



Análisis del estado de la susceptibilidad de la infraestructura hidráulica mediante herramientas GIS en la cabecera municipal de San Pablo, Nariño.

Juan David Granados Rincón

Juan David Martínez Urquijo

Juan Fernando Alvis González

Leidy Liliana Melo Caicedo

Tipo de documento para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Seleccione tipo de orientador(es):

José Fernando Mejía Correa, Doctor (PhD)

Director de posgrados

Jiber Antonio Quintero Salazar Magíster (MSc)

Planificación urbana y regional

Asesores de recursos académicos:

Harold Estiven García Álvarez (asesor bibliográfico), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual

Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Granados Rincón, J. D., Martínez Urquijo, J. D., Alvis González, J. F., & Melo Caicedo, L. L. (2025)
Referencia	Granados Rincón, J. D., Martínez Urquijo, J. D., Alvis González, J. F., & Melo Caicedo, L. L. (2025). <i>Susceptibilidad en la infraestructura hidráulica mediante herramientas GIS en el municipio de San Pablo, Nariño</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, I

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Línea de Investigación Territorios Inteligentes y Sostenibles.

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo - CIMAD

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

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

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

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

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

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

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

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
1. Planteamiento del problema.....	13
1.1 Estado actual de la problemática.	13
1.2 Descripción del área problemática.	16
1.3 Contextualización del problema en el espacio y tiempo.	16
1.4 Brechas en el conocimiento y vacíos a llenar.....	17
1.5 Delimitación del ámbito físico y circunstancial	17
1.6 Formulación del problema	18
1.7 Antecedentes	18
2. Justificación.....	20
2.1 Interés y motivaciones.....	20
2.2 Utilidad.....	20
2.3 Novedad del problema o temática de investigación	21
3. Objetivos	22
3.1 Objetivo general	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4. Referente normativo y legal	23
5. Marco teórico	24
5.1 Definición de términos clave.....	25
5.2 Susceptibilidad a movimientos en masa.....	26
5.3 Susceptibilidad a inundaciones	27
5.4 Factores condicionantes	28

5.4.1 Suelo	28
5.4.2 Relieve	29
5.4.3 Pendiente.....	29
5.4.4 Geomorfología	30
5.4.5 Geología.....	31
5.4.6 Cobertura.....	31
5.5 Factor detonante	32
5.5.1 Precipitación	32
5.6 Definición de categoría de susceptibles	33
5.7 Modelos de vulnerabilidad	34
5.7.1 Factores de vulnerabilidad en infraestructuras hidráulicas.....	34
5.7.1.1 Estado de la infraestructura	34
5.7.1.2 Ubicación geográfica.....	34
5.7.2 Análisis de la vulnerabilidad mediante GIS.....	35
5.7.3 Modelo o método de análisis jerárquico AHP	35
5.7.4 Integración espacial GIS	36
5.8 Impacto de desastres en la infraestructura hidráulica.....	37
5.8.1 Consecuencias de los desastres naturales en acueductos y sistemas de alcantarillado..	37
5.8.2 Evaluación de la resiliencia de la infraestructura existente	37
5.9 Perspectivas teóricas sobre la gestión del riesgo.....	37
5.9.1 Enfoque teóricos relevantes para la comprensión de la gestión del riesgo de desastres	37
5.10 Brechas y vacíos en la investigación.....	38
5.10.1 Identificación de áreas no abordadas en la literatura existente.....	38
6. Metodología	38
6.1 Enfoque metodológico	38

6.2. Justificación del enfoque mixto.....	39
6.2.1 Enfoque cuantitativo	39
6.2.2 Enfoque cualitativo	39
6.3 Tipo de estudio	40
6.4 Procedimiento.....	40
6.4.1 Fase 1. Identificación de zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa en la infraestructura hidráulica del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo mediante análisis geoespacial con ArcGIS Desktop.....	41
6.4.1.1 Obtención y elaboración de mapas temáticos de los factores condicionantes y detonantes.....	41
6.4.1.2 Procesamiento y reclasificación de factores.....	44
6.4.1.3 Aplicación del método de análisis jerárquico de procesos (AHP).....	44
6.4.1.4 Integración espacial y cálculo del mapa de susceptibilidad	45
6.4.1.5 Clasificación y análisis final	46
6.4.2 Fase 2. Identificación de zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones en la infraestructura hidráulica del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo mediante análisis geoespacial con ArcGIS Desktop.....	46
7. Resultados	46
7.1. Fase 1. Identificación de zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa en la infraestructura hidráulica del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo mediante análisis geoespacial con ArcGIS Desktop.....	46
7.1.1 Factores condicionantes	47
7.1.1.1 Suelos	47
7.1.1.2 Relieve.....	48
7.1.1.3 Pendientes.....	49
7.1.1.4 Geomorfología	51
7.1.1.5 Geológico	52
7.1.1.6 Cobertura de la tierra.....	53

7.1.2 Factores detonantes.....	54
7.1.2.1 Precipitación.....	55
7.1.3 Matriz de comparación por pares método AHP.....	56
7.1.4 Cálculo del mapa de susceptibilidad.....	57
7.2. Fase 2. Identificación de zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones en la infraestructura hidráulica del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo mediante análisis geoespacial con ArcGIS Desktop.....	58
7.2.1 Matriz de comparación por pares con el método AHP.....	59
7.2.2 Cálculo del mapa de susceptibilidad.....	60
7.3 Medidas preventivas y recomendaciones.....	61
8. Discusión.....	62
9. Conclusiones.....	64
10. Recomendaciones.....	65
Referencias.....	66
Anexos.....	76

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio (Municipio de San Pablo, Departamento de Nariño, Colombia)	15
Figura 2. Diagrama del Procedimiento Metodológico Implementado.....	41
Figura 3. Mapa de clasificación del suelo del área de estudio.	48
Figura 4. Mapa del relieve del área de estudio, clasificado según la altitud sobre el nivel del mar	49
Figura 5. Mapa de categorización de pendientes de acuerdo con el gradiente en el área de estudio.	51
Figura 6. Mapa geomorfológico del área de estudio.....	52
Figura 7. Mapa geología local del área de estudio.....	53
Figura 8. Mapa de la cobertura de la tierra del área de estudio a partir de clasificación supervisada	54
Figura 9. Mapa de Precipitación anual del área de estudio.....	55
Figura 10. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en el área de estudio.	57
Figura 11. Mapa de susceptibilidad a inundaciones en el área de estudio.	60

Lista de tablas

Tabla 1. Elementos del Sistema de Acueducto y Alcantarillado	15
Tabla 2. Niveles de susceptibilidad y prioridad en la gestión del riesgo para movimientos en masa e inundaciones	44
Tabla 3. Valores de importancia escala fundamental de Saaty	45
Tabla 4. Características del relieve en función de la pendiente	50
Tabla 5. Matriz de comparación por pares método Saaty ponderación de factores de susceptibilidad para movimientos en masa	56
Tabla 6. Grado de susceptibilidad en las unidades del sistema de acueducto y alcantarillado por movimientos en masa	58
Tabla 7. Matriz de comparación por pares método Saaty ponderación de factores de susceptibilidad para inundaciones	59
Tabla 8. Grado de susceptibilidad de las unidades del sistema de acueducto y alcantarillado por inundaciones	61

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ANLA	Agencia Nacional de Licencias Ambientales
ASE	<i>Agence spatiale européenne</i>
ArcGis	Conjunto de productos del <i>software</i> de información geográfica de <i>ESRI</i>
CI	Índice de consistencia de <i>Saaty</i>
Copernicus	<i>Global monitoring for environment and security</i>
NIR	<i>Near infrared</i>
DEM	<i>Digital elevation model</i>
DTM	<i>Digital terrain model</i>
EMC	Evaluación multicriterio
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESRI	<i>Environmental Science Research Institute</i>
FBCR	<i>Forest based classification and regression</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System</i>
Ideam	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
GIS	<i>Geographic Information Systems</i>
GSI	<i>Geological Strength Index</i>
MCDA	<i>Multicriteria decision analysis</i>
MLSC	<i>Maximum likelihood supervised classification</i>
MTG	<i>Meteosag</i> de Tercera Generación
OGC	<i>Open geospatial consortium</i>
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
QGis	Conjunto de productos del <i>software</i> conocido como <i>Quantum GIS</i>
raster	Imagen de computadora basada en píxeles con variadas resoluciones
ssppdd	Servicios públicos domiciliarios
UNAL	Universidad Nacional de Colombia

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo analizar la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en el área de influencia de la infraestructura hidráulica que abastece a la cabecera municipal de San Pablo, Nariño. El estudio busca identificar las condiciones físicas del territorio que favorecen la ocurrencia de estos fenómenos, empleando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La metodología contempla el uso de modelos digitales de elevación, análisis morfométricos y datos hidrológicos y geológico para caracterizar el terreno y delimitar zonas con mayor propensión a procesos gravitacionales e hidrometeorológicos. Se aplicará el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), una técnica multicriterio que permite comparar y ponderar factores condicionantes mediante matrices de comparación por pares, integrando estas variables en un entorno SIG para generar mapas de susceptibilidad que identifican áreas críticas para la infraestructura evaluada. Cabe resaltar que el estudio se limita a la identificación y representación espacial de factores condicionantes, sin abordar la evaluación de riesgo o vulnerabilidad.

Los resultados obtenidos constituirán una herramienta valiosa para orientar acciones preventivas, optimizar la planificación del mantenimiento y reducir la exposición e los sistemas hidráulicos a condiciones adversas. Esta información técnica servirá de insumo para futuras estrategias de intervención en territorios con alta complejidad geográfica y climática, como el municipio de San Pablo.

Palabras clave: Susceptibilidad; Movimientos en masa; Inundaciones; Sistemas de Información Geográfica (GIS); Análisis Jerárquico (AHP).

Abstract

This project aims to analyze the susceptibility of landslides and flooding within the area influenced by the hydraulic infrastructure supplying the municipal seat of San Pablo, Nariño. The study focuses on identifying the physical conditions of the terrain that favor the occurrence of these phenomena through the use of Geographic Information System (GIS) tools.

The methodology includes the use of digital elevation models, morphometric analyses, and hydrological and geological data to characterize the terrain and delineate zones with higher natural propensity for gravitational and hydrometeorological processes. The Analytic Hierarchy Process (AHP), a multicriteria evaluation technique, will be applied to compare and weight conditioning factors using pairwise comparison matrices. This approach facilitates the integration of variables within a GIS environment to generate susceptibility maps that identify critical areas for the evaluated infrastructure. It is important to note that the study is limited to the identification and spatial representation of conditioning factors and does not include risk or vulnerability assessments.

The results will provide a valuable tool to guide preventive actions, optimize maintenance planning, and reduce the exposure of hydraulic systems to adverse environmental conditions. This technical information can serve as input for future intervention strategies in territories with high geographic and climatic complexity, such as the municipality of San Pablo.

Keywords: Susceptibility; Landslides; Flooding; Geographic Information Systems (GIS) Analytic Hierarchy Process (AHP).

Introducción

Las condiciones geográficas y climáticas del municipio de San Pablo, Nariño, caracterizadas por pendientes pronunciadas, suelos inestables y elevados niveles de pluviosidad, favorecen la ocurrencia de fenómenos naturales como movimientos en masa e inundaciones. En efecto, estos eventos, propios del entorno físico, adquieren especial relevancia cuando afectan infraestructuras críticas como los sistemas de acueductos y alcantarillado, los cuales son esenciales para garantizar el bienestar y la salud pública de la población. Por consiguiente, el análisis espacial de los factores que predisponen al territorio a dichos procesos constituye un insumo clave para fortalecer la planeación territorial y anticipar posibles escenarios de afectación.

Teniendo en cuenta que la infraestructura hidráulica del municipio se encuentra en zonas con alta complejidad topográfica y climática, su exposición a estos fenómenos se incrementa considerablemente. De la misma forma, experiencias en territorios con características similares han demostrado que el uso de herramientas geoespaciales permite mejorar sustancialmente la identificación de zonas susceptibles y la toma de decisiones informadas.

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en el área de influencia de la infraestructura hidráulica que abastece a la cabecera municipal de San Pablo, Nariño, mediante la aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (*GIS*). Cabe precisar que el alcance de esta investigación se limita a la representación espacial de los factores físicos que condicionan dichos fenómenos, sin contemplar evaluaciones de riesgo ni de vulnerabilidad.

La pregunta de investigación que orienta este trabajo es: ¿Cuáles son las zonas de mayor susceptibilidad a fenómenos de origen gravitacional e hidrometeorológico en el área de influencia de la infraestructura hidráulica de San Pablo, Nariño, según los parámetros físicos del territorio? La respuesta a esta interrogante permitirá generar información técnica orientada a fortalecer los procesos de planificación, priorización y gestión preventiva por parte de los entes responsables.

En síntesis, la pertinencia de este estudio radica en la incorporación de metodologías geoespaciales para la identificación y representación de condiciones físicas que determinan la susceptibilidad del territorio. Así pues, se contribuye a la delimitación de áreas críticas y al fortalecimiento del conocimiento espacial, con el propósito de respaldar acciones orientadas a la

protección de la infraestructura hidráulica, dentro de los límites establecidos por el alcance metodológico del presente análisis.

1. Planteamiento del problema.

Las condiciones geográficas y climáticas del municipio de San Pablo, Nariño, caracterizadas por pendientes pronunciadas, suelos inestables y elevados niveles de pluviosidad, propician la ocurrencia de fenómenos naturales como movimientos en masa e inundaciones. Estos procesos pueden incidir de manera significativa en la infraestructura hidráulica, en particular en los sistemas de acueducto y alcantarillado, fundamentales para el desarrollo y el bienestar de la población. La ubicación de estas infraestructuras en zonas físicamente complejas incrementa su exposición a dichos fenómenos.

Este capítulo expone el planteamiento del problema que motiva esta investigación, enmarcado en la necesidad de identificar y caracterizar las condiciones físicas del territorio que determinan su susceptibilidad a los movimientos en masa e inundaciones. A través del uso de herramientas geoespaciales, se busca representar espacialmente los factores condicionantes que favorecen la ocurrencia de estos procesos, con el fin de aportar información técnica útil para la planificación territorial y la gestión preventiva de la infraestructura.

1.1 Estado actual de la problemática.

La cabecera del municipio de San Pablo, Nariño, está situada en una región montañosa con alta susceptibilidad a fenómenos geológicos y climáticos que representan un riesgo constante para su infraestructura esencial, particularmente los sistemas de acueducto y alcantarillado. La problemática central radica en la exposición de esta infraestructura a deslizamientos de tierra e inundaciones, eventos que se han intensificado en las últimas décadas debido a factores como el cambio climático, la deforestación y el uso inadecuado del suelo.

En términos concretos, los movimientos en masa ocurren en áreas con pendientes pronunciadas y suelos inestables, generando un riesgo inminente para las redes de suministro de agua y saneamiento. Por su parte, las inundaciones, favorecidas por la topografía y las precipitaciones, pueden afectar las unidades del sistema y comprometer su funcionamiento. Estos

dos tipos de eventos geológicos son interdependientes, ya que las condiciones que favorecen los deslizamientos también incrementan la probabilidad de inundaciones, creando así un escenario de riesgo complejo y multifactorial.

El área de estudio para este proyecto se definió en función de la infraestructura de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo, Nariño. Este sistema incluye siete bocatomas, de las cuales seis están ubicadas en la vereda Bateros, abasteciéndose de ramales de la cuenca Bateros. Estas bocatomas se conectan a un desarenador y desembocan en un tanque de almacenamiento en la zona urbana, donde el agua es conducida a la planta de tratamiento y luego a la red domiciliaria. Además, hay una bocatoma la vereda Praditas, sobre el río Blanquito, que también se conecta a un desarenador y a un tanque que alimenta la planta de tratamiento. En relación con el sistema de alcantarillado, se han identificado dos colectores al sur del municipio que serán considerados en este estudio. A continuación, la figura 1 presenta las unidades objeto de análisis y su área de influencia, así como un inventario de la infraestructura de acueducto y alcantarillado.

Nota. Elaboración propia.

1.2 Descripción del área problemática.

A nivel global, los movimientos en masa y las inundaciones son fenómenos geológicos ampliamente estudiados debido a su capacidad para causar daños catastróficos en infraestructuras y comunidades. En estudios previos, como los de *Reichenbach et al.* (2018), se ha demostrado que la combinación de factores topográficos, geomorfológicos y climáticos desempeña un papel crucial en la predisposición de una región a estos eventos. En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (2015) ha identificado varias áreas del suroccidente del país, incluyendo San Pablo, como zonas de alta vulnerabilidad a desastres relacionados con movimientos de masa e inundaciones, lo que resalta la importancia de este tipo de investigaciones a nivel local.

Sin embargo, aunque existen avances significativos en la identificación de zonas de susceptibles mediante tecnologías de información geográfica y modelación matemática, aún persisten brechas en la integración de estos estudios a nivel municipal. En San Pablo, específicamente, no se han desarrollado análisis detallados que combinen el uso de herramientas *GIS* (como *QGIS* o *ArcGIS*) con metodologías precisas para predecir la interacción entre los fenómenos de movimientos en masa e inundaciones en relación con la infraestructura hidráulica. Esta falta de estudios especializados crea un vacío de conocimiento en términos de identificación precisa de zonas críticas y la propuesta de soluciones orientadas a la prevención.

1.3 Contextualización del problema en el espacio y tiempo.

El municipio de San Pablo, Nariño, se ubica en una región geográficamente compleja dentro de los Andes colombianos, caracterizada por fuertes pendientes, actividad tectónica y una temporada de lluvias prolongada e intensa. Estas condiciones geológicas, sumadas a la presión humana sobre el territorio, como el crecimiento urbano desordenado y la agricultura en laderas, han exacerbado los problemas de inestabilidad del terreno y la gestión del agua.

En términos temporales, el cambio climático ha intensificado los eventos de precipitación extrema, incrementada la frecuencia de deslizamientos e inundaciones en las últimas dos décadas (Mendoza Ramírez & Aristizábal Giraldo, 2017). Estas circunstancias han generado un escenario propenso a emergencias recurrentes, donde la infraestructura hidráulica del municipio se ve

continuamente amenaza por fenómenos naturales. Aunque se han realizado esfuerzos aislados para mejorar la resiliencia de estas infraestructuras, no existe una estrategia integrada que aborde el análisis geoespacial, la gestión del riesgo y la planificación del territorio de manera conjunta y basada en evidencia científica.

1.4 Brechas en el conocimiento y vacíos a llenar

Este proyecto busca llenar el vacío existente en la identificación de la susceptibilidad a fenómenos geodinámicos que puedan afectar la infraestructura hidráulica del municipio de San Pablo, mediante el uso de herramientas SIG. Aunque estudios internacionales como los de *Guzzetti et al.* (2005) han desarrollado metodologías sólidas para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos e inundaciones centrándose en la caracterización de los factores condicionantes y no en el riesgo, a nivel local aún falta aplicar estas técnicas e interpretarlas correctamente según las condiciones geográficas específicas del territorio. La identificación de zonas con alta propensión a procesos de origen gravitacional e hidrometeorológico permitirá orientar acciones de planificación y manejo territorial más eficaces, enfocadas en cada territorio o contextualizadas.

El presente estudio integra tecnologías avanzadas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con datos topográficos y geomorfológicos específicos de la región para generar mapas de susceptibilidad a desastres geológicos. Estos resultados serán fundamentales como insumo técnico para la toma de decisiones en el ámbito municipal y ofrecerán una base sólida para futuras intervenciones en infraestructura y el diseño de políticas públicas enfocadas en la prevención y la adaptación ante fenómenos naturales.

1.5 Delimitación del ámbito físico y circunstancial

El estudio se centra específicamente en el área de influencia de la infraestructura hidráulica de la cabecera municipal de San Pablo, la cual comprende las redes de acueducto y alcantarillado. Estas infraestructuras son críticas para el bienestar de la población local y su ubicación en zonas de alto riesgo geológico las convierte en el foco principal de análisis. En este contexto, el proyecto abordará los fenómenos de deslizamientos de tierra e inundaciones como variables clave para evaluar la vulnerabilidad de estas estructuras. Los resultados de esta investigación no solo tendrán relevancia para San Pablo, sino también podrán ser extrapolados a otras regiones del país con

condiciones geográficas similares, contribuyendo así a la mejora de la resiliencia de infraestructuras hidráulicas en Colombia.

1.6 Formulación del problema

¿De qué manera la susceptibilidad a los movimientos en masa e inundaciones afecta la operatividad y seguridad de la infraestructura hidráulica (acueducto y alcantarillado) en le área de influencia de la cabecera del municipio de San Pablo, Departamento de Nariño y cómo pueden las herramientas geoespaciales (*GIS*) ser utilizadas para identificar y mapear estas áreas susceptibles?

Esta pregunta guía la investigación, delimitando claramente el objeto de estudio: La infraestructura hidráulica de San Pablo y su relación con fenómenos naturales de origen geológico e hidrometeorológico, tales como movimientos en masa e inundaciones. El enfoque se centra en identificar los factores condicionantes que favorecen la ocurrencia de estos fenómenos, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (*GIS*) para analizar datos topográficos, geomorfológicos e hidrológicos. El objetivo es obtener una caracterización precisa de las zonas más susceptibles a estos eventos, con el fin de proporcionar una base técnica para la gestión del riesgo. Los resultados obtenidos permitirán establecer áreas críticas que puedan requerir atención especial, lo cual puede servir de base para desarrollar estrategias preventivas como el monitoreo continuo de las zonas más vulnerables y la orientación de intervenciones focalizadas para minimizar los posibles impactos de estos fenómenos sobre la infraestructura.

1.7 Antecedentes

Diversos estudios han abordado la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos y otros procesos relacionados con los riesgos naturales desde enfoques metodológicos variados. *Atkinson* y *Massari* (1998) analizaron la susceptibilidad a los deslizamientos en los Apeninos centrales de Italia utilizando modelos lineales generalizados, destacando la importancia de variables como la pendiente, litología y uso del suelo para evaluar el riesgo, aspectos directamente relevantes para la infraestructura hidráulica en San Pablo. Complementando esta perspectiva, *Guzzetti et al.* (1999) emplearon técnicas múltiples para evaluar la peligrosidad de deslizamientos en Italia, subrayando la necesidad de un enfoque multidimensional en los análisis de riesgo. En la misma línea, *Reichenbach et al.* (2018) realizaron una revisión de modelo estadísticos de susceptibilidad a

deslizamientos, estableciendo un marco útil para seleccionar las técnicas más adecuadas. Otros autores se han enfocado en el desarrollo de herramientas predictivas. *Catani, Segoni y Galorni* (2010) propusieron un modelo empírico para predecir el grosor del suelo a escala de cuenca hidrográfica, apoyado en variables topográficas, útil para el análisis de avenidas torrenciales.

Asimismo, *Mendoza Ramírez y Aristizábal Giraldo* (2017) desarrollaron una metodología de zonificación de susceptibilidad en proyectos lineales de infraestructura mediante *GIS*, demostrando la aplicabilidad de estos sistemas en la evaluación de riesgos como los presentes en San Pablo. *Lee y Pradhan* (2007) aplicaron modelos de frecuencia y regresión logística para mapear riesgos de deslizamientos en Malasia y su enfoque puede ser adaptado al contexto local. Igualmente, *Guzzetti et al.* (2005) emplearon un enfoque probabilístico a escala de cuenca para evaluar la peligrosidad, aportando una dimensión cuantitativa esencial para la planificación. Desde una perspectiva más conceptual y normativa. *Varnes* (1984) ofreció una clasificación y principios para la zonificación de riesgos por deslizamientos que sigue siendo fundamental en la estructuración de análisis actuales. *Fell et al.* (2008), por su parte, brindaron directrices específicas para la zonificación de susceptibilidad y riesgo, útiles en la planificación territorial.

También *Corominas et al.* (2014) aportaron recomendaciones metodológicas para el análisis cuantitativo del riesgo, que pueden servir de base para el desarrollo de modelos predictivos aplicados a la infraestructura hidráulica. A su vez, *Soeters y Van Westen* (1996) abordaron el reconocimiento y zonificación de inestabilidades en pendientes, proporcionando fundamentos teóricos sólidos para identificar zonas críticas. Por otro lado, se reconoce la importancia del componente espacial y geológico en la comprensión de la amenaza. *Núñez* (2003) llevó a cabo un reconocimiento geológico en el sur de Colombia, subrayando características geológicas que inciden en la susceptibilidad a deslizamientos, lo cual es crucial para contextualizar el área de estudio. *Van Zuidam* (1986) destacó el papel de la fotointerpretación aérea en el análisis del terreno, una herramienta aplicable para la recopilación de información geoespacial en proyectos como el de San Pablo. De manera complementaria, *Malamud et al.* (2004) analizaron propiedades estadísticas de inventarios de deslizamientos, proporcionando insumos para entender la recurrencia y distribución de eventos en el tiempo. Finalmente, *Glade* (2003) exploró cómo los cambios en el uso del suelo influyen la ocurrencia de deslizamientos en Nueva Zelanda, resaltando la relevancia de los factores socioeconómicos, un aspecto también importante en la región objeto del presente análisis.

2. Justificación

2.1 Interés y motivaciones

Este proyecto es fundamental para garantizar la operatividad y seguridad de la infraestructura hidráulica (acueducto y alcantarillado) en el municipio de San pablo, Nariño, ya que esta se encuentra en una zona geológicamente activa con alta susceptibilidad a fenómenos como movimientos en masa e inundaciones. Estos eventos no solo pueden afectar la continuidad de los servicios básicos, sino también ocasionar pérdidas económicas y sociales en la comunidad. La motivación principal radica en la necesidad de aplicar metodologías de análisis geoespacial, como el uso de Sistemas de Información Geográfica (*GIS*) mediante *ArcGIS*, modelos digitales de terreno (*DTM*) y la técnica multicriterio de análisis jerárquico (*AHP*), para identificar las áreas con mayor susceptibilidad y proponer medidas preventivas basadas en evidencia científica. Este proyecto tiene relevancia tanto académica como práctica, ya que contribuye al desarrollo de soluciones específicas para la gestión de la susceptibilidad en infraestructuras hidráulicas. En términos de pertinencia, la investigación responde a las necesidades locales y regionales, abordando la alta susceptibilidad geológica de la región

2.2 Utilidad

Los resultados de este proyecto serán de gran utilidad para las entidades locales (alcaldía municipal de San Pablo u otras municipalidades que se puedan generar) y regionales (no solo del departamento de Nariño sino entidades supramunicipales o supra departamentales que se logren conformar). Las cuales son encargadas de la gestión de infraestructura y riesgos, así como para las comunidades que dependen del suministro de agua y sistemas de alcantarillado. Al identificar las zonas más vulnerables, los mapas resultantes permitirán una planificación más eficaz de las intervenciones preventivas en la infraestructura hidráulica. De esta forma, se podrá garantizar la seguridad de los sistemas ante fenómenos naturales extremos, evitando interrupciones en el servicio y protegiendo a la población. La investigación también tendrá un impacto positivo en la comunidad académica, al aportar nuevos conocimientos sobre la aplicación de herramientas

geoespaciales en el análisis de la susceptibilidad de la infraestructura hidráulica. Además, a nivel regional, el proyecto contribuir al fortalecimiento de capacidades técnicas y metodológicas para la gestión de la susceptibilidad, reforzando la resiliencia ante fenómenos naturales en el departamento de Nariño y sus municipios.

2.3 Novedad del problema o temática de investigación

El enfoque innovador de esta investigación radica en la aplicación de tecnologías de información geográfica como *ArcGIS*, junto con modelos digitales de terreno (*DTM*) de alta y media resolución, para mapear áreas susceptibles a fenómenos geológicos y climáticos que pueden afectar la infraestructura hidráulica, considerando factores condicionantes del terreno. Aunque existen estudios previos sobre la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones, este proyecto introduce una metodología adaptada específicamente al análisis de la susceptibilidad en infraestructuras hidráulicas, lo que representa un enfoque novedoso en el contexto de San Pablo. La novedad también reside en la implementación del Proceso de Análisis Jerárquico (*AHP*) como técnica multicriterio para ponderar y jerarquizar los factores condicionantes, integrándolos en un entorno *GIS* para generar mapas de susceptibilidad precisos. De esta forma, se contribuye a la identificación de zonas con mayor propensión a estos fenómenos, facilitando una mejor planificación y mantenimiento de las infraestructuras esenciales del municipio. Este enfoque metodológico, que combina análisis geoespacial, *MDT* y *AHP*, representa un avance significativo en la evaluación de la susceptibilidad en contexto geológicos y climáticos complejos y ofrece un modelo replicable para otras regiones con características similares.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en el área de influencia de la infraestructura hidráulica (acueducto y alcantarillado) de la cabecera municipal de San Pablo, Nariño, mediante el uso de herramientas geoespaciales en *ArcGIS*, con el fin de identificar y delimitar zonas críticas que puedan comprometer su operatividad y seguridad.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar y delimitar zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa que puedan afectar la infraestructura de acueducto y alcantarillado de San Pablo, a partir del análisis de factores condicionantes como pendiente, litología y uso del suelo, utilizando herramientas *GIS*.
- Delimitar áreas con alta susceptibilidad a inundaciones en el entorno de los sistemas de acueducto y alcantarillado, mediante la interpretación de modelos digitales de terreno y variables hidrogeológicas relevantes, procesadas en *ArcGIS*.
- Generar mapas temáticos de susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones, que permitan visualizar espacialmente las zonas críticas para la infraestructura hidráulica y sirvan como insumo para la gestión preventiva y la planificación del mantenimiento

4. Referente normativo y legal

El estudio de la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en el área de influencia de la infraestructura hidráulica en San Pablo, Departamento de Nariño, se enmarca dentro de un contexto normativo que establece directrices claras para la gestión del riesgo de desastres. A continuación, se describen las normativas y guías relevantes que fundamentan este estudio, organizadas en un orden jerárquico de mayor a menor rango.

Ley 1523 de 2012

Esta ley adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. La ley promueve la integración de la gestión del riesgo en todos los sectores y destaca la importancia de realizar estudios de susceptibilidad para la protección de la infraestructura y la población.

Decreto 1807 de 2014

Este decreto reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 y establece lineamientos para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Es crucial para garantizar que los planes de desarrollo urbano y rural consideren adecuadamente los riesgos naturales, incluyendo movimientos en masa y avenidas torrenciales.

Decreto 1077 de 2015

Este decreto expide se expide bajo el nombre de Reglamento Único del Sector de Vivienda Ciudad y Territorio. Contiene directrices sobre la planificación y regulación de proyectos de infraestructura, enfatizando la importancia de incluir la gestión del riesgo en la construcción y mantenimiento de la infraestructura hidráulica.

Guía metodológica para la formulación de programas de gestión del riesgo de desastres en servicios de acueductos, alcantarillados y aseo (2014)

Esta herramienta metodológica proporciona directrices específicas para la gestión del riesgo en servicios básicos, incluyendo la identificación de amenazas y vulnerabilidades relacionadas con la infraestructura hidráulica.

Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa para escala detallada (2016)

Esta guía ofrece un enfoque estructurado para realizar estudios sobre amenazas, vulnerabilidades y riesgos relacionados con movimientos en masa, contribuyendo a una mejor planificación y gestión del riesgo en áreas susceptibles.

Decreto 2157 de 2017

Establece directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de entidades públicas y privadas, en línea con el artículo 42 de la Ley 1523 de 2012. Este decreto resalta la necesidad de una planificación estratégica en la gestión del riesgo.

Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa para escalas de 1:25000 (2017)

Esta guía proporciona criterios y métodos para la zonificación de amenazas por movimientos en masa, permitiendo la identificación precisa de áreas en riesgo, lo cual es vital para la planificación de infraestructura segura.

Decreto 1478 de 2022

Este decreto adopta la actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y modifica el artículo 2.3.1.2.2.4.3 del Decreto 1081 de 2015, asegurando que se mantenga la relevancia y la efectividad de las políticas en la gestión del riesgo.

5. Marco teórico

El estudio de la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en la infraestructura hidráulica, especialmente en el contexto del municipio de San Pablo, Nariño, requiere un enfoque multidimensional que integra teorías y conceptos de diversas disciplinas. Este marco teórico busca proporcionar una base sólida para entender las interacciones entre los factores geológicos, geomorfológicos y climáticos que influyen en la ocurrencia de estos fenómenos.

La gestión del riesgo de desastres ha cobrado relevancia en el ámbito global y nacional, tal como se establece en la Ley 1523 de 2012, que adopta la política nacional de gestión del riesgo y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) en Colombia. Esta normativa subraya la necesidad de integrar la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial, como se destaca en el Decreto 1807 de 2014. La incorporación de metodologías adecuadas es fundamental

para identificar y evaluar áreas vulnerables y se apoya en guías metodológicas que abordan específicamente la amenaza de movimientos en masa.

La literatura existente también refleja el desarrollo de modelos estadísticos y geoespaciales para la evaluación de la susceptibilidad a desastres naturales. Según *Guzzetti et al.* (2005), el uso de *GIS* ha sido crucial para la evaluación del riesgo de deslizamientos, permitiendo una comprensión más precisa de la vulnerabilidad territorial. Esto se complementa con la investigación de *Malamud et al.* (2004), quienes enfatizan la importancia de los inventarios de deslizamientos y sus propiedades estadísticas en la formulación de estrategias de mitigación.

A medida que se avanza en la investigación, se hace evidente la necesidad de un enfoque que combine la teoría con la práctica, considerando tanto la experiencia acumulada en el campo como las innovaciones metodológicas. Esto permitirá no solo llenar vacíos existentes en el conocimiento, sino también ofrecer contribuciones significativas a la comprensión y gestión del riesgo en la región de San Pablo.

5.1 Definición de términos clave

- **Movimientos en masa:** Los movimientos en masa se refieren al desplazamiento de rocas y suelo a lo largo de una pendiente, impulsados por la gravedad. Según *Cruden y Varnes* (1996), estos pueden clasificarse en diferentes tipos, incluyendo deslizamientos, flujos y caídas. La comprensión de estos fenómenos es crucial para evaluar la susceptibilidad de áreas en riesgo, especialmente en el contexto de la infraestructura hidráulica, donde un deslizamiento puede comprometer la seguridad y funcionalidad de sistemas de acueducto y alcantarillado.
- **Inundaciones:** Las inundaciones son un fenómeno natural que ocurre cuando el agua cubre áreas que normalmente están secas. Este fenómeno puede resultar de diversas causas, incluyendo lluvias intensas, desbordamiento de ríos y condiciones climáticas extremas. *Glade* (2003) resalta la importancia de comprender los patrones de inundación y sus implicaciones en la planificación urbana y en la gestión de infraestructura. El análisis de la susceptibilidad a inundaciones en el área de influencia de la infraestructura hidráulica de San pablo es esencial para asegurar la operatividad y seguridad de los sistemas de acueducto y alcantarillado.

- **Susceptibilidad:** La susceptibilidad se refiere a la vulnerabilidad de una zona ante eventos adversos, como movimientos en masa e inundaciones. Según *Guzzetti et al.* (2005), la susceptibilidad se puede evaluar mediante modelos que consideran factores geomorfológicos, climáticos y de uso del suelo. Este proyecto tiene como objetivo identificar zonas de alta susceptibilidad en San Pablo, utilizando herramientas geoespaciales que faciliten una evaluación precisa de los riesgos.
- **Vulnerabilidad:** La vulnerabilidad se define como la predisposición de una comunidad o infraestructura a sufrir daños en caso de un evento adverso (*Soeters & Van Westen, 1996*). En el contexto de este proyecto se explorará la vulnerabilidad de la infraestructura hidráulica de San Pablo ante movimientos en masa e inundaciones, proporcionando un enfoque integral para la gestión del riesgo.

5.2 Susceptibilidad a movimientos en masa

La susceptibilidad a movimientos en masa se refiere a la predisposición de un terreno a experimentar procesos de remoción en masa como deslizamientos, caídas de rocas o flujos de detritos, sin considerar la frecuencia del evento ni los elementos expuestos. Esta se determina a partir de variables físicas del terreno, como pendiente, litología, uso del suelo, cobertura vegetal y geomorfología (*Reichenbach et al., 2018*).

En zonas montañosas como San Pablo, la identificación de áreas con alta susceptibilidad es crucial para la protección de la infraestructura hidráulica, especialmente redes de acueductos y alcantarillado ubicadas en laderas inestables. El uso de herramientas *GIS* como *ArcGIS* permite modelar esta susceptibilidad mediante la integración de capas temáticas -pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal- y la aplicación de modelos multicriterio.

ArcGis, a través de su extensión *Spatial Analyst*, permite el análisis de modelos digitales de elevación (*DEM*) para derivar variables como *slope* (que se traduce en español como pendiente) y relieve (mediante la categorización de intervalos entendidos como polígonos en función de la altitud), fundamentales en los estudios de inestabilidad de laderas. Además, funciones como *Weighted Overlay* posibilitan la ponderación de variables y la creación de mapas de susceptibilidad con base en criterios definidos por expertos o mediante método de análisis jerárquico (*AHP*).

5.3 Susceptibilidad a inundaciones

La susceptibilidad a inundaciones se refiere a la propensión del terreno a experimentar anegamientos derivados de sus características físicas e hidrológicas, sin considerar la frecuencia del evento (*Dilley et al., 2005; Guzzetti et al., 2008*). Factores como la pendiente, tipo de suelo, capacidad de drenaje, cobertura vegetal y geomorfología influyen en esta susceptibilidad.

En zonas montañosas como San Pablo, las precipitaciones intensas y la topografía abrupta aumentan el riesgo de inundaciones fluviales y avenidas torrenciales. Para evaluar este riesgo, es fundamental integrar espacialmente las variables condicionantes y detonantes.

Una técnica común para esta integración es el análisis jerárquico de procesos (*AHP*), que asigna ponderaciones a cada factor según su importancia relativa, facilitando la combinación de capas temáticas en *GIS* mediante superposición ponderada (*Saaty, 1977*). Respecto a la variable pluviométrica, los mapas de precipitación se generan mediante métodos de interpolación espacial. Entre los más usados están:

- *Spline*: produce superficies suaves y continuas, captando variaciones locales (*Rodríguez et al., 2008*).
- Polígonos de *Thiessen*: asigna valores según la estación más cercana, sin suavizado (*Burrough & McDonnell, 1998*).
- Distancia inversa ponderada (*IDW*): pondera valores según a distancia inversa (*Delgado, 2024*). Es decir, este método de interpolación por distancia inversa ponderada o medida o pesada supone que cada punto medido tiene una influencia local que disminuye con la distancia. Se utiliza en predicciones que son asignadas a puntos de datos que se puede ilustrar o graficar (*Environmental Science Research Institute, 2025*).
- *Kriging*: Método geoestadístico que considera la autocorrelación espacial para estimaciones precisas (*Cressie, 1993*). Es una segunda manera o método de interpolación que incluye autocorrelación. Tiene la capacidad de producir una superficie de predicción y además mide certeza o precisión o así lo afirma *ESRI* en su descripción como herramienta integrada a su *software*.

La combinación del *AHP* para ponderar factores y métodos de interpolación para estimar la precipitación en un entorno *GIS* permite elaborar mapas de susceptibilidad a inundaciones que apoyan la gestión y mitigación del riesgo.

5.4 Factores condicionantes

Son elementos o conjuntos de datos capturados y georreferenciados para su representación espacial. Según las hipótesis planteadas, estos factores influyen en la ocurrencia de amenazas, como los movimientos en masa. Se consideran condiciones actuales del terreno, conocidas como discrete features, es decir, elementos relativamente permanentes o que cambian en periodos largos o por factores detonantes. Para este estudio, se usan datos de precipitación como factor detonante que puede modificar el relieve a través de movimientos en masa. Además, el desarrollo agrícola puede afectar capas del terreno, como la cobertura vegetal, que normalmente se consideran estables.

5.4.1 Suelo

El suelo desempeña un papel fundamental en la susceptibilidad tanto a movimientos en masa como a inundaciones, debido a su estructura, textura, permeabilidad y grado de cohesión. Suelos arcillosos, con alta plasticidad o baja permeabilidad, presentan mayor probabilidad de inestabilidad o saturación frente a eventos de lluvia intensa (*Crosta, 1998*).

En el contexto de San Pablo, los suelos formados sobre materiales volcánicos o sedimentarios son frecuentes y suelen presentar características que los hacen susceptibles a procesos de remoción en masa o a convertirse en superficies poco permeables, lo que favorece el escurrimiento superficial y por tanto las inundaciones.

Desde el enfoque geoespacial, *ArcGIS* permite clasificar y mapear los diferentes tipos de suelo mediante herramientas como *Reclassify* y *Raster calculator*, lo que facilita la incorporación de esta variable en modelos de susceptibilidad. A sí mismo, la superposición de capas de suelos con variables como pendiente y cobertura vegetal, mediante análisis de álgebra de mapas, permite identificar combinaciones críticas que aumentan la vulnerabilidad de la infraestructura hidráulica.

5.4.2 *Relieve*

El relieve, entendido como la configuración tridimensional del terreno, es un factor condicionante fundamental que influye en la estabilidad del suelo y en los patrones de escorrentía superficial. En este estudio, se utilizó un modelo digital de elevación (*DEM*) para representar la altura sobre el nivel del mar, a partir del cual se generó un mapa de pendiente. Posteriormente, con el fin de segmentar el área de estudio en zonas altitudinales que reflejan diferentes características del relieve. Las áreas con pendientes pronunciadas presentan mayor susceptibilidad a movimientos en masa, como graduales y derrumbes, debido a la inestabilidad inherente del terreno inclinado. Por otro lado, las zonas planas o depresiones tienden a acumular agua, favoreciendo la ocurrencia de inundaciones (*Ayalew & Yamagishi, 2005*).

En el municipio de San Pablo, la topografía montañosa acentúa estos riesgos, ya que la infraestructura hidráulica, como sistemas de acueducto y alcantarillado, suele estar ubicada en laderas o cercanías de áreas propensas a inundaciones y movimientos en masa. Además, factores como la orientación del terreno (aspecto) y la forma del relieve influyen en la dirección y magnitud de los procesos erosivos y de acumulación de agua.

El análisis del relieve en *ArcGIS* se realiza mediante herramientas específicas que generan variables clave para la evaluación de susceptibilidad: *slope*, *aspecto*, *hillshade* y una serie de combinación de estas variables, que junto con una reclasificación del *DEM* por rangos, permite obtener productos cartográficos que caracterizan el territorio.

5.4.3 *Pendiente*

La pendiente del terreno es uno de los factores más decisivos en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa. A medida que el ángulo de inclinación aumenta, la fuerza gravitacional sobre el suelo incrementa, reduciendo la estabilidad y favoreciendo deslizamientos y caídas de material, especialmente si el suelo está saturado o ha perdido cohesión (*Montgomery & Diertrich, 1994*).

En zonas con infraestructura hidráulica ubicadas en escenarios de pendientes pronunciados pueden comprometer la integridad de redes de conducción o sistemas de recolección de aguas servidas, generando riesgos tanto estructurales como operativos. La pendiente también influye en

la velocidad del escurrimiento superficial, por lo que es un factor relevante también en la susceptibilidad a inundaciones súbitas.

Con herramientas como *ArcGIS*, es posible calcular la pendiente de forma precisa utilizando modelos digitales de elevación (*DEM*). La herramienta *slope* permite clasificar áreas según intervalos de inclinación, lo cual es útil para generar mapas temáticos de zonas con riesgo alto, medio o bajo. Estos mapas pueden ser integrados posteriormente en modelos de análisis multicriterio para generar evaluaciones de riesgo compuestas.

5.4.4 Geomorfología

La geomorfología se refiere al estudio de las formas del terreno y los procesos que las modelan, siendo un factor clave para comprender la distribución espacial de los fenómenos naturales como deslizamientos e inundaciones. Las unidades geomorfológicas (valles, laderas, terrazas, cuencas) determina cómo se comporta el agua superficial, la acumulación de sedimentos y la estabilidad de los suelos (*Brardinoni et al., 2003*).

En San Pablo las formas del relieve -producto de procesos fluviales, volcánicos, piroplásticos, tectónicos y telúricos- configuran un paisaje complejo donde la identificación geomorfológica resulta indispensable para anticipar zonas con alta susceptibilidad a eventos naturales que puedan afectar la infraestructura hidráulica. Por ejemplo, las laderas convexas o cóncavas, las terrazas de aluvión y los abanicos de desbordamiento son indicadores geomorfológicos relevantes.

Los datos geomorfológicos suelen obtenerse de estudio especializados o de entidades oficiales para garantizar su confiabilidad y precisión en los análisis posteriores (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2016). La geomorfología estudia las formas de la superficie terrestre, su evolución y comportamiento y es fundamental para entender procesos como la estabilidad del terreno y la dinámica hídrica (Agencia Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2019).

El análisis geomorfológico detallado se basa en la interpretación de Modelos Digitales de Elevación (*DEM*) y otras capas derivadas, como curvatura, perfil longitudinal de cauces y análisis de sombras (*hillshade*), que permiten clasificar el terreno según criterios morfométricos como pendiente, altitud y forma del relieve (*Lugo Hupb, 2011*). Estos datos facilitan la delimitación de unidades geomorfológicas homogéneas y la identificación de zonas de acumulación o erosión,

aspectos clave para evaluar la estabilidad del terreno y planificar el mantenimiento preventivo de infraestructuras hidráulicas (*Magnin et al.*, 2006).

5.4.5 Geología

La geología influye directamente en la susceptibilidad del terreno a procesos como deslizamientos, flujos de detritos e infiltraciones que pueden comprometer la infraestructura hidráulica. Factores como la litología (tipo de roca o suelo), la presencia de fallas geológicas, la fracturación de los materiales y el grado de meteorización determinan el comportamiento mecánico del terreno frente a eventos hidrometeorológicos (Crosta, 1998).

En el municipio de San pablo, la presencia de formaciones volcánicas y sedimentarias, muchas de ellas alteradas por procesos tectónicos, incrementa la posibilidad de inestabilidad en las laderas. Las rocas blandas, suelos residuales y capas arcillosas son particularmente propensas a fallas estructurales cuando están saturadas o intervenidas por condiciones de la intervención humana, como sucede en zonas de expansión urbana o agrícola.

A través de *ArcGIS*, la variable geológica se puede incorporar en los análisis de susceptibilidad mediante capas vectoriales de litología, zonas de fallas y unidades geotécnicas, generalmente obtenidas de estudios geológicos regionales o de datos del Servicio Geológico Colombiano. Herramientas como *join*, *spatial join* y *overlay análisis* permiten superponer esta información con capas de infraestructura y condiciones topográficas, identificando áreas de riesgo geotécnico relevante.

Además, si se cuenta con mapas geotécnicos detallados, pueden aplicarse métodos de reclasificación y ponderación en *Weighted overlay* o *Model Builder*, integrando la geología como uno de los factores clave del modelo de susceptibilidad.

5.4.6 Cobertura

La cobertura del terreno, en especial la vegetación, actúa como un regulador natural frente a procesos de inestabilidad e inundaciones. Las raíces de las plantas mejoran la cohesión del suelo, reducen la escorrentía superficial y favorecen la infiltración, mientras que la pérdida de cobertura

vegetal -por deforestación, urbanización o agricultura intensiva- incrementa significativamente la susceptibilidad a deslizamientos y anegamientos (*Greenway, 1987*).

En el contexto de San Pablo, el reemplazo de vegetación nativa por cultivos de ciclo corto o áreas urbanizadas ha modificado el equilibrio natural del terreno. Esta transformación no solo aumenta la exposición de la infraestructura hidráulica a fenómenos naturales, sino que también reduce la capacidad del ecosistema para mitigar sus efectos.

Con *ArcGIS*, la cobertura se analiza principalmente a través de imágenes satelitales o fotografía aéreas procesadas mediante clasificación supervisada o no supervisada, y se representa en capas temáticas de uso del suelo o cobertura terrestre. Estas capas pueden cruzarse con mapas de pendientes, suelos y redes de infraestructura mediante herramientas como *intersect*, *clip* o *map algebra*, lo que permite identificar zonas donde la pérdida de cobertura incrementa la vulnerabilidad de las redes hidráulicas.

Además, las capas de cobertura pueden ser ponderadas en análisis multicriterio, integrando información cuantitativa y cualitativa para producir mapas de susceptibilidad más robustos.

5.5 Factor detonante

Son datos espaciales que representan fenómenos continuos, los cuales pueden variar según las temporadas. Como cualquier dato geoespacial, se ubican e identifican mediante procesos, tipos, factores, causas, frecuencia y otras métricas que permiten evaluar su intensidad o manifestación. Aunque San Pablo está en una zona sísmica, en este estudio solo se considera la precipitación como factor detonante, con el fin de proyectar las zonas susceptibles que forman parte de la infraestructura hidráulica o áreas de interés. Estas zonas pueden verse afectadas por fenómenos como avenidas torrenciales, inundaciones y movimientos en masa, lo que podría impactar negativamente el suministro de agua potable y los servicios hidrosanitarios relacionados.

5.5.1 Precipitación

La precipitación es uno de los factores detonantes más significativos en la activación de deslizamientos, flujos de detritos e inundaciones. La intensidad, duración y acumulación de lluvia

pueden generar la saturación del suelo, disminuir su cohesión interna y activar procesos gravitacionales o generar escorrentía superficial rápida (*Guzzetti et al.*, 2008)

En el municipio de San Pablo, las precipitaciones orográficas frecuentes, típicas de regiones andinas, aumenta el riesgo sobre la infraestructura hidráulica localizada en laderas o en cercanías de cauces. Estas lluvias no solo actúan como desencadenantes directos de inestabilidad del terreno, sino que también contribuyen al colapso de sistemas de drenaje, al desbordamiento de cuerpos de agua y a la erosión de taludes.

El análisis de datos de precipitación puede abordarse de distintas maneras según el tipo de estudio. Por un lado, existen métodos de interpolación que, utilizando datos hidrometeorológicos consistentes, permiten estimar la distribución espacial de la precipitación anual o mensual. Por otro lado, herramientas como HEC-HMS facilitan la modelación hidrológica lluvia-escorrentía para simular la respuesta de cuencas ante eventos extremos. Desde el enfoque geoespacial, ArcGIS integra datos climáticos históricos o en tiempo real, en formatos raster o tabulares, para analizar precipitación acumulada, estimar escorrentías y definir umbrales críticos. Además, puede vincularse con modelos hidrológicos como HEC-HMS para representar espacialmente impactos potenciales mediante mapas de afectación.

La incorporación de la precipitación como capa detonante en modelos de susceptibilidad y riesgo ayuda a comprender no solo dónde es probable que ocurran eventos, sino cuándo y en qué condiciones, aportando un enfoque predictivo al análisis territorial.

5.6 Definición de categoría de susceptibles

La clasificación de la susceptibilidad en estudios de riesgo se realiza combinando valores numéricos a los atributos de las capas de factores condicionantes y detonantes, en una escala que va de 1 a 4, donde 1 representa la menor susceptibilidad y 4 la mayor (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2017). Esta categorización permite traducir la combinación espacial de variables como pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, geomorfología y precipitación en niveles de susceptibilidad que facilitan la priorización de intervenciones (*Guzzetti et al.*, 2005).

Por ejemplo, en la guía metodológica del SGC se recomienda representar la susceptibilidad en cuatro clases: baja, media, alta y muy alta. Esto se basa en unos criterios cualitativos, basada en criterios como la densidad de tamaños o la probabilidad espacial relativa. De forma similar, otros

emplean estudios tablas de reclasificación para cada factor, asignando rangos específicos a intervalos de valores medidos (como grados de pendiente o rangos de altitud) y ponderando su influencia en la susceptibilidad final. Según el SGC configura como un método estadístico y un método geomorfológico para zonificar la susceptibilidad y de allí se puede iniciar el proceso de caracterizar una amenaza.

5.7 Modelos de vulnerabilidad

5.7.1 Factores de vulnerabilidad en infraestructuras hidráulicas

La vulnerabilidad de los sistemas de acueducto y alcantarillado depende de varios factores estructurales y de gestión. *Cutter* (1996) identifica que los principales factores que influyen en la vulnerabilidad de infraestructuras hidráulicas incluyen: Estado de la infraestructura, planificación territorial y ubicación geográfica. Para el caso del municipio de San Pablo, los sistemas de acueducto y alcantarillado pueden presentar vulnerabilidades debido a su ubicación en zonas con una topografía accidentada y una alta probabilidad de fenómenos naturales adversos. Estos factores pueden comprometer la capacidad del sistema para mantener un servicio continuo durante y después de un evento extremo.

5.7.1.1 Estado de la infraestructura

La falta de mantenimiento adecuado incrementa la probabilidad de fallos en la infraestructura ante la eventual ocurrencia de algún fenómeno que pueda afectar la integridad de alguna de sus estructuras o que por ciertas condiciones retrase, reduzca o retenga el suministro de los servicios públicos domiciliarios hidrosanitarios y relacionados.

5.7.1.2 Ubicación geográfica

Las infraestructuras ubicadas en zonas de alta pendiente o cercanas a cauces de ríos están más expuestas a riesgos como movimientos en masa e inundaciones. Analizar la interacción entre los asentamientos humanos, los factores condicionantes del territorio y las dinámicas

hidrometeorológicas permite identificar, a partir de patrones, las áreas prioritarias en escenarios de susceptibilidad donde la precipitación actúa como factor detonante.

5.7.2 Análisis de la vulnerabilidad mediante GIS

El uso de herramientas de sistemas de información geográfica (*GIS*), como *ArcGis* y *QGIS* es fundamental para realizar evaluaciones detalladas de vulnerabilidad. Esto se debe a que permiten integrar y procesar datos topográficos, climáticos y estructurales en un entorno espacial. En este estudio, primero se elaboraron mapas individuales de los factores condicionantes y detonantes los cuales fueron debidamente clasificados y procesados para reflejar sus niveles de susceptibilidad.

Para determinar la importancia relativa de cada factor, se aplicó el método *AHP* de *Saaty*, que mediante comparaciones por pares asigna pesos ponderados a cada variable según su influencia en la vulnerabilidad del área de estudio. Estos pesos permiten cuantificar objetivamente la contribución de cada factor (Ramos, 2015; *Moreira-Franco & Ortega-Ordóñez*, 2021).

5.7.3 Modelo o método de análisis jerárquico AHP

El proceso de análisis jerárquico (*AHP*, por sus siglas en inglés: *Analytic Hierarchy Process*) es una metodología multicriterio ampliamente utilizado para la toma de decisiones complejas que implican múltiples variables cualitativas y cuantitativas. Este método, propuesto por *Saaty* (1980), permite descomponer un problema en una jerarquía de niveles objetivo, criterios, subcriterios y alternativas y asignarles pesos relativos a partir de comparaciones por pares, facilitando una evaluación estructurada de las prioridades.

En el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones el *AHP* se ha consolidado como una herramienta eficaz para ponderar los factores condicionantes (pendiente, litología, uso del suelo, *etc.*) en función de su influencia relativa. Esta metodología se integra con plataformas *GIS* como *ArcGIS* para producir mapas de susceptibilidad que representan espacialmente las zonas más vulnerables, utilizando herramientas como *weighted overlay* o *raster calculator*, las cuales permiten aplicar los pesos derivados del *AHP* a las capas geográficas correspondientes (*Ayalew & Yamagishi*, 2005).

El procedimiento del *AHP* en el contexto geoespacial implica en primer lugar la selección de los factores condicionantes relevantes. Posterior a ello se inicia con la construcción de una matriz de comparación por pares. Una vez obtenidos los pesos relativos mediante el cálculo de los vectores propios se procede a verificar el índice de consistencia (CI) geotécnico (Escobar Duque & Escobar P., 2016). Estos datos resultantes se integran en un entorno *GIS* que puede ser de licencia comercial o abierta al público para generar un modelo de susceptibilidad. Esta integración mejora la transparencia del análisis y permite validar los resultados con datos de eventos históricos (Machado *et al.*, 2017).

5.7.4 Integración espacial GIS

La integración espacial de las capas se realizó utilizando la calculadora *raster* en los *GIS*, aplicándola en *ArcMap* versión 10.7.0.10450; *ArcGIS Desktop ArcMap versión 10.8.2* y *QGIS* o *Quantum GIS* versión 3.36.0-Maidenhead. Los factores clasificados se multiplicaron con un peso ponderado y se sumaron los resultados para obtener un índice compuesto de vulnerabilidad según la fórmula:

$$V = \sum_i (F_i * P_i)$$

donde:

V = índice compuesto de vulnerabilidad

F_i = Factor condicionante o detonante i

P_i = Peso ponderado del factor condicionante o detonante.

Este procedimiento facilita la generación de mapas integrados que identifican zonas críticas con mayor riesgo para la infraestructura hidráulica, como acueductos y redes de alcantarillado, permitiendo priorizar intervenciones y optimizar la gestión del riesgo (González *et al.*, 2019; Delgado, 2022).

En resumen, la combinación del análisis jerárquico de procesos o *AHP* para la ponderación de factores y el uso de herramientas *GIS* como *ArcGIS* y *QGIS* para la integración y visualización espacial constituye una metodología robusta y ampliamente utilizada en estudios de vulnerabilidad

y riesgo, que aporta objetividad, reproducibilidad o integración a otros entornos o contextos al igual que su precisión ante los análisis propuestos (Ramos, 2015; Mora, 2020).

5.8 Impacto de desastres en la infraestructura hidráulica

5.8.1 Consecuencias de los desastres naturales en acueductos y sistemas de alcantarillado

Los desastres naturales, como movimientos en masa e inundaciones, tiene un impacto significativo en la infraestructura hidráulica. Según *Glade* (2003), estos fenómenos pueden provocar daños estructurales severos en acueductos y sistemas de alcantarillado, afectando la calidad del agua y la prestación de servicios básicos. La interrupción en el suministro de agua y la capacidad de evacuación de aguas residuales puede resultar en problemas sanitarios graves, especialmente en comunidades con condiciones físicas variables como las de San Pablo.

5.8.2 Evaluación de la resiliencia de la infraestructura existente

La resiliencia de la infraestructura hidráulica ante desastres es un aspecto crítico para considerar. *Fell et al.* (2008) destacan que una infraestructura bien diseñada y mantenida puede minimizar los efectos de eventos extremos. En este sentido, evaluar la resiliencia de los sistemas de acueducto y alcantarillado en San Pablo permitirá identificar las debilidades actuales y establecer recomendaciones para mejorar la capacidad de respuesta ante futuros desastres. Este análisis se llevará a cabo mediante la aplicación de herramientas de *GIS* y métodos de evaluación de susceptibilidad, tal como se planteó en los objetivos específicos del proyecto.

5.9 Perspectivas teóricas sobre la gestión del riesgo

5.9.1 Enfoque teóricos relevantes para la comprensión de la gestión del riesgo de desastres

La gestión del riesgo de desastres se fundamenta en varias teorías que explican cómo las comunidades y las infraestructuras responden y se adaptan a las amenazas naturales. Uno de los enfoques más citados es el modelo de vulnerabilidad y capacidad. Este fue desarrollado por *Blaikie*

et al. (1994), que plantea que los desastres no son únicamente eventos naturales, sino el resultado de la interacción entre el entorno físico y las condiciones socioeconómicas de una comunidad. En este sentido, la infraestructura, incluida la hidrosanitaria, es vulnerable no solo por su exposición a amenazas físicas, sino también por su capacidad de adaptación, lo cual se verá influido por factores como la planificación y el mantenimiento.

El enfoque de gestión integral de riesgo, tal como lo proponen *Lavell et al.* (2012), resalta la necesidad de considerar tanto las acciones preventivas como las reactivas. Esto implica no solo la evaluación del riesgo a través de herramientas técnicas como los *GIS*, sino también la inclusión de estrategias de mitigación y adaptación.

5.10 Brechas y vacíos en la investigación

5.10.1 Identificación de áreas no abordadas en la literatura existente

A pesar de la abundante investigación sobre la gestión del riesgo de desastres, aún persisten vacíos en la literatura que afectan la aplicación de estrategias metodológicas claras de análisis de susceptibilidad a fenómenos naturales en zonas más localizadas como el de San Pablo, en el departamento de Nariño. Muchas de las investigaciones existentes se centran en áreas urbanas con mayores recursos y capacidad de respuesta, dejando de lado regiones rurales o menos desarrolladas. Según *Reichenbach et al.* (2018), es crucial reconocer las particularidades de cada región, lo que implica la necesidad de estudios complementarios a la susceptibilidad que aborden las condiciones socioeconómicas, geográficas y ambientales específicas de lugares como San Pablo.

6. Metodología

6.1 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico del presente proyecto se fundamenta en la integración de técnicas cuantitativas y cualitativas. Esta combinación resulta pertinente, ya que permite utilizar herramientas de análisis espacial y modelación numérica para identificar y delimitar áreas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones. Al tiempo que se encuentra una facilidad al interpretar los factores físicos y ambientales que condicionan estos fenómenos. De este

modo, se logra un análisis integral de la susceptibilidad que contribuye a la toma de decisiones informadas para la gestión y protección de la infraestructura hidráulica.

6.2. Justificación del enfoque mixto

6.2.1 Enfoque cuantitativo

Para la identificación de zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones, el uso de herramientas geoespaciales como *ArcGIS* y modelos digitales de terreno (*DTM*) de alta resolución será fundamental. Estos métodos requieren la recopilación y análisis de datos topográficos, geomorfológicos e hidrológicos en forma cuantitativa, permitiendo modelar las condiciones físicas del terreno que favorecen la ocurrencia de estos fenómenos y generar mapas de susceptibilidad precisos.

Asimismo, la aplicación del proceso de análisis jerárquico (*AHP*) facilitará la ponderación y jerarquización de los factores condicionantes mediante matrices de comparación por pares, integrando variables cuantitativas y cualitativas en un entorno *GIS* para obtener resultados objetivos y confiables. El análisis de precipitaciones, junto con la caracterización morfométrica del terreno mediante *DTM*, constituyen datos cuantitativos esenciales para prever las áreas con la mayor propensión a deslizamientos e inundaciones, contribuyendo a una evaluación detallada y fundamentada de la susceptibilidad en la zona de estudio.

6.2.2 Enfoque cualitativo

La interpretación de los resultados obtenidos a partir del análisis geoespacial requiere un enfoque cualitativo para valorar y jerarquizar atributos no numéricos o de difícil cuantificación directa, como la calidad de los suelos, la cobertura vegetal o la estabilidad geológica de las zonas estudiadas. Estos atributos se califican y ponderan dentro del proceso multicriterio (*AHP*), lo que permite integrar variables cualitativas con datos cuantitativos en la generación de mapas de susceptibilidad.

De esta manera, el enfoque cualitativo aporta una comprensión más profunda de los factores condicionantes, facilitando la interpretación de las interrelaciones entre las distintas capas

temáticas y mejorando la precisión en la delimitación de áreas susceptibles a movimientos en masa e inundaciones.

6.3 Tipo de estudio

El presente proyecto corresponde a un estudio descriptivo de tipo cuantitativo, dado que su principal objetivo es identificar y caracterizar las zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en el área de influencia de la infraestructura hidráulica del municipio de San Pablo. Este tipo de estudio se centra en describir cómo se distribuyen las condiciones físicas del territorio que favorecen la ocurrencia de estos fenómenos, sin buscar establecer relaciones causales directas entre variables.

El estudio descriptivo resulta adecuado para especificar las propiedades, características y perfiles relevantes de la susceptibilidad en el territorio, tales como aspectos geomorfológicos, topográficos e hidrológicos, mediante el análisis de datos cuantitativos y cualitativos integrados en un sistema de información geográfica (*GIS*). El estudio descriptivo es todo aquel que busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. En este estudio se utilizará la infraestructura como el objeto de estudio y el suministro de servicios como el proceso que discurre sobre mencionada red que se debe describir.

6.4 Procedimiento

A continuación, se presenta el esquema general de la metodología empleada, que describe de manera resumida las etapas y procedimientos seguidos para el desarrollo del estudio.

resolución de 30 metros, que sirvió como insumo base para derivar las capas de relieve y pendientes.

- Suelos: Se obtuvo la cartografía oficial de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Dicha cartografía fue considerada a escala 1:100000. Esta información fue digitalizada, georreferenciada y adaptada para el análisis a través de la herramienta de *ESRI ArcMap* versión 10.8.2
- Relieve: A partir del *DEM*, se derivó la capa de relieve mediante análisis de curvaturas del terreno utilizando las herramientas de análisis de superficie en el software de escritorio *ArcGIS Desktop ArcMap* versión 10.8.2 Esta variable aporta información sobre la forma del terreno y su influencia en la estabilidad del suelo.
- Pendientes: Se importó el modelo digital de elevación (*DEM*) en *ArcGIS* y se calculó la pendiente en porcentaje utilizando la herramienta *slope* del *toolbox Spatial analyst*. El ráster generado fue convertido a formato vectorial (*shapefile*) mediante la herramienta *raster to polygon* para facilitar su análisis y reclasificación. Posteriormente, se aplicó la herramienta *Reclassify* para reclasificar las pendientes en una escala de susceptibilidad de 1 a 4, según los rangos definidos que reflejan distintos niveles de riesgo por movimientos en masa. Finalmente, se ajustó la simbología con una paleta de colores graduados que permite visualizar claramente las zonas.
- Geomorfología: El mapa de geomorfología fue tomado y modificado a partir del estudio realizado por el SGC y la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), desarrollado en el año 2015. Este mapa, elaborado mediante fotointerpretación y análisis de campo, describe unidades morfoestructurales relevantes para la susceptibilidad a movimientos en masa. Se digitalizó y reclasificó para su integración en el análisis.
- Geología: Se descargaron los mapas geológicos oficiales del SGC a escala 1:100000, los cuales contienen información sobre litologías y estructuras geológicas. Se asignaron valores de susceptibilidad según la estabilidad relativa de cada litología.
- Cobertura de la superficie terrestre: Se elaboró un mapa de coberturas mediante clasificación supervisada en *ArcGIS Desktop ArcMap* versión 10.8.2 a través de la creación de clases. Estas al señalar mediante puntos o polígonos ciertos rasgos peculiares que se quieren interpretar del *raster* satelital permite identificar unas firmas espectrales que se categorizaran en determinada columna llamada clase. Posteriormente siguiendo la caja de

herramientas de geoprocetos *Spatial analyst* se deben de crear estas firmas para exportarlas en formato o extensión .gsg. Con ello se puede crear un dendograma para identificar si los intervalos son similares y se deben modificar los límites o extremos que los definen. Esto se puede realizar a través de la herramienta *Maximum likelihood classification*. Este proceso se puede realizar de manera automática con la herramienta *Iso cluster unsupervised classifications* de la *toolbox Multivariate*. Para todo este proceso se debió depurar las imágenes que se encontraran libres de nubes y representativas del área de interés. Aquellas muestras realizadas para la clasificación supervisada fueron: Áreas urbanas, cuerpos de agua, suelo desnudo, vegetación. Los datos se obtuvieron a través del sensor remoto *Sentinel-2* el cual es una misión que orbita el planeta con satélites gemelos que entregan resoluciones de 10, 20 y 60 metros espaciales en cuatro, seis y tres bandas respectivamente que son usadas en aplicaciones como el monitoreo terrestre, la administración de las emergencias, la zonificación o mapeo de los riesgos y el control de los desastres. Todas estas aplicaciones se dan debido a la autocorrección de las imágenes gracias a la frecuencia de revisita a cada punto de la tierra.

- Precipitación: Para la elaboración del mapa de precipitación como fenómeno continuo se realizó una recopilación de los datos pluviométricos históricos normalizados para el período que comprende las cerca de tres décadas que transcurren entre 1991 y el año 2020. Los datos fueron proporcionados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam). Estos registros corresponden a la fecha del año 2021 a aquellas mediciones entregadas por las correspondientes estaciones hidrometeorológicas del área de estudio y sus alrededores, fueron organizados en una base de datos georreferenciada e importada como capa de puntos en *ArcGIS Desktop ArcMap versión 10.8.2*. Posteriormente se aplicó la herramienta de interpolación *Spline*, disponible en el módulo de geoprocetamiento *Spatial analyst*, definiendo un tamaño de celda de 30 metros para el *raster* resultante. Este procedimiento permitió generar una superficie continua que representa la distribución espacial de la precipitación media anual. Este proceso se genera a través de una interpolación automática que permite el proceso al cual se puede acceder por medio de la *ArcToolBox* de *Interpolation* o *Raster interpolation*.

6.4.1.2 Procesamiento y reclasificación de factores

Cada capa temática fue reclasificada en una escala común de susceptibilidad de 1 a 4. La reclasificación se realizó con base en los criterios técnicos y bibliográficos específicos para cada factor. Dicha reclasificación es posible explicar a partir de la siguiente tabla:

Tabla 2.

Niveles de susceptibilidad y prioridad en la gestión del riesgo para movimientos en masa e inundaciones³

Nivel de Susceptibilidad	Descripción	Probabilidad de Ocurrencia	Prioridad en la Gestión del Riesgo
MUY BAJA (1)	Áreas con condiciones geológicas y geomorfológicas estables, baja predisposición a movimientos en masa o inundaciones	Menor probabilidad	Baja
BAJA (2)	Áreas con condiciones moderadamente favorables, con baja frecuencia de eventos	Probabilidad limitada	Baja
MEDIA (3)	Áreas con condiciones muy favorables, alta predisposición y frecuencia de eventos	Probabilidad moderada	Media
ALTA (4)	Áreas con condiciones críticas, alta susceptibilidad y ocurrencia frecuente de eventos	Alta probabilidad	Alta

Nota. Tomada y adaptada para este estudio.

6.4.1.3 Aplicación del método de análisis jerárquico de procesos (AHP)

El método de análisis jerárquico de procesos (*AHP*), desarrollado por *Saaty* (1980), es una técnica multicriterio que facilita la toma de decisiones cuando se deben ponderar múltiples factores con diferentes grados de importancia. En este estudio, el *AHP* se aplicó para determinar la ponderación de los siete factores condicionantes que afectan la susceptibilidad a movimientos en masa: Suelos, relieve, pendientes, geomorfología, geología, cobertura de la tierra y precipitación. El proceso se desarrolló en las siguientes etapas:

1. Configuración de la matriz de comparación por pares método *AHP*: Cada factor fue comparado y esto se realiza mediante la creación de una matriz cuadrada donde cada

³ La tabla fue adaptada de la guía metodológica para la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa que provee el Servicio Geológico Colombiano SGC. Esta metodología se inscribe en modelos que se encuentran a escalas 1:500000 y fue presentado en el año 2016.

elemento representa la importancia relativa de un factor respecto a otro, usando la escala de *Saaty* y con valores en un intervalo de unidades entre uno y nueve. La matriz es recíproca, es decir, si el elemento A_{ij} es 3, entonces $A_{ji} = 1/3$

2. Se calculo el vector propio principal a partir de la matriz de comparación pareada para obtener los pesos relativos de cada factor, reflejando su importancia en el análisis. Posteriormente, se evaluó la consistencia de estas comparaciones mediante el índice de consistencia (CR) para asegurar la coherencia de los juicios; un CR menor a 0.1 indica aceptabilidad. Los pesos validados se aplicaron a las capas *raster* reclasificadas de cada factor

Tabla 3.

Valores de importancia escala fundamental de *Saaty*⁴

Importancia o Preferencia	Valor Cardinal
Igual	1
Entre igual y moderado	2
Moderado	3
Entre moderado y fuerte	4
Fuerte	5
Entre fuerte y muy fuerte	6
Muy fuerte	7
Entre muy fuerte y extremadamente fuerte	8
Extremadamente fuerte	9

6.4.1.4 Integración espacial y cálculo del mapa de susceptibilidad

Las capas reclasificadas se convirtieron a formato *raster* con resolución y extensión homogéneas. La ponderación espacial se realizó mediante la calculadora *raster* de *ArcGIS Desktop ArcMap* versión 10.8.2 Con ella se multiplico cada capa por su peso asignado y se sumó los resultados para obtener el mapa integrado de susceptibilidad. Este procedimiento permitió combinar espacialmente los factores condicionantes y detonantes, reflejando la influencia relativa de cada uno en la susceptibilidad a movimientos en masa.

⁴ Tomado de Merino Benítez y Bojórquez Tapia (2021)

6.4.1.5 Clasificación y análisis final

6.4.2 Fase 2. Identificación de zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones en la infraestructura hidráulica del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo mediante análisis geoespacial con ArcGIS Desktop

Para esta fase de identificación de zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones se siguió el mismo proceso metodológico enunciado para la susceptibilidad por movimientos en masa, empleando técnicas de análisis geoespacial y ponderación multicriterio mediante el método *AHP*. Sin embargo, es importante aclarar que la calificación de susceptibilidad asignada a cada una de las capas correspondientes a los factores condicionantes y detonantes varía significativamente entre ambos fenómenos debido a sus diferencias físicas y dinámicas. Por ejemplo, en la capa de pendientes, un mayor porcentaje de inclinación se asocia con una mayor probabilidad de susceptibilidad a movimientos en masa, dado que las pendientes pronunciadas favorecen la inestabilidad del terreno. En contraste, para inundaciones, una pendiente alta suele indicar una menor probabilidad de acumulación de agua y por ende una baja susceptibilidad a inundación, ya que el agua tiende a recorrer la superficie rápidamente. Por ello, cada factor fue reclasificado y ponderado según criterios específicos para inundaciones, garantizando que la evaluación reflejara adecuadamente las condiciones particulares de este fenómeno. Esta diferenciación en la calificación asegura que el análisis sea coherente y pertinente para cada tipo de amenaza, permitiendo una zonificación precisa y útil para la gestión del riesgo.

7. Resultados

7.1. Fase 1. Identificación de zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa en la infraestructura hidráulica del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo mediante análisis geoespacial con ArcGIS Desktop.

7.1.1 Factores condicionantes

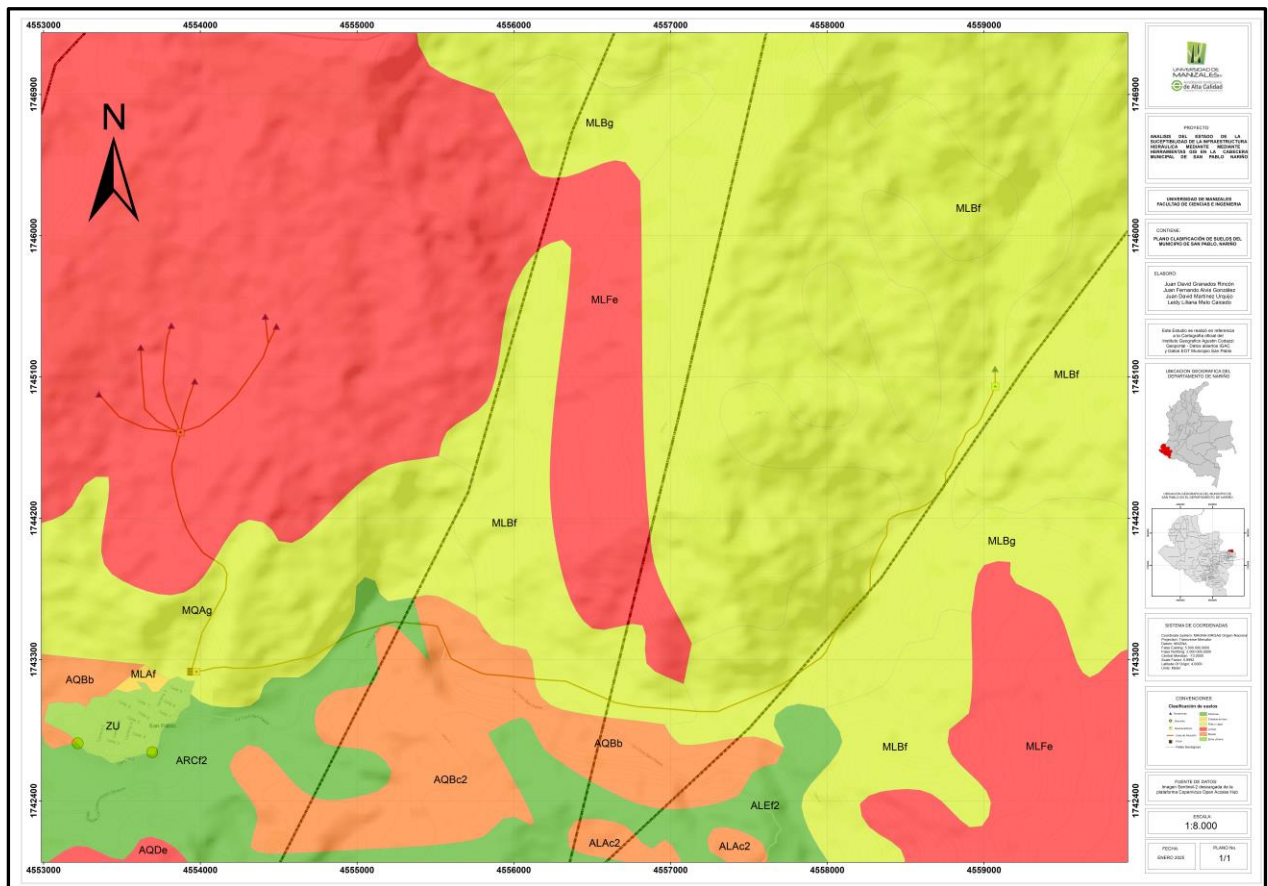
A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la generación y adquisición de capas de información correspondientes a los factores condicionantes considerados en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa. Estos factores incluyen suelos, relieve, pendientes, geomorfología, geología y cobertura de la tierra, los cuales fueron procesados y analizados mediante herramientas *GIS* para su posterior integración y ponderación en el modelo de susceptibilidad.

7.1.1.1 Suelos

El resultado del mapa de suelos se obtuvo a partir de la capa oficial del IGAC disponible en una escala 1:100000 para el departamento de Nariño. Para el análisis de susceptibilidad, se realizó una clasificación específica de los tipos de suelo presentes en el área de estudio, asignando valores de susceptibilidad en una escala de 1 a 4 según las características propias de cada unidad de suelo.

Figura 3.

Mapa de clasificación del suelo del área de estudio.



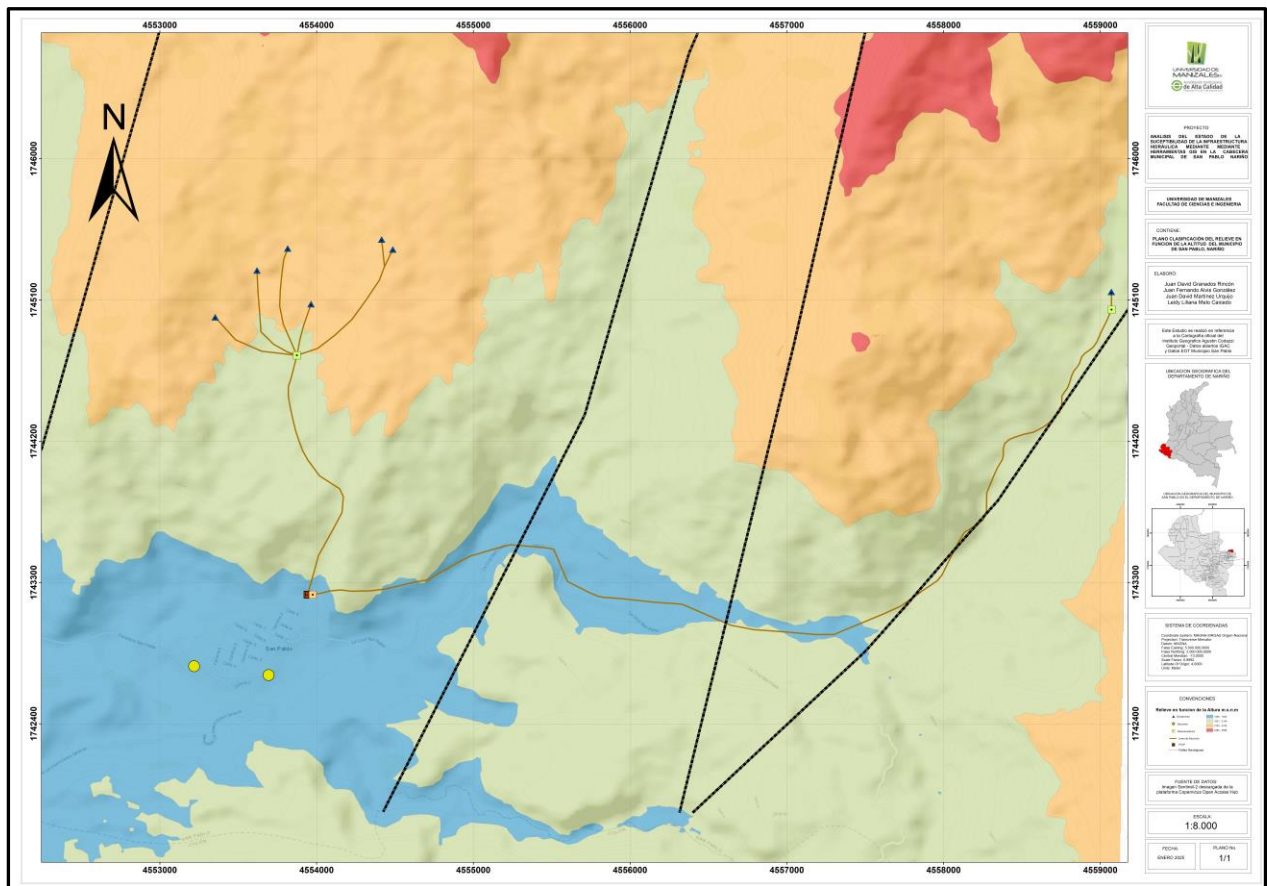
Nota. Elaboración propia.

7.1.1.2 Relieve

El mapa de relieve, elaborado a partir de un modelo digital de elevación (*DEM*), muestra la distribución de las altitudes sobre el nivel del mar en el área de estudio. Esta representación permite identificar zonas bajas, medias y altas, proporcionando información fundamental para delimitar áreas con distintas condiciones topográficas que afectan la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones.

Figura 4.

Mapa del relieve del área de estudio, clasificado según la altitud sobre el nivel del mar



Nota. Elaboración propia.

7.1.1.3 Pendientes

En esta fase del análisis, se implementó la metodología de clasificación de pendientes establecida por el IGAC en el año 2021. Esta metodología define un sistema que abarca siete categorías de pendientes. Estos intervalos son los siguientes: 0-3%: 4-7%: 8-12%: 13-25%; 26-50%; 51-75%: >75%. A continuación, se presenta la clasificación y los intervalos de las pendientes en un modelo tabular que permite su fácil lectura.

Tabla 4.*Características del relieve en función de la pendiente⁵*

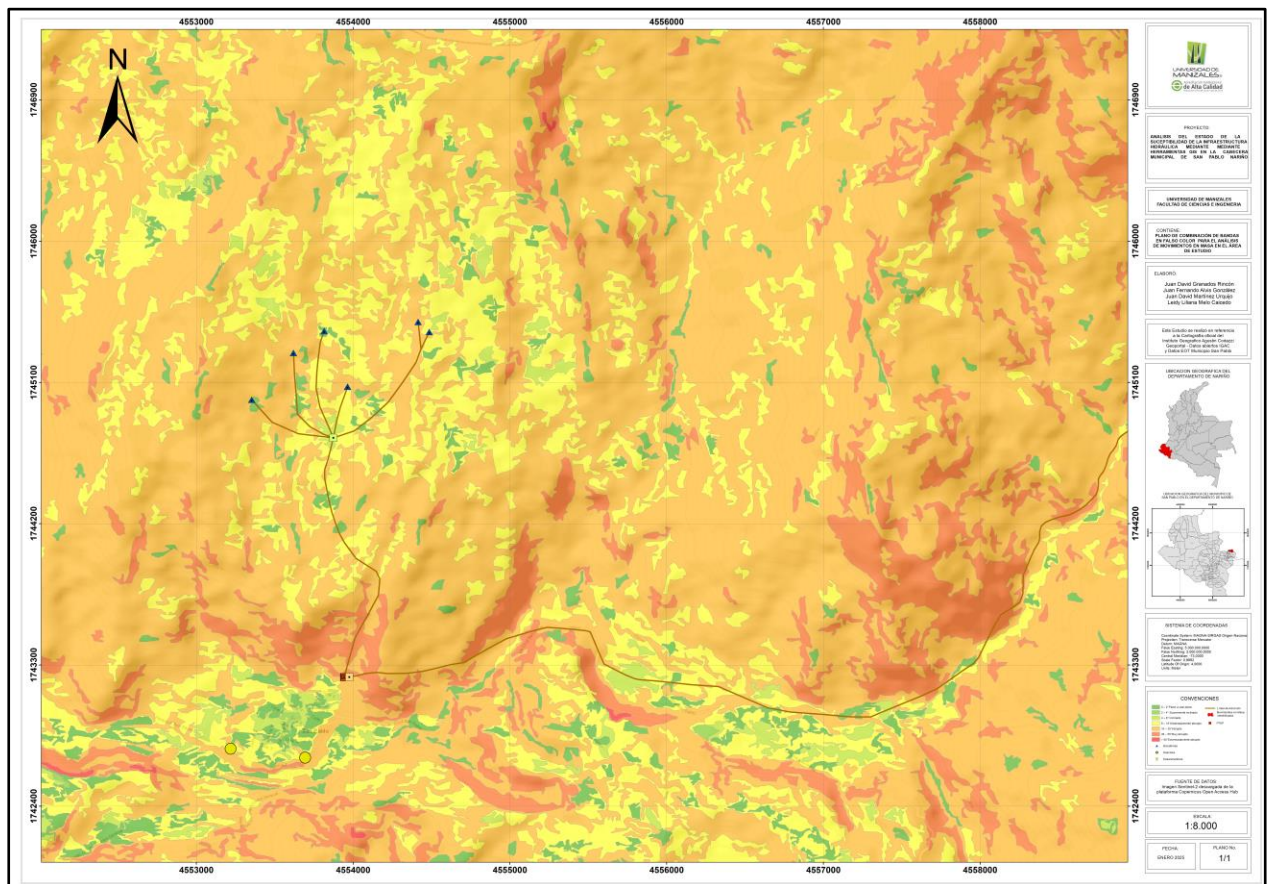
SÍMBOLO	GRADIENTE (%)	DESCRIPCIÓN
a	0-3	Plano
b	3-7	Ligeramente inclinado
c	7-12	Moderadamente inclinado
d	12-25	Fuertemente inclinado
e	25-50	Ligeramente escarpado
f	50-75	Moderadamente escarpado
g	>75	Fuertemente escarpado

Las pendientes fueron clasificadas y representadas en el mapa mediante una escala de colores que va del verde al rojo, donde el verde indica las zonas con menor inclinación y el rojo las áreas con mayor pendiente. Esta codificación visual facilita la identificación rápida de las zonas más propensas a movimientos en masa, al destacar claramente las áreas con pendientes pronunciadas. El análisis espacial realizado permitió delimitar estas zonas críticas.

⁵ Datos provenientes del IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (2021) *Clasificación de pendientes*.

Figura 5.

Mapa de categorización de pendientes de acuerdo con el gradiente en el área de estudio.



Nota. Elaboración propia.

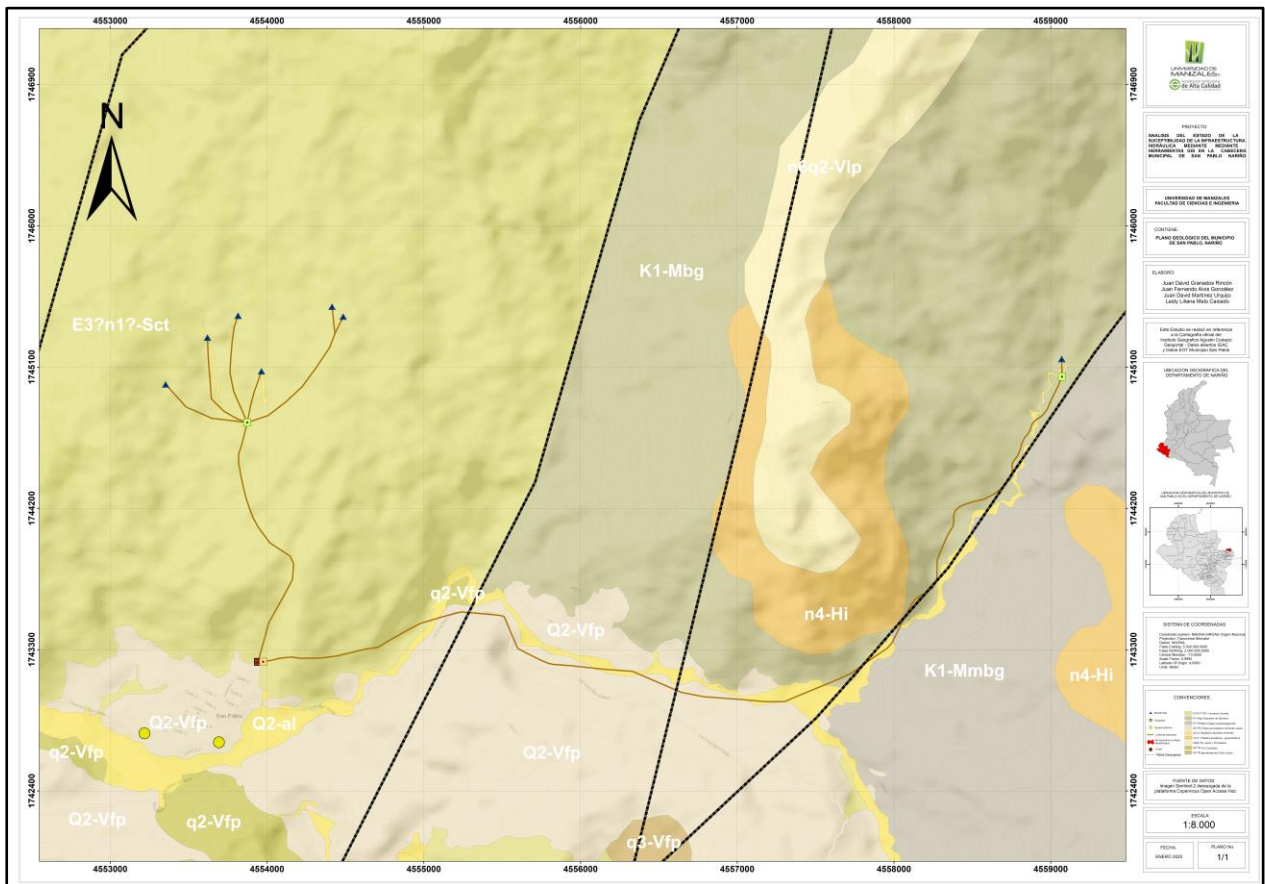
7.1.1.4 Geomorfología

Se tomó como base el mapa de geomorfología elaborado por el SGC y la UNAL en el año 2015. Dichos datos geospaciales fueron digitalizados para su edición. Esta variación o modificación se realizó con el propósito de integrarlos en el análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa. A cada una de las unidades geomorfológicas se les asignó un valor de susceptibilidad en una escala cuantitativa de uno a cuatro. En este caso uno o el número (1) representa muy baja susceptibilidad y el cuatro o el número (4) una alta susceptibilidad. Esta reclasificación permitió incorporar las características geomorfológicas de manera cuantitativa en el modelo espacial, facilitando la identificación de las zonas con mayor riesgo de inestabilidad. A

columnas de atributos asignando a cada unidad geológica un valor de susceptibilidad en una escala cuantitativa de uno a cuatro. Nuevamente el número uno o (1) representa una muy baja susceptibilidad y el número cuatro o (4) representa una alta susceptibilidad. A continuación, el mapa geológico resultante con la respectiva reclasificación de acuerdo a la composición del subsuelo.

Figura 7.

Mapa geología local del área de estudio.⁷



Nota. Tomado y adaptado.

7.1.1.6 Cobertura de la tierra

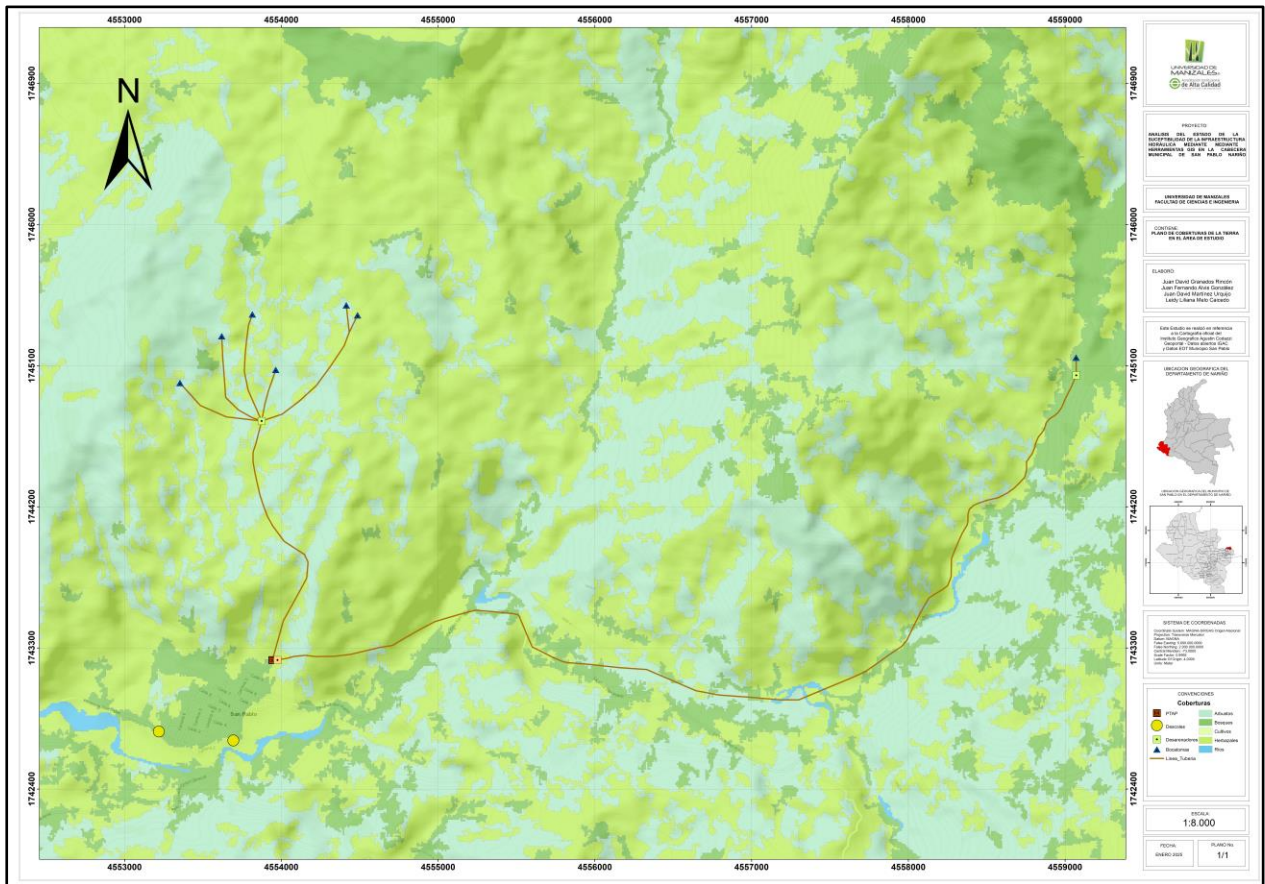
Se elaboró un mapa de coberturas de la tierra para San Pablo. Mediante una clasificación supervisada en *ArcGIS Desktop ArcMap versión 10.8.2* y haciendo uso de las imágenes *Sentinel-2*

⁷ Adaptación, edición de los mapas geológicos oficiales descargados desde el geovisor del Servicio Geológico Colombiano a través de herramientas *GIS*

que fueron seleccionadas por su calidad, precisión y ausencia de nubosidad. Se generaron muestras de entrenamiento para clases generales como áreas urbanas, suelos desnudos, cuerpos de agua y vegetación. Se aplicó un algoritmo supervisado para clasificar cada *píxel*. Prosiguiendo el análisis, a cada una de las clases de cobertura se le asignó un valor de susceptibilidad en la escala numérica de uno a cuatro, donde el valor de mayor denominación implica una mayor susceptibilidad. Este valor se define por la influencia en la estabilidad del terreno. Con ello es posible integrar la información del análisis espacial. El resultado del proceso es un mapa temático confiable, que representa de manera general las coberturas del suelo.

Figura 8.

Mapa de la cobertura de la tierra del área de estudio a partir de clasificación supervisada



Nota. Elaboración propia

7.1.2 Factores detonantes

7.1.3 Matriz de comparación por pares método AHP

Se presenta la matriz de comparación por pares realizada con el método *AHP* para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa. Esta matriz permitió asignar pesos relativos a cada factor, asegurando la consistencia del análisis. Los resultados facilitan la ponderación objetiva de los criterios para su integración en el modelo de susceptibilidad. A continuación, se muestra la matriz y los pesos obtenidos.

Tabla 5.

Matriz de comparación por pares método Saaty ponderación de factores de susceptibilidad para movimientos en masa

Factores	Pendientes	Geología	Geomorfología	Suelos	Coberturas	Precipitación	Relieve	Wi	Ci	λ max
Pendientes	1,00	3	5	7	7	5	9	4,42	0,424	0,903
Geología	1/3	1	3	5	5	3	7	2,45	0,235	1,222
Geomorfología	1/5	1/3	1	3	3	3	5	1,37	0,131	1,338
Suelos	1/7	1/5	1/3	1	3	3	3	0,82	0,079	1,342
Coberturas	1/7	1/5	1/3	1/3	1	1	3	0,51	0,049	1,003
Precipitación	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1	3	0,58	0,056	0,909
Relieve	1/9	1/7	1/5	1/3	1/3	1/3	1	0,27	0,026	0,816
SUMAS	2,13	5,21	10,20	17,00	20,33	16,33	31,00	10,43	1,00	7,53
									Ci =	0,09
									Rci=	1,32
									CR=	0,07

Nota. Elaboración propia

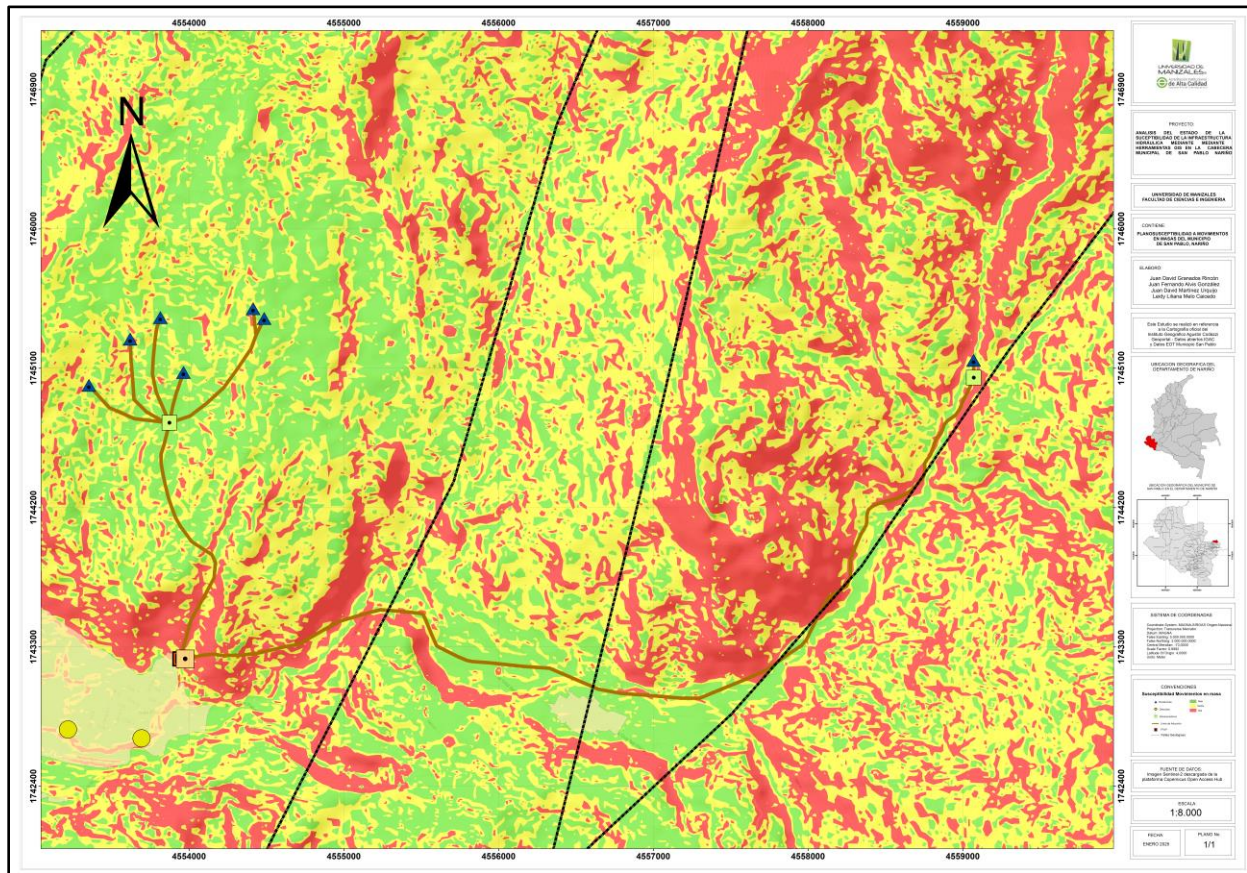
El análisis de la matriz de comparación por pares muestra que los pesos asignados a cada factor fueron distribuidos de manera acertada, reflejando una valoración coherente de su importancia relativa en el modelo de susceptibilidad. Esto se confirma con un índice de consistencia (CR) de 0,07. Dicho valor, según la escala propuesta por *Saaty*, indica que la matriz es consistente, dado que es menor al umbral de 0,1. Por lo tanto, los juicios realizados en la comparación por pares son fiables y pueden ser utilizados con confianza para la ponderación e integración de los factores en el análisis final.

7.1.4 Cálculo del mapa de susceptibilidad

A continuación, se presenta el resultado final del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Las capas reclasificadas, con resolución y extensión homogéneas, fueron convertidas a formato *raster* y combinadas mediante la calculadora *raster* de *ArcGIS Desktop ArcMap* versión 10.8.2. Cada capa fue multiplicada por el peso asignado y sumada para obtener un mapa integrado que refleja la influencia relativa de los factores condicionantes y detonantes en la susceptibilidad del terreno.

Figura 10.

Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en el área de estudio.



Nota. Elaboración propia

Tabla 6.

Grado de susceptibilidad en las unidades del sistema de acueducto y alcantarillado por movimientos en masa

Tipo	Sector	Grado de Susceptibilidad
Captaciones	Sector Bateros (Bocatomas)	Baja
	Sector Blanquito	Alta
Desarnador	Bateros	Baja
	Blanquito	Media a Alta
Tanque Almacenamiento.	Casco Urbano	Media a Alta
PTAP	Casco Urbano	Media a Alta
Descoles	Casco Urbano	Baja
Lote PTAR	Casco Urbano	Baja
Red Aducción	Z. Rural y Urbana	Alta en algunos tramos
Alcantarillado	Casco Urbano	Baja

Nota. Elaboración propia

7.2. Fase 2. Identificación de zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones en la infraestructura hidráulica del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo mediante análisis geoespacial con ArcGIS Desktop.

En esta fase se identificaron las zonas con mayor susceptibilidad a inundación que podrían afectar la infraestructura hidráulica de acueducto y alcantarillado del municipio de San Pablo. Para ello, se aplicó un enfoque geoespacial en *ArcGIS*. Se utiliza el mismo procedimiento metodológico desarrollado en la Fase 1.

Se integraron los mismos factores condicionantes y detonantes, adaptando la clasificación de la susceptibilidad de acuerdo con las características parietales de cada capa y la naturaleza del fenómeno analizado, en este caso, las inundaciones. Esta adaptación permitió ajustar los rangos de valoración para reflejar con mayor precisión la influencia de cada factor en la generación de acumulaciones de agua y posibles desbordamientos

7.2.1 Matriz de comparación por pares con el método AHP

Se presenta la matriz de comparación por pares realizada con el método *AHP* para evaluar la susceptibilidad a inundaciones. Esta matriz permitió asignar pesos relativos a cada factor, asegurando la consistencia del análisis. Los resultados facilitan la ponderación objetiva de los criterios para su integración en el modelo de susceptibilidad. A continuación se muestra la matriz y los pesos obtenidos.

Tabla 7.

Matriz de comparación por pares método Saaty ponderación de factores de susceptibilidad para inundaciones

Factores	Pendientes	Geología	Geomorfología	Suelos	Coberturas	Precipitación	Relieve	Wi	Ci	λ max
Pendientes	1,00	4	5	7	7	9	6	4,73	0,447	0,952
Geología	1/3	1	3	5	5	3	6	2,39	0,226	1,404
Geomorfología	1/5	1/3	1	3	3	3	5	1,37	0,129	1,319
Suelos	1/7	1/5	1/3	1	3	3	1	0,70	0,067	1,131
Coberturas	1/7	1/5	1/3	1/3	1	4	1	0,54	0,051	1,029
Precipitación	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1	3	0,58	0,055	1,280
Relieve	1/9	1/7	1/5	1/3	1/3	1/3	1	0,27	0,026	0,596
SUMAS	2,13	6,21	10,20	17,00	20,33	23,33	23,00	10,59	1,00	7,71
									Ci =	0,12
									Rci =	1,32
									CR =	0,09

Nota. Elaboración propia

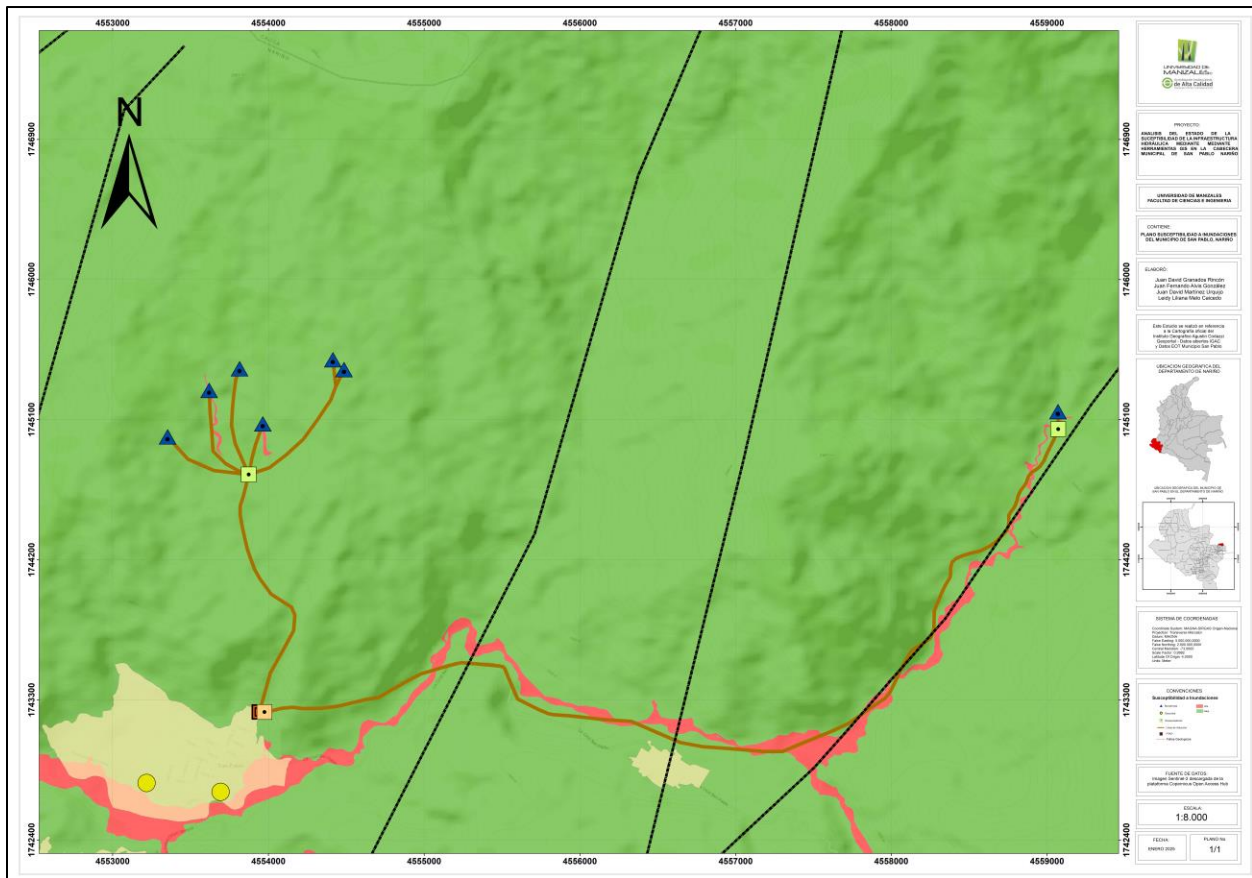
El análisis de la matriz de comparación por pares muestra que los pesos asignados a cada factor fueron distribuidos de manera acertada, reflejando una valoración coherente de su importancia relativa en el modelo de susceptibilidad. Esto se confirma con un índice de consistencia (CR) de 0,09, valor que, según la escala propuesta por *Saaty*, indica que la matriz es consistente, dado que es menor al umbral de 0,1. Por lo tanto, los juicios realizados en la comparación por pares son fiables y pueden ser utilizados con confianza para la ponderación e integración de los factores en el análisis final.

7.2.2 Cálculo del mapa de susceptibilidad

A continuación, se presenta el resultado final del mapa de susceptibilidad a inundaciones. Las capas reclasificadas, con resolución y extensión homogéneas, fueron convertidas a formato *raster* y combinadas mediante la calculadora de *ArcGIS Desktop ArcMap* versión 10.8.2. Cada capa fue multiplicada por su peso asignado y sumada para obtener un mapa integrado que refleja la influencia relativa de los factores condicionantes y detonantes en la susceptibilidad del terreno.

Figura 11.

Mapa de susceptibilidad a inundaciones en el área de estudio.



Nota. Elaboración propia

Tabla 8.

Grado de susceptibilidad de las unidades del sistema de acueducto y alcantarillado por inundaciones

Tipo	Sector	Grado de Susceptibilidad
Captaciones	Sector Bateros (Bocatomas)	Bajo
	Sector Blanquito	Bajo
	Bateros	Baja
Desarenador	Blanquito	Baja
Tanque Almacenamiento.	Casco Urbano	Baja
PTAP	Casco Urbano	Baja
Descoles	Casco Urbano	Baja
Lote PTAR	Casco Urbano	Baja
Red Aducción	Z. Rural y Urbana	Alta en algunos tramos
Alcantarillado	Casco Urbano	Baja

Nota. Elaboración propia

7.3 Medidas preventivas y recomendaciones

Con base en los mapas de susceptibilidad elaborados para movimientos en masa e inundaciones, se proponen las siguientes medidas preventivas, alineadas con el análisis realizado:

- **Mejoramiento del drenaje pluvial:** Como acciones a realizar se deben realizar inspecciones periódicas del sistema de drenaje pluvial en las zonas identificadas con mayor susceptibilidad a inundaciones. De igual manera el mantenimiento y la mejora de la infraestructura existente permite asegurar el flujo adecuado del suministro de agua potable y evitar de este modo acumulaciones que puedan desencadenar fenómenos como los movimientos en masa.
- **Conservación y reforestación en pendientes:** Se deben identificar pendientes críticas con alta susceptibilidad a los deslizamientos. La conservación de la cobertura vegetal y la reforestación en estas áreas para estabilizar el suelo y reducir la erosión.
- **Zonificación del riesgo:** Los mapas de susceptibilidad para clasificar las áreas deben ser usados con los niveles de riesgo definidos por la jurisprudencia. La planificación territorial,

los instrumentos jurídicos como el EOT deben de actualizarse. Las actividades que se permiten deben tener una orientación acorde a la reducción de la vulnerabilidad en zonas de alta susceptibilidad.

- **Monitoreo preventivo:** Deben establecerse programas de monitoreo regular en las áreas con mayor susceptibilidad. Las condiciones en el terreno que se consideren como cambios o modificaciones deben detectarse oportunamente mediante un sistema de alerta temprana. Con ello se pueden anticipar los resultados gráficos que denoten cuando pueden ocurrir fenómenos hidrometeorológicos adversos.
- **Educación y sensibilización comunitaria:** La información que ha sido sometida al análisis y los resultados deben ser difundidos en la población que ha sido identificada como posible damnificada en caso de un hecho que limite el suministro, abastecimiento y descarga de la red hidrosanitaria. La cultura de prevención y preparación frente a posibles eventos debe de llegar no solo a la población urbana identificada, sino que debería alcanzar al total de la población municipal.

8. Discusión

En el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en la infraestructura hidráulica del municipio de San Pablo se constituye el resultado de un proceso de rigurosa selección, clasificación y ponderación de factores bautizados como condicionantes. Estos factores son la composición de los subsuelos, la geomorfología, la geología, la cobertura vegetal o cobertura de la superficie, el relieve y las pendientes consideradas de estos últimos datos de elevación. También se han tenido en cuenta un factor detonante que es en este caso la precipitación. Como ya se mencionó bajo otras conceptualizaciones estos factores se pueden considerar como características discretas o datos geospaciales que representan realidades que permanecen en el tiempo. Lo anterior se entiende como factores condicionantes, mientras que aquellos factores detonantes, son los también conocidos como fenómenos continuos que presentan una gran variabilidad a lo largo del tiempo. No significa que las características discretas no puedan variar, solo que, para el intervalo de tiempo estudiado, sus evidentes modificaciones no son tenidas en cuenta.

Los factores han sido desplegados como capas temáticas en un *software* especializado para información geográfica (*GIS*). A través de estas herramientas se logró la reclasificación brindándole un nivel de susceptibilidad entre cuatro categorías numéricas que también tienen un título o cualificación. Según dichos valores observados o interpolados en cada zona. Esta estandarización o categorización numérica permitió integrar los factores de naturaleza heterogénea y garantizar que la influencia relativa de cada uno se reflejara de forma coherente en el modelo final.

Para la asignación de pesos a las capas se aplicó el método jerárquico de análisis de procesos *AHP* de *Saaty*. A través de la construcción de una matriz de comparación por pares, se evaluó la importancia relativa entre los distintos factores, por ejemplo, la pendiente del terreno frente a la cobertura vegetal. El índice de consistencia (CI) obtenido fue inferior al 10%, lo cual valida la coherencia interna de las comparaciones y respalda la confiabilidad de los pesos asignados en el modelo de síntesis.

En el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa se evidenció que las zonas de mayor riesgo o clase 4 se localizan en áreas con pendientes pronunciadas y escasa cobertura vegetal, como es el caso de la bocatoma del río Blanquito en la vereda Praditos. En contraste, áreas planas o con vegetación densa, como en la vereda Bateros, fueron clasificadas en las clases 1 y 2, correspondientes a una susceptibilidad baja. Esta distribución evidencia la influencia directa de factores como la pendiente, el tipo de suelo y el grado de cobertura en la determinación de zonas críticas.

En cuanto al análisis de susceptibilidad a inundaciones, las áreas ubicadas en zonas de baja pendiente, con convergencia de cauces, presentan los mayores niveles de susceptibilidad. Mientras que las laderas montañosas, a pesar de su escasa cobertura o carácter rocoso, fueron clasificadas en las clases de susceptibilidad más baja debido a su elevada capacidad de escorrentía. La calibración de los rangos de clasificación para cada factor como la precipitación interpolada con base en los promedios históricos del Ideam desde el año 1999 hasta el año 2020. Dicha interpolación fue determinante para concluir en los resultados finales por celda en el modelo espacial.

El empleo del mismo procedimiento metodológico en ambas fases del estudio aseguró la consistencia en la comparación de distintos tipos de amenaza, permitiendo una lectura clara y coherente de los niveles de susceptibilidad por fenómeno. En conjunto, los resultados obtenidos

dependen de la categorización asignada a cada capa y del peso relativo establecido para cada factor mediante *AHP*. La validación del índice de consistencia refuerza la robustez del análisis jerárquico. Este enfoque ofrece un insumo técnico valioso para la planificación territorial y la toma de decisiones en gestión del riesgo y adaptación a fenómenos naturales.

9. Conclusiones

El estudio permitió identificar, analizar y representar espacialmente los principales factores condicionantes (pendiente, litología, uso del suelo, geomorfología, geología y cobertura) y el factor detonante (precipitación) que inciden en la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en el área de influencia de la infraestructura de acueducto y alcantarillado de San Pablo, Nariño. Cada uno de estos factores fue modelado y cartografiado individualmente, generando productos temáticos que aportan una visión detallada de la distribución espacial de las condiciones físicas y climáticas del territorio.

La integración de los mapas de factores condicionantes y detonantes mediante el método de análisis jerárquico (*AHP*) en un entorno *GIS* permitió la generación de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones. Estos mapas identifican y delimitan con precisión las áreas críticas donde la infraestructura hidráulica está más expuesta a estos fenómenos, constituyéndose en un insumo clave para la gestión preventiva y la planificación territorial.

Además, los mapas finales de susceptibilidad, el trabajo de investigación generó productos intermedios como los mapas individuales de pendiente, litología, uso del suelo, geomorfología, geología, cobertura y precipitación. Estos permiten un análisis detallado y específico de cada factor. Los productos constituyen una base técnica robusta para futuras investigaciones, estudios complementarios y procesos de actualización cartográfica.

La información generada en este trabajo constituye un insumo técnico fundamental para identificar, visualizar y delimitar áreas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones en el entorno de la infraestructura hidráulica municipal. Los mapas temáticos y de susceptibilidad elaborados, producto del análisis de factores condicionantes y detonantes mediante herramientas *GIS*. Pueden ser empelados como soporte en la toma de decisiones orientadas a la gestión preventiva y la planificación territorial. Es importante resaltar que estos resultados

corresponden exclusivamente a la representación espacial de la susceptibilidad, por lo que deben ser utilizados considerando las limitaciones metodológicas y el alcance definido en ese estudio.

10. Recomendaciones.

Se recomienda que los mapas de susceptibilidad y los productos temáticos generados en este estudio sean utilizados como insumo técnico para la identificación y priorización de zonas que requieren estudios de detalle o monitoreo adicional en el entorno de la infraestructura hidráulica.

Es aconsejable que las entidades responsables de la planificación y gestión de la infraestructura hidrosanitaria integren los resultados del análisis de susceptibilidad en los procesos de actualización de instrumentos de planificación territorial mantenimiento preventivo.

Se sugiere actualizar periódicamente la información base o datos crudos obtenidos desde agencias estatales y que son usados en el análisis de susceptibilidad. De este modo se incorporan nuevos datos geológicos, topográficos, de cobertura y de precipitación. Los registros de los eventos tenidos en cuenta como movimientos en masa e inundaciones pueden georreferenciarse y mapearse con el propósito de mantener la pertinencia y utilidad de los mapas generados. Además, se recomienda realizar estudios de zonificación detallada que complementen y profundicen este análisis, permitiendo avanzar hacia una gestión territorial más integral y orientada a la reducción de la exposición de la infraestructura hidrosanitaria frente a las amenazas naturales.

Es pertinente promover la articulación entre entidades gubernamentales, académicas y la comunidad para validar y enriquecer la información sobre susceptibilidad, así como para impulsar investigaciones complementarias que profundicen en el análisis de factores físicos del territorio.

Referencias

- Achicanoy, J., Rojas, R., & Enrique, S. (2018). Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la localidad de Suba, Bogotá-Colombia. *Gestión y Ambiente* 21(1), 41-58.
- Alcaras, E. (2025). Flood mud index (FMI): A rapid and effective tool for mapping muddy areas after floods - The Valencia case. *Remote Sensing Volumen 17*, 1-27.
- Amatebelle, C. E., Owolabi, S. T., Ogundeji, A., & Okolie, C. (2025). A systematic analysis of remote sensing and geographic information system applications for flood disaster risk management. *Journal of Spatial Science* 1449-8596, 10.1080/14498596.2025.2476973.
- Andrade, C., Uribe, J., & Torres, A. (2018). Herramientas SIG aplicadas al análisis de riesgo en infraestructura de servicios públicos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 149–169.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Ávila Álvarez, GE, Cubillos Peña, CE, Granados Becerra, AE, Medina Bello, E., & Rodríguez Castiblanco, É. R. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa: escala detallada (1ª reimpresión). Servicio Geológico Colombiano. https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/1642_GuiaMetodologica-27-07-2016-SinGuias.pdf
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15–31.
- Belmonte Serran, F., Romero Díaz, A., López Bermúdez, F., & Laguna, E. H. (1999). Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por interceptación. *Papeles de Geografía No. 30 Universidad de Murcia*, 5-15.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons.

- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1994). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. Routledge.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual (Version 5.0)*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Cardona Velásquez, P. A., & Gualdrón Prieto, E. M. (2021). *Determinación de zonas homogéneas geoeconómicas de 16 veredas del municipio de Fusagasugá, Cundinamarca implementando zonas homogéneas físicas y el proceso analítico jerárquico (AHP)*. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Centros de Estudios de Desarrollo Regional; Centro de Datos Regional; Universidad de Nariño. (2024). *Contexto del Municipio de San Pablo - Nariño*. San Pablo: Gobernación de Nariño.
- Chamorro, A., Echaveguren, T., Pattillo, C., Contreras-Jara, M., Contreras, M., Allen, E., . . . Solminihac, H. (2023). SIGeR-RV: A web geographic information system based system for risk management of road networks exposed to natural hazards. *Transportation Research Record Vol. 2677 (12)*, 754-769.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Copernicus Data Space Ecosystem. (23 de Mayo de 2025). *Sentinel-2*. Obtenido de A European wide-swath, high-resolution, multi-spectral imaging mission: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>
- Crosta, G. B. (1998). Regional-scale landslide hazard assessment in the basin of Como Lake, Italy. *Geomorphology*, 30(1-2), 131–147.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In Turner, A.K., & Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36–75). National Research Council.
- Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to Environmental Hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529-539. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>
- Creación de una Empresa Industrial y Comercial del Estado del orden municipal, Acuerdo Municipal 20 (Concejo Municipal del Municipio de San Pablo 5 de Marzo de 1998).
- Decreto 1478 de 2022: Por medio del cual se adopta la actualización del Plan Nacional de Gestión

del Riesgo de Desastres y se modifica el Artículo 2.3.1.2.2.4.3 de la Subsección 4, Sección , Capítulo 2, Título 1, Libro 2, del Decreto Único Presidencial 1081 de 2015 [Decreto].
 Diario Oficial No. 51536.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191411>

Decreto 1807 de 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. Recuperado de
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>

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 [Decreto]. Diario Oficial No. 50367.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=199583>

Dino, D., Sobrino, N., & Macii, E. (2024). Web-GIS Application for hydrogeological risk prevention: The case study of Cervo Valley. *Sustainability Volume 16, Issue 22*,
<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/22/9833>.

Djilali, C., & Chérif, M. (2016). L'apport des systemes d'informations géographiques dans la gestion des risques liés au transport des hydrocarbures par pipelines: Cas de l'oléoduc Hassi Messaoud-Hassi Rmel (Algerie). *Revue des BioRessources Vol 6 N° 1*, 139-152.

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *First steps in ArcGIS 11.5*.
 Obtenido de Usar herramientas de comparación:
<https://doc.arcgis.com/es/excalibur/latest/get-started/comparison-tools.htm>

Environmental Science Research Institute. (25 de Mayo de 2025). *Análisis y geoprocesamiento*.
 Obtenido de Cómo funciona la interpolación de distancia inversa ponderada:
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Geoprocessing tools for ArcGIS Pro 3.4*. Obtenido de Spline (Spatial Analyst): <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/spline.htm>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Herramientas de geoprocesamiento ArcGIS Pro 3.4*. Obtenido de Dendograma:

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/create-signatures.htm>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Herramientas para ArcGIS 11.4*.

Obtenido de Calcular el índice compuesto:

<https://enterprise.arcgis.com/es/portal/latest/use/calculate-composite-index-mv.htm>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Referencias de la herramienta*

ArcGis Pro 3.4. Obtenido de Cómo funciona Kriging: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Sentinel-2 Level-2A*. Obtenido

de Global Sentinel-2 multispectral and multitemporal atmospherically corrected imagery.

This imagery layer is sourced from the Microsoft Planetary Computer and is updated daily with the latest available imagery.:

<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=255af1ceee844d6da8ef8440c8f90d00>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Spatial Analyst module for*

ArcGIS Pro 3.4. Obtenido de An overview of kriging model classes:

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/arcpy/spatial-analyst/an-overview-of-krigingmodel-classes.htm>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Spatial Analyst toolbox*.

Obtenido de Create signatures: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/create-signatures.htm>

Environmental Science Research Institute. (23 de Mayo de 2025). *Tool Reference for ArcGIS Pro*

3.4. Obtenido de How raster calculator works: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/tool-reference/image-analyst/how-raster-calculator-works.htm>

Environmental Systems Research Institute, I. (2025). *República de Colombia Patente n° ArcGIS*

Desktop ArcMap versión 10.8.2.

Environmental Systems Research Institute, I. (2025). *República de Colombia Patente n° Copyright*

© 1999-2023 Esri Inc. All Rights Reserved.

Ermini, L., Catani, F., & Casagli, N. (2005). Artificial neural networks applied to landslide

susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66(1–4), 327–343.

- Escobar Duque, G., & Escobar P., C. E. (2016). Consistencia y plasticidad. En G. Escobar Duque, & C. E. Escobar P., *Geomecánica* (págs. 71-77). Bogotá D.C. <http://galeon.com/geomecanica> : Universidad Nacional de Colombia.
- Espinal Patiño, C., & Posada Pérez, N. M. (2024). Enseñanza de los sistemas de información geográfica (SIG) orientados a la comprensión del territorio en contextos universitarios. *Atelie Geográfico v. 18 n. 1*, 304-329.
- Feldman, A. D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- García-González, J. A. (2022). De la topología a la geometría: Implementación de mapas mentales a los Sistemas de Información Geográfica. *Cuadernos Geográficos 61(2)*, 88-107.
- Ghosh, S., Kumar, S., & Kumar, R. (2012). Application of GIS in Water Supply and Sanitation Planning: A case study. *International Journal of Environmental Sciences*, 2(3), 1567-1574.
- Greenway, D. R. (1987). Vegetation and slope stability. In Anderson, M. G., & Richards, K. S. (Eds.), *Slope Stability* (pp. 187–230). Wiley.
- Guataquirá, M. (2018). Análisis de movimientos en masa mediante la aplicación de SIG en la ciudad de Villavicencio en el sector Cerro de Buenavista [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12019/2018manuelguataquirá.pdf>
- Güiza Suarez, L. (2012). Floods risk management in Colombia. *Letras Verdes N° 12*, 25-41.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2005). Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines. *Geomorphology*, 72(1-4), 272–299.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, 5(1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Hammad, A. A. (2011). Watershed erosion risk assessment and management utilizing revised universal soil loss equation-geographic information systems in the Mediterranean environments. *Water and Environmental Journal Volume 25, Issue 2*, 149-162.
- Herramienta metodológica para la formulación de programas de gestión del riesgo de desastres en servicios de acueductos, alcantarillado y aseo. (2014). Recuperado de <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/handle/20.500.11762/20088>

- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook: A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(3), 221–238.
- Hurtado, T., & Bruno, G. (2025). Capítulo III. PProceso de análisis jerárquico (AHP). En T. Hurtado, & G. Bruno, *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores* (págs. 1-21). UNMSM https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF#:~:text=Es%20una%20matriz%20cuadrada%20que%20contiene%20comparaciones%20pareadas,%201,%202,...n,%20y,%20j%20=%201,%202,...n.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2024). República de Colombia Mapa oficial a escala 1:100.000 para el departamento de Nariño [Datos geospaciales]. Geoportal IGAC. <https://geoportal.igac.gov.co>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (sf). República de Colombia Cartografía básica escala 1:25.000 . <https://www.igac.gov.co>
- Institute, E. S. (2025). *República de Colombia Patente n° ArcMap Versión 10.8.2*
- Jakob, M., & Hungr, O. (2005). *Debris-flow hazard and risk assessment*. Springer Praxis Books.
- Jonkman, S. N., & Vrijling, J. K. (2008). Loss of life due to floods. *Journal of Flood Risk management*, 1(1), 43–56. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00006.x>
- Kakumoto, S., Kosugi, Y., Hatayama, M., & Kameda, H. (2002). Development of spatial temporal geographic information system and risk adaptive regional management information system. *SICE*, 352-357.
- Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., Lempert, R., Li, J., ... & Myeong, S. (2012). Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, 25-64.
- Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33–41.
- Lepuschitz, E. (2015). Geographic information systems in mountain risk and disaster management. *Applied Geogrphy* 63, 212-219.

- Londoño Ciro, L. A., & Cañon Barriga, J. E. (2015). Metodología para la aplicación de modelos de regresión de usos del suelo en la estimación local de la concentración mensual de PM10 en Medellín-Colombia. *Revista Politécnica Año 11, Número 21*, 29-40.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (4th ed.). Wiley.
- Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. ESRI Press.
- Maj. Berdugo Sierra, H. A. (12 de Mayo de 2025). *Universidad Militar Nueva Granada*. Obtenido de Repositorio Institucional UMNG: <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/821102b7-05ce-4588-bf99-44aa158e270d/content>
- Maksimovi., & Tejada-Guibert, J. A. (2001). *Frontiers in Urban Water Management: Deadlock or Hope*. IWA Publishing.
- Martínez, L., & Escobar, M. (2020). Impacto del cambio en la cobertura vegetal sobre la escorrentía superficial en cuencas andinas. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 53(2), 45-61.
- Merino-Benítez, T., Hernández, V., & Grave, I. B.-T. (2022). Finding optimal infrastructure investment locations with GIS-MCDA. *International Symposium of the Analytic Hierarchy Process*, 1-4.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015, 26 de mayo). Decreto 1077 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio [Decreto]. *Diario Oficial* No. 49542. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>
- Moges, E., & Bhat, M. G. (2018). A GIS-based approach to assess the impact of land use changes on watershed hydrology. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(4), 309-318.
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
- Montoya, H., Augusto, C., & Vega Gutiérrez, J. A. (2014). Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia (Valle de Aburrá-Colombia). *Revista EIA, ISSN 1794-1237. Volumen 11 (22)*, 103-117.
- Mora, S., & Vahrson, W. G. (1994). Macrozonificación de amenazas naturales en América Central. *Revista Geológica de América Central*, 17, 101-124.

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Muñoz Arboleda, O. J. (2015). *Análisis de los efectos del fenómeno climático de "La Niña" en Colombia a la luz del actual modelo de gestión integral del riesgo*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Paéz, R. (1975). Traslado del edificio Cudecom, Bogotá, Colombia. *Informes de la Construcción Vol. 28 n° 274*, 49-64.
- Palacio Martínez, J. A., & Pedraza Franco, C. (2012). Inventario e identificación del componente arbóreo de la sede del poblado politécnico Jaime Isaza Cadavid. *Revista Politécnica Año 8 Número 14*, 85-95.
- Pérez, R., & Martínez, L. (2020). Análisis de vulnerabilidad en sistemas de acueducto: un enfoque metodológico. *Ingeniería Civil y Ambiental*, 15(2), 23-37.
- Pérez, J. L., Salcedo Hurtado, E. d., & Mora Paéz, H. (2014). Análisis sismotectónico regional como contribución al estudio de las fuentes sismogénicas locales en la zona del embalse Calima, Valle del Cauca, Colombia. *Boletín de Geología Vol 36 N° 2*, 101-124.
- Pettenella, D. (2009). Land use and hydrological response: The importance of soil infiltration. *Journal of Hydrologic Science*, 54(3), 520–533.
- Planeación, D. N. (11 de Mayo de 2025). *Terridata Sistema de Estadística Territoriales*. Obtenido de San Pablo, Nariño: <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles/52693>
- 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, Ley 1523 (Congreso de Colombia 24 de Abril de 2012).
- Por la cual se adoptan medidas y disposiciones para los proyectos de infraestructura de transporte, agua potable y saneamiento básico y los demás sectores que requieran expropiación en proyectos de inversión que adelante el Estado y se dictan otras dispo., Ley 1742 de 2014 (El Congreso de Colombia 26 de Diciembre de 2014).
- Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones, Ley 1454 (Congreso de Colombia 28 de Junio de 2011).
- Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones, Ley 388 (Congreso de Colombia 18 de Julio de 1997).

- Porta Trinidad, J. (2024). *Sistemas de información geográfica y algoritmos de optimización aplicados a problemas geoespaciales en la administración de tierras*. Coruña: Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles.
- Ramos, L. (2015). Análisis espacial de amenazas y vulnerabilidades en contextos urbanos mediante GIS. Universidad Militar Nueva Granada. [Disponible en: <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/8f94ec71-ca5f-4f38-a3af157a1aa860cb/content>]
- Ramos, J. (2015). Aplicación de SIG para la evaluación de vulnerabilidad en infraestructuras hidráulicas. *Revista de Ingeniería y Tecnología*, 7(1), 45-62.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91.
- Reid, K., Clark, E., & Cho, G. (1996). Legal risk management for geographic information systems. *Journal of Law and Information Science Vol 7 No 2*, 169-207.
- Saaty, T.L. (1994). Cómo tomar una decisión: El proceso de jerarquía analítica. *Interfaces*, 24 (6), 19–43. <https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Processes* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. Transportation Research Board, Special Report 176.
- Se dictan otras normas tendientes a fortalecer la descentralización, y se dictan normas para la racionalización del gasto, Ley 617 (Congreso de Colombia 6 de Octubre de 2000).
- Servicio Geológico Colombiano. (2024). Mapas geológicos oficiales del departamento de Nariño, escala 1:100.000 [Datos geoespaciales]. República de Colombia Geoportal del Servicio Geológico Colombiano. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/paginas/geoportal.aspx>
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) y Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2015). República de Colombia Memoria explicativa mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Escala 1:100.000 [Informe técnico]. https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac_detail.pl?biblionumber=7335
- Servicio Geológico Colombiano. (2024). República de Colombia Mapas geológicos oficiales del departamento de Nariño, escala 1:100.000 [Datos geoespaciales]. Geoportal del Servicio Geológico Colombiano. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/paginas/geoportal.aspx>

Se reglamenta en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones., Decreto 1807 (Presidencia de la República de Colombia 19 de Septiembre de 2014).

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales Gobierno de México. (23 de Mayo de 2025). *semarnat.gob.mx*. Obtenido de Metodología AHP para determinación de la ponderación global de los componentes ambientales en el sistema ambiental regional (memoria de cálculo y resultados): <https://doc.arcgis.com/es/excalibur/latest/get-started/comparison-tools.htm>

Soto, C. A., Romero, M. A., & Montoya, J. (2017). Evaluación de amenazas naturales en territorios montañosos del suroccidente colombiano. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(30), 113–132.

Team, Q. D., & Foundation, O. S. (2025). *República de Colombia Patente n° QGIS Versión 3.36.0-Maidenhead*.

Torres, MA y Franco, JE (2019). Gestión de riesgos y su impacto en la infraestructura hidráulica: una revisión crítica. *Revista de Gestión de Riesgos*, 2 (3), 56–74.

van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2006). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology for Society and Territory*, 5, 49–69.

Anexos

Anexo 1. Cartografía temática de los resultados obtenidos en el área de estudio.

Este anexo presenta los mapas elaborados como parte fundamental de los resultados obtenidos en la investigación, los cuales permiten visualizar y analizar de manera detallada las características espaciales y territoriales del área de estudio. Estos mapas son esenciales para comprender la distribución y susceptibilidad de la infraestructura hidráulica en el municipio de San Pablo, Nariño, y constituyen un producto visual clave para la interpretación y validación de los hallazgos del estudio:

- Mapa 1. Localización del área de estudio (Municipio de San Pablo, Departamento de Nariño, Colombia)
- Mapa 2. Clasificación del suelo del área de estudio
- Mapa 3. Relieve del área de estudio, clasificado según la altitud sobre el nivel del mar
- Mapa 4. Categorización de pendientes según el gradiente en el área de estudio
- Mapa 5. Geomorfológico del área de estudio
- Mapa 6. Geología local del área de estudio
- Mapa 7. Cobertura de la tierra del área de estudio a partir de clasificación supervisada
- Mapa 8. Precipitación anual del área de estudio
- Mapa 9. Susceptibilidad a movimientos en masa en el área de estudio
- Mapa 10. Susceptibilidad a inundaciones en el área de estudio

Anexo 2. Matriz de comparación por pares (método Saaty): Ponderación de factores de susceptibilidad para movimientos en masa e inundaciones – Datos y cálculos en Excel

En este Anexo se presentan las matrices de comparación por pares desarrolladas bajo el método de Saaty, utilizadas para la evaluación y determinación de los pesos relativos de cada factor condicionante y detonante en la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones. Estas matrices permitieron realizar el proceso de ponderación, facilitando la identificación de la importancia relativa de cada factor mediante el análisis dependiendo el fenómeno estudiado.