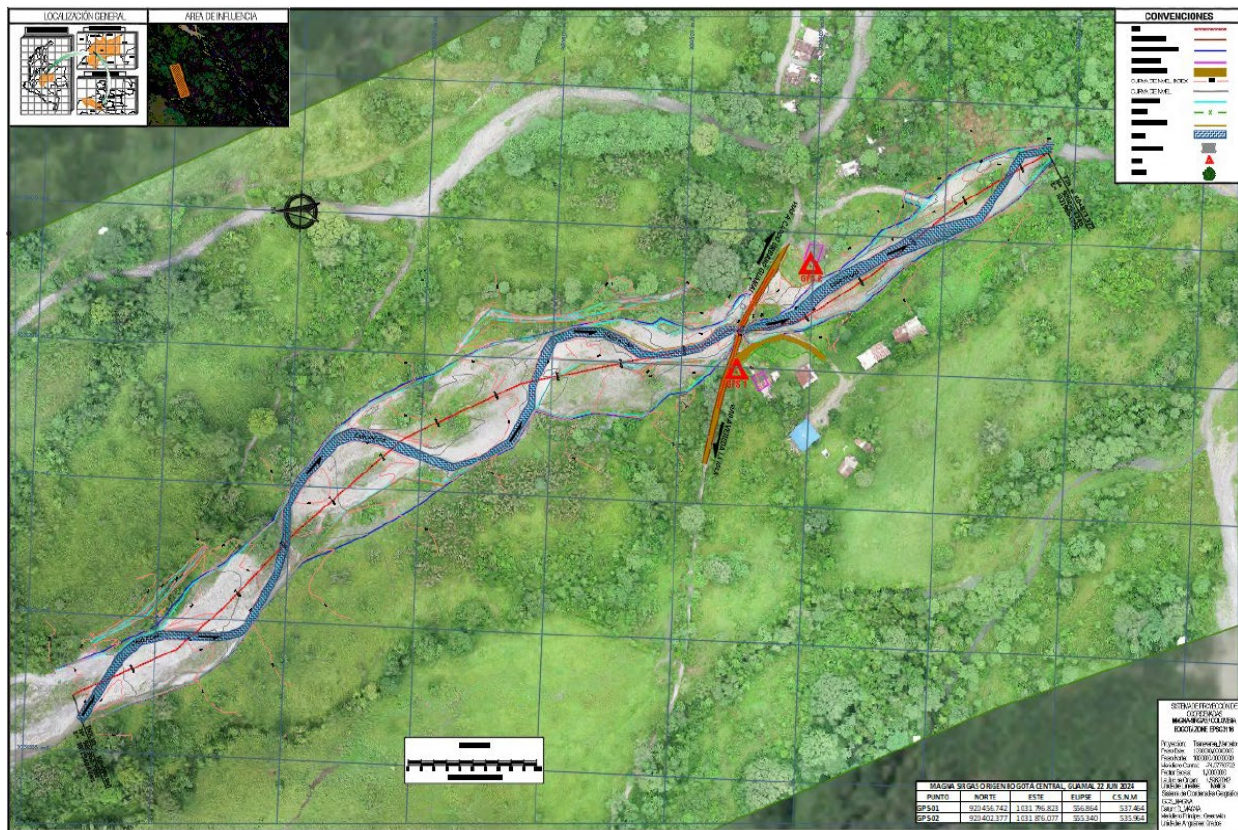


Fuente: Elaboración propia

7.3 Levantamiento topo – batimétrico

Una vez obtenida la poligonal en el proceso de georreferenciación se dio inicio al levantamiento topo-batimétrico radiando los detalles aferentes a la zona de intervención (Vereda la Isla caño Picuño, con RTK de doble frecuencia y radio externo se hizo el levantamiento del caño Picuño en secciones transversales cada 30 metros aproximadamente en una longitud de 600 metros aguas arriba y de 280 metros aguas abajo.

- **Vuelo con Drone y generación de ortofoto:** luego de la materialización de los puntos de control (GPS 01 y GPS 02), se programó y se realizó el vuelo con los parámetros establecidos para abarcar el área de estudio. Con los datos de campo tomados, se procedió a realizar la ortofoto empleando el software Agisoft Metashape Professional permitiendo con esto obtener el plano topográfico como se evidencia en la **figura 3**.

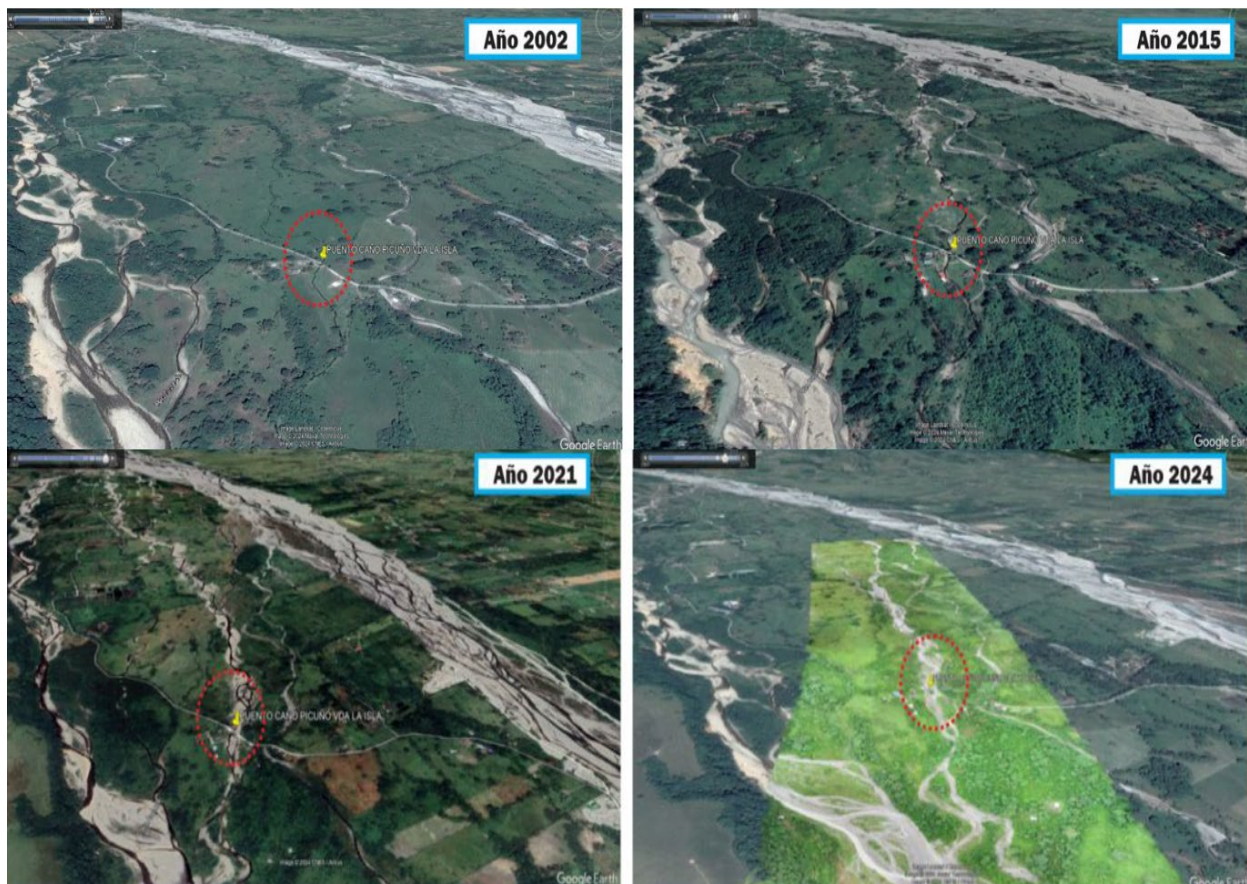
Figura 3.*Plano topográfico**Fuente: Elaboración propia*

7.4 Análisis de la geomorfología local en base a la evolución del caño Picuño

Para este análisis de la dinámica fluvial del cauce se procedió a la interpretación de imágenes satélites obtenidas a partir del programa Google Earth Pro donde por medio de la herramienta “Historial de Imágenes” permitió analizar cronológicamente el comportamiento que ha tenido este cauce debido al desbordamiento que ha presentado el río Guamal. Por lo tanto, el programa arroja imágenes del municipio a partir del año 2002, en el cual se puede observar hacia la parte derecha del río Guamal la existencia del cauce caño Picuño en la vereda la Isla.

Figura 4.

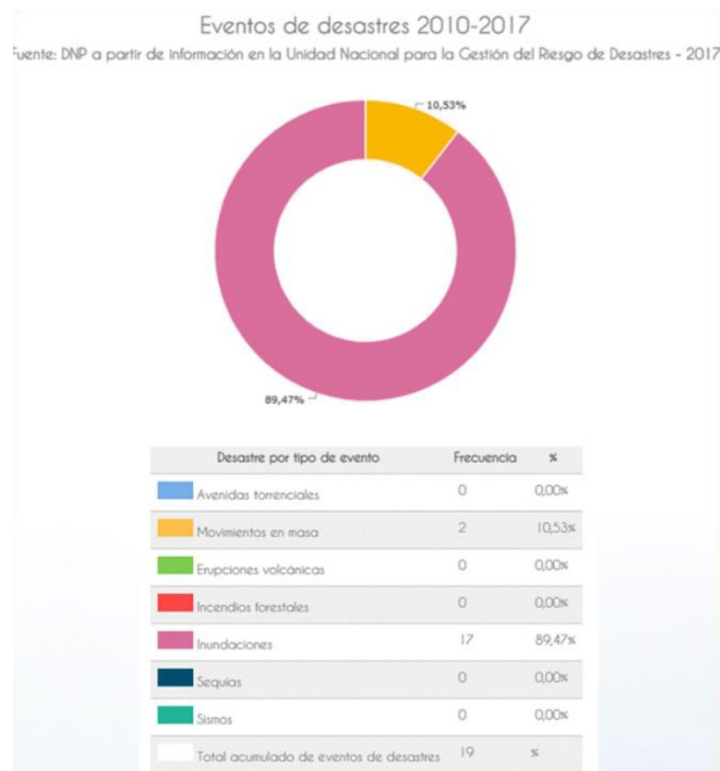
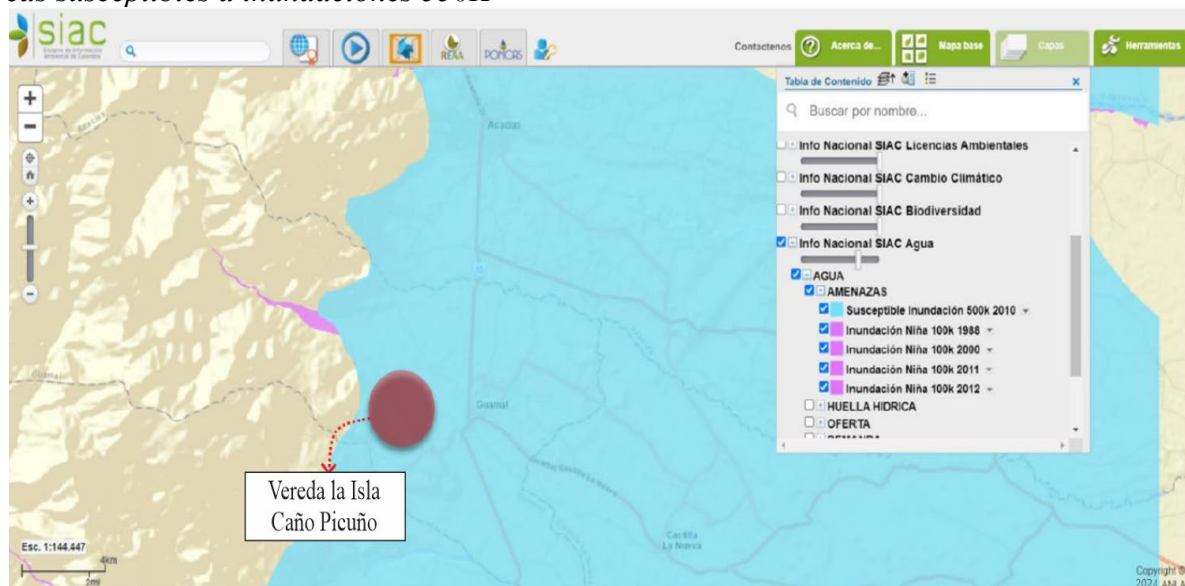
Perspectivas comportamiento fluvial caño Picuño



Fuente: Google Earth Pro

7.5 Análisis de riesgo – identificación de amenazas

Con base a las investigaciones realizadas, se obtuvo que la amenaza que más afecta a la vereda la Isla son las inundaciones, dato que se corrobora con la información arrojada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en los eventos de desastres de 2010 - 2017 donde se evalúa los porcentajes de cada amenaza presente.

Figura 5.*Eventos de desastres 2010 - 2017 DNP**Fuente: DNP a partir de la información de UNGRD – TERRIDATA DNP***Figura 6.***Áreas susceptibles a inundaciones 550K**Fuente: Sistema de información Ambiental de Colombia – SIAC*

- **Eventos de antecedentes:** como fuente de información se usó la base de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres NGRD, en la cual se evidencia las características principales de los eventos de inundación producidos por el desbordamiento del río Guamal.

Figura 7.*Eventos antecedentes Inundación*

DESCRIPCION Y UBICACIÓN			
FECHA	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	EVENTO
27/06/2020	META	GUAMAL	CRECIENTE SUBITA
SEGUIMIENTO Y CONTROL A LA EMERGENCIA			
COMENTARIOS			
<p>CDGRD DE META INFORMA MUNICIPIO GUAMAL, VEREDAS LA ISLA, EN EL CASCO URBANO BARRIO LAS VILLAS, FERIAS, CALLES 12 Y 13 DEL BARRIO LOS FUNDADORES EVENTO CRECIENTE SÚBITA 27-06-2020 AFECTACIÓN DESBORDAMIENTO DEL RIO GUAMAL. EVACUADAS AL ALBERGUE 7 ADULTOS Y 4 MENORES DE EDAD HASTA EL MOMENTO ACCIONES ATIENDE CMGRD, BOMBEROS ESTADO ABIERTO - 475 DNBC ACTUALIZA INFORMACIÓN. DEPARTAMENTO DEL META MUNICIPIO GUAMAL, VEREDAS: LA ISLA, BARRIOS: LAS VILLAS, FERIAS, CALLES 12 Y 13, LOS FUNDADORES EVENTO CRECIENTE SÚBITA 27-06-2020 AFECTACIÓN SE REALIZÓ EVACUACIÓN AL ALBERGUE DE 7 ADULTOS Y 4 MENORES, POR CRECIENTE DEL RÍO GUAMAL, BOMBEROS CONTINUARÁN APOYANDO EN LAS LABORES PARA RETIRAR EL LODO. SE CONTINÚA LAVADO DE CASAS Y CALLES AFECTADAS, MAÑANA SE CONTINUARÁ CON LABORES DE REMOCIÓN DE LODO. ATENDIDO LOCALMENTE ACCIONES ATIENDE CMGRD, BOMBEROS GUAMAL- 14 UNIDADES, 3 MÁQUINAS. BOMBEROS ACACIAS- 3 UNIDADES, 1 CAMIÓN CISTERNA ESTADO CERRADO. -477 DNBC ACTUALIZA INFORMACIÓN MUNICIPIO: GUAMAL - META EVENTO: CRECIENTE SÚBITA 27/06/2020 AFECTACIÓN: SEGÚN EL CENSO EN EL CASCO URBANO FUE DE 85 FAMILIAS AFECTADAS Y 6 FAMILIAS DAMNIFICADAS QUE LO PERDIERON TODO. LAS CUALES SE ENCUENTRAN EN LA SEDE DE LA CRUZ ROJA. EL DÍA DE HOY EL CMGRD CONTINUA CON EL CENSO EN LA VEREDA LA ISLA ACCIONES: ATIENDE CMGRD Y BOMBEROS CON EL APOYO DEL CAMIÓN CISTERNA DE BOMBEROS ACACIAS Y 3 UNIDADES ESTADO CERRADO -480</p>			

Fuente: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres NGRD

De acuerdo con la **Figura 7**, al día de hoy se han evidenciado diversos eventos de inundaciones debido al desbordamiento del caño Picuño ocurridos principalmente en la Vereda la Isla. Con esta información, se evidencia los daños producidos a lo largo de los años en la sociedad y sus diferentes componentes como consecuencia de las inundaciones, en especial las afectaciones producidas a las viviendas y la cantidad de damnificados considerables en cada evento.

7.6 Caracterización geomorfológica

A continuación, se presenta la caracterización de las condiciones geomorfológicas y pluviometrías del cauce e hidrología del caño Picuño con base a su evolución. Para esto se efectuó

el desarrollo el estudio hidráulico para determinar el caudal máximo de descarga en el trasvase del río Guamal hasta el caño Picuño.

Figura 8.

Modelos de Elevación Digital DEM



Fuente: *Elaboración propia ArcGIS*

7.6.1 Análisis de precipitaciones

- **Metodología polígonos de Thiessen:** Se encontró que las estaciones de incidencia en el proyecto, fueron las estaciones pluviométricas llamadas: Caño Hondo [35010040] con un 71.30% y Guamal [35010070] con un 28.70, a continuación, en la figura 9 se muestra la localización espacial de la cuenca en referencia con las estaciones meteorológicas, y en la figura 10 el procesamiento de la metodología Polígonos de Thiessen.

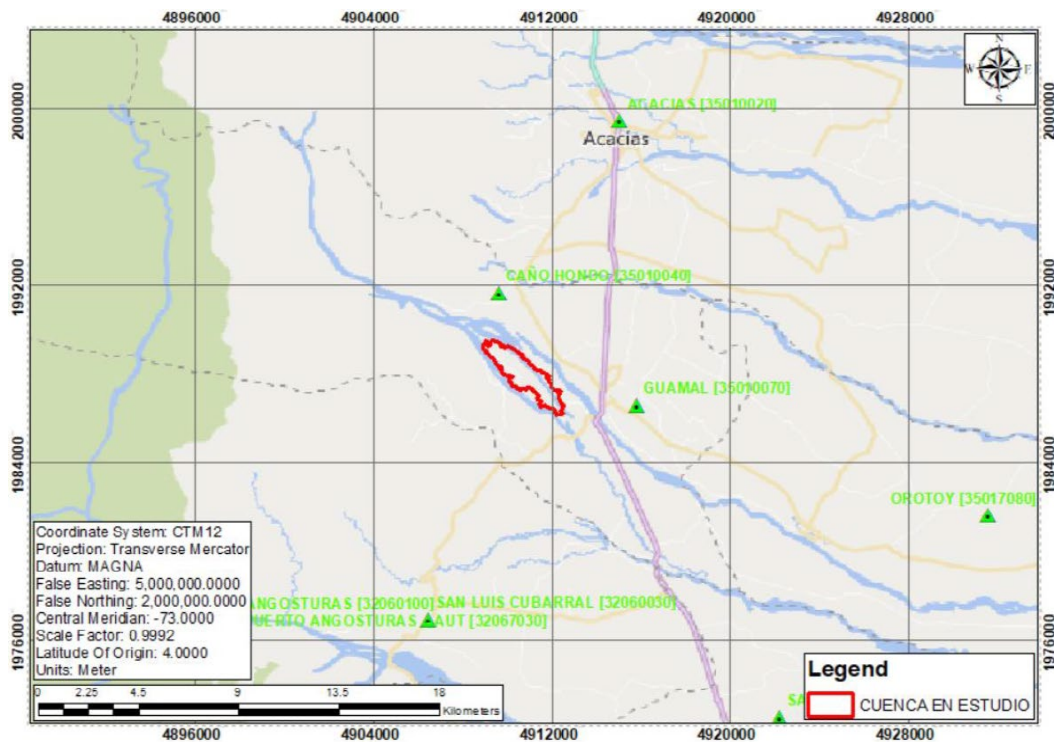
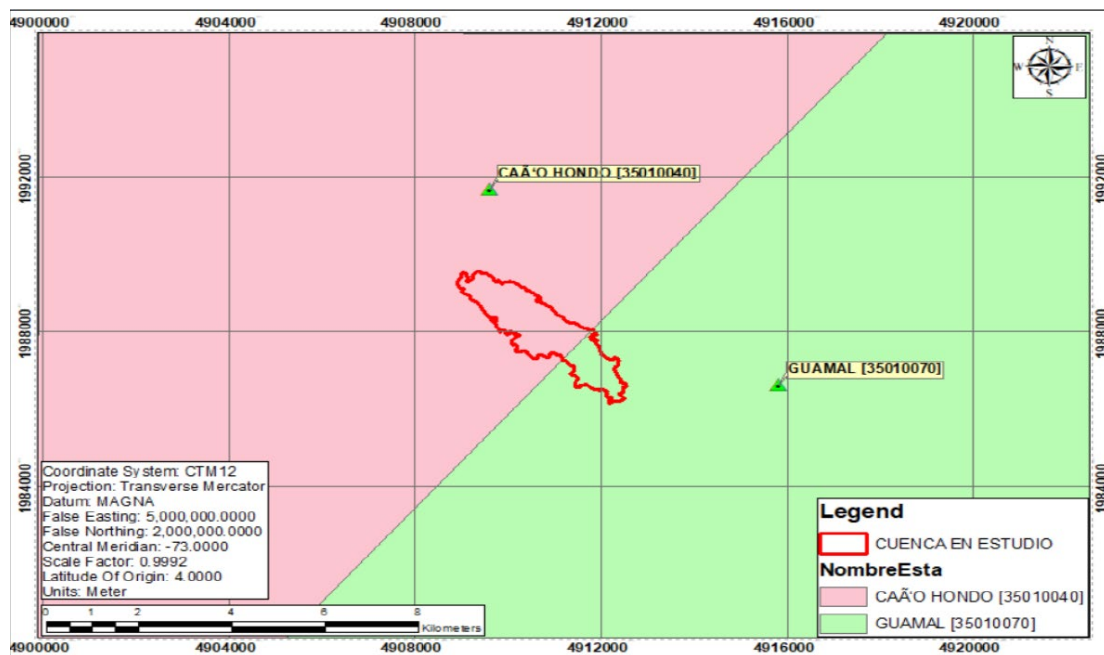
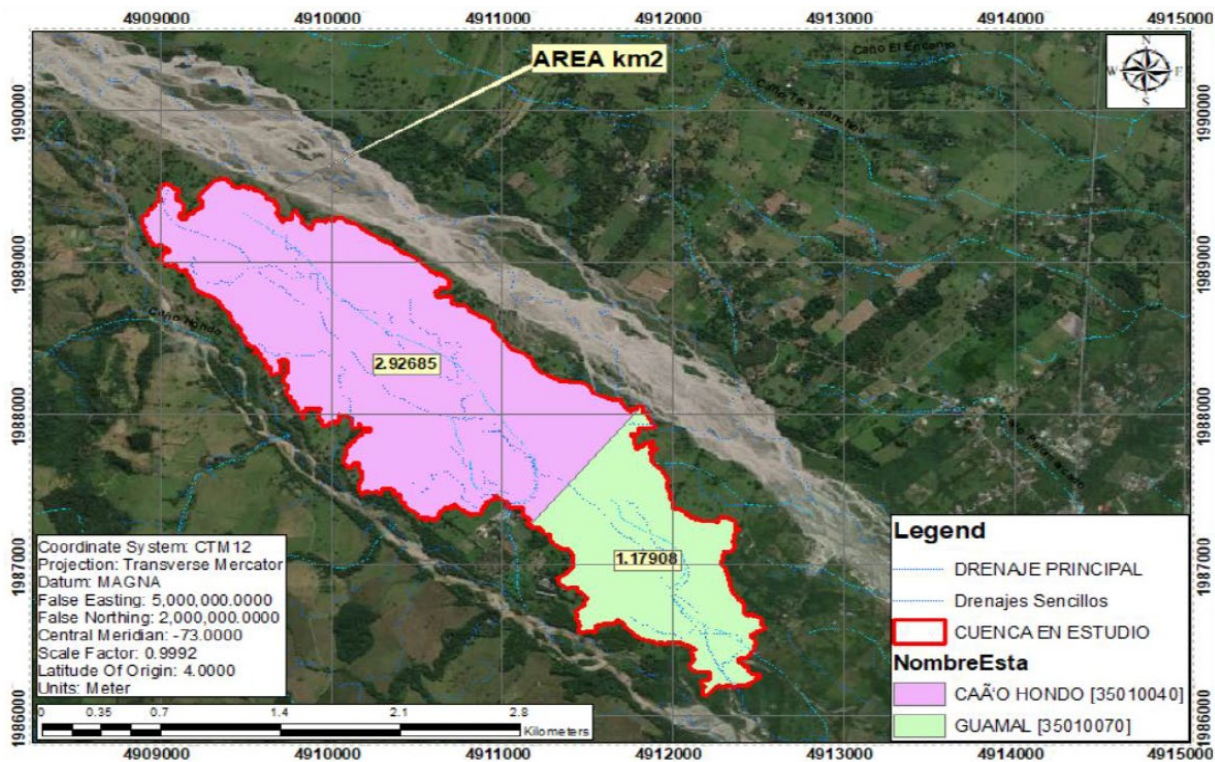
Figura 9.*Localización de la cuenca y estaciones meteorológicas cercanas**Fuente: Elaboración propia***Figura 10.***Polígonos de Thiessen Estaciones cercanas**Fuente: Elaboración propia*

Figura 11.*Área de incidencia estaciones cercanas - imagen satelital**Fuente: Elaboración propia*

7.6.2 Modelo de elevación digital del terreno de la cuenca

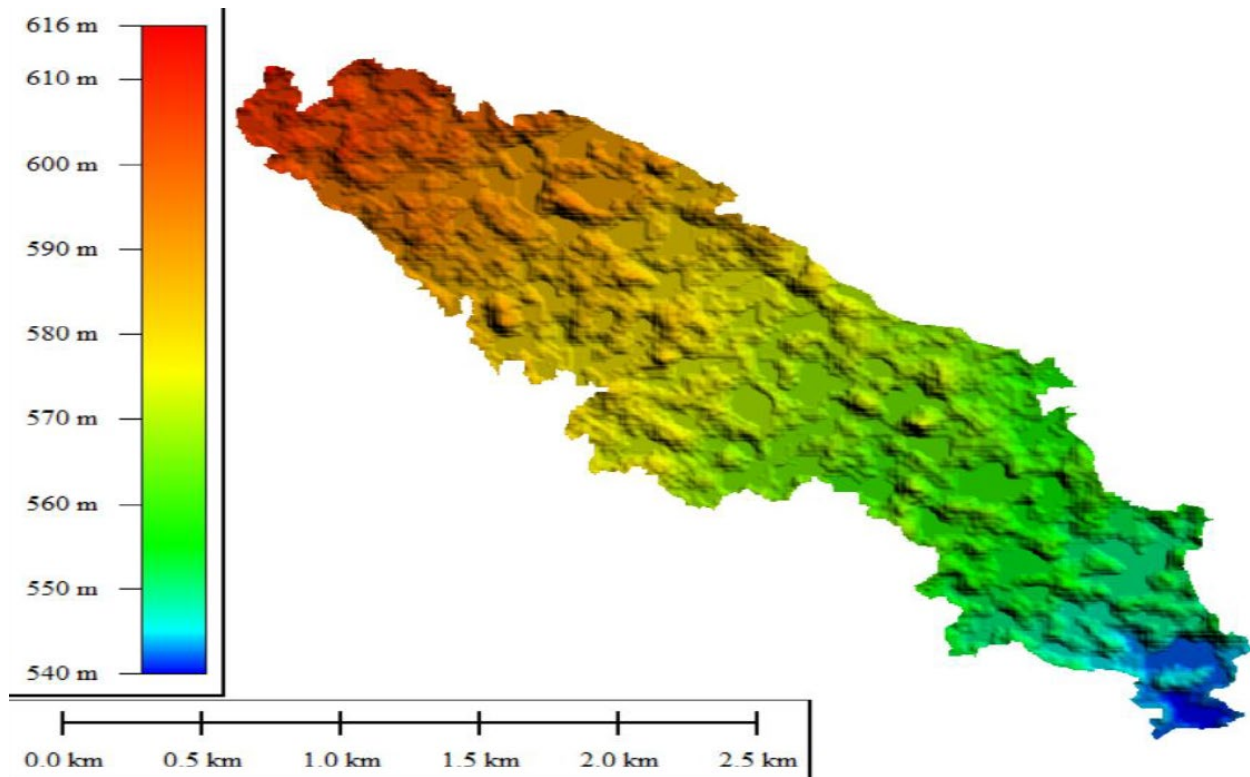
Para la elaboración del estudio hidrológico, se descargó un “DEM” modelo de elevación digital con resolución de 12,5 metros de pixel de la página de EARTHDATA – NASA, del satélite ALOS PALSAR, como también por medio del programa Global Mapper y el satélite Sentinel se realizó la descarga de un “DEM” modelo de elevación digital con resolución de 30 metros de pixel, y con la página de Land Viewer se realizó la descarga “DEM” modelo de elevación digital con resolución de 4 metros de pixel procedente de los satélites Landast-7, Landast-8, Sentinel-2 y Modis.

Se realizó un análisis detallado de los tres insumos, verificando la cantidad de los datos en las superficies; se encontró que el insumo más acertado a la información del terreno en campo, es el “DEM” de 12.5 metros de pixel para la generación de subcuencas y la modelación en el programa

SIG. En la siguiente figura se presenta el modelo de elevación digital con resolución de 12,5 metros de la cuenca del río Guamal.

Figura 12.

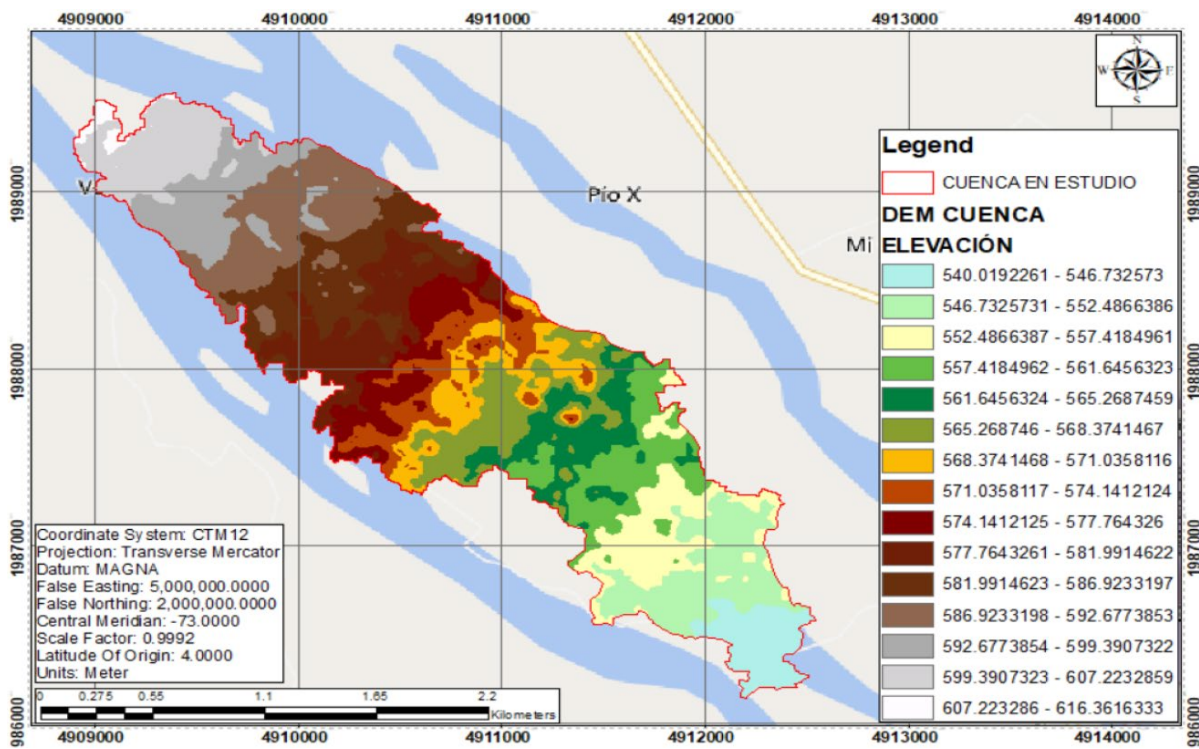
Modelo de Elevación Digital Cuenca Guamal



Fuente: Elaboración propia

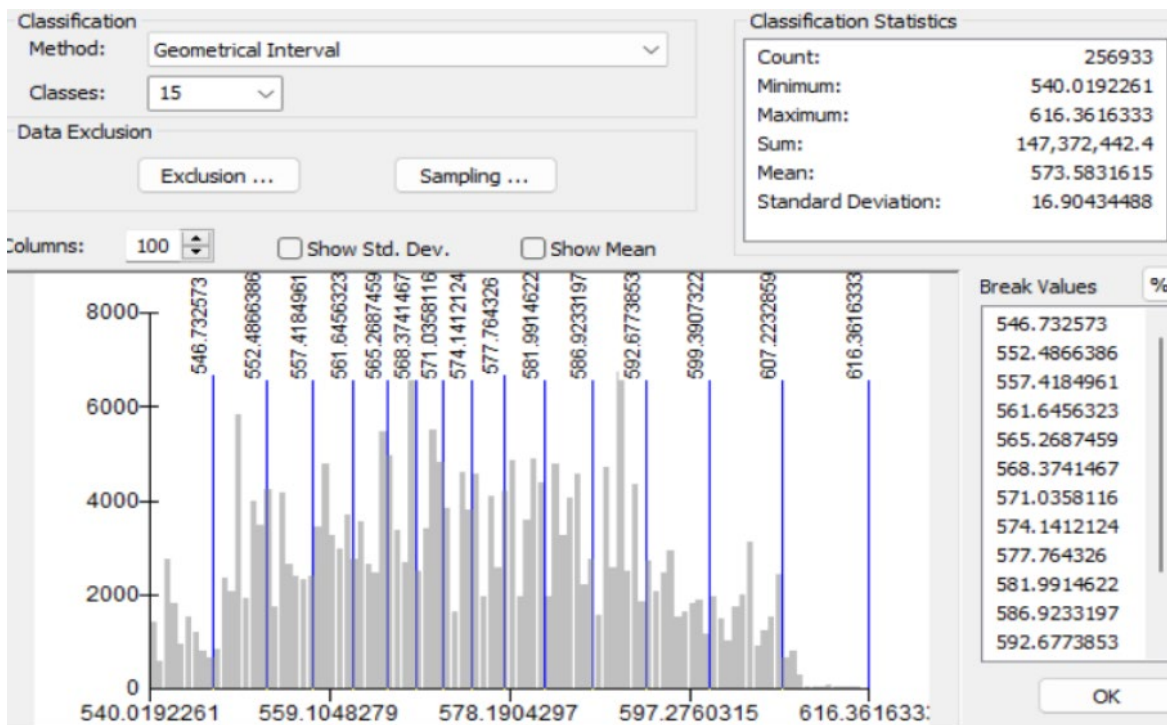
Tras seleccionar el Modelo de Elevación Digital (DEM) desde la plataforma EARTHDATA de la NASA, generado por el satélite ALOS PALSAR con una resolución de 12,5 metros por pixel, se realizó un geoprocésamiento empleando herramientas de SIG, con el objetivo de extraer el DEM correspondiente a la cuenca del río Guamal (ver figura 12).

El procesamiento del Modelo de Elevación Digital fue una actividad fundamental en el análisis topográfico y caracterización del relieve, ya que a través del DEM fue posible obtener información detallada sobre la distribución de altitudes, la pendiente del terreno y otros parámetros geomorfológicos que influyen en la dinámica hidrológica y ambiental.

Figura 13.*DEM reclasificado - Mapa hipsométrico Cuenca Guamal**Fuente: Elaboración propia*

Seguido a esto, a partir del Modelo de Elevación “DEM” de la cuenca, se obtuvo el proceso de reclasificación del “DEM” representado en la Figura 13 como mapa hipsométrico, el cual permitió la agrupación de las elevaciones en intervalos específicos, facilitando la interpretación de la variabilidad altimétrica y la identificación de zonas con características similares ya que muestra las cotas máximas y mínimas. Esta reclasificación fue esencial para el estudio del modelado hidrológico con base en la gestión de los riesgos naturales (inundaciones).

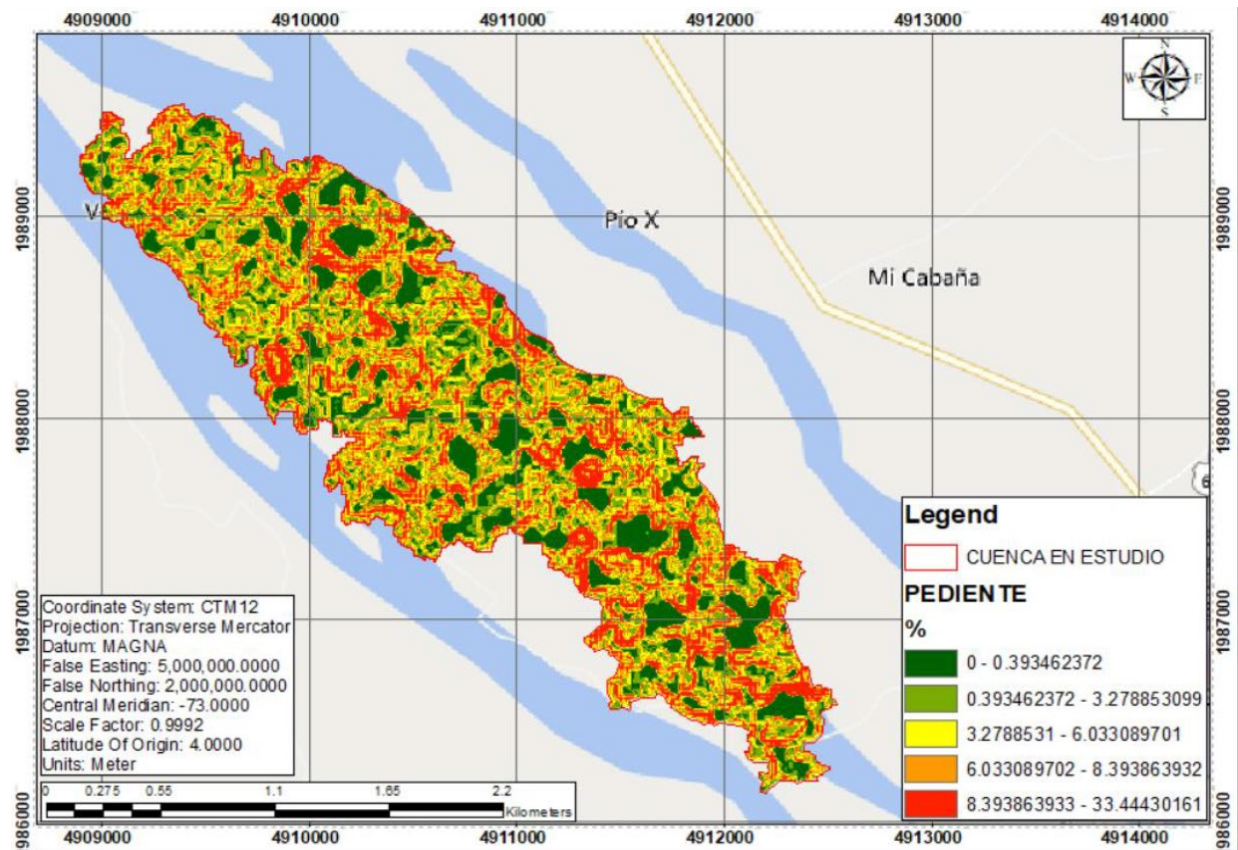
Finalmente, se realizó la generación del histograma de elevación de la cuenca, el cual proporciona una representación gráfica de la distribución altimétrica, que permitió visualizar la frecuencia de cada rango de elevación dentro del área de estudio. Este análisis fue clave para la generación de la red de drenaje de la cuenca, ya que permitió comprender mejor la estructura topográfica y sus implicaciones en los procesos naturales como lo son las inundaciones.

Figura 14.*Histograma de Elevaciones de la Cuenca Guamal**Fuente: Elaboración propia*

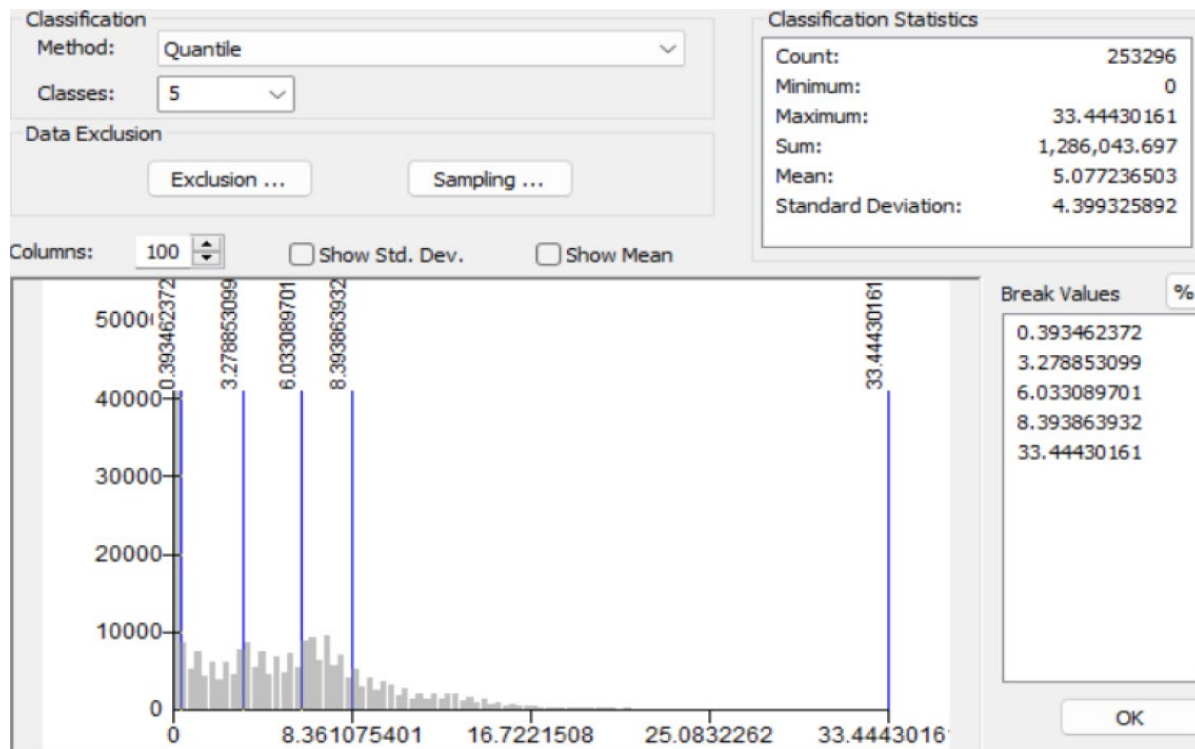
7.6.3 Pendientes de la cuenca

El análisis de la pendiente de una cuenca hidrográfica es fundamental para comprender los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ambientales que ocurren en ella. Por lo tanto, a partir de un Modelo Digital de Elevación “DEM” se realizó el Modelo Digital de Pendientes de la cuenca del río Guamal con el objetivo de observar los cambios en la inclinación del terreno mediante una clasificación simbólica. Este análisis resultó fundamental para comprender la dinámica del escurrimiento superficial, la infiltración del agua y la susceptibilidad a la erosión de la cuenca.

Mediante la clasificación simbólica de las pendientes (ver figura 15) se logró identificar las zonas con diferentes grados de inclinación, lo cual facilitó el análisis de las áreas propensas a proceso erosivos o de rápida escorrentía.

Figura 15.*Pendiente del Terreno Cuenca Guamal**Fuente: Elaboración propia*

A través del Modelo Digital de Pendientes, fue posible generar un histograma de pendientes (Ver figura 16) el cual representa la distribución de las inclinaciones en la cuenca. Este histograma se obtuvo a partir del DEM del cual se derivó la pendiente en cada celda utilizando métodos de diferencias finitas o interpolación espacial, se agruparon las pendientes calculadas en intervalos o clases definidas (0- 3%, 3-6%, 6-8%, 8-33%) y se contabilizó el número de celdas dentro de cada intervalo de pendiente dando como resultado el grafico de barras donde el eje X representa los intervalos de pendiente y el eje Y la cantidad de celdas en cada categoría.

Figura 16.*Histograma de Pendientes Cuenca Guamal**Fuente: Elaboración propia*

Este histograma permitió interpretar la distribución de pendientes en la cuenca del río Guamal, facilitando la identificación de áreas predominantes de baja, media o alta pendiente. Resultando útil para una mejor planificación y toma de decisiones basadas en la caracterización del relieve y su influencia en los procesos naturales.

7.7 Modelación en HEC – HMS

7.7.1 Cálculo de caudales en la cuenca en HEC-HMS

El cálculo de los caudales se llevó a cabo para las corrientes superficiales de la cuenca en estudio. Se efectuó la modelación hidrológica con el fin de capturar las variaciones espacio temporales de la cuenca del río Guamal. Se le realizó un estudio hidrológico que comprende la modelación con el HEC-HMS corriendo para este modelo la siguiente metodología: Método de

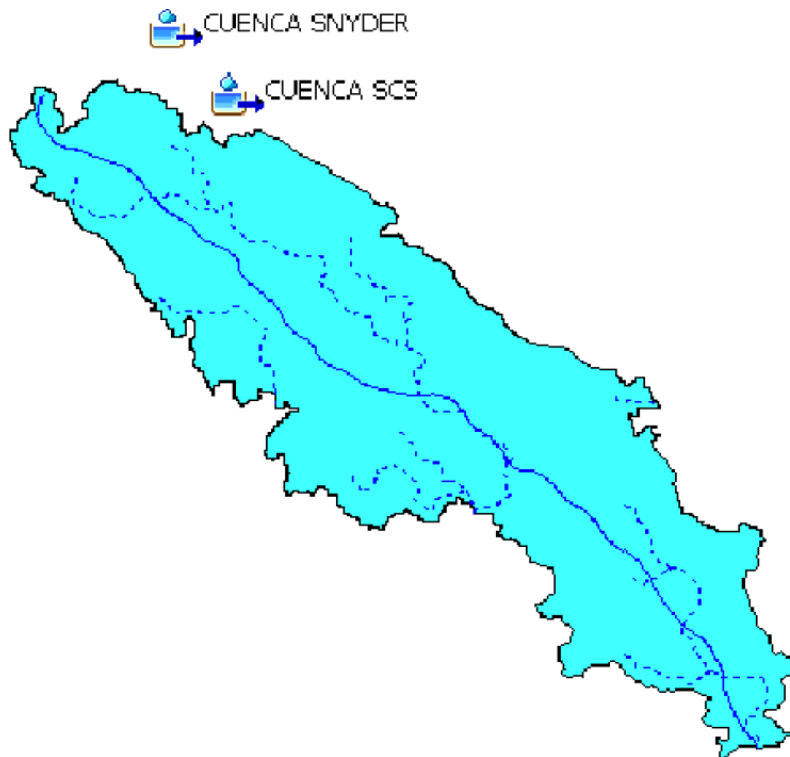
perdidas SCS NUMERO DE CURVA, Método de transformaciones SCS HIDROGRAMA UNITARIO, Método de transformaciones SNYDER HIDROGRAMA UNITARIO, Meteorologic Models Hietograma según Tr años y Precipitation Gages, Hietogramas según Tr año y curvas IDF.

Con base a la metodología ya mencionada, se hizo uso del software HEC-HMS siendo este una herramienta para estimar los caudales en distintos periodos de retorno. Gracias a este modelo, se obtuvo la modelación hidrológica de la cuenca (Figura 17) donde fue posible simular el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Guamal bajo diversas condiciones de precipitación y flujo.

Además, esta información permitió analizar eventos extremos y planificar infraestructuras hidráulicas para mitigar el impacto de las inundaciones. En definitiva, el uso de HEC-HMS facilitó una comprensión detallada de la dinámica hídrica de la cuenca, mejorando la precisión en la estimación de caudales para diferentes intervalos de retorno.

Figura 17.

Modelo hidrológico cuenca del rio Guamal para su modelación el Hec-hms



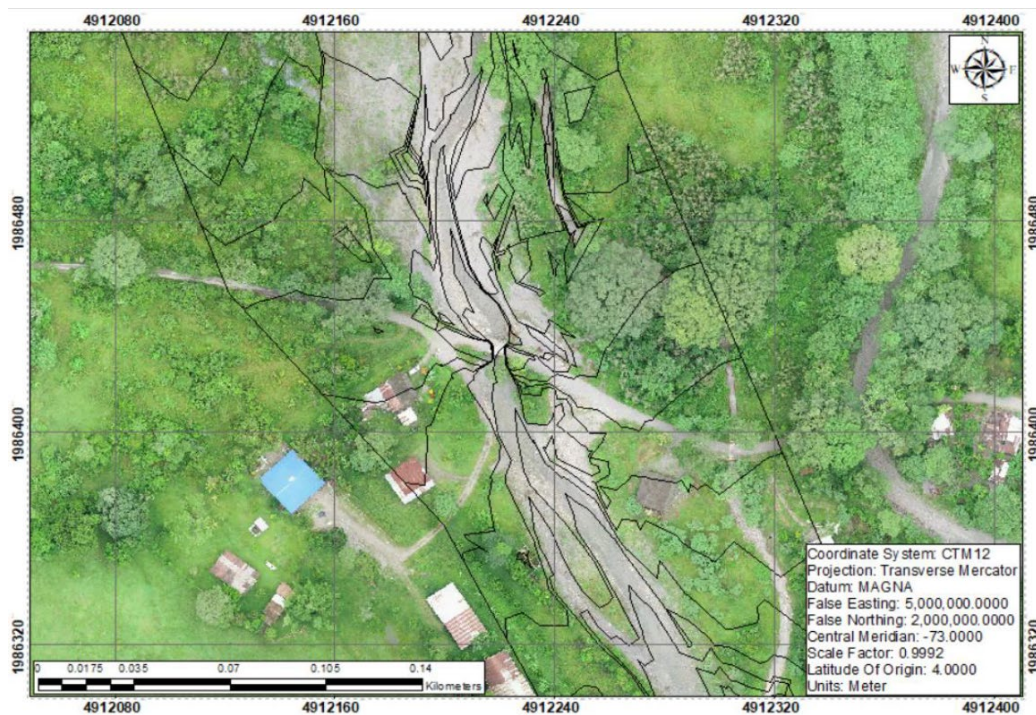
Fuente: Elaboración propia

7.7.2 Evaluación del caudal para la zona de estudio (caño Picuño)

La evaluación del caudal es una herramienta crucial para la gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos, esta evaluación en una zona propensa a inundaciones es un proceso fundamental para comprender el comportamiento hidrológico del área y mitigar los riesgos asociados a eventos extremos. Por lo tanto, en la figura 18 se presenta el área de estudio para donde se requiere la evaluación hidrológica, la cual se realizó mediante dos métodos HIDROGRAMA UNITARIO y SNYDER HIDROGRAMA UNITARIO los cuales arrojan los resultados de caudal obtenidos en HEC-HMS. Este análisis permitió identificar los factores que influyeron en la variabilidad del caudal, como las precipitaciones, el uso del suelo y las condiciones geomorfológicas, proporcionando una base para la modelación y predicción de escenarios de inundación. Además, esta evaluación del caudal fue clave para el diseño de medidas de prevención y control, tales como la construcción de sistemas de drenaje, planificación de áreas seguras y la optimización de estrategias de alerta temprana.

Figura 18.

Área de descarga de caudal punta de la cuenca caño Picuño



Fuente: Elaboración propia

Respecto a lo anteriormente mencionado, para la evaluación de caudal se inició con la aplicación del método SCS (Soil Conservation Service) en el modelamiento hidrológico del HEC-HMS el cual permitió evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento de lluvia extremo con un periodo de retorno de 100 años.

El número de curva (CN) obtenida a partir de la clasificación de suelos y la cobertura vegetal de la cuenca, se utilizó para calcular la lluvia efectiva y el escurrimiento superficial, los cuales se integraron en el modelo hidrológico para obtener el caudal de diseño.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 19 variables hidrológicas SCS-HEC-HMS y figura 20 comportamiento de lluvia-escorrentía, pico máximo del caudal.

Figura 19.

Variables hidrológicas scs- hec hms

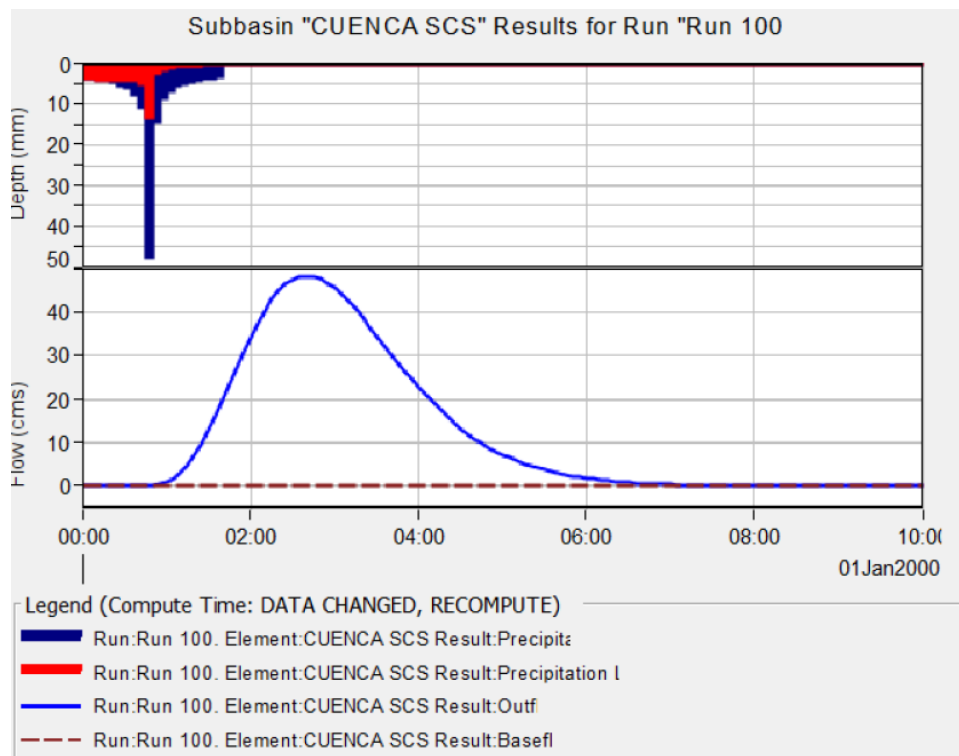
Computed Results			
Peak Discharge:	48,3 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	01ene.2000, 02:40
Precipitation Volume:	157,30 (MM)	Direct Runoff Volume:	98,95 (MM)
Loss Volume:	58,35 (MM)	Baseflow Volume:	0,00 (MM)
Excess Volume:	98,95 (MM)	Discharge Volume:	98,95 (MM)

Fuente: Elaboración propia

- Volumen de caudal máximo de descarga: 48.3 m³/s
- Volumen de la precipitación de 157.30 mm
- Volumen de pérdidas por abstracciones de 58.35 mm
- Volumen de excesos o precipitación efectiva de 98.95 mm

Figura 20.

Comportamiento de lluvia - escorrentía, pico máximo de caudal scs - hec hms



Fuente: Elaboración propia

El gráfico obtenido para la cuenca de estudio muestra los resultados de la corrida “Run para periodo de 100 años” en la parte superior se evidencia el histograma de precipitación, donde se identifica lo siguiente: La gráfica roja representa la infiltración al suelo, que varía entre 2 y 14 mm, indicando la cantidad de agua de lluvia que se filtra de manera natural desde la superficie al subsuelo. Esta medida, expresada en milímetros (mm) corresponde a la profundidad de agua infiltrada durante un evento de precipitación. En la gráfica de color azul se identificó un evento de lluvia acumulada con un pico inicial de aproximadamente 48 mm el cual ocurre en un intervalo concentrado de tiempo.

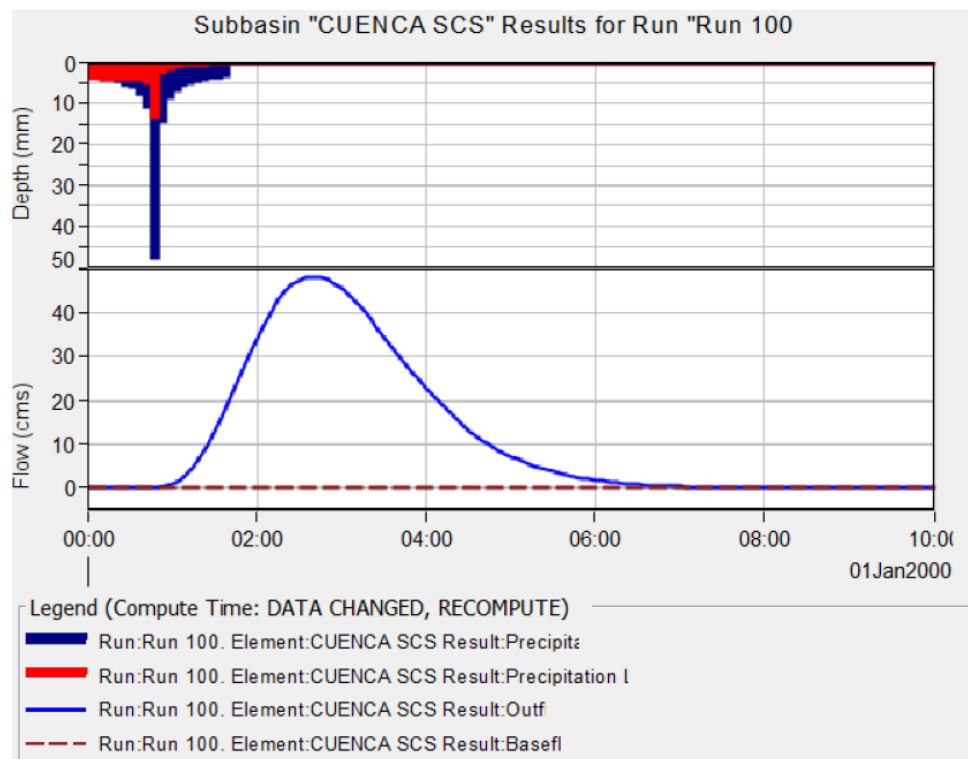
En la parte inferior, el hidrograma refleja la respuesta en escorrentía de la cuenca, destacándose un caudal pico cercano a 48.30 m³/s. Este pico ocurre poco después del evento de precipitación, lo que evidencia el tiempo de concentración de la cuenca. Además, el gráfico incluye una línea discontinua roja que representa el flujo base constante, importante para diferenciar la escorrentía generada de las condiciones iniciales.

Seguido a esto, para continuar con la evaluación de caudal se procedió a llevar a cabo el método SNYDER HIDROGRAMA UNITARIO (ver figura 21) donde muestra los resultados obtenidos de la corrida "Run para periodo de 100 años" en la parte superior se muestra el hietograma de precipitación, donde se identifica lo siguiente: la gráfica roja interpreta la filtración al suelo que es 2 y 14 mm, la gráfica de color azul se identifica un evento de lluvia acumulada con un pico inicial de 48 mm el cual ocurre en un intervalo concentrado de tiempo.

En la parte inferior, el hidrograma refleja la respuesta en escorrentía de la cuenca, destacándose un caudal pico cercano de $45,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Este pico ocurre poco después del evento de precipitación, lo que evidencia el tiempo de concentración de la cuenca. Además, el grafico incluye una línea discontinua roja que representa el flujo base constante, importante para diferenciar la escorrentía generada de las condiciones iniciales.

Figura 21.

Comportamiento de lluvia - escorrentía, pico máximo de caudal scs - hec hms



Fuente: Elaboración propia

- Volumen de caudal máximo de descarga: 45.9 m³/s
- Volumen de la precipitación de 157.30 mm
- Volumen de pérdidas por abstracciones de 58.35 mm
- Volumen de excesos o precipitación efectiva de 98.95 mm

Tras realizar el modelamiento antes mencionado utilizando los hidrogramas unitarios SCS y SNYDER en el software HEC-HMS, se llevó a cabo un análisis comparativo del dato más representativo (caudal). En la tabla 4 se presenta de forma organizada los resultados.

Tabla 4.

Comparativa de Caudales obtenidos en HEC HMS – SNYDER – SCS.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
CUENCA SNYDER	4,1	45,9	1 January 2000, 02:...	98,95
CUENCA SCS	4,1	48,3	1 January 2000, 02:...	98,95

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4 se evidencian una serie de datos los cuales se interpretan de la siguiente manera, la columna 1 Hydrologic Element es la metodología empleada, la columna 2 Drainage Área (Km²) es el área de la cuenca, la columna 3 Peak Discharge (M³/s) representa el caudal calculado en la modelación, la columna 4 Time of Peak contiene los datos de hietograma y por último la figura 5 muestra la precipitación registrada.

A continuación, se presenta la tabla 5 donde se refleja los caudales para los distintos periodos de retorno, obtenida a partir de la modelación hidrológica realizada en el programa HEC-HMS 4.6.

Tabla 5.

Caudales para los diferentes Periodos de Retorno

HIDROGRAMA UNITARIO	CAUDAL (M3/S)						
	TR 2.33 AÑOS	TR 5 AÑOS	TR 10 AÑOS	TR 25 AÑOS	TR 50 AÑOS	TR 100 AÑOS	TR 200 AÑOS
SNYDER	14,9	19,3	23,9	31,3	38,0	45,9	55,0
SCS	15,7	20,3	25,1	32,9	40,0	48,3	58,0

Fuente: Elaboración propia

Aunque la variación de los resultados de caudal por la metodología de SNYDER y SCS es muy pequeña, se aplicaron métodos estadísticos básicos para la selección del valor final, con el fin de disminuir la incertidumbre en a la confiabilidad de los resultados a tomar.

Tabla 6.

Métodos estadísticos Básicos para Obtención de Valor Final de Caudal

"TR"	"CAUDAL" PROMEDIO	"CAUDAL" MAX	"CAUDAL" MIN	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VARIANZA	COEF. DE VARIACIÓN
AÑOS	min	min	min	...	...	...	...
2	15,30	15,70	14,90	15,30	0,57	0,32	0,04
5	19,80	20,30	19,30	19,80	0,71	0,50	0,04
10	24,50	25,10	23,90	24,50	0,85	0,72	0,03
25	32,10	32,90	31,30	32,10	1,13	1,28	0,04
50	39,00	40,00	38,00	39,00	1,41	2,00	0,04
100	47,10	48,30	45,90	47,10	1,70	2,88	0,04
200	56,50	58,00	55,00	56,50	2,12	4,50	0,04

"TR"	ALFA SIGNIFICANCIA	CANTIDAD DE DATOS	INTERVALO DE CONFIANZA	LIMITE SUPERIOR	LIMITE INFERIOR	"CAUDAL" PROMEDIO FINAL
AÑOS	...	...	min	min	min	min
2	0,05	2,00	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	15,30
5	0,05	2,00	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	19,80
10	0,05	2,00	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	24,50
25	0,05	2,00	3,92	36,82	27,38	32,10
50	0,05	2,00	3,92	43,92	34,08	39,00
100	0,05	2,00	3,92	52,22	41,98	47,10
200	0,05	2,00	2,77	60,77	52,23	56,50

Fuente: Elaboración propia

7.7.3 Valor final del caudal para el área de estudio (caño Picuño)

Se aplicaron métodos estadísticos los cuales están relacionados en la tabla 6. Métodos estadísticos Básicos para Obtención de Valor Final de Caudal, determinándose que el promedio entre ambos sería el valor representativo utilizado. Sin embargo, debido a que se trata de un trasvase, en el que existe un flujo externo (caudal puente hormiga) que ingresa a la cuenca de estudio (caudal puente Guamal), fue necesario considerar un incremento del 5% correspondiente al caudal del puente hormiga.

Tabla 7.*Valor final del caudal para caño Picuño*

CUENCA PUENTE HORMIGA		CUENCA TRASVASE RIO GUAMAL	
TR AÑOS	CAUDAL PUENTE HORMIGA m3/s	CAUDAL PUENTE GUAMAL m3/s	CAUDAL PUENTE GUAMAL + 5% CAUDAL PUENTE HORMIGA (m3/s)
2.33	273,5	15,3	29,0
5	413	19,8	40,5
10	542,8	24,5	51,6
25	726	32,1	68,4
50	876,5	39	82,8
100	1038,5	47,1	99,0
200	1212,4	56,5	117,1

Fuente: Elaboración propia

7.8 Estudio y modelación hidráulica

El estudio y modelación hidráulica son herramientas esenciales para comprender el comportamiento del flujo en sistemas naturales y artificiales, permitiendo evaluar su eficiencia y optimizar su diseño.

7.8.1 Implementación del modelo hidráulico

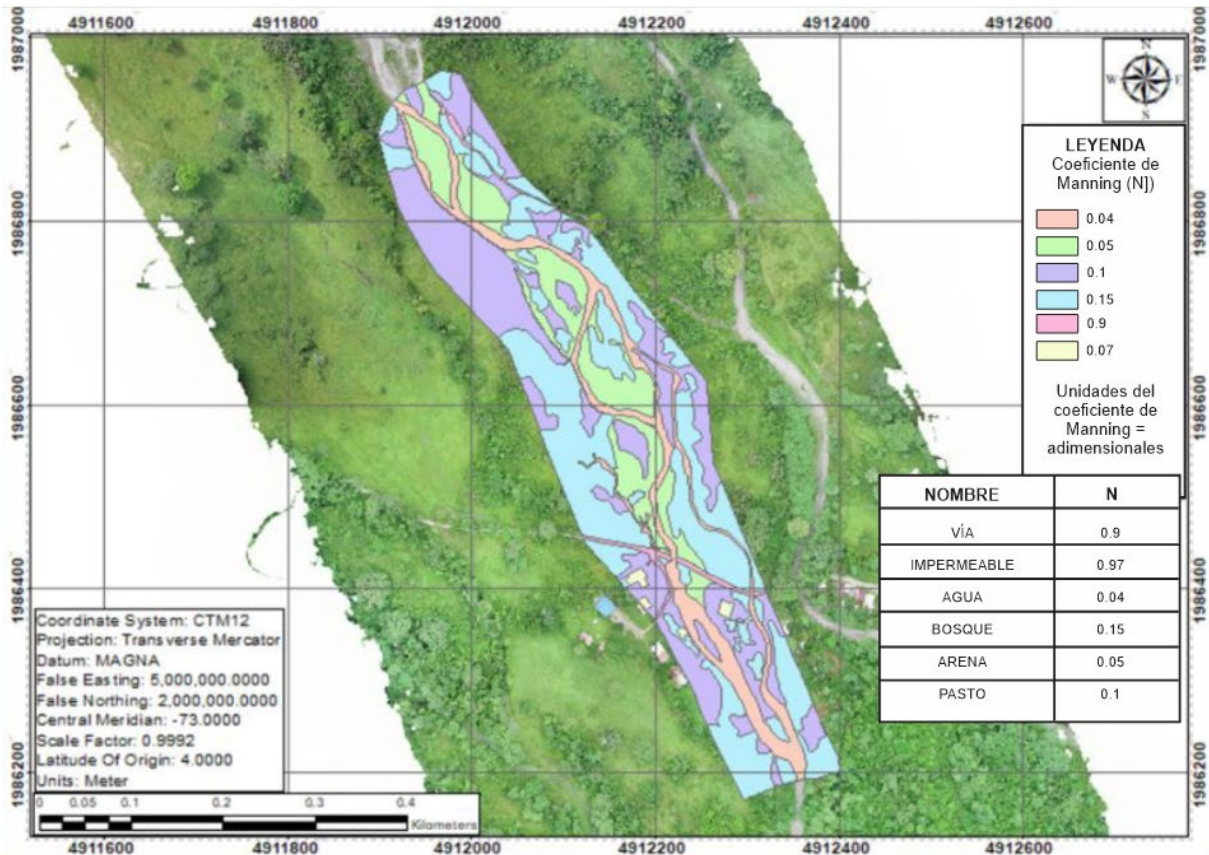
Con base en las condiciones geométricas del terreno y las propiedades físicas que se desean analizar con la influencia de la pendiente de un canal, se consideraron los valores de coeficiente de Manning, esto en referencia a la topografía general del terreno; la cual se caracteriza por pendientes moderadamente bajas. En este contexto, la implementación de un modelo hidráulico basado en el coeficiente del Manning se convierte en una metodología fundamental para analizar el flujo de canales y cauces con pendientes bajas, donde la fricción y la resistencia del lecho juegan un papel determinante en la conducción.

Una vez definido el modelo geométrico de los cauces y las estructuras hidráulicas que lo intervengan y asignados los coeficientes de Manning (las unidades del coeficiente de Manning son adimensionales, este valor representa las condiciones de rugosidad, cuando el valor tiende a 0 es no rugoso y cuando tiende a 1 es muy rugoso, lo cual refleja las condiciones de rugosidad de la cuenca de estudio afectando la resistencia del flujo) tanto para el canal principal como para las

bancas, y habiendo suministrado datos de caudal estableciendo las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo del tramo, se puede evidenciar en la figura 22 la cual contiene la modelación hidráulica realizada en el Modelo y programa de cálculo HEC-RAS.

Figura 22.

Modelación hidráulica



Fuente: *Hidráulica de canales abiertos V.T. Chow*

7.8.2 Calibración del modelo hidráulico

El proceso de calibración del modelo hidráulico consistió en estimar el valor de coeficiente de rugosidad de Manning, para esto se obtuvo primero la pendiente promedio del cauce en el tramo de estudio y se corrió el modelo en régimen mixto del cauce en el tramo en estudio, se desarrollaron 90 (noventa) secciones transversales para la elaboración de este modelo en el software HEC RAS, las distancias entre las secciones son constantes con intervalos de 10 (diez) metros, teniendo en

cuenta que en el levantamiento topográfico de cada sección se presentan cambios o alteraciones en sus dimensiones geométricas del terreno.

Los caudales de diseño extraídos del estudio hidrológico que se modelaron para los diferentes periodos de retorno, en especial para un periodo de 100 años se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Información requerida para alimentar el modelo

Tr Años	Caudales m³/s
2.33	29.0
5	40.5
10	51.6
25	68.4
50	82.8
100	99.0
200	117.1

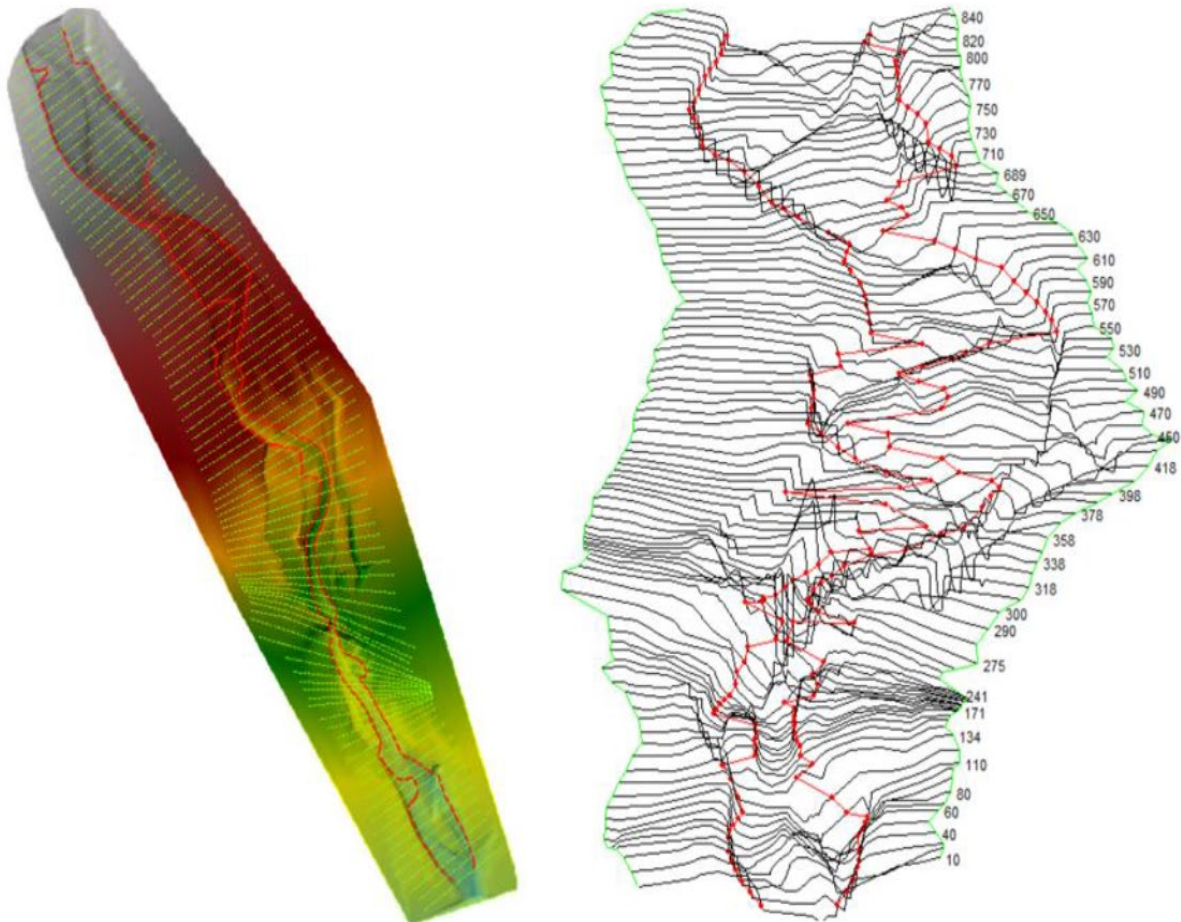
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, para realizar la modelación hidráulica, se implementó el software HEC-RAS, el cual requirió la creación de un Modelo Digital de Elevación DEM del cauce del río Guamal en la zona de interés expuesto en la figura 23 (lado izquierdo). El DEM se generó mediante un proceso de geoprocésamiento de la topo-batimetría del proyecto, para así obtener la representación precisa de la superficie del terreno en el área de influencia.

El software HEC-RAS se implementaron secciones transversales al eje del río, las cuales se visualizan en la figura 23 (lado derecho) como representación tridimensional. Una vez introducido el caudal obtenido, el software simula la laminación de agua y la velocidad del caudal en el DEM proporcionando datos y shape para la evaluación y diseño de la infraestructura hidráulica.

Figura 23.

Esquema de planta modelo hidráulico, caño Picuño, fuente Hec Ras 6.5



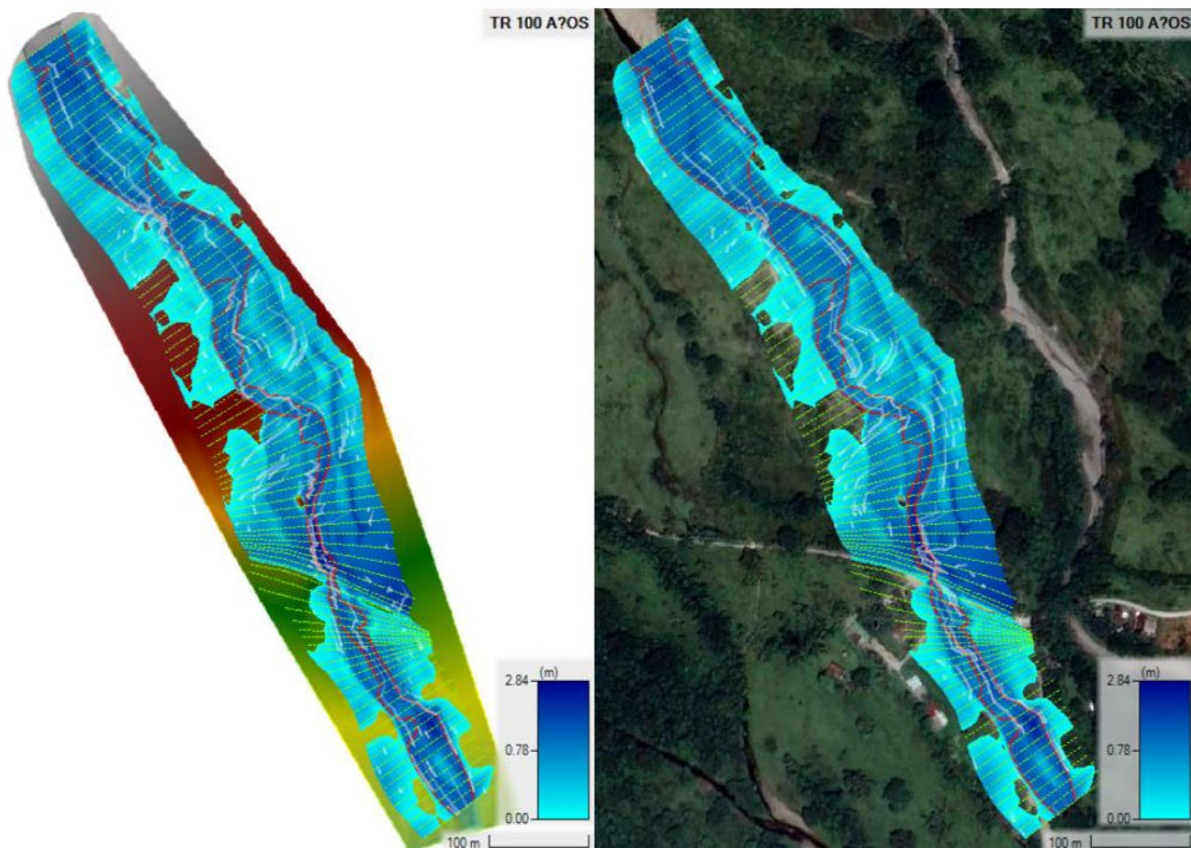
Fuente: Elaboración propia

La figura 24 presenta los resultados del modelamiento hidráulico de un evento de inundación con periodo de retorno de 100 años, obtenidos a través del software HEC-RAS 6.5. en la figura 24 al lado izquierdo, se observa una capa de Shape que utiliza un gradiente de colores para mostrar las alturas de la lámina de agua, desde azul claro (menor altura) hasta azul oscuro (mayor altura).

A la derecha, se muestra una vista aérea con datos sobrepuestos en una imagen satelital, de las alturas de la lámina de agua, empleando la misma escala de colores. Este análisis se realizó para evaluar el comportamiento de flujo y determinar las posibles áreas afectadas por inundaciones en la zona de estudio.

Figura 24.

Altura de Lámina de agua 100 años trasvase caño Picuño, Fuente Hec Ras 6.5



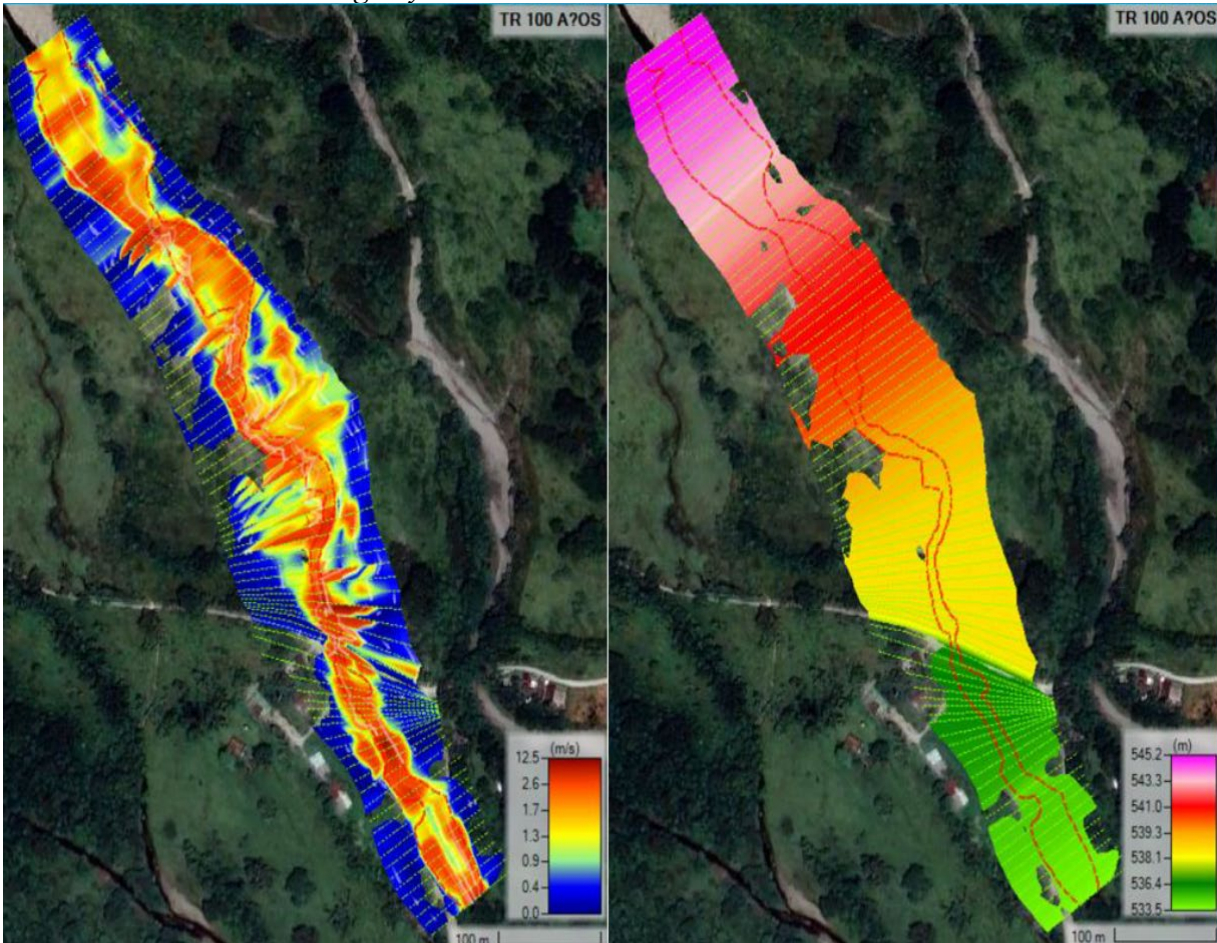
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 25 se presenta el análisis hidráulico correspondiente a un evento de inundación con un periodo de retorno de 100 años (TR 100 años). En la figura 25 lado izquierdo, se representa la variación de velocidad del agua, utilizando un gradiente de color que va desde el azul (velocidades bajas, entre 0 y 0.4 m/s) hasta el rojo (velocidades altas alcanzando 12.5 m/s).

En esta misma figura al lado derecho, se observan las cotas de inundación representadas con un gradiente de color que abarca desde el verde (cotas bajas 533.5m) hasta el rosa (cotas altas 542.2m), ambas visualizaciones están superpuestas en una imagen satelital que contextualiza las zonas de interés. Estos resultados son cruciales para determinar el área de riesgo, optimizar diseños de mitigación y analizar el comportamiento hidráulico de la zona en estudio.

Figura 25.

Variación de velocidad del agua y cotas de inundación - TR 100 años



Fuente: Elaboración propia

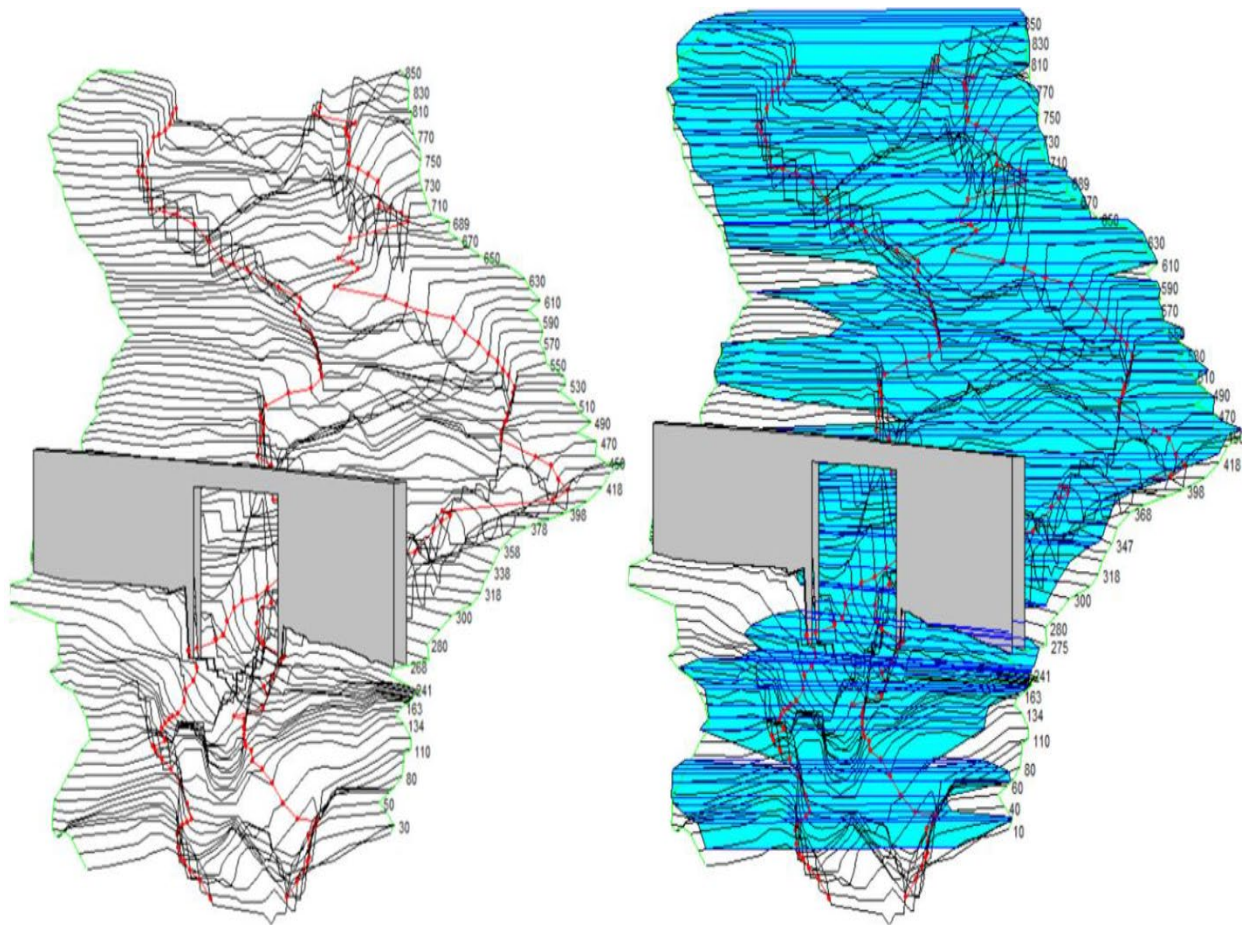
7.8.3 Evaluación hidráulica puente Hormiga río Guamal

A partir de la implementación del modelo de análisis hidráulico, la información topográfica, caudales estimados y demás características del sitio en estudio, se procedió a la evaluación de parámetros hidráulicos. De acuerdo a lo anterior, en la figura 26 se presenta un esquema tridimensional del modelo digital de superficie, en el cual se incorporó la estructura proyectada del puente dentro de la zona de influencia.

Este modelo permitió visualizar de manera precisa las características topográficas del terreno junto con la integración de la infraestructura propuesta.

Figura 26.

Esquema modelo hidráulico trasvase caño Picuño, fuente hec ras 6.5



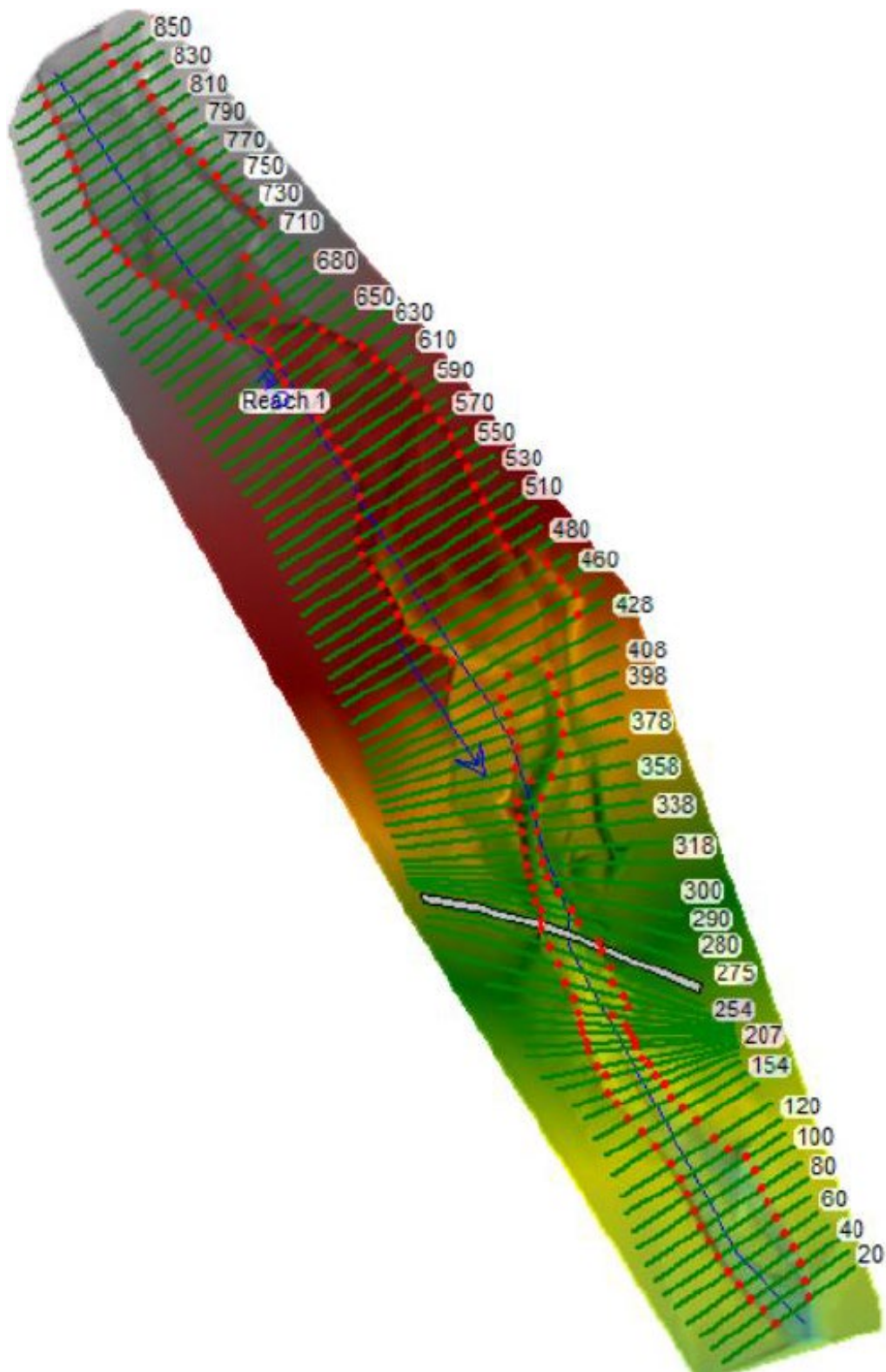
Fuente: Elaboración propia

7.8.4 Evaluación de parámetros hidráulicos

En la figura 27 se presentan las secciones transversales del eje del río obtenidas mediante el software HEC-RAS 6.5, mostrando en planta la estructura del puente proyectada e implementada. Este esquema permitió analizar los parámetros hidráulicos asociados a la interacción del flujo con el puente, como la distribución de velocidades, niveles de agua y posibles impactos en las zonas aledañas.

Figura 27.

Esquema en planta modelo hidráulico puente hormiga, fuente Hec Ras 6.5



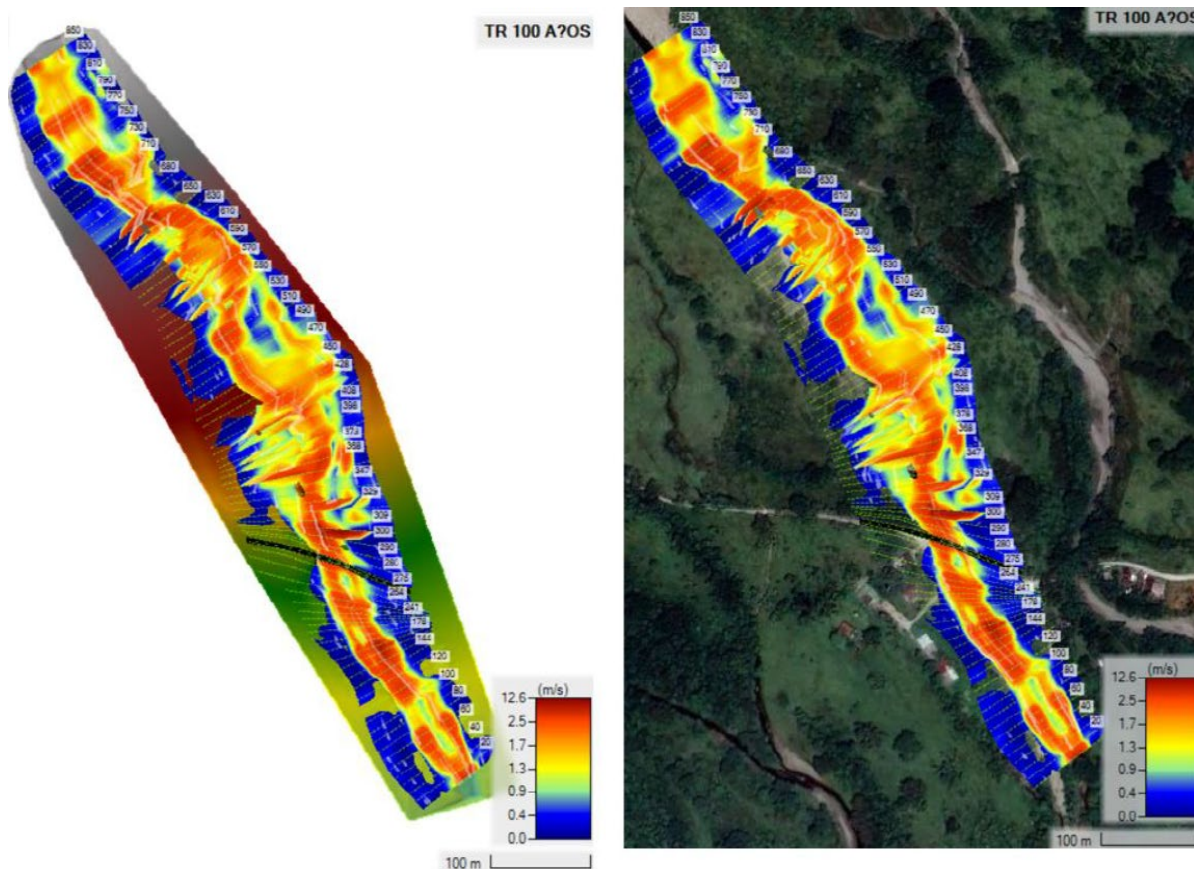
Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas las secciones transversales, se relacionaron los perfiles de flujo y los parámetros hidráulicos evaluados mediante el modelo hidráulico para las secciones de incidencia directa del puente, considerando el caudal diseño el que se determinó para un periodo de retorno de 100 años, el cual es de 99 m³/s, como resultado se obtuvieron los mapas de la altura de lámina de agua y cotas de inundación de lámina de agua de TR 100 año.

Por lo tanto, en la figura 26 y 27 se presentan los resultados de una simulación que estima la altura máxima del agua y cotas de inundación que podrían alcanzarse en distintas zonas del área afectada por el trasvase del río Guamal, basándose en un escenario de inundación que ocurre una vez cada 100 años. Esto ayudó a identificar las áreas más vulnerables y así apoyar la toma de decisiones sobre medidas de protección o mitigación de riesgos.

Figura 28.

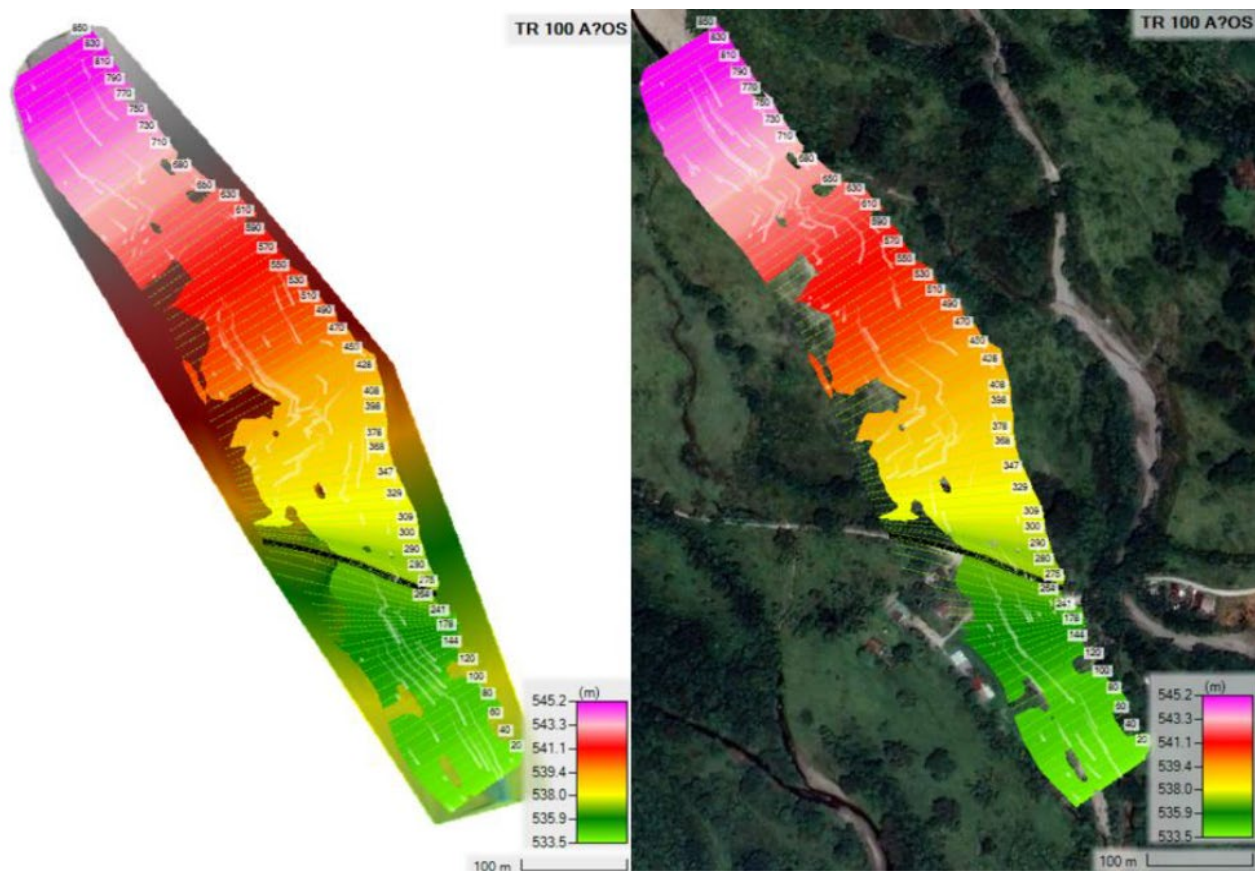
Altura de Lámina de Agua TR 100 Años, Trasvase Rio Guamal, Fuente HEC RAS 6.5



Fuente: Elaboración propia

Figura 29.

Cotas de Inundación de Lámina de Agua Tr 100 Años, Fuente Hec Ras 6.5

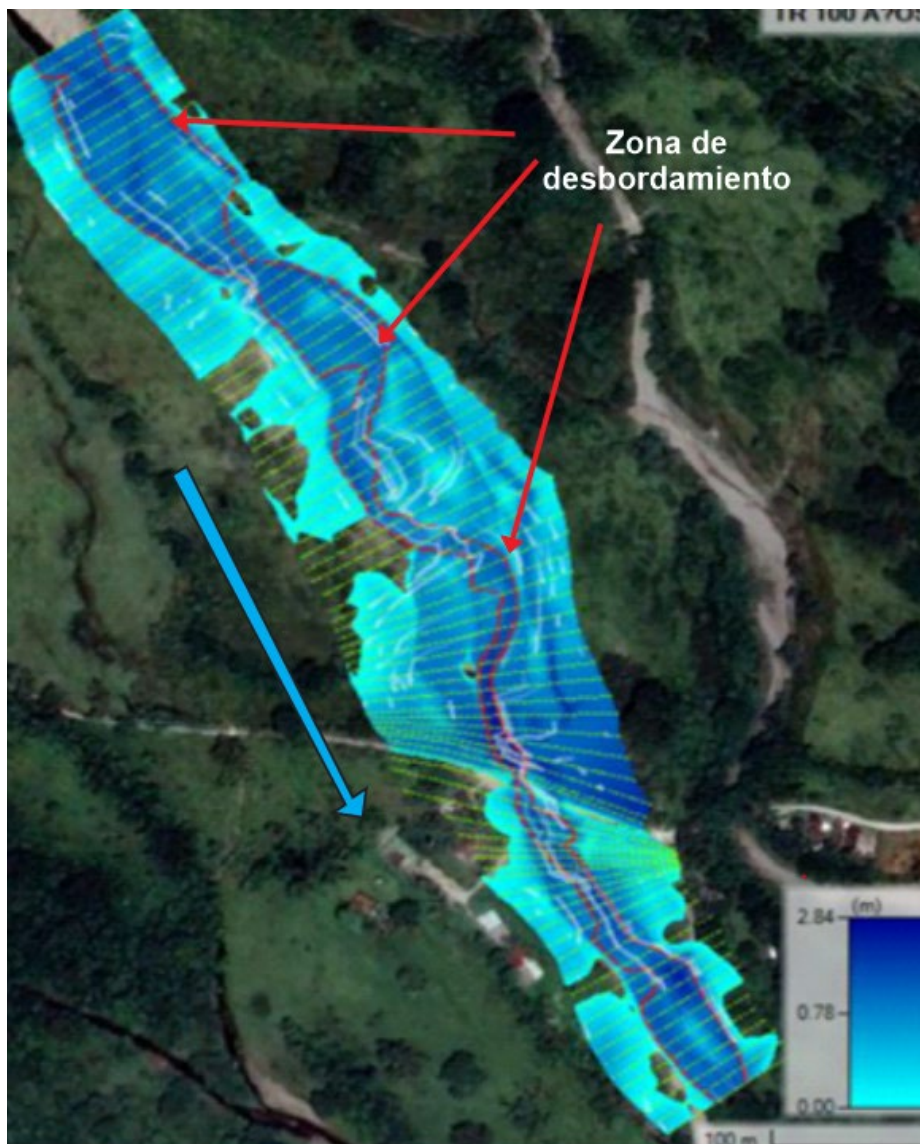


Fuente: Elaboración propia

7.8.5 Control de inundaciones

A partir del estudio y modelación hidráulica del cauce caño Picuño, se obtuvo la calibración del modelo hidráulico, permitiendo determinar la altura máxima y las cotas de inundación para un periodo de retorno de 100 años lo que se traduce a un caudal de 99.0 m³/s (ver figura 24).

De igual manera, en la figura 25 se observa que la altura máxima alcanzada es de 2.84 metros y con una variación de velocidad de 12.5 m/s, también se evidenciaron las cotas de inundación las cuales se presentan desde 533.5 m la más bajas y 542.2 m la más alta. Estos resultados fueron determinantes para identificar al área de mayores riesgos a eventos de inundación.

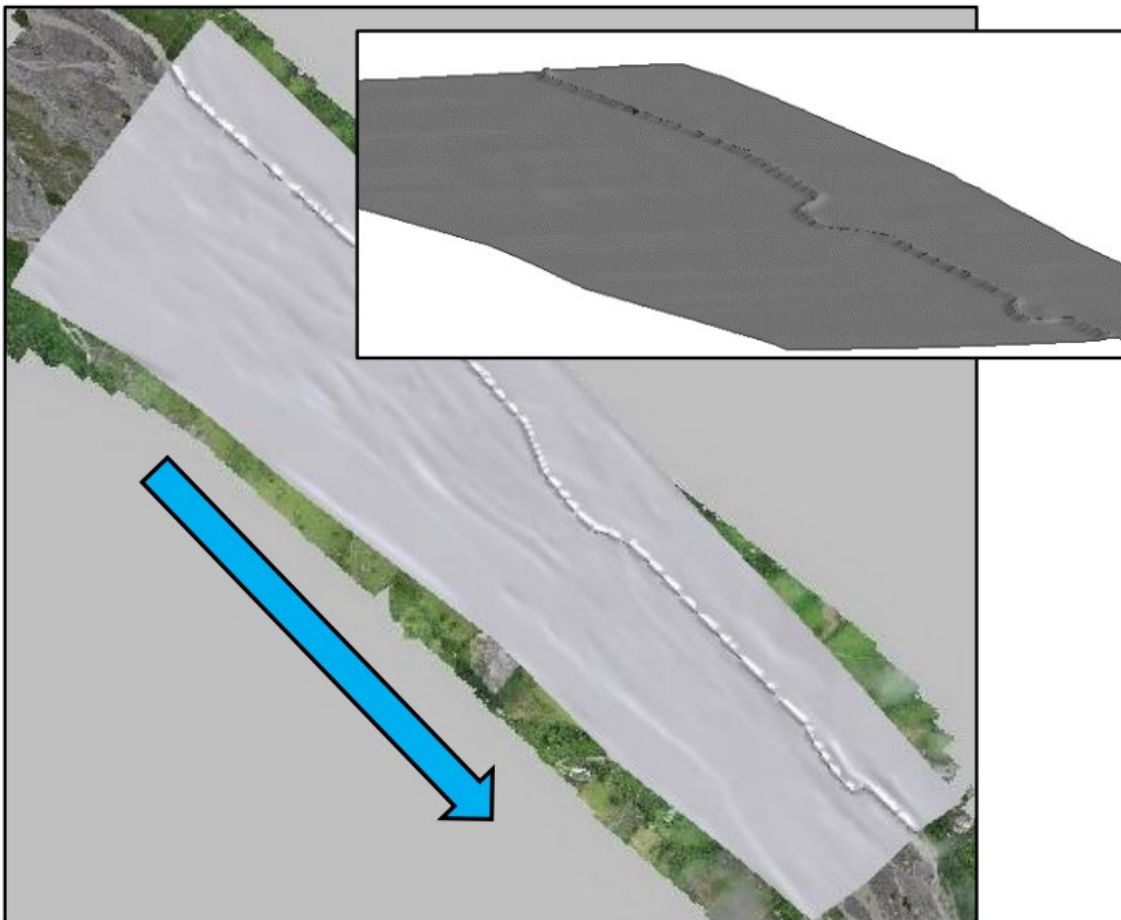
Figura 30.*Zona de desbordamiento**Fuente: Elaboración propia*

Por lo tanto, en la figura 30 se logró evidenciar que en eventos de alta recurrencia al lado derecho del cauce se presenta una zona de desbordamiento significativa, lo que genera un riesgo para la comunidad e infraestructura existente. Considerando estrategias que permiten controlar el aumento de los caudales y niveles de los cauces, se presenta como alternativa de solución la construcción de una estructura hidráulica, para reducir o evitar inundaciones por medio de la protección de las orillas del cauce (Escuder et, 2010). En referencia a esto, se procede con la descripción de la estructura hidráulica.

- **Dique longitudinal:** La construcción de un dique longitudinal es una medida de infraestructura hidráulica diseñada para mitigar los efectos de las inundaciones en áreas vulnerables a desbordamientos fluviales. Se encuentran contruidos de manera paralela al cauce, en forma de estructura lineal con la zona a proteger, de tal forma que puedan soportar las fuerzas y velocidades desarrolladas por el agua. Pueden ser contruidas en diferentes materiales, dependiendo de las características del cauce analizado; usualmente suelen ser contruidas en concreto, gaviones, geo – sintéticos rellenos y demás (Nava & Cortes, 2009). Siendo esta la estructura hidráulica la alternativa de construcción, en la figura 31 se definió el alineamiento del eje central de la obra con una longitud de 300 m con base en las manchas de inundación obtenidas.

Figura 31.

Inclusión dique longitudinal en modelo hidráulico.

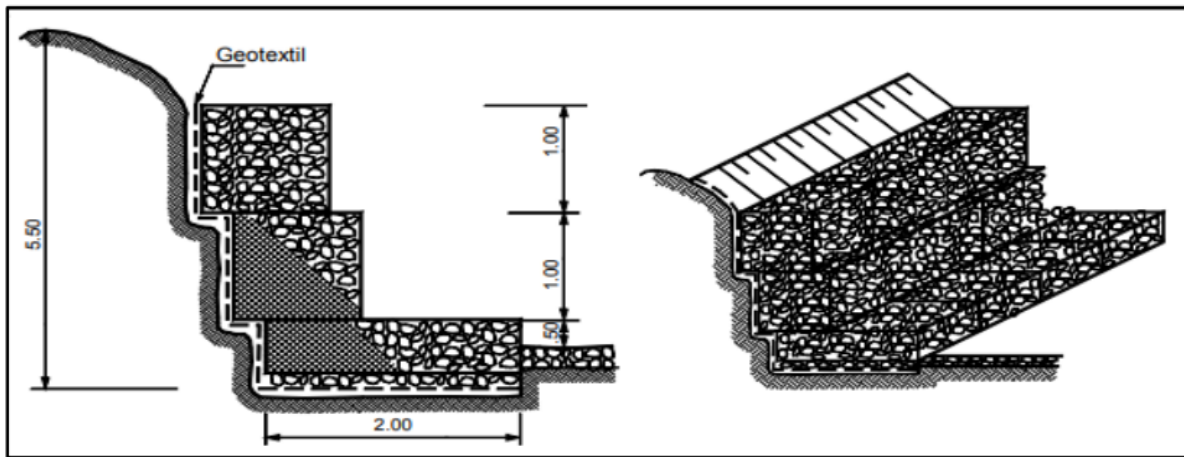


Fuente: Herramientas SIG (ArcGIS) apoyo del programa HEC – RAS 6.5

Para la construcción del dique longitudinal, se optó por la alternativa de gaviones como se muestra en la figura 32, los cuales son elementos de malla metálica tejida a doble torsión, producida con alambre metálico, estos son rellenos con cantos rodados o piedras de cantera (Fracassi, 2019). La definición de la altura general del dique se realizó con base en las profundidades evidenciadas sobre la margen derecha del cauce, por lo tanto, se definieron 3 hileras principales de gaviones de dimensiones 1.0 m x 1.0m.

Figura 32.

Estructura de gaviones para dique longitudinal



Fuente: El consultor

8. Análisis y Discusión de los resultados

El análisis integral del comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño en el sector de la vereda la Isla se desarrolló utilizando herramientas de georreferenciación, modelación hidráulica y Sistemas de Información Geográfica SIG. A continuación, se presenta el análisis y su discusión en función del riesgo de inundación y las posibles soluciones estructurales.

A partir del estudio de las series históricas de precipitación y caudales se identificó una tendencia de incremento en los eventos de alta intensidad, especialmente durante la temporada de lluvias. La modelación hidrológica reveló que la cuenca del caño Picuño responde rápidamente a las precipitaciones intensas, con tiempo de concentración cortos y una capacidad limitada para infiltrar el exceso del agua, lo que incrementa la posibilidad de desbordamientos. Los resultados de la modelación hidráulica mostraron que las características naturales del terreno, combinadas con las secciones transversales de reducida capacidad de conducción y falta de obras de encauzamiento, favorecen la expansión lateral del caudal durante las crecidas, lo cual representa una amenaza directa para los habitantes, sus viviendas y sus actividades económicas de la vereda la Isla. En este contexto, el uso de modelos hidráulicos permitió simular distintos escenarios de flujo y evaluar el comportamiento del caño Picuño frente a la implementación de obras de mitigación.

Se evidenció que los eventos de crecida con periodos de retorno de 100 años generan inundaciones significativas en la zona, los mapas de peligrosidad generados a partir del SIG arrojaron que las áreas más afectadas por las inundaciones corresponden aquellas con menor pendiente y cercanía al cauce. En estos sectores, la velocidad del flujo y la altura del agua alcanzan valores críticos que comprometen la seguridad de los habitantes y las infraestructuras locales.

En función de los datos obtenidos, se propuso la implementación de una obra hidráulica la cual corresponde a la construcción de un dique longitudinal elaborado por gaviones al costado derecho del caño Picuño, cuya función principal será contener y redirigir el flujo del caño Picuño durante los picos de caudal y así mitigar los impactos de las inundaciones. Además, se recomendó el fortalecimiento de las redes de drenaje y la implementación de sistemas de alerta temprana para la comunidad.

Esta solución fue evaluada en los modelos, arrojando resultados positivos en términos de reducción de áreas inundables y disminución del riesgo para la comunidad. Además, los gaviones representan una solución sostenible y de bajo impacto ambiental, adecuada para la geografía y las condiciones socioeconómicas de la vereda la Isla.

En definitiva, el trabajo demostró que el uso de herramientas SIG y modelación hidráulica no solo permite comprender el riesgo de inundación, sino que también facilita la formulación de soluciones adaptadas a la realidad local. La implementación del dique de gaviones se presenta como una medida adecuada que contribuirá significativamente al bienestar y seguridad de los habitantes de la vereda La Isla, fortaleciendo la resiliencia de la comunidad ante eventos hidrometeorológicos extremos.

Con base en el análisis de resultados, la importancia de este trabajo radica en su valor como antecedente técnico para la comprensión del comportamiento hidrológico y fluvial en zonas rurales vulnerables como la vereda La Isla. Este estudio constituye una referencia para investigaciones futuras debido a la integración de herramientas avanzadas como la modelación hidráulica, los SIG y el análisis de series históricas de datos hidrometeorológicos, lo que permite una caracterización del riesgo de inundación y la identificación de soluciones estructurales viables y sostenibles.

8.1 Discusión

A partir de los datos obtenidos para la alternativa de mitigación es necesario mencionar primeramente que cualquier ejecución y desarrollo de obra civil dentro de un cauce, altera 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 produjo un problema importante para las zonas aguas abajo o del otro costado del cauce de las cuales se tiene conocimiento. Teniendo en cuenta los conceptos desarrollados a través de la ejecución de este proyecto, fue posible evidenciar una serie de características y comportamiento del cauce del caño Picuño, los cuales fueron la base para la selección de la alternativa de mitigación contra la inundación fluvial más óptima considerando la zona de estudio.

Cabe mencionar, que las medidas estructurales son desarrolladas para mitigar y/o evitar las inundaciones fluviales a través de la construcción de obras longitudinales. De esta manera, el dique longitudinal proyectado se encuentra conformado por tres hileras de gaviones de dimensiones de 1.0 m x 1.0 m. Teniendo en cuenta los antecedentes presentados en el contexto histórico del caño Picuño y buscando una equidad a nivel de elevación entre las dos márgenes expuestas, se estimó que una sola hilera de 1.0 metros 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 metros para los gaviones.

9. Conclusiones

El análisis del caño Picuño en el sector de la vereda La Isla permitió identificar que su comportamiento hidrológico y fluvial tiene una incidencia directa en la generación de eventos de inundación. Factores como el aumento en la intensidad de las precipitaciones halladas en las estaciones pluviométricas más cercanas: Caño Hondo (35010040) y Guamal (35010070), la topografía del terreno como son las secciones transversales de la reducida capacidad de conducción, la falta de obras de encauzamiento y la obstrucción del cauce natural, incrementan la vulnerabilidad del caño ante eventos extremos. El caño Picuño actúa como colector de aguas superficiales, y en temporadas de lluvias intensas, su capacidad se ve sobrepasada, lo que genera desbordamientos que afectan directamente a la comunidad.

Las herramientas SIG resultaron fundamentales para la recopilación, organización, análisis espacial y representación cartográfica de los datos hidrológicos y morfológicos de la cuenca del caño Picuño. A través de estas herramientas, fue posible identificar zonas críticas, delimitar áreas de riesgo y de inundación que permitieron una mejor visualización y comprensión de la dinámica del caño Picuño por medio de mapas y su interacción con el entorno.

la modelación hidrológica se realizó en el programa HEC-HMS 4.6, obteniendo el caudal para los diferentes periodos de retorno (2;33, 5, 10, 25, 50, 100 y 200) años, el cual hace referencia a una estimación del caudal en eventos de crecientes súbitas que genero un aporte considerable al área en estudio.

La modelación hidráulica se llevó a cabo por medio del Software HEC-RAS la cual complementó el análisis SIG al simular distintos escenarios de caudales y niveles de inundación, lo cual permitió estimar la magnitud del riesgo en distintos puntos de la vereda La Isla. Esta metodología proporcionó información técnica para evaluar el comportamiento del flujo en condiciones normales y extremas, lo que resultó fundamental para la planificación de medidas de mitigación.

A partir del diagnóstico realizado en el caño Picuño, se propuso como alternativa de solución una obra hidráulica la cual corresponde a la construcción de un dique longitudinal elaborado por gaviones al costado derecho del caño Picuño. Esta medida, en combinación con la zonificación de riesgo obtenida mediante SIG y modelación hidráulica, permitió reducir significativamente la exposición de la comunidad a eventos de inundación.

Esta investigación demuestra que la integración de herramientas SIG y la modelación hidráulica en el estudio del comportamiento fluvial permite avanzar hacia una gestión del riesgo más técnica. La información generada puede ser usada por las entidades competentes en el área para la toma de decisiones, planificación territorial y educación comunitaria en torno a la reducción del riesgo.

10. Recomendaciones

De acuerdo al análisis del comportamiento hidrológico y fluvial del caño Picuño sector vereda la Isla municipio de Guamal Meta, y con base en los resultados obtenidos mediante herramientas de georreferenciación, modelación hidráulica y SIG, se dictan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo en el caño Picuño mediante el uso de estaciones hidrometeorológicas y sensores de nivel de agua, con el objetivo de actualizar la información hidrológica en el software HEC-RAS. Esto permitirá exportar los archivos shapefile de la mancha de inundación e importarlos a los sistemas de información geográfica, facilitando así la verificación histórica del comportamiento hidráulico del caño Picuño.
- Se recomienda usar herramientas de (SIG) para identificar zonas de alto riesgo de inundación mediante el análisis de la evolución del cauce y la variación hidráulica. Esto permitirá delimitar áreas vulnerables y apoyar la formulación de planes de ordenamiento territorial que restrinjan el desarrollo urbano en dichas zonas.
- Se sugiere la construcción de obras hidráulicas como diques de protección con estructura de gaviones diseñados con base a la información obtenida de la modelación hidráulica, para mitigar los impactos de las crecidas y reducir la erosión de las riberas.
- Para mejorar la seguridad y movilidad de la comunidad, se propone la evaluación de alternativa la construcción de infraestructura vial, como un puente vehicular, que permitan la conectividad de la vereda la Isla con el municipio de Guamal Meta durante los eventos de bajas y altas precipitaciones.
- Es importante realizar actividades periódicas de limpieza y dragado en el lecho del caño Picuño, evitando la acumulación de sedimentos y residuos que puedan afectar su capacidad hidráulica y aumentar el riesgo de desbordamiento.

- Se recomienda utilizar herramientas de (SIG) para identificar las áreas más afectadas por la erosión en las riberas del caño Picuño y priorizar los sitios para reforestación. Los SIG permiten analizar la topografía, el uso del suelo y las condiciones ambientales, facilitando la planificación y monitoreo de los programas de reforestación.

11. Referencias

- Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS). (2005). *Estudio de zonas críticas en el departamento de Cesar : municipio de San Alberto / Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS)*. Obtenido de Servicio Geológico Colombiano: <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-imageviewer.pl?biblionumber=13333>
- Akallouch y Mashoud. (2024). *Aplicación de los SIG en el análisis del riesgo de inundaciones urbanas: Midar como caso de estudio*. Obtenido de Revista Abierta de Ecología: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=131418>
- Bates P y Roo D. (2000). *Un modelo simple basado en ráster para la simulación de inundaciones*. Obtenido de Revista de hidrología: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216940000278X>
- Benjamín. (2008). *Investigating physical and social dimensions. MSc thesis. Cape Town, South Africa*. Obtenido de University of Cape Town: <https://open.uct.ac.za/items/e60e5050-9a42-4cdb-8104-655054f7c900>
- Burrough, P.A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems*. Obtenido de Universiteit Twente : https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesgis.pdf
- Buzai et. (2015). *ánalisis espacial y eva-luación de zonas de potenciales conflictos ambientales, productivos y patrimoniales ante la expansión urbana en la cuenca del río Luján* . Obtenido de Anuario de la División Geografía, ISSN: 1851-7897.
- Cardona . (2005). *Gestion integral del riesgo y desastres* . Obtenido de Universidad Nacional de Colombia : <https://documents1.worldbank.org/curated/ar/671321468026993367/pdf/701030ESW0P1290ESTI0N0DEL0RIESGOweb.pdf>
- Chen. (2022). *Flood hazard zone mapping incorporating geographic information system (GIS) and multi-criteria analysis (MCA)*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128268>
- Chow. (2009). *Open Channel Hydraulics* . Obtenido de McGraw-Hill, Nueva York: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1929585>

- Cipagauta y Cadena. (2014). *Uso de Sistemas de Informacion Geografica en la determinación de amenazas por inundacion en el municipio de Chia*. Obtenido de Universidad Catolica de Colombia : <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb93825e-5e48-4644-85a2-504bf516c86a/content>
- Cívicos A y Hernández M. (2007). *Algunas reflexiones y aportaciones en torno a los enfoques teóricos y prácticos de la investigación en Trabajo Social*. Obtenido de Universidad de la Laguna, Departamento trabajo social y servicios sociales : <https://papiro.unizar.es/ojs/index.php/ais/article/view/306/300>
- Creswell. (2012). *Metodologia de la investigacion Capitulo III*. Obtenido de Repositorio Universidad Pendidikan indonesia : https://repository.upi.edu/20582/6/S_ING_1006412_Chapter3.pdf
- Demissie, Rimal y Dutta. (2024). *Mapeo de susceptibilidad a inundaciones: integración del aprendizaje automático y el SIG para una mejor evaluación de riesgos*. Obtenido de Computación Aplicada y Geociencias: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590197424000302#bib56>
- Escuder et. (2010). *Análisis y evaluación de riesgos de inundación* . Obtenido de estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales.
- Fracassi. (2019). *Defensas ribereñas con gaviones y geo sintéticos*. Obtenido de Ediciones de la U.
- Garcia . (2006). *Conceptos básicos para el estudio de sistemas complejos*”. Obtenido de Sistemas Complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria, Barcelona, España: <https://secat.unicen.edu.ar/wp-content/uploads/2020/03/GARCIA-Sistemas-complejos1.pdf>
- GFGR. (2012). Analisis de la Gestion del Riesgo de Desastres en Colombia. *Banco Mundial Colombia* .
- Glass y Hopkins. (1984). *Hipótesis, Método & Diseño de Investigación*. Obtenido de International Journal of Good Conscience. 7(2) 187-197: <https://www.spentamexico.org/v7-n2/7%282%29187-197.pdf>
- Gutiérrez V, Dudei S y Cuervo G . (2019). *Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas con la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia*. Obtenido de Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 28 (1): 152-174: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/70856/pdf>

- Hudson P y Colditz R . (2003). *Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Pánuco basin, México*. Obtenido de Journal of Hydrology, 280, pp. 229-245: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169403002270>
- Karmaoui, Balica y Messouli. (2016). *Análisis de la aplicabilidad del índice de vulnerabilidad a inundaciones en la región presahariana: un estudio piloto para evaluar las inundaciones en el sur de Marruecos. Debates sobre peligros naturales y ciencias del sistema terrestre*. Obtenido de <https://doi.org/10.5194/nhess-2016-96>
- Longley P. (2015). *Sistemas de información Geografica* . Obtenido de Cartografía y Geodesia. Sistema de proyección : <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Longley, Goodchild, Maguire y Rhind. (2005). *Geographic Information Systems and Scienc*. Obtenido de Repositorio de la Universidad de Lisboa : https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/43193/1/Rocha_Abrantes_2019.pdf
- Maguire, D.J . (1991). *"The Functionality of GIS"*, en: D. J. Maguire, M. F. Goodchild, D. W. Rhind, (éd.), *Geographical Information System, vol. 1: Principles*., Obtenido de Longman Scientific&Technical, New York, pp. 319-335: <https://core.ac.uk/download/pdf/33797586.pdf>
- Moya-Quiroga. (2016). *Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS versión 5*. Obtenido de revista Iberoamericana del Agua, 3, 25-33: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2386378116000025>
- Nava & Cortes. (2009). *Hidráulica de ríos, morfología, técnicas de medición y muestreo de ríos* . Obtenido de Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura .
- Ordoñez. (2016). *Analisis del Riesgo por Inundación utilizando herramientas GIS para la Cuenca del Río Quito*. Obtenido de Universidad de Manizales : https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/2896/Moreno_Cristian_TrabajodeGrado_2016.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Principi, Buzai y Baxendale. (2015). *Mapa social y vulnerabilidad socioeconómica en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina)*. Obtenido de Procesos Territoriales: un enfoque multidisciplinario, Buenos Aires, Lugar Editorial, pp. 17-38.: https://www.researchgate.net/publication/354821669_Mapasocial_y_vulnerabilidad_socioeconomica_en_la_ciudad_de_Lujan_Buenos_Aires_Argentina

- Rivas A. (2016). *Modelos Cuantitativos en SIG para la Evaluación de Riesgos* . Obtenido de Metodología de la Investigación: https://www.lopezgalvezasesores.com/descargas/metodologia_investigaci%C3%B3n.pdf
- Schubert y Sanders. (2012). *Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency*: . Obtenido de ELSEVIER, 41, 49-64: <https://doi.org/10.1016/j.ad-vwatres.2012.02.012>
- Sendra B y Garcia R. (2000). *Sistemas de Informacion Geografica* . Obtenido de Anales de Geografia de la Universidad Complutense : https://www.researchgate.net/publication/39276976_El_uso_de_los_sistemas_de_Informacion_Geografica_en_la_planificacion_territorial
- Servicio Meteorológico Nacional. (2022). *inundaciones en el Medio Oeste*. Obtenido de Servicio Meteorológico Nacional: <https://www.weather.gov/arx/usflood>
- SNET. (2003). *Análisis de riesgo por inundaciones y deslizamientos de tierra en la microcuenca del arenal de Montserrat*. Obtenido de Servicio Nacional de Estudios Territoriales. San Salvador, El salvador: <https://www.itc.nl/external/unesco-rapca/en/contents-%20of-%20this-cd/2-analisis-de-riesgo-arenal-el-salvador.PDF>
- Soldano A, Giraut M y Goniadzki D . (2007). *Mapa de susceptibilidad urbana ante inundaciones caso: Ciudad de Goya, provincia de Corrientes*. Obtenido de XII congreso de la asociación española de teledetección y SIG: https://www.academia.edu/92782111/Mapa_de_Susceptibilidad_Urbana_Ante_Inundaciones_Caso_Ciudad_de_Goya_Provincia_de_Corrientes
- Tibavija W y Villar E. (2011). *Plan de Gestión del Riesgo por inundaciones del rio Guamal en la zona urbana del municipio de Guamal - Meta* . Obtenido de Universidad de los Llanos : <https://repositorio.unillanos.edu.co/server/api/core/bitstreams/3be517de-7198-4ffa-88e1-f9e9d81b6917/content>
- UNESCO. (2002). *Gestión del Riesgo de desastres - inundaciones*. Obtenido de rganización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000228134/PDF/228134spa.pdf.multi>
- Wilches Chaux. (2018). Analisis General de la Gestion del Riesgo por Inundacion en Colombia. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad CAS. Vol 4n N° 01* .