

Zonificación de amenazas por inundación e incendio forestal en el Centro de Investigaciones
Santa Lucia del Instituto Universitario de La Paz en Barrancabermeja

Eduard Orozco Pérez y Jesús Leonel García Arias

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

Director

Edwin Alexander Villa Plaza

Geólogo

Codirector

Sergio Antonio Rodríguez Arrieta

Ing. Ambiental

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2024

Dedicatoria

...A todos aquellos que hicieron parte en cada uno de los peldaños construidos, a todos aquellos quienes de una u otra manera ayudaron en este proceso de crecimiento, a todos aquellos quienes creyeron y confiaron, a todos aquellos gracias...

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Antecedentes	16
2. Justificación y/o Planteamiento del problema	18
3. Objetivos	19
3.1. Objetivo general	19
3.2. Objetivos específicos	19
4. Generalidades	20
4.1. Localización geográfica	20
4.2. Vías de acceso	20
4.3. Clima	21
4.4. Hidrografía	23
4.4.1. Subcuenca ciénaga San Silvestre	24
4.4.2. Parámetros morfométricos	25
4.5. Geomorfología preliminar	26
4.5.1. Ambiente denudacional	26
4.5.1.1. Planicie colinada denudada (Dpcd)	26
4.5.2. Ambiente fluvial	26
4.5.2.1. Plano o llanura de inundación (Fpi)	26
4.5.2.2. Terrazas bajas de acumulación	27
5. Marco teórico	27
5.1. Gestión del Riesgo y Zonificación de Amenazas	27
5.2. Análisis multicriterio	29

5.3. Marco normativo de análisis de amenazas	30
6. Marco metodológico	32
6.1. Etapa de recopilación bibliográfica.....	33
6.2. Generación de insumos	34
6.2.1. Generación de un MDT y ortomosaico.....	34
6.2.2. Delimitación de la subcuenca.....	37
6.2.3. Generación de mapa de pendientes	38
6.2.4. Generación mapa geomorfológico	38
6.2.5. Generación del mapa de coberturas	38
6.3. Procesamiento de los datos modelado de inundación	39
6.3.1. Caracterización morfométrica	39
6.3.1.1 Parámetros físicos	39
6.3.1.2 Parámetros de forma de la cuenca	40
6.3.2. Datos hidrometeorológicos	41
6.3.2.1 Precipitación	41
6.3.2.2. Intensidad.....	42
6.3.2.3 Tiempo de concentración.....	43
6.3.2.4. Caudales máximos	43
6.3.3. Modelado hidráulico de inundación.....	44
6.3.3.1 Método del paso estándar.....	44
6.4. Proceso metodológico para evaluar la amenaza por incendio forestal	46
6.4.1. Susceptibilidad de la vegetación	46
6.4.1.1 Mapa de coberturas	47

6.4.1.2 Susceptibilidad por tipo de combustible.....	47
6.4.1.3 Susceptibilidad por duración de combustible.....	47
6.4.1.4 Susceptibilidad por Carga de combustible.....	48
6.4.2. Factores Climáticos.....	51
6.4.3. Factor relieve.....	54
6.4.4. Accesibilidad.....	55
6.4.5. Factor histórico.....	55
7. Resultados.....	57
7.1 Modelo digital del terreno y ortomosaico.....	57
7.2 Geomorfología.....	59
7.2.1 Ambiente denudacional.....	59
7.2.1.1 Planicie colinada denudada de pendiente media (Dpcdpm).....	59
7.2.1.2 Planicie colinada denudada de pendiente baja (Dpcdpb).....	59
7.2.2 Ambiente fluvial.....	60
7.2.2.1 Plano o llanura de inundación (Fpi).....	60
7.2.2.2 Terrazas bajas de acumulación (Fta).....	61
7.3 Zonificación de amenaza por inundación.....	61
7.3.1. Morfometría microcuenca el Zarzal.....	61
7.3.1.1 Tiempo de concentración.....	62
7.3.2. Análisis meteorológico.....	63
7.3.2.1 Precipitación Máxima en 24 Horas.....	63
7.3.2.2 Curva de intensidad, duración y frecuencia-IDF.....	66
7.3.2.3 Intensidad.....	66

7.3.2.4 Estimación de Caudales Máximos.....	69
7.3.2.5 Coeficiente de rugosidad de Manning.....	70
7.3.3. Modelo hidráulico.....	71
7.3.3.1 Secciones transversales.....	71
7.3.3.2 Espacialización modelo hidráulico asociado a inundación.....	75
7.4 Zonificación de amenaza por incendios forestal.....	79
7.4.1 Susceptibilidad de la cobertura vegetal.....	79
7.4.2. Susceptibilidad por factores climáticos.....	82
7.4.3. Susceptibilidad por factor relieve.....	84
7.4.4 Susceptibilidad por accesibilidad.....	86
7.4.5 Susceptibilidad por factor histórico.....	86
7.4.6 Zonificación final amenaza de incendios forestales.....	88
8. Análisis y discusión de resultados.....	89
9. Conclusiones.....	90
10. Recomendaciones.....	91
Referencias bibliográficas.....	92
Apéndices.....	97

Lista de Figuras

Figura 1 Localización general área de estudio.....	20
Figura 2 Vías de acceso al área de estudio	21
Figura 3 Isoyetas Barrancabermeja.....	22
Figura 4 Cuencas hidrográficas municipio de Barrancabermeja	24
Figura 5 Subcuenca hidrográfica San Silvestre	25
Figura 6 Geomorfología preliminar de la zona de estudio	27
Figura 7 Esquema metodológico	32
Figura 8 Procesamiento de Modelo digital de Superficie.....	35
Figura 9 Procesamiento de Modelo digital de terreno	36
Figura 10 Topobatimétrica tramo quebrada Zarzal.	36
Figura 11 Esquema metodológico geoprosesamiento para delimitación de cuenca.....	37
Figura 12 Esquema metodológico caracterización de susceptibilidad de Coberturas vegetal.....	50
Figura 13 Esquema metodológico caracterización de amenaza por condiciones meteorológicas	53
Figura 14 Esquema metodológico caracterización de amenaza por factor relieve.....	54
Figura 15 Número de eventos de incendios forestales reportados por departamentos en el periodo 2002-2012	56
Figura 16 Modelo Digital de Superficie	57
Figura 17 Ortomosaico	58
Figura 18 Modelo Digital de terreno	58

Figura 19 Geomorfología de la zona de estudio	61
Figura 20. Estaciones meteorológicas zona de estudio.....	64
Figura 21. Distribución de influencia de estaciones meteorológicas por método de Thiessen. .	65
Figura 22 Coeficiente de Manning	70
Figura 23 Secciones Transversales tramo quebrada el Zarzal	71
Figura 24 Geometría Tramo quebrada el Zarzal.....	72
Figura 25 Transito hidráulico caudal a diferentes tiempos de retorno.....	73
Figura 26 la zonificación de amenaza por inundación sobre el predio del UNIPAZ	78
Figura 27. Categorización final susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios forestales..	81
Figura 28. Categorización final susceptibilidad por condiciones climáticas a incendios forestales	83
Figura 29. Categorización final susceptibilidad por pendientes a incendios forestales.....	84
Figura 30. Categorización final susceptibilidad por índice de frecuencia de incendios forestales	87
Figura 31. Zonificación de amenaza por incendios forestales en el predio de la UNIPAZ.....	88

Lista de Tablas

Tabla 1 Parámetros meteorológicos medios anuales	22
Tabla 2 Parámetros morfométricos de la Subcuenca San Silvestre	25
Tabla 3 Escala de preferencias.....	30
Tabla 4 Normativa colombiana análisis de riesgos.....	30
Tabla 5 Clasificación de pendientes	38
Tabla 6 Índice de compacidad para la evaluación de la forma	41
Tabla 7 Índice de compacidad para la evaluación de la forma	41
Tabla 8 Parámetros de ajuste de la regresión.....	43
Tabla 9 Categorización de susceptibilidad por tipo de combustible.....	47
Tabla 10 Categorización de susceptibilidad por duración de combustible.....	48
Tabla 11 Categorización de susceptibilidad por carga de combustible	48
Tabla 12 Categorización de susceptibilidad por carga de combustible	50
Tabla 13 Estaciones meteorológicas	52
Tabla 14 Categorización de amenaza por condiciones climáticas.....	52
Tabla 15 Categorización de amenaza por Factor Relieve.....	54
Tabla 16 Categorización de amenaza por Factor Relieve.....	55
Tabla 17 Características morfométricas de la microcuenca de la quebrada el Zarzal	62
Tabla 18 Expresiones empíricas para la estimación de tiempos de concentración.....	62
Tabla -19 Registro histórico de incendios de vegetación en zona rural de Barrancabermeja	63
Tabla 20 Parámetros de ajuste de la regresión.....	67

Tabla 21 Intensidad de precipitación por Duración de lluvia y Frecuencia de esta distribuida por polígonos de Thiessen	68
Tabla 22 Tabla intensidades - Tiempo de duración	68
Tabla 23 Caudales máximos estimados para la microcuenca el Zarzal.....	70
Tabla 24 Condiciones hidráulicas.....	74
Tabla 25 Matriz de categorización de amenaza.....	77
Tabla 26 Distribución espacial de las categorías de amenaza por inundación	78
Tabla 27 Categoría final susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios forestales.....	79
Tabla 28 Distribución espacial de la amenaza por cobertura vegetal.....	81
Tabla 29 Precipitación promedio multianual.....	82
Tabla 30 Temperatura promedio multianual.....	82
Tabla 31 Velocidad de vientos.....	83
Tabla 32 Radiación solar	83
Tabla 33 Categoría amenaza pendientes.....	84
Tabla 34 Categoría amenaza pendientes área de estudio.....	85
Tabla 35 Registro histórico de incendios de vegetación en zona rural de Barrancabermeja.....	86
Tabla 36 Categorización de amenaza por índice de frecuencia	86
Tabla 37 Distribución en área y porcentaje de la zonificación de amenaza por incendios forestales del predio UNIPAZ.....	88

Lista de Apéndices

Apéndice A Valores de precipitación máxima en 24 horas mensual multianual.....	102
Apéndice B Cálculos de precipitación diaria, intensidad y regresiones Estación La Putana.....	103
Apéndice C Cálculos de precipitación diaria, intensidad y regresiones Estación Yariguíes.....	104
Apéndice D Cálculos de precipitación diaria, intensidad y regresiones Estación El Centro.....	108

Resumen

Título: Zonificación de amenazas por inundación e incendio forestal en el Centro de Investigaciones Santa Lucía del Instituto Universitario de La Paz en Barrancabermeja*

Autor: Orozco Perez Eduard. García Arias Jesús Leonel **

Palabras Clave: Amenazas, Zonificación, Barrancabermeja, Inundación, Incendio

Descripción:

El presente proyecto de investigación se propone como una respuesta autónoma a la necesidad de evaluar y comprender las amenazas naturales que enfrenta el Centro de Investigaciones Santa Lucía, a través de un análisis detallado de inundación, e incendio forestal, donde se buscará identificar áreas críticas. Dada la creciente frecuencia de desastres naturales en Colombia, como los incendios y las inundaciones, esta investigación busca fortalecer la planificación territorial y la protección de la infraestructura. El estudio utiliza dos metodologías clave: el modelo HEC-RAS para el análisis de inundaciones y el Protocolo del IDEAM (2011) para la zonificación de incendios forestales. Estas herramientas se complementan con análisis detallados de geología, geomorfología, cobertura vegetal y clima, apoyados en datos secundarios y verificaciones de campo. La zonificación de amenazas muestra que la mayor parte del área de estudio presenta una amenaza moderada por incendios forestales debido a la presencia de elementos detonantes como la temperatura y la radiación. Además, se identifica que la principal categoría de la amenaza a inundaciones es moderada debido a las características morfométricas de la cuenca, la morfología del terreno y las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la quebrada.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingeniería Físicoquímicas-Escuela de Geología. Director: Edwin Alexander Villa Plaza, Geólogo. Esp.
Codirector: Sergio Antonio Rodríguez Arrieta, Ingeniero Msc

Abstract

Title: Hazard Zoning for Flooding and Forest Fire at the Santa Lucía Research Center of the Instituto Universitario de la Paz in Barrancabermeja

Author: Orozco Perez Eduard. García Arias Jesús Leonel **

Key words: Hazard, Zoning, Barrancabermeja, Flooding, Forest Fire

Description:

This research project is an autonomous response to the need to assess and understand the natural hazards faced by the Santa Lucía Research Center. It focuses on a detailed analysis of flood and wildfire risks to identify critical areas. Given the increasing frequency of natural disasters in Colombia, such as fires and floods, the project aims to strengthen land-use planning and infrastructure protection. The study employs two key methodologies: the HEC-RAS model for flood analysis and the IDEAM (2011) protocol for wildfire hazard zoning. These methods are complemented by detailed geological, geomorphological, vegetation, and climate analyses, supported by secondary data and field verifications. The threat zoning indicates that most of the study area faces a moderate wildfire risk due to factors like temperature and radiation, while the flood threat is also categorized as moderate, attributed to the basin's morphometric characteristics, terrain morphology, and the hydrological and hydraulic conditions of the stream.

*Bachelor Thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering, School of Geology. Director: Edwin Alexander Villa Plaza, Geosciences.
Esp. Co-director: Sergio Antonio Rodríguez Arrieta, Engineer Msc.

Introducción

A pesar de los avances que Colombia ha logrado en la gestión del riesgo, la persistencia de daños significativos a la propiedad e infraestructura indica la necesidad de implementar enfoques más detallados y efectivos. En particular, la historia reciente de la región ha estado marcada por eventos climáticos extremos, como las inundaciones que afectaron a la región en 2010-2011, debido a las intensas lluvias asociadas a La Niña, y los incendios forestales que suelen ocurrir durante temporadas secas prolongadas (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2022).

La zonificación de amenazas es una herramienta fundamental para la gestión del riesgo, especialmente en áreas propensas a desastres naturales como inundaciones e incendios forestales, permitiendo una planificación territorial precisa y adaptada a las características locales. En el contexto del Centro de Investigaciones Santa Lucía del Instituto Universitario de La Paz en Barrancabermeja, este estudio cobra una relevancia particular debido a las características geográficas y climáticas lo que expone al Centro de Investigaciones a fluctuaciones entre sequías e inundaciones, debido a la proximidad de cuerpos de agua y la variabilidad estacional (Pérez, 2017). Además, el área forma parte de una ruta ecológica importante para especies en peligro como el jaguar, lo que añade relevancia a la protección de su biodiversidad (Fundación Panthera, 2019), así como la importancia del Centro de investigaciones para el Magdalena medio. Según García, López y Pérez (2018), la zonificación permite la planificación y gestión del territorio de manera sostenible, reduciendo los riesgos asociados a desastres naturales y protegiendo tanto a la población como a los ecosistemas locales. Por lo tanto, la zonificación de amenazas por inundación e incendio forestal puede proporcionar información valiosa para la toma de decisiones en la

planificación de infraestructuras, la gestión de recursos naturales y la protección de la biodiversidad en el predio del Centro de investigaciones Santa Lucía.

La metodología empleada en esta investigación para la zonificación de amenazas se basa en dos enfoques principales. En el caso de la amenaza por incendios forestales, se tomó como base el Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000 del IDEAM (2011), Esta metodología plantea una resolución de tipo semidetallado a detallado, ajustando su escala para permitir un análisis más detallado de la cobertura vegetal, el régimen climático y otros factores detonantes locales. Para la amenaza de inundaciones, se utilizó el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), una herramienta ampliamente reconocida que permite simular el comportamiento hidráulico de los cauces y predecir las áreas susceptibles a inundación bajo diferentes escenarios de eventos extremos. (USACE, 2020).

Esta investigación se centra en el Centro de Investigaciones Santa Lucía del Instituto Universitario de La Paz en Barrancabermeja, una zona que combina factores geográficos y climáticos críticos para el análisis de amenazas. Barrancabermeja, con su clima tropical caracterizado por temporadas secas prolongadas y altas precipitaciones, representa un entorno propenso tanto a incendios forestales como a inundaciones, siendo estas últimas por la cercanía de ríos y cuerpos de agua.

El objetivo de este estudio es no solo identificar áreas críticas, sino también generar información clave que apoye la toma de decisiones en términos de planificación, gestión sostenible de recursos naturales y protección de la biodiversidad en el marco de la misión y visión del Instituto Universitario de la Paz. Al profundizar en el comportamiento de los procesos de superficie en la zona de estudio, se busca contribuir a la mitigación de desastres y la protección tanto del entorno

humano como ambiental. Este enfoque integral permitirá al Centro de Investigaciones desarrollar planes de contingencia robustos, mejorando la resiliencia frente a desastres naturales en su comunidad y garantizando la sostenibilidad de sus instalaciones y su entorno natural este contexto, descrito por diversos autores como Pardo y Torres (2019) y Salazar y García (2020), plantea la necesidad crítica de evaluar y gestionar los riesgos naturales de manera específica y adaptada a las realidades locales.

1. Antecedentes

En Colombia, los fenómenos naturales amenazantes, especialmente los de origen hidrometeorológico, han tenido un impacto significativo en la población y el territorio. Según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2022), el 87% de los desastres registrados entre 1998 y 2020 fueron de esta categoría, donde las inundaciones y los incendios forestales se destacan entre las principales amenazas. Las sequías e incendios forestales representaron el 31% de estos eventos, mientras que las inundaciones contribuyeron con un 27%, evidenciando la relevancia de estos fenómenos en la gestión de riesgos en el país.

El área de estudio, Barrancabermeja, se encuentra en una zona con características climáticas y geográficas que incrementan la susceptibilidad a estos desastres. Según IDEAM (2011), la región presenta un clima tropical húmedo, con ciclos de intensas precipitaciones y temporadas secas prolongadas, lo que incrementa tanto el riesgo de inundaciones como de incendios forestales. Este contexto es particularmente relevante para la investigación, dado que la zonificación de amenazas es una herramienta clave en la planificación y gestión del territorio.

Históricamente, la región ha sufrido eventos que han puesto en evidencia la vulnerabilidad a estos fenómenos. Por ejemplo, el fenómeno de La Niña, que afectó gravemente el país entre 2010

y 2011, causó inundaciones que afectaron extensas áreas del Magdalena Medio, donde se ubica el Centro de Investigaciones Santa Lucía (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2011). Estos eventos han subrayado la necesidad de estudios más detallados y localizados para la identificación de áreas críticas y la implementación de medidas preventivas y de mitigación.

A nivel municipal según DesInventar (2013), por intensas lluvias el 1 de octubre de 2013, se produjeron inundaciones en 28 barrios del municipio de Barrancabermeja, causando daños significativos en viviendas de los barrios El Palmar, Diamante, Chapinero, Miraflores, El Dorado y Pozo Siete. Como resultado, 72 familias se vieron afectadas, lo que llevó a un total de 360 damnificados, según el censo realizado. La emergencia fue atendida por el Cuerpo de Bomberos, la Defensa Civil y la Alcaldía.

El municipio de Barrancabermeja el 6 de noviembre enfrentó lluvias que afectaron los barrios de Buenos Aires, Palmira, Jerusalén, Belén, Pueblo Nuevo, Callejón de las Lavanderas, Puente Picapiedra, la invasión Mano de Dios y el barrio Pozo. Reportando 73 familias afectadas, lo que suma un total de 204 personas. En total, se identificaron 16 barrios afectados en las comunas 1, 2, 3, 4, 6 y 7, lo que representa aproximadamente 300 familias (DesInventar, 2016).

El Directorio de Coordinadores de Gestión del Riesgo de Santander reportó un incendio forestal en el municipio de Barrancabermeja, específicamente en la vereda Campo Galán, donde se consumieron 3 hectáreas de vegetación. También se registró otro incendio en la vereda Peroles, a 25 minutos de Barrancabermeja, que afectó 6 hectáreas (DesInventar, 2016).

En la región de Santander ocurrió en 2016, cuando un incendio forestal afectó el Parque Nacional Natural Serranía de los Yariguíes, uno de los ecosistemas más ricos en biodiversidad de la región. Este incendio fue causado por prácticas agrícolas no controladas y se extendió

rápidamente debido a las altas temperaturas y la sequedad del ambiente (Parques Nacionales de Colombia, 2016).

2. Justificación y/o Planteamiento del problema

Las inundaciones y los incendios forestales son fenómenos recurrentes en muchas regiones tropicales, como el Magdalena Medio, que sufren tanto periodos de lluvias intensas como temporadas secas prolongadas, lo que incrementa la frecuencia y severidad de estos eventos (IDEAM, 2011; Pabón-Caicedo et al., 2016).

Esta problemática genera un interés significativo en realizar estudios con el objetivo de evaluar las amenazas a las que se encuentra expuesta la institución. Estas acciones no solo buscan preparar a la comunidad que hace parte del instituto para afrontar amenazas potenciales, sino también generar un conocimiento más profundo que sirva como base para desarrollar estrategias efectivas de planeación, prevención y respuesta.

La zonificación de amenazas ofrece una herramienta técnica y científica que permite identificar áreas críticas donde la probabilidad de ocurrencia de estos desastres es mayor, facilitando la implementación de medidas preventivas y mitigadoras (García et al., 2018). En un contexto como el del Centro de Investigaciones Santa Lucía, donde convergen factores ambientales sensibles y la presencia de importantes ecosistemas, este tipo de análisis es clave no solo para la protección de la infraestructura, sino también para la conservación de la biodiversidad y los recursos naturales (Torres & Álvarez, 2019). El análisis de amenazas naturales se convierte, entonces, en una herramienta esencial que posibilita la comprensión de la probabilidad de ocurrencia de un evento, permitiendo así la formulación de estrategias efectivas de mitigación y respuesta.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Realizar una evaluación y zonificación de las amenazas naturales asociadas a inundación, e incendio forestal que pudieran impactar al Centro de Investigaciones Santa Lucía del Instituto Universitario de la Paz en Barrancabermeja.

3.2. Objetivos específicos

Elaborar modelo digital del terreno y Ortomosaico a escala 1:5000 del área de estudio

Realizar fotointerpretación del área de estudio (Identificación de estructuras locales geomorfología y coberturas).

Modelar la amenaza de inundación mediante el software Hec-Ras sobre el tramo de la Quebrada el Zarzal presente en el área de estudio.

Realizar el análisis de amenaza por incendios forestales identificando las coberturas terrestres, elementos detonantes y patrones históricos en las cercanías del Centro de Investigaciones Santa Lucía.

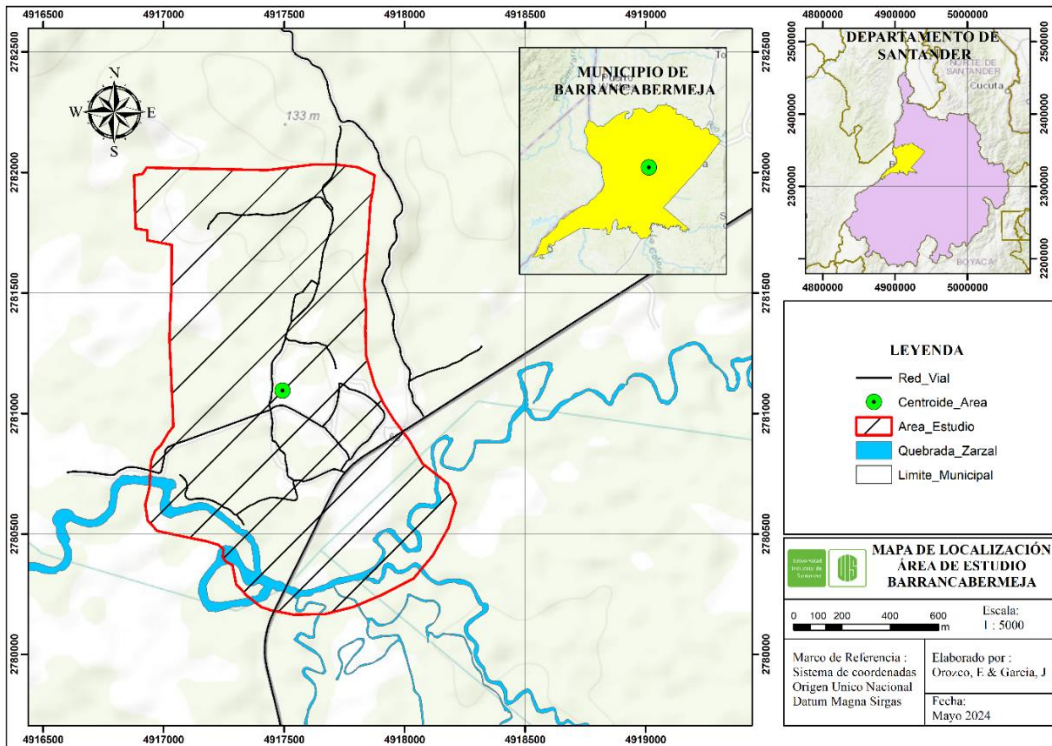
4. Generalidades

4.1. Localización geográfica

Barrancabermeja es un distrito especial que se encuentra a orillas del río Magdalena, en la parte occidental del departamento de Santander. El Centro de Investigación Santa Lucía, perteneciente al Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ), está situado a 15 kilómetros del casco urbano de Barrancabermeja sobre el margen izquierdo de la vía Barrancabermeja-Bucaramanga, ubicado específicamente en la vereda El Zarzal. El área de estudio abarca una extensión de 162 hectáreas con coordenadas del centroide en origen Único Nacional: X:4917493.54 y Y:2781095.20.

Figura 1

Localización general área de estudio

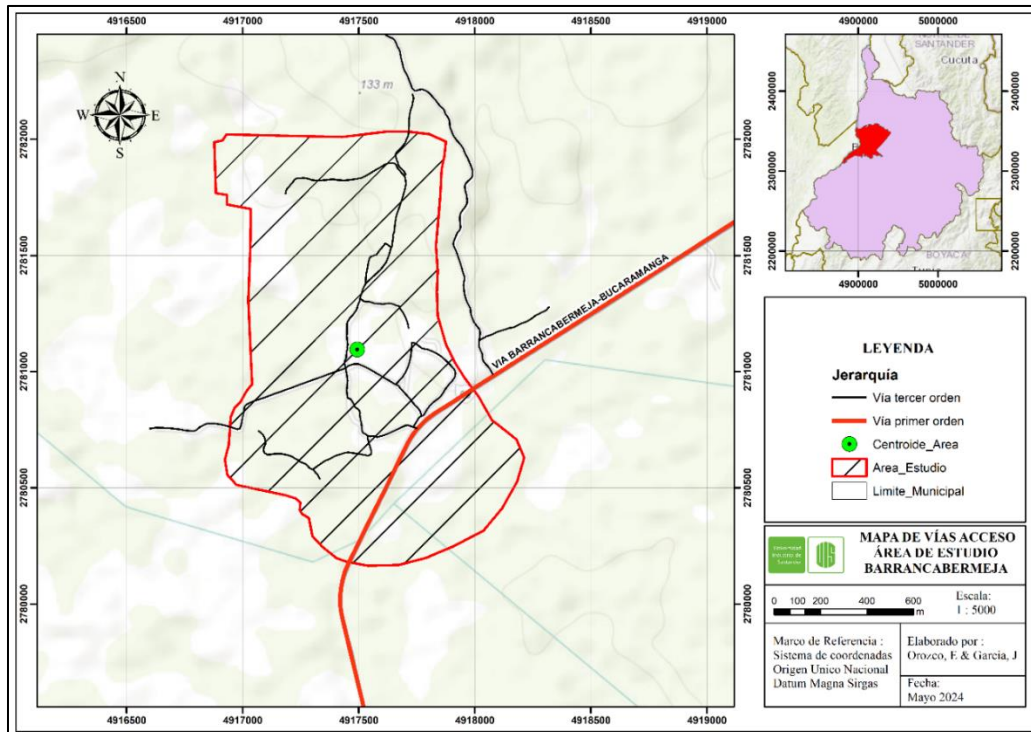


4.2. Vías de acceso

El predio objeto de estudio cuenta con conexión directa de la vía nacional de primer orden, Barrancabermeja-Bucaramanga denominada ruta del cacao. Adicionalmente cuenta con vías de tercer orden de acceso veredal ver Figura 2

Figura 2

Vías de acceso al área de estudio



4.3.Clima

El municipio de Barrancabermeja se encuentra sobre el Zonobioma húmedo tropical del Magdalena (IGAC, 2012) caracterizado por ser tierras ubicadas en el piso térmico cálido húmedo con precipitaciones anual mayor a 2000 mm en elevaciones entre 0 y 500 msnm, donde predominan coberturas terrestres de bosques naturales (38.0 %), pastos (32.5%) vegetación secundaria (21.8%) y cultivos (5.9%). (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, CORANTIOQUIA, 2009)

De acuerdo con la información climatológica presentada en el Plan de Ordenamiento Territorial 2022-2035 del municipio de Barrancabermeja, con datos suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se han analizado los registros de la estación Yarigués correspondientes al periodo entre los años 2002 y 2016. Estos datos revelan importantes características climáticas de la región. Durante este período, el promedio multianual de precipitación fue de 3030,1 mm, indicando un clima con una alta pluviosidad. La temperatura media anual se registró en 28,1 °C, lo que refleja un ambiente cálido típico de zonas tropicales. Además, el brillo solar alcanzó un promedio anual de 2203,1 horas, lo cual es significativo para actividades que dependen de la radiación solar, como la agricultura.

Tabla 1

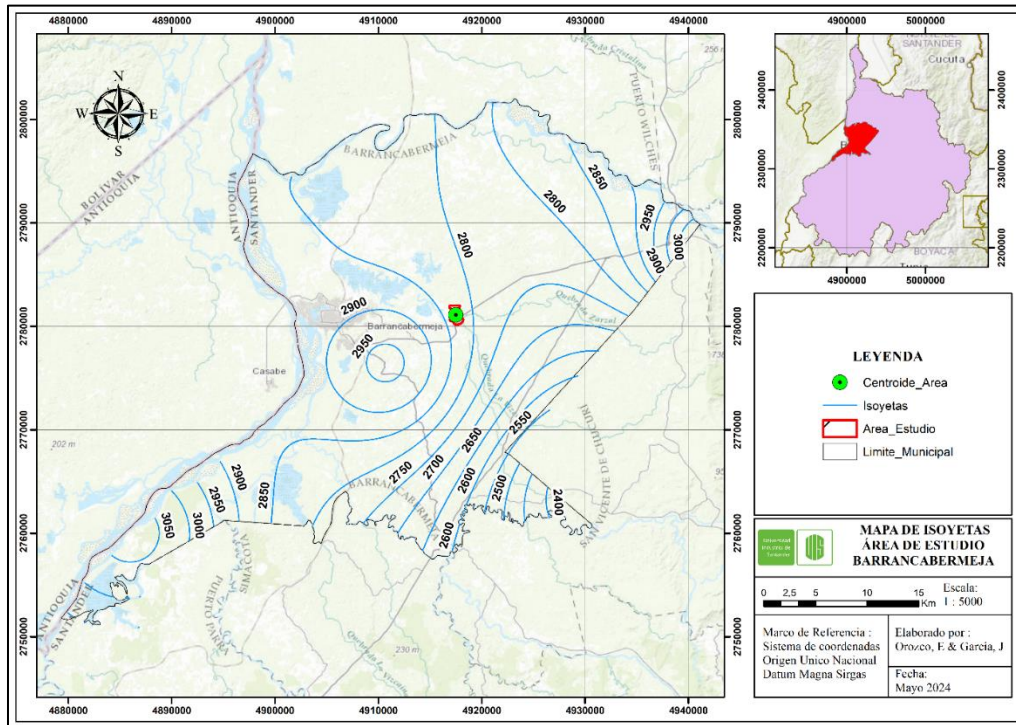
Parámetros meteorológicos medios anuales

Parámetros medios anuales			
Año	Precipitación Total	Temperatura media anual	Brillo solar total
2002	2455,3	28,7	2363,5
2003	3108,3	28,2	2167,0
2004	2551,2	28,4	2286,6
2005	3522,3	28,1	2215,8
2006	3153,5	28,0	2155,2
2007	3339,2	28,1	2340,0
2008	3869,9	27,7	2214,3
2009	2564,1	28,3	2251,3
2010	4777,2	28,0	2010,2
2011	3190,4	27,7	2040,5
2012	2534,8	28,3	2300,0
2013	2942,6	28,5	2209,8
2014	2293,2	25,6	2247,8
2015	2526,6	29,0	2202,1
2016	2623,0	28,7	2041,5
Promedio multianual	3030,1	28,1	2203,1

Nota: Adaptado de Plan de Ordenamiento Territorial de Barrancabermeja, 2022- 2035

Figura 3

Isoyetas Barrancabermeja



Nota: Adaptado de Plan de Ordenamiento Territorial de Barrancabermeja, 2022-2035

4.4.Hidrografía

La quebrada el Zarzal se encuentra ubicado en la cuenca del río Sogamoso. Según el documento del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Sogamoso, este río se forma por la confluencia de los ríos Chicamocha y Suárez y desemboca en el río Magdalena por su margen derecha, siendo el mayor afluente del Magdalena Medio. La parte baja de la cuenca del río Sogamoso atraviesa una zona plana rica en yacimientos petrolíferos y tierras muy fértiles, con un gran potencial para el desarrollo de la ganadería y la agricultura mecanizada. Este río baña importantes municipios como San Vicente de Chucurí, Betulia, Los Santos, Barrancabermeja Puerto Wilches, Sabana de Torres y Zapatoca.

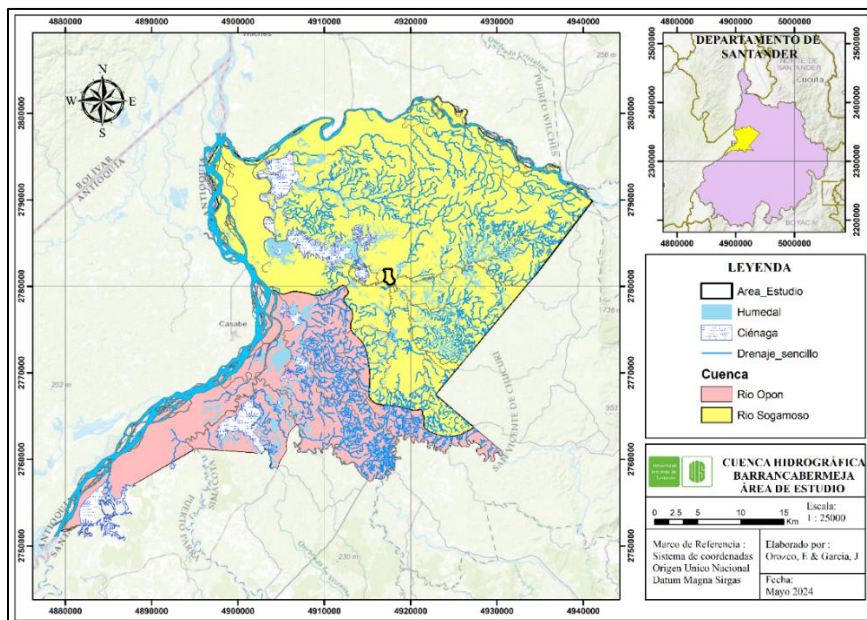
Con una extensión de 329,069 hectáreas, de las cuales 285,650 hectáreas pertenecen a la jurisdicción de la CAS, la cuenca del río Sogamoso tiene una longitud de 116 km. Identificada con

el código 2405, esta cuenca pertenece a la Macrocuena Magdalena Cauca. Posee una extensión total aproximada de 340,843 hectáreas, de las cuales 277,128 hectáreas, equivalentes al 81.31 %, están bajo la jurisdicción de la CAS. Además, esta cuenca es compartida con la CDMB (POMCA,2018).

Como se observa en la Figura 4, el municipio de Barrancabermeja, debido a su ubicación geográfica, cuenta con una gran cantidad de cuerpos de agua lóticos y lénticos, destacando el sistema de la ciénaga de San Silvestre, que es la principal fuente de abastecimiento de agua. El principal afluente de esta ciénaga es la quebrada El Zarzal.

Figura 4

Cuencas hidrográficas municipio de Barrancabermeja



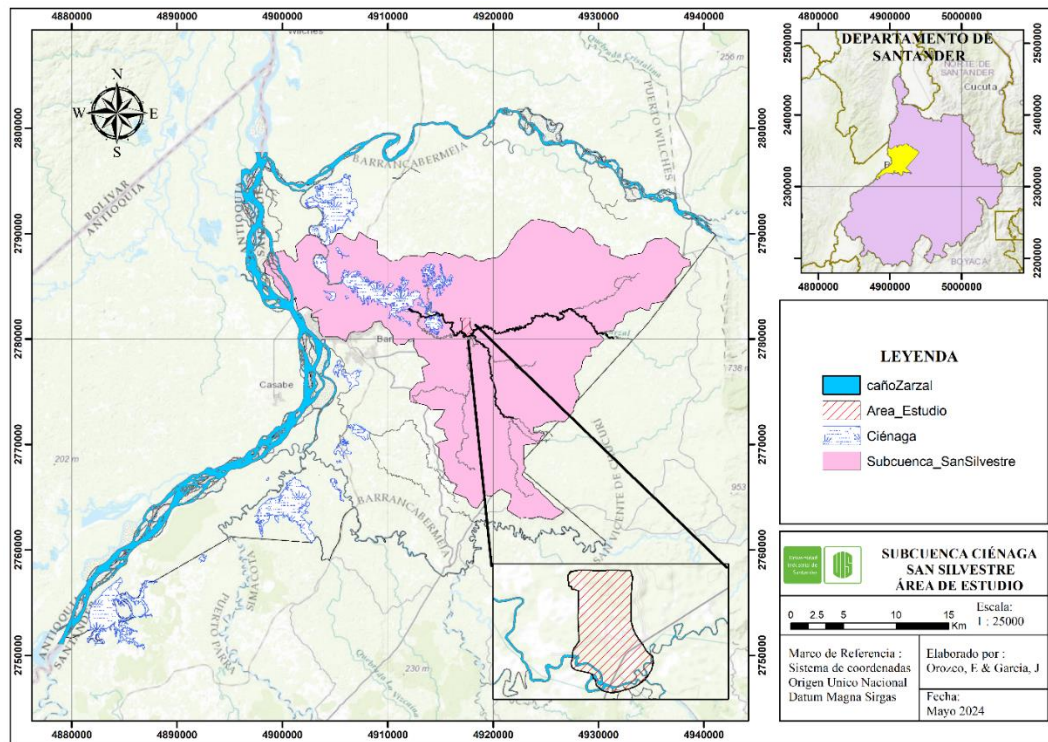
4.4.1. Subcuenca ciénaga San Silvestre

El cuerpo de agua objeto de estudio se encuentra en la subcuenca de la ciénaga San Silvestre, ubicada aproximadamente a 15 minutos del área urbana. Este cuerpo de agua tiene un área aproximada de 12 km² y una profundidad promedio de 2.06 m, con un volumen útil de

26,500,000 m³. Actualmente, esta ciénaga es la fuente de captación de agua para el consumo del Distrito (POT 2022 – 2035).

Figura 5

Subcuenca hidrográfica San Silvestre



4.4.2. Parámetros morfométricos

La subcuenca de la ciénaga San Silvestre tiene un área aproximada de 44.57 km² y se caracteriza por tener una forma alargada con una densidad de drenaje moderada. Ver Tabla 2

Tabla 2

Parámetros morfométricos de la Subcuenca San Silvestre

Parámetros Morfométricos	Subcuenca San Silvestre
Área (Km ²)	44.57
Perímetro (km)	155.45
Long. Cauce principal (km)	45.26
Long. Cauce axial (km)	40.4
Pendiente (m/m)	0.43

Parámetros Morfométricos	Subcuenca San Silvestre
Densidad de drenaje (Km ² /km)	1.67
Clase de densidad de drenaje	Moderada
Coefficiente de compacidad	1.97
Clase de compacidad	Oval oblonga a Rectangular oblonga
Característica índice de compacidad	Menos riesgo a avenidas torrenciales
Factor de forma (Kf)	0.24
Forma de la cuenca	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas torrenciales
Índice de alargamiento	1.64
Forma de alargamiento	Cuenca alargada

4.5. Geomorfología preliminar

La información preliminar de la geomorfología se toma en base al Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa de plancha 119 Barrancabermeja. (SGC, 2014).

4.5.1. Ambiente denudacional

4.5.1.1. Planicie colinada denudada (Dpcd). Superficie erosiva suavemente ondular de paisaje colinado, con pendientes inclinadas, laderas cortas planas a cóncavas donde predomina el patrón de drenaje dendrítico ah bueno (SGC, 2014). Son producto de la erosión intensa que afectó al grupo Real por la vía Bucaramanga -Barrancabermeja, en el sitio zarzal la Gloria se presenta un deslizamiento traslacional presenta erosión laminar y en surcos, también algunos flujos de tierra de pequeña dimensión.

4.5.2. Ambiente fluvial

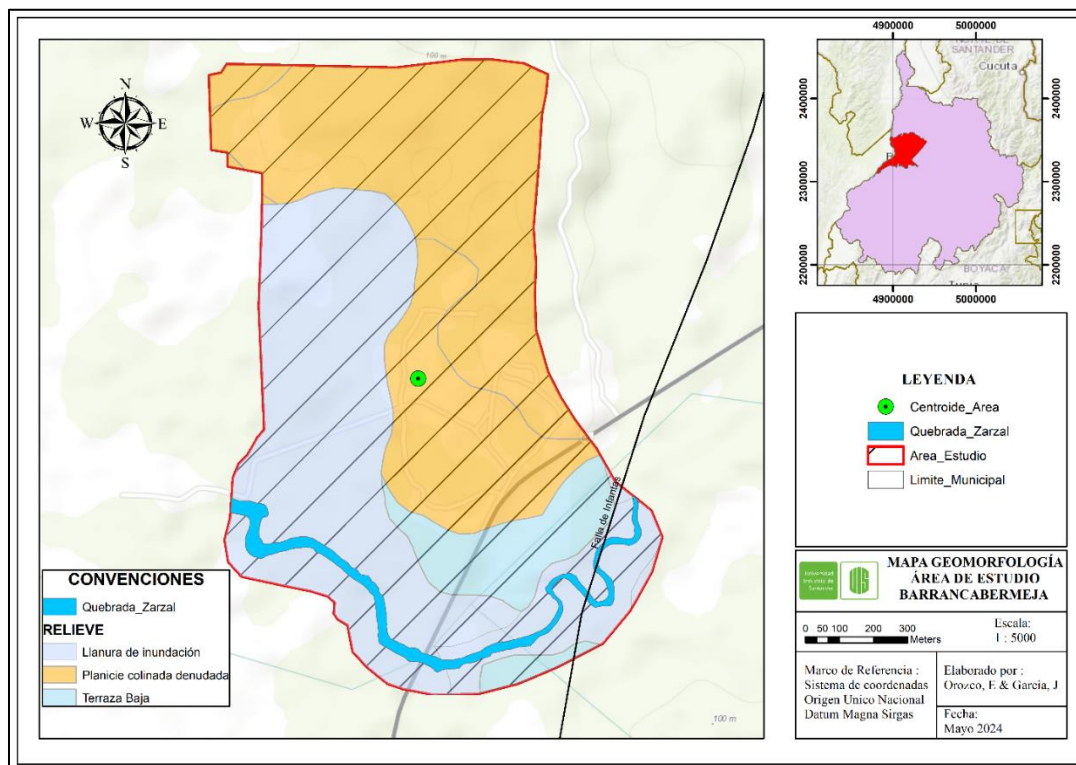
4.5.2.1. Plano o llanura de inundación (Fpi). Se presentan principalmente a ambos lados y a lo largo del curso del río Magdalena, Oponcito, Opón, Cascajales, La Colorada y las principales quebradas (Vizcaína, Peroles y El Zarzal). Estas zonas son muy estables en cuanto a

movimientos en masa, debido a su muy bajo índice de relieve relativo. Se encuentran cubiertas principalmente por pastos y en algunos sectores por matorrales y bosques.

4.5.2.2. Terrazas bajas de acumulación. Superficie plana elongada de longitud muy larga, ligeramente ondulada desarrollada sobre depósitos cuaternarios a lo largo del cauce fluvial de la quebrada. Están limitadas por escarpes que varían de altura y que no son cartografiables a la escala de trabajo.

Figura 6

Geomorfología preliminar de la zona de estudio



5. Marco teórico

5.1. Gestión del Riesgo y Zonificación de Amenazas

La gestión del riesgo es un enfoque integral y sistemático que tiene como finalidad identificar, evaluar y mitigar los peligros asociados con fenómenos naturales o inducidos por el ser humano (Lavell et al., 2012). La zonificación de amenazas es una de las principales herramientas dentro de este marco, ya que permite la identificación de áreas con diferentes niveles de riesgo basados en criterios geográficos, climatológicos y socioeconómicos (Cardona, 2001). En Colombia, un país caracterizado por su alta variabilidad geográfica y climática, la zonificación de amenazas es particularmente relevante para abordar desastres naturales como inundaciones e incendios forestales (IDEAM, 2011; Pérez & Gómez, 2017).

Las inundaciones son uno de los desastres naturales más frecuentes y destructivos, afectando tanto a áreas urbanas como rurales. En términos generales, se producen cuando las precipitaciones superan la capacidad de infiltración del suelo o el sistema de drenaje, lo que resulta en acumulación de agua en áreas bajas (Maidment, 1993). Las zonas propensas a inundaciones se caracterizan por factores como la topografía, la permeabilidad del suelo, y la capacidad de los cauces de ríos y quebradas para evacuar grandes volúmenes de agua (Pérez & Gómez, 2017).

Las inundaciones configuran un tipo de amenaza, las cuales se definen como un peligro latente relacionado con un fenómeno físico o tecnológico, presentándose en un sitio específico y para un tiempo determinado, produciendo un efecto negativo hacia las personas, el patrimonio y al medio (Wilches-Chaux, 1989 como se citó en Salgado, 2005).

Las inundaciones tienden a ocurrir con mayor frecuencia en áreas planas adyacentes a los márgenes de los ríos, conocidos como llanuras de inundación. Estas zonas forman parte del entorno fluvial, caracterizado por un relieve que facilita la acumulación y distribución del agua durante los eventos de desbordamiento de los ríos (Barrantes & Vargas, 2010). En situaciones normales, las llanuras de inundación actúan como áreas de amortiguación natural, donde las crecidas son

previsibles y las inundaciones moderadas forman parte de la dinámica natural del ecosistema fluvial (Maidment, 1993). Sin embargo, cuando las lluvias son excesivas o están asociadas a fenómenos como la remoción en masa de laderas, se pueden generar inundaciones extraordinarias, que afectan áreas más allá de las llanuras de inundación, invadiendo zonas más elevadas, como las terrazas fluviales, las cuales usualmente no están diseñadas para recibir grandes volúmenes de agua (Strahler, 1984, citado en Barrantes & Vargas, 2010).

Para la evaluación de la amenaza de inundación, es común el uso de modelos hidráulicos como HEC-RAS, que permite simular el comportamiento de los cuerpos de agua y predecir los niveles de inundación bajo diferentes escenarios de periodos de retorno (USACE, 2010). Este tipo de modelos proporciona una base técnica robusta para definir zonas propensas a inundaciones.

Los incendios forestales constituyen otra de las principales amenazas naturales en regiones tropicales, como el Magdalena Medio, debido a las prolongadas estaciones secas y a las altas temperaturas características del clima de la región (IDEAM, 2011). Estos incendios pueden tener tanto causas naturales, como los rayos, como causas antropogénicas, incluyendo la quema para la expansión agrícola, la deforestación y otras actividades humanas (Murcia et al., 2016). Los incendios forestales no solo generan graves pérdidas económicas y sociales, sino que también afectan negativamente la biodiversidad y contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, exacerbando el cambio climático (Vélez, 2000). La evaluación de la amenaza de incendios forestales se basa en el análisis de variables como la temperatura, la radiación y la cobertura vegetal. En este sentido, el Protocolo para la Zonificación de Riesgos a Incendios Forestales del IDEAM (2011) es un marco metodológico ampliamente utilizado, que establece un enfoque para la realización de mapas de zonificación basados en el análisis de estos factores.

5.2. Análisis multicriterio

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es una técnica de análisis multicriterio desarrollada por Thomas L. Saaty en la década de 1970, ampliamente utilizada para la toma de decisiones en situaciones complejas que involucran múltiples criterios. AHP facilita la descomposición de un problema en una jerarquía de decisiones, donde los objetivos, criterios y alternativas se organizan de forma estructurada, permitiendo a los tomadores de decisiones evaluar cada componente de manera sistemática y lógica (Saaty, 1980).

El AHP se basa en la idea de que los problemas de decisión pueden organizarse en niveles jerárquicos, que incluyen un objetivo general en la cúspide, seguido de criterios y subcriterios, y en la base, las alternativas a evaluar. Este enfoque jerárquico permite descomponer problemas complejos en partes más manejables y evaluarlas individualmente. Cada nivel de la jerarquía puede ser comparado en relación con el nivel superior a través de comparaciones pareadas, lo que da lugar a la asignación de pesos relativos a cada criterio o alternativa. Ver Tabla 3

Tabla 3

Escala de preferencias

Valor	Planteamiento de la importancia
1	Igual importancia
3	Moderadamente importante
5	Fuertemente importante
7	Muy fuertemente importante
9	Sumamente importante

5.3.Marco normativo de análisis de amenazas

Tabla 4

Normativa colombiana análisis de riesgos

NORMA	OBJETO
-------	--------

Decreto 2157 de 2017 Por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la ley 1523 de 2012

Ley 1523 de 2012 Política nacional de gestión del riesgo de desastres

Directiva presidencial 33 de 1989 Responsabilidades de los organismos y entidades descentralizadas orden nacional del sector público, en el desarrollo y operación del Sistema Nacional para la Prevención Atención de Desastres.

Ley 322 de 1996. Sistema nacional de Bomberos. Artículo 1. La prevención de incendios es responsabilidad de todas las autoridades y los habitantes del territorio colombiano. En cumplimiento de esta responsabilidad los organismos públicos y privados deberán contemplar la contingencia de este riesgo en los bienes inmuebles tales como parques naturales, construcciones, programas y proyectos tendientes a disminuir su vulnerabilidad.

Decreto 93 de 1998 Por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.

Decreto ley 4147 de 2011 Por el cual se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, se establece su objeto y estructura.

Ley 1523 de 2012 Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

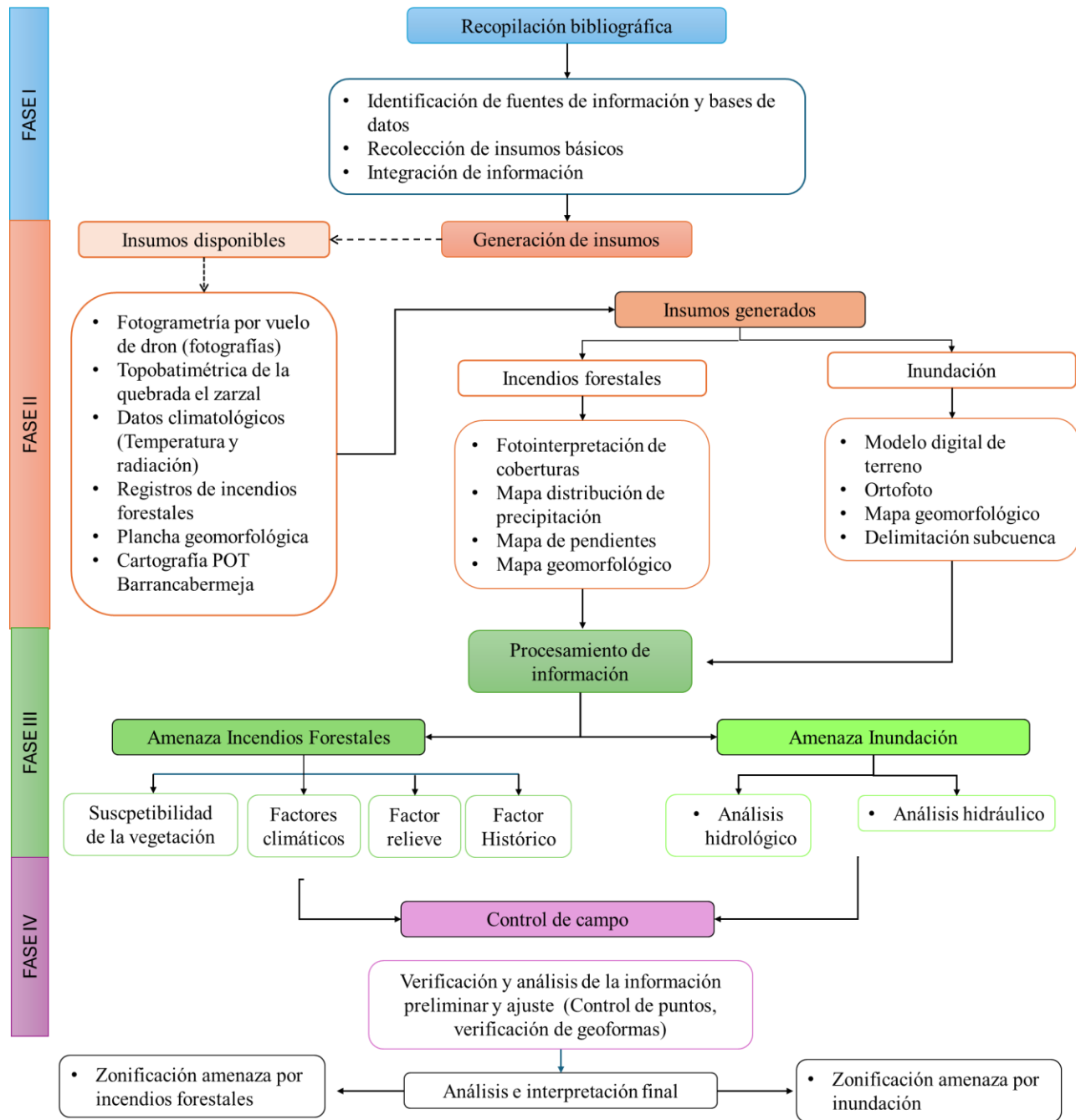
Decreto 1807 del 2014 Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones.

6. Marco metodológico

La metodología del proyecto se implementa con el fin de desarrollar y ejecutar los objetivos establecidos. Este enfoque se estructura en diversas etapas. En primera instancia, se lleva a cabo una revisión y recopilación bibliográfica de la información disponible. Posteriormente, se procede a la organización y generación de insumos básicos y temáticos, seguido del trabajo de campo. Finalmente, se completa con una fase integral que engloba la generación y análisis de los mapas de zonificación de amenazas, así como la redacción del informe final. Ver Figura 7

Figura 7

Esquema metodológico



6.1. Etapa de recopilación bibliográfica

La recopilación de información bibliográfica, datos e insumos básicos y temáticos se llevó a cabo utilizando las bases de datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales (IDEAM), así como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Barrancabermeja, junto con otros estudios más detallados relacionados con el proyecto y ajustados a la escala de trabajo proporcionados por el Centro de Investigaciones Santa Lucía del Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ).

Para la generación del mapa geomorfológico a escala 1:5000, se empleó la técnica de fotointerpretación basada en el ortomosaico, complementada con el análisis del modelo digital de elevación (DEM), el mapa de sombras y el mapa de pendientes. Estas herramientas resultaron esenciales para identificar y delimitar las geoformas preliminares mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), proporcionando un análisis espacial detallado y preciso. La leyenda y clasificación de las unidades geomorfológicas fueron elaboradas siguiendo referencias clave, como el “Glosario de Unidades y Subunidades Geomorfológicas” (Servicio Geológico Colombiano, 2012) y la “Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia” (CARVAL, Servicio Geológico Colombiano, 2012)

6.2. Generación de insumos

A partir de la información bibliográfica y cartográfica obtenida en la fase de recopilación bibliográfica se obtuvieron insumos base tales como datos de las estaciones meteorológicas, cartografía base del POT (Vías), fotografías tomadas por vuelo de dron del área de estudio y la recopilación del registro de incendios forestales dado por el cuerpo de bomberos de Barrancabermeja

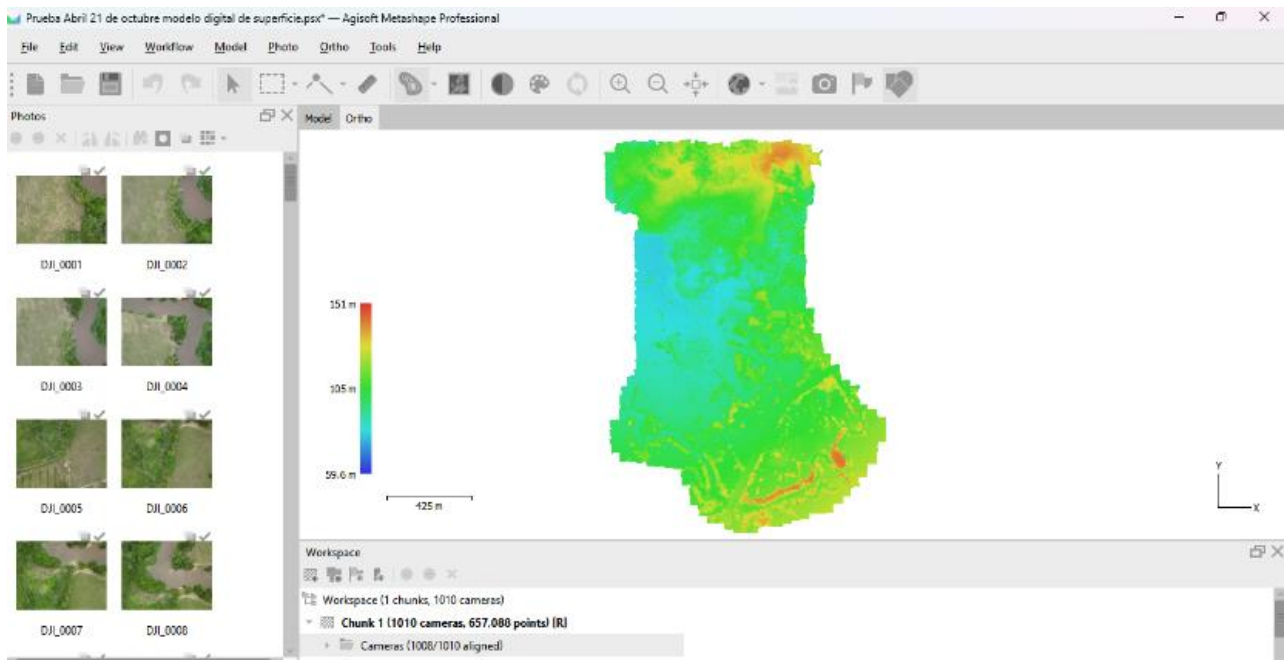
Teniendo esta información como punto de partida se procede a la generación de los insumos necesarios para el desarrollo del estudio.

6.2.1. Generación de un MDT y ortomosaico

El Instituto Universitario de la Paz, realizó unos vuelos de dron sobre el predio en estudio, una vez obtenida las fotografías se procedió a realizar el procesamiento de las imágenes de las cuales se obtuvo el modelo digital de superficie y la ortofoto, dicho vuelo se realizó a una altura de 80 metros lo que permite tener un detalle 1:5.000 o mayor.

Figura 8

Procesamiento de Modelo digital de Superficie

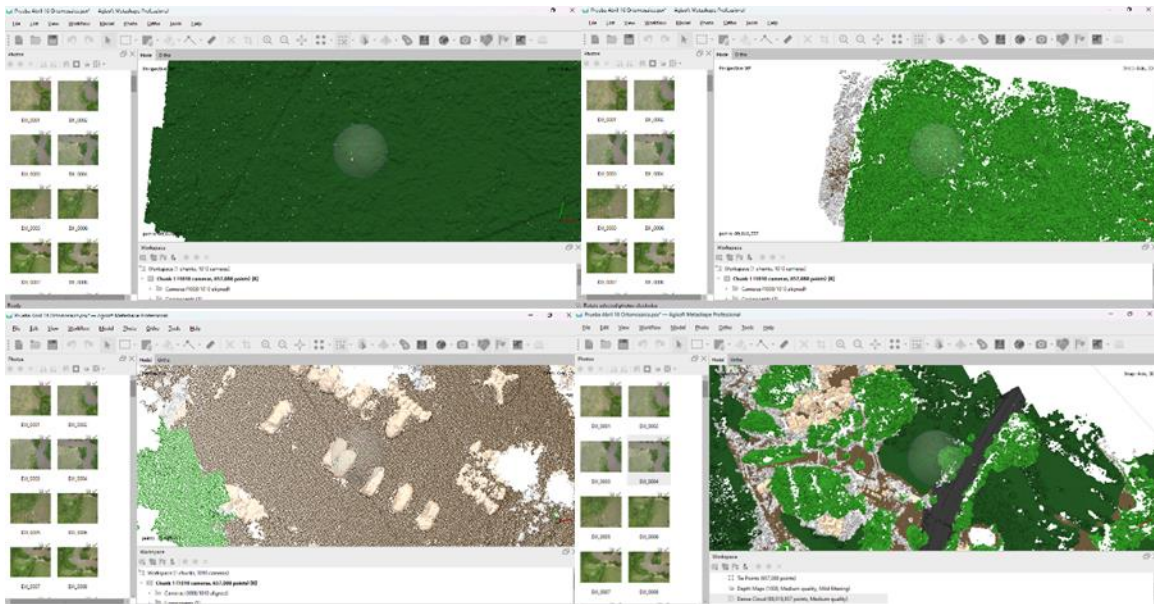


A partir de la nube de puntos generada mediante el proceso fotogramétrico, se realiza una reclasificación de los elementos en superficie con el fin de eliminar objetos que no pertenecen al terreno y asegurar la precisión del Modelo Digital de Terreno (MDT). Este procedimiento involucra la clasificación en tres categorías principales: vegetación alta, edificaciones y terreno. En la clase de vegetación alta se incluyen árboles, arbustos y otros elementos que cubren la superficie. En cuanto a las edificaciones, estas incluyen construcciones y otras estructuras artificiales que deben excluirse del modelo final para representar con fidelidad la topografía

natural., los puntos clasificados como terreno son los que se mantienen, proporcionando una representación fiel del relieve.

Figura 9

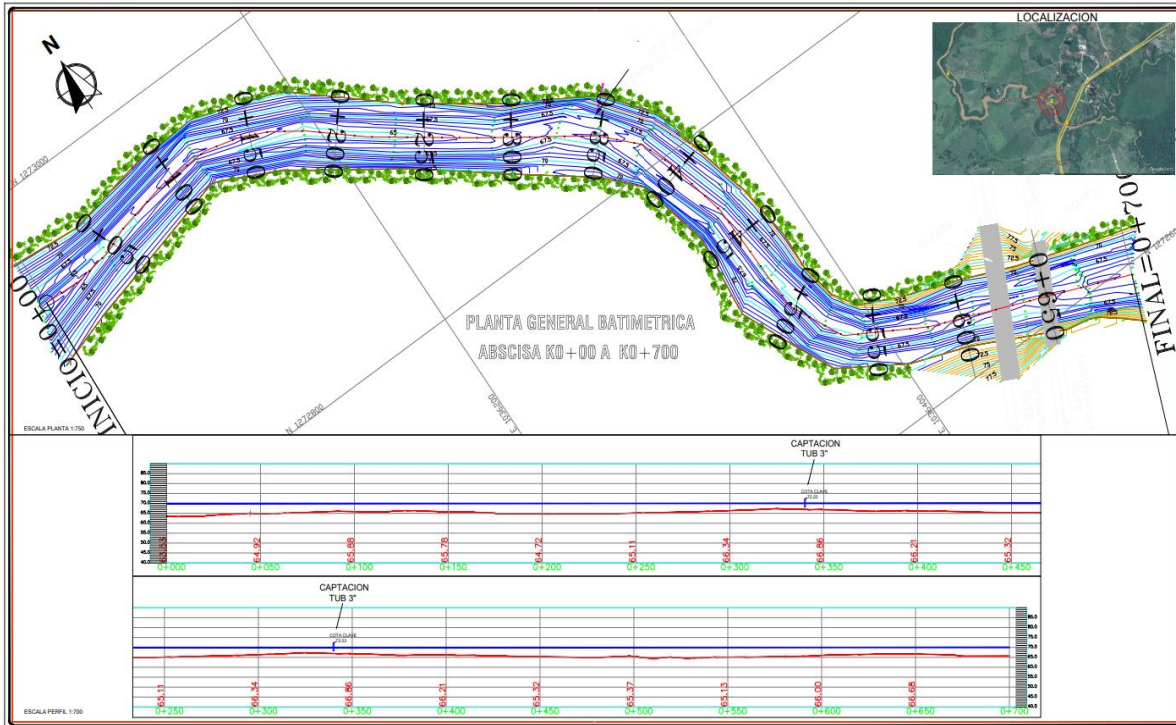
Procesamiento de Modelo digital de terreno



Finalmente, con el procesamiento de la información se obtiene un MDT preliminar, sin embargo, teniendo en cuenta el nivel del detalle para el análisis de la quebrada, se incluye e integra el análisis topobatimétrico realizado por la UNIPAZ para obtener el MDT final.

Figura 10

Topobatimétrica tramo quebrada Zarzal.

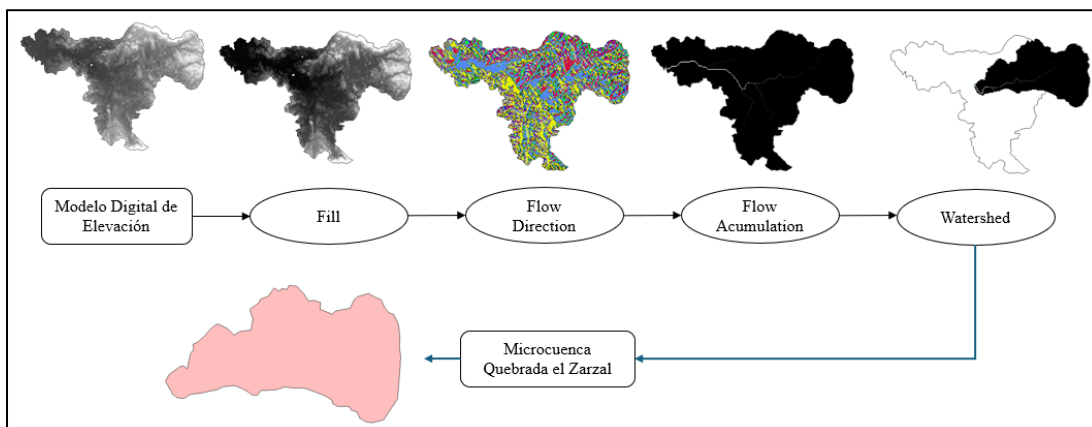


6.2.2. Delimitación de la subcuenca

Para delimitar la subcuenca, se emplean geoprocetos (Fill, Flow Direction, Flow Accumulation y Watershed) mediante un software GIS. Estos procesos utilizan el Modelo Digital del Terreno (MDE) para determinar las direcciones del flujo, las acumulaciones de los tributarios y, finalmente, definir los límites de la subcuenca de trabajo. Ver figura 10.

Figura 11

Esquema metodológico geoprocetamiento para delimitación de cuenca



6.2.3. *Generación de mapa de pendientes*

Para la realización del mapa de pendientes se partió de la información topográfica levantada con el vuelo de dron, de la cual se obtuvo un nivel de detalle 1:5.000 y se realizaron las curvas de nivel cada metro para obtener el modelo digital de terreno, que se usó para generar el mapa de pendientes y la respectiva categorización de acuerdo con la metodología del IDEAM.

Tabla 5

Clasificación de pendientes

Clasificación de pendiente (%)	Categoría
0-7	Plano o a nivel
7-12	Levemente inclinado
12-25	Moderadamente
25-75	Fuertemente inclinado
>75	Escarpada

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

6.2.4. *Generación mapa geomorfológico*

A partir del MDT y el mapa de pendientes se realizó una delimitación de geoformas del terreno, resultando en la identificación de 4 estructuras predominantes de la zona relacionada con dos ambientes principales fluvial y denudacional.

6.2.5. *Generación del mapa de coberturas*

Para realizar el análisis detallado de coberturas del suelo del presente estudio se utiliza la metodología CORINE LAND COVER (IDEAM, 2010) a partir de la fotointerpretación del Ortomosaico a escala 1:5000. Profundizando hasta cuarto nivel de detalle en la clasificación

principal de las coberturas del suelo: territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua.

6.3. Procesamiento de los datos modelado de inundación

6.3.1. Caracterización morfométrica.

La caracterización morfométrica de una cuenca es un aspecto fundamental para el análisis hidrológico e hidráulico, y se basa en una serie de parámetros geomorfológicos y topográficos que ayudan a comprender la forma y el comportamiento de esta.

6.3.1.1 Parámetros físicos. Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella. Los parámetros morfométricos de una cuenca integran un conjunto de estimaciones realizadas, en la mayoría de los casos, al iniciar un estudio hidrológico, con fines de aprovechamiento o control. Dentro de las características morfométricas principales que se obtuvieron, se encuentran:

6.3.1.1.1 Área de la cuenca (A_c). Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido, directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa normalmente en km^2 .

6.3.1.1.2 Perímetro (P). Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en m o km.

6.3.1.1.3 Longitud de cauce principal (L_c). La longitud en línea recta de la cuenca corresponde a la longitud axial de la cuenca medida sobre el cauce más largo desde la cabecera hasta el punto de salida o de cierre de la cuenca.

6.3.1.1.4 Longitud axial (L_a). Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca hasta otro punto aguas arriba, en línea recta.

6.3.1.1.5 Pendiente media (P_m). Es la relación entre las elevaciones en el punto de nacimiento de la cuenca o punto más alto y la elevación en el punto de cierre o salida de la cuenca, con la longitud en línea recta de la misma. Este parámetro da cuenta en promedio de las pendientes que puede tener el cauce principal de una cuenca.

6.3.1.1.6 Densidad de drenaje (Dd). La cantidad de ríos y quebradas que llegan o tributan al río principal dentro del área de la cuenca, se conoce como densidad de drenaje. Este parámetro relaciona la longitud de los cursos de agua, con el área total y se expresa en km/km². De manera que valores altos reflejan un fuerte escurrimiento generalmente en el rango de 3.7 a 5.6, valores en el rango 0.1 a 1.8 hacen referencia a una densidad baja, y valores en el rango de 1.9 a 3.6 reflejan una densidad moderada.

6.3.1.2 Parámetros de forma de la cuenca. Los factores geológicos son los principales responsables de dar forma a la fisiografía de una región, influyendo particularmente en la configuración de las cuencas hidrográficas. Para describir cuantitativamente la forma de una cuenca, se la compara con figuras geométricas conocidas, como el círculo, el óvalo, el cuadrado y el rectángulo.

6.3.1.2.1 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (K_c). Se trata de un indicador adimensional de la forma de la cuenca relacionando el perímetro de la cuenca con el área de un círculo igual al de la cuenca (círculo equivalente). Teniendo en cuenta la relación anterior, el índice de compacidad se define como:

$$K_c = \frac{P_{cuenca}}{2\pi \left(\frac{A_{cuenca}}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. A partir de este se define la forma de la cuenca tomando como criterio los rangos que se muestran a continuación.

Tabla 6*Índice de compacidad para la evaluación de la forma*

Clase	Rango	Descripción	Característica a eventos
Kc1	1 a 1.25	Forma casi redonda a oval redonda	Cuenca torrencial peligrosa
Kc2	1.25 a 1.5	Forma oval – oblonga	Presenta peligros torrenciales, pero no iguales a la anterior
Kc3	>1.5	Forma oval – oblonga a rectangular - oblonga	Menos riesgo a avenidas torrenciales

Nota: Adaptado en base a (Campos, 1992).

6.3.1.2.2 Factor de forma (Kf). El índice propuesto por Gravelius es la relación entre el área (Ac) de la cuenca y el cuadrado de su recorrido máximo (Lc). Este parámetro evalúa la tendencia de la cuenca a experimentar inundaciones rápidas e intensas o lentas y sostenidas, dependiendo de si su factor de forma se aproxima a valores extremos grandes o pequeños. Ver tabla 5

$$K_f = \frac{A_c}{L_c^2}$$

Tabla 7*Índice de compacidad para la evaluación de la forma*

Kf	Característica
<1	Tiende a ser alargada baja susceptibilidad a avenidas
1	Cuadrada
>1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

Nota: Adaptado de Smith y Stopp (1978).

6.3.2. Datos hidrometeorológicos

6.3.2.1 Precipitación. La precipitación es un elemento crítico en la gestión del recurso hídrico. Esta variable climática, representada por la cantidad de agua que cae en forma de lluvia durante un período específico, desempeña un papel fundamental en la modelación de eventos hidrológicos, el cálculo de caudales máximos y la evaluación de riesgos de inundaciones Para

obtener los datos de precipitación necesarios, se lleva a cabo una búsqueda en el geovisor proporcionado por el IDEAM. Dentro de este recurso, se identifican dos estaciones climatológicas relevantes para el área de estudio: la Estación APTO YARIGUIES, la Estación EL CENTRO y la estación LA PUTANA que corresponde a las estaciones que rodean la microcuenca de estudio. Se procederá a recopilar la información correspondiente a los valores máximos de precipitación diarios para poder genera las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Esta recopilación es crucial para el posterior tratamiento de datos y la generación de hietogramas, así como para la estimación de caudales en diversos periodos de retorno.

6.3.2.2. Intensidad. La intensidad de la lluvia se define como la cantidad de precipitación caída por unidad de tiempo, medida en milímetros por hora, y se determina en función de la duración de la lluvia de diseño. Según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2009), si el tiempo de concentración (T_c) de la cuenca es menor a 15 minutos, se debe considerar una duración de lluvia de diseño de 15 minutos.

Las intensidades de precipitación se obtienen generalmente a partir de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), desarrolladas específicamente para la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio. No obstante, cuando no se dispone de la información necesaria para crear estas gráficas, es necesario utilizar metodologías alternativas.

Una de las alternativas es utilizar el método simplificado propuesto por INVIAS en 2009 para el cálculo de las curvas IDF. Este método es aplicable en situaciones donde no se cuentan con datos históricos de precipitación de corta duración, conocidos como datos pluviográficos. Para Colombia, INVIAS propone la siguiente ecuación para estimar las curvas IDF.

$$I = \frac{K * T^b}{d^c}$$

Donde:

I: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h)

T: Periodo de retorno, en años

d: Duración de la lluvia de diseño, en minutos (min)

b, c: Parámetros de ajuste de la regresión

Tabla 8

Parámetros de ajuste de la regresión

Región	b	c
Andina	0.18	0.66
Calculados	0.119	0.6163

6.3.2.3 Tiempo de concentración. El tiempo de concentración se define como el intervalo necesario para que el agua de lluvia que cae en el punto más distante de la cuenca llegue al punto de salida de la cuenca, generando escorrentía directa durante un evento de precipitación. Determinar los parámetros morfométricos es esencial no solo porque proporciona una visión integral de la geometría de la cuenca hidrográfica, sino también porque estos parámetros son fundamentales para calcular el tiempo de concentración utilizando fórmulas empíricas (UNAL, 2014).

6.3.2.4. Caudales máximos. Para el cálculo de los caudales máximos se usará el método racional y la corrección del método de Témez ya que este es una técnica empírica utilizada en hidrología para calcular el caudal pico de una cuenca. Este método es especialmente útil en cuencas pequeñas y medianas donde la información hidrológica y meteorológica puede ser limitada (Temez, 1978).

La metodología comienza con la división de la cuenca en subcuencas más pequeñas para manejar la variabilidad en sus características físicas (INE, 2021). Luego, se calcula el tiempo de

concentración (T_c) considerando la longitud del cauce y la pendiente media de la cuenca. Este tiempo puede calcularse usando fórmulas específicas adaptadas a las características de la cuenca (SCS, 2021).

A continuación, se selecciona un periodo de retorno y se obtiene la precipitación de diseño (P_d) a partir de registros históricos o modelos de precipitación. Se determina el coeficiente de escorrentía (C) ponderado para la cuenca, teniendo en cuenta las diferentes superficies y su capacidad de infiltración (INE, 2021).

Finalmente, se estima el caudal máximo (Q) utilizando la fórmula modificada del Método Racional adaptada por Témez:

$$Q=0.278\times C\times I\times A$$

donde

Q es el caudal máximo en m^3/s ,

C es el coeficiente de escorrentía,

I es la intensidad de la precipitación, y

A es el área de la cuenca en km^2

6.3.3. Modelado hidráulico de inundación

6.3.3.1 Método del paso estándar. El flujo gradualmente variado, es calculado en el HEC-RAS, empleando el método del paso estándar el cuál es una de las metodologías más aplicables para el cálculo tanto de perfiles de flujo en canales prismáticos como en aquellos de geometría variada.

El método consiste en estimar la profundidad del flujo en las diferentes secciones transversales, iniciando a partir de los datos de profundidad conocidos para una sección, que en la mayoría de los casos corresponde a la sección de control. Si el flujo es subcrítico los cálculos se

inician desde aguas abajo y se desarrollan hacia aguas arriba y si es supercrítico se parte de aguas arriba continuándose hacia aguas abajo.

Se determina, por algún método de convergencia, la profundidad del flujo en una sección transversal localizada en una determinada abscisa, de forma que satisfaga las relaciones de energía en el cauce.

La metodología empleada para analizar desde el punto de vista hidráulico el arroyo, se presenta a continuación, destacando que las simulaciones del comportamiento del flujo se realizaron empleando el modelo matemático HEC-RAS (U.S. Army Corps Engineers, 2002), versión 5.0.7 ampliamente usado en Estados Unidos y Latinoamérica

El proceso inició con un análisis espacial donde se ejecutan todas las tareas relacionadas con la modelación topográfica del río mediante la implementación de la metodología de creación de geometría con HEC-GeoRAS, una extensión que opera en conjunto con GIS y HEC-RAS. Con la asistencia de esta extensión, se logra modelar las secciones transversales directamente a partir del modelo tridimensional obtenido del modelo de elevación del terreno y generar la simulación adaptando los parámetros correspondientes, condiciones iniciales y límites.

Tras completar la simulación en HEC-RAS, los datos se exportan en un formato SIG, permitiendo su visualización con la extensión HEC-GeoRAS en GIS. Una vez importados, se puede genera la superficie de inundación, incluyendo información sobre profundidad, extensión y velocidad. Esta información se presenta en un formato ráster, que puede ser reclasificado según las necesidades específicas del análisis.

Finalmente, se procede al análisis de los resultados de la simulación para evaluar e identificar áreas propensas a inundaciones, presentando las observaciones y conclusiones en el informe final.

6.4. Proceso metodológico para evaluar la amenaza por incendio forestal

La base metodológica de este trabajo corresponde al "Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal, Escala 1:100.000" (IDEAM, 2011). Esta metodología fue adaptada, modificada y enriquecida para trabajar a una escala más detallada, así, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de evaluación.

6.4.1. Susceptibilidad de la vegetación

La susceptibilidad de la cobertura vegetal se analiza mediante la identificación y valoración de la condición pirogénica de la vegetación, según lo propuesto en el modelo de combustibles desarrollado para Colombia por Páramo, 2007.

El modelo de combustibles representa la condición pirogénica de la vegetación colombiana, aspecto clave en la evaluación del comportamiento de nuestros ecosistemas frente al fuego, tanto en el inicio de un incendio, como en la modelación del comportamiento del fuego, en caso de presentarse eventos de esta índole. El modelo de combustibles desarrollado se estructuró mediante una clasificación jerárquica, conformada por los siguientes factores:

- ✓ Tipo de combustible vegetal predominante por bioma y ecosistema: tipo de cobertura vegetal y biotipo dominante.
- ✓ Duración del tipo de combustible dominante: duración en horas de cada tipo de combustible, definidos en horas de ignición (1 h, 10 h, 100 h),
- ✓ Carga total de combustibles: caracterización cualitativa dependiente de la correlación de la altura en metros, cobertura en valores porcentuales, biomasa aérea en Ton/ha).

Para obtener el mapa de susceptibilidad de la vegetación se realizó una fotointerpretación de coberturas de la tierra del Ortomosaico a escala 1:5000 para la posterior caracterización pirogénica de la cobertura vegetal, se evaluaron 3 características: La vegetación con relación al

tipo de combustible (tc), la vegetación en relación con la duración de la combustión(dc) y finalmente la carga total de combustible(ct).

6.4.1.1 Mapa de coberturas. Para realizar el análisis detallado de coberturas del suelo del presente estudio se utiliza la metodología CORINE LAND COVER (IDEAM, 2010) a partir de la fotointerpretación del Ortomosaico a escala 1:5000. Profundizando hasta cuarto nivel de detalle en la clasificación principal de las coberturas del suelo: territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua.

6.4.1.2 Susceptibilidad por tipo de combustible. Para realizar la categorización de la cobertura relacionado con el tipo de combustible se usó la metodología planteada por el IDEAM la cual establece los grupos y la categorización por nivel de cobertura. Ver tabla 16.

Tabla 9

Categorización de susceptibilidad por tipo de combustible

Tipo de combustible	Calificación	Categoría de susceptibilidad
No combustibles	0	Sin riesgo
Arboles	1	Muy Baja
Arboles/Arbustos	2	Baja
Arbustos	3	Moderada
Arbustos/hierbas- árboles/hierbas- pastos/hierbas/arbustos/arboles	3	Moderada
Hierbas/Cultivos	4	Alta
Hierbas-Pastos	5	Muy alta
Pastos	5	Muy alta

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

6.4.1.3 Susceptibilidad por duración de combustible. La duración de los combustibles se clasificó siguiendo el sistema propuesto por el IDEAM, que establece categorías basadas en la duración del proceso de combustión. Esto permite comprender la capacidad pirogénica de la

vegetación, asignando valores específicos de duración a cada tipo de combustible identificado.

Ver tabla 17.

Tabla 10

Categorización de susceptibilidad por duración de combustible

Tipo de cobertura	Duración de los combustibles	Clasificación
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	0
zonas verdes, pastos limpios	1 hora	2
Herbazales, cultivos herbáceos, pastos enmalezados	1 hora	2
Arbustal abierto, herbazal con arbustos y/o arbolado	10 horas	3
Arbustales/ mosaico con espacios naturales	10 horas	3
Bosques fragmentados	100 horas	4
Bosques densos y abiertos altos y bajos	100 horas	4

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

6.4.1.4 Susceptibilidad por Carga de combustible. Para la categorización de carga total de combustible se usó la metodología establecida por el IDEAM. La carga total de combustibles se determina a partir de los valores obtenidos mediante la suma ponderada de cuatro factores clave que afectan la combustibilidad de la vegetación: altura, cobertura (proyección de la vegetación en el suelo), biomasa aérea total y contenido de humedad de la vegetación (Páramo, R. Gabriel, 2011). Ver tabla 18.

Tabla 11

Categorización de susceptibilidad por carga de combustible

Tipo de cobertura	Carga total de los combustibles	Clasificación
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	0
zonas verdes, pastos limpios	1 ton/ha	2
Herbazales, cultivos herbáceos, pastos enmalezados	1-50 ton/ha	2
Arbustal abierto, herbazal con arbustos y/o arbolado	50-100 ton/ha	3
Arbustales	50-100 ton/ha	3
Bosques fragmentados	>100 ton/ha	4
Bosques densos y abiertos altos y bajos	>100 ton/ha	4

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

Ya con la evaluación de las 3 variables mencionadas se obtiene la susceptibilidad de la vegetación mediante la ecuación y algebra de mapas:

$$Suscv_{eg} = CAL(tc) + CAL(dc) + CAL(ct)$$

Finalmente, después de usar la ecuación se requiere normalizar el valor de acuerdo con las 5 categorías de amenaza establecidas para dicha normalización se usa la siguiente ecuación

$$Factor\ normalizado = \frac{(x - Min)}{(Max - Min)} * 5\ categorias$$

Donde:

X, valor obtenido de la ecuación 1 para una cobertura en específico del área de estudio

Min, valor mínimo de la serie de valores obtenidos

Max, valor máximo de la serie de datos obtenidos

Adicionalmente se define la amplitud del rango mediante la distribución de frecuencias mediante:

$$Amplitud = \frac{(Max_{norm} - Min_{norm})}{n} * 5\ categorias$$

Donde:

Min_{norm} , valor mínimo normalizado de la serie de valores obtenidos

Max_{norm} , valor máximo normalizado de la serie de datos obtenidos

n, número total de datos obtenidos

Por último, se realiza la clasificación de la susceptibilidad con los valores finales de acuerdo con la categorización de la siguiente tabla.

Tabla 12

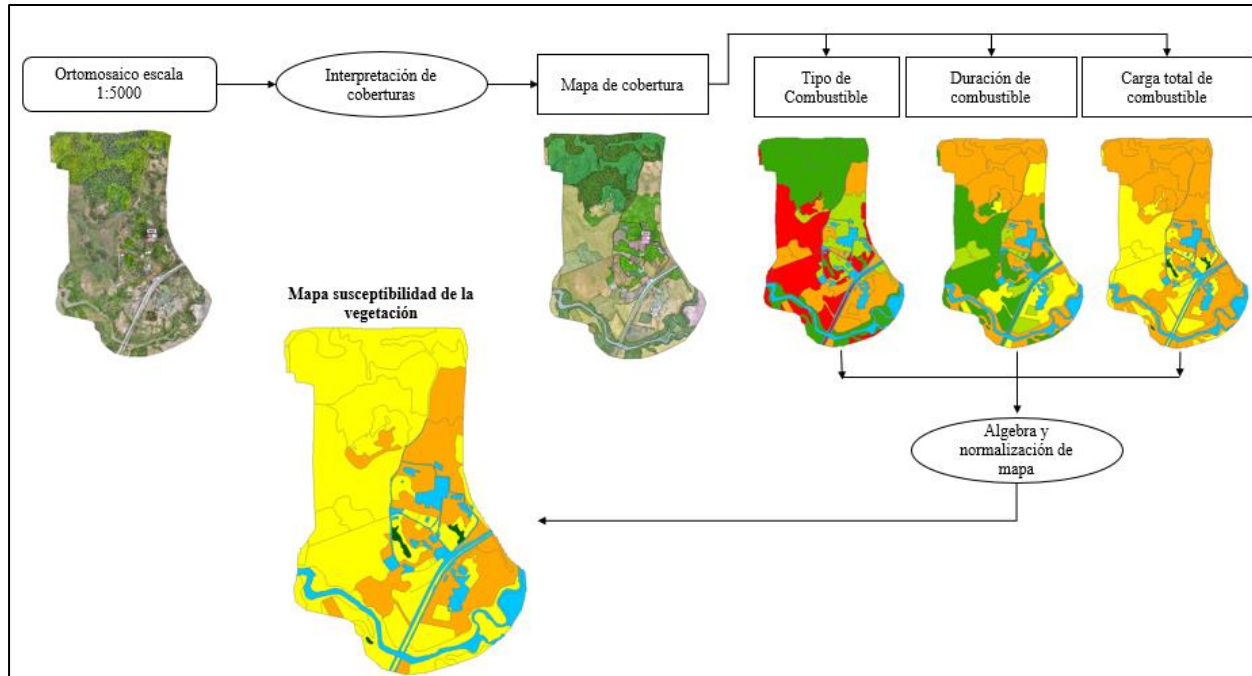
Categorización de susceptibilidad por carga de combustible

Calificación	Categoría de susceptibilidad
0	Sin amenaza
1	Susceptibilidad Muy baja
2	Susceptibilidad Baja
3	Susceptibilidad Moderada
4	Susceptibilidad Alta
5	Susceptibilidad Muy alta

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

Figura 12

Esquema metodológico caracterización de susceptibilidad de Coberturas vegetal



6.4.2. Factores Climáticos

El clima es uno de los factores de fundamental importancia en la generación y propagación de los incendios forestales ya que determina la duración y la severidad de las estaciones secas y calurosas en un área geográfica determinada, lo cual influye directamente sobre la humedad y la cantidad de combustible disponible de fácil ignición y con mayor probabilidad de ser afectado por el fuego (lo que determina la susceptibilidad de la vegetación), ya que el contenido de humedad de los tejidos vegetales (influida directamente por la precipitación, humedad del suelo y temperatura ambiental) hace que la vegetación sea más o menos resistente a la afectación del fuego. Estas razones posicionan las condiciones climáticas como factor indispensable para la evaluación de la amenaza y por ello se considera necesario generar una calificación de los factores climáticos bajo las condiciones normales de precipitación y temperatura imperantes en el país. (adaptado de CONIF-MAVDT, 2008, Páramo, 2010)

Para la evaluación de los factores climáticos se tienen en cuenta la información meteorológica obtenida del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM, de la cual se extrajo información de precipitación, temperaturas radiación y velocidad del viento en sus valores medios mensuales, para así obtener las medias anuales. Estos datos fueron analizados en un periodo comprendido entre 2000 y 2023 correspondiendo a 23 años de información. Tabla 20

Tabla 13

Estaciones meteorológicas

ID	Estación	Código
1	AEROPUERTO YARIGUIES AUT	23155030
2	EL CENTRO	23155040
3	CHUCURI	23130010
4	LA PUTANA	24050070
5	ALBANIA	24050110
6	SABANA DE TORRES	23180070
7	AGUASCLARAS	24060040
8	HACIENDA LAS BRISAS	24065010
9	PUERTO WILCHES	23180020
10	EL CARMEN	23145020
11	VILLA LEIVA	23185010

Nota: Adaptado IDEAM, 2024

Para la caracterización de amenaza por condiciones climáticas se tiene en cuenta la categorización realizada por el IDEAM, dicha caracterización se muestra en la Tabla 14

Tabla 14

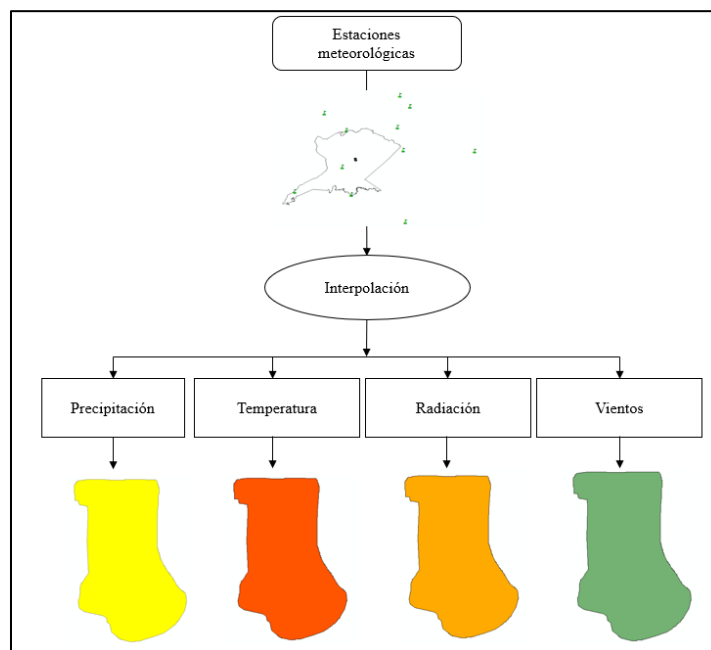
Categorización de amenaza por condiciones climáticas

Precipitación media anual (mm)	Temperatura media anual (°C)	Radiación media anual (Kwh/m2/año)	Velocidad media anual (m/s)	Clasificación	Amenaza
>7000	<6°	<3.0	<2.0	1	Muy baja
3000-7000	6-12°	3.0-4.0	2.0-3.0	2	Baja
2000-3000	12-18°	4.0-5.0	3.0-4.0	3	Moderada
1000-2000	18-24°	5.0-6.0	4.0-5.0	4	Alta
0-1000	>24°	>6.0	>5.0	5	Muy alta

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

Figura 13

Esquema metodológico caracterización de amenaza por condiciones meteorológicas



6.4.3. Factor relieve.

Para la realización del mapa de pendientes se partió de la información topográfica levantada con el vuelo de dron, de la cual se obtuvo un nivel de detalle 1:5.000 y se realizaron las curvas de nivel cada metro para obtener el modelo digital de elevación, que se usó para generar el mapa de pendientes y la respectiva categorización de acuerdo con la metodología del IDEAM. Ver tabla 22

Tabla 15

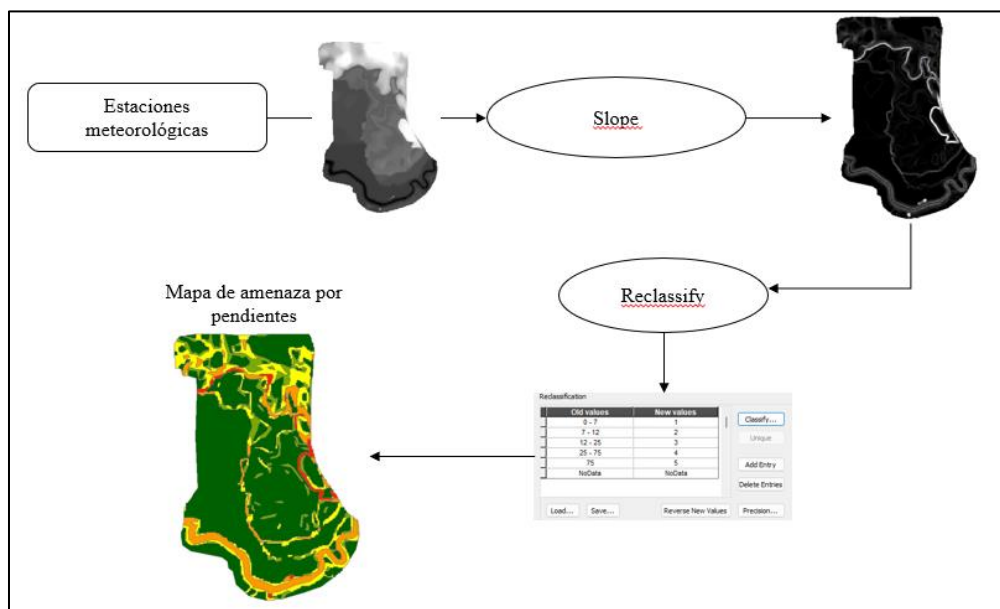
Categorización de amenaza por Factor Relieve

Clasificación de pendiente (%)	Calificación de amenaza	Categoría de amenaza
0-7	1	Muy baja
7-12	2	Baja
12-25	3	Moderada
25-75	4	Alta
>75	5	Muy alta

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

Figura 14

Esquema metodológico caracterización de amenaza por factor relieve



6.4.4. Accesibilidad

La accesibilidad se considera parte de la amenaza a incendios de la cobertura vegetal, debido a que es un factor determinante en la probabilidad de que la población pueda acceder a las áreas con coberturas vegetal susceptibles y generar focos de incendios. Este factor se puede evaluar desde dos perspectivas, la primera expresada como la densidad vial, que corresponde a los kilómetros de vía por unidad de superficie en un área determinada y, la segunda, expresada como cercanía de las vías a coberturas vegetales susceptibles de ser incendiadas. (IDEAM, 2011).

Tabla 16

Categorización de amenaza por Factor Relieve

Distancia a la vía (m)	Calificación de amenaza	Categoría de amenaza
0-500	1	Muy baja
500-1000	2	Baja
1000-1500	3	Moderada
1500-2000	4	Alta
>2000	5	Muy alta

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

6.4.5. Factor histórico.

Es importante conocer el comportamiento de los eventos asociados a incendios en la historia, su análisis permite generar un parámetro cualitativo de amenaza a nivel regional de acuerdo con la frecuencia con la que ocurren dichos eventos. Para la obtención del registro histórico se solicitó información al cuerpo de bomberos del distrito de Barrancabermeja, dicha información se usó para realizar el cálculo del índice de frecuencia representado por la ecuación

$$Fi = \frac{1}{a} \sum_{1}^a ni$$

Donde:

Fi, frecuencia de incendios

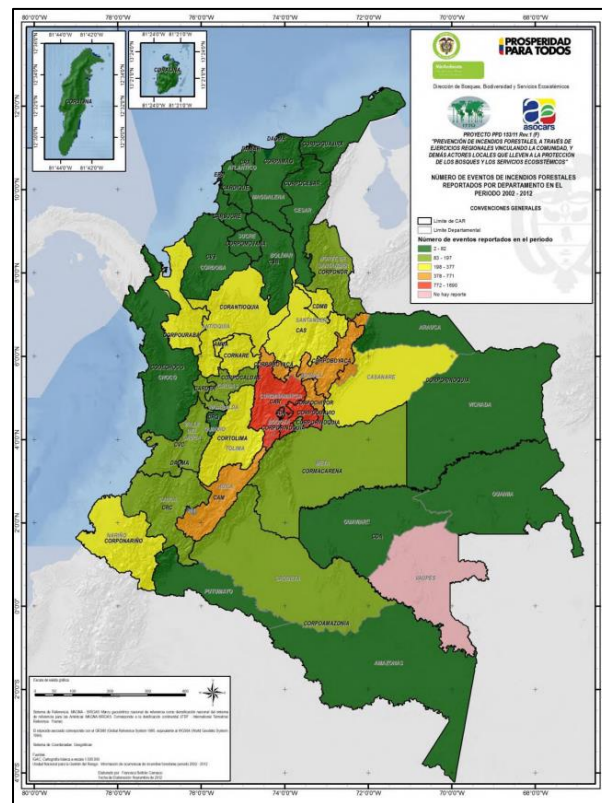
a, número de años

ni, número de incendios de cada año

Adicionalmente se realizó una normalización del Índice de frecuencia obtenido y de los datos presentados por la UNGRD, el cual establece los datos de incendios registrados por las corporaciones y bomberos del país para el año 2012 en donde se establece la clasificación del número de eventos entre el año 2002 y 2012.

Figura 15

Número de eventos de incendios forestales reportados por departamentos en el periodo 2002-2012



Nota: Adaptado MADS, 2012. Realizado con datos de la UNGRD

Finalmente se realiza la suma ponderada con los pesos establecidos para obtener el valor de la amenaza por incendios forestales.

$$\begin{aligned} \text{Amenaza} = & \textit{suscep de la vegetación} * (0.30) + \textit{precipitación} * (0.15) \\ & + \textit{Temperatura} * (0.15) + \textit{pendientes} * (0.10) + \textit{Frecuencia} * (0.05) \\ & + \textit{Accesibilidad} * (0.05) + \textit{Vientos} * (0.10) + \textit{radiación solar} \\ & * (0.10) \end{aligned}$$

7. Resultados

7.1 Modelo digital del terreno y ortomosaico

Gracias a los estudios de fotogrametría realizados con vehículos aéreos no tripulados (RPAS), facilitados por el Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ) a través de su Centro de Investigaciones Santa Lucía, se obtuvieron los productos utilizando el software Agisoft Metashape. A partir de la densa nube de puntos generada durante el procesamiento, se generaron varios insumos clave para el análisis geomorfológico y topográfico del área de estudio. Entre estos productos se destacan el modelo digital de superficie (MDS), que proporciona una representación tridimensional detallada del terreno incluyendo edificaciones y vegetación (Figura 16), y el modelo digital del terreno (MDT), que muestra la elevación del suelo libre de objetos superficiales. Asimismo, se generó un ortomosaico de alta resolución, una imagen compuesta y corregida geométricamente que permite observar el área de estudio con una escala de detalle 1:5000. Ver

Figura 17

Figura 16

Modelo Digital de Superficie

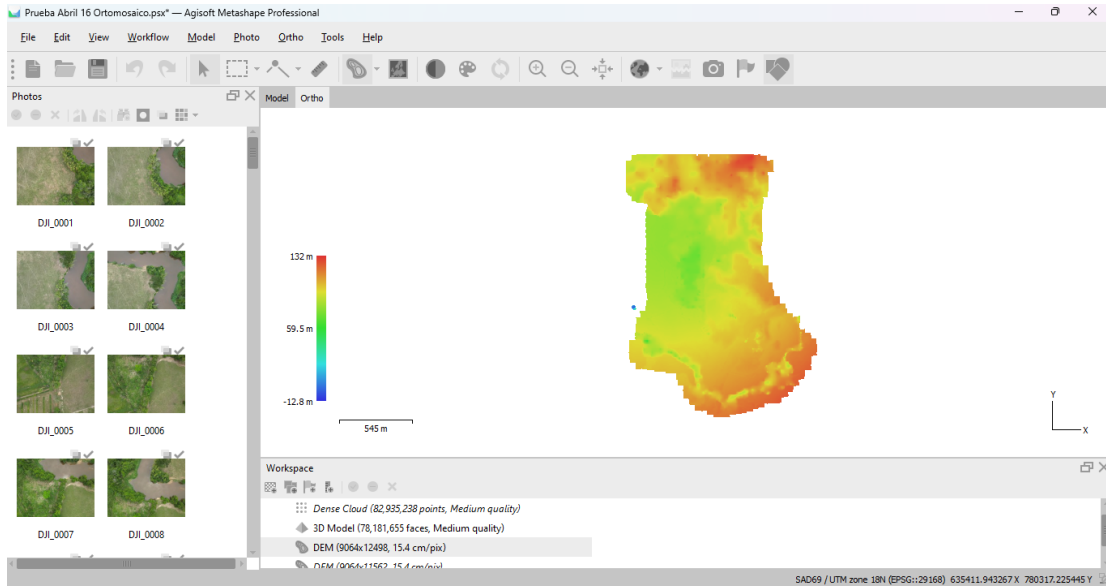


Figura 17

Ortomosaico

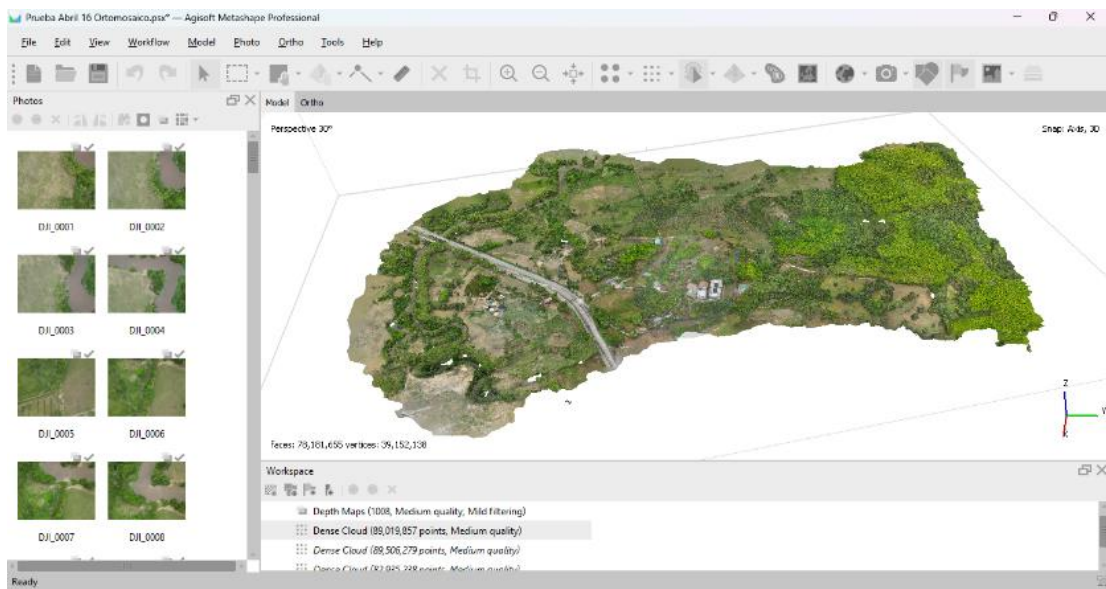
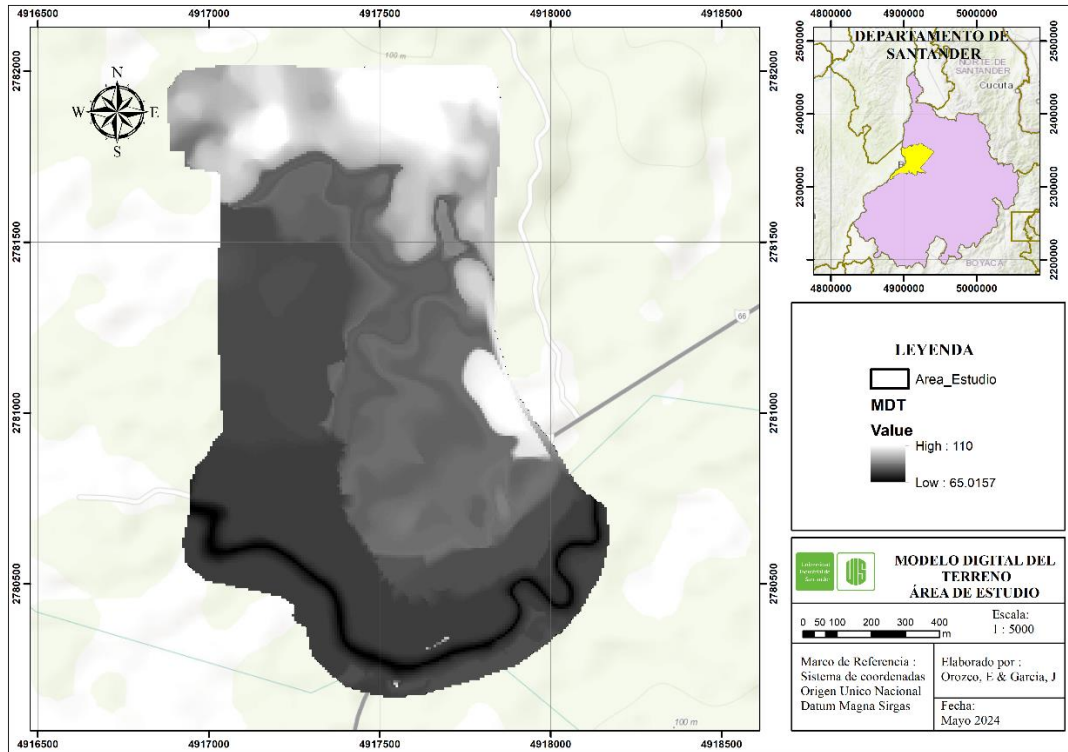


Figura 18

Modelo Digital de terreno



7.2 Geomorfología

El análisis de la geomorfología presentado se toma en base al Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa de plancha 119 Barrancabermeja adicionalmente, se hace una interpretación del modelo digital del terreno con control en campo para identificar las geoformas del área de estudio a la escala de análisis. Ver figura 8

7.2.1 Ambiente denudacional

7.2.1.1 Planicie colinada denudada de pendiente media (Dpcdpm). Superficie ondulada de paisaje colinado, con pendientes inclinadas entre 7 y 12%, laderas cortas planas a cóncavas, representa el 28% del área de estudio.

7.2.1.2 Planicie colinada denudada de pendiente baja (Dpcdpb). Superficie erosiva suavemente ondulada de paisaje colinado, con pendientes con inclinación baja, laderas largas planas, representa el 22.3% del área total.



7.2.2 *Ambiente fluvial*

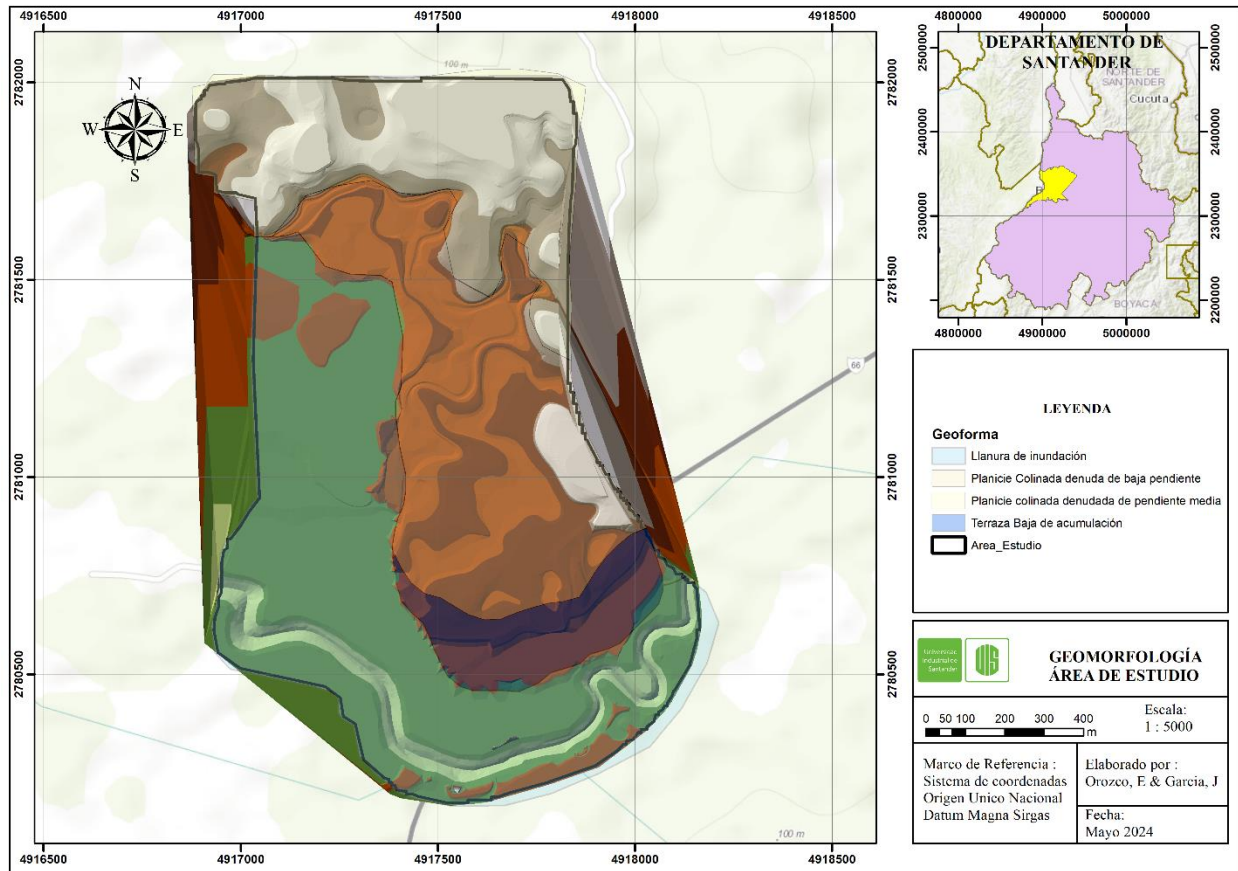
7.2.2.1 Plano o llanura de inundación (Fpi). Area región plana con ligeras ondulaciones, inundable en épocas de alta pluviosidad. Se presentan principalmente a ambos lados y a lo largo del curso de la quebrada El Zarzal. Estas zonas son muy estables en cuanto a movimientos en masa, debido a su muy bajo índice de relieve relativo. Se encuentran cubiertas principalmente por pastos y en algunos sectores por matorrales y bosques.



7.2.2.2 Terrazas bajas de acumulación (Fta). Superficie plana elongada de longitud muy larga, ligeramente ondulada desarrollada sobre depósitos cuaternarios a lo largo del cauce fluvial de la quebrada. Están limitadas por escarpes que varían de altura y que no son cartografiables a la escala de trabajo.

Figura 19

Geomorfología de la zona de estudio



7.3 Zonificación de amenaza por inundación.

7.3.1. Morfometría microcuenca el Zarzal

Se localiza en el sector nororiental del municipio de Barrancabermeja, abarcando un área aproximada de 194.75 km². Su cauce principal es la Quebrada El Zarzal, que tiene una longitud de 31.7 km desde su nacimiento en el municipio de San Vicente de Chucurí hasta su desembocadura

en el caño San Silvestre. El factor de forma es de 0.19, un índice bajo que indica que la microcuenca posee cierta susceptibilidad a la ocurrencia de crecidas. El coeficiente de compacidad sugiere una forma oval oblonga–redonda, lo que también indica una clara tendencia a las crecidas. Los índices de alargamiento corroboran este criterio, señalando que se trata de una cuenca alargada.

Tabla 17

Características morfométricas de la microcuenca de la quebrada el Zarzal

Cuenca	Area Km ²	Perímetro Km	Longitud del cauce principal Lc (km)	Longitud axial La (km)	Ancho Max Km ²	Kc	Kf	Ia
Microcuenca El Zarzal	194.75	71.02	31.7	29.69	10.86	1.44	0.19	2.92

7.3.1.1Tiempo de concentración. El tiempo de concentración se define como el intervalo necesario para que el agua de lluvia que cae en el punto más distante de la cuenca llegue al punto de salida de la cuenca, generando escorrentía directa durante un evento de precipitación. Determinar los parámetros morfométricos es esencial no solo porque proporciona una visión integral de la geometría de la cuenca hidrográfica, sino también porque estos parámetros son fundamentales para calcular el tiempo de concentración utilizando fórmulas empíricas (UNAL, 2014).

La literatura sugiere que, para asignar un tiempo de concentración a una cuenca, se debe calcular el promedio de los valores obtenidos de al menos cinco de estas fórmulas empíricas. Se recomienda descartar los resultados de las fórmulas que produzcan valores extremos para obtener una estimación más precisa y representativa (Vélez & Botero, 2011).

Tabla 18

Expresiones empíricas para la estimación de tiempos de concentración

Autor	Ecuación	Tc (h)
Kirpich	$T_c = 0.06628 \cdot \left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.77}$	13.500802
Témez	$T_c = 0.3 \cdot \left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.76}$	15.4143883
Johnstone Cross	$T_c = 0.4624 \cdot \left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.5}$	12.6645459
Giandotti	$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{25.3 \cdot \sqrt{SL}}$	66.5188688
SCS Rancer	$T_c = 0.947 \cdot \left(\frac{L^3}{S^{0.5}}\right)^{0.5}$	950.471004

Nota: L corresponde a la longitud del cauce principal, S corresponde a la pendiente media de la cuenca y A hace referencia al área de la cuenca.

Teniendo en cuenta lo dicho por Vélez y Botero se usa el valor correspondiente al método de Témez teniendo en cuenta los valores extremos y las condiciones de la cuenca.

7.3.2. Análisis meteorológico

7.3.2.1 Precipitación Máxima en 24 Horas. La precipitación es un elemento crítico en la gestión del recurso hídrico. Esta variable climática, representada por la cantidad de agua que cae en forma de lluvia durante un período específico, desempeña un papel fundamental en la modelación de eventos hidrológicos, el cálculo de caudales máximos y la evaluación de riesgos de inundaciones. En este contexto, presentamos el análisis de precipitación obtenido a partir de los datos históricos de la estación con el objetivo de comprender y caracterizar las pautas de precipitación en esta región. A continuación, se presentarán los análisis para las estaciones Apto Yarigués, El Centro y La Putana.

Tabla -19*Registro histórico de incendios de vegetación en zona rural de Barrancabermeja*

Nombre	Categoría	altitud	latitud	longitud	Datos Faltantes
--------	-----------	---------	---------	----------	-----------------

AEROPUERTO YARIGUIES AUT [23155030]	SP	126	2776432.3 4	4910725.94	1%
CENTRO EL [23155040]	CO	114	2757987.2 3	4915502.11	8%
PUTANA LA [24050070]	PM	150	2787523.8 7	4942542.04	6%

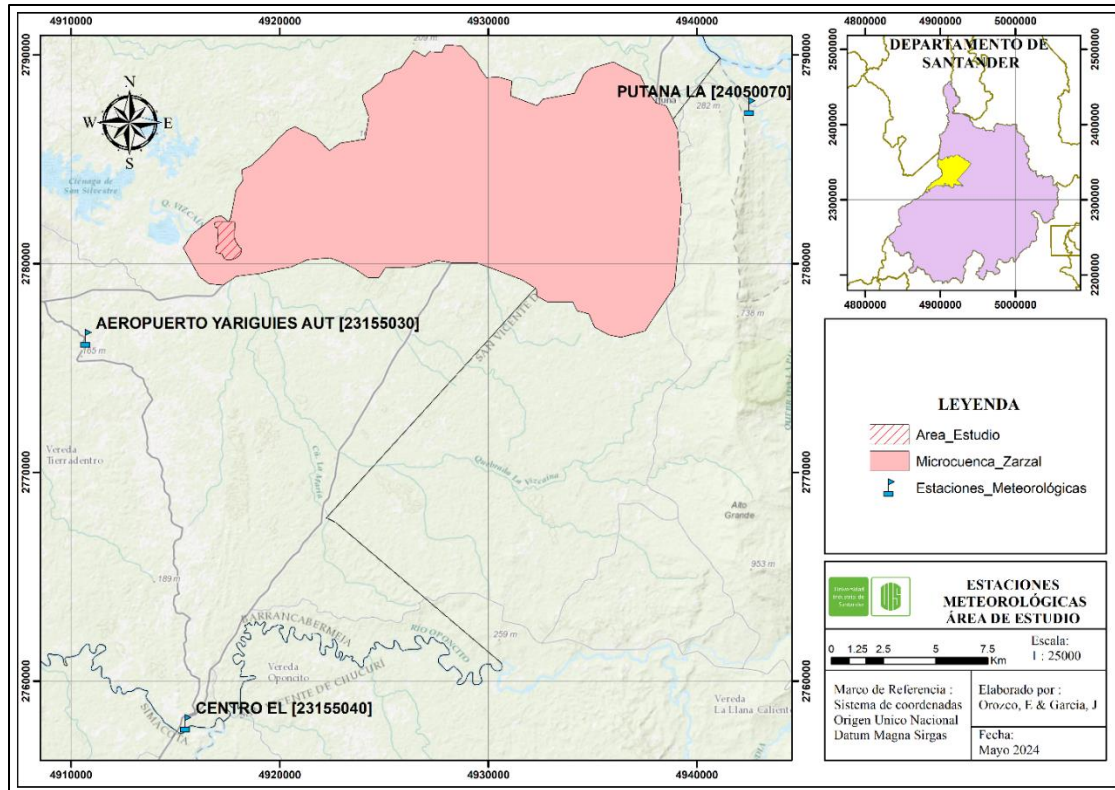
Nota: Adaptado Información estaciones meteorológicas IDEAM.

El análisis de la información se realiza para una temporalidad de 20 años dado que es la fecha para la cual se tiene registros pluviométricos diarios lo que equivaldría a un total de 21900 días pluviométricos, equivalentes a un promedio de 7300 datos por estación.

Las estaciones presentan un faltante de información en algunos meses y años específicos. En el peor de los casos, la estación El Centro tiene un 8% de datos faltantes, mientras que la estación Yariguíes tiene un faltante del 1%. Teniendo en cuenta que el análisis considera el peor escenario y que se priorizó el tratamiento de los valores máximos, este faltante de información no afecta significativamente los resultados obtenidos.

Figura 20.

Estaciones meteorológicas zona de estudio

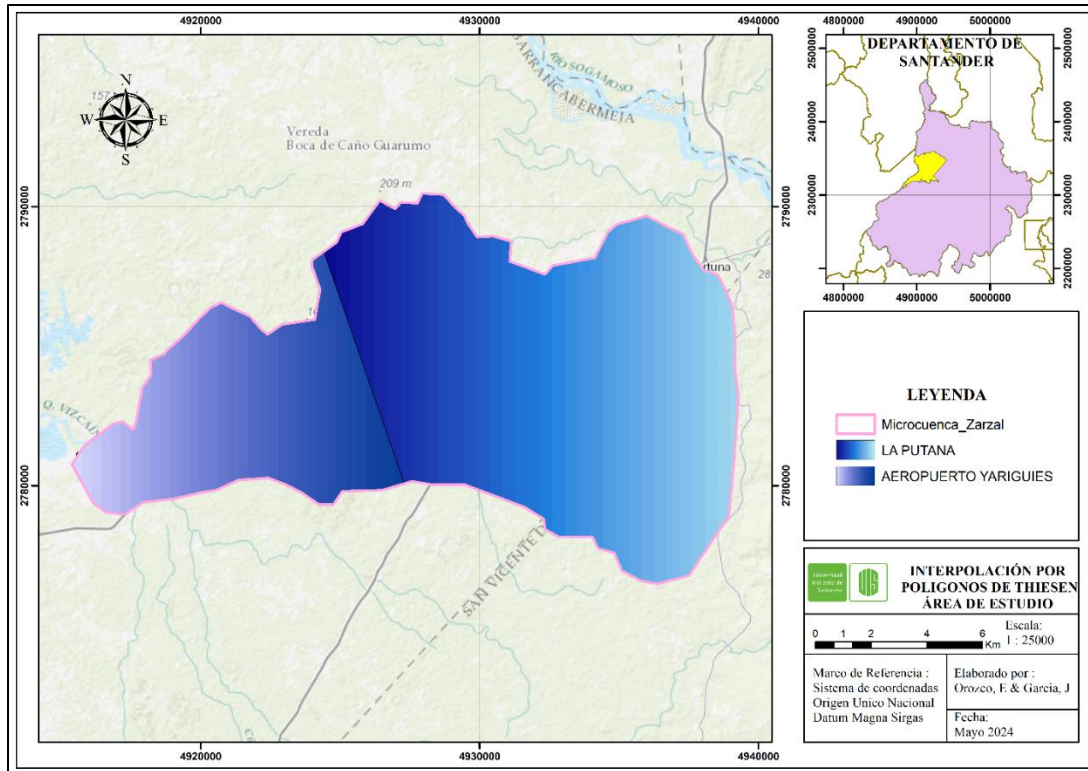


De acuerdo con la información recopilada de las 3 estaciones, se procesaron los valores históricos para obtener los datos máximos en 24 de cada una de las estaciones.

Adicionalmente, se realizó una aproximación de la influencia de las estaciones meteorológicas utilizando el método de Thiessen. Este método consiste en crear polígonos alrededor de cada estación meteorológica, de manera que cualquier punto dentro de un polígono se considera influenciado únicamente por la estación correspondiente. Es una técnica comúnmente utilizada para la estimación de precipitaciones medias en una cuenca a partir de datos de estaciones dispersas (Thiessen, 1911). En la figura se muestra que la mayor influencia de los datos corresponde la estación La Putana, para las estaciones Yariguíes y El Centro en relación de usar la mayor cantidad de datos disponibles se distribuyó la influencia en porcentajes iguales.

Figura 21.

Distribución de influencia de estaciones meteorológicas por método de Thiessen.



7.3.2.2 Curva de intensidad, duración y frecuencia-IDF. Para el cálculo de las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF), se emplearon los datos de recopilados de las 3 estaciones presentadas en la Tabla 17.

Una vez seleccionada la serie de datos idónea para la estimación de las curvas IDF, se procedió a utilizar los valores máximos de precipitación obtenidos anualmente desde 2000 hasta 2019 para un registro total de 20 años. Posteriormente, se planteó el escenario crítico establecido por el máximo valor de la precipitación máxima en un período de 24 horas.

7.3.2.3 Intensidad. La intensidad de la lluvia se define como la cantidad de precipitación caída por unidad de tiempo, medida en milímetros por hora, y se determina en función de la duración de la lluvia de diseño. Según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2009), si el tiempo de concentración (T_c) de la cuenca es menor a 15 minutos, se debe considerar una duración de lluvia de diseño de 15 minutos.

Las intensidades de precipitación se obtienen generalmente a partir de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), desarrolladas específicamente para la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio. No obstante, cuando no se dispone de la información necesaria para crear estas gráficas, es necesario utilizar metodologías alternativas.

Una de las alternativas es utilizar el método simplificado propuesto por INVIAS en 2009 para el cálculo de las curvas IDF. Este método es aplicable en situaciones donde no se cuentan con datos históricos de precipitación de corta duración, conocidos como datos pluviográficos. Para Colombia, INVIAS propone la siguiente ecuación para estimar las curvas IDF.

$$I = \frac{K * T^b}{d^c}$$

Donde:

I: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h)

T: Periodo de retorno, en años

d: Duración de la lluvia de diseño, en minutos (min)

b, c: Parámetros de ajuste de la regresión

Tabla 20

Parámetros de ajuste de la regresión

Región	b	c
Andina	0.18	0.66
Calculados	0.119	0.6163

Nota: se realizó el cálculo de estos parámetros mediante regresiones logarítmicas, mostrando que no difiere en gran manera con los valores establecidos para las zonas de Colombia, dado que el área de estudio es una zona puntual se utiliza el valor calculado.

Después se obtienen los valores de intensidad de precipitación por duración de acuerdo con la distribución de polígonos de Thiessen.

Tabla 21

Intensidad de precipitación por Duración de lluvia y Frecuencia de esta distribuida por polígonos de Thiessen

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) por Periodo de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	1440	5.8130	6.8888	7.6011	8.5011	9.1688	9.8315	11.3630
18 hr	1080	7.0531	8.3584	9.2227	10.3147	11.1248	11.9289	13.7871
12 hr	720	9.3008	11.0221	12.1618	13.6018	14.6701	15.7304	18.1808
8 hr	480	11.8585	14.0532	15.5063	17.3423	18.7043	20.0563	23.1805
6 hr	360	14.1837	16.8087	18.5467	20.7427	22.3718	23.9889	27.7257
5 hr	300	15.9043	18.8478	20.7967	23.2591	25.0858	26.8990	31.0892
4 hr	240	18.1365	21.4931	23.7155	26.5235	28.6066	30.6743	35.4526
3 hr	180	21.3918	25.3509	27.9721	31.2841	33.7411	36.1800	41.8158
2 hr	120	27.2048	32.2397	35.5733	39.7852	42.9099	46.0115	53.1788
1 hr	60	41.8535	49.5995	54.7281	61.2080	66.0152	70.7869	81.8136

Finalmente se construye la gráfica IDF a partir de los datos procesados. La gráfica muestra el comportamiento típico de los eventos asociados a lluvias intensas, estos eventos de mayor periodo mayores intensidades de lluvia están relacionados con periodos de retorno mayores lo que implica que los eventos más intensos son menos frecuentes.

Tabla 22

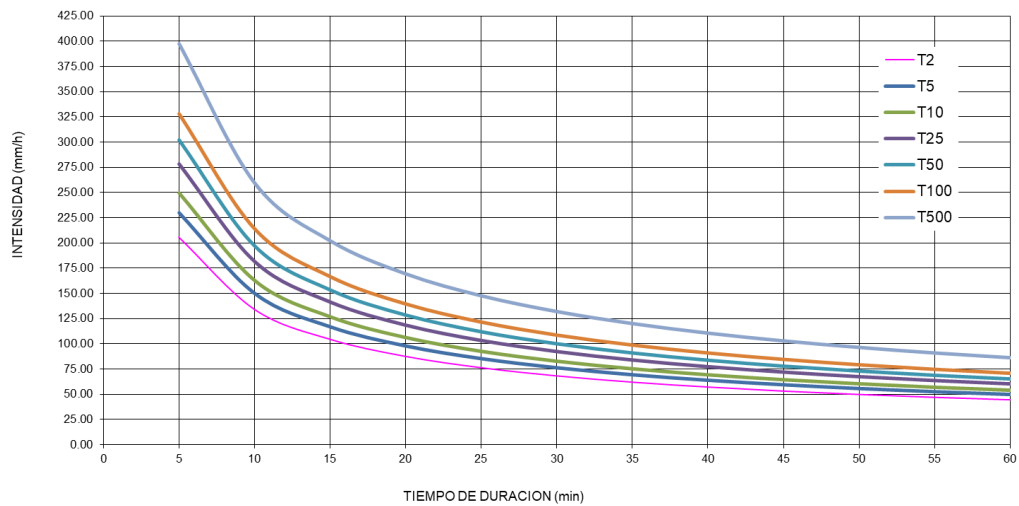
Tabla intensidades - Tiempo de duración

Frecuencia	Duración en minutos											
años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	211.41	137.90	107.41	89.95	78.40	70.06	63.71	58.68	54.57	51.14	48.22	45.70

5	236.07	153.99	119.94	100.45	87.54	78.23	71.14	65.52	60.93	57.10	53.84	51.03
10	256.62	167.39	130.38	109.19	95.16	85.04	77.34	71.23	66.24	62.07	58.53	55.48
25	286.55	186.92	145.58	121.93	106.26	94.97	86.36	79.53	73.96	69.31	65.36	61.95
50	311.50	203.19	158.26	132.54	115.51	103.23	93.87	86.46	80.40	75.35	71.05	67.34
100	338.61	220.88	172.03	144.08	125.56	112.22	102.05	93.98	87.40	81.91	77.23	73.20
500	411.02	268.11	208.82	174.89	152.42	136.21	123.87	114.08	106.09	99.42	93.75	88.85

Gráfica 1.

Curvas IDF de la microcuenca el Zarzal



7.3.2.4 Estimación de Caudales Máximos. La estimación de caudales máximos de la cuenca asociada se realizó teniendo en cuenta las características de la cuenca que corresponde a una cuenca pequeña con poca información.

Para la obtención del valor de escurrentía se realizó una generalización de las características de la microcuenca en relación con pendiente, coberturas y tipo de suelo, lo que permitió establecer un valor general para el área de estudio relacionado a la particularidad de esta. Este valor de acuerdo con Razuri, 1984 para una zona de bosque y pastos con pendientes suaves el valor fluctúa entre 0.05 y 0.15.

Finalmente, con la información de intensidad de precipitación procesada a partir de los datos para los diferentes tiempos de retorno y de los valores máximos, se obtiene los valores de caudales máximos para los diferentes tiempos de retorno.

Tabla 23

Caudales máximos estimados para la microcuenca el Zarzal

Caudales máximos	2	5	10	25	50	100	500 años
Método Témez	89.45	106.03	116.97	130.82	141.09	151.29	174.85

7.3.2.5 Coeficiente de rugosidad de Manning. El coeficiente de Manning asignado para las secciones transversales fue el mismo, debido a que el tramo modelado es de corta distancia, tiene el mismo tipo vegetación y geología asignada. En la Figura 22, se muestran las superficies para la selección del coeficiente de Manning recomendados por Ven Te Chow en su libro “Hidráulica de Canales Abiertos”.

De acuerdo con que el tramo en estudio corresponde a un canal con meandros con algunos bancos y las zonas de bancos corresponde a vegetación de bosque de galería principalmente se establecen los valores de 0.06 para los bordes del canal y 0.04 para el centro del canal.

Figura 22

Coeficiente de Manning

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (Ancho de la superficie libre en crecida <30m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
Limpios, rectos sin fallas ni pozos	0.025	0.030	0.033
Rectos con algunas piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
Limpios con meandros con algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
Meandros con algunas piedras y pastos	0.035	0.045	0.050
Meandros con muchas piedras	0.045	0.050	0.060

Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
tramo con mucho pasto, pozo profundo y cauce en crecida con muchos arbustos	0.075	0.100	0.150
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos sin arbustos			
Pasto corto	0.025	0.03	0.035
Pasto alto	0.03	0.035	0.05
A.2.2 Zonas de cultivos			
Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0.025	0.035	0.045
Cultivos sembrados en línea a voleo de madurez fisiológica	0.030	0.040	0.050
A.2.3 Zonas arbustivas			
Escasos arbustos y pasto abundante	0.035	0.050	0.070
pequeños árboles y arbustos sin follaje	0.035	0.050	0.060
pequeños árboles y arbustos con follaje	0.040	0.060	0.080
Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0.045	0.070	0.110
Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0.070	0.100	0.160

Nota: Adaptado de Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow

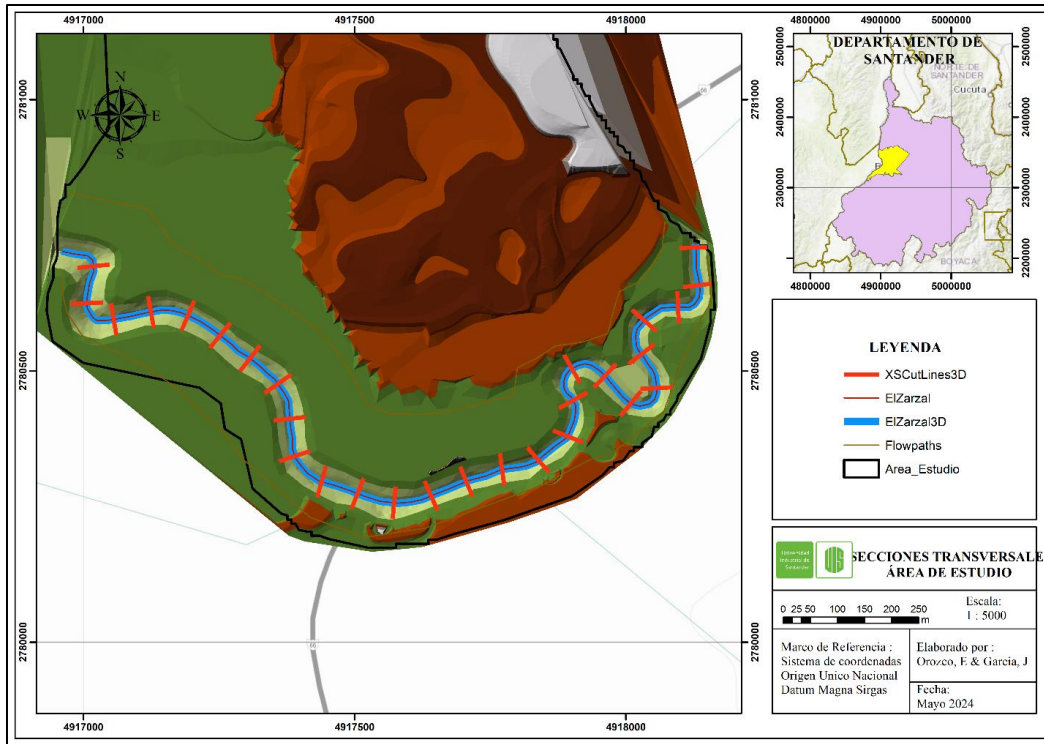
7.3.3. Modelo hidráulico

A continuación, se presentan los análisis hidráulicos realizados para obtener los niveles alcanzados por los caudales analizados. El análisis hidráulico se realizó empleando el modelo HEC-RAS). Este programa fue desarrollado para calcular perfiles de flujo en un canal con secciones transversales regulares o irregulares, utilizando el método del paso estándar para calcular los perfiles de flujo.

7.3.3.1 Secciones transversales. Las secciones transversales utilizadas para la implementación del modelo hidráulico en el tramo analizado fueron obtenidas del levantamiento topo batimétrico realizado por el Instituto Universitario de la Paz (ver Figura 23), asimismo se complementó con el modelo digital de elevación procesado con las imágenes de dron.

Figura 23

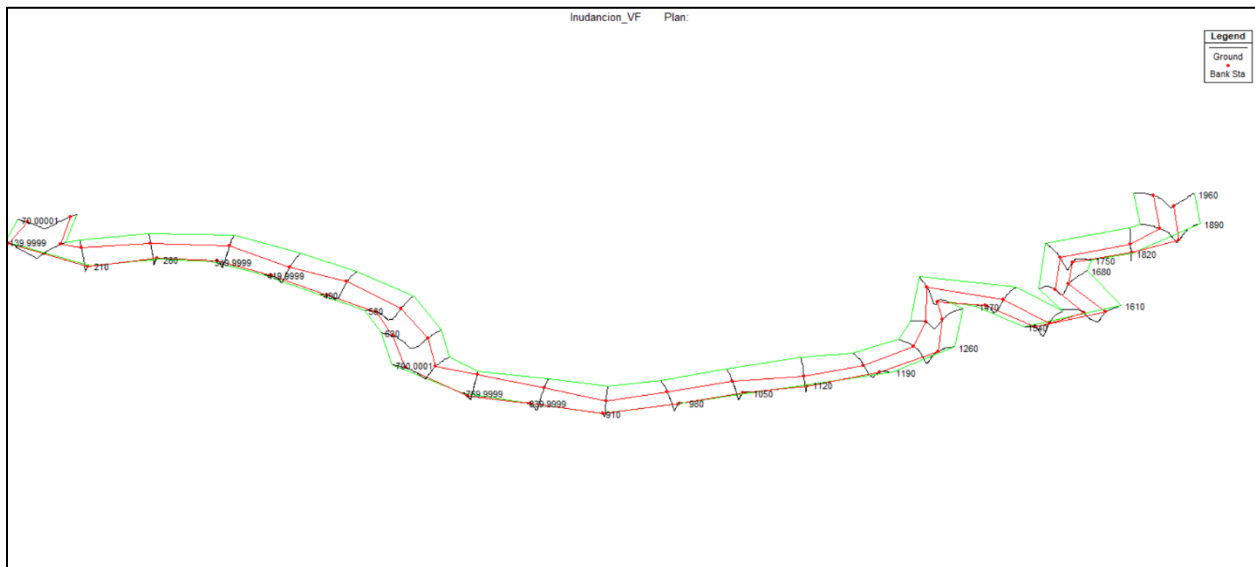
Secciones Transversales tramo quebrada el Zarzal



Las secciones transversales, se establecieron con una separación de 70 metros entre si y un ancho de 80 metros es decir 40 metros a cada lado superando los 30 metros correspondientes a la ronda hídrica del cuerpo de agua.

Figura 24

Geometría Tramo quebrada el Zarzal



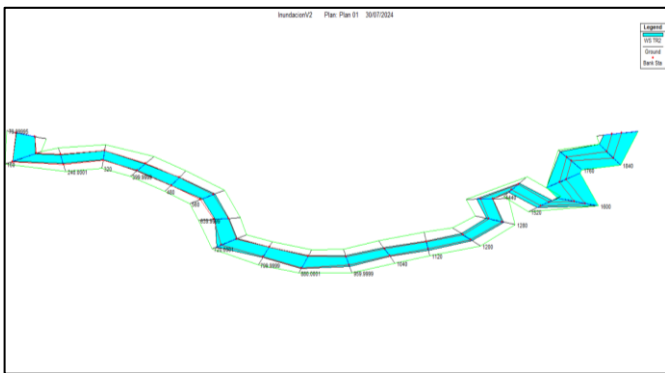
Finalmente, de acuerdo con toda la información procesada y los caudales máximos identificados en el numeral 0 se contemplen las condiciones máximas del perfil del agua en el cuerpo hídrico durante los diferentes periodos de retorno.

El tramo analizado en el sitio de ocupación de cauce tiene una longitud de 1.96 kilómetros aproximadamente y un cauce ordinario entre las cotas 65.61 m.s.n.m. y 63.56 m.s.n.m.

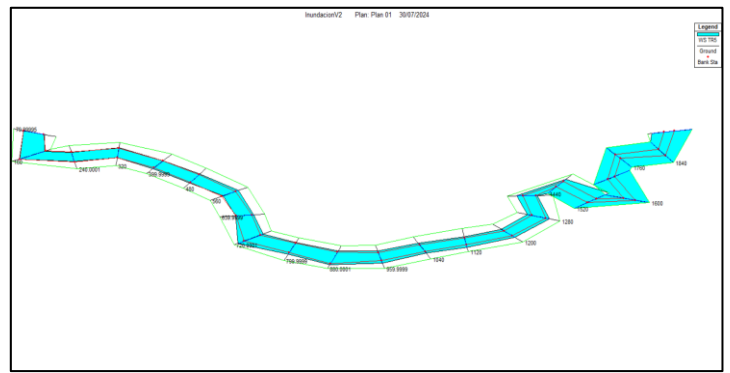
Figura 25

Transito hidráulico caudal a diferentes tiempos de retorno

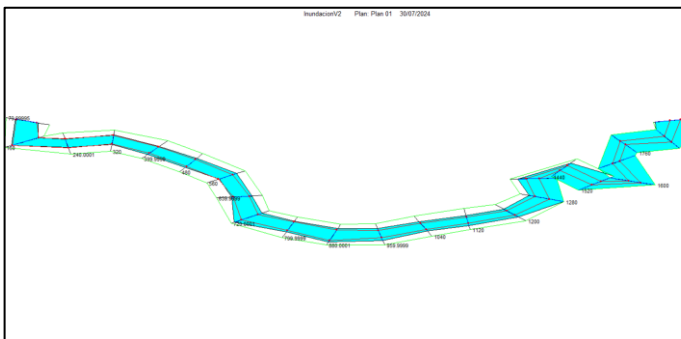
TR= 2 años



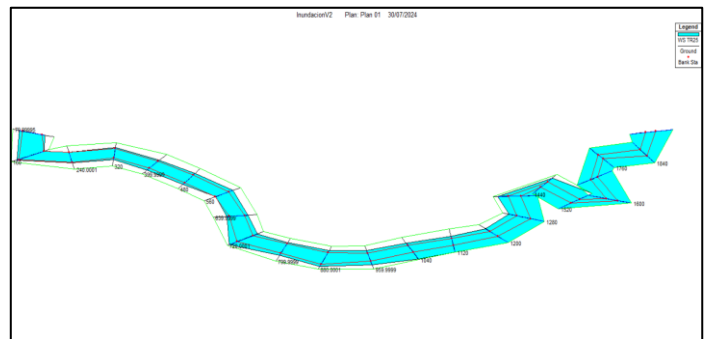
TR= 5 años



TR= 10 años

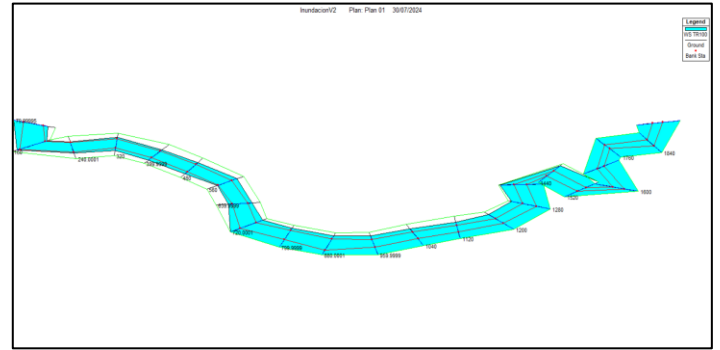
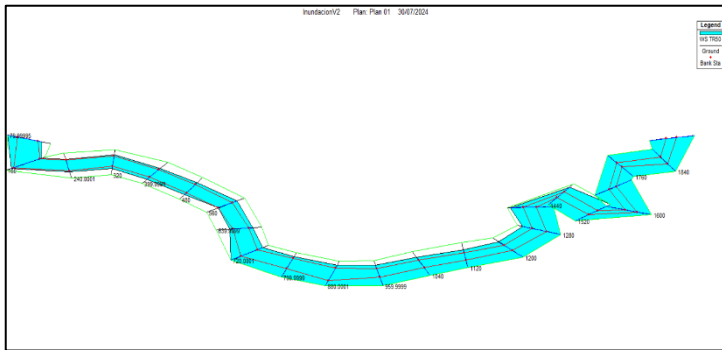


TR= 25 años

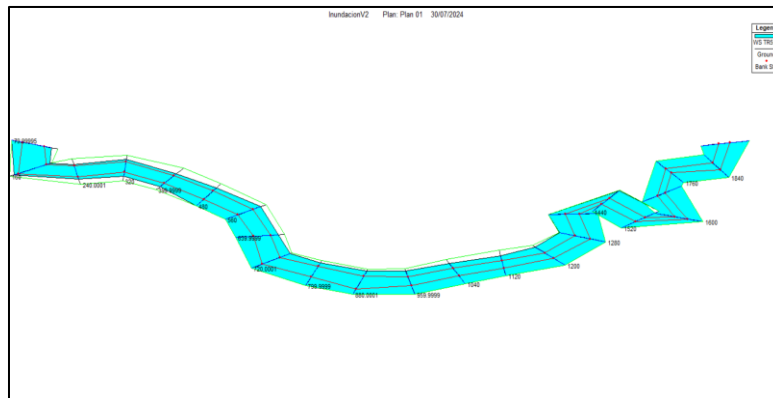


TR= 50 años

TR= 100 años



TR= 500 años



Con los caudales modelados el incremento en la lámina de agua aumenta en promedio entre 0.15 m, con una pendiente hidráulica promedio de 0.0006 m/m, y una velocidad promedio de 1.46 m/s. (Ver Tabla 24).

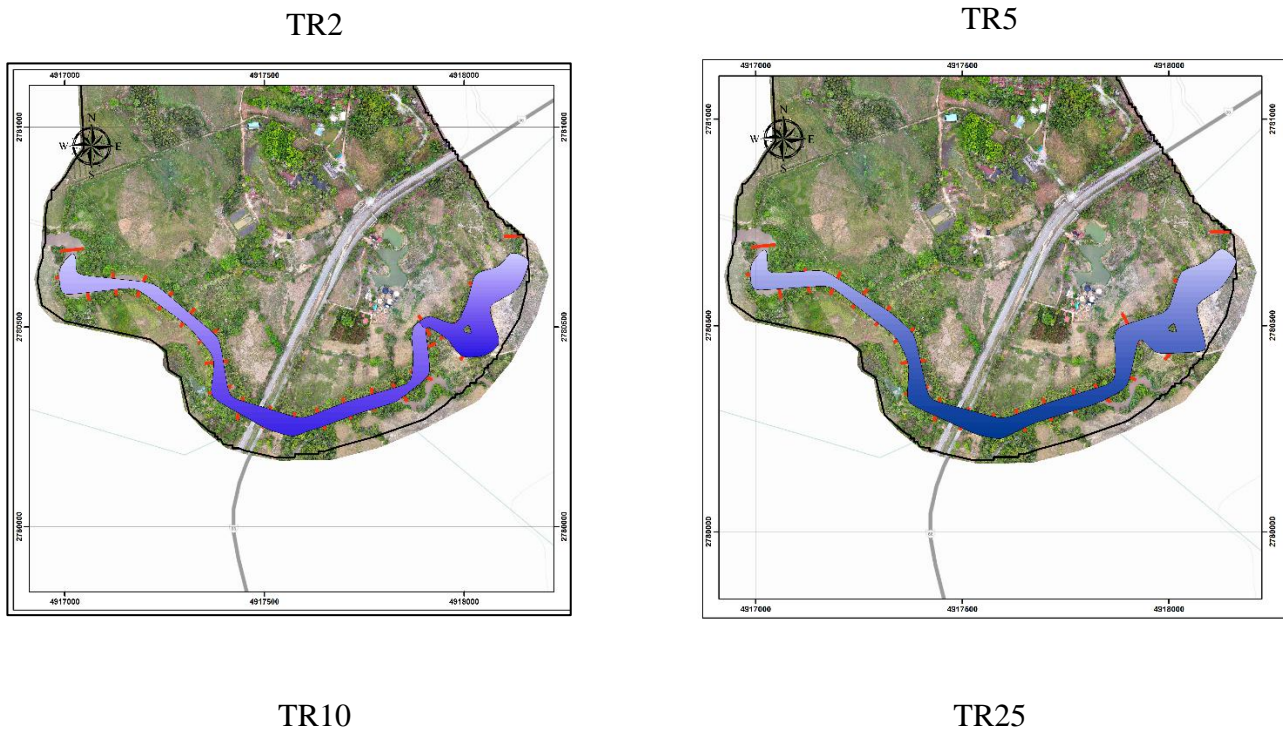
Tabla 24

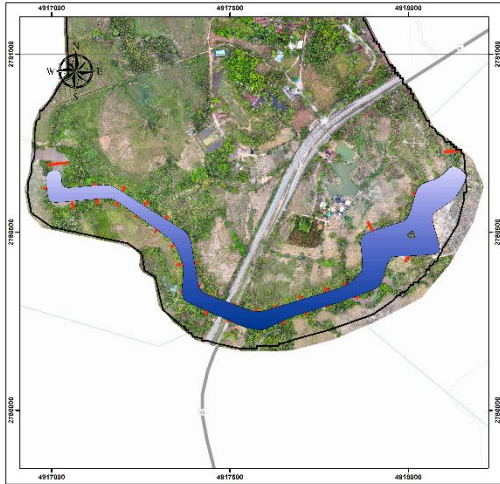
Condiciones hidráulicas

Profile	Q total (m3/s)	minC h EL (m)	W.S elev (m)	E,G elev (m)	E.G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Forude # Chl
Tr2	89.45	65	71.34	71.42	0.000621	1.30	85.26	65.97	0.23
Tr5	106.03	65	71.60	71.68	0.000632	1.38	102.81	71.98	0.23
Tr10	116.97	65	71.74	71.83	0.000641	1.43	113.61	75.97	0.23
Tr25	130.82	65	71.91	72.01	0.000649	1.48	126.91	80	0.23
Tr50	141.09	65	72.03	72.13	0.000651	1.51	136.30	80	0.24
Tr100	151.29	65	72.14	72.24	0.000654	1.54	145.13	80	0.24
Tr500	174.85	65	73.38	72.48	0.000661	1.60	164.01	80	0.24

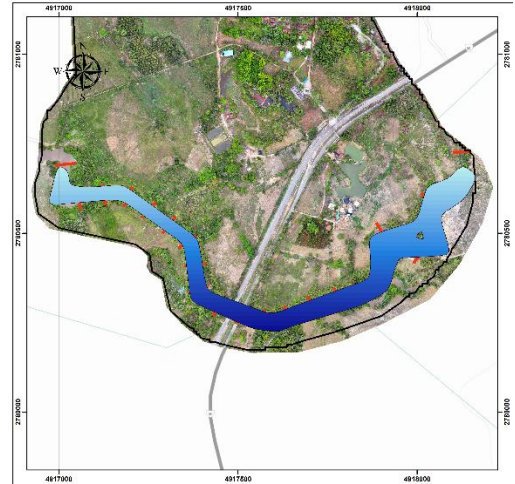
La tabla de agua pasa tiene un aumento de 2 metros para el peor escenario el cual corresponde al periodo de retorno de 500 años que igualmente es el menos frecuente y por lo tanto el menos probable.

7.3.3.2 Espacialización modelo hidráulico asociado a inundación. A continuación, se presenta la espacialización de los caudales modelados para diferentes años de retorno, lo cual permite identificar la extensión de la mancha de inundación generada en el tramo de la quebrada el Zarzal durante un evento de precipitación de alta intensidad.

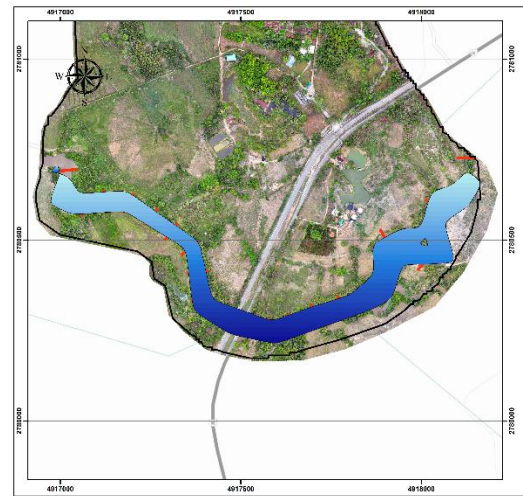
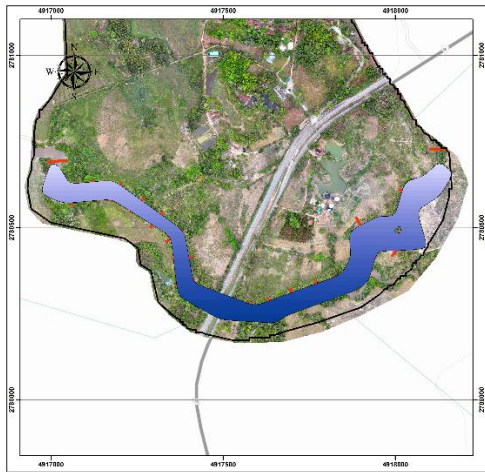




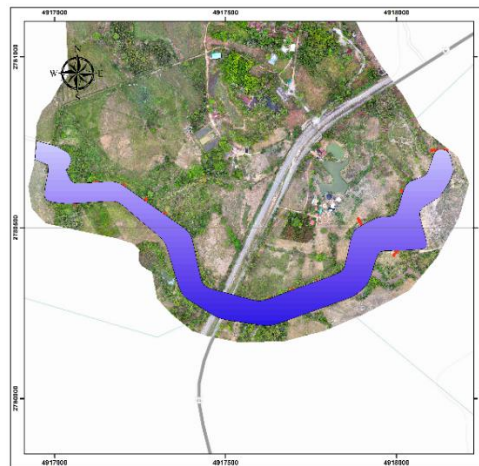
TR100



TR100



TR500



Finalmente, teniendo en cuenta las limitaciones del método usado para el modelamiento, en relación al ancho de la sección transversal, se analiza la altura de la lámina de agua alcanzada en los diferentes tiempo de retorno, y por medio de las curvas de nivel se plantea un área de inundación asociado a la lámina de agua mayor a 72 metros siendo esta la cota crítica de desbordamiento relacionada a periodos de retorno mayor a 50 años, de acuerdo a esta información se plantea que para esta área de desbordamiento.

Tabla 25

Matriz de categorización de amenaza

Nivel de intensidad	Categoría de amenaza		
Nivel de la lámina de agua menor a 1 m y velocidad del agua menor a 0.5 m/s	Alto	Alto	Alto
Nivel de la lámina de agua menor a 1-1.5 m y velocidad del agua entre 0.5 y 1 m/s	Alto	Medio	Medio
Nivel de lámina de agua mayor a 1.5 m y velocidad del agua mayor a 1 m/s	Medio	Bajo	Bajo
Frecuencia de la inundación	Frecuencia alta TR ≤ 10	Frecuencia media 10 < TR < 25	Frecuencia baja < 25 TR < 500

Nota: Adaptado de (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

Por último, teniendo en cuenta los niveles de intensidad planteados en la Tabla 25 se obtiene la zonificación de amenaza por inundación sobre el tramo de la quebrada el Zarzal que se encuentra dentro del predio de Instituto Universitario de la Paz.

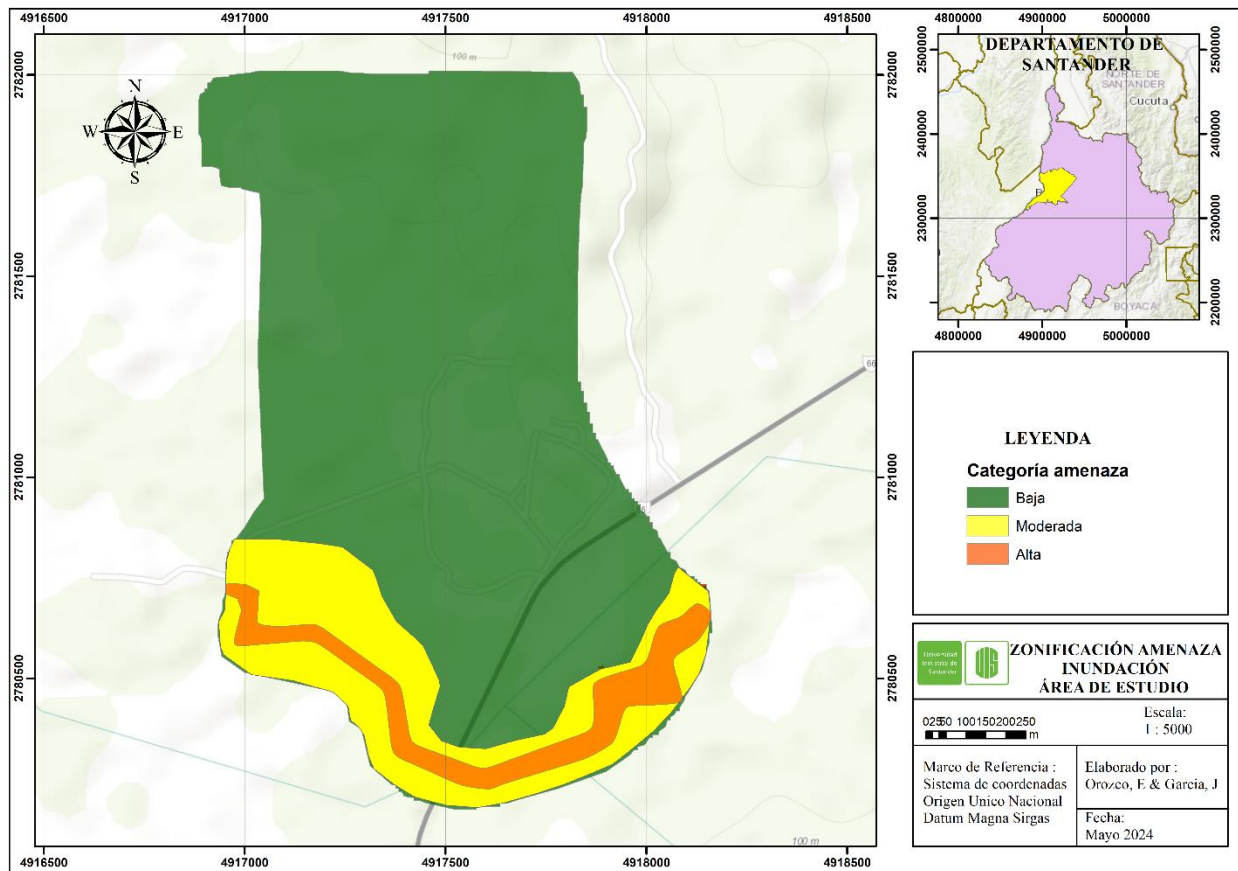
Tabla 26

Distribución espacial de las categorías de amenaza por inundación

Categoría	Area	
	ha	%
Alta	9.25	5.71
Moderada	24.34	15.04
Baja	128.22	79.24
TOTAL	161.81	100.00%

Figura 26

La zonificación de amenaza por inundación sobre el predio del UNIPAZ



7.4 Zonificación de amenaza por incendios forestal

De acuerdo con la metodología del "Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000" (IDEAM, 2011), y con las modificaciones y adaptaciones necesarias para la espacialización de la amenaza a una escala más detallada, se obtuvieron los siguientes resultados:

7.4.1 Susceptibilidad de la cobertura vegetal.

En relación con la susceptibilidad de la cobertura vegetal y los datos obtenidos para las tres características evaluadas, se presenta la categorización de amenaza resultante en función de la cobertura como combustible.

Tabla 27

Categoría final susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios forestales

Cobertura	Tipo Combustible	Duración de combustible	Carga de combustible	Valor	Normalización	Amenaza
Bosque de galería y ripario	1	4	4	9	3	Moderada
Bosque denso	1	4	4	9	3	Moderada
bosque fragmentado	2	4	4	10	4	Alta
Bosque fragmentado	2	4	4	10	4	Alta
Camino	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Carreteable	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Cuerpo de agua artificial	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Cultivos	4	2	3	9	3	Moderada
Cultivos permanentes	4	2	3	9	3	Moderada

Cultivos transitorios	4	2	3	9	3	Moderada
Instalaciones recreativas	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Mosaico de cultivos y espacios naturales	4	2	3	9	3	Moderada
Mosaico de pastos y cultivos	4	2	3	9	3	Moderada
Pastos arbolados	4	3	4	11	4	Alta
Pastos enmalezados	5	1	3	9	3	Moderada
Pastos limpios	5	1	3	9	3	Moderada
Plantación forestal	1	4	4	9	3	Moderada
Quebrada El Zarzal	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Red vial y territorios asociados	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Red vial	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Sendero	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Tejido urbano discontinuo	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Tierras desnudas y degradadas	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Zona Institucional	0	0	0	0	0	Sin amenaza
Zonas pantanosas	1	1	1	3	1	Muy baja

Adicionalmente, se presenta la categorización final de la susceptibilidad de la vegetación en la Figura 27 y su distribución porcentual en la Tabla 28.

Figura 27.

Categorización final susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios forestales

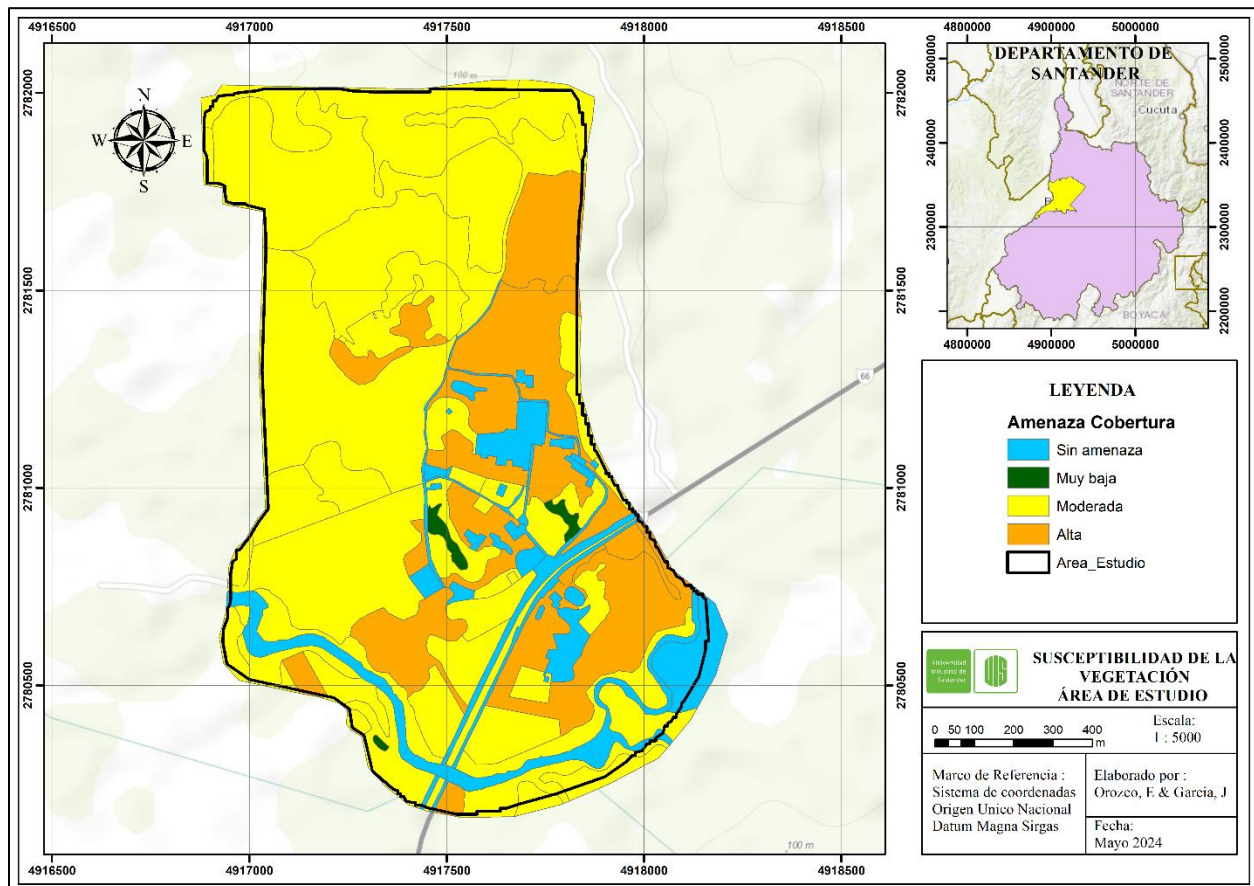


Tabla 28

Distribución espacial de la amenaza por cobertura vegetal

Categoría amenaza	Area	
	ha	%
Alta	38.02	23.50%
Moderada	106.42	65.77%
Muy baja	0.97	0.60%
Sin amenaza	16.39	10.13%
TOTAL	161.80	100.00%

De acuerdo con los resultados obtenidos la categoría principal corresponde a Moderada en relación con la cantidad de material desde bosques hasta pastos cada una teniendo una

característica predominante como es la carga total para los bosques y el tipo de combustible para los pastos.

7.4.2. Susceptibilidad por factores climáticos.

Las variables analizadas referente a las condiciones meteorológicas fueron precipitación temperatura radiación y velocidad del viento.

Para la precipitación se tiene la información recopilada de las estaciones meteorológicas, con esta información se realizó la interpolación obteniendo una precipitación para la zona de estudio de 2850 mm, para temperatura se obtuvo un valor de 28°C de acuerdo con las isotermas, para vientos y radiación se obtuvo valores de 0.83 m/s y 5.43 Kwh/m²/año. al ser el área puntual los factores y su categorización aplican para el 100% del área de estudio.

Tabla 29

Precipitación promedio multianual

Estación	Código	Precipitacion_prom_anual
AEROPUERTO YARIGUIES		
AUT	23155030	2922.53
EL CENTRO	23155040	2251.65
CHUCURI	23130010	2979.54
LA PUTANA	24050070	3009.13
SABANA DE TORRES	23180070	3194.87
AGUASCLARAS	24060040	2908.53
HACIENDA LAS BRISAS	24065010	2628.55
PUERTO WILCHES	23180020	2845.79

Nota: Adaptado de estaciones meteorológicas de IDEAM,2024

Tabla 30

Temperatura promedio multianual

Estación	Código	Temperatura_Prom_Anua l
-----------------	---------------	------------------------------------

AEROPUERTO YARIGUIES AUT	23155030	28.29
EL CENTRO HACIENDA LAS BRISAS	23155040	27.58
VILLA LEIVA	24065010	28.92
	23185010	28.01

Nota: Adaptado de estaciones meteorológicas de IDEAM,2024

Tabla 31

Velocidad de vientos

Estación	Código	Velocidad_Prom_Anual
VIZCAINA	24055080	0.83

Nota: Adaptado de estaciones meteorológicas de IDEAM,2024

Tabla 32

Radiación solar

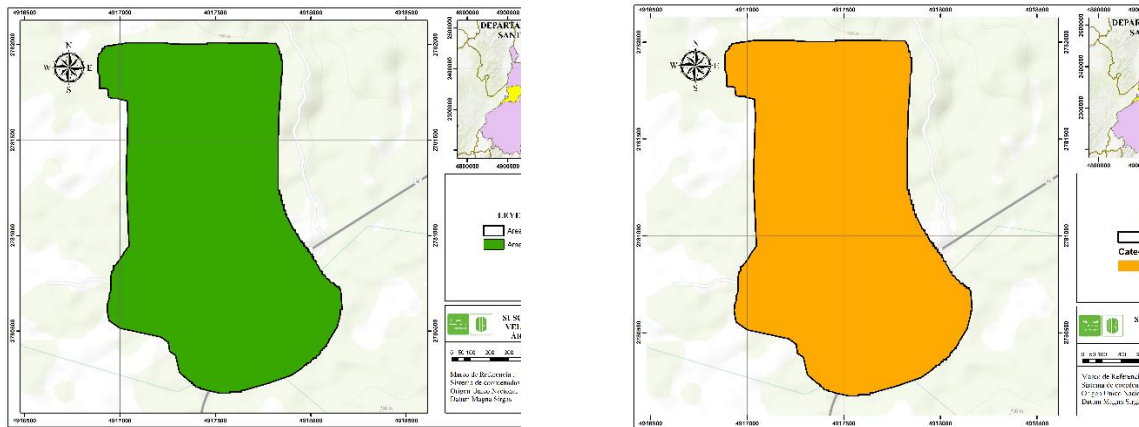
Estación	Código	Velocidad_Prom_Anual
VIZCAINA	24055080	5.43

Nota: Adaptado de estaciones meteorológicas de IDEAM,2024

Figura 28.

Categorización final susceptibilidad por condiciones climáticas a incendios forestales





7.4.3. Susceptibilidad por factor relieve.

El mapa de pendientes en grados se clasifica por porcentaje de pendiente y se le asigna la calificación y categorización según el siguiente cuadro para así obtener el mapa de amenaza por pendientes.

Tabla 33

Categoría amenaza pendientes

Clasificación Pendiente (%)	Calificación pendiente	Categoría amenaza
0 – 7	1	Muy baja
7 – 12	2	Baja
12 – 25	3	Moderada
25 – 75	4	Alta
>75	5	Muy alta

Nota: Adaptado de “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios forestales de la cobertura vegetal a escala 1:100.000” IDEAM 2011

Figura 29.

Categorización final susceptibilidad por pendientes a incendios forestales

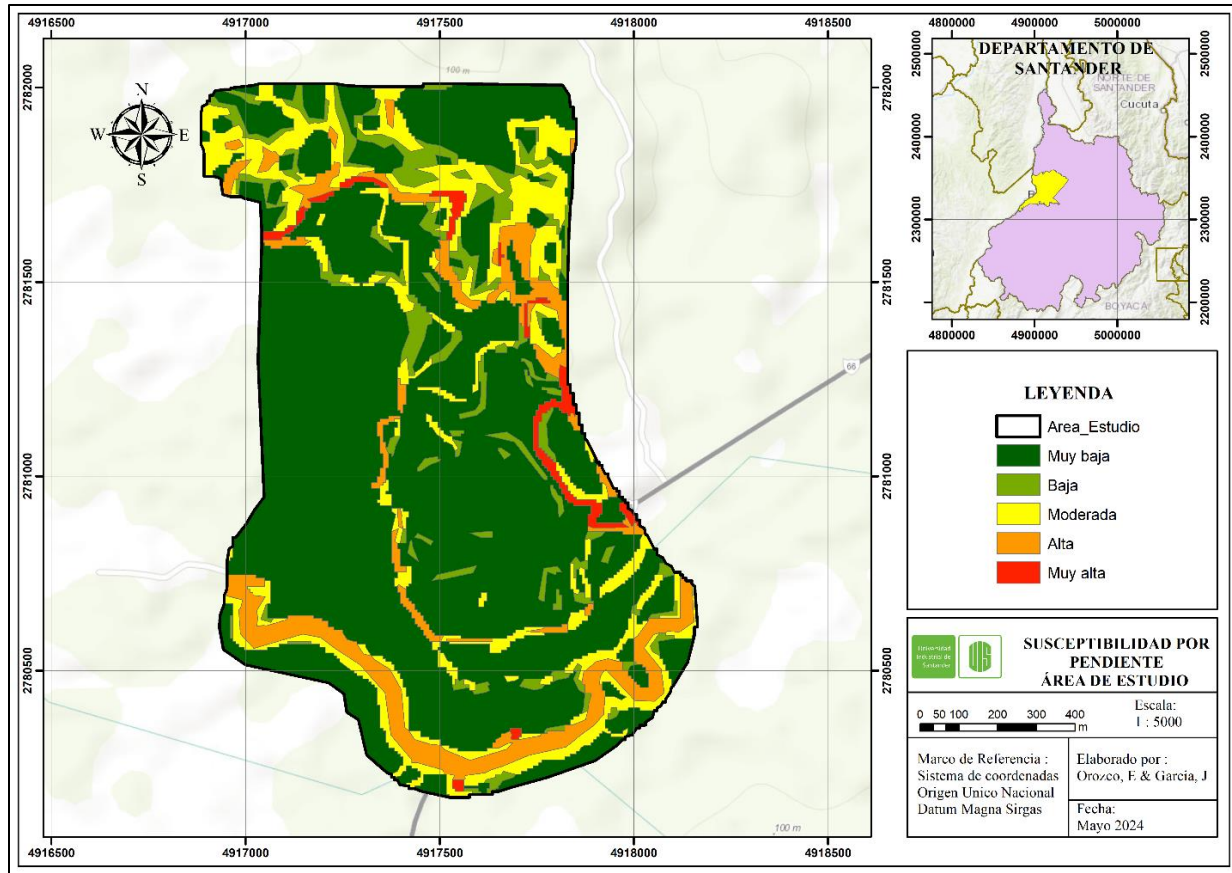


Tabla 34

Categoría amenaza pendientes área de estudio

PENDIENTE	Valor	Categoría	Área	
			ha	%
0 - 7%	1	Muy baja	108.973978	67.35%
7 - 12%	2	Baja	11.662093	7.21%
12 - 25 %	3	Moderada	22.976945	14.20%
25 - 75%	4	Alta	15.441635	9.54%
>75%	5	Muy alta	2.74839	1.70%
TOTAL			161.803041	100.00%

De acuerdo con las características morfométricas del área de estudio donde predominan las pendientes bajas con un porcentaje de distribución del 74.56% del área total correspondiente a pendientes menores a 12%, categorizado con amenaza baja y muy baja para incendios forestales.

7.4.4 Susceptibilidad por accesibilidad.

El área de estudio cuenta con una densidad considerable de vías y carretables sumado al buffer de 500 metros establecido en la metodología toda el área se encuentra una amenaza muy alta en función de la accesibilidad a las coberturas vegetales.

7.4.5 Susceptibilidad por factor histórico.

A partir de la información de registros históricos obtenidas del cuerpo de bomberos de Barrancabermeja se procesan datos para un rango de 9 años, comprendido entre los periodos del 2016 hasta el 2024, se procede a realizar el cálculo de índice de frecuencia mediante la aplicación de la ecuación propuesta por el ideam.

Tabla 35

Registro histórico de incendios de vegetación en zona rural de Barrancabermeja

INCENDIOS Y QUEMAS FORESTALES ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE BARRANCABERMEJA										
Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	TOTAL
Forestales	429	367	374	240	90	56	38	61	45	1700
Quema	113	95	228	301	330	478	245	554	269	2613
										4313
									Fi	489

Nota: Cuerpo de Bomberos de Barrancabermeja, 2024

Después de realizar el análisis y tratamiento de la información, los resultados obtenidos se normalizan con el objeto de generar los rangos de frecuencia y poder asignar la calificación cualitativa y cuantitativa.

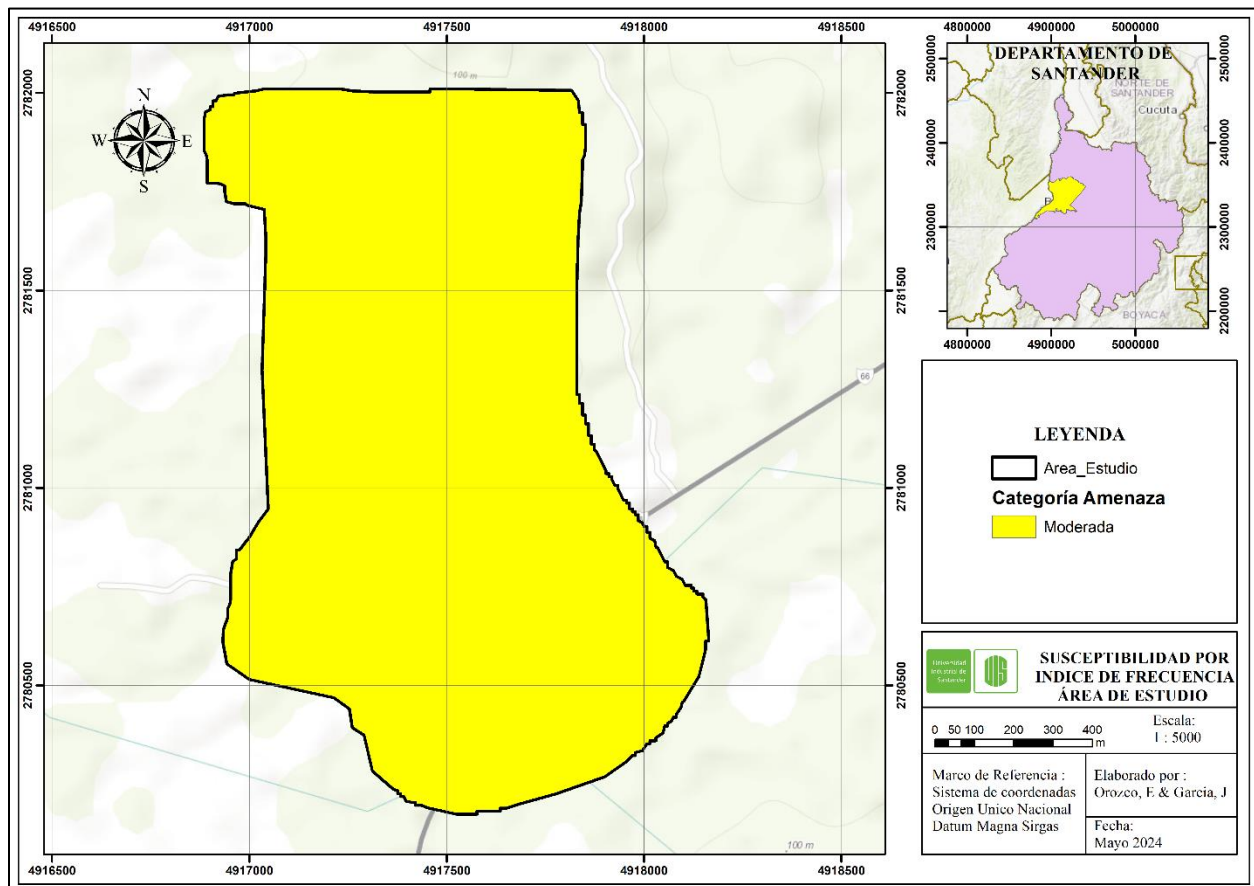
Tabla 36

Categorización de amenaza por índice de frecuencia

Rangos	Normalización	Categoría
<350	1	Muy baja
350-410	2	baja
410-490	3	Moderada
490-550	4	Alta
>550	5	Muy alta

Figura 30.

Categorización final susceptibilidad por índice de frecuencia de incendios forestales



7.4.6 Zonificación final amenaza de incendios forestales

Finalmente, al realizar el intercepto y la sumatoria ponderada de las variables analizadas se obtiene el mapa final de amenaza de incendios forestales del área de estudio.

La categoría principal corresponde amenaza de grado moderado relacionado con las condiciones climáticas del clima cálido-húmedo del área de estudio sumado a las abundante vegetación natural y artificial.

Figura 31.

Zonificación de amenaza por incendios forestales en el predio de la UNIPAZ

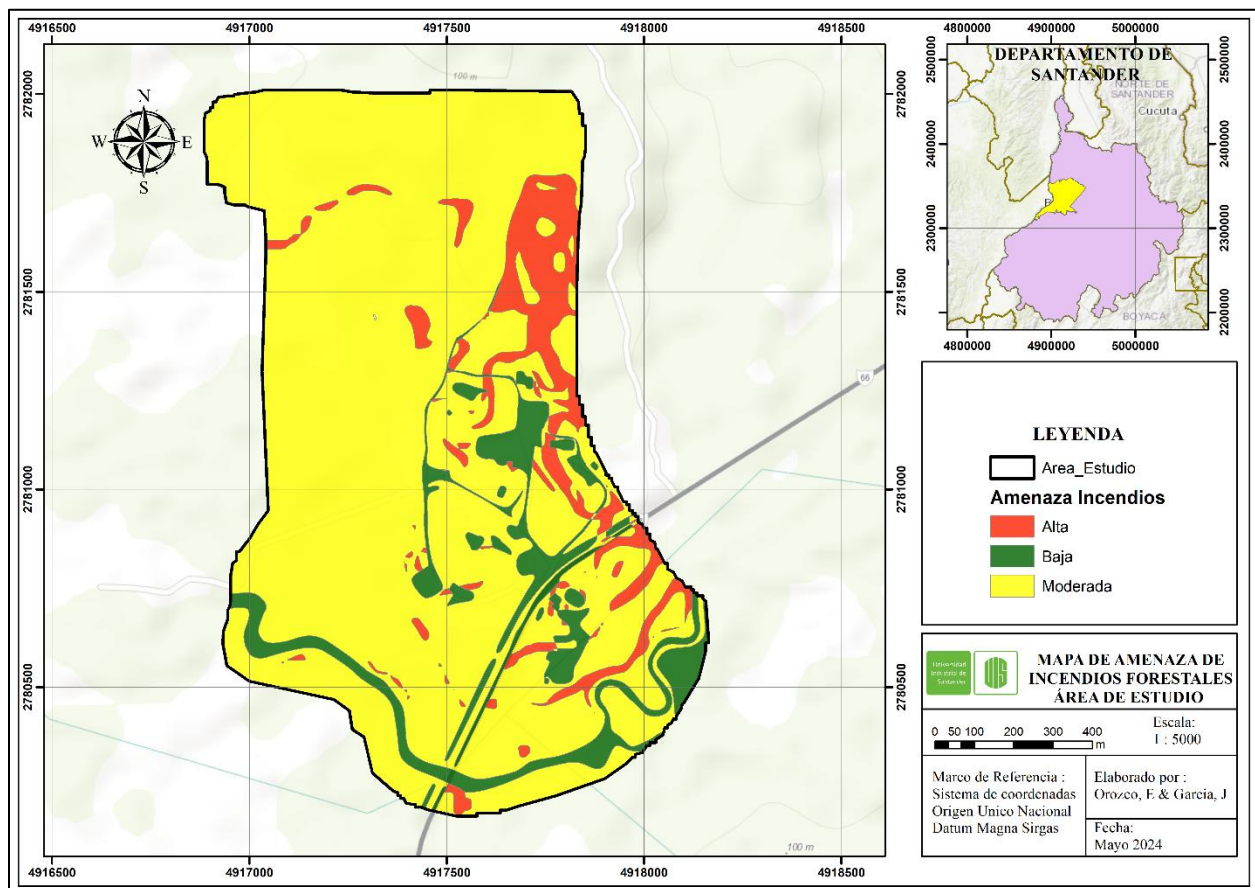


Tabla 37

Distribución en área y porcentaje de la zonificación de amenaza por incendios forestales del predio UNIPAZ.

Categoría	Area	
	ha	%
Alta	14.37	8.88%
Baja	15.50	9.58%
Moderada	131.94	81.54%
TOTAL	161.80	100.00%

8. Análisis y discusión de resultados

De manera general, para la evaluación y zonificación de la amenaza se consideraron los factores condicionantes y detonantes para la materialización de los eventos.

En el caso de la amenaza por incendios forestales, los resultados obtenidos representan de manera coherente la estructura biofísica del área de estudio. Predominan las coberturas terrestres naturales, con condiciones climatológicas que categorizan el área principalmente con una amenaza moderada. Estas condiciones incluyen temperaturas superiores a los 28 grados Celsius, coberturas entre pastizales y zonas boscosas, pendientes suaves y bajas velocidades del viento.

La amenaza baja se asocia directamente con coberturas antropizadas, como terrenos urbanos discontinuos, vías y zonas desnudas. Finalmente, el nivel de detalle proporciona una mayor profundidad en los datos obtenidos, generando resultados con mayor precisión a la hora de la toma de decisiones en cuanto al ordenamiento interno de la institución.

Para la zonificación de la amenaza por inundación, se utilizó información topobatimétrica, lo que permitió un análisis detallado de la morfología del canal en estudio. Los resultados indican que, a pesar de encontrarse en una geoforma de planicie de inundación, el cauce principal presenta una cota crítica de desbordamiento alta. Esto le permite soportar el escurrimiento de la microcuenca, relacionado con un bajo coeficiente de escorrentía debido a la cobertura vegetal y el bajo gradiente del terreno.

La amenaza alta se asocia al canal del cauce principal, influenciado por caudales de periodos de retorno bajos y una alta probabilidad de frecuencia. Esto genera una altura del agua entre 0.5 y 1 metro respecto a la cota media del cauce, con velocidades de flujo entre 1.3 m/s y 1.6 m/s.

La categoría de amenaza moderada se establece en función de la altura del agua, la velocidad y la frecuencia de los eventos. En este caso, las temporalidades que presentan estas condiciones corresponden a frecuencias medias a altas, lo que reduce la probabilidad de ocurrencia y materialización del evento.

Finalmente, los mapas de zonificación para cada uno de los eventos analizados, representa espacialmente la probabilidad de ocurrencia de estos eventos mostrando porcentualmente su distribución.

9. Conclusiones

La amenaza por incendios forestales se clasificó como moderada, abarcando el 81.54 % de la superficie del área de estudio. En contraste, la amenaza alta representa el 8.88 % y se localiza principalmente en los costados noreste y sureste. Por otro lado, la amenaza baja, que constituye el 9.58 %, se encuentra en áreas adyacentes al tramo de la quebrada El Zarzal y en zonas antropizadas.

Las condiciones climáticas de la ubicación del área de estudio en relación con la precipitación muestran comportamientos típicos de los periodos secos y de lluvia en Colombia, adicionalmente la morfometría de la cuenca en relación con la forma y densidad muestran una susceptibilidad general moderada a inundación.

La morfometría característica del Canal de la Quebrada el Zarzal hace que la cota crítica de desbordamiento este por encima del metro y medio en la mayoría del tramo analizado lo que permite un mayor gradiente de flujo alto respecto al caudal recibido por microcuenca.

La categorización de amenaza alta se da en las orillas del cauce con un engrosamiento en la parte NW del tramo analizado representado por un bajo topográfico e inundable, adicionalmente, el área de inundación obtenida es coherente con la geoforma denominada planicie de inundación que cubre gran parte del área de estudio.

10. Recomendaciones

Es necesario para el avance en materia de la prevención frente a eventos amenazantes, incluir análisis de vulnerabilidad para así identificar los posibles riesgos. En ese sentido se hace relevante adelantar estudios no solo en el área de estudio si no en las zonas circundantes ya que esta zona presenta una homogeneidad en cuanto a coberturas, geología, geomorfología y condiciones hidrometeorológicas

Adicionalmente, se recomienda realizar el estudio de inundación con otras metodologías con el fin de relacionar los resultados y poder dar mayor peso a estos resultados, teniendo en cuenta, que el periodo analizado corresponde a intervalo de tiempo de 20 años siendo esta la información disponible.

Finalmente, Fomentar la colaboración con otras instituciones académicas, gubernamentales y organizaciones no gubernamentales que trabajen en la gestión de riesgos naturales. El intercambio de conocimientos y recursos fortalecerá las capacidades de investigación y respuesta del Centro de Investigaciones Santa Lucia.

Referencias bibliográficas

- Amaya, L. (2020). Zonificación de amenazas por incendios forestales en el municipio del Rosal, Cundinamarca. Universidad de Cundinamarca.
- Barrantes, G., & Vargas, J. (2010). La zonificación de amenaza por inundación como herramienta para el ordenamiento territorial en el Valle del Río Sixaola. *Revista Geográfica de América Central*, 46, 67-85.
- Camacho, M. (2021). Zonificación de amenaza por incendios forestales en el municipio de Yopal, Casanare. Universidad Nueva Granada.
- Cardona, O. D. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Carvajal, J. (2011). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. INGEOMINAS.
- Corporación OSSO. (2020). Inventario histórico nacional de desastres.
- Contreras, L., & Gómez, P. (2019). Gestión del riesgo de desastres en Colombia: Retos y oportunidades. *Revista de Ciencias Ambientales*, 17(3), 102-115.

Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Barrancabermeja. (2024). Informe anual sobre incendios y quemas forestales 2016-2024. Barrancabermeja, Santander, Colombia: Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Barrancabermeja.

DesInventar. (s.f.). Reporte de desastres. <https://www.desinventar.net/DesInventar/report.jsp>

Forero, L. (2023). Zonificación de amenazas por incendios forestales en el municipio de San Juan de Rioseco, Cundinamarca, según metodología IDEAM. Universidad Santo Tomás.

Fundación Panthera. (2019). Rutas ecológicas de especies en peligro en el Magdalena Medio. Revista de Ecología Tropical, 34(1), 45-60.

García, J., López, P., & Pérez, M. (2018). Planificación y gestión del riesgo en áreas vulnerables: Un enfoque sostenible. Revista de Gestión de Riesgos, 15(2), 34-45.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2011). Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal, escala 1:100.000. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). Estudio nacional del agua 2018. Bogotá, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). Mapas de inundación Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2020a). Amenazas inundación. Bogotá, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2020b). Boletín hidrológico diario. Bogotá, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2020c). Sistema operacional de pronóstico hidrológico para Colombia - Plataforma FEWS-Colombia.
<http://fews.ideam.gov.co/colombia/MapaEstacionesColombiaEstado.html>

Instituto Nacional de Vías. (2009). Manual de diseño de obras civiles - Hidrología. INVIAS.

Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank.

Maidment, D. R. (1993). Handbook of hydrology. McGraw-Hill.

Morales, L., et al. (1958). General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin.

Pabón-Caicedo, J. D., Álvarez, A. M., & Pérez, J. (2016). Evaluación de amenazas climáticas en Colombia: Impacto de fenómenos extremos. Boletín Meteorológico Colombiano, 22(1), 45-67.

Pardo, C., & Torres, M. (2019). Estrategias para la gestión de riesgos en Colombia: Análisis y propuestas. Estudios Ambientales, 7(1), 80-92.

Pérez, A. (2017). Análisis de la variabilidad climática en Colombia y su impacto en los ecosistemas. Boletín de Ciencias Ambientales, 12(3), 123-137.

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2020, 30 junio). Isoyeta - Qué es, historia, definición y concepto. Recuperado 10 de mayo de 2024, de <https://definicion.de/isoyeta/>

Royero, J., & Clavijo, J. A. I. R. O. (2001). Mapa geológico generalizado del departamento de Santander. INGEOMINAS.

Ruiz, O., & Muñoz, I. (2018). Estudio básico de amenaza por incendios forestales en el área rural del municipio de Nilo, Cundinamarca. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Santos, O. (2021). Revisión de normas y procedimientos para el estudio de las inundaciones en Colombia, comparación con la normativa europea vigente. Universidad Industrial de Santander.

Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres. (2019). Atlas de riesgo de Colombia: Revelando los desastres latentes. UNGRD.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). ¿Cuál es el riesgo por inundaciones en Colombia? Portal Oficial de la UNGRD.
<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Cual-es-el-riesgo-por-inundaciones-en-Colombia.aspx>

Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres. (2020). Consolidado anual de emergencias.

Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres. (2020). Evaluación probabilística del riesgo (EPR) por inundación lenta en las cabeceras municipales de Montelíbano (Córdoba), San Marcos (Sucre), Mompóx y Magangué (Bolívar).

Apéndices

Apéndice A Valores de precipitación máxima en 24 horas mensual multianual

Valores de precipitación máxima en 24 horas mensual multianual estación Yariguíes													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máximo
2000	19.4	58.4	16.8	134	92	59.5	106.2	56.3	90.2	73.6	63.5	52.3	134.00
2001	43.6	0	53.8	76.8	85.9	72.7	102.4	44.4	117.1	71.8	97.7	70.9	117.10
2002	3.6	48.3	82.6	51.6	101	60.3	77.4	66.7	44.4	79.1	121.6	14.8	121.60
2003	13	23.4	62.5	59.4	58.6	124.8	56.8	118.4	37.7	93.6	76.6	67.4	124.80
2004	0.2	22.3	75.2	61.2	59.6	29.7	61.8	58.2	73.2	87.6	86.6	26.6	87.60
2005	41.3	43.3	64.2	81.6	95.9	103.7	68	35.4	61	86.6	105.2	49.3	105.20
2006	28.9	77.8	60.5	66.9	85.2	60.8	126.8	84.4	47.3	123.6	50.6	72	126.80
2007	27.9	35.3	66.9	129.4	130.2	74.1	50.6	84.6	83.7	89.8	39.5	73.2	130.20
2008	20.7	115.4	44.1	79.1	114.2	55.4	69.8	87.7	74.8	63.8	138	78.4	138.00
2009	40.3	13.1	36.6	58.5	156.5	82.6	92.3	42.7	38.3	72.7	53.1	57.9	156.50
2010	12.6	49.2	49.9	68.4	130	97.7	106.1	134.9	127.4	72.9	92.6	84.3	134.90
2011	2.3	33.4	34.9	62.9	96.3	106.6	128.7	61.8	90.8	59.7	68.5	43.8	128.70
2012	20.5	13.2	44	87.6	44.9	47.1	125.7	47.8	80	103.7	77.4	18.6	125.70
2013	1.5	53	55.2	92.1	79.5	89.1	32.2	65.6	135.9	62.4	66.3	58.7	135.90
2014	37.6	73.7	32.1	29.7	42.7	31.4	80.4	53.3	89.8	72.7	129.9	38	129.90
2015	49.7	11.1	32.6	98	32.6	32.2	88.4	107.6	68.9	100	65.6	23.5	107.60
2016	17.2	17.5	15.4	50.6	54.1	24.4	98.8	77.9	82.8	108.8	116.7	34.8	116.70
2017	26.4	22	99.6	124.5	164.1	62.6	164.8	157.6	131.9	56.6	57.9	66.5	164.80
2018	62.4	0	36.4	114.3	126.8	15.2	78.8	14.7	86.1	98.1	65.8	1.5	126.80
2019	7.4	29.8	20.8	52.4	87.2	129.2	91.3	19.6	45.7				129.20
MAX	62.40	115.40	99.60	134.00	164.10	129.20	164.80	157.60	135.90	123.60	138.00	84.30	164.80
Valores de precipitación máxima en 24 horas mensual multianual estación La Putana													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máximo
2000	40	91	76	81	100	68	92	70	100	63	44	64	100.00

Valores de precipitación máxima en 24 horas mensual multianual estación Yariguíes

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máximo
2001	12	0	105	59	81	42	48	37	151	100	80	100	151.00
2002	3	3	93	93	109	101	61	55	45	59	47	24	109.00
2003	60	53	42	100	61	62	30	60	48	99	110	109	110.00
2004	26	22	53	90	58	75	137	60	93	90	100	63	137.00
2005	42	90	74	55	132	93	30	67	45	110	79	135	135.00
2006						100	136	135	49	133	60	8	136.00
2007	12.4									78	45	49	78.00
2008	16.2	25.2	86.2	90.5	119.3	110.6	85.5	93.7	59.2	54.4	57.8	52.5	119.30
2009	52.2	10.1	130.3	77.2	128.8	95.5	63.5	88.2	28	45.5	26.2	48.6	130.30
2010	42.1	92.6	38.5	183.7	102.5	130.6	60.9	60.8	90.6	70	57.1	108	183.70
2011	19.5	26	56.8	132	111.5	84.6	78.6	83.2	74.5	114	64.1	110.3	132.00
2012	13.6	105.1	37.2	85.3	77.4	67.6	39.7	79.2	26.6	159.4	128.9	102.3	159.40
2013	60	88.8	60	85	124.9	70.1	20.9	66	140	79.5	155.4	37.9	155.40
2014	32.4	69.2	90.8	21.6	63	52	52.6	54.1	50.5	70.7	103.8	60.6	103.80
2015	50.4	72.5	34.4	128.4	177.1	25.1	30.4	49.5	126.6	88.5	59.6	74.9	177.10
2016	25.6	29.3	87.1	109.3	121.9	91.3	130.3	109	90.5	74.5	152	36	152.00
2017	48	22	105	80	85.2	34	57		49.5	110	58.5	59.5	110.00
2018	43.6	53	20	92	57.4	58.6	36.6	134	125.3	79	89.9	20.6	134.00
2019	48.9	73.3	100.1	86.2	91.6	45.3	29.3	28.8	101.7	108.4	60.6	38.4	108.40
MAX	60.00	105.10	130.30	183.70	177.10	130.60	137.00	135.00	151.00	159.40	155.40	135.00	183.70

Valores de precipitación máxima en 24 horas mensual multianual estación La Putana

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máximo
2000	23.2	74.3	51.7	64.4	81.8	50.4	160.5	26.6	130.6	53.4	41.5	72.7	160.50
2001	45.9	13.8	102.5	69.4	49.7	17.6	120.9	40.7	32.3	59.2	24.4	90.6	120.90
2002	1.6	20.9	60.6	55.4	45.8	55.3	11.3	0	122.6	66.1	75.4	51.6	122.60
2003	0.7	70.9			44	117.4	44.8	38.2	33.7	87.8	143.8	79.4	143.80
2004	3.7	14.6	68.4	76.8	139.8	20.8	96.8	54.5	111.8		83.4	0	139.80
2005	53.2	92	97.8	118.3	103.6	45.1	42.2	52	52.7	118.7	85.2	88.5	118.70
2006	34.6	58.7	12.2	105.8	92.2	91.6	140.5	71.2	57.8	96.7	41.4	67.7	140.50
2007	14.6	11.1	58.6	89.9	39.2	20.6	79.5	36.2	50.4	21.4	19.8	12.4	89.90

2008	17.6	19.4	63.2	40.2	66.4	55.8	47.4	22	66.6	93.4	72.8	22.4	93.40
2009	36.6	60.7	93.2	51.6	58.8	69.2	53.2	114.4	86.4	128.5			128.50
2010	32.5	52.9	59.9	42.4	118.7	126.5	103.2	79.8	165.5	85.4	74.4	78.2	165.50
2011	14.2	34.8	54.6	88.5	107.7	74.3	91.9	99.1	55	68.7	92.2	86.8	107.70
2012	0	14.7	47.7	60.8	51.6	62.8	74.8	58.8	33.4	96.4	42.8	28.3	96.40
2013	27.4	64.6	48.6	28.4	88.5	34.4	20.8	33.4	137.2	96.4	59.4	46.4	137.20
2014	0.8	75.8	64.2	62.4	73.4	35.6	55.3	83.4	71.2				83.40
2015	22.8	32.4	21.4				37.4					44.6	44.60
2016	28.4	75.6	72.5	49.5				41.5	72.6	65.7	72.2	39.6	75.60
2017	32.2	17.6	114.2	55.4	78.2	56.7	85.6	40.5	58.6	51.6	95.2	50.4	114.20
2018	27.2	0	34.6	83.6	86.6	82.2	81.2	24.4	60.3	43.6	60.8	6.6	86.60
2019	41.8	67.5	45.4	63.6	98.4	63.3	26.7	16.2	63.8	93	78.2	47.7	98.40
MAX	53.20	92.00	114.20	118.30	139.80	126.50	160.50	114.40	165.50	128.50	143.80	90.60	165.50

Apéndice B Cálculos de precipitación diaria, intensidad y regresiones Estación La Putana

Distribución de probabilidades pluviométricas				
mediante Gumbel				
Nº	Año	Mes	Precipitación (mm)	
		Max. Precip.	<i>xi</i>	$(xi - x)^2$
1	2000	100	100.00	965.3449
2	2001	151	151.00	397.2049
3	2002	109	109.00	487.0849
4	2003	110	110.00	443.9449
5	2004	137	137.00	35.1649
6	2005	135	135.00	15.4449
7	2006	136	136.00	24.3049
8	2007	78	78.00	2816.4249
9	2008	119.3	119.30	138.5329
10	2009	130.3	130.30	0.5929
11	2010	183.7	183.70	2769.9169
12	2011	132	132.00	0.8649
13	2012	159.4	159.40	802.5889

14	2013	155.4	155.40	591.9489
15	2014	103.8	103.80	743.6529
16	2015	177.1	177.10	2118.7609
17	2016	152	152.00	438.0649
18	2017	110	110.00	443.9449
19	2018	134	134.00	8.5849
20	2019	108.4	108.40	513.9289
20		Suma	2621.4	13756.3

Cálculo variables probabilísticas	
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} =$	131.07 mm
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} =$	26.91 mm
$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s =$	20.98 mm
$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha =$	118.96 mm

<i>Periodo</i>	<i>Variable</i>	<i>Precip.</i>	<i>Prob. de</i>	<i>Corrección</i>
<i>Retorno</i>	<i>Reducida</i>	<i>(mm)</i>	<i>ocurrencia</i>	<i>intervalo fijo</i>
<i>Años</i>	<i>YT</i>	<i>XT'(mm)</i>	<i>F(xT)</i>	<i>XT (mm)</i>
2	0.3665	126.6498	0.5000	143.1143
5	1.4999	150.4288	0.8000	169.9846
10	2.2504	166.1726	0.9000	187.7750
25	3.1985	186.0649	0.9600	210.2533
50	3.9019	200.8221	0.9800	226.9290

100	4.6001	215.4704	0.9900	243.4815
500	6.2136	249.3203	0.9980	281.7319

$$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$$

Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	143.114	169.984	187.775	210.253	226.929	243.481	281.731
18 hr	X18 = 91%	130.234	154.686	170.875	191.330	206.505	221.568	256.376
12 hr	X12 = 80%	114.415	135.987	150.220	168.202	181.543	194.785	225.3855
8 hr	X8 = 68%	97.3177	115.589	127.687	142.972	154.311	165.567	191.5777
6 hr	X6 = 61%	87.2997	103.690	114.542	128.254	138.426	148.5237	171.8565
5 hr	X5 = 57%	81.5752	96.8912	107.031	119.844	129.349	138.7845	160.5872
4 hr	X4 = 52%	74.4194	88.3920	97.6430	109.331	118.003	126.6104	146.5006
3 hr	X3 = 46%	65.8326	78.1929	86.3765	96.7165	104.387	112.0015	129.5967
2 hr	X2 = 39%	55.8146	66.2940	73.2323	81.9988	88.5023	94.9578	109.8754
1 hr	X1 = 30%	42.9343	50.9954	56.3325	63.0760	68.0787	73.0445	84.5196

Apéndice C Cálculos de precipitación diaria, intensidad y regresiones Estación

Yariguíes

Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel				
Nº	Año	Mes	Precipitación (mm)	
		Max. Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$

1	2000	134	134.00	47.61
2	2001	117.1	117.10	100
3	2002	121.6	121.60	30.25
4	2003	124.8	124.80	5.29
5	2004	87.6	87.60	1560.25
6	2005	105.2	105.20	479.61
7	2006	126.8	126.80	0.09
8	2007	130.2	130.20	9.61
9	2008	138	138.00	118.81
10	2009	156.5	156.50	864.36
11	2010	134.9	134.90	60.84
12	2011	128.7	128.70	2.56
13	2012	125.7	125.70	1.96
14	2013	135.9	135.90	77.44
15	2014	129.9	129.90	7.84
16	2015	107.6	107.60	380.25
17	2016	116.7	116.70	108.16
18	2017	164.8	164.80	1421.29
19	2018	126.8	126.80	0.09
20	2019	129.2	129.20	4.41
20		Suma	2542.0	5280.7

Cálculo variables probabilísticas	
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} =$	127.10 mm
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	16.67 mm
$\alpha = \frac{6}{\pi} * s =$	13.00 mm
$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha =$	119.60 mm

<i>Periodo</i>	<i>Variable</i>	<i>Precip.</i>	<i>Prob. de</i>	<i>Corrección</i>
<i>Retorno</i>	<i>Reducida</i>	<i>(mm)</i>	<i>ocurrencia</i>	<i>intervalo fijo</i>
<i>Años</i>	<i>YT</i>	<i>XT'(mm)</i>	<i>F(xT)</i>	<i>XT (mm)</i>
2	0.3665	124.3614	0.5000	140.5283
5	1.4999	139.0943	0.8000	157.1766
10	2.2504	148.8488	0.9000	168.1991
25	3.1985	161.1736	0.9600	182.1262
50	3.9019	170.3168	0.9800	192.4580
100	4.6001	179.3926	0.9900	202.7136
500	6.2136	200.3652	0.9980	226.4127

Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	122.515	152.849	172.933	198.309	217.134	235.821	279.002
18 hr	X18 = 91%	111.488	139.092	157.369	180.461	197.592	214.597	253.892
12 hr	X12 = 80%	98.012	122.279	138.346	158.647	173.707	188.656	223.202
8 hr	X8 = 68%	83.310	103.937	117.594	134.850	147.651	160.358	189.721
6 hr	X6 = 61%	74.734	93.238	105.489	120.968	132.452	143.851	170.191
5 hr	X5 = 57%	69.833	87.124	98.572	113.036	123.766	134.418	159.031
4 hr	X4 = 52%	63.708	79.481	89.925	103.121	112.910	122.627	145.081
3 hr	X3 = 46%	56.357	70.310	79.549	91.222	99.882	108.477	128.341
2 hr	X2 = 39%	47.781	59.611	67.444	77.340	84.682	91.970	108.811
1 hr	X1 = 30%	36.7544	45.8547	51.8798	59.4926	65.1403	70.7462	83.7006

Apéndice D Cálculos de precipitación diaria, intensidad y regresiones Estación El Centro

Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel				
Nº	Año	Mes	Precipitación (mm)	
		Max. Precip.	x_i	$(x_i - x)^2$
1	2000	160.5	160.50	2217.4681
2	2001	120.9	120.90	56.1001
3	2002	122.6	122.60	84.4561
4	2003	143.8	143.80	923.5521
5	2004	139.8	139.80	696.4321
6	2005	118.7	118.70	27.9841
7	2006	140.5	140.50	733.8681
8	2007	89.9	89.90	552.7201
9	2008	93.4	93.40	400.4001
10	2009	128.5	128.50	227.7081
11	2010	165.5	165.50	2713.3681
12	2011	107.7	107.70	32.6041
13	2012	96.4	96.40	289.3401
14	2013	137.2	137.20	565.9641
15	2014	83.4	83.40	900.6001
16	2015	44.6	44.60	4734.8161
17	2016	75.6	75.60	1429.5961
18	2017	114.2	114.20	0.6241
19	2018	86.6	86.60	718.7761
20	2019	98.4	98.40	225.3001
20		Suma	2268.2	17531.7

Cálculo variables probabilísticas			
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} =$	113.41	mm	
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} =$	30.38	mm	
$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s =$	23.68	mm	
$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha =$	99.74	mm	

Periodo	Variable	Precip.	Prob. de	Corrección
Retorno	Reducida	(mm)	ocurrencia	intervalo fijo
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)
2	0.3665	108.4200	0.5000	122.5146
5	1.4999	135.2645	0.8000	152.8488
10	2.2504	153.0378	0.9000	172.9327
25	3.1985	175.4945	0.9600	198.3088
50	3.9019	192.1541	0.9800	217.1342
100	4.6001	208.6908	0.9900	235.8206
500	6.2136	246.9044	0.9980	279.0020

Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	122.5146	152.8488	172.9327	198.3088	217.1342	235.8206	279.0020
18 hr	X18 = 91%	111.4883	139.0924	157.3688	180.4610	197.5921	214.5967	253.8918
12 hr	X12 = 80%	98.0117	122.2791	138.3462	158.6470	173.7073	188.6565	223.2016

8 hr	X8 = 68%	83.3099	103.9372	117.5943	134.8500	147.6512	160.3580	189.7213
6 hr	X6 = 61%	74.7339	93.2378	105.4890	120.9684	132.4518	143.8505	170.1912
5 hr	X5 = 57%	69.8333	87.1238	98.5717	113.0360	123.7665	134.4177	159.0311
4 hr	X4 = 52%	63.7076	79.4814	89.9250	103.1206	112.9098	122.6267	145.0810
3 hr	X3 = 46%	56.3567	70.3105	79.5491	91.2220	99.8817	108.4775	128.3409
2 hr	X2 = 39%	47.7807	59.6110	67.4438	77.3404	84.6823	91.9700	108.8108
1 hr	X1 = 30%	36.7544	45.8547	51.8798	59.4926	65.1403	70.7462	83.7006
