

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa como insumo para la implementación de mallas retenedoras de caudal sólido

Sergio Hernando Sánchez Ospina

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2024

Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa como insumo para la implementación de mallas retenedoras de caudal sólido

Sergio Hernando Sánchez Ospina

Trabajo de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director

M.Sc. Yesid Paul Goyes Peñafiel

Codirectora

M.Sc. Joan Nathalie Suarez Hincapié

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2024

Resumen

Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa como insumo para la implementación de mallas retenedoras de caudal sólido

Los movimientos en masa y las avenidas torrenciales tienen una estrecha relación en vistas desde diferentes ámbitos, entre ellos las condiciones climáticas y los factores que los detonan los cuales son variables dependientes que condicionan el terreno. La cordillera de los Andes a pesar de que se extiende por Suramérica, en Colombia se expone a condiciones tropicales que particularmente convierten sus laderas en escenarios donde se presentan diferentes movimientos en masa y deslizamientos por los materiales que se descomponen de las rocas, así dicha necesidad de conocer, mitigar y prepararse para un evento súbito en el que la zonificación se encasilla en la etapa del conocimiento de la susceptibilidad. En la actualidad existen varios métodos de zonificación, sin embargo, el presente trabajo tiene como objetivo principal la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa (mm) en el municipio de Palmira utilizando 2 metodologías, los pesos de evidencia o Wofe y el análisis jerárquico multicriterio AHP, en lo cual, con los resultados de zonificación se proyecta priorizar las zonas o cuencas con mayor probabilidad de aporte de detritos o material deslizado y sea en dichas áreas donde se adelanten trabajos detallados que permitan la disminución de la condición de riesgo por avenidas torrenciales implementando barreras o mallas de retención de caudal sólido. En síntesis, la zonificación y la directriz propuesta en este trabajo puede utilizarse como insumo para la toma de decisiones en los instrumentos de planificación y proponer estudios de detalle con los cuales se adelanten procesos para la implementación de estas obras de mitigación contra las avenidas torrenciales.

Palabras clave: susceptibilidad, movimientos en masa, retención de detritos, avenidas torrenciales, barrera de detritos, mallas de retención

Abstract

Susceptibility analysis due to mass movements as an input for the implementation of solid flow retaining barriers

Mass movements and torrential floods have a close relationship in views from different areas, including climatic conditions and the factors that trigger them, which are dependent variables that condition the terrain. Although the Andes mountain range extends through South America, in Colombia it is exposed to tropical conditions that particularly turn its slopes into scenarios where different mass movements and landslides occur due to the materials that decompose from the rocks, thus this need of knowing, mitigating and preparing for a sudden event in which zoning is typecast in the stage of knowledge of susceptibility. Currently there are several zoning methods, however, the main objective of this work is the zoning of susceptibility due to mass movements (mm) in the municipality of Palmira using 2 methodologies, weights of evidence or Wofe and hierarchical analysis AHP multi-criteria, in which, with the zoning results, it is planned to prioritize the areas or basins with the greatest probability of contribution of debris or slid material and it is in these areas where detailed works are carried out that allow the reduction of the risk condition due to floods. torrential flows by implementing solid flow retention barriers or meshes. In summary, the zoning and guideline proposed in this work can be used as input for decision-making in planning instruments and propose detailed studies with which processes for the implementation of these mitigation works against torrential floods are carried out.

Keywords: susceptibility, mass movements, debris retention, torrential floods, debris barrier, retention meshes

Contenido

| | Pág. |
|--|------------|
| Resumen | iii |
| Abstract | iv |
| Contenido..... | v |
| Lista de figuras | vii |
| Lista de tablas | ix |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Descripción del problema | 3 |
| 1.2 Alcance..... | 4 |
| 2. Objetivos | 7 |
| 2.1 Objetivo general | 8 |
| 2.1.1 Objetivos específicos..... | 8 |
| 3. Marco teórico | 9 |
| 3.1 Gestión del riesgo de desastres en Colombia..... | 9 |
| 3.2 Avenidas torrenciales..... | 14 |
| 3.3 Movimientos en masa | 15 |
| 3.4 Metodologías de zonificación de susceptibilidad | 18 |
| 3.4.1 Pesos de evidencia – Wofe..... | 19 |
| 3.4.2 Análisis jerárquico – AHP..... | 25 |
| 4. Materiales y métodos..... | 27 |
| 4.1 Caracterización geoambiental | 27 |
| 4.2 Metodología para la zonificación | 37 |
| 4.2.1 Cálculo de pesos finales | 39 |
| 4.2.2 Índice de susceptibilidad por deslizamiento (LSI)..... | 44 |
| 4.2.3 Validación – Curva de éxito AUC – ABC | 45 |
| 4.2.4 Categorización de susceptibilidad..... | 46 |
| 4.3 Comparación entre modelos de susceptibilidad..... | 48 |
| 5. Resultados | 49 |
| 5.1 Caracterización geoambiental | 49 |
| 5.1.1 Procesos morfodinámicos..... | 49 |
| 5.1.2 UGS – Unidades geológicas superficiales..... | 52 |
| 5.1.3 Subunidades geomorfológicas..... | 57 |
| 5.1.4 Cobertura y uso del suelo | 58 |
| 5.1.5 Pendientes del terreno | 59 |
| 5.1.6 Curvatura del terreno..... | 61 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.1.7 | Pérdida máxima del suelo | 62 |
| 5.1.8 | Grado de erosión | 63 |
| 5.2 | Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa | 64 |
| 5.2.1 | Susceptibilidad método Wofe | 64 |
| 5.2.2 | Susceptibilidad método AHP | 68 |
| 5.3 | Propuesta para el levantamiento de campo | 72 |
| 5.3.1 | Deslizamiento La Zapata – Zona rural Palmira | 79 |
| 5.4 | Comparación de metodologías de zonificación | 86 |
| 5.5 | Reducción del riesgo por avenidas torrenciales | 92 |
| 5.5.1 | Cuenca Aguaclara - Chontaduro | 92 |
| 5.5.2 | Cuenca Río Nima | 95 |
| 5.5.3 | Mallas de retención - Barreras de red de anillos de alambre de acero de alta resistencia a la tracción VX, HX y UX | 99 |
| 6. | Conclusiones | 103 |
| 6.1 | Susceptibilidad por movimientos en masa | 103 |
| 6.2 | Recopilación de registros de campo | 103 |
| 6.3 | Comparación de metodologías, priorización de zonas propensas a riesgo por avenidas torrenciales | 104 |
| 7. | Referencias | 106 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Mapa del municipio de Palmira, Valle del Cauca en relieve sombreado. Fuente: Modificado de (IGAC, s/f) | 2 |
| Figura 2 Árbol de problemas. | 4 |
| Figura 3 Árbol de objetivos..... | 7 |
| Figura 4 Número de personas afectadas por fenómeno de la niña 2010 - 2011. Fuente:(Gallego, 2018) | 11 |
| Figura 5 Principales factores detonantes y pérdidas humanas por país; a. Lluvia, b. Sismo, c. Actividad antrópica. Fuente: (Gómez et al., 2023)..... | 12 |
| Figura 6 Avenida torrencial sector la María, zona rural de Palmira..... | 15 |
| Figura 7 Bloque diagrama deslizamiento rotacional. Fuente: Modificado de (Varnes, 1978). ... | 17 |
| Figura 8 Relación del factor condicionante con la presencia de deslizamiento. Fuente: (MINMINAS & SGC, 2017) | 22 |
| Figura 9 Flujograma, método estadístico bivariado. Fuente:(C. van Westen, 1996) | 24 |
| Figura 10 Deslizamientos comunes en suelo, roca y material coluvial. Fuente: Tomado de (Deere & Patton, 1971) | 31 |
| Figura 11 Matriz rectángulas esquematizando el análisis morfométrico. Fuente: (Zevenbergen & Thorne, 1987)..... | 36 |
| Figura 12 Curvatura de plano. Fuente: (ESRI, 2021) | 36 |
| Figura 13 Inventario de mm en binario..... | 40 |
| Figura 14 Mapa de pendientes en grados | 43 |
| Figura 15 Mapa final de wf | 44 |
| Figura 16 Mapa LSI – índice de susceptibilidad por mm..... | 45 |
| Figura 17 Procesos morfodinámicos, recopilación del inventario de mm Fuente: Modificado de (IGAC, s/f) | 50 |
| Figura 18 Movimientos en masa presentes sobre laderas estructurales. | 51 |
| Figura 19 Unidades geológicas superficiales Fuente: Modificado de (Univalle et al., 2023), (IGAC, s/f) | 52 |
| Figura 20 UGS y mm relacionados con rocas de la formación Amaime. | 55 |
| Figura 21 Izquierda deslizamiento y pérdida de banca, corregimiento de Tenjo derecha talud corte de carretera, sector el Mesón..... | 56 |
| Figura 22 Depósitos coluviales proveniente de materiales de la fm Amaime, sector el Mesón. | 57 |
| Figura 23 Subunidades geomorfológicas Fuente: Modificado de (IGAC, s/f) | 58 |
| Figura 24 Cobertura del suelo Fuente: (IGAC, s/f) | 59 |
| Figura 25 Pendiente del terreno en grados Fuente: Modificado de (IGAC, s/f) | 60 |
| Figura 26 Curvatura del terreno Fuente: Modificado de (IGAC, s/f) | 61 |
| Figura 27 Pérdida máxima del suelo. Fuente: Modificado de (CVC, 2021a) | 62 |
| Figura 28 Grado de erosión. Fuente: Modificado de (CVC, 2021c) | 64 |
| Figura 29 Mapa de susceptibilidad por mm, método Wofe | 66 |
| Figura 30 Porcentaje de importancia de los factores condicionantes | 67 |
| Figura 31 Mapa de susceptibilidad por mm, metodología de (Saaty, 1977).. | 69 |

| | |
|--|-----|
| Figura 32 Susceptibilidad por mm metodología AHP. | 72 |
| Figura 33 Plantilla de reporte para la adquisición de información de mm. Fuente: Modificado de (Cruden & Varnes, 1996)..... | 75 |
| Figura 34 Dimensiones idealizadas del deslizamiento. La línea punteada se refiere a la superficie antes de ser deslizado. Fuente: (Cruden & Varnes, 1996)..... | 76 |
| Figura 35 Estimación del volumen de un elipsoide. Fuente: (Cruden & Varnes, 1996) | 78 |
| Figura 36 Deslizamiento la Zapata..... | 80 |
| Figura 37 Esquema de deslizamiento. | 80 |
| Figura 38 Quebrada Baquero, corregimiento la Zapata. | 81 |
| Figura 39 Deslizamiento La Zapata. | 82 |
| Figura 40 Reporte de deslizamiento diligenciado para deslizamiento en corregimiento la Zapata. | 83 |
| Figura 41 Resultado de la susceptibilidad por mm de las metodologías utilizadas..... | 86 |
| Figura 42 Mapa de densidad de visitas por mm. | 88 |
| Figura 43 Comparación de modelos de susceptibilidad en zonas de geoformas fluviales y pendientes bajas..... | 89 |
| Figura 44 Acercamiento de las geoformas de la zona de montaña baja y media. | 90 |
| Figura 45 Comparación de modelos de susceptibilidad para la zona de montaña alta de Palmira. | 90 |
| Figura 46 Curva de éxito para los métodos AHP (izquierda) y Wofe (derecha). | 91 |
| Figura 47 Cuenca del río Aguaclara y centros poblados o corregimientos aferentes a la dinámica fluvial del río homónimo. Fuente: Modificado de (IGAC, s/f) | 93 |
| Figura 48 Priorización de zonas objetivo de estudios detallados..... | 94 |
| Figura 49 Cuenca del río Nima, centros poblados y mapa de susceptibilidad por mm. Fuente: Modificado de (IGAC, s/f) | 95 |
| Figura 50 Deslizamiento y pérdida de banca sobre vía que comunica el centro poblado de Tenjo con la María, cauce del río Nima..... | 96 |
| Figura 51 Puente, corregimiento Tenjo, Cauce Nima, condición de riesgo por socavación lateral y arrastre fluvial..... | 97 |
| Figura 52 Priorización de zonas objetivo de estudios detallados río Nima. | 98 |
| Figura 53 Barrera VX para retención de flujo de detritos. Fuente: (GEOBRUGG, 2023)..... | 100 |
| Figura 54 Barreras VX escalonadas. Fuente: (GEOBRUGG, 2023)..... | 102 |

Lista de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1 Marco de referencia para la zonificación de susceptibilidad. Fuente: Modificado de (MINMINAS & SGC, 2017) | 27 |
| Tabla 2 Fuentes de información secundaria Fuente: Tomado y modificado de (MINMINAS & SGC, 2017) | 29 |
| Tabla 3 Perfil de meteorización para rocas ígneas y metamórficas. Fuente: Modificado de (Deere & Patton, 1971) | 30 |
| Tabla 4 Categorías de pérdida máxima de suelo. Fuente: (CVC, 2021a) | 32 |
| Tabla 5 Grado de erosión. Fuente: (CVC, 2021c) | 33 |
| Tabla 6 Clasificación de pendientes en grados. Fuente: Tomado de (van Zuidam, 1986) | 34 |
| Tabla 7 Factores condicionantes formato y proceso GIS | 39 |
| Tabla 8 Conteo de pixeles para el factor condicionante Pendientes en grados | 41 |
| Tabla 9 Determinación de los pesos positivos y negativos | 41 |
| Tabla 10 Pesos finales del método Wofe para el factor Pendientes | 42 |
| Tabla 11 Leyenda del mapa de susceptibilidad. Fuente: Modificado de (C. van Westen, 2013) | 46 |
| Tabla 12 Calificación de importancia entre factores condicionantes. | 47 |
| Tabla 13 Pesos de evidencia y clases para el factor condicionante UGS. | 53 |
| Tabla 14 Dimensiones sugeridas para la UZT. Fuente: (Calvello et al., 2013)..... | 54 |
| Tabla 15 Ejemplo de algunos factores condicionantes usados para el cálculo de pesos de evidencia | 65 |
| Tabla 16 Categorías de susceptibilidad (C. van Westen, 2013) | 65 |
| Tabla 17 Resultados de pesos de importancia (Saaty, 1977) | 68 |
| Tabla 18 Índice y ratio de consistencia como validación del modelo AHP | 68 |
| Tabla 19 Categorías de susceptibilidad | 70 |
| Tabla 20 Definiciones de las dimensiones del deslizamiento. Fuente: Modificado de (Cruden & Varnes, 1996)..... | 76 |
| Tabla 21 Cálculo de volumen a partir de datos adquiridos del reporte propuesto..... | 85 |
| Tabla 22 Resumen de los resultados de validación de las metodologías utilizadas. | 87 |
| Tabla 23 Sistemas de barreras para cada dimensión de cauce y cargas admisibles. Fuente: Tomado de (GEOBRUGG, 2023)..... | 101 |

1.Introducción

La susceptibilidad por movimientos en masa en Colombia principalmente en la región comprendida entre media y alta montaña es objeto de estudio desde hace varios años, sin embargo, solo desde el año 2012 el gobierno nacional reglamenta sus estudios para ser incluidos en los diferentes instrumentos de planificación. Así, comienza la implementación de metodologías de zonificación basadas en Sistemas De Información Geográfica (SIG) adelantadas a escala global, de lo cual resultan los mapas de susceptibilidad por movimientos en masa (mm) y posteriormente sean implementados en los diferentes instrumentos de planificación, entendiéndose éstos como las herramientas que utiliza el gobierno para administrar el territorio desde una perspectiva que armoniza los intereses sociales con los ambientales (involucrando industria, ganadería, desarrollo rural, entre otros).

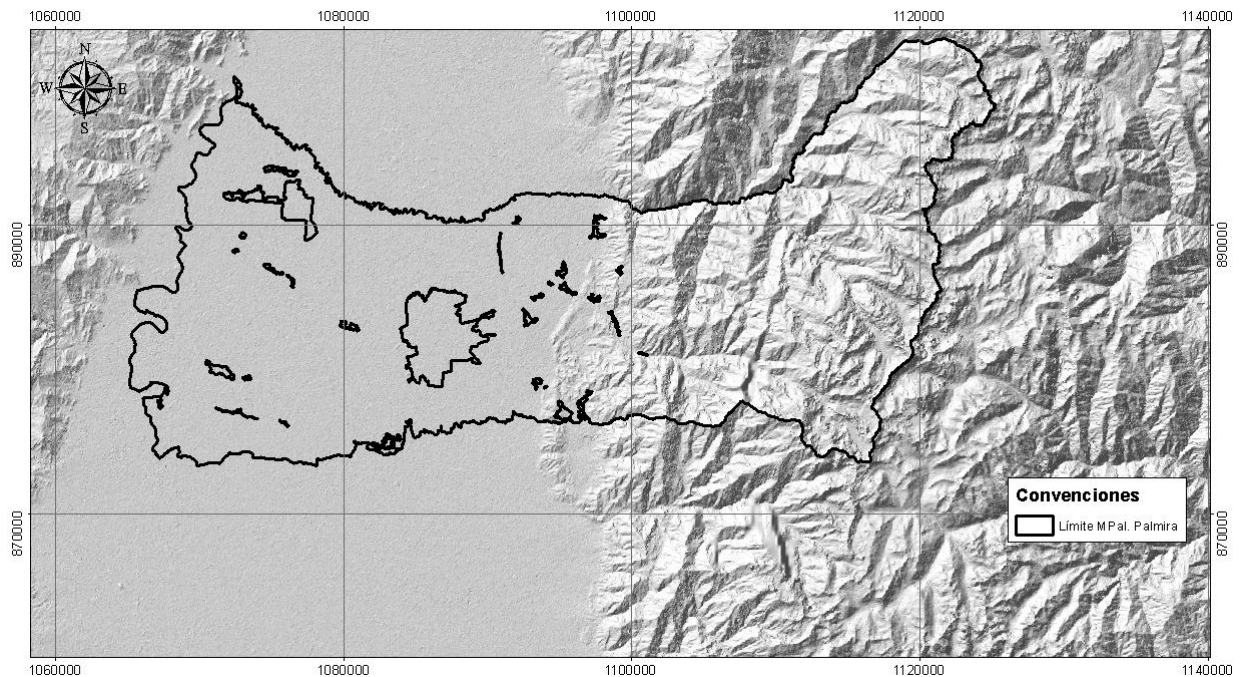
De los diferentes instrumentos de planificación que existen, se resaltan los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y algunos otros dispuestos por los ministerios gubernamentales para solicitudes de usos del suelo para fines minero – energético. Dichos procesos territoriales dentro de sus componentes o términos de referencia exigen que se estudie la susceptibilidad por mm y así, el estudio sea determinante en la toma de decisiones o limite el desarrollo de la actividad de interés.

La susceptibilidad por mm es definida por (Benchelha et al., 2019) como la asociación geográfica de los deslizamientos con diferentes variables que detonan el evento. Para el caso de Colombia donde en su mayoría los factores condicionantes se refieren a las unidades geológicas superficiales (UGS), subunidades Geomorfológicas (SUGMF) y usos del suelo (MINMINAS & SGC, 2017), los deslizamientos y movimientos en masa reportados obedecen al comportamiento de dichos factores los que se estudian a detalle en el presente trabajo. Estas son características intrínsecas del terreno que dependen directamente de los materiales que componen el subsuelo y así como de los agentes climáticos que modelan la superficie, y del ser humano, que, en el

desarrollo de sus actividades, cambia o modifica el uso del suelo finalmente afectando la cobertura del terreno.

Para el presente trabajo se eligió el municipio de Palmira, ubicado al sur del departamento del Valle del Cauca, sobre el flanco occidental de la cordillera central, con una transición ecosistémica desde Herbazales y Pajonales con un clima extremadamente frío y lluvioso en montaña fluvio-glacial principalmente en la zona más alta, pasando por bosque frío, en la zona media, posteriormente un bosque seco tropical en el piedemonte y precordillera para finalmente un ecosistema de bosque cálido en la zona plana. La orogenia andina presenta características con dinámica fluvial típica, donde las vertientes se direccionan a partir de la morfología montañosa obedeciendo una tendencia Norte sur debido a la tectónica de placas, y así, sus afluentes escurren hacia sus costados donde convergen las aguas en el río cauca y su mega cuenca homónima Figura 1.

Figura 1 *Mapa del municipio de Palmira, Valle del Cauca en relieve sombreado. Fuente: Modificado de (IGAC, s/f)*



Los mm ocasionalmente son los responsables del represamiento en los cauces de las cuencas, que en el presente trabajo se busca mejorar a partir de la estimación de cuencas con posibilidad

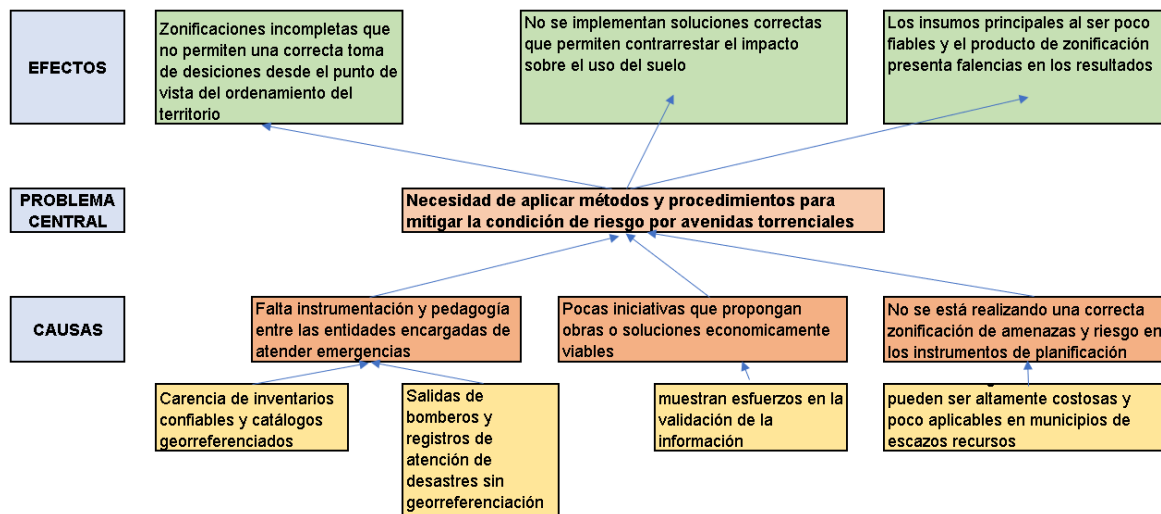
torrencial a partir de la susceptibilidad por mm y permita proponer estudios detallados en sitios particulares para reducir la condición de riesgo de las poblaciones aledañas o asentamientos ubicados en riberas de cauces.

1.1 Descripción del problema

La investigación motivo del presente trabajo parte de una idea enfocada hacia un problema concreto, en este caso, la susceptibilidad por mm como herramienta de probabilidad de ocurrencia de un evento súbito y su capacidad de provocar otros eventos en cadena de dinámica torrencial fluvial. Acompañado del problema principal, se encuentra el inconveniente que limita la realización de los modelos de susceptibilidad los cuales dependen del inventario y registros de mm debidamente diligenciados y georreferenciados.

Las crecientes súbitas, tanto avenidas torrenciales como las mismas inundaciones, son principalmente detonadas por períodos de lluvias que superan los umbrales críticos de equilibrio, aunque no solo las precipitaciones generan aumento del caudal en los cauces, pero si sumado a ello, otros factores como la morfometría de la cuenca, usos del suelo y la geología superficial no son los apropiados, adicionalmente se propician fenómenos de remoción en masa que eventualmente depositan su masa deslizada sobre los cauces, provocando así, los represamientos que cambian considerablemente la composición y dinámica de los flujos. En la Figura 2 se evidencia la relación causa efecto en el problema central estudiado.

Figura 2 *Árbol de problemas.*



El problema se puede enfocar en la probabilidad de aplicar métodos y procedimientos para mitigar la condición de riesgo por avenidas torrenciales y empalizadas, lo cual se da a partir del diagnóstico de susceptibilidad por movimientos en masa que a su vez requiere de un trabajo de campo para realizar el inventario del cual los métodos estadísticos de zonificación se basan para el cálculo de la susceptibilidad. Sin embargo, dicha necesidad de aplicar la metodología no es necesariamente la falta de aplicabilidad de métodos ya conocidos, sino de un problema fundamental el cual es el inventario de movimientos en masa, de los cuales se debe tener información georreferenciada, de preferencia las coordenadas del evento y la fecha de ocurrencia ya que, durante las etapas de revisión de información secundaria, no se encuentra debidamente levantada en términos de inventarios de deslizamientos.

La zonificación debe contar con un inventario de campo suficiente para alimentar los modelos de susceptibilidad pues la resolución de estos depende en gran medida de la calidad y cantidad de información verificada, partiendo del hecho que el indicador principal es el ROC o AUC (área bajo la curva) siendo este el valor en porcentaje de éxito del modelo.

1.2 Alcance

El enfoque central de este estudio se dirige hacia la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos por mm en la zona de media y alta montaña del municipio de Palmira, basándose

en la premisa fundamental de que los deslizamientos tienden a ocurrir con mayor frecuencia en zonas de ladera. Es importante destacar que la zona plana ha sido excluida de este análisis.

El modelo de susceptibilidad se nutre del inventario de procesos morfodinámicos; sin embargo, se ha identificado una limitación significativa relacionada con la escasez de registros verificados y la falta de georreferenciación adecuada. Esta limitación impacta la resolución y la efectividad del modelo. Por ende, se ha tomado la decisión de implementar metodologías basadas en inventarios de campo que incluyan registros fotográficos. Estos reportes no solo permitirán evidenciar el proceso de remoción, sino también clasificar cada deslizamiento según su dinámica, siguiendo la metodología propuesta por (Cruden & Varnes, 1996).

Adicionalmente, se tiene planificado llevar a cabo campañas de exploración de campo para verificar algunos de los movimientos en masa registrados por otras entidades. Esta iniciativa tiene como objetivo enriquecer el inventario con registros de primera mano, abordando así las limitaciones actuales y fortaleciendo la base de datos para una evaluación más precisa de la susceptibilidad a deslizamientos en la región.

Las metodologías seleccionadas para este estudio han sido elegidas considerando aquellas ampliamente utilizadas a nivel global, poniendo un énfasis especial en la premisa fundamental de que la susceptibilidad de deslizamiento se define como la probabilidad de que ocurra un deslizamiento de tierra en una determinada área, tomando en cuenta las condiciones locales del terreno (Brabb, 1984). En términos más simples, la susceptibilidad por mm predice las áreas donde es más probable que se produzca un deslizamiento (Guzzetti et al., 2005). Este enfoque respalda la aplicación de metodologías reconocidas y robustas que tienen en cuenta las características específicas del terreno para evaluar la probabilidad de eventos de deslizamiento.

Dado que la susceptibilidad se concibe como una probabilidad, se ha optado por la metodología Weight of Evidence (Wofe) para la zonificación. Esta elección se fundamenta en su aplicación de principios estadísticos bivariados, lo que ha demostrado proporcionar resultados óptimos en términos de capacidad predictiva. Además, Wofe es la metodología recomendada por (MINMINAS & SGC, 2017) en su guía de susceptibilidad por mm a escala 1:25,000. Esta escala es la adecuada para proyectos a mediana escala para diversos instrumentos de planificación.

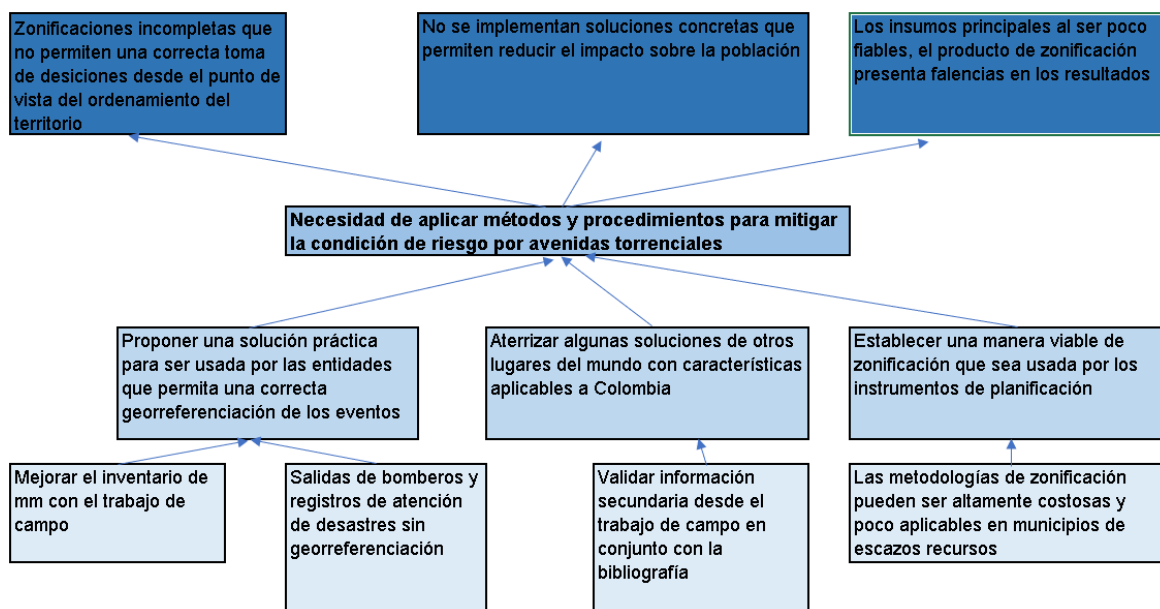
Por otro lado, la metodología Analytic Hierarchy Process (AHP), que se basa en principios heurísticos, se ha seleccionado para abordar la resolución de problemas mediante experiencias y juicios profesionales. A pesar de la subjetividad inherente a este método, se ha demostrado ser una herramienta fiable con resultados ajustados, ganando preferencia entre varios autores debido a su simplicidad y eficacia.

En otro aspecto crucial, se aborda uno de los objetivos principales relacionados con la priorización estimativa de zonas con potencial generador de torrencialidad debido al aporte de sedimentos. Este enfoque se materializa mediante la sugerencia de generar informes detallados sobre eventos de movimientos en masa, centrando la atención en el cálculo del volumen de masa deslizada. La premisa subyacente es que la cantidad de material desplazado representa la contribución de la cuenca a los cauces. Con este propósito, se propone un método de recopilación de información que considera la posibilidad de que el personal involucrado no siempre posea un nivel técnico. No obstante, la propuesta incluye la capacitación en conceptos matemáticos básicos, lo que permitiría al personal de respuesta a emergencias adquirir la información necesaria con un enfoque práctico y aplicable.

2. Objetivos

Pensando inicialmente en la necesidad de solucionar parte del problema de las avenidas torrenciales desde la susceptibilidad por movimientos en masa, se parte de esta premisa para identificar los problemas inherentes como la falta de información confiable, las pocas medidas implementadas para mitigar o reducir la condición de riesgo por avenidas torrenciales. De esta manera, analizada la situación se deben de proyectar objetivos que permitan contrarrestar los problemas detectados, que guíen hacia la más conveniente solución que a partir de estudios de susceptibilidad, permiten identificar las cuencas con mayores rangos y a partir de este análisis, determinar las zonas priorizadas para la implementación de las mallas retenedoras.

Figura 3 *Árbol de objetivos*



Del ejercicio anterior Figura 3, se definen los siguientes objetivos:

2.1 Objetivo general

- Analizar la susceptibilidad por movimientos en masa y la producción de sedimento con el fin de priorizar zonas en las que se proyectará implementar estructuras de retención de caudal sólido

2.1.1 Objetivos específicos

- Zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa para el municipio de Palmira y verificar por medio de la curva de éxito.
- Establecer los métodos para mejorar los registros de movimientos en masa que permitan estimar los aportes de sedimentos
- Comparar metodologías usadas para la zonificación de la susceptibilidad por mm y priorizar las zonas para ser objeto de estudios detallados con el fin de determinar la ubicación geográfica de las estructuras y los estudios previos que integren la viabilidad social y ambiental que finalmente permita la implementación de las mallas retenedoras de caudal sólido.

3.Marco teórico

Los estudios de susceptibilidad, amenaza y riesgo representan avances significativos en la forma en que la sociedad evoluciona y utiliza el territorio y los recursos naturales. En la actualidad, la investigación de desastres se centra en la prevención, destacando la importancia de la zonificación desde una perspectiva predictiva. A continuación, se presenta de manera resumida la evolución de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, desde la formalización política de entidades para atender emergencias hasta las actualizaciones que los estudios de zonificación implican en la toma de decisiones sobre los modelos de ocupación. Además, se examina cómo han evolucionado algunos de los métodos más comunes para calcular la susceptibilidad, como lo son el análisis jerárquico multicriterio (AHP) y el peso de evidencia (Wofe), abordando enfoques estadísticos caracterizados por su principio matemático probabilístico hasta heurísticos apoyándose en el criterio profesional. Este enfoque demuestra la constante adaptación y mejora en los métodos de evaluación de riesgos para fortalecer la capacidad de prever y gestionar desastres de manera efectiva.

3.1 Gestión del riesgo de desastres en Colombia

La gestión del riesgo es el instrumento mediante el cual los gobiernos administran el territorio teniendo en cuenta la probabilidad de que ocurra un evento y genere alguna condición de riesgo, particularmente los mm en el presente estudio. De esta manera, la gestión se subdivide en 3 etapas las cuales son el conocimiento, prevención y manejo (Ley 1523, 2012) donde la etapa de conocimiento es en la que se enfocan los estudios de zonificación de susceptibilidad pues es cuando se presentan las áreas donde podrían ocurrir los eventos. Los mm en la etapa del conocimiento corresponden al insumo principal de la zonificación, pues son los procesos que ya ocurrieron los que ayudan a crear los modelos de probabilidad de ocurrencia en lugares donde no ha sucedido.

A nivel global, los deslizamientos representan aproximadamente el 4,9% de todos los desastres naturales y contribuyen al 1,3% de los resultados fatales en el periodo comprendido entre 1990 y 2015, según datos de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2021). En el contexto de Latinoamérica, los deslizamientos ocupan el 10% de los desastres naturales y están asociados

al 12% de las pérdidas humanas, según informes de (Haque et al., 2019). Estas estadísticas subrayan la importancia de comprender y gestionar adecuadamente los deslizamientos, ya que constituyen un fenómeno significativo en términos de riesgos naturales y sus impactos asociados a las condiciones geográficas, fisiográficas sumado a las características climáticas de la zona tropical.

La dinámica de la gestión del riesgo y la prevención de desastres en Colombia ha experimentado una transformación significativa, especialmente a raíz del impacto contundente de la temporada de lluvias 2010-2011, la cual se vio agravada por la intensificación del fenómeno de La Niña. Este fenómeno climático, provocado entre otras cosas, por corrientes marítimas de aguas más frías de lo normal en el Océano Pacífico ecuatorial, desencadenando condiciones climáticas extremas que contribuyeron de manera notable a una elevada incidencia de desastres naturales en el país (Gallego, 2018).

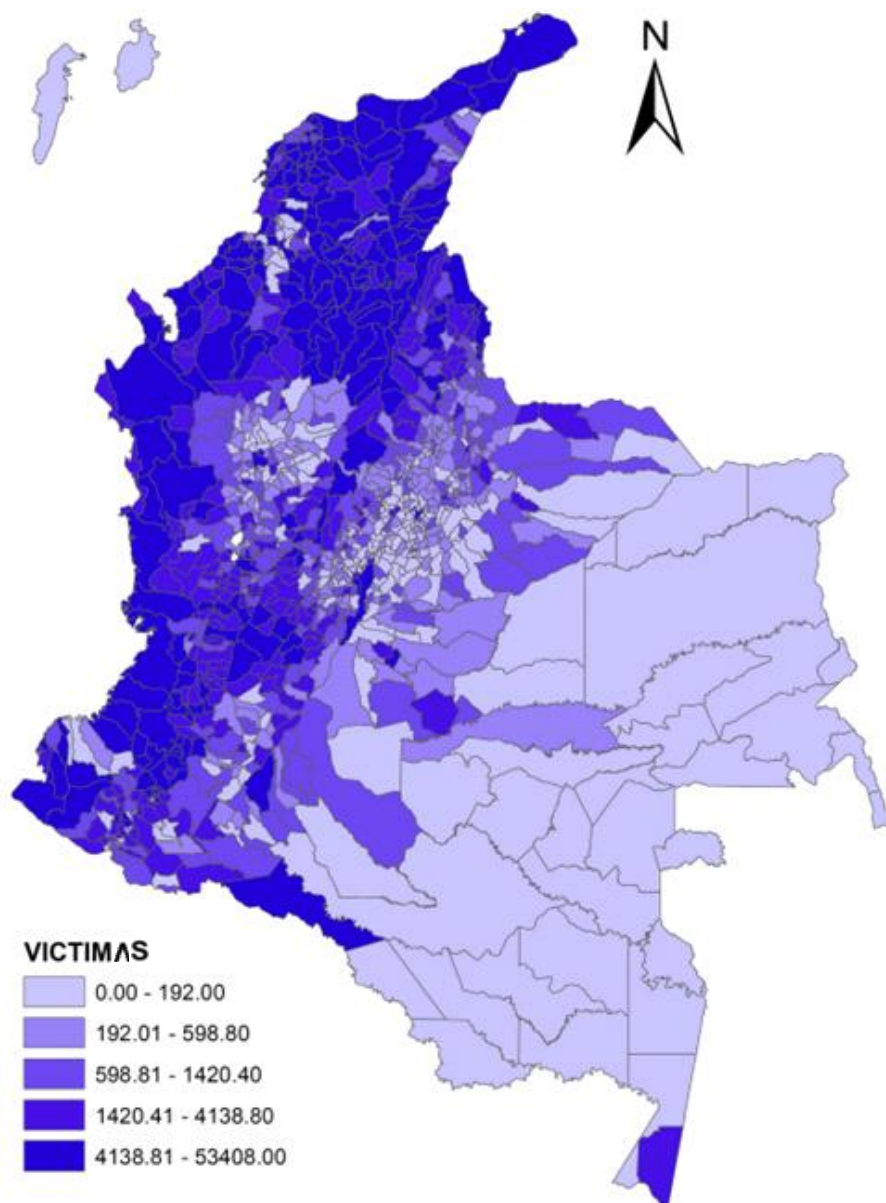
La intensidad y persistencia de La Niña durante esos años amplificaron la frecuencia e intensidad de las lluvias, desatando eventos adversos como inundaciones, deslizamientos de tierra y avenidas torrenciales. La magnitud de estos sucesos marcó un hito en la percepción y enfoque de la gestión del riesgo en Colombia, catalizando una revisión exhaustiva de las estrategias y políticas existentes con el objetivo de fortalecer la resiliencia ante eventos climáticos extremos.

El periodo de lluvias que se inició en el segundo trimestre de 2010 y se prolongó hasta abril de 2011 ha sido clasificado como el más intenso de la historia, con estimaciones que sugieren una intensidad de lluvias aproximadamente un 170% superior al promedio histórico. Este fenómeno afectó a más de 4 millones de ciudadanos, con reportes de 490 muertes humanas, 595 heridos, cerca de 13,000 viviendas destruidas y 441,579 afectados. Además, alrededor de 1,080,000 hectáreas de tierra productiva quedaron inundadas (Sánchez, 2011) La magnitud de estas cifras subraya la devastación provocada por este periodo de condiciones climáticas extremas, instigando una reflexión profunda sobre las medidas necesarias para abordar y mitigar los riesgos asociados a eventos climáticos extremos en el futuro. A continuación, se realizará un breve recorrido por la historia de la gestión del riesgo en Colombia desde la perspectiva legal.

En términos de personas afectadas, se observa una amplia variedad en el tipo de perjuicios experimentados, abarcando desde viviendas que, aunque no resultaron destruidas, sufrieron

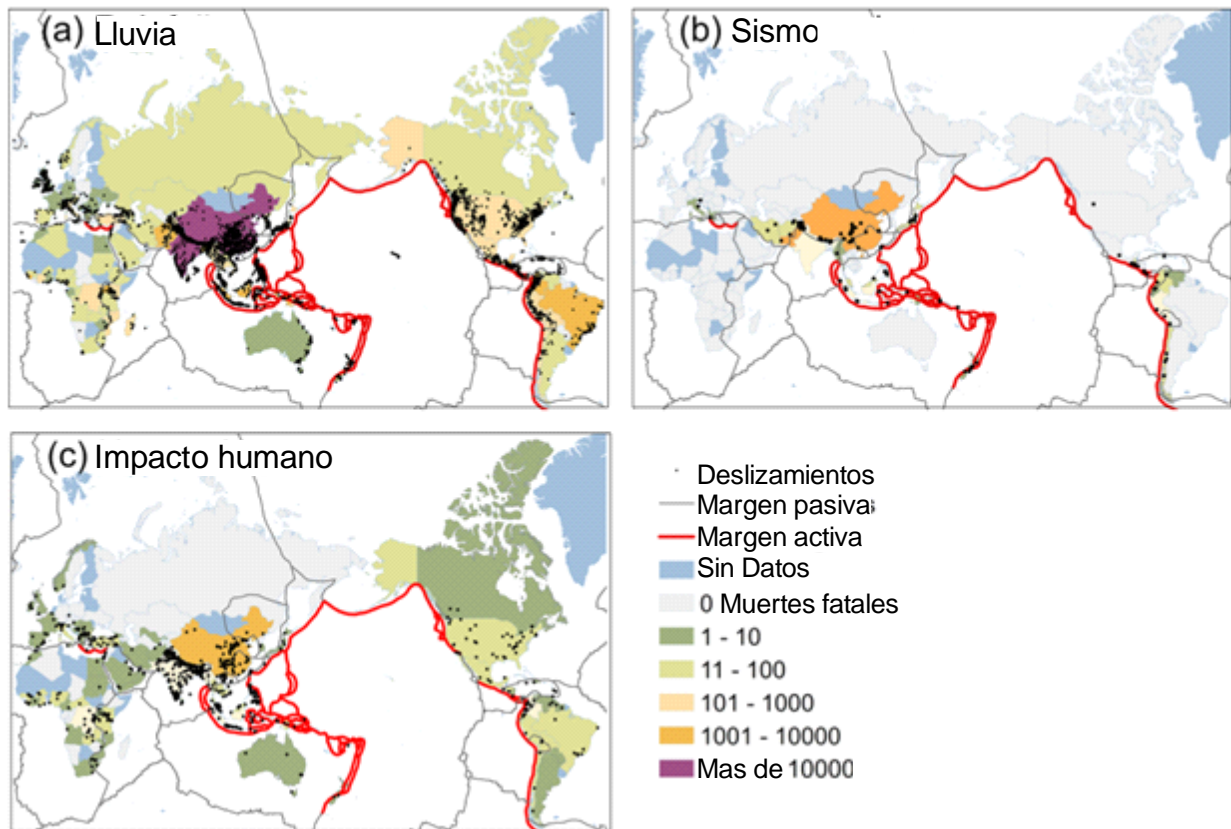
pérdidas económicas en bienes y enseres, contribuyendo así a la cuantificación de los afectados. Este panorama se extiende hasta tierras y cultivos, generando pérdidas significativas en la seguridad alimentaria y dependiendo directamente de la resiliencia de las comunidades afectadas. Además, se registran deslizamientos que invaden vías terciarias, obstaculizando el paso vehicular e interrumpiendo el transporte de alimentos e insumos agrícolas. La diversidad de impactos refleja la complejidad y la extensión de las consecuencias derivadas de este fenómeno Figura 4.

Figura 4 Número de personas afectadas por fenómeno de la niña 2010 - 2011. Fuente:(Gallego, 2018)



Las lluvias intensas desencadenan diversos efectos en el terreno, como se ilustra en la Figura 4, donde la distribución de las afectaciones más significativas se concentra principalmente en las áreas con influencia directa de las cordilleras. Este fenómeno se asocia tanto con inundaciones generadas por las cuencas formadas debido a las diferencias de relieve, como con los deslizamientos de tierra en zonas de ladera, donde la lluvia incide directamente, exacerbando el riesgo de eventos adversos en estas regiones.

Figura 5 Principales factores detonantes y pérdidas humanas por país; **a. Lluvia**, **b. Sismo**, **c. Actividad antrópica**. Fuente: (Gómez et al., 2023)



El factor lluvia es reconocido como el principal desencadenante de deslizamientos, figurando entre los tres factores más comunes, siendo los sismos y la actividad antrópica los restantes, según señala (Gómez et al., 2023). No obstante, es la susceptibilidad la que estima la probabilidad de que ocurran deslizamientos, considerando las condiciones intrínsecas del terreno y diversos factores detonantes que influyen en la ocurrencia de fenómenos de origen natural Figura 5.

Esta consideración resalta la importancia de evaluar y comprender la susceptibilidad de las áreas propensas a deslizamientos, ya que, aunque la lluvia actúa como el factor desencadenante más predominante, la susceptibilidad aborda las características inherentes del terreno que contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos. Esto subraya la necesidad de un enfoque integral que incorpore tanto los factores desencadenantes como los intrínsecos al terreno al desarrollar estrategias de gestión del riesgo y planificación territorial.

- Ley 46 de 1988 y el Decreto 919 de 1989

Creación y organización del sistema nacional de prevención y atención de desastres SNPAD

En Colombia se empieza a organizar gubernamentalmente la gestión del riesgo por medio de la Ley 46 de 1988 y el decreto 919 de 1989 donde se crea y organiza el sistema nacional de la prevención y atención de desastres (SNPAD) a partir de la tragedia de Armero en el año 1985. Solo hasta el fenómeno de La Niña del 2010 – 2011, es cuando se promueve y agiliza la iniciativa de la política nacional de prevención y atención de desastres que venía sonando desde el 2001.

- Ley 1523 de 2012

Se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres

Debido a los eventos del 2010 y 2011, en el año 2012 entra en vigor la Ley 1523 y el país ajusta su política de prevención y atención de desastres la cual ya cuenta con un mejor enfoque más técnico y conceptual. Esta política continúa vigente por medio de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).

- Artículo 189 del decreto de ley 019 de 2012

Reglamentación por parte del gobierno nacional para las condiciones y escalas de detalle para la zonificación de las áreas de amenaza y de las áreas con condición de riesgo.

- Decreto 1807 de 2014

Incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial

En el año 2014 por medio del decreto 1807 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., 2014), se comienza a exigir de manera técnica que

los estudios profesionales para la zonificación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo empiecen a ser tenidos en cuenta con las escalas apropiadas y las directrices y metodologías globalmente demostradas.

- Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25000 – Servicio Geológico Colombiano

Guía con el paso a paso para entregar los informes de susceptibilidad, amenaza y riesgo por movimientos en masa en Colombia.

3.2 Avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales han sido definidas de varias maneras, teniendo en cuenta que en ocasiones se consideran tipos de deslizamiento de tipo flujo, aunque autores como (PMA, 2007) definen estos eventos como flujos de detritos extremadamente rápidos, no plásticos, aunque la clasificación incorpora diferentes criterios entre los cuales se encuentra la velocidad del flujo como propone (Cruden & Varnes, 1996) estos flujos se caracterizan por velocidades de más o menos 3m /min. Otro criterio clave de estos eventos son la geomorfología de tránsito de los eventos, la cual (PMA, 2007) indican que estos procesos ocurren en zonas canalizadas y confinadas.

(Caballero Acosta, 2011) de igual manera, define las avenidas torrenciales como un subtipo de tipo movimiento en masa con la diferencia que se depositan con la dinámica de un flujo con importantes concentraciones de sedimentos y escombros. Esta definición puede ser complementada con la idea de que estos procesos a diferencia de las mismas inundaciones o flujos de escombros, cuenta con una densidad mayor adicionando la premisa que estos procesos pueden incluir cualquier tipo de sólidos, desde suelo, lodos y rocas, hasta escombros como ladrillo, concreto y otros residuos de obras civiles que, en su paso, afectan hasta arrastrar y dañar su integridad física. A su vez, (Palacio Jiménez, 2022) sugiere que las avenidas torrenciales son eventos destructivos comunes de regiones montañosas Figura 6, enfocando su análisis en el departamento de Antioquia enfatizando además que la importancia de la predicción o los modelos de susceptibilidad deben considerarse de manera imperativa, debido a la gran capacidad destructiva de dichos fenómenos.

Figura 6 Avenida torrencial sector la María, zona rural de Palmira.



El municipio de Palmira en su zona montañosa evidencia varios fenómenos torrenciales ligados a cuencas con susceptibilidad a deslizamientos, lo que puede evidenciarse en la Figura 6 donde estos eventos se presentan en zonas de montaña apoyando lo propuesto por (Palacio Jiménez, 2022).

3.3 Movimientos en masa

La importancia de la clasificación de los deslizamientos es la capacidad de distinguir y reconocer los deslizamientos con el propósito de realizar diseños y tomar decisiones frente a medidas de seguridad en prevención de desastres (Terzaghi, 1950). Mundialmente se han estudiado los movimientos en masa desde la necesidad y características de cada territorio particular. Los estudios tienen en común factores, parámetros o características actualmente usadas, tales como

criterios de clasificación a partir del tipo y del mecanismo de falla, materiales involucrados y velocidad. En (SGC & Montero, 2017).realizan la recopilación de las clasificaciones de movimientos en masa más mencionadas.

(Sharpe, 1938) fue de los primeros profesionales en clasificar estos procesos, tomando como criterio inicial el término cara libre o confinada (sin cara libre) el cuál se entiende como un proceso de subsidencia o hundimiento del terreno pues no hay evidencia superficial de erosión. Sharpe utiliza el factor velocidad para diferenciar los flujos entre lentos o rápidos, así como los deslizamientos. (Terzaghi, 1950) por su parte, precisaba la dificultad de un sistema unificado de clasificación de deslizamientos debido a la cantidad de combinaciones entre materiales y los agentes que provocan estos fenómenos. Posteriormente (Varnes, 1958) agrupa su investigación relacionando los mm con los diferentes factores con fines de prevención y control. Así mismo, indica que dichos procesos ocurren en 3 materiales principalmente, suelo, roca y rellenos artificiales (además de la combinación de éstos) provocando 3 tipos de procesos: deslizamiento, caída y flujo, y sus combinaciones. Por otra parte, (Varnes, 1958) explica que a la fecha de su investigación ya existían varios trabajos de clasificación los cuales se basaban esencialmente en el material, tipo de movimiento, causas y otros factores que dependen del lugar o zona de ocurrencia.

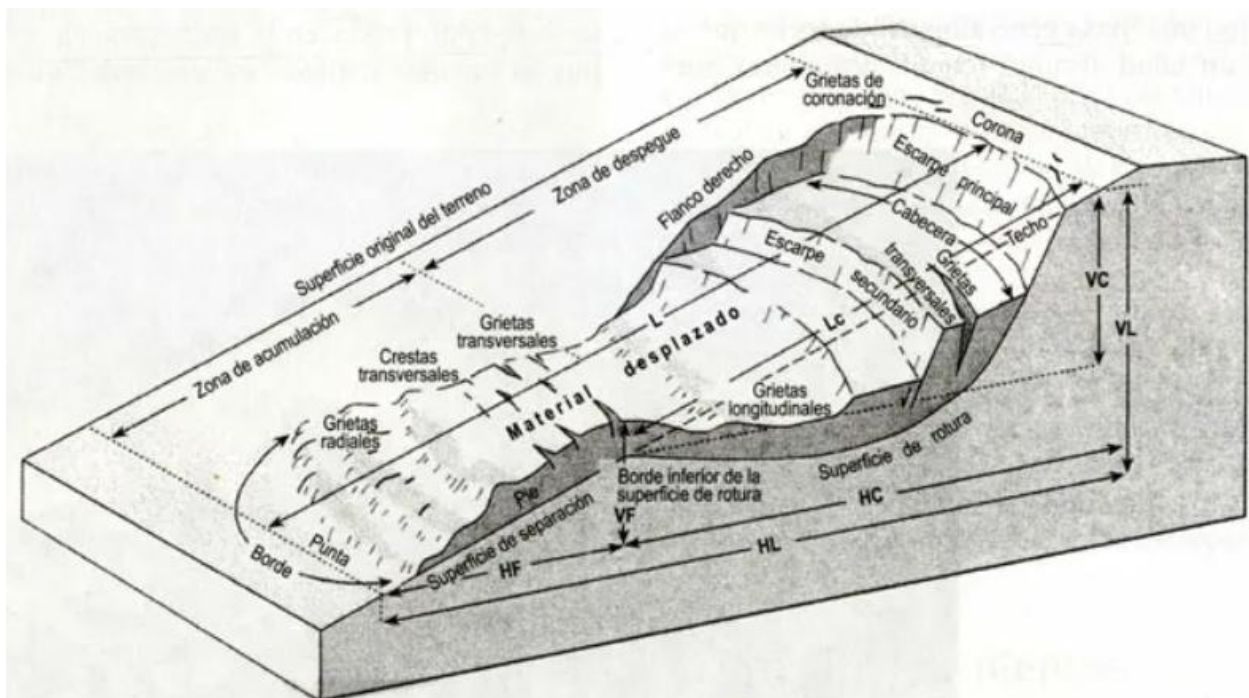
20 años después, (Varnes, 1978) actualiza el uso de la terminología, diferenciando los movimientos en masa de los deslizamientos. Adicionalmente, otro cambio representativo es la distinción de los tipos de material separando el suelo entre “detritos” y “tierra” haciendo hincapié en la granulometría, aunque no detalla el tamaño de partícula, los presenta como “predominantemente grueso y fino respectivamente. El aporte más relevante en (Varnes, 1978) puede ser la diferenciación de los deslizamientos rotacionales y traslacionales lo cual en la actualidad sigue siendo el método de clasificación principal, además que las metodologías de zonificación difieren de si el tipo de deslizamientos en rotacional o traslacional, como propone (MINMINAS & SGC, 2017), siendo los métodos estadísticos bivariados para deslizamientos rotacionales y cálculos de equilibrio límite por métodos determinísticos calculando factor de seguridad para deslizamientos rotacionales o planares.

Secuencialmente, (Cruden & Varnes, 1996) continúan con la actualización de la terminología y acotando las definiciones con el fin de facilitar la clasificación de dichos fenómenos. Hoy en día,

el término Deslizamiento tiene una connotación más consolidada, tanto así que en la actualidad sigue siendo una de las clasificaciones más utilizadas. En esta publicación, adoptan la definición de deslizamiento " el movimiento de una masa de roca, detritos o tierra pendiente abajo", (Cruden, 1991).

(Crozier, 1986) en (Cruden & Varnes, 1996) explica la recopilación de las investigaciones de (Skempton & Hutchinson, 1969) y (Varnes, 1958, 1978) donde además intenta explicar el enfoque de cada autor, resaltando que ambos tienen una importante similitud en la clasificación y la diferenciación de estos fenómenos a partir del tipo de material, velocidad y movimiento. Sin embargo, Hutchinson parece enfocar su sistema en analizar las condiciones de falla o el tratamiento de estabilidad del proceso detallando el tipo de cizallamiento de la superficie de ruptura. No obstante, en el análisis realizado por (Crozier, 1986) el esquema de Varnes puede resultar más fácil de aplicar pues requiere menos experiencia, mientras que Hutchinson apela principalmente a las técnicas de estabilización.

Figura 7 Bloque diagrama deslizamiento rotacional. Fuente: Modificado de (Varnes, 1978).



La Figura 7 muestra el bloque diagrama propuesto por Varnes para la identificación y clasificación de deslizamientos rotacionales. Dicho esquema permite obtener de manera conceptualizada más

información al momento de caracterizar los mm no solamente en campo, sino, en las imágenes satelitales y fotografías aéreas donde gran parte de los procesos morfodinámicos no pueden observarse directamente, pero si muestran evidencias o relicto de su morfología como lo son las coronas de los escarpes o el cuerpo de taludes antiguos.

3.4 Metodologías de zonificación de susceptibilidad

Se registran metodologías de zonificación y susceptibilidad por movimientos en masa desde los años 70s según (Fell et al., 2008) referenciando a (Brabb et al., 1972) como uno de los estudios más antiguos registrados en el cual realizaron superposición de mapas de manera manual, usando la geología, pendientes y el inventario de procesos morfodinámicos asignando valores a cada recuadro de una red o grilla construida a mano y posteriormente a los polígonos con mayor importancia se les asignaba la categoría de susceptibilidad alta. Esta metodología se asemeja al algebra de mapas, que básicamente realiza la misma superposición en los SIG con el apoyo de las herramientas geomáticas disponibles en la actualidad, de las cuales se derivan otros factores que facilitan el modelo probabilístico como la información que brindan los archivos raster.

Diferentes métodos para determinar la susceptibilidad se han aplicado globalmente, aunque la carrera actual es por la resolución de dichas técnicas o definir cuáles funcionan mejor según las condiciones del terreno y la dinámica denudacional de la zona de estudio. El método mundialmente más usado es el de regresión logística (Aristizábal et al., 2022), seguido por el análisis multicriterio (AHP) y el método estadístico bivariado por pesos de evidencia (WoE) recomendado por (MINMINAS & SGC, 2017). Finalmente, la decisión de cual metodología utilizar depende de cada profesional, sin embargo, cabe resaltar que la metodología AHP es un método altamente subjetivo pues depende directamente de la experticia de la persona que ejecuta el estudio, por el contrario, los métodos estadísticos se basan en la probabilidad por medio de funciones de densidad a partir de eventos históricos.

Las metodologías mencionadas consisten en la sobreposición de información usando los SIG, particularmente RASTER que resultan del tratamiento de información en formato SHAPE de los diferentes factores que condicionan el terreno. Dichos factores, en especial las unidades geológicas superficiales definen el tipo de deslizamientos o procesos de remoción que se tienen, partiendo del hecho que la clasificación de los movimientos en masa va de la mano con el tipo

de material deslizado. Con esta aclaración se pretende aterrizar esencialmente las condiciones climáticas de la zona intertropical donde se encuentra Colombia, las cuales establecieron el relieve y el terreno a una conjugación de factores que influyen directamente sobre las laderas.

En el año 2017, se publica el documento sobre el cual se deben guiar los estudios a escala 1:25000, donde se detallan los procedimientos tanto del levantamiento de la información, como el procesamiento y las metodologías para cada proceso de adquisición de información (MINMINAS & SGC, 2017). Sin embargo, la guía adopta métodos de reconocimiento mundial para la zonificación como lo son los pesos de evidencia (Wofe), análisis heurístico multicriterio y otros enfocados únicamente en la geomorfología y morfometría del terreno.

En el presente trabajo se adoptarán 2 metodologías principalmente, además de realizar una comparación y determinar cuál presenta mejor resolución. Estas son los pesos de evidencia (Wofe) y análisis jerárquico multicriterio (AHP). Cabe resaltar que ambas metodologías han sido utilizadas en otros ámbitos y en otros campos de la ciencia, aunque con un objetivo establecido el cual es un modelo predictivo de zonificación. El método AHP ha sido utilizado en otros campos como herramienta que facilita la toma de decisiones cuando esta requiere diferentes criterios o consta de diferentes variables.

3.4.1 Pesos de evidencia – Wofe

La metodología de pesos de evidencia inicialmente fue utilizada para estimar la probabilidad de ocurrencia de fumarolas hidrotermales en el fondo marino (Davis & Herzfeld, 1994) enfocando la investigación en la probabilidad de ocurrencia de depósitos de sulfuros masivos polimetálicos. El Servicio geológico colombiano recomienda este método como análisis de la susceptibilidad para la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

Por sus siglas en inglés “weight of evidence” o en español, pesos de evidencia, es un método estadístico bivariado que usa el principio de la probabilidad bayesiana, también conocida como inferencia bayesiana. Este es un enfoque estadístico que utiliza la teoría de la probabilidad para actualizar los conocimientos previos sobre un evento o una hipótesis en función de nueva evidencia o datos observados. Se basa en el teorema de Bayes, que establece cómo combinar la probabilidad previa con la nueva evidencia para obtener una probabilidad posterior o predictiva.

La fórmula general del teorema de Bayes es la siguiente:

$$P(H|D) = [P(D|H) * P(H)] / P(D) \quad (1)$$

Donde:

- $P(H|D)$ es la probabilidad posterior de la hipótesis H dado el evento D.
- $P(D|H)$ es la probabilidad de observar el evento D dado que la hipótesis H es verdadera (verosimilitud).
- $P(H)$ es la probabilidad previa de la hipótesis H.
- $P(D)$ es la probabilidad marginal del evento D (evidencia).

La probabilidad bayesiana es especialmente útil cuando se dispone de información previa o conocimientos expertos que se pueden combinar con datos observados para obtener una visión más precisa y actualizada de la probabilidad de una hipótesis. Además, la inferencia bayesiana permite realizar actualizaciones continuas a medida que se obtienen más datos, lo que la hace flexible y adaptable a nuevas evidencias.

El procedimiento matemático para la generación y utilización del método Wofe se explica en (G. Bonham-Carter, 1994) donde define la probabilidad como la probabilidad que un deslizamiento “L” suceda en determinada área “q”, “p” veces. La expresión general sería:

$$p(L) = \frac{n(L)}{q} = \frac{p}{q} \quad (2)$$

(C. van Westen, 1996) genera un paso a paso para ejecutar el modelo Wofe en el software ILWIS, el cual es uno de los programas con herramientas para los GIS que permite realizar cálculos con capas temáticas Figura 9. El paso a paso explicado prácticamente consiste en determinar la cantidad de píxeles con presencia de deslizamiento y compararlo contra los píxeles del área total de estudio, de esta manera, aplicar las fórmulas propuestas por (G. Bonham-Carter, 1994).

En la ecuación (2), se representa n como el número de veces que un deslizamiento L se repite, teniendo en cuenta que cada capa o factor condicionante por ejemplo el mapa de pendientes representado por la letra “w” y las clases “i”, se reemplaza por la siguiente expresión:

$$p(L/w_i) = \frac{p(w_i \cap L)}{p(w_i)} \quad (3)$$

Expresando la probabilidad de la ecuación (3) como proporción, se obtiene lo siguiente:

$$O(L) = \frac{p(L)}{p(L)} = \frac{p(L)}{1 - p(L)} = \frac{p}{p - q} \quad (4)$$

$$O(L/w_i) = \frac{p(L/w_i)}{p(L/w_i)} \quad (5)$$

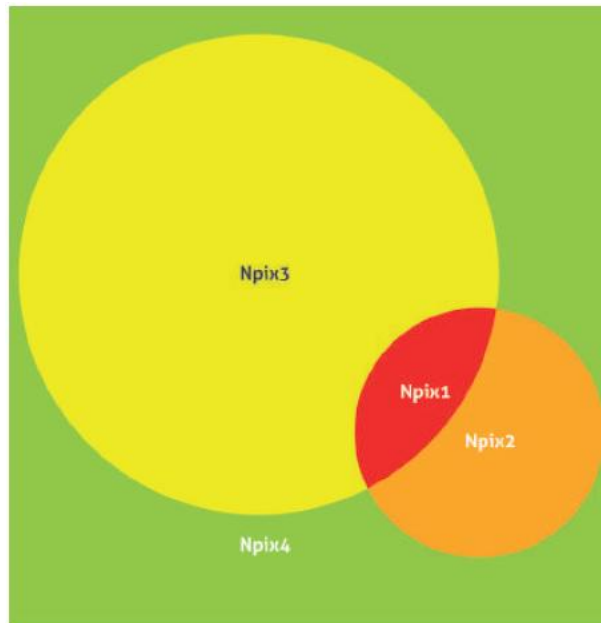
Obteniendo los pesos de evidencia así:

$$W_i^+ = \ln \frac{p(w_i/L)}{p(w_i/L)} \quad (6)$$

$$W_i^- = \ln \frac{p(\bar{w}_i/L)}{p(\bar{w}_i/L)} \quad (7)$$

Las ecuaciones (4)(5)(6)(7), son tomadas de(MINMINAS & SGC, 2017) a partir de (Bonham-Carter, 1994), sin embargo, (C. J. van Westen et al., 1993) previamente indicó el uso de los pixeles para ser incluidos en la metodología que luego el SGC describió como se muestra en la Figura 8 esquematizando los conjuntos de datos y la intersección de los pixeles para representar gráficamente la susceptibilidad por movimientos en masa a partir de los cálculos de pesos de evidencia W_f .

Figura 8 Relación del factor condicionante con la presencia de deslizamiento. Fuente: (MINMINAS & SGC, 2017)



Npix1: Factor condicionante presente en el deslizamiento Npix2.

Npix2: No hay presencia del factor condicionante Npix3 en el deslizamiento Npix2.

Npix3: Factor condicionante.

Npix4: No hay presencia de deslizamiento en factor condicionante.

Estos términos en cuestión de estadística bivariada, se estiman los pesos a partir de la significancia, lo que posteriormente se traduce las fórmulas a continuación para la significancia positiva:

$$W_i^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}} \quad (8)$$

$$W_i^- = \ln \frac{\frac{Npix2}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}} \quad (9)$$

Las expresiones en términos de W_i^+ indica la importancia de la presencia en el factor, siendo los valores positivos los de mayor relevancia, contrario a ello, cuanto mas negativo, el factor contribuye a la ausencia del deslizamiento. Cuando el valor es igual a 0, quiere decir que el factor no es relevante.

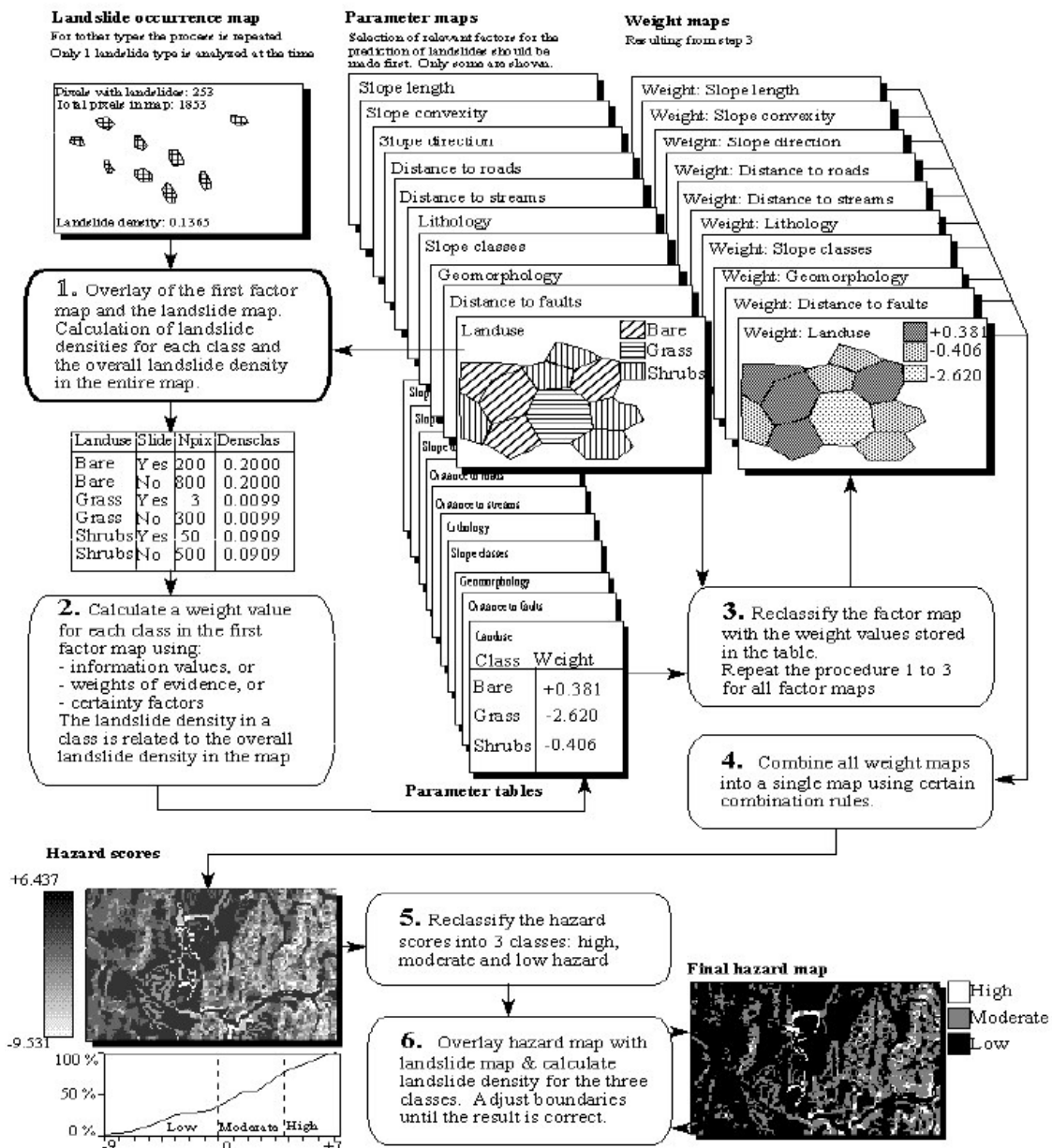
Por otra parte, el W_i^- indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento, siendo los valores positivos, los que indican que la ausencia del factor favorece la presencia de deslizamiento y los valores negativos que la ausencia del factor favorece la ausencia de deslizamiento. De igual manera, valor igual a 0, no tiene relevancia.

El procedimiento se realiza para cada una de las clases de los factores condicionantes donde finalmente para cada clase, se determina el w_f o peso final, el cual es la suma de ambos factores (10).

$$w_f = w_i^+ + w_i^- \quad (10)$$

El valor de w_f indicará finalmente como influye cada clase de los factores condicionantes en la generación de los movimientos en masa, con valores positivos para clases que influyen en la generación y los valores negativos cuando la ausencia del factor o clase contribuyen a la no presencia de dichos eventos.

Figura 9 Flujograma, método estadístico bivariado. Fuente:(C. van Westen, 1996)



Finalmente, el método Wofe resulta como un cálculo por medio de herramientas SIG donde las áreas zonificadas de los diferentes factores condicionantes son convertidas en raster con el fin de determinar la cantidad de pixeles y relacionar las clases con la presencia o ausencia de deslizamiento. La metodología Wofe sigue siendo ampliamente utilizada a nivel mundial debido a su practicidad y a los resultados óptimos obtenidos en términos de validación. Además, se

observa una tendencia a combinarla con otras metodologías con el objetivo de mejorar la calidad de los insumos, lo que representa una optimización significativa en la capacidad predictiva de los modelos de susceptibilidad. Esta sinergia entre metodologías sugiere un enfoque integral y avanzado en la generación de información precisa sobre riesgos geodinámicos.

Es relevante destacar que los avances continuos en las metodologías de zonificación de susceptibilidad responden a la creciente necesidad de reducir la condición de riesgo en áreas particulares a través del conocimiento, una etapa fundamental en la gestión del riesgo de desastres. Estas metodologías se han desarrollado en paralelo con los avances tecnológicos y el progreso en el campo de la informática, especialmente con el surgimiento de computadoras con mayores capacidades de análisis. (Zhang et al., 2023) refuerza esta perspectiva, destacando cómo el desarrollo tecnológico ha influido en la evolución de las metodologías de zonificación. La capacidad mejorada de análisis de las computadoras modernas ha permitido una mayor sofisticación en la modelización y ha ampliado las posibilidades de integrar múltiples enfoques metodológicos para obtener resultados más precisos y confiables.

En resumen, la combinación de la metodología Wofe con otros enfoques y la evolución continua de las metodologías de zonificación de susceptibilidad se alinean con la necesidad constante de mejorar la gestión del riesgo de desastres y proporcionar información robusta para la toma de decisiones. Estos avances representan un paso significativo hacia la optimización de la capacidad predictiva de los modelos y, por ende, contribuyen a una gestión más efectiva del riesgo.

3.4.2 Análisis jerárquico – AHP

El análisis multicriterio o AHP es un método que nace a partir de la necesidad de resolver problemas que involucran múltiples criterios, en ese orden de ideas, resulta imperativo implementar herramientas para resolver o tomar decisiones (Saaty, 1977). Existen 2 opciones para determinar los pesos de importancia, ya sea una persona o múltiples personas opinando sobre la importancia de los factores.

En el ámbito de los deslizamientos, el método AHP ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por mm. Su aplicabilidad eficiente destaca

por permitir la asignación de pesos de importancia mediante un enfoque heurístico, y el cálculo mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) conduce a la generación de mapas finales de susceptibilidad. A pesar de su enfoque más subjetivo debido a la implicación de juicios profesionales, el método AHP ha demostrado ser una herramienta confiable y preferida por su simplicidad en la evaluación de riesgos asociados a deslizamientos.

El enfoque AHP destaca por su eficiencia y viabilidad económica, lo que lo convierte en una herramienta especialmente conveniente para llevar a cabo la zonificación de susceptibilidad por mm. Esta metodología se ha ganado reconocimiento por su capacidad para evaluar rápidamente los riesgos asociados a deslizamientos, proporcionando resultados fiables con un costo de ejecución razonable y sin altos requerimientos computacionales (Ahmad et al., 2023).

Cabe resaltar que, en ocasiones, el método AHP se combina estratégicamente con enfoques de base estadística para establecer una sólida base comparativa. Esta integración fortalece la capacidad del AHP para analizar y ponderar de manera efectiva los diferentes factores que contribuyen a la susceptibilidad. Asimismo, el AHP puede desempeñar un papel crucial en el proceso de depuración de información, permitiendo la exclusión o reforzamiento de factores que inciden positivamente en el modelo. Esta capacidad de optimización se traduce en resultados más precisos y relevantes para la evaluación de riesgos asociados a movimientos en masa (Ahmad et al., 2023). Por otra parte, el análisis multicriterio consiste en un procedimiento matemático usado para cuantificar la importancia de los factores condicionantes con los movimientos en masa (Zangmene et al., 2023). Este procedimiento se realizará por medio de las llamadas matrices de Saaty, método propuesto en (Saaty, 1977) donde los grados de importancia derivan en pesos que luego serán aquellos los que determinen el grado de susceptibilidad en el procedimiento con los Sistemas de información geográfica.

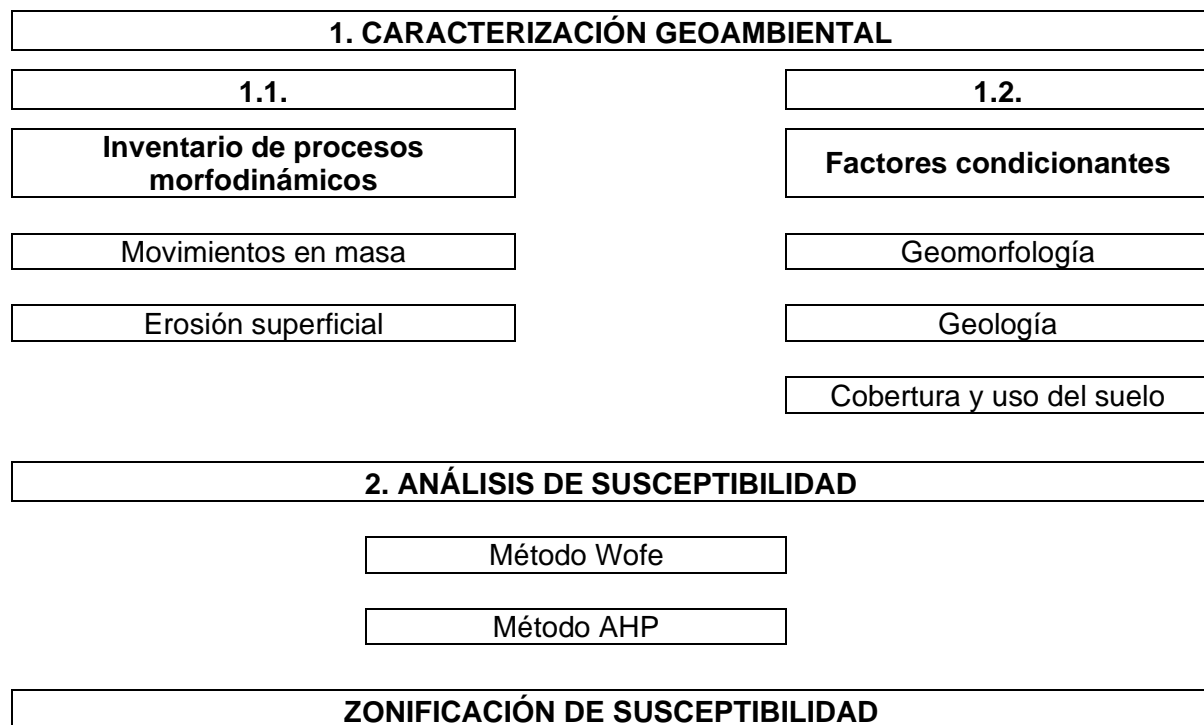
El objetivo tal como lo plantea (Saaty, 1977) es el de implementar los pesos organizando prioridades, asignando rangos de importancia a cada factor condicionante con los movimientos en masa. Por ejemplo, al asignarle peso de importancia a las pendientes del terreno, de manera subjetiva, puede asumirse que la mayoría de los movimientos en masa ocurren en rangos mayores a 25°, contrariamente, las pendientes entre 0 y 10° probablemente pueda asignarse el grado de afectación menor en términos de las pendientes.

4. Materiales y métodos

El proceso de zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa se llevó a cabo en 2 etapas, primero la caracterización geoambiental, posteriormente la implementación de las metodologías de zonificación Wofe y AHP.

Durante el proceso de caracterización se describió y zonificó toda la información recopilada de cada componente tal como se propuso anteriormente, la cual indica la revisión de información secundaria, hasta el levantamiento de campo. La Tabla 1 conceptualiza y resume el procedimiento desde el levantamiento de la información hasta el análisis de la susceptibilidad.

Tabla 1 Marco de referencia para la zonificación de susceptibilidad. Fuente: Modificado de (MINMINAS & SGC, 2017)



4.1 Caracterización geoambiental

La etapa inicial en el proceso de zonificación consiste en la caracterización de los factores geoambientales que están directamente involucrados con la ocurrencia de mm también denominados factores condicionantes y su relación con los procesos morfodinámicos o

deslizamientos (Regmi et al., 2010). (MINMINAS & SGC, 2017) propone que durante la caracterización geoambiental se levante información respecto a los procesos morfodinámicos, unidades geológicas superficiales, subunidades geomorfológicas, pérdida máxima del suelo, grado de erosión, pendientes, curvatura y cobertura del suelo.

A continuación, se presenta la información cartográfica que se refiere a los factores condicionantes y el inventario de procesos morfodinámicos de la zona de media y alta montaña del municipio de Palmira correspondiente a los insumos para el cálculo de la susceptibilidad por mm:

- Inventario de procesos morfodinámicos

El inventario de procesos morfodinámicos se concentra en la recopilación y levantamiento de procesos erosivos o mm de todas las fuentes posibles, sin embargo, algunos procesos no cuentan con información suficiente o evidencia aparente de su existencia por lo que se decidió eliminar tales datos del inventario, teniendo como premisa que se tendrán en cuenta los procesos que puedan ser verificados ya sea por medio de recorridos de campo o imágenes satelitales multiespectrales.

Por otra parte, los datos representados en los SIG serán de tipo punto y polígono, para los casos donde los mm son de dimensiones no muy grandes (menores a 10 m de ancho) serán representados como puntos y aquellos donde se puede diferenciar el cuerpo, pata y corona del talud, será de tipo polígono. Esta limitación debido al tamaño del píxel de trabajo el cual será de 12,5 m, por esta razón, un polígono de 10 m no puede ser representado como polígono.

En resumen, las fuentes de información respecto al inventario y catálogos de movimientos en masa se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Fuentes de información secundaria Fuente: Tomado y modificado de (MINMINAS & SGC, 2017)

| Tipo de información secundaria | Entidades |
|--|---|
| Geología y geomorfología | SGC, CAR's, IDEAM, IGAC, universidades y empresas de consultoría |
| Base de datos e inventarios de movimientos en masa | SIMMA (base de datos SGC), DESINVENTAR, INVIAS, CAR's, entidades públicas, UNGRD y empresas de consultoría |
| Informes y mapas de movimientos en masa | SGC, CAR's, Universidades Públicas y Privadas, Planeación |
| Reportes de emergencias por movimientos en masa | SGC, CAR's, Universidades Públicas y Privadas, Planeación Municipal y Departamental, Empresas Consultoras UNGRD, SGC, INVIAS, Defensa Civil, Cuerpo de Bomberos, Ejército Nacional, Policía Nacional, CMGRD |

1) UGS – Unidades Geológicas Superficiales

Las UGS consisten principalmente en definir los materiales inmediatamente relacionados con los deslizamientos, diferenciándose de la geología en que esta última puede contener cuerpos que abarcan varios kilómetros de extensión, razón por la que no se le asigna relevancia en los procesos superficiales. Por otra parte, las UGS hace alusión a los materiales que están sufriendo los procesos meteóricos en la actualidad y que en su dinámica denudacional condicionan el terreno a la generación de movimientos en masa. En este apartado se busca la descripción de los materiales con enfoque geotécnico, como la granulometría, humedad natural, plasticidad, resistencia a la compresión, cohesión y ángulo de fricción, además como los espesores y perfiles de meteorización como lo propone (Dearman, 1991; Deere & Patton, 1971). Los materiales en superficie se clasifican según su estructura cristalina, fábrica y disposición, diferenciando el comportamiento de éstos entre suelo y roca, aunque persiste el problema con los materiales intermedios que se componen de una matriz producto de la alteración de los mismo coexistiendo con fragmentos de roca dura.

Una solución es la propuesta se muestra en la Tabla 3 continuación modificado de (Deere & Patton, 1971) para clasificar los materiales presentes en el terreno, con el fin además de caracterizar los movimientos en masa y las litologías asociadas.

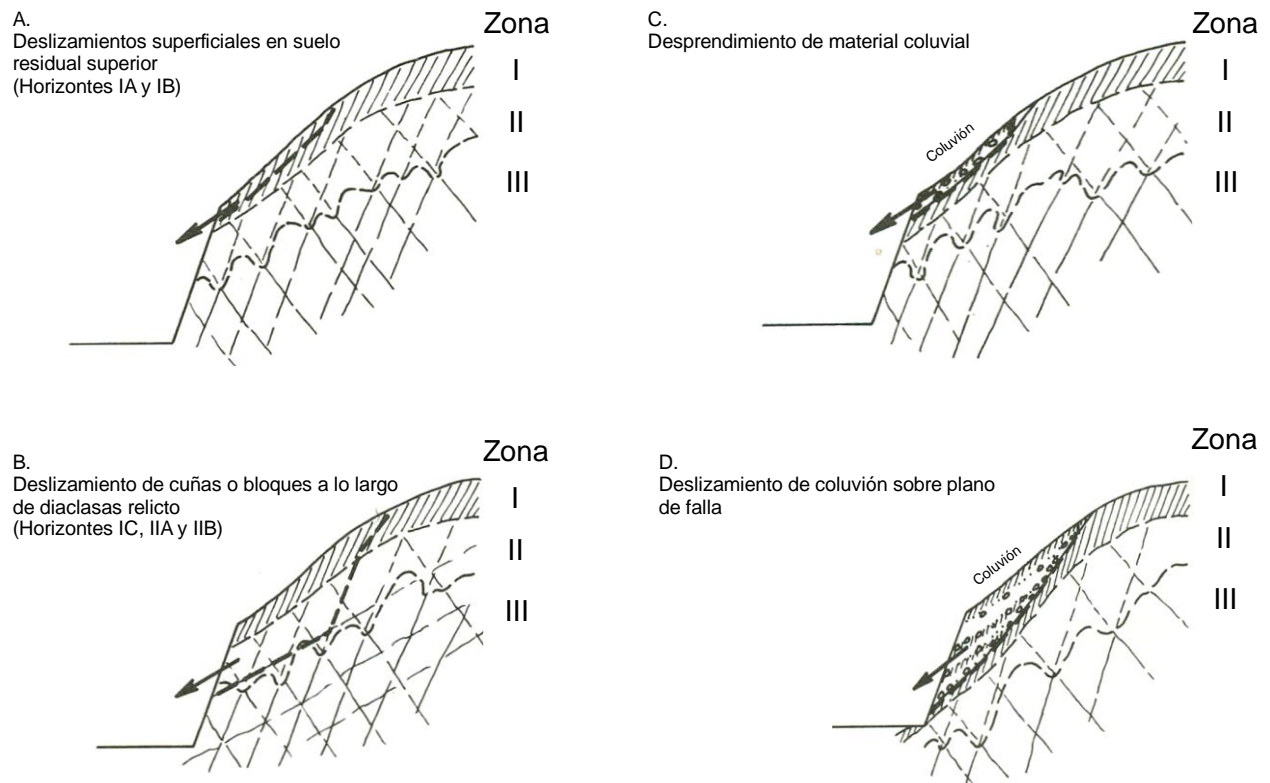
Tabla 3 Perfil de meteorización para rocas ígneas y metamórficas. Fuente: Modificado de (Deere & Patton, 1971)

| Perfil | Zona | Resistencia relativa |
|-----------------------|--|--|
| I - Suelo residual | IA-A Horizonte | Baja a media |
| | IB - B Horizonte | comúnmente baja (alta si está cimentado) |
| | IC - C Horizonte (saprolito) Transición de suelo residual o | baja a media (estructuras relicto-significativas) |
| II - Roca meteorizada | IIA saprolito a roca parcialmente meteorizada | Medio a bajo donde estructuras relicto son débiles |
| | IIB Roca parcialmente meteorizada | Medio a alto |
| III - Roca fresca | | Muy alto |

Por otra parte, la importancia de la descripción de los materiales y la categorización de los diferentes horizontes marca la dinámica del deslizamiento o el patrón del movimiento en masa, así como su configuración relacionando el comportamiento reológico con el plano de falla, entendiendo que el cambio de la composición de suelo a roca eventualmente puede delimitar una línea de contacto de 2 materiales con diferente comportamiento, mientras un horizonte de suelo puede sobre saturarse y duplicar su peso unitario, la unidad de roca permanece con sus propiedades volumétricas igual, por ende, la preferencia del cuerpo o masa de terreno será sobre el plano de cambio de unidad.

Los deslizamientos superficiales ocurren principalmente en los horizontes IA y IB, que durante largo e intensos periodos de lluvia por el incremento de la presión de poros (Deere & Patton, 1971), adicionalmente, al superar el ángulo de equilibrio por la saturación, se favorece el deslizamiento de la capa o horizonte inferior que no ha sufrido grandes cambios.

Figura 10 Deslizamientos comunes en suelo, roca y material coluvial. Fuente: Tomado de (Deere & Patton, 1971)



2) Geomorfología

De igual manera como en la geología, la información geomorfológica se genera de las descripciones pertinentes de las subunidades geomorfológicas detalladas en la propuesta de estandarización (Carvajal, 2012) el cual propone la caracterización recopilando otras metodologías y aterrizando los procedimientos al territorio colombiano teniendo como enfoque principal la subdivisión de las formas del terreno en relación con los movimientos en masa.

3) Cobertura y Uso Del Suelo

La principal fuente de información con respecto al suelo proviene del IGAC – Instituto geográfico Agustín Codazzi el cual pone a disposición los diferentes estudios realizados a escalas semidetalladas. La información que será utilizada serán las coberturas del suelo, usos del suelo y conflicto por uso del suelo a escala 1:25000.

4) Pérdida máxima del suelo

Información recopilada de (CVC, 2021b) para la zonificación del suelo y cobertura del estudio de zonificación forestal donde se clasificaron las condiciones físicas de los suelos con propósitos productivos, teniendo en cuenta la potencialidad del suelo y proponer alternativas agrícolas en el departamento del valle del Cauca. La información se encuentra disponible a escala 1:25000.

La zonificación de pérdida máxima del suelo se realizó con el fin de identificar las zonas que, a partir de las características del suelo, pendiente y el tipo de cobertura, son más susceptibles de ser erosionadas calculado en toneladas por hectárea por año, usando la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE) propuesta por (WISCHMEIER & SMITH, 1962).

Las categorías usadas por (CVC, 2021a) se muestran a continuación en la Tabla 4

Tabla 4 Categorías de pérdida máxima de suelo. Fuente: (CVC, 2021a)

| Pérdida (Ton/Ha/año) | Nombre |
|-----------------------------|---------------|
| 0 -10 | Muy bajo |
| 10 - 20 | Bajo |
| 20 - 50 | Moderado |
| 50 - 100 | Alto |
| 100 - 300 | Muy alto |
| > 300 | Irreversible |

5) Grado de erosión

El grado de erosión en el trabajo realizado por (CVC, 2021b), definen a erosión cómo el proceso físico que desgasta la superficie moldeando permanentemente el terreno. Entre los agentes erosivos como el hielo, viento, factores biológicos, antrópicos y agua, es este último el de mayor incidencia por su variabilidad temporal y acción constante sobre el relieve.

La clasificación del grado de erosión se llevó a cabo en 5 categorías (CVC, 2021c): Muy severa, severa, moderada, ligera y erosión natural, la información se presenta a escala 1:25000.

Tabla 5 Grado de erosión. Fuente: (CVC, 2021c)

| Código | Grado de erosión |
|---------------|-------------------------|
| N/A | Natural |
| 1 | Ligero |
| 2 | Moderado |
| 3 | Severo |
| 4 | Muy severo |
| NA | Natural |
| CA | Cuerpo de agua |
| INF | Infraestructura |
| 0 | Sin estudio |
| SE | Sin evidencia |
| ZU | Zona urbana |

6) A Partir Del DEM (Modelo de Elevación Digital)

Como insumo inicial se cuenta con un modelo de elevación digital con resolución de 12,5 m de resolución de píxel, lo cual resulta cómodo al momento de trabajar cartografía a escala 1:25000. La información contenida en el DEM sirve para extraer otras capas raster que serán insumo principal en la caracterización de otros factores condicionantes como:

a) Pendiente del terreno

La pendiente del terreno hace referencia a la inclinación de una superficie con respecto a la horizontal, los valores se expresan en grados entre 0° para zonas planas y 90° para laderas completamente verticales. El análisis de las pendientes en la zonificación de la susceptibilidad por mm se considera uno de los factores más comunes en la generación de dichos procesos, teniendo una relación directa con las altas pendientes, cuanto más inclinada una ladera, más susceptible a generar movimientos en masa, sumado a esto, el equilibrio de los materiales sea suelo o roca, también se ve afectado directamente por este factor, pues las superficies muy empinadas o verticales cuentan con menor soporte lateral, este efecto puede evidenciarse en taludes donde los suelos muestran rasgos de hinchamiento sufriendo una expansión lateral por los esfuerzos horizontales. Varios factores geotécnicos están involucrados en los análisis de estabilidad, por lo que eventualmente se relaciona el grado de inclinación con el ángulo de fricción interna del suelo, o el mismo ángulo de rozamiento de las superficies de roca donde básicamente

el deslizamiento ocurre cuando estos parámetros internos del material son superados por el grado de inclinación del talud.

Para la zonificación de susceptibilidad por mm, (MINMINAS & SGC, 2017; van Zuidam, 1986) proponen la categorización de las pendientes del terreno en grados clasificando la superficie desde los terrenos planos hasta laderas con pendientes extremadamente abruptas para las superficies mayores a 55°.

Tabla 6 Clasificación de pendientes en grados. Fuente: Tomado de (van Zuidam, 1986)

| Inclinación (°) | Clasificación del terreno |
|------------------------|----------------------------------|
| 0 - 2 | Plano a casi plano |
| 2 - 4 | Suavemente inclinado |
| 4 - 8 | Inclinado |
| 8 - 16 | Moderadamente abrupto |
| 16 - 35 | Abrupto |
| 35 - 55 | Muy Abrupto |
| 55 - 90 | Extremadamente abrupto |

La obtención del mapa de pendientes se llevó a cabo mediante el análisis del DEM con el objetivo de evaluar la inclinación de la topografía circundante por medio del software QGIS, el cual realiza el cálculo de la diferencia de elevación entre cada celda teniendo en cuenta su posición geográfica y altitudinal. Posteriormente, se procede con el cálculo trigonométrico de la pendiente expresada en grados el cual el software arroja el mapa en formato raster de las pendientes en grados el cual debe ser reclasificado en los rangos descritos previamente. Una vez ajustado el raster.

Este proceso se llevó a cabo con el fin de integrar información crucial sobre la topografía en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, proporcionando una comprensión detallada de las características geomorfológicas del área de estudio simplificando la relación directa de los deslizamientos con el ángulo de pendiente de las laderas y de ahí, el alcance del proyecto el cual se realizó exclusivamente sobre la zona montañosa del municipio de Palmira dejando de lado la zona plana correspondiente a pendientes entre 0 y 5° donde los estudios de susceptibilidad se enfocan principalmente en las crecientes por inundaciones y en cuanto a movimientos en masa, ocasionalmente la socavación lateral de causes, pero en escalas de trabajo detalladas.

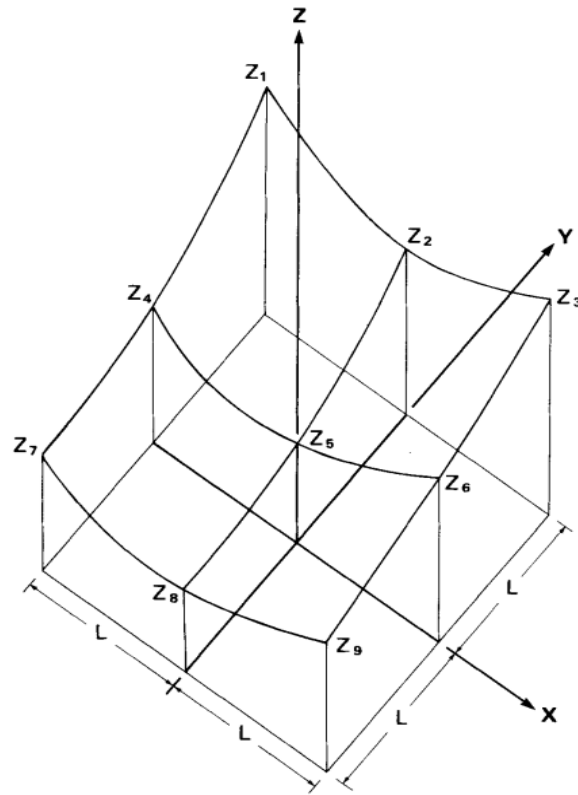
b) Curvatura (en plano)

La curvatura del terreno se refiere a la concavidad o convexidad de una ladera en comparación con un plano vertical. Los valores más negativos indican una superficie cóncava, mientras que los valores positivos más altos están asociados con laderas convexas. Por otro lado, los valores cercanos a cero representan un terreno relativamente plano.

La inclusión de la curvatura del terreno en la evaluación de la susceptibilidad por mm se fundamenta en la idea de que el agua, como principal agente erosivo, tiende a escurrir con mayor intensidad sobre superficies cóncavas. En estas áreas, la velocidad del escurrimiento es mayor en comparación con superficies planas o convexas, aunque se omite considerar otros factores influyentes, como la cobertura y la pendiente. Es importante señalar que la curvatura de una ladera puede calcularse tanto paralelamente al plano de máxima pendiente (curvatura de perfil) como en un plano perpendicular (curvatura de plano). En este contexto, para la generación de procesos erosivos, se presta especial atención a la curvatura de plano, teniendo en cuenta la capacidad de captación y convergencia de corrientes (MINMINAS & SGC, 2017).

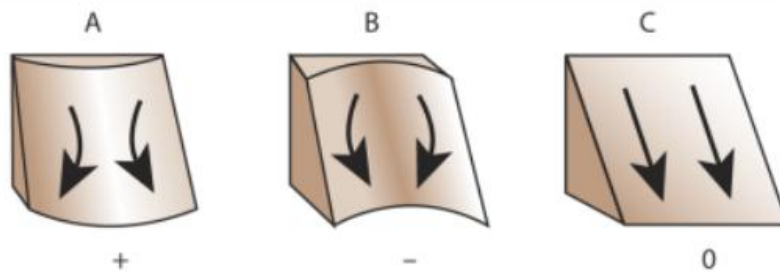
La clasificación de los valores de curvatura se realiza mediante el método propuesto por (Süzen & Doyuran, 2004) que se basa en agrupar los valores numéricos en percentiles. Este enfoque permite clasificar los valores de curvatura en tres categorías, distribuyendo equitativamente los datos en cada una de ellas. La elección de métodos matemáticos y estadísticos busca reducir la subjetividad en los cálculos, priorizando la objetividad en los resultados. (Zevenbergen & Thorne, 1987) propone un análisis de la superficie del terreno mediante el cálculo de la dirección e inclinación de la superficie a partir del análisis esquematizado de un rectángulo Figura 11.

Figura 11 Matriz rectángulas esquematizando el análisis morfométrico. Fuente: (Zevenbergen & Thorne, 1987)



El análisis se basa en la posición del centro de la matriz y los valores de posicionamiento de los vértices circundantes. Sin embargo, la curvatura de plano la cual es el objetivo del presente estudio se representa en Figura 12 mostrando las 3 posibilidades de una ladera sobre una línea horizontal.

Figura 12 Curvatura de plano. Fuente: (ESRI, 2021)



La obtención de la curvatura del terreno a partir del DEM implica la derivación de la superficie del modelo de elevación el cual dicho proceso requiere calcular las derivadas parciales de primer y segundo orden en las direcciones x e y para obtener las pendientes y curvaturas. La curvatura plana, que representa las variaciones horizontales, se obtiene combinando las derivadas parciales de segundo orden, mientras que la curvatura perfil, que refleja las variaciones verticales, se deriva de la curvatura plana y las pendientes. Posteriormente, los valores de curvatura se clasifican en las categorías indicadas previamente para facilitar su análisis y se representan en un mapa para visualizar las variaciones topográficas. Este proceso se realizó por medio de QGIS, software especializado en geoprocesamiento.

4.2 Metodología para la zonificación

Una vez recopilada y organizada la información relevante para la caracterización geoambiental, se procede con la implementación de las metodologías de zonificación de susceptibilidad por mm. En esta etapa, se lleva a cabo el procesamiento de la información mediante software GIS, donde se realizan los cálculos respectivos de susceptibilidad utilizando tanto el método Wofe como el análisis multicriterio AHP.

Ambas metodologías consideran capas temáticas con niveles de importancia o incidencia en la ocurrencia de los movimientos en masa, diferenciándose en el enfoque utilizado para asignar estos niveles. El método Wofe utiliza fórmulas matemáticas después de cruzar la información en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y determinar los rangos de susceptibilidad. En cambio, el análisis multicriterio AHP asigna los pesos de importancia de los campos de los factores condicionantes de manera subjetiva, basándose en las opinión profesional según la experiencia que se tenga sobre los deslizamientos y la relación con los parámetros.

El resultado final de esta etapa es el mapa de susceptibilidad, el cual será sometido a un análisis y validación mediante la curva ROC o área bajo la curva (AUC). Esta evaluación permitirá determinar el porcentaje de éxito de cada método y, posteriormente, aplicar criterios finales para la toma de decisiones sobre las soluciones estructurales. El mapa que mejor se ajuste según los métodos de validación y la comparación de los mapas de manera visual será aquel que se propondrá para ser considerado como la referencia principal con el fin de aplicar las estrategias y medidas de mitigación correspondientes.

Una vez preparada la información pertinente a la caracterización geoambiental, se procede con la implementación de las metodologías de zonificación de la susceptibilidad por mm. Dicha etapa hace referencia al procesamiento de la información mediante software GIS, donde se realizaron los respectivos cálculos de susceptibilidad por los métodos Wofe y análisis multicriterio AHP. Ambas metodologías consideran las capas temáticas con niveles de importancia o incidencia en la ocurrencia de los movimientos en masa, solo difieren en que el método Wofe asigna valores de susceptibilidad por medio de fórmulas matemáticas después de cruzar la información en los SIG y posteriormente determinar los rangos de clasificación. Por otra parte, el método del análisis multicriterio asigna los pesos de importancia a los factores condicionantes de manera subjetiva apoyándose en la opinión profesional.

El producto final de dicha etapa es el mapa de susceptibilidad, el cual será analizado y validado por medio de la curva ROC o área bajo la curva (AUC) para determinar el porcentaje de éxito de cada método y posteriormente aplicar los criterios finales de las soluciones estructurales sobre el mapa con mayor porcentaje de AUC.

I. Pesos de evidencia - WOFE

La metodología Wofe se desarrolló utilizando los sistemas de información geográfica pues es la herramienta apropiada para el manejo y manipulación de datos espaciales (Lee et al., 2002). El método Wofe para el cálculo de la susceptibilidad se llevó a cabo teniendo en cuenta las variables del terreno que se consideran de mayor relevancia, en general diferentes estudios proponen usar el mayor número de capas de información disponibles, además que mucha de la información se obtiene a partir del modelo de elevación digital.

Se propone tener en cuenta las siguientes capas según (Chuanhua & Xueping, 2009; Saha et al., 2021), además se modifica y se proponen otras a partir de (MINMINAS & SGC, 2017):

1. Subunidades geomorfológicas
2. Pendiente
3. Pérdida máxima del suelo

4. Curvatura (en plano)
5. Grado de erosión
6. Unidades geológicas superficiales
7. Cobertura del suelo

Para llevar a cabo el procedimiento SIG, se convierten todas las capas en formato raster reclasificando las clases existentes de manera que el producto final corresponda a píxeles con las subclases previamente asignadas y el conteo de éstos. Los factores condicionantes y su respectivo formato se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Factores condicionantes formato y proceso GIS

| Factor condicionante | Formato | Proceso GIS | Formato final |
|-----------------------------|----------------|--------------------|----------------------|
| Geomorfología | Shape | Polígono a raster | Tiff |
| UGS | Shape | Polígono a raster | Tiff |
| Cobertura | Shape | Polígono a raster | Tiff |
| Grado de erosión | Shape | Polígono a raster | Tiff |
| Pérdida máxima suelo | Shape | Polígono a raster | Tiff |
| Pendientes | Tiff | - | Tiff |
| Curvatura | Tiff | - | Tiff |

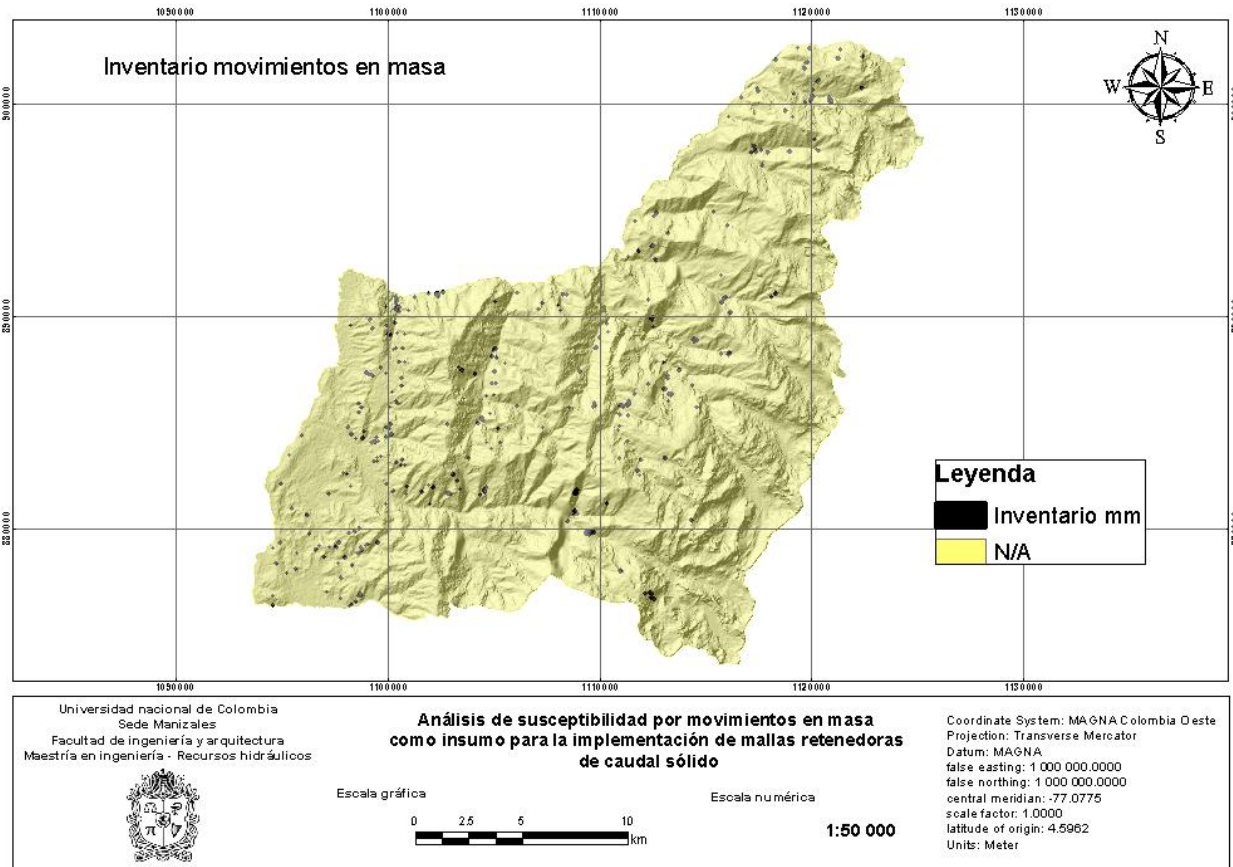
Las capas en formato raster o Tiff deben estar alineadas y tener el mismo tamaño de píxel para realizar el cálculo por cada área correspondiente de manera precisa. En este caso, dado que se dispone de un DEM con una resolución de 12,5 metros, se procede a reclasificar todas las capas al mismo tamaño, asegurando una homogeneidad en la información geoespacial. Este proceso garantiza la consistencia en la comparación de datos y contribuye a la precisión de los cálculos realizados en las siguientes etapas de la zonificación de susceptibilidad por mm.

4.2.1 Cálculo de pesos finales

Una vez obtenidos los factores condicionantes en formato raster, se procede al conteo de píxeles y la generación de los pesos de evidencia. En esta fase, se realiza el cálculo de los píxeles correspondientes a los deslizamientos que están asociados a la presencia de los factores

condicionantes. Este proceso implica la multiplicación de cada capa raster por el inventario de procesos morfodinámicos, permitiendo cuantificar la influencia de cada factor en la ocurrencia de deslizamientos.

Figura 13 Inventario de mm en binario



Durante la etapa del álgebra de mapas al multiplicar las capas raster, se asignan valores de 1 a todos los polígonos y píxeles que indican la presencia de deslizamientos, mientras que se asigna un valor de 0 al resto de las zonas donde no hay registros de movimientos en masa. De esta manera, cada clase con valores positivos diferentes a 0 conserva sus valores al ser multiplicada por 1 en las áreas con deslizamientos, mientras que el resto de los valores se convierten en 0 al ser multiplicados por este valor en las áreas sin presencia de deslizamientos. Este enfoque facilita la cuantificación de la influencia de cada factor condicionante en la ocurrencia de deslizamientos.

Una vez realizada la operación de multiplicar cada factor por el binario del inventario, se tienen el conteo de pixeles totales por clase y los pixeles de cada clase con la cantidad de pixeles con deslizamiento. La Tabla 8 es el ejemplo, donde se clasificaron las pendientes en grados como lo propone (MINMINAS & SGC, 2017) y posteriormente se le asignaron valores en orden ascendente para cada clase.

Tabla 8 Conteo de pixeles para el factor condicionante Pendientes en grados

| CODIGO | CLASE | NPC | NPiX1 | NPiX2 | NPiX3 | NPiX4 |
|---------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0 - 2% | 1 | 16418 | 2 | 2112 | 16416 | 3063712 |
| 2 - 4% | 2 | 34934 | 4 | 2110 | 34930 | 3045198 |
| 4 - 8% | 3 | 135441 | 25 | 2089 | 135416 | 2944712 |
| 8 - 16% | 4 | 397312 | 187 | 1927 | 397125 | 2683003 |
| 16 - 35% | 5 | 1736385 | 1388 | 726 | 1734997 | 1345131 |
| 35 - 55% | 6 | 717838 | 483 | 1631 | 717355 | 2362773 |
| > 55% | 7 | 43914 | 25 | 2089 | 43889 | 3036239 |

El campo NPC corresponde a la sumatoria de pixeles de cada clase, Npix1 son los pixeles de cada clase donde hay presencia de deslizamiento, Npix2 los que indican la ausencia del factor condicionante, pero existen deslizamientos y Npix3 los que tienen presencia del factor condicionante pero el deslizamiento es ausente y Npix4 son los pixeles donde son ausentes los deslizamientos y el factor condicionante.

A partir de la obtención del conteo de pixeles, se procede con la aplicación de las ecuaciones (8) y (9) para hallar la relevancia de los factores W_i^+ y W_i^- , Tabla 9:

Tabla 9 Determinación de los pesos positivos y negativos

| CODIGO | CLASE | WI+ | WI- |
|---------------|--------------|------------|------------|
| 0 - 2% | 1 | -1.7287 | 0.0044 |
| 2 - 4% | 2 | -1.7907 | 0.00951 |
| 4 - 8% | 3 | -1.3131 | 0.03306 |
| 8 - 16% | 4 | -0.3768 | 0.04542 |
| 16 - 35% | 5 | 0.15325 | -0.2403 |
| 35 - 55% | 6 | -0.0192 | 0.00575 |
| > 55% | 7 | -0.1864 | 0.00246 |

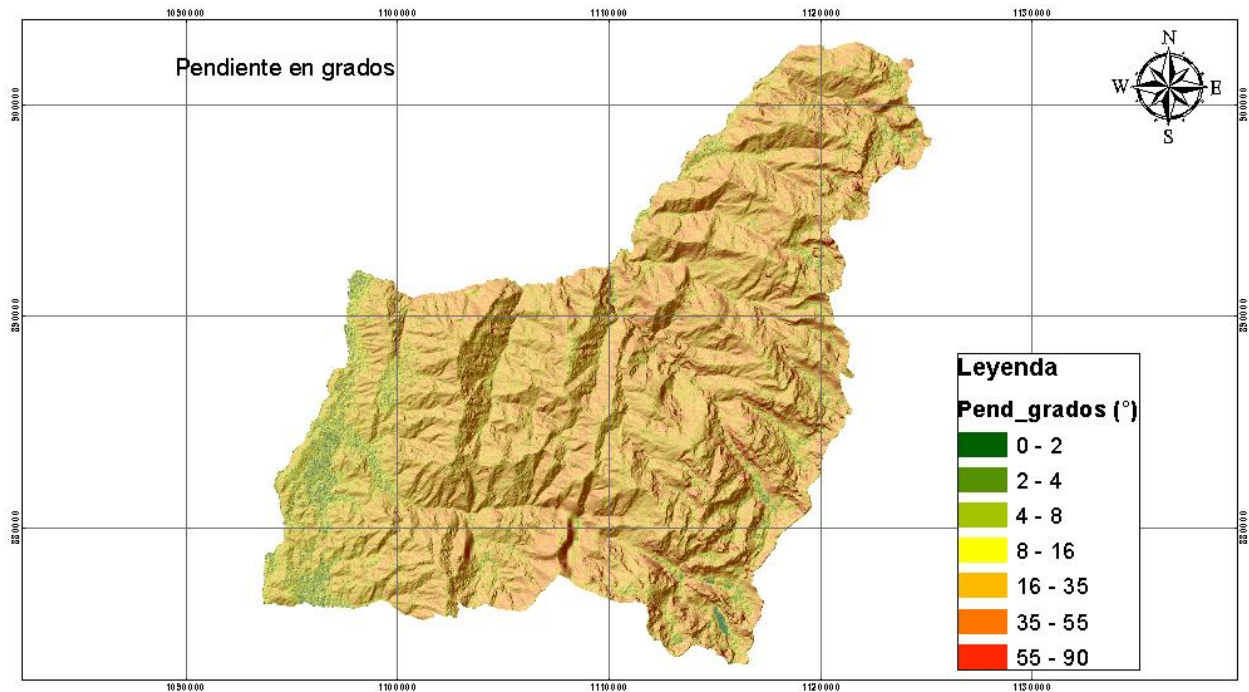
Finalmente se suman los valores con la ecuación (10) y se obtiene el peso final que indica la importancia de cada una de las clases, Tabla 10.

Tabla 10 Pesos finales del método Wofe para el factor Pendientes

| Categoría de pendiente (%) | Wf |
|-----------------------------------|-----------|
| 0 – 2 | -1.7331 |
| 2 – 4 | -1.8002 |
| 4 – 8 | -1.3462 |
| 8 – 16 | -0.4222 |
| 16 – 35 | 0.39355 |
| 35 – 55 | -0.0249 |
| > 55 | -0.1889 |

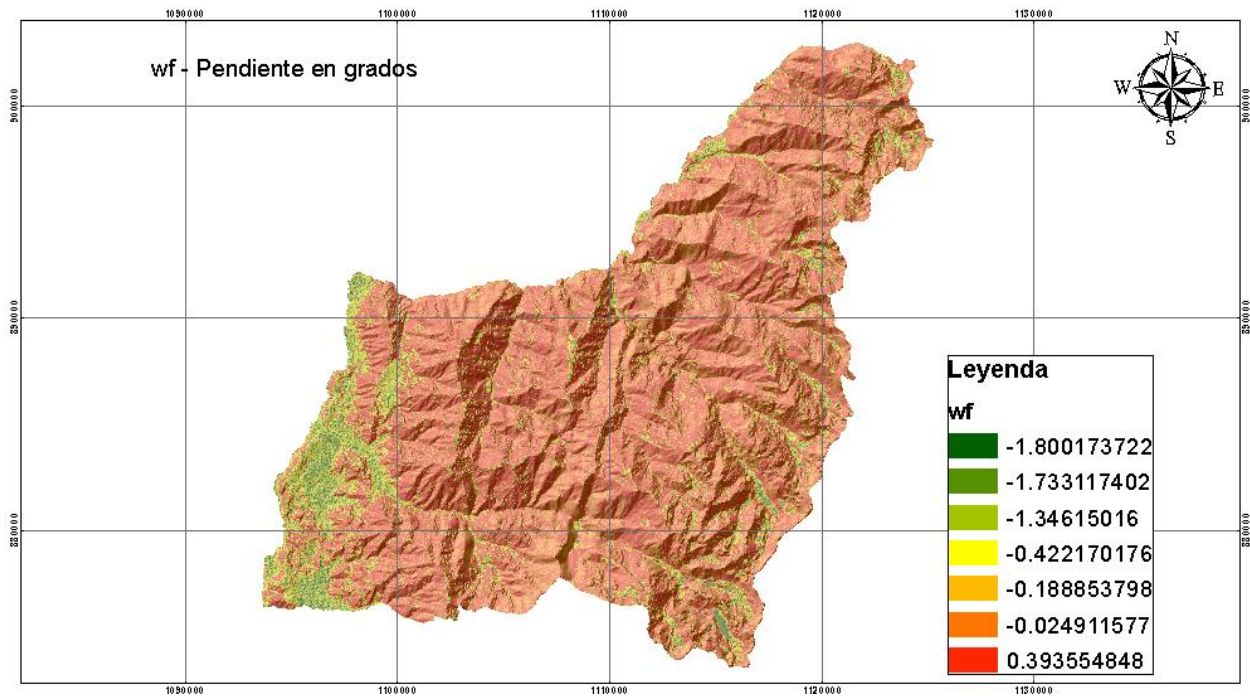
Realizando un análisis preliminar de los valores de Wf, se puede concluir que las pendientes entre 16 y 35° son las de mayor importancia en la generación de movimientos en masa, esto quiere decir que, a partir del inventario, los deslizamientos se presentan en su mayoría en zonas donde las pendientes son las indicadas. Por otra parte, los valores más negativos se encuentran entre 0 y 4°, lo cual indica que en este rango de pendientes la frecuencia de presencia de deslizamientos es muy poca. Cabe resaltar el rango mayor a 55° que a pesar de que es una inclinación considerable, el valor negativo de dicha clase se debe a que el inventario no registra gran cantidad de deslizamientos en estas pendientes, pues valores mayores a 55° se obtienen en zona de montaña alta o de páramo Figura 14, donde los movimientos en masa son poco frecuentes Tabla 10.

Figura 14 Mapa de pendientes en grados



Una vez calculado los pesos finales para cada clase del factor condicionante pendientes del terreno, se procede con la asignación de valores de Wf obtenidos de la etapa anterior a cada una de las clases en formato shape, para lo que se debe realizar la conversión de raster a shape, resultando en una capa de tipo vectorial con polígonos con valores de pendientes de las clases y al que se debe relacionar el valor de Wf. Finalmente, al terminar la asignación, el proceso a continuación será el de convertir nuevamente la capa vectorial a raster pero con los valores de Wf, obteniendo el mapa de pesos de evidencia Figura 15, en el cual ya puede observarse la tendencia a la susceptibilidad de las pendientes, asignando colores cálidos desde amarillo hasta rojizo a las clases más susceptibles como laderas y colinas de la zona montañosa, mientras que en colores verdes las de menor grado de susceptibilidad como serían las zonas de llanuras, conos aluviales y el resto de geformas asociadas a ambientes fluviales o planicies.

Figura 15 Mapa final de wf

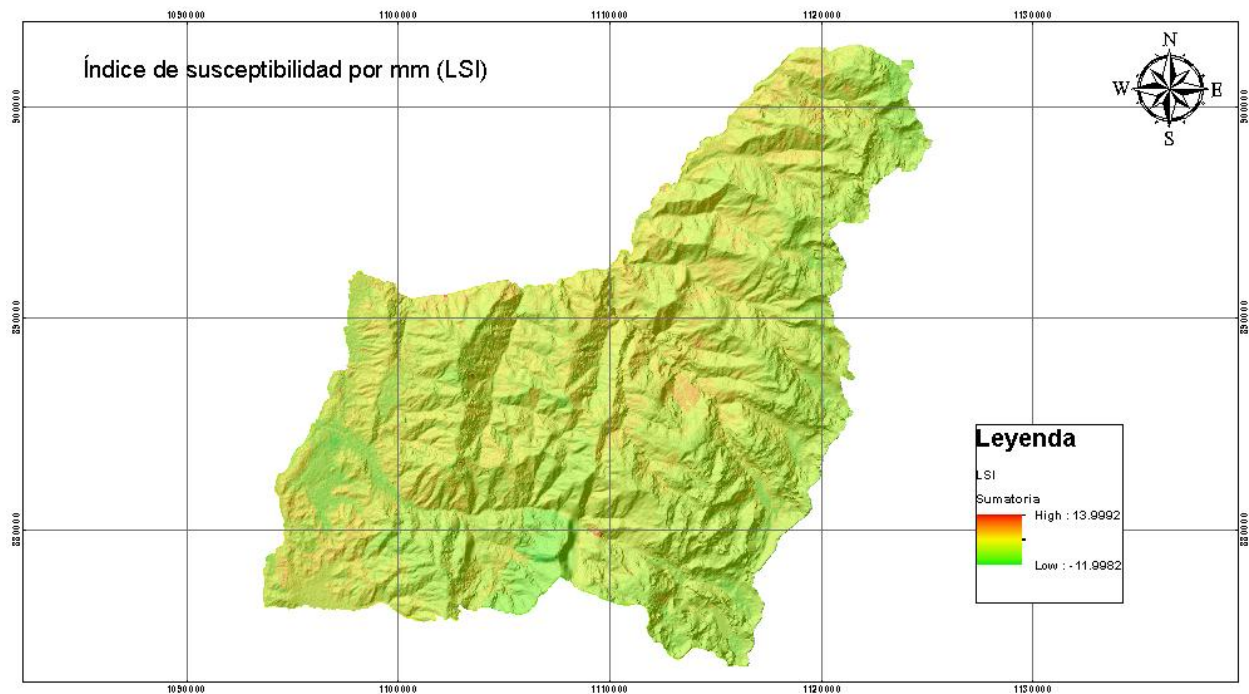


4.2.2 Índice de susceptibilidad por deslizamiento (LSI)

El cálculo del LSI se lleva a cabo sumando los valores de wf finales de cada clase de cada factor condicionante, es decir, a cada píxel le corresponde un valor de wf para cada uno de los factores, entonces el mapa de LSI final, representa la sumatoria para cada celda de trabajo.

$$LSI = W_f UGS + W_f SUGMF + W_f Pend + W_f Curv + W_f Cob + W_f Perd_suelo + W_f Grad_Eros$$

Figura 16 Mapa LSI – índice de susceptibilidad por mm



La Figura 16 corresponde a los valores de la sumatoria de todos los pesos w_f , por ende, representa las zonas con mayor importancia o susceptibilidad por movimientos en masa, aunque son valores crudos que posteriormente deben ser analizados y validados.

4.2.3 Validación – Curva de éxito AUC – ABC

El método de validación del modelo Wofe es la curva de éxito o área bajo la curva que mide la bondad de ajuste del modelo de susceptibilidad, dicho método grafica los valores de LSI en orden descendente y organizarlos en percentiles de manera que hacia la izquierda se ubiquen los percentiles más susceptibles y desciendan hacia la derecha (MINMINAS & SGC, 2017), (Dahal et al., 2008).

El resultado de la validación corresponde al área bajo la curva la cual un valor de AUC de 0.5 indica que el modelo no es mejor que una predicción aleatoria, mientras que un AUC de 1.0 indica una capacidad de predicción perfecta. (MINMINAS & SGC, 2017) propone un valor mínimo aceptable de 0,7 o 70%. El proceso de validación con la curva ROC y el AUC implica comparar

las predicciones del modelo con los datos de eventos pasados o conocidos. Cuanto mayor sea el AUC, mejor será el modelo en la identificación de áreas susceptibles a movimientos en masa teniendo en cuenta que la cartografía final es una herramienta predictiva para la toma de decisiones.

4.2.4 Categorización de susceptibilidad

Una vez aplicado el método Wofe y validado con la curva AUC, se procede con la categorización de los valores LSI con el fin de obtener las cartografías finales de susceptibilidad por movimientos en masa como mapa final. Para dicho propósito se utilizan los valores propuestos por (C. van Westen, 2013) para la construcción de la leyenda del mapa de susceptibilidad final Tabla 11.

Tabla 11 Leyenda del mapa de susceptibilidad. Fuente: Modificado de (C. van Westen, 2013)

| Susceptibilidad | Descripción | % de deslizamientos |
|-----------------|--|---------------------|
| Alta | Áreas limitadas que deben ser evitadas en ordenamiento territorial debido a la alta ocurrencia de deslizamientos | > 75 |
| Moderada | | Máximo 25 |
| Baja | Áreas con algunos deslizamientos. Puede ser considerada segura para ordenamiento territorial | < 2 |

A partir de la curva de éxito AUC se estiman los umbrales de del porcentaje del número de deslizamientos para las categorías de susceptibilidad propuestas por (C. van Westen, 2013) y asignar los colores para cada rango, siendo rojo para susceptibilidad alta, amarillo para media y verde para baja.

II. Metodología Análisis jerárquico multicriterio - AHP

Teniendo en cuenta las mismas variables o factores condicionantes tomadas para el método Wofe, se realizan la matriz de importancia clasificando la incidencia o el posible grado de afectación que podría tener un factor sobre el otro.

La calificación de realizará del 1 al 9 para incidencia en el factor y valores recíprocos para capas o factores que no tienen importancia alguna, siendo el valor de 9 de mayor importancia, 1 de igual importancia y 1/9 de ninguna importancia o la relación es completamente irrelevante.

Tabla 12 Calificación de importancia entre factores condicionantes.

| Calificación | Importancia |
|--------------|----------------------------------|
| 9 | Absolutamente importante |
| 8 | |
| 7 | Demostablemente importante |
| 6 | |
| 5 | Notablemente más importante |
| 4 | |
| 3 | Ligeramente más importante |
| 2 | |
| 1 | Igual Importancia |
| 1/2 | |
| 1/3 | Ligeramente menos importante |
| 1/4 | |
| 1/5 | Notablemente menos importante |
| 1/6 | |
| 1/7 | Demostablemente menos importante |
| 1/8 | |
| 1/9 | Absolutamente menos importante |

La validación del modelo AHP se realiza a partir de la relación de consistencia (CR) propuesta por (Saaty, 1977; Saaty & Vargas, 2001), que consiste en el valor que determina el nivel de consistencia del juicio aplicado en la matriz. La fórmula para calcular la CR se muestra a continuación:

$$CR = \frac{CI}{Rci} \quad (3)$$

La validación del método consiste en el valor de CR propuesto por (Saaty, 1977) que propone que menor a 0,10 es un valor aceptable.

Para calcular el CR se requiere del valor del índice de consistencia CI y del valor de Rci, que se calculan de la siguiente manera:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} \quad (4)$$

4.3 Comparación entre modelos de susceptibilidad

La susceptibilidad calculada por los métodos Wofe y AHP cuenta con su respectivo criterio de validación, el cual únicamente arroja la aceptabilidad de cada uno. Para el caso del método Wofe, la validación se da a partir de la curva de éxito calculada a partir de la cantidad de píxeles por clase y la comparación con los procesos morfodinámicos, la cual se supone como un modelo aceptable si es mayor al 70%. Por otra parte, el método heurístico AHP, cuenta con un método de validación llamado el índice de consistencia. La comparación de las metodologías se realiza a partir de la curva de éxito una vez se tengan los mapas finales de cada modelo, para el método Wofe sería una segunda curva de éxito, con la diferencia que para la comparación contra el método AHP, se realizará con las mismas 5 clases de susceptibilidad con las que se llevó a cabo el modelo heurístico. De esta manera se logra que los métodos de validación sean igual, así mismo, con el método de la curva ABC o ROC, se puede conocer con qué porcentaje el modelo es efectivo, teniendo el mapa de susceptibilidad final sobreponiendo el inventario de procesos morfodinámicos.

5.Resultados

5.1 Caracterización geoambiental

Realizada la caracterización geoambiental, se cuenta con los insumos necesarios para llevar a cabo el cálculo de la susceptibilidad por mm. Tales insumos resultan en la cartografía de cada factor condicionante. La caracterización geoambiental se refiere al análisis y descripción detallada de los elementos y procesos ambientales presentes en una determinada área geográfica, para este caso la zona de montaña media y alta del municipio de Palmira. Este enfoque implica estudiar y entender las características geológicas, geomorfológicas, las relacionadas con el suelo y la cobertura además de otras relacionadas con el medio ambiente. La finalidad de la caracterización geoambiental fue proporcionar una visión integral de los factores ambientales o condicionantes que influyen en un área, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones en la planificación territorial, la gestión ambiental y la evaluación de riesgos naturales, entre otros aspectos.

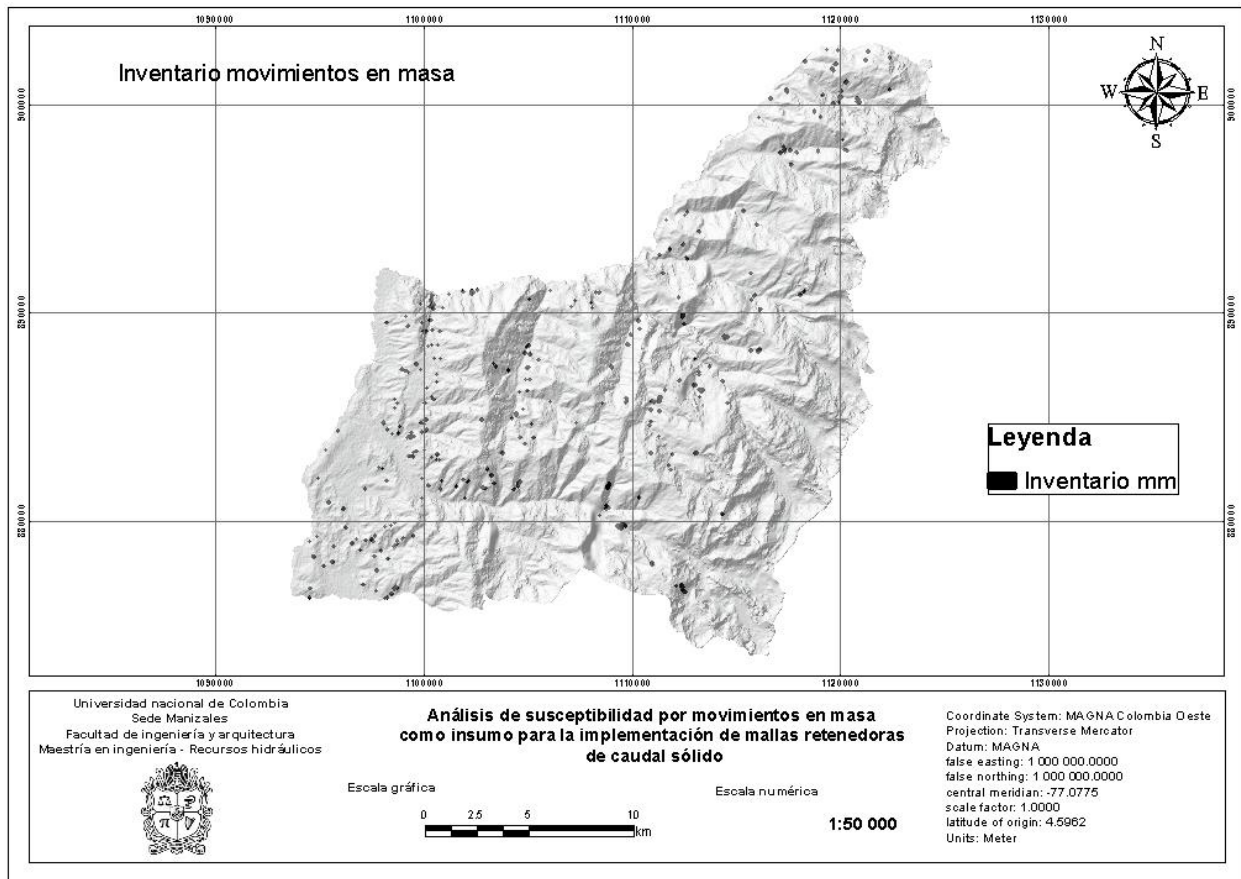
5.1.1 Procesos morfodinámicos

Los procesos morfodinámicos, como se ilustra en la Figura 17, se representan en el mapa de sombras para establecer una correlación entre los eventos de movimientos en masa (mm) y el relieve del terreno. La distribución de estos eventos es uniforme en términos de densidad por unidad de área, encontrándose principalmente en la zona montañosa del municipio y con mayor presencia en áreas de baja y media montaña. En otras palabras, hay una menor incidencia en altitudes superiores a 2500 metros sobre el nivel del mar, donde las condiciones climáticas son más frías, la presencia de asentamientos humanos es menor y la actividad agrícola y ganadera también disminuye.

Asimismo, cabe destacar que esta tendencia hacia los deslizamientos está vinculada de manera indirecta con la intervención antrópica, especialmente en proyectos urbanísticos. En este contexto, las actividades de explanación y reconfiguración del terreno conllevan a procesos de deforestación que dejan el suelo expuesto, favoreciendo la infiltración y el impacto directo de agentes erosivos, principalmente la lluvia. Además, la apertura de taludes para ajustar la

topografía requerida en la construcción de viviendas incrementa significativamente la susceptibilidad a los movimientos en masa. No obstante, es crucial subrayar que existen enfoques mitigadores, como el control de aguas superficiales y soluciones geotécnicas, que permiten llevar a cabo estos proyectos de manera sostenible, minimizando el impacto potencial en la superficie circundante.

Figura 17 Procesos morfodinámicos, recopilación del inventario de mm Fuente: Modificado de (IGAC, s/f)



El inventario de procesos morfodinámicos se construyó inicialmente utilizando información secundaria disponible, que comprende datos sobre el tipo de proceso, ubicación geográfica y descripción de los materiales. Además, se incorporó la identificación de procesos erosivos a partir de imágenes satelitales. Posteriormente, se complementó este inventario con datos recopilados en el campo para garantizar una recopilación completa y precisa de la información. Se excluyeron del análisis los procesos que carecían de información en la base de datos secundaria, ya que su

inclusión podría comprometer la precisión y resolución del modelo, que, en otras palabras, pudiera reducir el porcentaje de éxito.

A partir del mapa de procesos morfodinámicos y la facilidad de interpretación del relieve del terreno se puede suponer inicialmente la presencia de procesos morfodinámicos relacionados con aspectos de geología estructural Figura 18 donde se puede observar un marcado rasgo estructural que obedece al trazo de la falla conocida como el sistema de fallas Cauca - Almaguer, la cual se conoce por una fuerte tendencia norte sur y su gran extensión estimándose un recorrido que va desde el norte del departamento del Cauca, hasta el centro occidente de Caldas, además conocida por ser el límite geológico entre las rocas ígneas volcánicas pertenecientes a una gran provincia del cretácico superior que posteriormente colisionaron con Suramérica hace alrededor de 75 ma (Villagómez et al., 2011) con las rocas metamórficas del complejo Arquía.

Figura 18 Movimientos en masa presentes sobre laderas estructurales.

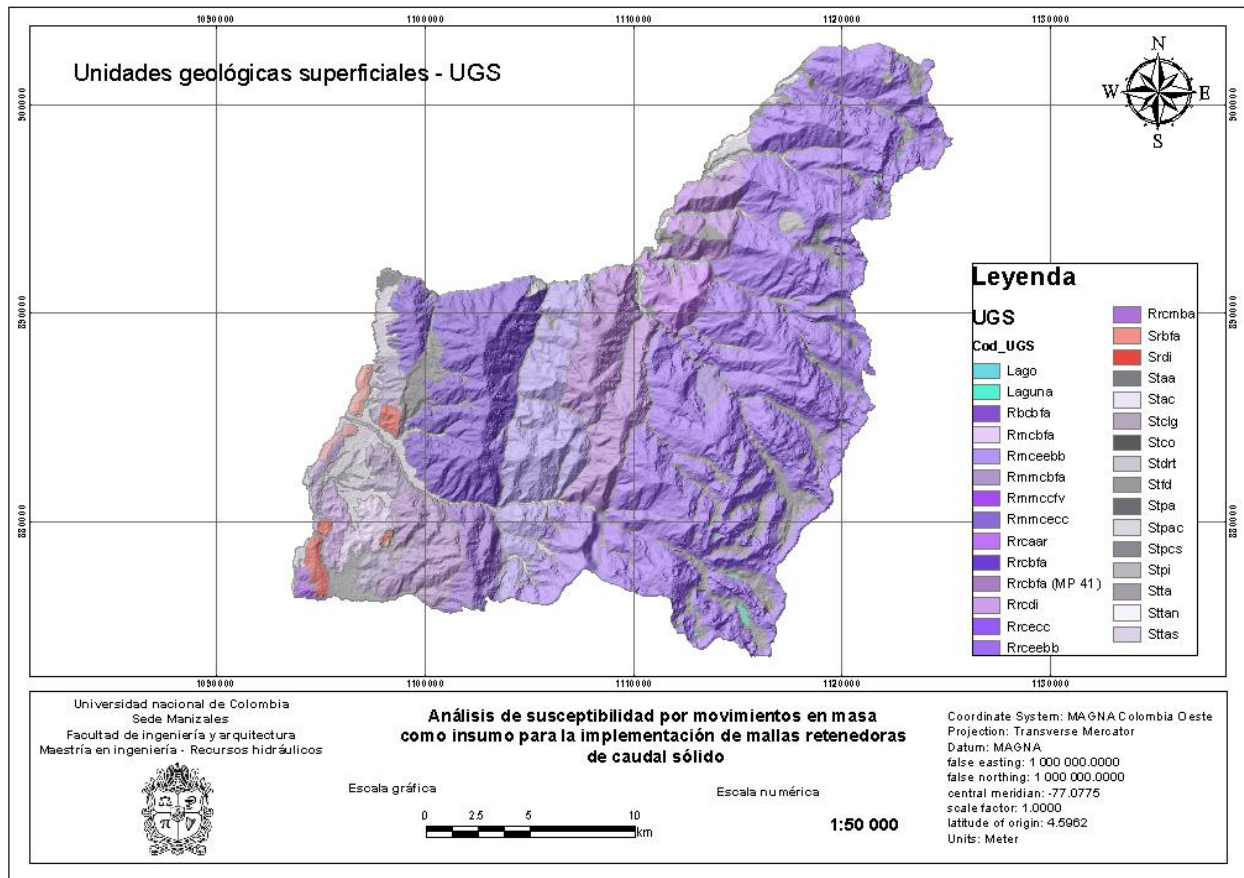


Otras secciones muestran rasgos tectónicos que pueden indicar ser condicionantes de deslizamientos, si bien los movimientos en masa no se generan directamente por la actividad tectónica, esta si condiciona y permite que se formen laderas con tendencias y pendientes fuertes que favorecen la conexión con otros factores condicionantes y así configurando laderas susceptibles a movimientos en masa.

5.1.2 UGS – Unidades geológicas superficiales

Las Unidades geológicas superficiales (UGS) se centran en la caracterización de los materiales presentes inmediatamente bajo la superficie, desde la roca madre, excluyendo suelos antrópicos como rellenos o suelos orgánicos generados por la actividad agrícola. En la Figura 19, los tonos morados indican que los materiales expuestos son predominantemente rocosos, siendo esta la condición predominante en la mayor parte de la zona montañosa. En menor proporción, representados por tonos rojizos, se identifican suelos residuales, generalmente compuestos por arcillas y limos resultantes de la descomposición de la roca madre, principalmente de composición básica.

Figura 19 Unidades geológicas superficiales Fuente: Modificado de (Univalle et al., 2023), (IGAC, s/f)



La información recopilada en campo se conjuga con la revisión bibliográfica donde existen registros georreferenciados de estaciones de campo con fotografías que permiten la relación de

los materiales con los deslizamientos, como puede concluir el análisis de los pesos de evidencia con las clases de los factores condicionantes Tabla 13.

Tabla 13 Pesos de evidencia y clases para el factor condicionante UGS.

| Factor condicionante | Clases | Wf |
|----------------------|----------------|-----------|
| UGS | Stpac | 0.000000 |
| | Srdi | 0.000000 |
| | Stta | 0.000000 |
| | Stac | 0.621132 |
| | Stfd | -0.434434 |
| | Stpcs | -0.448234 |
| | Stdrt | -0.568655 |
| | Rmmcecc | 2.400093 |
| | Staa | 0.300553 |
| | Stco | -0.077384 |
| | Stclg | -0.082886 |
| | Stpi | -0.252071 |
| | Rmmcbfa | 0.301892 |
| | Rrcdi | -4.030028 |
| | Rrcbfa (MP 41) | -0.212444 |
| | Rrcbfa | -1.431397 |
| | Rbcbfa | 0.458410 |
| | Rmceebb | -0.780424 |
| | Rrceebb | -2.708684 |
| | Rrcmba | 0.000000 |
| | Rrcaar | 0.000000 |
| | Rrcecc | 3.486312 |
| | Rmcbfa | 0.000000 |
| | Sttan | 0.000000 |
| | Stpa | 1.090428 |
| | Lago | 0.000000 |
| | Rmmccfv | 0.000000 |
| Srbfa | 0.000000 | |
| Sttas | 0.168739 | |
| Laguna | -2.255413 | |

Es fundamental destacar que la caracterización de las Unidades geológicas superficiales (UGS) se rige por la representación de las unidades geológicas en función de la profundidad del material en el afloramiento, determinado por su espesor. Según la propuesta de (Hermelin, 1987) se sugiere caracterizar aquellos materiales con espesores del orden de decenas de metros. Además, estas unidades deben poseer un área mínima cartografiable, conocida como Unidades

de Zonificación del Terreno (UZT), según la definición de (Calvello et al., 2013). En el caso de un estudio a escala 1:25000, como es el alcance de este trabajo, la unidad mínima cartografiada para las UGS es de 10000 m² en términos de área de los polígonos Tabla 14. Cabe destacar que el criterio principal que define las UGS es la profundidad y homogeneidad de los materiales en la superficie, otorgando prioridad al espesor. En este sentido, el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016) propone que el espesor mínimo sea el valor de la escala dividido por mil, resultando en 25 metros para el presente estudio (25000/1000=25 m).

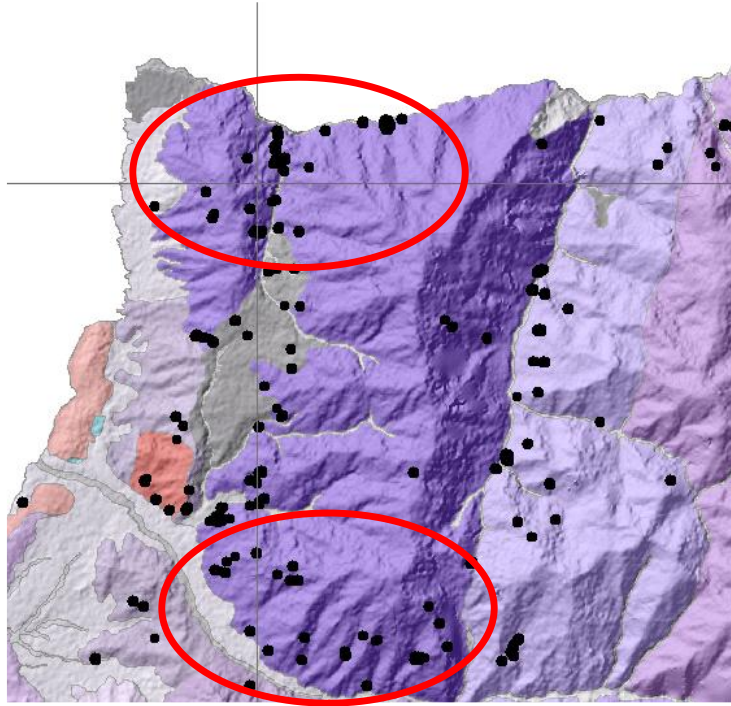
Tabla 14 Dimensiones sugeridas para la UZT. Fuente: (Calvello et al., 2013)

| Escala de referencia | Dimensiones del píxel | | Dimensiones máximas y mínimas de ZTU | | |
|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|
| | Lado (m) | Área (m ²) | # De pixeles | Área (km ²) | |
| 1:x | $x \cdot 10^{-3}$ | $x^2 \cdot 10^{-6}$ | 16-1600 | $(16x^2) - 1600x^2$ | |
| 1:250000 | 250 | 62500 | 16-1600 | 1-100 | |
| 1:100000 | 100 | 10000 | 16-1600 | 0.16-16 | |
| 1:25000 | 25 | 625 | 16-1600 | 0.01-1 | |
| 1:50000 | 5 | 25 | 16-1600 | 0.004-0.4 | |

Aquellas UGS que no cumplían con estos estándares, especialmente aquellas con espesores de suelo residual menores a 25 metros, fueron excluidas del análisis. Este fenómeno es notable en la zona de montaña media, donde los perfiles de meteorización son gradualmente ascendentes. Sin embargo, la presencia de roca meteorizada a profundidades de 5 a 15 metros determinó que las unidades cartografiadas finales estén mayormente compuestas por rocas.

Por otra parte, analizando las UGS con respecto a los movimientos en masa, cabe resaltar la presencia de deslizamientos y marcas de erosión sobre rocas de la formación (fm) Amaime, las cuales están definidas según (Aspden & McCourt, 1986) como rocas volcánicas máficas principalmente basálticas de origen toleítico con extensos horizontes de lavas almohadilladas acomodadas alongadamente alrededor de 200 km sobre el flanco occidental de la cordillera oriental. Dichas rocas basálticas varían principalmente en su grado de meteorización lo cual se evidencia de manera local, siendo este un factor determinante en la caracterización de las UGS y la susceptibilidad por movimientos en masa, ya que el grado de integridad física o meteorización de las rocas, está directamente relacionado con la generación de deslizamientos, ya sea por procesos de caída de detritos – rocas, o por su alto grado de descomposición y la formación de suelo residual.

Figura 20 UGS y mm relacionados con rocas de la formación Amaime.



Los materiales de descomposición de la fm Amaime Figura 20 típicamente se observan como suelos pardo-rojizos de granulometría limo arcillosa, con perfiles de meteorización variables. Estos colores parduzcos son la tonalidad resultado de la mineralogía de las rocas basálticas lo cual está compuesto principalmente de minerales de hierro y magnesio, cuando estos minerales son atacados por agentes como el agua, resultan en la oxidación y de ahí la coloración rojiza Figura 21.

Geotécnicamente los suelos residuales tienen un comportamiento generalmente cohesivo, este parámetro se debe a su naturaleza de descomposición lenta, pues la trayectoria de roca a suelo tarda miles de años, condicionado por las condiciones climáticas y exposición al intemperismo de la roca parental. Otra evidencia de su comportamiento cohesivo es la forma de generar superficies de falla, hay una relación estrecha entre los materiales cohesivos y los deslizamientos rotacionales, lo cual en un sentido estricto hablando de la forma de fallar entre materiales granulares y arcillosos, es más probable la generación de planos de falla circulares que planares.

Figura 21 Izquierda deslizamiento y pérdida de banca, corregimiento de Tenjo derecha talud corte de carretera, sector el Mesón.



La descomposición de las rocas juega un papel fundamental en la generación de flujos, siendo el resultado de una prolongada trayectoria denudacional de los materiales. Este proceso se ve intensificado por el elevado grado de fracturamiento presente en la zona, facilitando la infiltración del agua superficial y debilitando la estructura y fábrica cristalina desde el interior. Este continuo proceso de meteorización contribuye a la formación de coluviones recientes, como se ilustra en la Figura 22. Estos coluviones están compuestos por una matriz limo arenosa de color pardo rojizo y presentan clastos y bloques de baja esfericidad y angulares, variando en tamaño y principalmente provenientes de basaltos de la formación Amaime.

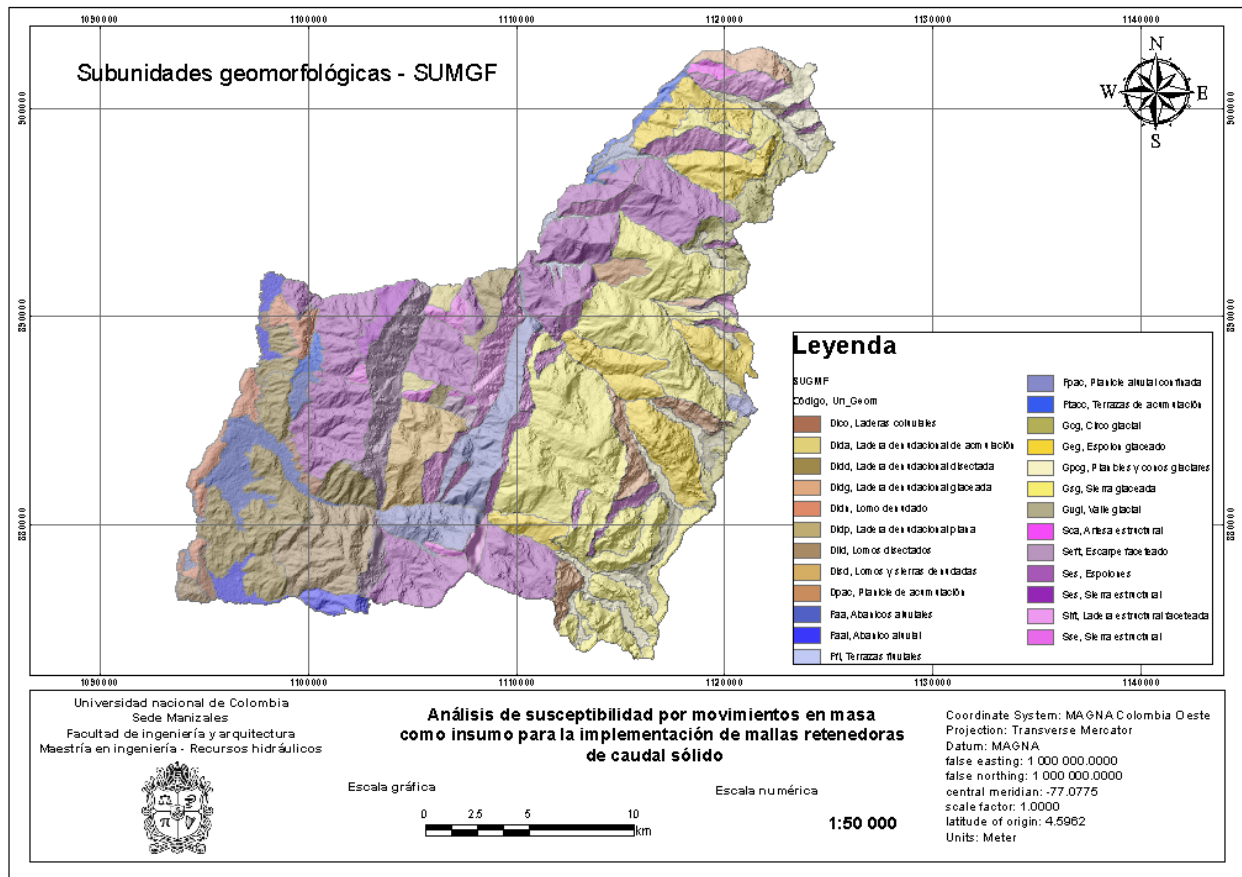
Figura 22 Depósitos coluviales proveniente de materiales de la fm Amaime, sector el Mesón.



5.1.3 Subunidades geomorfológicas

La geomorfología de la media y alta montaña de Palmira Figura 23 se considera compleja pues los orígenes de las geoformas son variables, algunas laderas presentan señales de remanentes tectónicos formando diferentes espolones y por otra parte, las geoformas denudacionales en las cuales se encontraron la mayoría de los procesos morfodinámicos, lo cual es una relación correlacionable pues la actividad denudacional se atañe con la actividad morfodinámica y a los suelos residuales.

Figura 23 Subunidades geomorfológicas Fuente: Modificado de (IGAC, s/f)

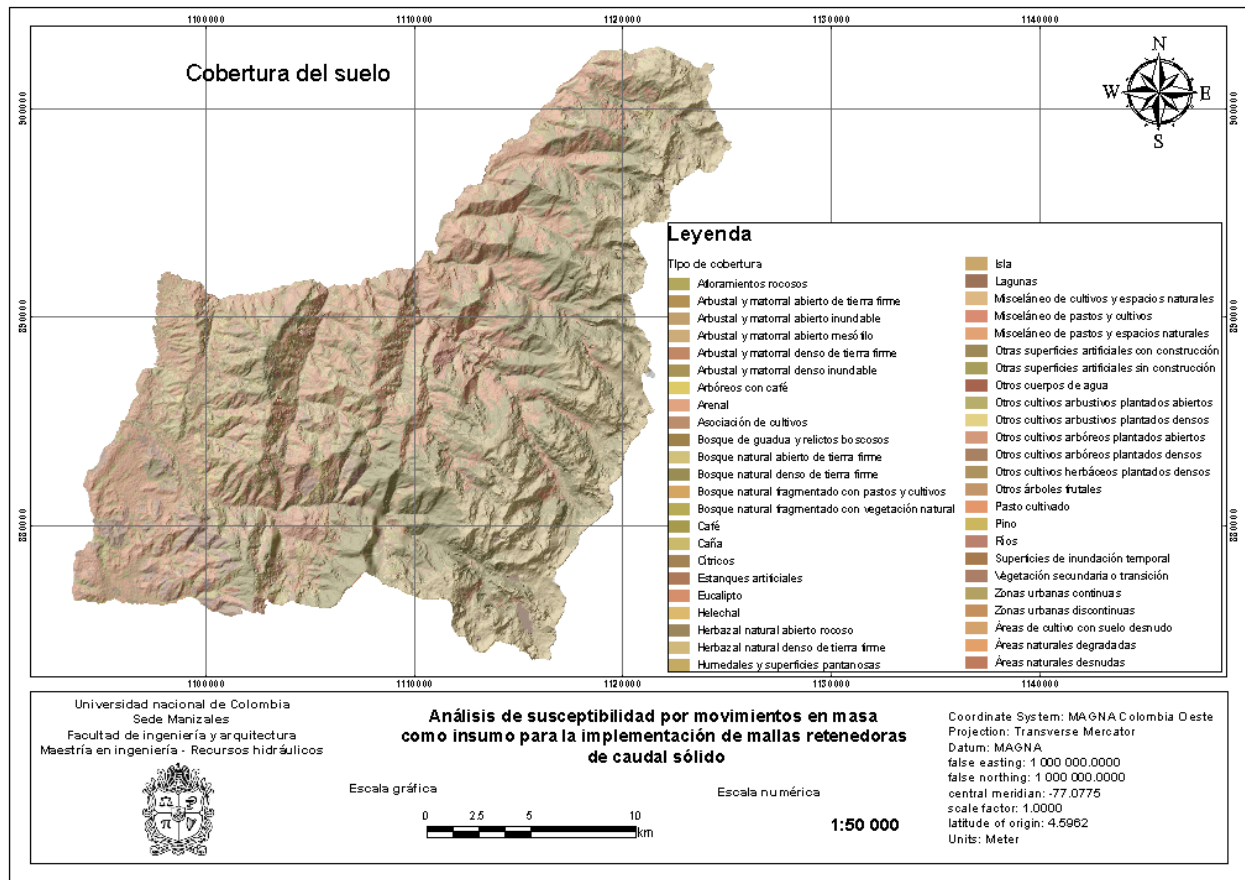


Las geformas en la zona montañosa del municipio de Palmira fueron moldeadas por agentes principalmente estructurales y glaciares, lo cual se evidencia en los relieves suavizados que permite observar la glaciación actual de los terrenos, así mismo, la geología estructural incide sobre las unidades geológicas facetando y abriendo camino con valles abruptos alineados con la tendencia general de la tectónica regional E-W de los esfuerzos tectónicos y su respuesta en rasgos estructurales con tendencia N-S.

5.1.4 Cobertura y uso del suelo

La información concerniente a la cobertura del suelo Figura 24 se encuentra disponible a escala semidetallada (1:25000) por (IGAC, s/f) en el cual se ha realizado todo el proceso de clasificación y caracterización de los suelos a nivel nacional.

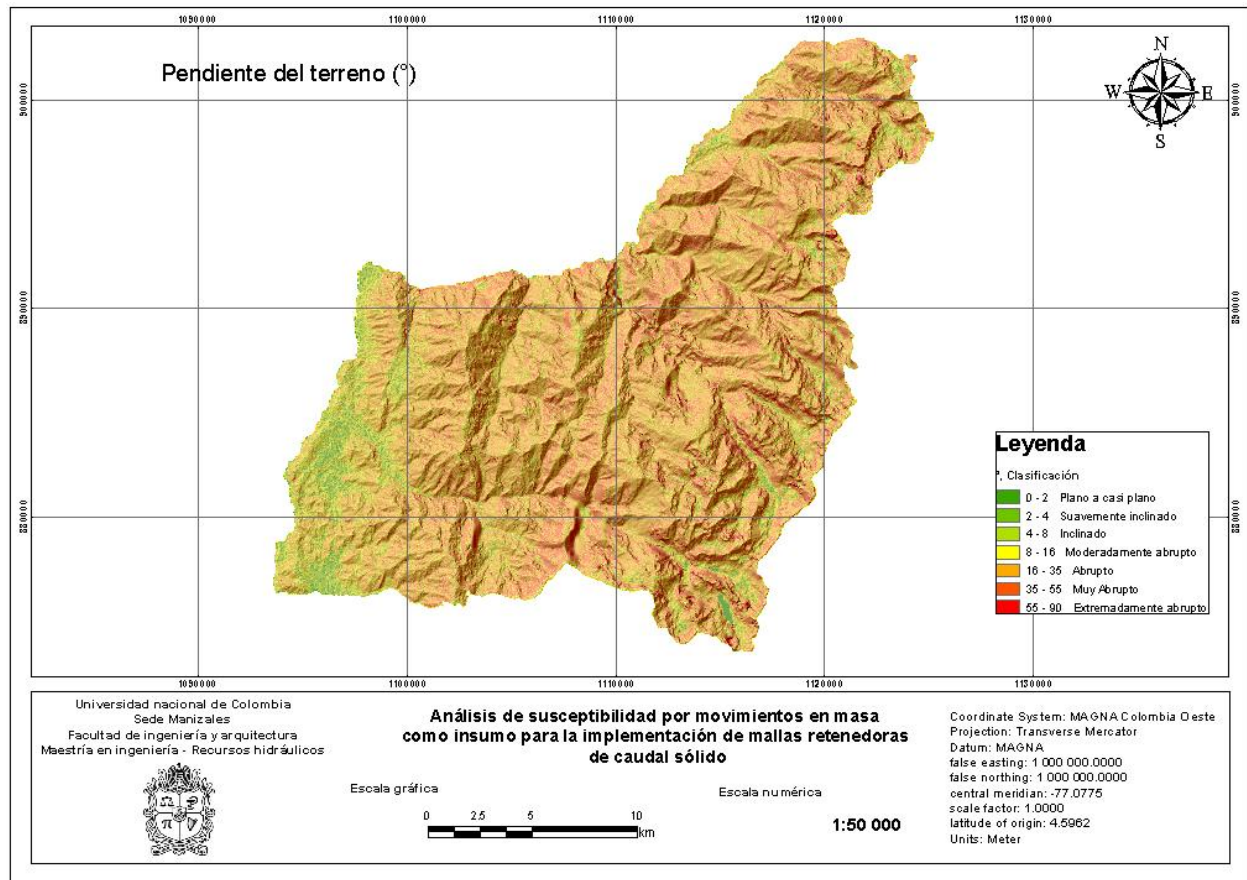
Figura 24 Cobertura del suelo Fuente: (IGAC, s/f)



5.1.5 Pendientes del terreno

El mapa de pendientes del terreno Figura 25 se realizó a partir del DEM con resolución de 12,5 m por medio de herramientas SIG y se categorizaron los rangos de pendientes tomando como guía (MINMINAS & SGC, 2017).

Figura 25 Pendiente del terreno en grados Fuente: Modificado de (IGAC, s/f)



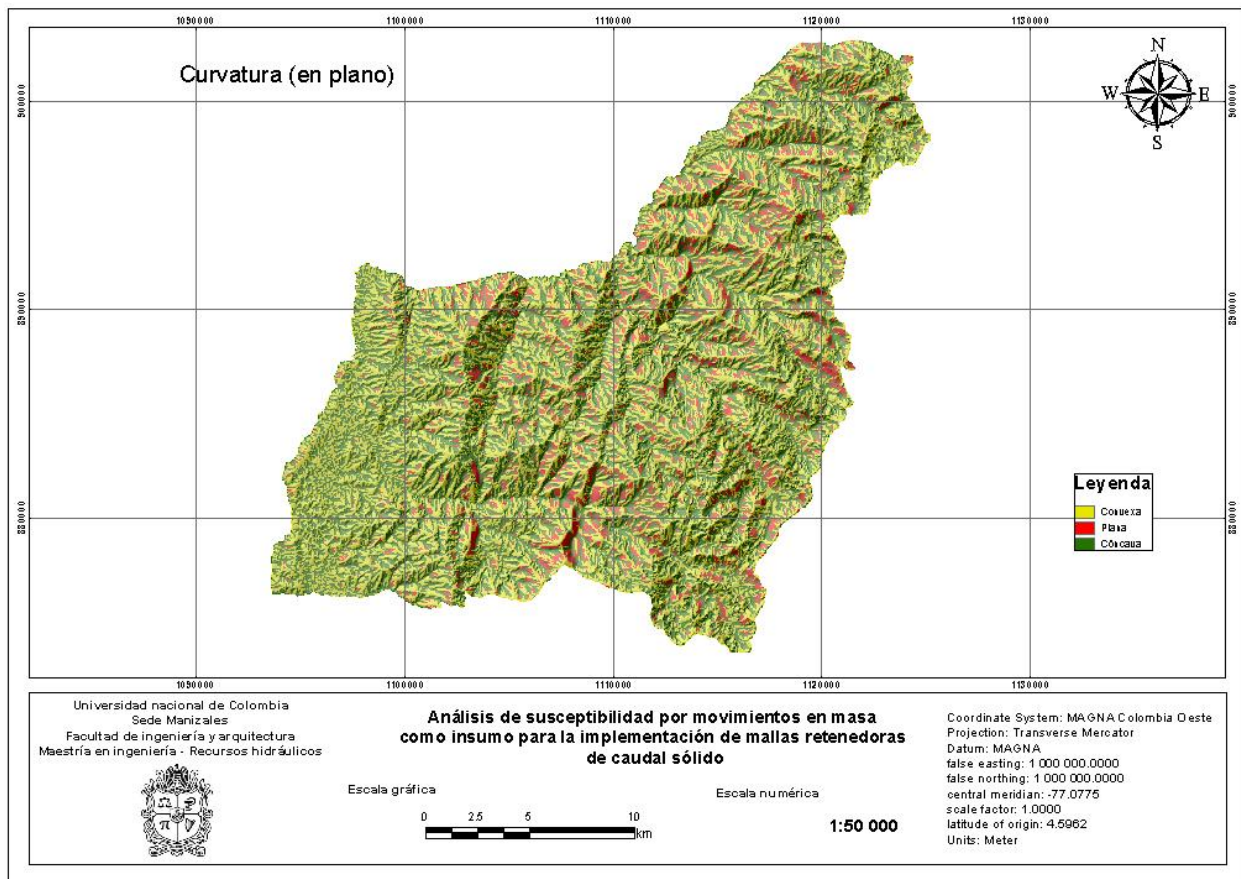
La Figura 25 muestra los rangos de pendientes clasificados según (van Zuidam, 1986) para la categorización de la inclinación del terreno con fines de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa. La zona media y alta montaña del Palmira va desde 1200 hasta 4000 msnm aproximadamente, diferencia altitudinal considerable teniendo en cuenta las clasificaciones bioclimáticas.

Dicho contraste en la formación de laderas y montañas es la respuesta de una tectónica compleja que, conjugada con las unidades geológicas y la posición geográfica del continente, han formado todo el relieve montañoso moldeando la superficie con trazos y cortes provocados por fallas regionales.

5.1.6 Curvatura del terreno

La curvatura del terreno al igual que las pendientes, se realizaron a partir de la información de las celdas del DEM. Para este caso, se categorizó la curvatura como laderas planas, cóncavas y convexas, brindando mayor relevancia a las planas y cóncavas como posibles condicionantes de generar mm, en menor importancia las laderas convexas Figura 26.

Figura 26 Curvatura del terreno Fuente: Modificado de (IGAC, s/f)



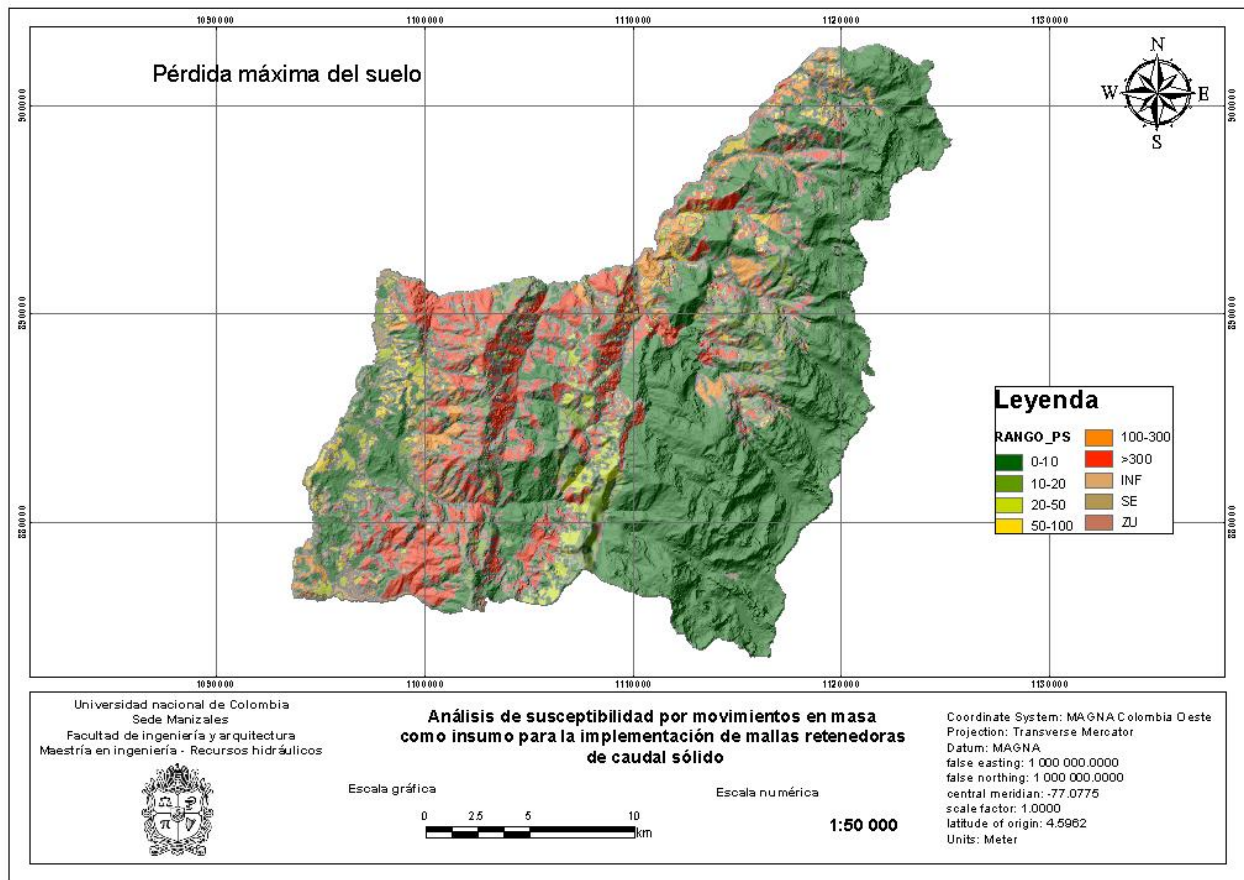
(MINMINAS & SGC, 2017) plantea la clasificación de la curvatura en 3 categorías principales a partir del método de percentiles propuesto por (Süzen & Doyuran, 2004) donde define la clasificación de las curvaturas entre cóncava, plana y convexa a partir del tratamiento geoestadístico de la información que se obtiene del DEM. El mapa de curvaturas muestra un contraste entre laderas cóncavas y convexas en su gran mayoría, los valores de curvatura plana son escasos, en toda la zona de montaña del municipio se presentan laderas principalmente con geometrías dominadas por la geología estructural y la incidencia de las quebradas en el

moldeamiento de las superficies de las cuencas, asimismo, las laderas planas son poco comunes además teniendo en cuenta que las superficies planares son comunes en geología donde predominan las estratificaciones planares.

5.1.7 Pérdida máxima del suelo

El mapa de pérdida máxima del suelo adaptado del estudio realizado por (CVC, 2021a), evidencia los contrastes en el índice de pérdida del suelo el cual se tuvo en cuenta en el presente informe para determinar las zonas con mayor susceptibilidad a ser erosionadas o afectadas por agentes climáticos debido a su cobertura y la pérdida de esta capa de protección Figura 27.

Figura 27 Pérdida máxima del suelo. Fuente: Modificado de (CVC, 2021a)



Los índices de pérdida del suelo en el municipio de Palmira se observan en sus valores máximos en el sector de media montaña, donde se concentra la actividad agrícola del municipio, su relación con el uso del suelo está ligado a los problemas en el uso potencial y la afectación en la

superficie por un uso indebido o no potencial. Los factores que condicionan el terreno se relacionan entre otras cosas, por la actividad humana como principal fuente generadora de cambios representativos en la superficie, de esta manera, la pérdida del suelo se materializa en lugares donde más ha impactado la erosión, donde las condiciones desfavorables si no son intervenidas, empeoran impactando negativamente sobre la estabilidad gradualmente.

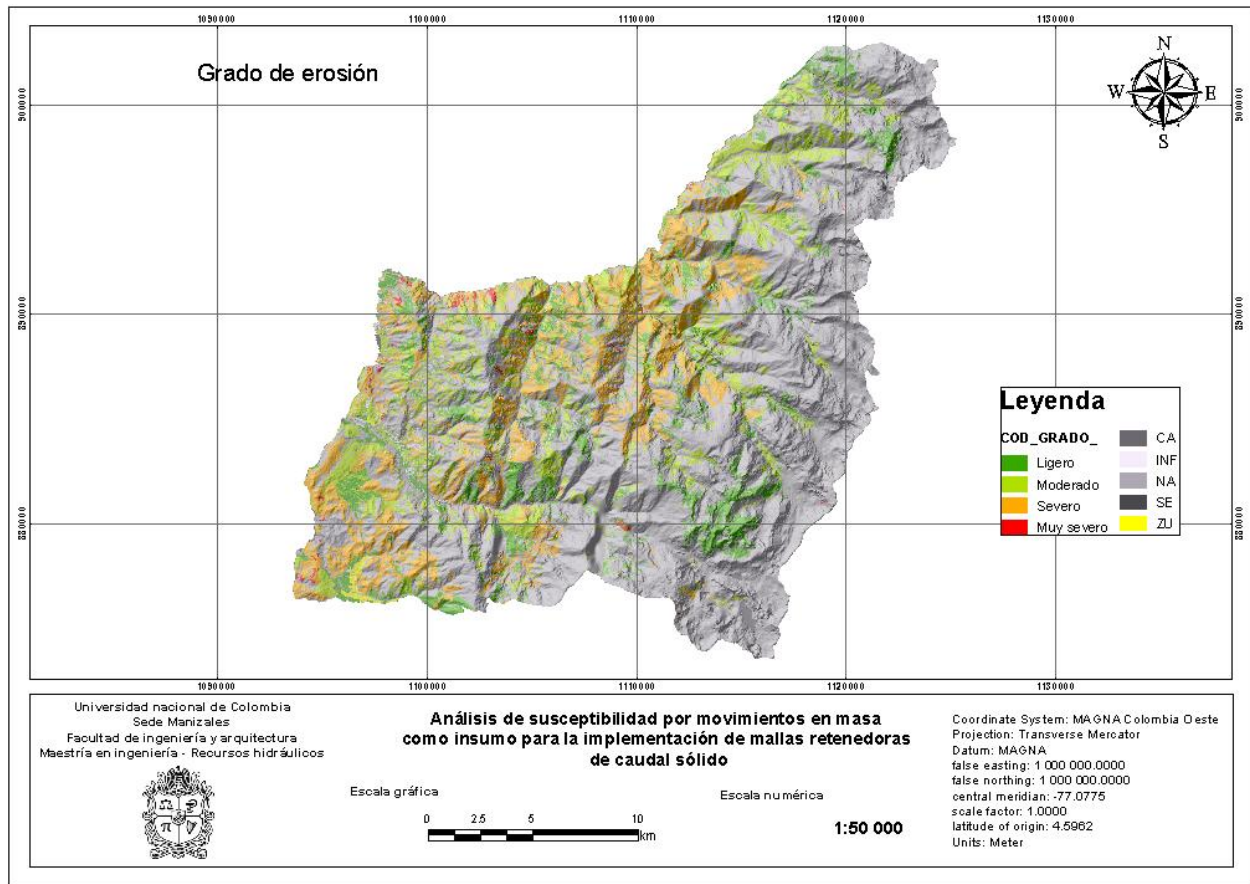
5.1.8 Grado de erosión

El grado de erosión se mide a partir de la pérdida de los horizontes más someros o superficiales dentro del perfil de meteorización en función de la evidencia de procesos erosivos como terracetos, solifluxión y sufusión, siendo los principales los horizontes A y B los objeto de estudio (CVC, 2021a).

El grado de erosión en la susceptibilidad por mm se interpreta como las superficies del terreno con mayores pérdidas de capa superficial las más susceptibles a condicionar el terreno a que se generen movimientos en masa, entre otras cosas, por la pérdida de cobertura que aumenta considerablemente la intensidad y velocidad de la meteorización. Procesos como la infiltración, cambios climáticos como periodos de extensas sequias y lluvias intensas aceleran los procesos denudacionales.

Inicialmente, en la Figura 28 se observa una tendencia a un grado de erosión natural en la zona de mayor altitud y de páramo con erosión natural correspondiente a zonas boscosas con especies arbóreas, aunque en los sectores de piedemonte y montaña baja algunos sectores muestran este mismo grado de erosión, se debe a pequeños espacios que probablemente aún no han sido intervenidos por el ser humano. Por otra parte, el grado de erosión severo está presente en zona de montaña media donde se presenta la mayor concentración de actividad humana, siendo el desarrollo agrícola, ganadero y los proyectos de urbanización, los usos del suelo más comunes, por esta razón, la apertura de vías, explanaciones, quemas, acomodación topográfica para los proyectos de urbanismo, provocan superficies desnudas de cobertura vegetal, detonando procesos erosivos como surcos, deslizamientos, cárcavamiento y entre otros, que varían en su peligrosidad según la magnitud de la intervención.

Figura 28 Grado de erosión. Fuente: Modificado de (CVC, 2021c)



5.2 Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa

5.2.1 Susceptibilidad método Wofe

El análisis cartográfico de los factores condicionantes para el cálculo de los pesos finales muestra la importancia preliminar de cada clase de los factores. En la Tabla 15 se muestran los resultados de algunos factores analizados después de aplicar el método, en la columna “Wf” los valores de importancia finales con los que posteriormente se calcula el LSI.

Tabla 15 Ejemplo de algunos factores condicionantes usados para el cálculo de pesos de evidencia

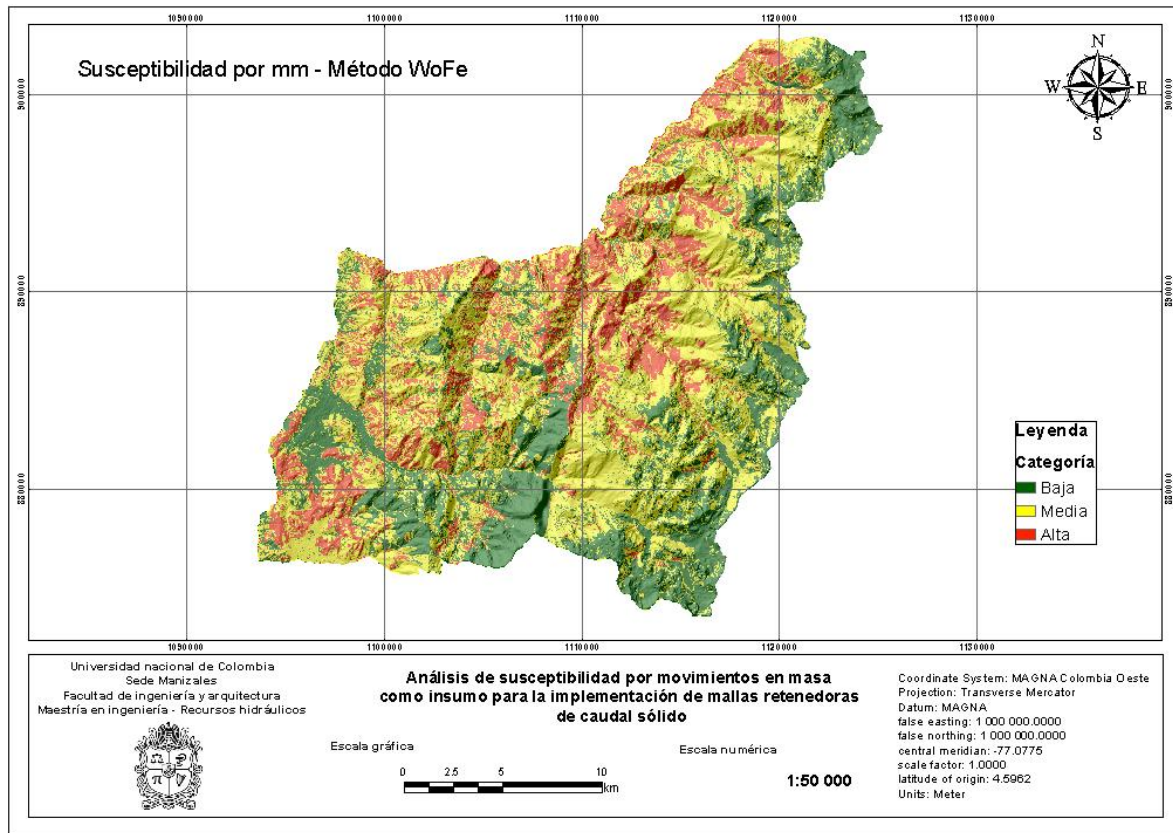
| Factor condicionante | Clases | Total # pixeles | Pixeles con mm | Wf |
|-----------------------------|----------|-----------------|----------------|-----------|
| Pendiente | 0 - 2% | 16418 | 2 | -1.733117 |
| | 2 - 4% | 34934 | 4 | -1.800174 |
| | 4 - 8% | 135441 | 25 | -1.346150 |
| | 8 - 16% | 397312 | 187 | -0.422170 |
| | 16 - 35% | 1736385 | 1388 | 0.393555 |
| | 35 - 55% | 717838 | 483 | -0.024912 |
| | > 55% | 43914 | 25 | -0.188854 |
| Grado de erosión | 1 | 294476 | 169 | -0.196511 |
| | 2 | 372139 | 371 | 0.437481 |
| | 3 | 433144 | 671 | 1.044773 |
| | 4 | 13081 | 390 | 4.000254 |
| | CA | 20993 | 9 | -0.473701 |
| | Inf | 14128 | 25 | 0.955192 |
| | NA | 1924001 | 481 | -1.732290 |
| | SE | 2247 | | 0.000000 |
| ZU | 7926 | | 0.000000 | |
| Curvatura (en plano) | Convexo | 1388319 | 770 | -0.361480 |
| | Planar | 303082 | 205 | -0.017655 |
| | Cóncavo | 1390493 | 1143 | 0.355119 |

El mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa por el método Wofe se muestra en la Figura 29 usando los porcentajes de cada categoría de susceptibilidad previamente indicados (C. van Westen, 2013), se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16 Categorías de susceptibilidad (C. van Westen, 2013)

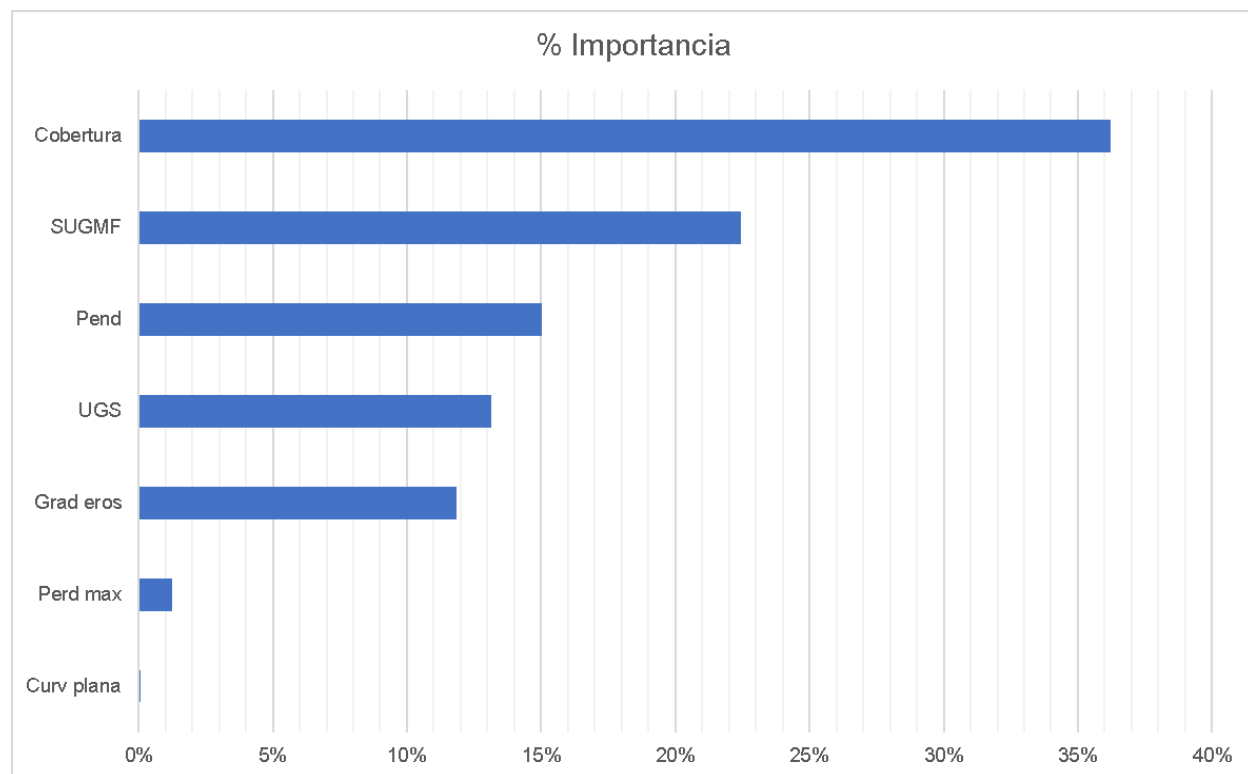
| Clase | Pixeles con presencia de mm | Pixeles por clase | Susceptibilidad tipo deslizamiento |
|-------|-----------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 1 | 5 | 301201 | Alta |
| 2 | 16 | 313022 | Alta |
| 3 | 26 | 289788 | Media |
| 4 | 47 | 324630 | Media |
| 5 | 65 | 306196 | Media |
| 6 | 52 | 268333 | Media |
| 7 | 128 | 346084 | Media |
| 8 | 218 | 307301 | Baja |
| 9 | 269 | 306898 | Baja |
| 10 | 1288 | 307241 | Baja |

Figura 29 Mapa de susceptibilidad por mm, método WoFe



Del mapa de susceptibilidad y los pesos de evidencia W_f se estimaron los factores con mayor importancia realizando la sumatoria de los W_f de cada factor y calculando el porcentaje de importancia Figura 30 de manera que se pudiera verificar los factores con mayor relevancia teniendo en cuenta que estos procesos responden a las condiciones del terreno, sin embargo, los factores que mayormente condicionan pueden cambiar espacialmente.

Figura 30 Porcentaje de importancia de los factores condicionantes



El factor que principalmente condiciona el terreno es la cobertura del suelo, lo cual se puede verificar en las clases con mayor W_f del factor cobertura la cual corresponde a áreas desnudas que traducido en términos de susceptibilidad por mm, son suelos expuestos con erosión activa probablemente con procesos de remoción en desarrollo, zonas con mayor infiltración y saturación. El valor de W_f de las zonas desnudas es de 3.7, lo cual es uno de los 3 primeros valores más altos, es decir, los resultados con mayor influencia en el modelo predictivo de susceptibilidad que posteriormente puede ser objetivo de las recomendaciones y proyectos vistos desde la gestión del riesgo de desastres enfocándose en medidas preventivas como la reforestación o protección de coberturas.

Por otra parte, la capa de grado de erosión también indica un grado de susceptibilidad importante pues el rango de muy severo es el valor de W_f también es superior, siendo de 4.00, este hecho valida el modelo de susceptibilidad realizando una relación directa entre los movimientos en masa y el grado de erosión. Aunque el grado de importancia del grado de erosión no representa valores altos, dicha capa nos aporta información valiosa para el éxito del modelo.

5.2.2 Susceptibilidad método AHP

Se realizó el análisis de la susceptibilidad por mm aplicando las matrices expuestas en la metodología, implementando los niveles de importancia y asignando pesos porcentuales a las capas temáticas. El resultado del tratamiento de las capas temáticas por medio de los grados de importancia se muestra a continuación en la Tabla 17.

Tabla 17 Resultados de pesos de importancia (Saaty, 1977)

| Factor | PESOS |
|------------------|--------------|
| UGS | 0.05 |
| SUGMF | 0.15 |
| PerdMax | 0.06 |
| Pend | 0.30 |
| GradEros | 0.17 |
| Curvatura | 0.04 |
| Cobertura | 0.22 |
| Sumatoria | 1.00 |

El factor condicionante de los mm con mayor importancia es la pendiente del terreno, posteriormente la cobertura, en menor proporción las UGS y la curvatura. Teniendo en cuenta las verificaciones en campo, se observa que la dinámica de la mayoría de los deslizamientos se presenta por sobre saturación del terreno, aumentando su peso unitario húmedo y desequilibrando los esfuerzos de los taludes en pendientes mayores a 15° y con coberturas poco densas y carente de especies arbóreas, pastos limpios o arbustales.

La verificación del resultado se determinó con el ratio de consistencia (Saaty & Vargas, 2001), en el cual el valor de RC debe ser menor a 0,1 es decir menor del 10 % para que se considere consistente el juicio aplicado Tabla 18.

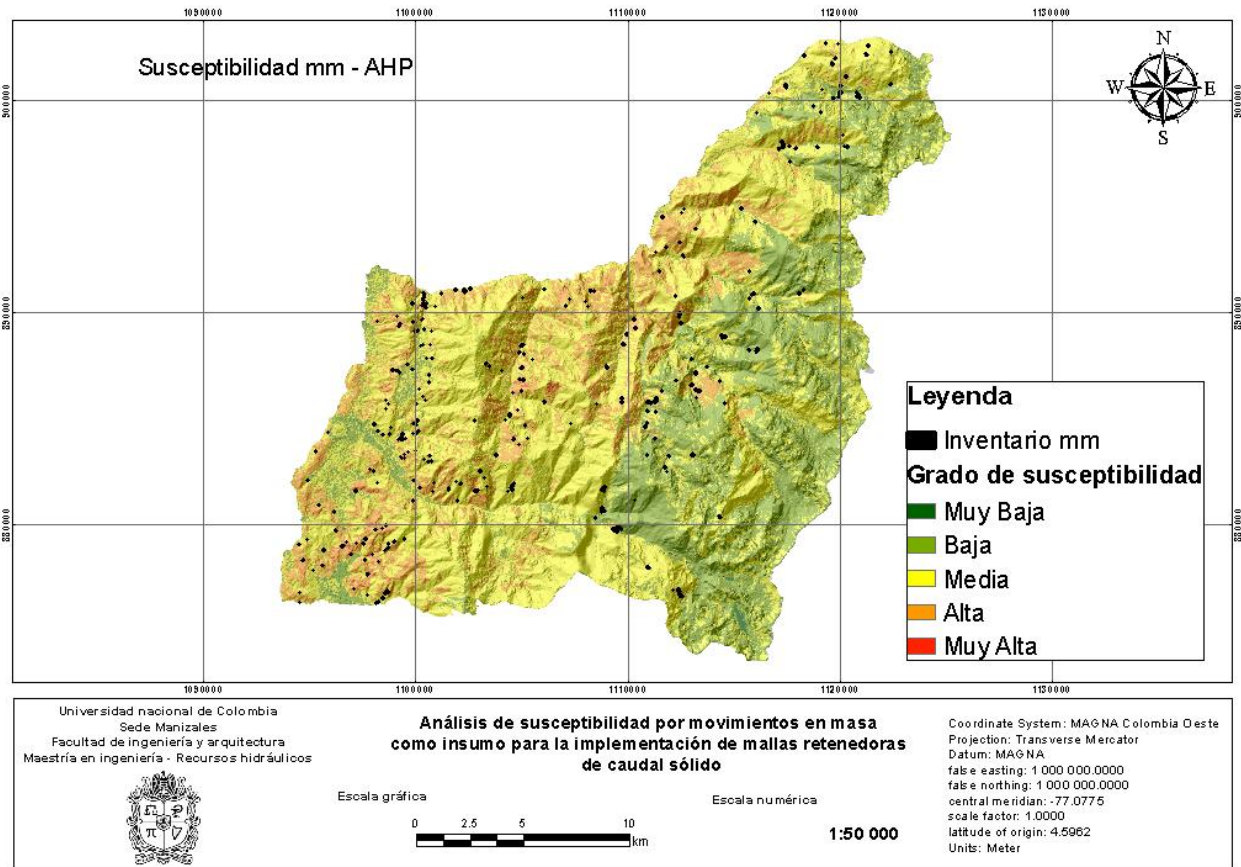
Tabla 18 Índice y ratio de consistencia como validación del modelo AHP

| Valores de consistencia | |
|--------------------------------|-----------|
| Ci= | -0.184539 |
| Rci= | 1.414286 |
| CR= | -0.130482 |

Consistente

El índice de consistencia es de -0.18, el índice de consistencia aleatorio es de 1.41 y la relación de consistencia de -0.13 siendo un valor menor a 0,1 indicando que es un valor de consistencia aceptable.

Figura 31 Mapa de susceptibilidad por mm, metodología de (Saaty, 1977).



La representación visual de los procesos morfodinámicos en color negro, juntamente con las categorías de susceptibilidad que se observan en la Figura 31, proporciona una valiosa herramienta para correlacionar la presencia de eventos de remoción en masa y realizar una interpretación visual del resultado del modelo. Se destaca que la mayor extensión de la zona de media montaña y la transición a alta montaña en el municipio de Palmira se ubica predominantemente en la categoría de susceptibilidad media a alta. Esta observación adquiere especial relevancia al considerar el historial de eventos en toda la región montañosa.

La aceptabilidad visual del modelo de susceptibilidad se refuerza al tener en cuenta que históricamente se han registrado eventos en toda la zona montañosa estudiada. Esta capacidad de correlación entre el modelo y la ocurrencia pasada de eventos subraya la idoneidad y validez de este. Además, se observa una marcada diferencia en la región de montaña alta, caracterizada por la presencia de geformas glaciares y mayormente cubierta por bosques y especies arbóreas típicas de zonas de páramo, a menudo sujetas a objetivos de conservación. En esta área, la susceptibilidad generalmente se clasifica como baja, proporcionando una visión equilibrada del riesgo asociado a movimientos en masa.

Este análisis visual robustece la confianza en la capacidad del modelo para discernir niveles de susceptibilidad en diversas áreas topográficas y ecológicas. La interpretación visual enriquece la comprensión del riesgo geodinámico en la región, respaldando la utilidad práctica del modelo en la gestión de riesgos y la toma de decisiones asociadas a eventos de remoción en masa. Inicialmente, las categorías asignadas al mapa de susceptibilidad se estructuraron en 5 clases; no obstante, posteriormente se simplificó esta clasificación a 3, siguiendo la matriz indicada en la Tabla 19. Esta adaptación refleja un refinamiento en la representación de la susceptibilidad, posiblemente para mejorar la interpretación y la aplicabilidad práctica del modelo. El proceso de reducción de clases sugiere una mayor claridad y simplicidad en la comunicación de los niveles de susceptibilidad, lo cual puede facilitar la comprensión y la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de riesgos asociados a movimientos en masa.

Tabla 19 Categorías de susceptibilidad

| Susceptibilidad | |
|------------------------|-------|
| Muy Baja | Baja |
| Baja | Baja |
| Media | Media |
| Alta | Alta |
| Muy Alta | Alta |

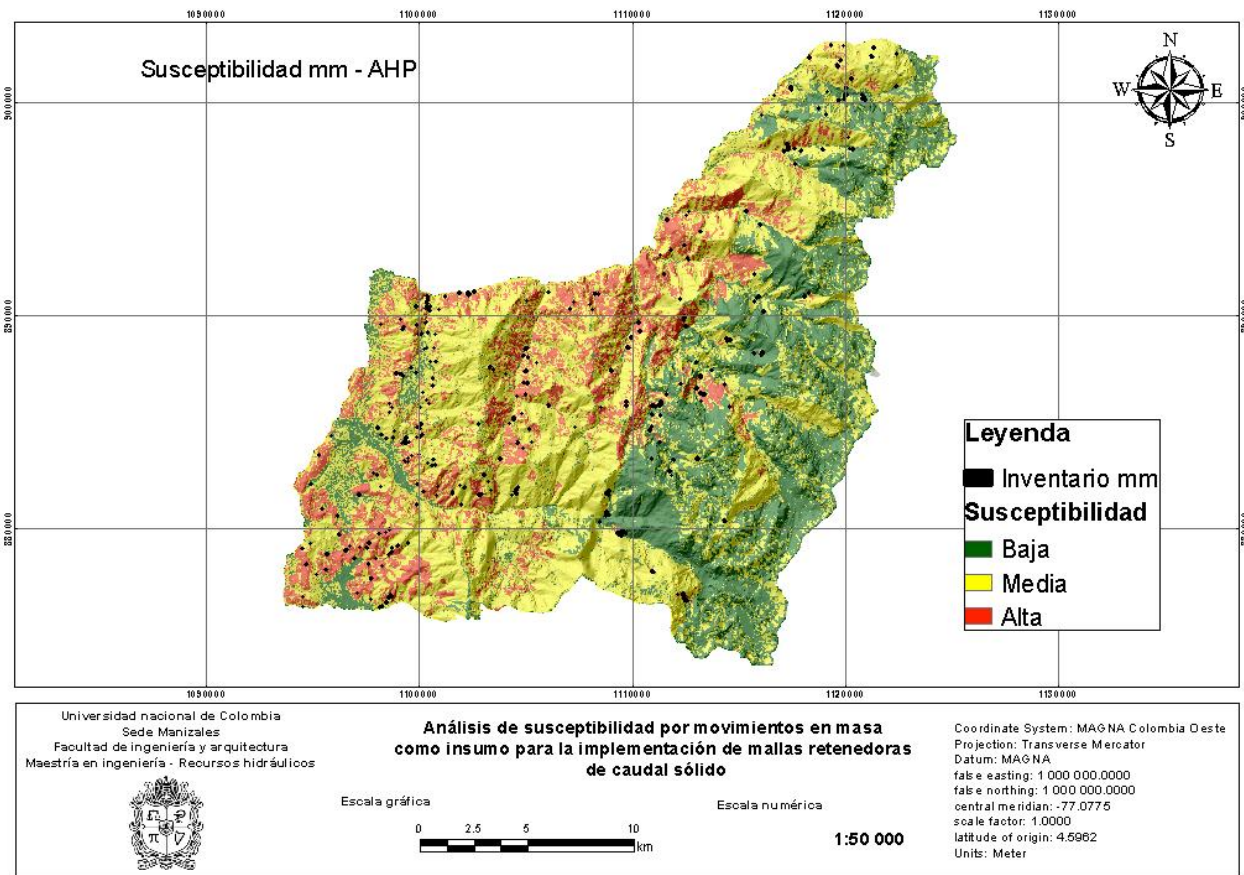
La Figura 32 presenta de manera visual los resultados después de llevar a cabo un ajuste significativo. Este ajuste, centrado en la reducción de las categorías de susceptibilidad, refleja una relación más estrecha entre los deslizamientos históricos inventariados y la capacidad predictiva del modelo. Además, visualmente facilita la identificación de las zonas con ausencia de procesos morfodinámicos al representarlas en color verde de manera más intuitiva. La figura

ofrece una representación gráfica clara de cómo estos ajustes impactan en la viabilidad de la zonificación como herramienta para la gestión del territorio.

Este ajuste específico permite una representación más precisa y cómoda de las áreas con distintos niveles de susceptibilidad, destacando aquellos lugares donde se han identificado históricamente deslizamientos. La figura proporciona una visión mejorada en comparación con la configuración inicial, donde las categorías eran más cautelosas al clasificar una zona con un nivel de susceptibilidad particular.

Este análisis visual resulta esencial para comprender el rendimiento del modelo, resaltando las áreas de optimización y brindando información clave para la interpretación de los resultados obtenidos en este proceso de ajuste. En última instancia, la Figura 32 contribuye significativamente a la mejora y eficacia de la zonificación, reforzando su utilidad como herramienta integral en la administración del territorio y la gestión de riesgos asociados a movimientos en masa.

Figura 32 Susceptibilidad por mm metodología AHP.



5.3 Propuesta para el levantamiento de campo

La comprensión de la importancia de contar con insumos de calidad y correctamente georreferenciados en el contexto de la gestión del riesgo de desastres sienta las bases para proponer un esquema de capacitación tipo taller. El objetivo principal de este taller es proporcionar los conocimientos prácticos esenciales para el uso eficiente de software y aplicaciones digitales. Estos recursos permitirán a la persona designada para atender eventos o desastres naturales registrar información fotográfica de manera consolidada en un único archivo, con georreferenciación precisa en las coordenadas correspondientes.

La formalización de la gestión del riesgo de desastres como un Sistema Nacional, según lo establecido en (Ley 1523, 2012), subsección 2, artículo sexto, establece como uno de sus objetivos fundamentales la "identificación de escenarios de riesgo y su priorización para estudio

con mayor detalle y generación de los recursos necesarios para su intervención". En consonancia con este marco normativo, y reconociendo que el conocimiento se construye a partir de insumos y recopilación de información, se propone la implementación de directrices en cada dirección o secretaría de gestión del riesgo de desastres.

La optimización de procedimientos y la estandarización de formatos que incluyan registros fotográficos, fechas y georreferenciación en visitas de emergencia o amenaza se convierten en componentes esenciales. Dichas salidas de cada dependencia destinada a la atención de una emergencia proporcionan la fecha del evento. Posteriormente, tras la comunicación del desastre en un plazo máximo de 1 o 2 días, se puede relacionar con eventos climáticos intensos o sísmicos.

En campo, se obtiene la georreferenciación y, luego, personal especializado puede recopilar registros detallados, como el tipo de evento y sus características geomorfológicas y geotécnicas. Con la implementación de técnicas prácticas para la toma de datos, cabe resaltar que se debe capacitar al personal en temas de principios básicos de gestión del riesgo de desastres, terminología y cálculos básicos para la estimación de medidas en campo de los deslizamientos y la interpretación de las evidencias de campo para además, comprender como los agentes detonantes provocan dichos eventos, teniendo en cuenta el apoyo de las fotografías con escala para que la información pueda ser corroborada en oficina. Por otra parte, de contar con la presencia de un geólogo al servicio de cada municipio, esta persona puede fomentar y apoyar la gestión desde las visitas hasta las mismas capacitaciones teniendo en cuenta las recomendaciones y la propuesta de (González & Rangel-Buitrago, 2024) de la necesidad de un geólogo por municipio, buscando reducir la condición del riesgo a partir de dicha iniciativa fomentando el apoyo obligatorio de un geólogo en labores detalladas concernientes a la amenaza y riesgo por fenómenos naturales, exponiendo que este tipo de profesional es completamente idóneo debido a la experticia en temas concernientes al suelo, rocas, agua superficial y subterránea, amenaza sísmica, etc. Esta metodología integral garantiza la recopilación de información necesaria para brindar insumos de calidad en la toma de decisiones y la intervención oportuna frente a eventos de riesgo. En resumen, la propuesta no solo se enfoca en la eficiencia operativa, sino también en la calidad y precisión de la información recopilada, fortaleciendo así la capacidad de respuesta y gestión del riesgo de desastres a nivel nacional.

Con el objetivo de simplificar la recopilación de información sobre deslizamientos, se propone emplear la metodología descrita en (Cruden & Varnes, 1996), la cual ofrece un enfoque sistemático para estimar las dimensiones de los deslizamientos basándose en observaciones de campo. En caso de disponer de las herramientas apropiadas, se sugiere utilizar drones o imágenes satelitales que faciliten la observación visual cómoda del deslizamiento, permitiendo obtener dimensiones precisas y detalladas. Esta combinación de metodología tradicional respaldada por tecnologías modernas optimiza la eficiencia en la recopilación de datos, mejorando la calidad y la exactitud de la información recabada sobre los deslizamientos.

Además, la metodología propuesta por (Cruden & Varnes, 1996) ofrece un marco sólido para la evaluación de las dimensiones del deslizamiento, considerando factores clave como la extensión lateral, profundidad y altura. Al implementar esta metodología, se busca obtener una comprensión detallada de la magnitud del deslizamiento, lo cual es esencial para una gestión eficaz del riesgo por deslizamiento como insumo del levantamiento de información relevante permitiendo los cálculos de material y volumen de cada proceso Figura 33.

La incorporación de tecnologías avanzadas, como drones o imágenes satelitales, añade un componente innovador al proceso de recopilación de datos. Estas herramientas permiten una observación remota detallada, mejorando la capacidad para visualizar y cuantificar las dimensiones del deslizamiento de manera eficiente y segura. Esta integración de métodos tradicionales con tecnología de vanguardia no solo agiliza el proceso de evaluación, sino que también enriquece la calidad y la precisión de los datos recabados, contribuyendo así a una toma de decisiones más informada en materia de gestión del riesgo.

La aplicación de la metodología se centra primordialmente en las dimensiones superficiales del deslizamiento, que pueden medirse con una precisión suficiente para evaluar con errores en el rango de centímetros la altura del talud, su ancho y pendiente. Este proceso puede llevarse a cabo mediante el uso de herramientas básicas como cinta métrica y brújula, lo que proporciona resultados satisfactorios.

Sin embargo, se destaca que, en caso de contar con la capacidad de aplicar fotogrametría, se logra una medición altamente precisa del ancho y largo tanto del talud como del cuerpo de deslizamiento. La fotogrametría permite aprovechar la información visual recopilada para obtener

medidas detalladas con una exactitud significativamente mayor. Este enfoque más avanzado ofrece ventajas sustanciales, especialmente en situaciones donde la precisión en las dimensiones del deslizamiento es crucial para la estimación de la profundidad del cuerpo y de la superficie de falla, parámetros esenciales para el cálculo de la masa desplazada.

Figura 33 Plantilla de reporte para la adquisición de información de mm. Fuente: Modificado de (Cruden & Varnes, 1996)

| REPORTE DESLIZAMIENTO | | | | # Inventario |
|---|---|--|--|---|
| | | | | <input style="width: 50px;" type="text"/> |
| Fecha del reporte: | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> | |
| | día | mes | año | |
| Fecha ocurrencia del evento: | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> | |
| | día | mes | año | |
| Ubicación deslizamiento | <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> | | | |
| Nombre de quien hace el reporte: | <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> | | | |
| Entidad: | <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> | | | |
| Coordenadas: | | Grados | Minutos | Segundos |
| | Latitud | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> |
| | Longitud | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> |
| | Altitud | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> | <input style="width: 50px;" type="text"/> |
| Superficie de ruptura | Corona | <input style="width: 50px;" type="text"/> | msnm | |
| | Talón | <input style="width: 50px;" type="text"/> | msnm | |
| | Pata | <input style="width: 50px;" type="text"/> | msnm | |
| Geometría: | | Superficie ruptura | Masa desplazada | |
| | Largo | L _r = <input style="width: 50px;" type="text"/> | L _d = <input style="width: 50px;" type="text"/> | L = <input style="width: 50px;" type="text"/> |
| | Ancho | W _r = <input style="width: 50px;" type="text"/> | W _d = <input style="width: 50px;" type="text"/> | |
| | Profundidad | D _r = <input style="width: 50px;" type="text"/> | D _d = <input style="width: 50px;" type="text"/> | |
| Volúmen: | V_{antes} = | $\frac{\pi \times L_r \times D_r \times W_r}{6}$ | <input style="width: 50px;" type="text"/> | m ³ |
| | Factor de hinchamiento <input style="width: 50px;" type="text"/> | | | |
| | V_{despues} = | $\frac{\pi \times L_d \times D_d \times W_d}{6}$ | <input style="width: 50px;" type="text"/> | m ³ |
| Daños: | Elementos expuestos | <input style="width: 100%; height: 50px;" type="text"/> | | |

La descripción de la geometría del deslizamiento se basa en el esquema general para deslizamientos rotacionales donde se asume una masa deslizada sobre una superficie de falla cóncava donde pueden evidenciarse varios elementos del deslizamiento Figura 7.

La descripción completa de las dimensiones parte de las medidas visibles en campo o por medio de fotogrametría Figura 34.

Figura 34 Dimensiones idealizadas del deslizamiento. La línea punteada se refiere a la superficie antes de ser deslizado. Fuente: (Cruden & Varnes, 1996)

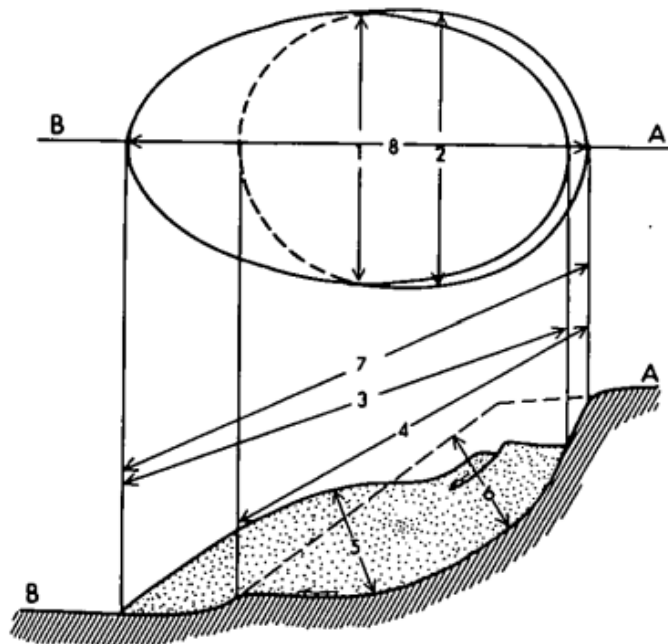


Tabla 20 Definiciones de las dimensiones del deslizamiento. Fuente: Modificado de (Cruden & Varnes, 1996)

| # | Nombre | Nomenclatura |
|---|--------------------------------------|--------------|
| 1 | Ancho de masa deslizada | Wd |
| 2 | Ancho de superficie de ruptura | Wr |
| 3 | Longitud de masa desplazada | Ld |
| 4 | Longitud de superficie de ruptura | Lr |
| 5 | Profundidad de masa desplazada | Dd |
| 6 | Profundidad de superficie de ruptura | Dy |
| 7 | Longitud total | L |
| 8 | Longitud de línea central | Lci |

Estas definiciones Tabla 20 proporcionan un marco de referencia esencial para evaluar la magnitud y la geometría del deslizamiento, al establecer claramente las dimensiones superficiales, como la altura del talud, el ancho y la pendiente, se obtiene una visión detallada de la configuración del deslizamiento.

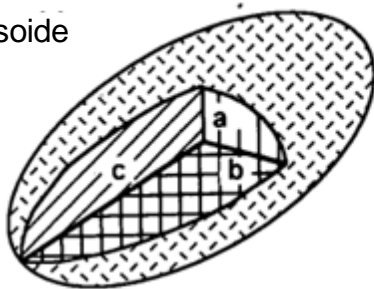
Esto no solo es crucial para comprender la extensión del fenómeno, sino que también facilita la identificación de posibles factores desencadenantes y la estimación de posibles riesgos asociados. Además, al emplear tecnologías avanzadas como la fotogrametría para medir con alta precisión el ancho y largo del deslizamiento, se agrega una capa adicional de detalle que mejora la calidad de la información recopilada. En conjunto, estas definiciones dimensionales proporcionan la base necesaria para una evaluación completa y precisa del deslizamiento.

El propósito final del cálculo del volumen de la masa deslizada implica considerar elementos geométricos, especialmente la profundidad del cuerpo, que se pueden calcular mediante perforaciones o técnicas geofísicas. Además, se tiene en cuenta un fenómeno adicional: después del movimiento, las partículas se descohesionan, provocando que el material ocupe más espacio y, por ende, incremente el volumen total.

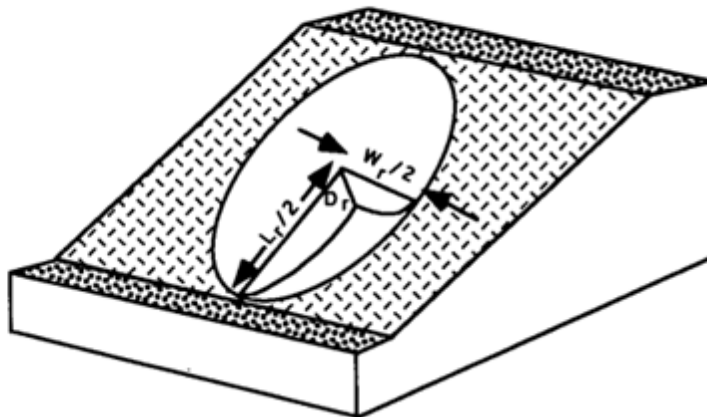
El principio fundamental para calcular el volumen se basa en modelar el espacio removido de la ladera como la mitad de un elipsoide Figura 35. Esta aproximación geométrica proporciona una representación efectiva de la forma de la masa deslizada, permitiendo estimar de manera precisa la magnitud del volumen afectado por el deslizamiento. Integrar la información sobre la profundidad del cuerpo y la expansión posmovimiento de las partículas en este modelo elipsoidal permite obtener un cálculo más robusto y detallado del volumen total de la masa deslizada.

Figura 35 Estimación del volumen de un elipsoide. Fuente: (Cruden & Varnes, 1996)

(a) Elipsoide



(b) Deslizamiento



El reconocimiento de la forma semicircular, común en deslizamientos rotacionales, es fundamental para desarrollar un modelo geométrico que refleje fielmente las características del terreno afectado. Integrar esta forma específica en el cálculo del volumen contribuye a una evaluación más realista de la magnitud del deslizamiento y, por ende, a una mejor comprensión de su impacto en el entorno en cuanto a cuencas se refiere, sirve como insumo para el cálculo de volumen aportado, información sobre la cuál, se pueden tomar decisiones para implementar medidas estructurales de retención de caudal sólido.

El cálculo del volumen se aborda asumiendo la forma de una cuchara o medio elipsoide, ya que los deslizamientos rotacionales tienden a tener una geometría similar a un semicírculo, como se describe en (Cruden & Varnes, 1996) Esta aproximación en forma de medio elipsoide proporciona una representación eficaz de la morfología del deslizamiento, permitiendo una estimación más precisa del volumen desplazado. Esta estimación se aborda desde 2 perspectivas, puede ser el del cuerpo del deslizamiento previo al momento de la falla o la masa deslizada una vez ocurrido el movimiento, como la ocurrencia del evento provoca que el material sea removido y desequilibrado, el volumen se estima que aumenta un 67% (Church, 1981), sin embargo esta capacidad de hinchamiento en lo posible debe ser corroborada con métodos geofísicos realizando ensayos de geoelectrónica o líneas de refracción sísmica que permitan contrastar el terreno cohesionado y denso con los materiales relativamente sueltos de la masa

deslizada. Las ecuaciones (11) y (12) indican la fórmula para el cálculo de volumen de ambas condiciones, antes y después de la falla.

$$VOL_{ls} = \frac{1}{6} \pi D_r W_r L_r \quad (11)$$

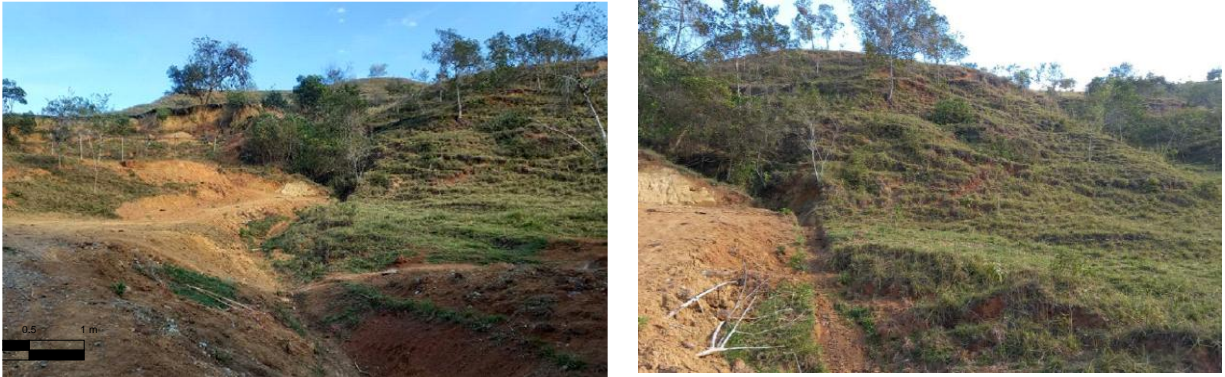
$$VOL_{ls} = \frac{1}{6} \pi D_d W_d L_d \quad (12)$$

5.3.1 Deslizamiento La Zapata – Zona rural Palmira

En la zona de rural de Palmira, montaña media alrededor de 1213 msnm se encuentra el corregimiento de La Zapata. En el sector donde se ubica el puente que comunica con la vereda Llanitos, se presenta un movimiento en masa de tipo rotacional, comprometiendo la vía de conexión, predios privados generando subsidencia y perdiendo terreno, adicionalmente, el proceso denudacional compromete entre otras cosas, la quebrada Baquero Figura 38, lo que configura una condición de riesgo por represamiento del cauce y la capacidad de desencadenar un evento torrencial. Sobre este sector se realizaron visitas de reconocimiento con el fin de estimar las dimensiones del deslizamiento principalmente los espesores y calcular los volúmenes que se exponen en el presente informe. Por otra parte, se dispone de fotografía con drone, lo cual facilita la obtención de las medidas de longitud y ancho de las superficies requeridas en el formato de la Figura 33, posteriormente la ortofoto debidamente georreferenciada se analizó con herramientas SIG y se logró obtener las medidas de longitud de la superficie de ruptura, longitud de la masa deslizada, ancho de la superficie de ruptura, ancho de la masa deslizada y longitud total Figura 39.

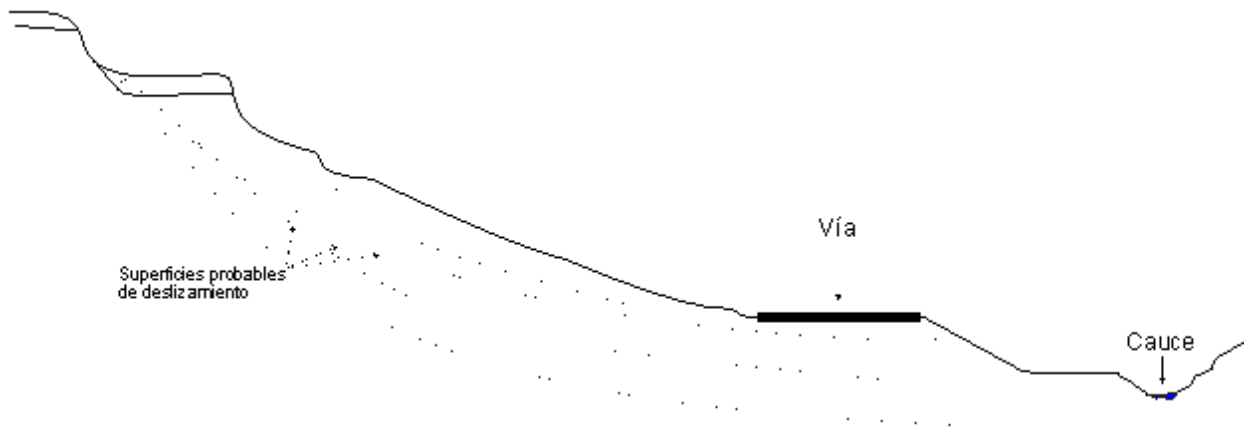
En un primer acercamiento, el deslizamiento evidencia superficies con erosión por pisadas de ganado, cicatrices y surcos provocados por la lluvia Figura 36. Su morfología sugiere un deslizamiento rotacional, soportado por el tipo de material el cual se caracteriza como suelo pardo rojizo, ocasionalmente amarillento blancuzco variando su coloración dependiendo el grado de meteorización, de tamaño limo arenoso de plasticidad media. El origen del suelo se relaciona con la degradación y meteorización de rocas compuestas por minerales ferromagnesianos posiblemente los basaltos de la formación Amaime.

Figura 36 Deslizamiento la Zapata.



Las pisadas de ganado como agente erosivo implican la degradación progresiva del terreno, destruyendo la cobertura vegetal desnudando el terreno, aparte, provocando planos de infiltración por los cuales el agua ingresa a la estructura y matriz del suelo y de esta manera saturando el terreno y desequilibrando los esfuerzos. En cuanto al plano de falla, se asume un plano rotacional Figura 37 debido a la naturaleza cohesiva de los materiales, pues su granulometría provoca principalmente planos de deslizamiento circulares (siendo las superficies planares más comunes en suelos friccionantes o de granulometrías gruesas como arenas y gravas) aunque en las superficies de falla planar una excepción resulta cuando se presenta estratificación y uno de las láminas o estratos se desliza sobre otro que por condiciones litológicas permanece en equilibrio mientras el estrato superior no.

Figura 37 Esquema de deslizamiento.



Una vez caracterizado el deslizamiento, se procede con la estimación y medición de la geometría de este con el fin de calcular el volumen de material deslizado implementando el formato propuesto para el presente estudio Figura 33.

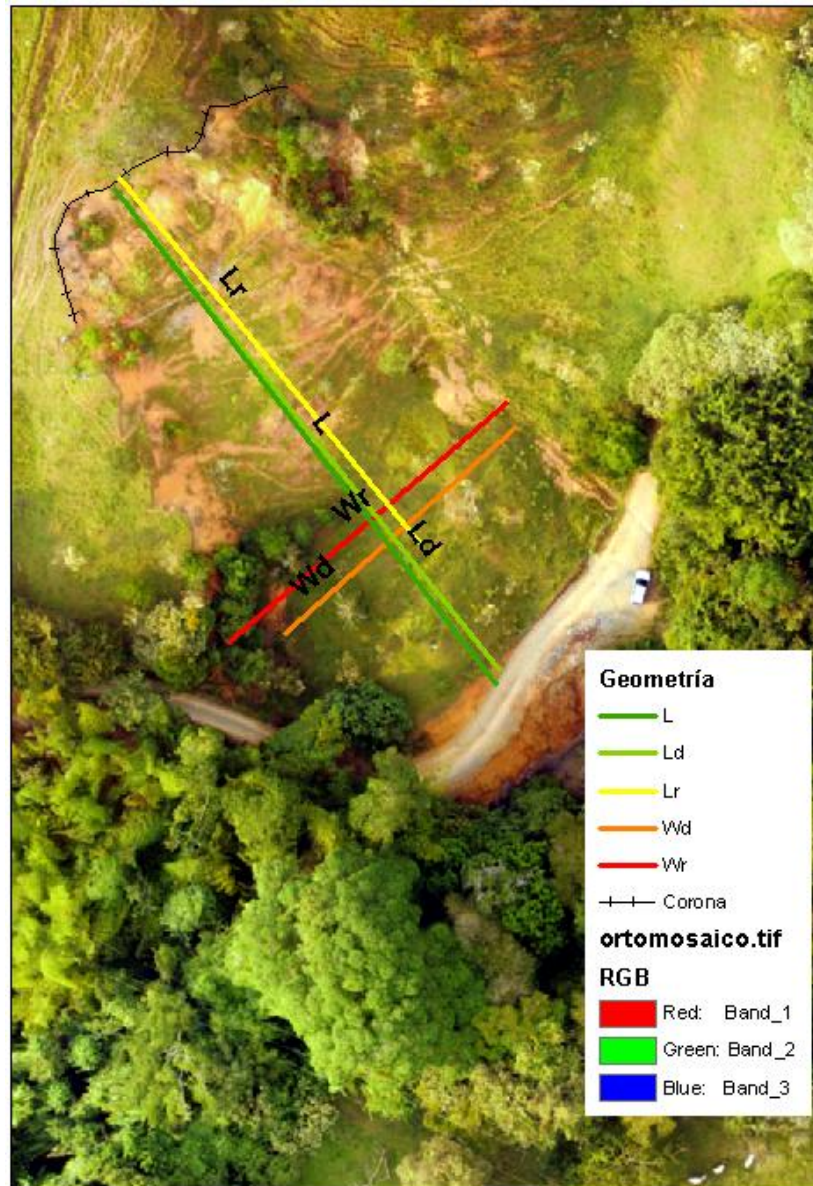
Figura 38 Quebrada Baquero, corregimiento la Zapata.



Inicialmente se procede con los cálculos de las dimensiones con el software GIS dibujando líneas sobre la ortofoto Figura 39 y posteriormente solicitando al software que indique las longitudes. A partir de observaciones de campo, se estiman las profundidades tanto de la masa deslizada como de la posible superficie de ruptura con la superficie del terreno, estos 2 parámetros resultan los de mayor complejidad por la incertidumbre que existe entre la superficie de falla antes y después del deslizamiento, sin embargo, de contar con la posibilidad de realizar perforaciones, pueden correlacionarse la dureza del suelo con el cambio de comportamiento, teniendo en cuenta que el material original debe tener mayor dureza o consolidación, que el material luego del deslizamiento, pues al ser removido su comportamiento es más suave. La profundidad puede estimarse a partir de afloramientos cercanos en los cuales se pueda observar que altura tiene el mismo perfil de suelo, en caso de no medir la profundidad posterior a la falla, puede aplicarse el

factor de hinchamiento propuesto por (Church, 1981) aumentando la profundidad un 67 % del original.

Figura 39 Deslizamiento La Zapata.



Durante las labores de reconocimiento de campo, se estiman las dimensiones y se diligencia el formato indicado Figura 33, empezando por la fecha del reporte, se consulta con las personas del sector de ocurrencia la fecha de ocurrencia del evento (1, 2, 3 de la Figura 40).

Figura 40 Reporte de deslizamiento diligenciado para deslizamiento en corregimiento la Zapata.

REPORTE DESLIZAMIENTO

Inventario 001 1

Fecha del reporte: 02 Nov 2023 2
día mes año

Fecha ocurrencia del evento: 3
día mes año

Ubicación deslizamiento Cerro La Zapata - Vía vereda el Llano 4

Nombre de quien hace el reporte: Sergio Sánchez 5

Entidad: Independiente 6

Coordenadas:

| | Grados | Minutos | Segundos | |
|-----------------------|--------|---------|----------|----|
| Latitud N | 3 | 31 | 30,46 | 7 |
| Longitud O | 76 | 12 | 9,65 | 8 |
| Altitud | | 1213 | msnm | 9 |
| Superficie de ruptura | Corona | 1217 | msnm | 10 |
| | Talón | | msnm | 11 |
| | Pata | 1212 | msnm | 12 |

Geometría:

| | Superficie ruptura 13 | Masa desplazada 14 | | 15 |
|-----------------|---|--|-----|--|
| Largo (m) | L _r = 54,8 | L _d = 70 | L = | 73,02 |
| Ancho (m) | W _r = 42,7 | W _d = 36,05 | | |
| Profundidad (m) | D _r = 3,2 | D _d = 4 | | |

Volúmen: 16

| | | | | |
|---------------|--|---------|-------|--|
| $V_{antes} =$ | $\frac{\pi \times L_r \times D_r \times W_r}{6}$ | 3920,64 | m^3 | |
|---------------|--|---------|-------|--|

18

| |
|----------------------------|
| Factor de hinchamiento (%) |
| 74 |

$V_{despues} =$ $\frac{\pi \times L_d \times D_d \times W_d}{6}$ 17
5285,21 m^3

Daños: Elementos expuestos 19

Posterior a diligenciar la información respecto a la fecha y ubicación, se indica la persona encargada de llenar el formulario y su relación con la respectiva dependencia con la cual realiza la visita (4, 5 y 6 de la Figura 40). Con el apoyo de herramientas de geoprocésamiento como GPS o celulares, se obtienen las coordenadas del deslizamiento y la altitud de la corona, talón y pata (7, 8, 9, 10, 11 y 12 de la Figura 40).

Los datos de medición para el largo, ancho y profundidad de la superficie de ruptura como de la masa deslizada, se obtienen en campo con la ayuda de cinta métrica, metro, topografía de campo o en caso de que el deslizamiento sea de una magnitud tal que no permita recorrer la superficie de éste, se recomienda obtener la información por medio de fotografías obtenidas con dron. Otra alternativa es el uso de distanciómetro para hallar las distancias y estimar el largo y ancho de los parámetros geométricos requeridos. Las dimensiones 13, 14 y 15 de la Figura 40 para el caso de estudio que se cuenta con la fotografía de dron, se calcularon las distancias por medio del software GIS Figura 39.

Al finalizar las mediciones, sea en campo con las herramientas propuestas o durante el trabajo de escritorio, se calculan los volúmenes (en campo con calculadora de mano o celulares) tanto para la superficie de falla como para la masa deslizada, cabe resaltar que en caso de que la incertidumbre en las profundidades no permita estimar los valores de espesores antes y después de la falla, se puede optar por la opción de implementar una profundidad y se aplique el factor de hinchamiento del 67%. Para el caso de la Zapata, la profundidad antes se adquirió tomando como nivel de referencia la superficie de las laderas adyacentes y el desnivel marcó la profundidad del talud, por lo que se asignaron los valores (16 y 17) con los que posteriormente se calculó el porcentaje de hinchamiento (18) de la Figura 40. Con el fin de complementar los datos de campo, aprovechando la asistencia al lugar del evento, se solicitan datos como daños, elementos expuestos, damnificados o toda la información pertinente al componente social (19 de Figura 40).

Tabla 21 Cálculo de volumen a partir de datos adquiridos del reporte propuesto.

| Dimensiones del deslizamiento | | |
|--|---------------|----------------------|
| Cálculo de Volumen de masa desplazada | | |
| Número | Nombre | Dimensión (m) |
| 1 | $W_d =$ | 36.05 |
| 2 | $W_r =$ | 42.7 |
| 3 | $L_d =$ | 70 |
| 4 | $L_r =$ | 54.8 |
| 5 | $D_d =$ | 4.00 |
| 6 | $D_r =$ | 3.20 |
| 7 | $L =$ | 73.02 |

Aplicando las ecuaciones (11) y (12) con los valores de la Tabla 21, se procedió con las operaciones matemáticas para el cálculo de los respectivos volúmenes:

$$VOL_{antes} = \frac{1}{6} \pi * 3.2 * 42.7 * 54.8 \quad (13)$$

$$VOL_{después} = \frac{1}{6} \pi * 70 * 4 * 36.05 \quad (14)$$

Los resultados fueron:

$$VOL_{antes} = 3920.64 \text{ m}^3 \quad (15)$$

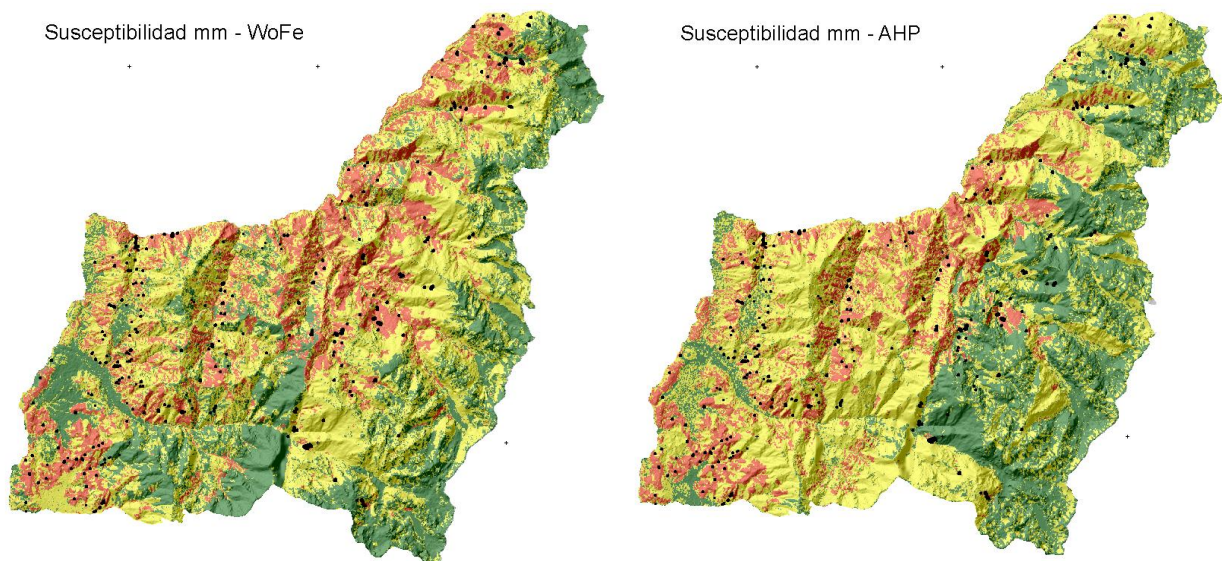
$$VOL_{después} = 5285.21 \text{ m}^3 \quad (16)$$

La masa deslizada final es de 5285.21 m³, lo que indica un porcentaje de hinchamiento del 74% con respecto al volumen inicial calculado. Este factor puede recopilarse durante el desarrollo de otras campañas de campo en las que se pueda obtener este factor y posteriormente sea corregido para que pueda ser ajustado a la misma UGS.

5.4 Comparación de metodologías de zonificación

Los resultados de la zonificación están ligados al porcentaje de éxito de cada uno, el cual consiste en una muestra de los movimientos en masa inventariados superpuestos con la capa de susceptibilidad de cada uno de los métodos, de esta manera se puede estimar que tan predictivo resultó el modelo. Por otra parte, las metodologías son distintas en cuanto a sus principios matemáticos por lo que sería complejo determinar cuál es mejor que la otra de manera objetiva, sin embargo, teniendo en cuenta que se tienen mapas de calor de las visitas realizadas en campo para inventariar movimientos en masa desde el año 2020, se superpondrá el mapa con las señales de calor usando herramientas SIG y por medio de la observación se estimará cual modelo resulta más ajustado a la realidad.

Figura 41 Resultado de la susceptibilidad por mm de las metodologías utilizadas.



Las metodologías empleadas para evaluar la susceptibilidad, a pesar de tener fundamentos matemáticos y estadísticos distintos, han arrojado resultados satisfactorios. Cada una de estas metodologías, respaldada por su correspondiente proceso de validación, ha superado las expectativas en términos de precisión del modelo, Tabla 22.

Tabla 22 Resumen de los resultados de validación de las metodologías utilizadas.

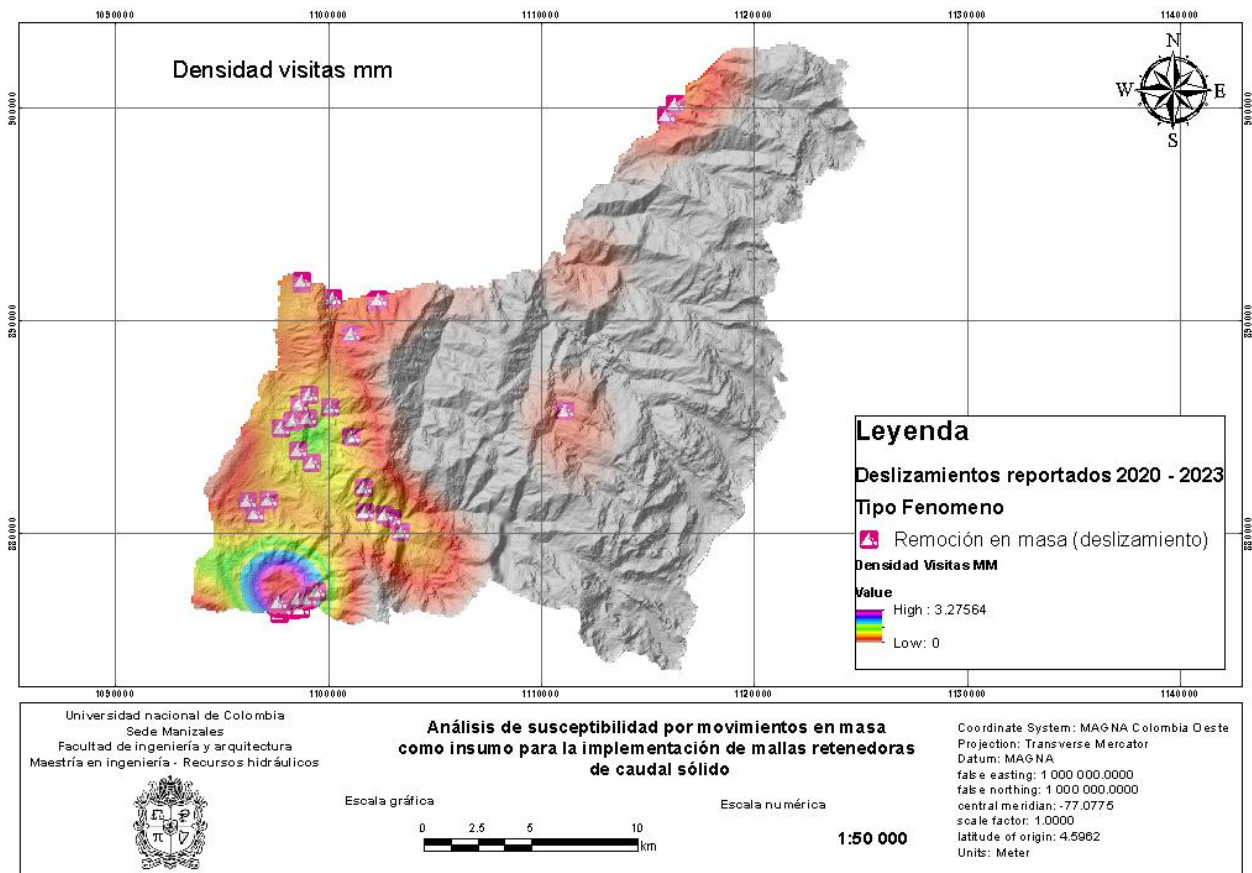
| Indicador | Metodología | Valor de referencia | Fuente | Resultado |
|------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|------------------|
| AUC | Wofe | > 76% | (MINMINAS & SGC, 2017) | 84% |
| CR | AHP | < 0.1 | (Saaty & Vargas, 2001) | -0.13 |

Es necesario resaltar que el inventario de movimientos en masa empleado para llevar a cabo las modelaciones incorporó un enfoque integral que incluyó la interpretación de imágenes satelitales de diversas temporalidades. Es fundamental reconocer que algunos de los deslizamientos cartografiados en este inventario pueden no ser fácilmente identificables en el terreno en la actualidad, ya sea debido a su antigüedad o a la posible cobertura por vegetación.

Es relevante tener en cuenta que las imágenes satelitales utilizadas abarcan múltiples períodos, lo que proporciona una perspectiva histórica de los eventos de movimientos en masa. No obstante, la naturaleza dinámica del entorno, junto con el potencial crecimiento de vegetación, puede dificultar la detección de ciertos deslizamientos en la realidad actual.

Adicionalmente, se destaca que el mapa de densidades, coloquialmente conocido como "mapa de calor", se ha generado exclusivamente a partir de los deslizamientos identificados durante las visitas realizadas en campo, donde se llevó a cabo la recopilación de información de manera directa. Este enfoque, basado en datos de campo más recientes y detallados, refuerza la precisión y relevancia del mapa de susceptibilidad generado para una gestión efectiva del riesgo de desastres.

Figura 42 Mapa de densidad de visitas por mm.



Desde el año 2020, se han registrado visitas realizadas por la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres de la ciudad de Palmira, con el propósito de evaluar deslizamientos o pérdidas de banca. Durante estas visitas de campo, se pudo constatar que algunos de estos deslizamientos se encuentran activos o presentan características latentes. Utilizando esta información como base, se lleva a cabo un análisis de validación para ambos modelos, Weigth of Evidence (Wofe) y Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP), con el objetivo de verificar la precisión de los modelos en la identificación de las zonas más susceptibles a deslizamientos. Es importante señalar que existen áreas específicas en el municipio de Palmira, especialmente en la zona nororiental, donde se han registrado numerosos deslizamientos, siendo evidenciados por cortes en las carreteras, como se ilustra en la Figura 42.

Con el fin de decidir cual mapa de susceptibilidad establecer como el final o definitivo, se analizaron los resultados de cada uno por los métodos elaborados, realizando una validación visual relacionando los eventos registrados del inventario y la realidad a partir del grado de susceptibilidad. Las geoformas resultan uno de los criterios que más resaltan al momento de analizar tendencias sobre todo en modelos de susceptibilidad por eventos naturales, en la comparación de los métodos llevados a cabo, resalta las zonas con geoformas de origen fluvial como lo son abanicos, llanuras y terrazas, de lo cual se esperan resultados de susceptibilidad bajos, pues corresponden a zonas planas donde no se generan taludes o deslizamientos comúnmente Figura 43.

Figura 43 Comparación de modelos de susceptibilidad en zonas de geoformas fluviales y pendientes bajas.

Susceptibilidad mm - WoFe

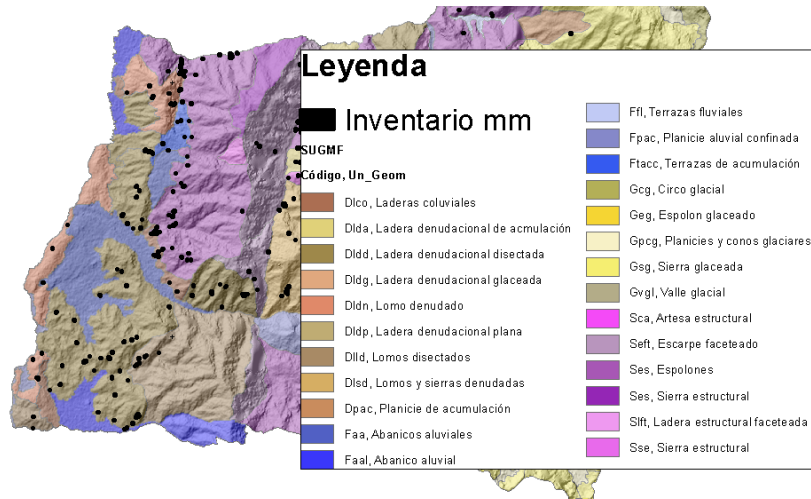


Susceptibilidad mm - AHP



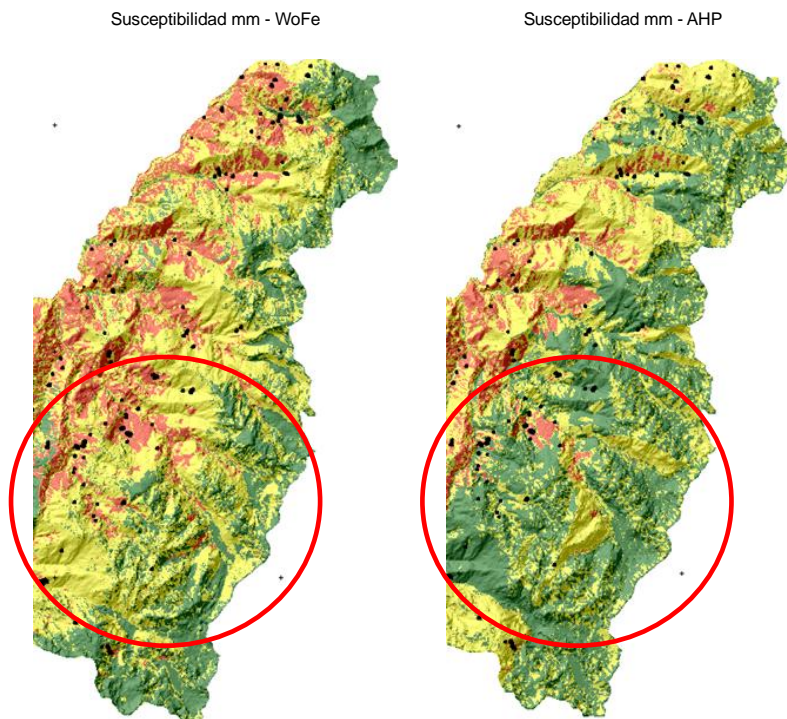
El relieve sombreado facilita la interpretación donde es evidente que corresponde a zona plana o pendientes bajas y geoformas relacionadas con abanicos aluviales Figura 44, conos de eyección y otras unidades formadas por agentes principalmente fluviales con aporte gravitacional.

Figura 44 Acercamiento de las geofomas de la zona de montaña baja y media.



Las evidencias de deslizamientos en la zona indicada son nulas, por ende, el modelo de mayor aceptación será el que en dicho sector exponga un grado de susceptibilidad baja como lo demuestra el método Wofe Figura 43.

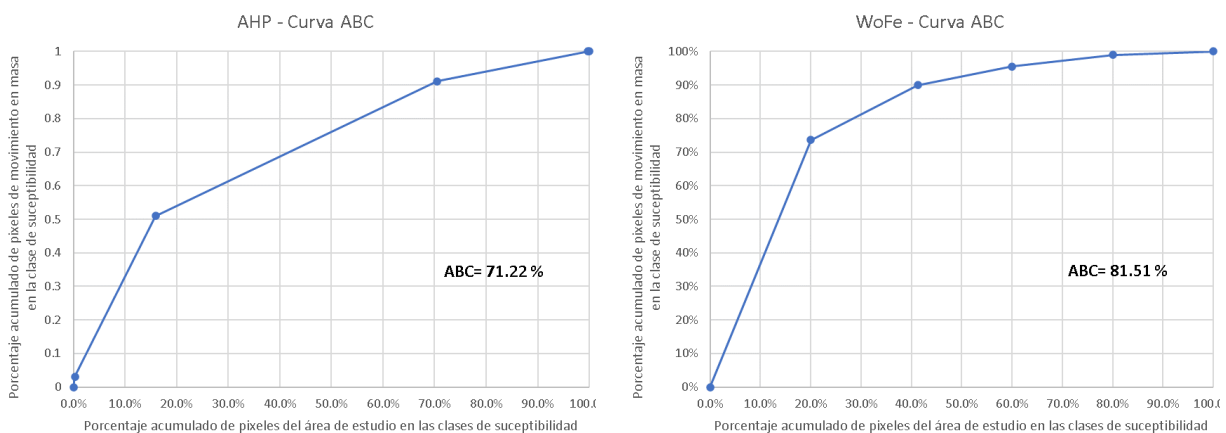
Figura 45 Comparación de modelos de susceptibilidad para la zona de montaña alta de Palmira.



La zona alta del municipio de Palmira, donde predominan las geformas de origen glaciar y coberturas boscosas y suelos de protección, cuenta con poca presencia de procesos denudacionales inventariados, sin embargo se observaron por medio de interpretación de imágenes satelitales que algunos sectores muestran rasgos de cicatrices de deslizamientos o procesos erosivos inactivos y antiguos, su edad relativa se interpretó una vez se corroborara con las imágenes multitemporal que en la actualidad se encuentran cubiertos por cobertura vegetal. Estos rasgos de procesos denudacionales se tuvieron en cuenta para el cálculo de susceptibilidad, por esta razón, los modelos muestran rangos de susceptibilidad media, sin embargo, el método AHP cuenta con zonas de susceptibilidad baja en lugares donde existen deslizamientos inventariados Figura 45, por esta razón, se opta por el método Wofe para el mapa de zonificación final, ya que evidencia las zonas de susceptibilidad media y alta en los lugares donde coexisten los deslizamientos o procesos erosivos.

La validación de los modelos aplicados para el cálculo de la susceptibilidad por mm implementan principios diferentes aunque los dos cumplen a cabalidad con los criterios para ser considerados como válidos, sin embargo, con el fin de aplicar un juicio de manera objetiva sobre ambos métodos y elegir el modelo definitivo, se implementó el método de la curva de éxito para ambos mapas una vez clasificados en las 5 categorías, de manera que se pueda tener un mismo método de validación para ambos métodos Figura 46.

Figura 46 Curva de éxito para los métodos AHP (izquierda) y Wofe (derecha).



Validando los métodos a partir de las curvas ABC que comprueban el éxito o la capacidad predictiva de los métodos, además del análisis sobre las zonas con deslizamiento y su grado de susceptibilidad que marcan un nivel de coherencia con el modelo, se opta finalmente por elegir el resultado del método Wofe como la herramienta final determinante para la toma de decisiones en términos de la aplicabilidad en el municipio con el fin de continuar alimentando el inventario y la cartografía de los factores condicionantes.

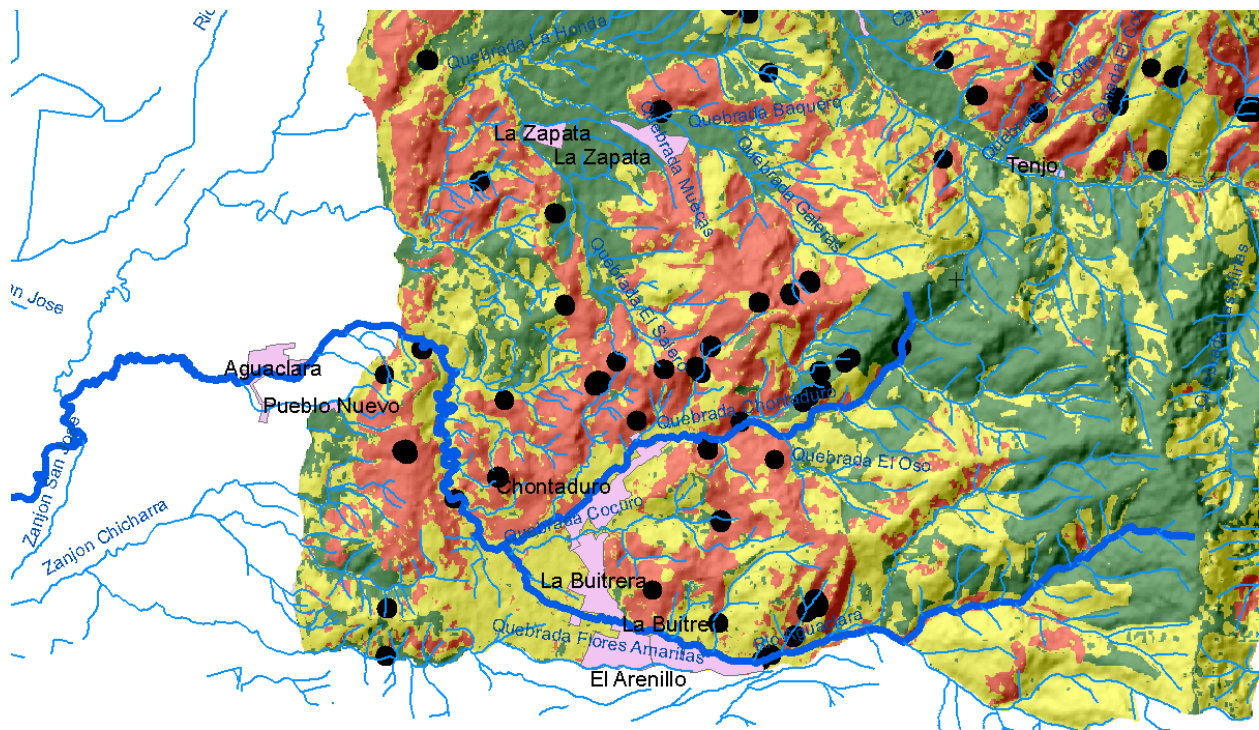
5.5 Reducción del riesgo por avenidas torrenciales

El resultado de la susceptibilidad por mm es el insumo principal para adelantar los trabajos necesarios que permitan priorizar las zonas sobre las cuales la implementación de las mallas retenedoras pueden ser implementadas y que cumplan su labor al momento de retener sólidos que reduzcan considerablemente el caudal sólido y de esta manera la reducción de la condición de riesgo por avenidas torrenciales teniendo en cuenta los movimientos en masa como factor detonante de éstos fenómenos al ser procesos que depositan material deslizado sobre los cauces que ocasionalmente pueden generar represamiento acumulando materia y energía y posteriormente desencadenando flujos hiperconcentrados cargados de sólidos y materializando la condición de riesgo por avenida torrencial.

5.5.1 Cuenca Aguaclara - Chontaduro

La importancia del presente estudio es promover la optimización de los insumos de tal manera que se cuente con resultados superiores o por lo menos con un alto grado de confiabilidad que reduzcan el margen de error y el sobredimensionamiento de las obras de mitigación. Un resultado óptimo puede ser medido con el porcentaje de éxito del modelo de susceptibilidad por mm, buscando lograr siempre un valor superior, lo cual se logra mejorando los insumos que, a su vez, se ven optimizados por la calidad de la cartografía, los recorridos de campo y la interpretación del profesional. Por otra parte, al establecer los métodos de recolección de datos, se promueve el mejoramiento del inventario, así, optimizando adicionalmente la validación del modelo de susceptibilidad, buscando entre otras cosas, la depuración de procesos erróneamente indicados o inexistentes.

Figura 47 Cuenca del río Aguaclara y centros poblados o corregimientos aferentes a la dinámica fluvial del río homónimo. Fuente: Modificado de (IGAC, s/f)



La cuenca del río Aguaclara Figura 47 localizada al sur del municipio de Palmira, límites con el norte de Pradera, cuenta con el afluente homónimo que nace más o menos a 2600 msnm descendiendo hacia el occidente pasando por el centro poblado el Arenillo, la Buitrera donde se encuentra con el afluente de la quebrada Chontaduro, asimismo, recorriendo el trazo sobre el centro poblado Chontaduro para finalmente descender y abandonar el confinamiento en el piedemonte del centro poblado Aguaclara.

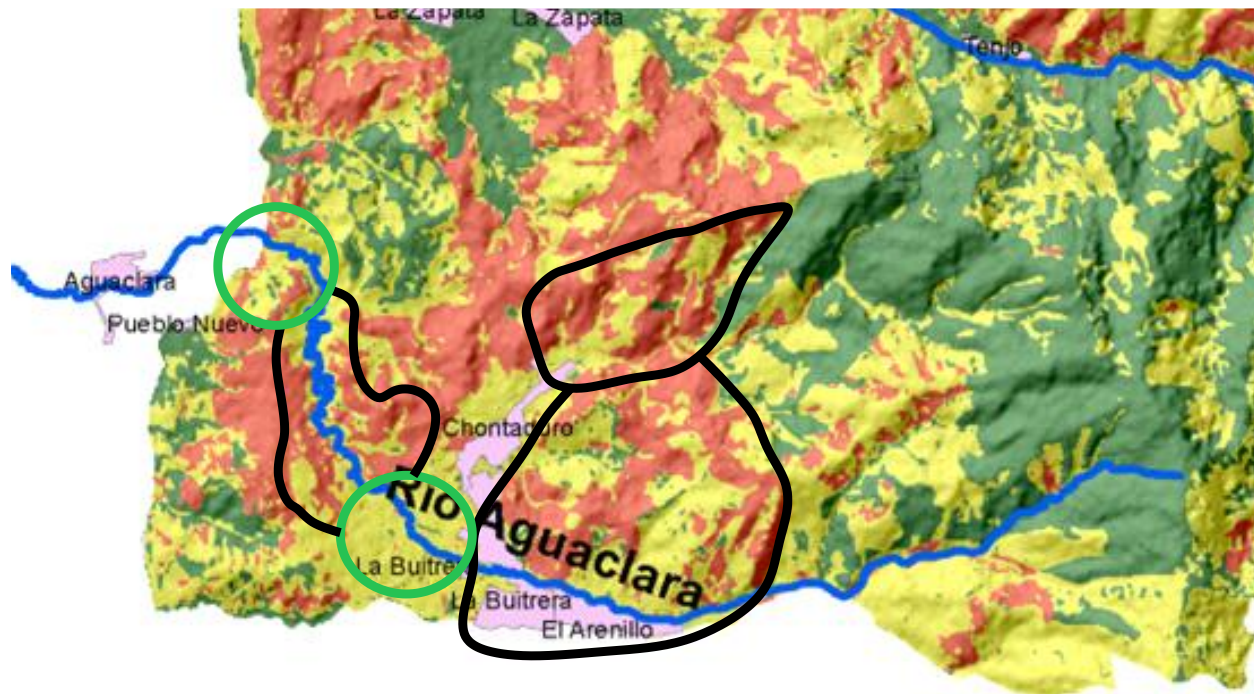
El centro poblado de Aguaclara pudiera presentar una condición de riesgo por avenida torrencial dado que las cuencas Chontaduro y Aguaclara se encuentran sobre un enjambre importante de movimientos en masa, además de un grado de susceptibilidad media en la zona donde se ubican los centros poblados y alta en sus laderas circundantes. Esta zona se propone sea objeto de estudios detallados considerando el aporte de material y caudal sólido de las laderas para lo que debe realizarse un levantamiento detallado de los movimientos en masa importantes calculando los volúmenes y de esta manera estimar los aportes sólidos sobre los que debe diseñarse las mallas de retención Figura 53, posteriormente establecer la ubicación correcta para dicha

estructura, teniendo en cuenta el ingreso de maquinaria para el mantenimiento de éstas y limpieza de las mallas, pues eventualmente pueden provocar represamiento si no se hace un debido mantenimiento.

- **Zonas priorizadas para estudio de implementación de mallas retenedoras cuenca río Aguaclara y Chontaduro**

La factibilidad de la implementación de las mallas retenedoras depende de varios factores entre los cuales se presenta la viabilidad constructiva teniendo en cuenta elementos sociales como la disposición de predios, impactos socioeconómicos entre otros. Por esta razón, se seleccionaron los sectores donde inicialmente pueden priorizarse los estudios previos teniendo en cuenta las laderas con mayor susceptibilidad y su capacidad torrencial por posibles represamientos, así, se configura 2 zonas en color verde Figura 48, mientras en color negro se encuentran los polígonos correspondientes a las secciones de la cuenca y laderas con mayores índices de susceptibilidad donde puede encañonarse un posible flujo torrencial con alto contenido de escombros.

Figura 48 Priorización de zonas objetivo de estudios detallados.

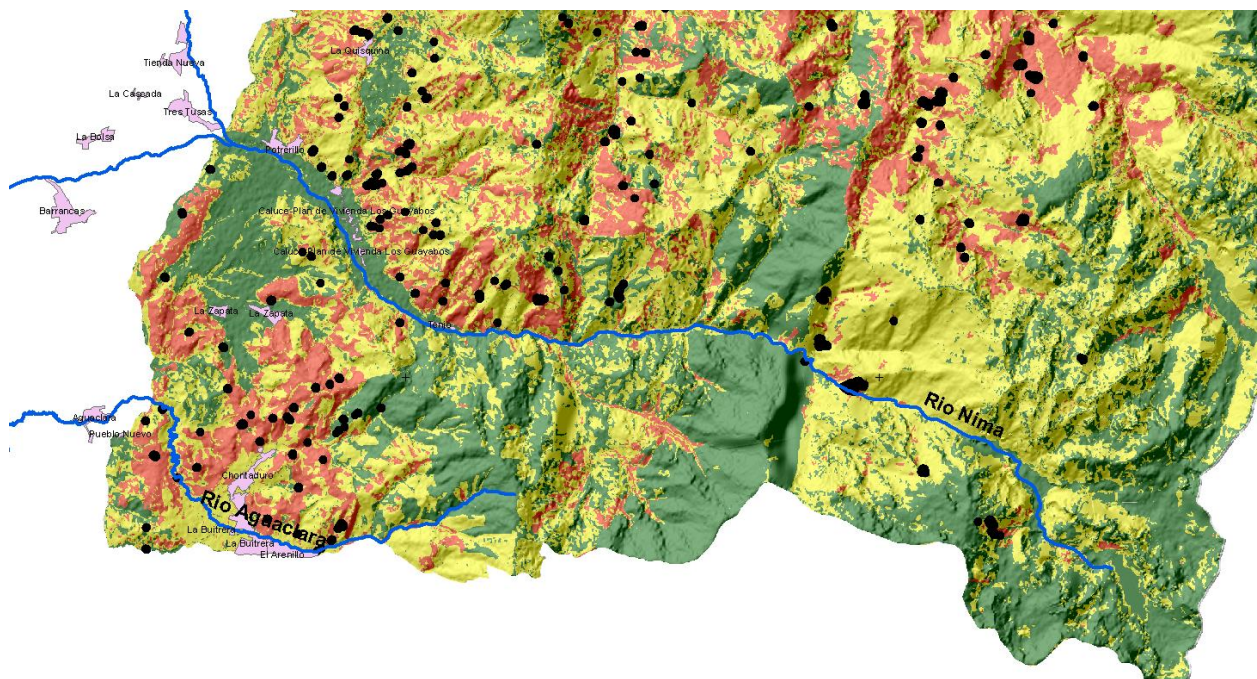


Del análisis de las zonas priorizadas, debe contemplarse la viabilidad de más de 1 malla de retención, posibilitando la reducción considerable entre cauces o tributarios pues finalmente el centro poblado con mayor posibilidad a sufrir afectaciones debido a su ubicación geomorfológica es el corregimiento de Aguaclara, el cual se ubica sobre la desembocadura del río Nima, que a su vez incluye el tributario de la cuenca Chontaduro.

5.5.2 Cuenca Río Nima

El río Nima considerado el afluente principal, con un recorrido que va desde la zona alta de montaña cerca de los límites con el departamento del Tolima sobre un ecosistema dominado por especies de páramo, desciende sobre las laderas pasando por el centro poblado de Tenjo, Calucé y Potrerillo, donde desemboca en un relieve menos escarpado, depositando sedimento configurando llanuras y terrazas sobre las cuales estos centros poblados encontraron comodidad para su locación. Sin embargo, el cauce en dicho sector cuenta con características que pudieran convertirlo en una cuenca potencialmente torrencial, dado su extenso recorrido sobre el cual atraviesa entre otras cosas, diferentes sectores que pudieran desencadenar avenidas torrenciales Figura 49.

Figura 49 Cuenca del río Nima, centros poblados y mapa de susceptibilidad por mm. Fuente: Modificado de (IGAC, s/f)



Un potencial represamiento en zona alta puede desencadenar una creciente acompañada de sedimentos desde limos hasta bloques de roca, restos arbóreos y residuos antrópicos, las afectaciones estarían enfocadas principalmente en la población del corregimiento de Tenjo que son los más próximos al abandono del confinamiento del cauce del río, sin embargo, la estabilidad de las laderas sobre las que se implementaron las vías de conexión se encuentran comprometidas frente a la socavación lateral Figura 50, si bien el caudal líquido del cauce no afecta directamente la ladera, las crecientes erodan gradualmente el talud, fenómeno que ocurre en todo el paso del río Nima hasta la zona plana, donde compromete puentes Figura 51 y estructuras civiles con propósitos de conexión social.

Figura 50 Deslizamiento y pérdida de banca sobre vía que comunica el centro poblado de Tenjo con la María, cauce del río Nima.



El proceso de conocimiento del riesgo proyecta las observaciones hacia la prevención, sobre lo que se concentró el presente estudio para reducir en el futuro una condición de riesgo que por su magnitud se pueda considerar desastre. Para tal propósito, se busca que se promuevan los estudios detallados en la cuenca para determinar la capacidad de un cauce generar dichos daños e implementar de ser necesario el sistema de mallas de retención Figura 53.

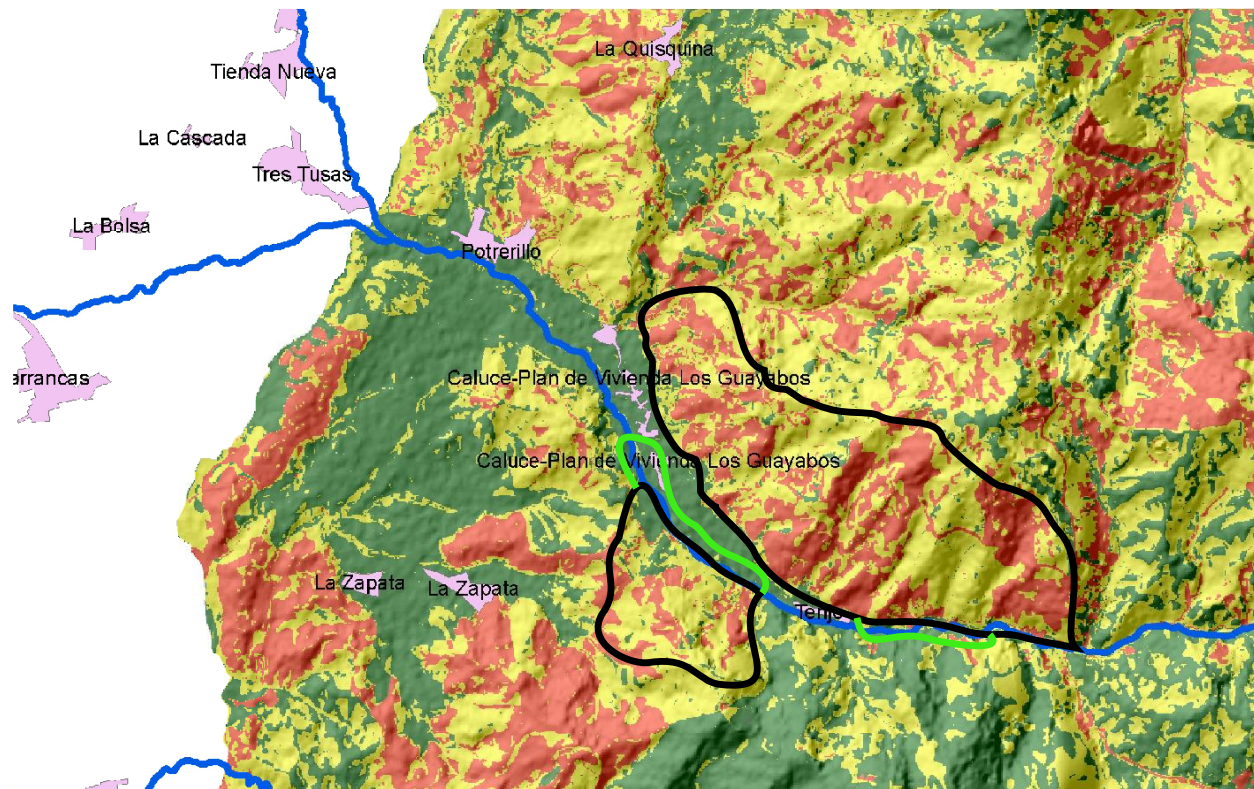
Figura 51 Puente, corregimiento Tenjo, Cauce Nima, condición de riesgo por socavación lateral y arrastre fluvial.



- **Zonas priorizadas para estudio de implementación de mallas retenedoras cuenca río Nima**

El río Nima considerado el afluente de mayor importancia debido a su trayectoria fluvial y caudal, entre otras cosas, también acarrea implicaciones ambientales que deben ser estudiadas a detalle con el propósito de conservar su integridad ambiental y permanezca como una fuente de agua para el consumo del municipio de Palmira. La cuenca del río Nima nace desde la zona de montaña media alta del municipio de Palmira, la cual sobre su trayectoria se enfrenta a diferentes laderas con evidencias de deslizamientos, que, entre otras cosas, presentan susceptibilidad media y alta por mm Figura 52.

Figura 52 Priorización de zonas objetivo de estudios detallados río Nima.



El corregimiento de Tenjo se ubica en piedemonte de ladera con un grado de susceptibilidad alta en gran porción de la vertiente, cabe resaltar que la ubicación del centro poblado se encuentra encañonado en el valle aluvial donde la corriente conserva llanuras por las que transita el río Nima, por consiguiente, las obras de mitigación podrían implementarse aguas arriba del centro poblado de manera que se reduzca la condición de riesgo por socavación lateral que se presenta en el corregimiento donde está comprometida la vía Figura 51. Adicionalmente, el tramo del río Nima entre el corregimiento de Tenjo y Potrerillo, compromete llanuras y terrazas aluviales con llanuras de inundación que implican una condición de riesgo por crecientes súbitas que, sumado al aporte de sedimento de las laderas, incluye un componente sólido en el caudal y posteriormente materializando la condición de riesgo por avenidas torrenciales. Por esta razón, se debe incluir en la proyección de mallas retenedoras sobre el polígono en color verde Figura 52 siendo una de las zonas más determinantes en el comportamiento fluvial posterior a la construcción de las obras de mitigación.

5.5.3 Mallas de retención - Barreras de red de anillos de alambre de acero de alta resistencia a la tracción VX, HX y UX

Las cuencas de Colombia necesitan intervenciones que permitan inicialmente el conocimiento del riesgo para lo que es necesario contar con profesionales idóneos en los respectivos campos de estudio, sea en la hidrología, geología, ingeniería civil, geotecnia y ambiental, con los que se puedan construir planes de trabajo de prevención y posteriormente los proyectos de mitigación para la reducción del riesgo, dentro de los cuales están las soluciones estructurales como se propone en el presente estudio, tales como mallas o Barreras de red de anillos de alambre de acero de alta resistencia a la tracción para la retención de caudal sólido y la condición de riesgo por avenidas torrenciales se vea reducida considerablemente, que finalmente se convierta en una reducción de pérdidas humanas, económicas y estructurales, así mismo, tener en cuenta los conceptos de prevención desde el punto de vista no estructural, lo que implica tener claros los propósitos de conservación y manejo de las cuencas, respetando los usos potenciales del suelo, acompañamiento en la actividad agrícola y ganadera que eviten el deterioro intensivo e invasivo de las laderas, usando el suelo armonizando los intereses económicos del campesino con los principios de reducción del riesgo.

(Ramos et al., 2021) en la guía metodológica para la zonificación de amenaza y riesgo por avenidas torrenciales, definen estos fenómenos como “flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas que puede ser generado por efecto de lluvias intensas” (p. 17), además, cabe resaltar que las mismas lluvias intensas provocan movimientos en masa en las cuencas, de ahí que la relación directa entre ambos fenómenos tengan correlación entre el diagnóstico de los estudios enfocados a la susceptibilidad por movimientos en masa, pues varios deslizamientos pueden provocar torrencialidad, pero un evento torrencial no detona un deslizamiento. Por consiguiente, la susceptibilidad por mm se convierte en el insumo principal en los estudios detallados que deben ejecutarse en las cuencas priorizadas para fijar el objetivo a la reducción del riesgo por avenidas torrenciales, así, el presente trabajo busca llevar las investigaciones a un enfoque sinérgico con las entidades y los instrumentos de planificación para promover la prevención de la gestión del riesgo, desde una mirada inicial que no implica grandes costos ni licitaciones de proyectos que pueden retrasar la ejecución de labores que se pueden llevar a cabo desde las oficinas de los organismos públicos.

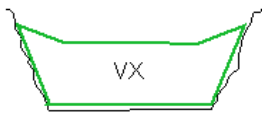
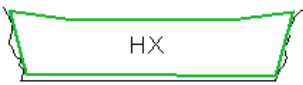
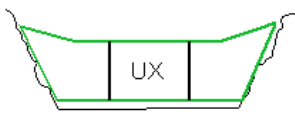
En climas tropicales donde además se evidencia desarrollo rural y actividad humana, las cuencas resultan de gran importancia de la predicción de avenidas torrenciales, apoyando entre otras cosas, la susceptibilidad por mm como insumo considerando los deslizamientos con uno de los factores detonantes según (Palacio Jiménez, 2022). Hablando del relieve y los deslizamientos como factores detonantes, resalta la importancia de una caracterización geomorfológica detallada implementando y calculando índices morfométricos que faciliten el entendimiento de la dinámica torrencial, estos factores y parámetros hoy en día resultan cómodos en términos de la facilidad de cálculo debido al acceso a imágenes satelitales y DEM que permiten realizarlos de manera práctica (Rodríguez Martínez, 2023).

Figura 53 Barrera VX para retención de flujo de detritos. Fuente: (GEOBRUGG, 2023)



La implementación de las mallas retenedoras de flujos de escombros Barreras de red de anillos de alambre de acero de alta resistencia a la tracción Figura 53 tienen el propósito de contener las partículas en una estructura eslabonada con anillos y anclajes con características físicas y metalúrgicas tales que cumplan con condiciones de esfuerzos, resistencia y oxidación. En cuencas de la zona tropical, como en el caso de Palmira, se espera que los flujos de escombros estén compuestos por materiales principalmente detríticos o suelos con fragmentos de roca meteorizada, además de restos de árboles o empalizadas con material de origen antrópico en menor proporción, teniendo en cuenta lo anterior, las mallas resultan en una solución aplicable como obra de mitigación.

Tabla 23 Sistemas de barreras para cada dimensión de cauce y cargas admisibles. Fuente: Tomado de (GEOBRUGG, 2023)

| Sistemas | Vano inferior mín. | Vano inferior máx. | Altura del sistema | Capacidad de carga |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|
|  | 5 - 12 m | 10 - 15 m | 4 - 6 m | 60 - 160 kN/m ² |
|  | 8 - 15 m | 30 m | 6 m | - 120 kN/m ² |
|  | 5 - 10 m | 20 - 25 m | 4 - 6 m | 60 - 180 kN/m ² |

Los sistemas de barrera propuestos cuentan con propiedades que varían según el tipo de cauce, principalmente las dimensiones del cauce y la capacidad de carga, lo cual debe considerarse con el aporte de sedimento. Estas soluciones entre otras cosas permiten la retención de material sólido, permitiendo el flujo de agua lo que adicionalmente reduce considerablemente la velocidad de éste, así que también los calados de inundación serían menores, así como las velocidades. En síntesis, la elección del tipo de barrera depende directamente del tipo de cauce, siendo las de tipo **VX** las más adecuadas para cauces cerrados, estrechos o confinados lo que, a su vez, permite la implementación de varias estructuras consecutivamente Figura 54 y dado su costo menor en comparación a las otras además de su reducido costo de instalación, resulta una medida favorable desde el punto de vista económico. Las barreras de tipo **HX** funcionan de la misma manera que las de tipo **VX**, con la diferencia que es más apropiado para cauces amplios

con vano superior más ancho. Finalmente, las barreras **UX**, son propias para cauces con extensiones mayores a 20 m donde se espera mayor cantidad de detritos, por lo que cuentan con columnas de soporte para permitir mayor refuerzo entre las secciones horizontales de la malla Tabla 23.

Figura 54 Barreras VX escalonadas. Fuente: (GEOBRUGG, 2023)



Las soluciones con las barreras contra los detritos buscan finalmente contener los materiales que pueden generar mayores daños o afectaciones, pues las partículas sólidas aumentan la densidad y el volumen del flujo, lo que en un evento súbito y torrencial se traduce en pérdidas más importantes y daños de mayor magnitud si se tratara de una inundación. La implementación de estas estructuras requiere de estudios que permitan localizar o proyectar los lugares donde se podrían construir, por otra parte, las condiciones del terreno que permitan un correcto anclaje de los extremos de las barreras, así, las obras muestran una viabilidad positiva al no presentar mayores impedimentos para su elaboración. Un beneficio adicional es la conservación y protección de los sistemas de acueducto que durante las épocas de invierno exhiben daños entre otras cosas por el ingreso al sistema de excesos de sedimento, lo que colapsa la red de acueducto municipal, y este hecho presenta antecedentes en varios tributarios del valle del Cauca que, durante periodos de lluvias intensas, los sistemas de agua potable fallan.

6. Conclusiones

6.1 Susceptibilidad por movimientos en masa

Realizados los modelos de susceptibilidad, se realiza la comparación de éstos buscando el resultado con mejor ajuste por medio de la curva de éxito, así, el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa por el método Wofe resultó con un porcentaje predictivo del 84%.

Se llevó a cabo un análisis detallado de las capas, destacando que la cobertura del suelo y la geomorfología son propiedades físicas fundamentales que condicionan el terreno, delineando su predisposición a la generación de movimientos en masa. Los principales factores que están condicionando el terreno en la zona de montaña del municipio de Palmira, son las pendientes y las coberturas del suelo. Esto se evidencia en el resultado del análisis jerárquico donde ambos factores suman una importancia consistente del 52 % entre los 7 totales, este hecho marca la ruta para el mejoramiento de la condición de susceptibilidad alta y eventualmente convertirse en una de las medidas correctivas de mitigación no estructural en las cuencas y reducción del riesgo abordando las coberturas ajustando y ejerciendo las actividades recomendadas para la protección de la capa vegetal del terreno como el uso potencial y extrapolar los objetivos de conservación de coberturas entre otras cosas, evitando actividades que aceleren los procesos erosivos como el pastoreo intensivo a nivel de cuenca.

6.2 Recopilación de registros de campo

A partir del reporte realizado para el levantamiento de información del movimiento en masa del corregimiento la Zapata, se evidencia factibilidad en el proceso de diligenciamiento de la información para el cálculo de volumen deslizado a partir de herramientas exequibles para la obtención de coordenadas, las mediciones en campo y de ser posible, implementar ensayos de mayor tecnicidad como geofísica, perforaciones y fotografías de dron.

Las iniciativas de disponer con profesionales idóneos en el campo de la geología en las oficinas de las entidades oficiales, favorece la necesidad de contar con resultados de calidad, siendo verificada la información y el constante mejoramiento de los insumos por parte del personal, así

mismo, a cargo de estas personas, descansa la responsabilidad de hacer el seguimiento y capacitaciones pertinentes a los organismos encargados de la atención de emergencias. Estas actividades permiten que los porcentajes de éxito verificables en el cálculo de la susceptibilidad sean cada vez mayores, siendo modelos alimentados por información e insumos detallados.

6.3 Comparación de metodologías, priorización de zonas propensas a riesgo por avenidas torrenciales

Las metodologías para la zonificación se validaron, encontrándose que el resultado más favorable es el método estadístico bivariado Wofe, corroborado por el porcentaje de éxito mayor que el del método AHP. Esta validación se acompañó de un análisis a partir de observaciones de los respectivos mapas donde se relacionaron los movimientos en masa con el mapa de susceptibilidad y la capacidad predictiva de dichos modelos teniendo en cuenta las categorías implementadas para los productos cartográficos. Este proceso facilita la toma de decisiones, teniendo en cuenta que el mapa de susceptibilidad es un insumo final dentro del proceso del conocimiento del riesgo que a su vez permite tomar las medidas preventivas y correctivas que promuevan la reducción de la condición de riesgo, así mismo, se propone que las actividades no terminen con dichos estudios, por el contrario, se recopile constantemente información y se mejore la cartografía de los insumos y factores condicionantes, de manera que periódicamente, se actualicen los mapas de susceptibilidad por el modelo Wofe como método validado, buscando así, con el transcurso del tiempo y con cada iteración, los modelos tengan mejor porcentaje de éxito con cada actualización.

Con el modelo de pesos de evidencia Wofe se logra estimar las cuencas con mayor grado de susceptibilidad al aporte de sedimentos y el inventario de procesos morfodinámicos, cabe resaltar que el cálculo de sedimento que puede aportar una cuenca necesita información detallada de la cuenca como fotografías aéreas, levantamiento de dimensiones y caracterización de cada deslizamiento que permita estimar el volumen de masa deslizada, que a su vez, puede ser recopilada y sumada al aporte de material a la cuenca.

Las zonas priorizadas para la implementación de las barreras retenedoras fueron establecidas a partir del modelo de susceptibilidad por movimientos en masa, teniendo en cuenta la posible condición de riesgo por avenidas torrenciales que puede implicar sobre los centros poblados

particularmente los corregimientos Chontaduro, La buitrera, Aguaclara para la vertiente principal del río Aguaclara, por otro lado, los centros poblados Tenjo, Calucé, Potrerillo y Tiendanueva – Tres Tusas. Las soluciones con mallas o barreras entre otras cosas, implica un análisis de disponibilidad presupuestal, lo cual varía la configuración de las obras de retención, pudiendo implementarse varias mallas **VX** en cauces estrechos de las quebradas tributarias o mallas del tipo **UX** para las zonas de los cauces más amplios o sobre las vertientes principales como el río Nima y Aguaclara.

7. Referencias

- Ahmad, M. S., MonaLisa, & Khan, S. (2023). Comparative analysis of analytical hierarchy process (AHP) and frequency ratio (FR) models for landslide susceptibility mapping in Reshun, NW Pakistan. *Kuwait Journal of Science*, 50(3), 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.01.004>
- Aristizábal, E., Morales-García, P., Vásquez-Guarín, M., Ruíz-Vásquez, D., Palacio-Córdoba, J., Ángel-Cárdenas, F. P., Caballero-Acosta, H., & Ordóñez-Carmona, O. (2022). Metodologías para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa como parte de los estudios básico de amenaza: caso de estudio municipio de Andes, Antioquia, Colombia. *Boletín de Geología*, 43(3). <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022009>
- Aspden, J. A., & McCourt, W. J. (1986). Mesozoic oceanic terrane in the central Andes of Colombia. *Geology*, 14(5), 415. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<415:MOTITC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<415:MOTITC>2.0.CO;2)
- Benchelha, S., Aoudjehane, H. C., Hakdaoui, M., Hamdouni, R. El, Mansouri, H., Benchelha, T., Layelmam, M., & Alaoui, M. (2019). *Landslide Susceptibility Mapping: A Comparison between Logistic Regression and Multivariate Adaptive Regression Spline Models in the Municipality of Oudka, Northern of Morocco*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3298803>
- Bonham-Carter, G. (1994). Geographic Information Systems for Geoscientists. En G. F. Bonham-Carter (Ed.), *Geographic Information Systems for Geoscientists*. Pergamon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041867-4.50005-9>
- Brabb, E. E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *International landslide symposium proceedings, Toronto, Canada*, 17–22.
- Brabb, E. E., Pampeyan, E. H., & Bonilla, M. G. (1972). *Landslide susceptibility in San Mateo County, California. U.S.*
- Caballero Acosta, H. (2011). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el Valle de Aburra. *Gestión y ambiente*, 14(3), 45–50. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9282>
- Calvello, M., Cascini, L., & Mastroianni, S. (2013). Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units. *Geomorphology*, 182, 33–48. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.026>
- Carvajal, J. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789589952825>

- Chuanhua, Z., & Xueping, W. (2009). Landslide susceptibility mapping: A comparison of information and weights-of-evidence methods in Three Gorges Area. *Proceedings - 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, ESIAT 2009*, 3, 342–346. <https://doi.org/10.1109/ESIAT.2009.187>
- Church, H. K. (1981). *Excavation Handbook* (McGraw-Hill, Ed.).
- Ley 1523, Pub. L. No. Ley, 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 (2012).
- Crozier, M. J. (1986). Landslides: Causes, Consequences and Environment. *Géographie physique et Quaternaire*, 41(3). <https://doi.org/10.7202/032702ar>
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27–29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: Investigation and Mitigation. En A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides investigation and mitigation* (247a ed., pp. 36–71). National academy press.
- CVC. (2021a). *GUÍA RÁPIDA TEMÁTICA PARA EL USUARIO SIG CORPORATIVO PERDIDA DE SUELO.*
- CVC. (2021b). *GUÍA RÁPIDA TEMÁTICA PARA EL USUARIO SIG CORPORATIVO USO POTENCIAL – ZONIFICACIÓN FORESTAL.*
- CVC. (2021c). *GUÍA TEMÁTICA PARA EL USUARIO SIG CORPORATIVO EROSION DEL SUELO.*
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., & Nishino, K. (2008). GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 54(2), 311–324. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0818-3>
- Davis, J. C., & Herzfeld, U. C. (1994). *Computers in Geology--25 Years of Progress.*
- Dearman, W. R. (1991). *Engineering geological mapping.* Butterworth-Heinemann.
- Deere, D. U., & Patton, F. D. (1971). SLOPE STABILITY IN RESIDUAL SOILS. *Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 87–170.
- ESRI. (2021). *Curvature function.* Curvature function. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- Gallego, J. (2018). Natural disasters and clientelism: The case of floods and landslides in Colombia. *Electoral Studies*, 55, 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.electstud.2018.08.001>
- GEOBRUGG. (2023). LA SOLUCIÓN ECONÓMICA CONTRA LOS FLUJOS DE ESCOMBROS. *Barreras de red de anillos de alambre de acero de alta resistencia a la tracción*.
- Gómez, D., García, E. F., & Aristizábal, E. (2023). Spatial and temporal landslide distributions using global and open landslide databases. *Natural Hazards*, 117(1), 25–55. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05848-8>
- González, C. G., & Rangel-Buitrago, N. (2024). A geologist per municipality initiative: Bridging geology and governance for sustainable development in Colombia. *Environmental Science & Policy*, 153, 103675. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103675>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- Haque, U., da Silva, P. F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopo, W., Andersen, P., Lu, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., Wu, J.-H., & Glass, G. E. (2019). The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of The Total Environment*, 682, 673–684. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415>
- Hermelin, M. (1987). *Bases de Geología Ambiental*. Universidad Nacional.
- IGAC. (s/f). *Colombia en mapas*.
- Lee, S., Choi, J., Chwae, U., & Chang, B. (2002). Landslide susceptibility analysis using weight of evidence. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 5, 2865–2867.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1807 (1807)*. Publicado en el Diario Oficial 49279 de septiembre 19 de 2014.
- MINMINAS, & SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000*.

- Palacio Jiménez, D. (2022). *Método para la predicción temporal de avenidas torrenciales a partir de datos abiertos usando aprendizaje de máquinas*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81507>
- PMA. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas* (4a ed.). Servicio Nacional de Geología y Minería. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2830>
- Ramos, A. M., Reyes, A., Munévas, M., Ruiz, G., Machuca, S., Rangel, M., Prada, L., Cabrera, M., Rodríguez, C., Escobar, N., Quintero, C., Escobar, J., Giraldo, J., Medina, M., Durán, L., Trujillo, D., Medina, D., Capachero, C., León, D., ... Pérez, M. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>
- Regmi, N. R., Giardino, J. R., & Vitek, J. D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1–2), 172–187. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>
- Rodríguez Martínez, L. (2023). *Análisis de las condiciones geomorfológicas y de precipitación detonantes de eventos torrenciales en cuencas del departamento de Antioquia* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85269>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process* (Vol. 34). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1665-1>
- Saha, S., Arabameri, A., Saha, A., Blaschke, T., Ngo, P. T. T., Nhu, V. H., & Band, S. S. (2021). Prediction of landslide susceptibility in Rudraprayag, India using novel ensemble of conditional probability and boosted regression tree-based on cross-validation method. *Science of the Total Environment*, 764. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142928>
- Sánchez, A. (2011). *Después de la inundación. Documentos de trabajo sobre economía regional* (Número Banco de la república Cartagena).
- SGC. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*.
- SGC, & Montero, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución de terrenos geológicos de Colombia*.

- Sharpe, C. F. S. (1938). Landslides and Related Phenomena: A Study of Mass Movements of Soil and Mantle Rock. *Columbia geomorphic studies*, 2.
- Skempton, A., & Hutchinson, J. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/*.
- Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71(3), 303–321. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00143-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00143-1)
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslides. En *Application of Geology to Engineering Practice*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83>
- Univalle, Osso, Alcaldía de Palmira, & DGRD Palmira. (2023). *ESTUDIO 4: AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ZONA RURAL ESCALA 1:25.000*.
- van Westen, C. (1996). *Análisis Estadístico de Riesgo de Deslizamiento*.
- van Westen, C. (2013). *Guidelines for the generation of 1:50.000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Ng*.
- van Westen, C. J., van Duren, I. C., Kruse, H. M. G., & Terlien, M. T. J. (1993). *GISSIZ : training package for Geographic Information Systems in slope instability zonation : Part 1. theory Part 2. exercises*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial Photo-interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping* (T. H. Smits, Ed.). Smits Publishers. <https://books.google.com.co/books?id=zGLGQgAACAAJ>
- Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24(Highway Research Board Special Report), 20–47.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11–33.
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., & Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3–4), 875–896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- WISCHMEIER, W. H., & SMITH, D. D. (1962). *Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning*. 59, 148–159.

- WMO. (2021). *WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)* (WMO-No. 1267). <https://library.wmo.int/idurl/4/57564>
- Zangmene, F. L., Ngapna, M. N., Ateba, M. C. B., Mboudou, G. M. M., Defo, P. L. W., Kouo, R. T., Dongmo, A. K., & Owona, S. (2023). Landslide susceptibility zonation using the analytical hierarchy process (AHP) in the Bafoussam-Dschang region (West Cameroon). *Advances in Space Research*, 71(12), 5282–5301. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.02.014>
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS. En *QUANTITATIVE ANALYSIS OF LAND SURFACE TOPOGRAPHY* (Vol. 12, pp. 47–56). John Wiley & Sons, Ltd.
- Zhang, G., Wang, S., Chen, Z., Liu, Y., Xu, Z., & Zhao, R. (2023). Landslide susceptibility evaluation integrating weight of evidence model and InSAR results, west of Hubei Province, China. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1), 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.12.010>