



Zonificación de amenaza por remoción en masa mediante el uso de herramientas SIG en el municipio de Pueblo Bello, Cesar.

Diana Marcela Barragán Martínez

Christopher Antonio Ramírez Díaz

Andrea Katerine Torres Cuervo

Carmen María Pérez Ochoa

Andrés Felipe Ruiz Hernández

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

Asesor: Juan Sebastián Grisales Noreña, Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	(Barragán et al., 2025)
Referencia	Barragán Martínez, D. M., Ramírez Díaz, C. A., Torres Cuervo, A. K., Pérez Ochoa, C. M., & Ruiz Hernández, A. F. (2025). <i>Zonificación de amenaza por remoción en masa mediante el uso de herramientas SIG en el municipio de Pueblo Bello, Cesar</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Línea de Investigación Territorios Inteligentes y Sostenibles.

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

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

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

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

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

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

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

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1. Planteamiento del problema.....	16
1.1 Descripción del problema.....	16
1.2. Formulación del problema	17
2. Antecedentes	18
3. Justificación	28
4. Objetivos	31
4.1 Objetivo general	31
4.2 Objetivos específicos.....	31
5. Referente normativo y legal.....	32
6. Marco teórico	34
6.1 Estado Actual del Conocimiento.....	34
6.2 Brechas y Vacíos de Conocimiento	35
6.3 Definiciones y Teoría	35
6.3.1 Modelo de Datos Ráster.....	35
6.3.2 Ráster	36
6.3.3 Celda	36
6.3.4 Píxel	36
6.3.5 Movimientos en Masa o Fenómenos de Remoción en Masa.....	36
6.3.6 Los Factores Condicionantes	37
6.3.6.1 Geología	38

6.3.6.2 Geomorfología (Modelo Digital de Elevación - DEM)	38
6.3.6.3 Cobertura y Uso del Suelo	39
6.3.7 Los Factores Detonantes	40
6.3.7.1 Lluvias	40
6.3.7.2 Sismicidad	40
6.3.8 Análisis de susceptibilidad (Métodos como Weight of Evidence – WoE).....	41
6.3.9 Análisis de Amenaza.....	44
7. Metodología	46
7.1. Enfoque Metodológico	46
7.2. Tipo de Estudio	46
7.3. Procedimiento.....	47
7.3.1. Fase I. Revisión Bibliográfica y Documental	48
7.3.1.1. Consulta en Bases de Datos.	48
7.3.1.2. Análisis y Síntesis del Conocimiento Recopilado.	48
7.3.1.3. Descarga de Imágenes Satelitales y DEM	49
7.3.1.4. Descarga de Capas Vectoriales	49
7.3.1.5. Recopilación del Inventario de Fenómenos de Remoción en Masa	49
7.3.2. Fase II. Caracterización de los factores condicionantes y detonantes.....	50
7.3.2.1. Factor Geomorfológico	50
7.3.2.2. Factor Geológico.....	52
7.3.2.3. Factor de Cobertura de la Tierra	54
7.3.2.4. Factor de precipitación.....	56
7.3.2.5. Factor de Sismicidad.....	58
7.3.3. Fase III. Análisis de susceptibilidad.....	59
7.3.4. Fase IV. Zonificación de la Amenaza	61

8. Resultados.....	63
8.1. Revisión de Literatura y Bases Técnicas.....	63
8.1.1. Ubicación de los eventos de remoción en masa registrados en el aplicativo SIMMA .	63
8.1.2. Variación de la cobertura vegetal, resultado del procesamiento y análisis satelital, que evidencia las zonas con mayor disminución del índice NDVI.	65
8.2. Factores condicionantes y detonantes que inciden en la amenaza por fenómenos de remoción en masa.....	67
8.2.1. Factores Condicionantes	67
8.2.1.1. Análisis de la pendiente.....	67
8.2.1.2. Curvatura de Terreno	69
8.2.1.3. Unidades Geológicas Superficiales	71
8.2.1.4. Subunidades Geomorfológicas.....	77
8.2.1.5. Cobertura de la tierra Corin Land Cover (2022).....	80
8.2.2. Factores Detonantes	86
8.2.2.1. Precipitación.....	86
.2.2.2. Sismicidad.....	88
8.3. Zonificación de la susceptibilidad por remoción en masa	89
8.4. Zonificación de la amenaza por remoción en masa a escala 1:25.000.....	91
Discusión.....	94
Conclusiones	98
Recomendaciones.....	101
Referencias	102

Lista de tabla

Tabla 1 <i>Reclasificación</i>	38
Tabla 2 <i>Reclasificación de la capa de pendientes</i>	39
Tabla 3 <i>Categorías de amenaza a partir del análisis de susceptibilidad</i>	45
Tabla 4 <i>Reclasificación de la capa de pendientes</i>	51
Tabla 5 <i>Reclasificación de la capa de curvatura</i>	52
Tabla 6 <i>Unidades geológicas Superficiales (UGS) según su origen</i>	53
Tabla 7 <i>Leyenda de Cobertura Vegetal y Usos de la Tierra</i>	54
Tabla 8 <i>Estaciones meteorológicas seleccionadas para la estimación de la probabilidad anual de excedencia</i>	56
Tabla 9 <i>Resultados de la probabilidad de excedencia anual para cada estación</i>	57
Tabla 10. <i>Reclasificación de la probabilidad anual de excedencia</i>	58
Tabla 11 <i>Significado de parámetros, tablas de pesos de evidencia</i>	61
Tabla 12 <i>Relación de la categoría de amenaza y de susceptibilidad</i>	62
Tabla 13 <i>Inventario de movimientos en masa en el municipio de Pueblo Bello</i>	63
Tabla 14 <i>Clasificación de la capa de pendientes</i>	67
Tabla 15 <i>Tabla de pesos de evidencia de la variable de pendientes</i>	69
Tabla 16 <i>Clasificación de la capa de curvatura</i>	70
Tabla 17 <i>Tabla de pesos de evidencia de la variable de curvatura del terreno</i>	71
Tabla 18 <i>Unidades geológicas superficiales</i>	73
Tabla 19 <i>Tabla de pesos de evidencia de la variable de unidades geológicas superficiales</i>	76
Tabla 20 <i>Subunidades geomorfológicas</i>	77
Tabla 21 <i>Tabla de pesos de evidencia de la variable de subunidades geomorfológicas</i>	78
Tabla 22 <i>Clasificación de coberturas de la tierra</i>	82
Tabla 23 <i>Tabla de pesos de evidencia de la variable de cobertura de la tierra</i>	84

Tabla 24 <i>Clasificación de la probabilidad anual de excedencia.</i>	87
Tabla 25 <i>Clasificación de la magnitud sísmica</i>	88
Tabla 26 <i>Distribución del área y del inventario de movimientos en masa por clases de susceptibilidad</i>	91

Lista de figuras

Figura 1 Relación deslizamientos L y	43
Figura 2 Esquema de las Fases.....	47
Figura 3 Mapa con la ubicación de los eventos de remoción en masa registrados en el aplicativo SIMMA	65
Figura 4 Mapa de la variación de la cobertura vegetal, resultado del procesamiento y análisis satelital, que evidencia las zonas con mayor disminución del índice NDVI.	66
Figura 5 Mapa de las Pendientes generadas mediante el DEM de Pueblo Bello – Cesar (resolución 12.5 m).	68
Figura 6 <i>Mapa de Curvatura generado a partir del DEM de Pueblo Bello – Cesar (resolución 12.5m)</i>	70
Figura 7 Mapa de las unidades geológicas superficiales reclasificado con las unidades litológicas según su susceptibilidad estructural.	72
Figura 8 Mapa de unidades geomorfológicas realizado a partir de imágenes satelitales, las unidades geológicas, el DEM y fotointerpretación	78
Figura 9 Mapa de Coberturas de Corin Land Cover del año 2022 Municipio Pueblo Bello- Cesar.	81
Figura 10 Mapa de probabilidad de excedencia anual de precipitaciones Municipio Pueblo Bello- Cesar.....	86
Figura 11 Mapa de sismicidad Municipio Pueblo Bello-Cesar	88
Figura 12 Mapa de Susceptibilidad a eventos de remoción en masa Municipio Pueblo Bello- Cesar.....	90
Figura 13 <i>Validación modelo susceptibilidad WoE</i>	90
Figura 14 Mapa de Amenaza por remoción en masa Municipio Pueblo Bello- Cesar.	92

Lista de ecuaciones

<i>Probailidad de ocurrencia de un deslizamiento (Ecuación 1)</i>	41
<i>Integracioin de factores condicionantes (Ecuación 2)</i>	41
<i>Proporcion de factor condionante (Ecuación 3)</i>	42
<i>Proporcion de factores condionantes (Ecuación 4)</i>	42
<i>Pesos de evidencia positivos (Ecuación 5)</i>	42
<i>Pesos de evidenia negativos (Ecuación 6)</i>	42
<i>Numero total de pixeles (Ecuación 7)</i>	42
<i>Numero total de pixeles en pesos de evidencia positivos (Ecuación 8)</i>	43
<i>Numero total de pixeles en pesos de evidencia negativos (Ecuación 9)</i>	44
<i>Peso final (Ecuación 10)</i>	44
<i>Formula de Poisson (Ecuación 11)</i>	57
<i>Numero promedio de veces de excedencia del umbral (Ecuación 12)</i>	57
<i>Ponderacion de factores detonantes (Ecuación 13)</i>	61
<i>Valor final de amenaza (Ecuación 14)</i>	61

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ANN	Redes Neuronales Artificiales
DEM	Modelo digital del terreno
FRM	Fenómenos de Remoción en Masa
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
LiDAR	Light Detection and Ranging
PMGRD	Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres
SAR	Sistemas de Administración del Riesgo
SGC	Servicio Geológico Colombiano
<i>SGMF</i>	Mapa de Subunidades Geomorfológicas
<i>SIG</i>	Sistemas de Información Geográfica
SVM	Máquinas de Soporte Vectorial
UAVs	Ummanned Aerial Vehicles
UGS	Unidades Geológicas Superficiales
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction
UNGRD	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres
WoE	Weight of Evidence

Resumen

Los fenómenos de remoción en masa son procesos complejos que pueden generar consecuencias catastróficas para las comunidades, ocasionando pérdidas humanas y materiales. Por ello, es fundamental investigarlos y zonificarlos con el fin de reducir las amenazas, garantizando así una respuesta efectiva en la gestión de riesgo de desastres.

En este proyecto se obtuvo la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por fenómenos de remoción en masa en el municipio de Pueblo Bello, Cesar, implementando la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa a escala 1:25.000, elaborada por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2017.

El análisis permitió identificar zonas con pendientes pronunciadas y cobertura vegetal intervenida, factores clave para comprender la dinámica del riesgo. A través de la aplicación del modelo estadístico Weights of Evidence (WoE) y el uso de herramientas SIG, se generó un índice de susceptibilidad que mostró correspondencia con las zonas históricamente afectadas por eventos de remoción en masa, lo que permitió identificar áreas críticas que requieren atención prioritaria en términos de monitoreo y planificación.

Los resultados destacan sectores de alta amenaza ubicados principalmente en el centro-sur y sur-occidente del municipio, especialmente en las veredas Costa Rica, Las Minas y parte de San Sebastián. El producto de esta investigación constituye una herramienta técnica clave para la gestión del riesgo, que servirá de soporte para la formulación de estrategias de mitigación, el ordenamiento territorial y la protección de las comunidades locales.

Palabras clave: Remoción en Masa, Pueblo Bello, Susceptibilidad, Amenaza, WoE.

Abstract

Mass movement phenomena are complex processes that can generate catastrophic consequences for communities, causing both human and material losses. Therefore, it is essential to study and map them in order to reduce hazards and ensure an effective response in disaster risk management.

In this project, the zoning of susceptibility and hazard to mass movement phenomena was carried out in the municipality of Pueblo Bello, Cesar, following the Methodological Guide for Zoning of Mass Movement Hazard at 1:25,000 Scale, developed by the Colombian Geological Survey in 2017.

The analysis made it possible to identify areas with steep slopes and disturbed vegetation cover, which are key factors for understanding risk dynamics. By applying the statistical model Weights of Evidence (WoE) and using GIS tools, a susceptibility index was generated that showed correspondence with areas historically affected by mass movement events, allowing the identification of critical zones that require priority attention in terms of monitoring and planning.

The results highlight high-hazard sectors mainly located in the central-southern and southwestern parts of the municipality, particularly in the rural areas of Costa Rica, Las Minas, and parts of San Sebastián. The outcome of this research provides a valuable technical tool for risk management, supporting the development of mitigation strategies, land-use planning, and the protection of local communities.

Keywords: Mass Removal, Pueblo Bello, Susceptibility, Threat, WoE.

Introducción

Los fenómenos de remoción en masa son comunes en zonas con topografía montañosa, fuertes precipitaciones y una amplia variedad de tipos de suelos y rocas. Los factores detonantes de esta problemática incluyen: condiciones del terreno, como alta pendiente, materiales débiles o sensibles en el suelo, presencia de fallas geológicas y escasa cobertura vegetal; procesos naturales, tales como lluvias intensas y prolongadas, sismos, y erosión o degradación del suelo; y finalmente, factores de origen antrópico, como cortes y excavaciones en las laderas, sobrecarga y rellenos, modificación del drenaje natural, falta de sistemas de drenaje urbano, y actividades mineras (Quintero, 2023).

Colombia, debido a sus diversas condiciones geográficas y geológicas, enfrenta múltiples amenazas por fenómenos de remoción en masa. A esto se suman factores como la vulnerabilidad social y económica de la población, la rápida urbanización, la degradación ambiental y los efectos del cambio climático. En conjunto, estos elementos incrementan el riesgo de desastres, poniendo en peligro la vida de los ciudadanos y afectando la estabilidad social y económica del país (Gobernación del Departamento del Cesar, 2012). Por esta razón, la gestión del riesgo de desastres es un aspecto esencial en la planificación territorial, especialmente en regiones vulnerables a fenómenos naturales como la remoción en masa. En este contexto, el uso de herramientas geoespaciales ha demostrado ser clave para la identificación y zonificación de áreas en riesgo, facilitando la toma de decisiones.

La incorporación de la gestión del riesgo en un territorio permite planificar su desarrollo, definir zonas de ocupación y garantizar una construcción de infraestructura más segura. Por ello, es fundamental delimitar las diferentes áreas del territorio, identificando aquellas que pueden representar condiciones de riesgo, con el fin de establecer medidas preventivas y correctivas que reduzcan posibles pérdidas (Stralen, 2022), por lo cual, las políticas y acciones permanentes para el conocimiento y la prevención del riesgo de desastres son fundamentales para contribuir a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas, así como al desarrollo social de las comunidades (Ley 1523, 2012).

En el departamento del Cesar, los desastres causados por fenómenos de remoción en masa han generado la necesidad de implementar estrategias eficaces de gestión del riesgo. Estos eventos afectan principalmente a la población más vulnerable, tanto en zonas rurales como urbanas, lo que

resalta la urgencia de fortalecer la planificación territorial y la prevención de desastres. En los últimos quince años (2010-2025) según los datos del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano, en el departamento del Cesar se han presentado 101 eventos asociados a fenómenos de movimientos en masa, lo que representa el 1.1% de los fenómenos registrados e inventariados en el país en dicha plataforma durante el periodo de tiempo mencionado anteriormente; de los cuales el 73% de los fenómenos reportados fueron deslizamientos (74 eventos), distribuidos en 18 de los 25 municipios que conforman el departamento (SIMMA, 2025); lo cual es un indicador del alto nivel de vulnerabilidad que enfrenta la región ante estos fenómenos.

La zonificación fue realizada en el municipio de Pueblo Bello, el cual es uno de los 25 municipios que conforman el departamento del Cesar en Colombia. Está ubicado en la Sierra Nevada de Santa Marta, a una altitud de 1.200 metros sobre el nivel del mar, en un estrecho valle montañoso sobre un altiplano. Es un punto clave para la prestación de servicios de salud y abastecimiento para las comunidades indígenas de la Sierra, además de ser un atractivo turístico importante a nivel nacional (Alcaldía municipal de Pueblo Bello, 2020), su principal actividad económica es la agricultura, dado que la mayoría de su población reside en zonas rurales.

En el aplicativo SIMMA se encuentran reportados diez eventos de remoción en masa ocurridos en el municipio de Pueblo Bello, los cuales generaron daños en la infraestructura y en los bienes materiales. El 80% de estos eventos fueron deslizamientos de tierra, mientras que el 20% restante corresponden a flujos y caídas de material. Esta situación muestra la importancia de realizar una zonificación de riesgo por remoción en masa, dado que el municipio está expuesto a amenazas relacionadas con fuertes precipitaciones que afectan tanto el área urbana como la rural. Tal como indico el Concejo Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres (CMGRD, 2012), a esto se suma la presencia de riesgo de sequía durante los prolongados periodos de verano a lo largo del año, intensificados por la tala indiscriminada de bosques y los efectos del cambio climático.

El Decreto 1077 de 2015 establece los lineamientos para los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, estableciendo tipos de métodos o enfoques para la zonificación de amenaza, indicando que cada uno debe aplicarse a escalas específicas según la complejidad del terreno. Entre estos, los métodos heurísticos son recomendados para estudios regionales, ya que permiten realizar una zonificación rápida considerando múltiples variables, esto facilita la gestión

del riesgo en áreas extensas donde no se dispone de información detallada del terreno (Stralen, 2022).

La Ley 1523 de 2012 establece que las políticas y acciones para la prevención y gestión del riesgo de desastres son esenciales para la seguridad, el bienestar y el desarrollo de las comunidades. En este contexto, la planificación territorial debe integrar estrategias de mitigación, especialmente en regiones vulnerables a fenómenos naturales como la remoción en masa (Ley 1523, 2012).

1. Planteamiento del problema

El municipio de Pueblo Bello, en el departamento del Cesar, se encuentra en la cuenca alta del río Ariguaní, ubicada al sur occidente de la Sierra Nevada de Santa Marta, debido a los factores geológicos, geográficos, climáticos y ambientales de su ubicación, la zona se enfrenta a un riesgo alto de remoción en masa. Estos eventos representan una amenaza significativa para la seguridad de las comunidades, la infraestructura y el desarrollo territorial de la región (Lascarro Navarro et al., 2024)

Esta investigación buscó tecnologías de información geoespacial y aplico una metodología heurística y Weight of Evidence (WoE) para desarrollar una zonificación detallada a escala 1:25.000, que permita fortalecer la gestión del riesgo y facilite una planificación territorial más preciso y efectivo en el municipio.

El municipio de Pueblo Bello, ubicado en el departamento del Cesar, posee una alta susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, esta peculiaridad se ha venido incrementado en los últimos años por las alteraciones en los patrones climáticos, los cuales traen consigo un aumento en la frecuencia e intensidad de las lluvias, siendo de los factores con mayor contribución en la inestabilidad del terreno.

1.1 Descripción del problema

A pesar del incremento en la amenaza, el municipio continúa utilizando un Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) que no ha sido actualizado desde el año 2012 (Alcaldía de Pueblo Bello, 2012). Esta desactualización trae consigo un límite en la capacidad de respuesta institucional, porque el plan vigente no tiene en cuenta las nuevas dinámicas ambientales ni los cambios en el uso del suelo; factores que influyen directamente en el panorama de amenazas del territorio, esto sumado a la geología local caracterizada por suelos en constante proceso de degradación y baja cobertura vegetal, provoca una mayor inestabilidad en zonas de pendiente pronunciada, haciendo que los movimientos en masa sean cada vez más frecuentes. Los factores mencionados con anterioridad no solo producen pérdidas materiales, sino también se suma la alteración a la calidad de vida, provocando daños en las actividades productivas y atentando al bienestar general de la población (Gámez et al., 2017).

Otro aspecto crítico es la limitada incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en los procesos de planificación y gestión del riesgo; estas herramientas en los últimos años han sido claves y fundamentales para identificar y analizar áreas vulnerables, escenarios de amenaza y diseñar estrategias de mitigación eficaces (Zeballos et al., 2017). No obstante, la poca información actualizada también dificulta el funcionamiento de sistemas de alerta temprana, esenciales para reducir los impactos de los eventos. Sin datos precisos y en tiempo real, no es posible emitir advertencias oportunas ni ejecutar evacuaciones preventivas que salvaguarden la vida de los residentes.

Estas distintas situaciones de falta de información reflejan una necesidad urgente de modernización en los procesos de monitoreo y comunicación del riesgo, además, las implicaciones ambientales y sociales, la gestión inadecuada del riesgo representa una amenaza significativa para la estabilidad económica del municipio. Las afectaciones a infraestructuras, viviendas y zonas productivas conllevan altos costos que la población, en su mayoría de bajos recursos, no está en capacidad de asumir, lo cual profundiza los niveles de pobreza y exclusión social.

Dicho lo anterior, se hace evidente la necesidad de actualizar la zonificación de amenaza por remoción en masa, utilizando las tecnologías modernas y considerando las nuevas condiciones climáticas y territoriales. Esta actualización permitiría fortalecer la resiliencia del municipio, optimizar la toma de decisiones y proteger tanto a la población como a sus medios de vida.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo contribuyen los sistemas de información geográfica a la actualización de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por remoción en masa en el municipio de Pueblo Bello, Cesar, para fortalecer la gestión del riesgo y la planificación territorial utilizando el método Weights of Evidence (WoE)?

2. Antecedentes

Los fenómenos de inestabilidad de laderas o remoción en masa suelen presentarse en zonas de morfología montañosa y escarpada, donde procesos como la erosión y la meteorización facilitan la caída de masas, el flujo de detritos y los deslizamientos, estos eventos representan un riesgo significativo para la infraestructura, las actividades económicas y la seguridad de las comunidades (Cuanalo & Gallardo, 2016). En el municipio de Pueblo Bello, Cesar, estas dinámicas se ven intensificadas por las características propias del terreno y el aumento de las actividades humanas, lo que muestra la importancia de identificar las áreas susceptibles a procesos de remoción en masa. En este contexto, se presenta una recopilación de investigaciones previas enfocadas en la zonificación del riesgo por remoción en masa.

En el estudio realizado por Navarro et al.,(2024), se desarrolló una zonificación de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en la cuenca alta del río Ariguaní, en el municipio de Pueblo Bello (Cesar), mediante el método estadístico discriminante. Para ello, se incorporaron factores condicionantes y detonantes que cuantifican la influencia de las variables geoambientales en la ocurrencia de estos fenómenos. Los datos se recolectaron en campo, lo que permitió elaborar mapas de geología, unidades geológicas superficiales, geomorfología, cobertura y uso del suelo. Con esta información se identificaron zonas homogéneas, mecanismos de falla y la relación entre el drenaje y los procesos de inestabilidad. Como resultado, se clasificaron las áreas de susceptibilidad en tres categorías: media (45,46%), baja (20,07%) y alta (17,40%). Este antecedente resulta especialmente relevante para nuestra investigación, pues constituye una referencia directa en la misma zona de estudio y ofrece parámetros comparativos que orientan la estimación de resultados esperados en el presente trabajo.

El estudio realizado por Gutiérrez y Mesa (2018) resulta particularmente relevante, ya que se enfocó en el sector de Pueblo Hundido, al norte del municipio de Pueblo Bello (Cesar), una zona históricamente afectada por procesos de remoción en masa. El objetivo principal de esta investigación fue elaborar un mapa que registrara los procesos morfodinámicos presentes, con el fin de identificar las áreas de mayor riesgo, aplicando la *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa* del Servicio Geológico Colombiano. Como parte del análisis, se caracterizaron las cárcavas y se evaluó su impacto en la degradación del suelo, lo que permitió proponer medidas de control. Los resultados evidenciaron que la cárcava

en Pueblo Hundido se originó principalmente por la escasez de cobertura vegetal, lo que ocasionó la pérdida del horizonte orgánico del suelo y, en consecuencia, la disminución de sus propiedades físicas y químicas. Este deterioro estableció una relación directa entre la precipitación y la susceptibilidad al desprendimiento de material. La importancia de este antecedente radica en dos aspectos centrales: por un lado, la aplicación de la metodología del Servicio Geológico Colombiano, la cual también se emplea en el presente estudio; y por otro, la identificación de la precipitación como factor detonante clave en los fenómenos de remoción en masa, elemento que se retoma y profundiza en nuestra investigación.

En la misma línea, resulta igualmente importante el trabajo de Mendoza et al., (2018) en su investigación titulada *Microzonificación y análisis de amenazas por fenómenos de remoción en masa, en la vía entre la cabecera municipal de Pueblo Bello y la vereda Monte Grande, Departamento del Cesar*. En este estudio se plantea que, en diferentes zonas del departamento, los fenómenos de remoción en masa han aumentado progresivamente en los últimos años debido a la combinación de topografías abruptas y una geología compleja. La investigación analizó los factores condicionantes y detonantes que influyen en la inestabilidad de taludes, aportando claridad sobre los procesos de remoción en masa en el área de estudio. Para ello, se empleó la metodología propuesta por Mora y Vahrson (1991). Este antecedente resulta de gran utilidad para la presente investigación, ya que proporciona información sobre las condiciones de inestabilidad del territorio y permite explicar tanto la dinámica de los procesos como la magnitud de las zonas afectadas en el municipio de Pueblo Bello.

De manera complementaria, el estudio realizado por Martínez y Vargas (2022) presenta los resultados de la zonificación y caracterización geomorfológica del departamento del Cesar a escala 1:25.000, empleando la metodología de zonificación geomorfológica basada en el sistema de clasificación propuesto por el IGAC para levantamientos de suelos. Este trabajo constituye un referente valioso para la elaboración de cartografía geomorfológica tanto a escala general (1:100.000) como semidetallada (1:25.000), ya que permite identificar y delimitar las geoformas de manera estandarizada. A partir de la información obtenida, fue posible reconocer los paisajes geomorfológicos, los ambientes morfogenéticos, los tipos de relieve y las formas de terreno presentes en la zona de estudio. Este antecedente fortalece nuestro trabajo al aportar criterios metodológicos y cartográficos esenciales para el análisis geomorfológico del municipio de Pueblo

Bello, lo que contribuye a mejorar la precisión en la zonificación de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa.

En esta misma perspectiva, el trabajo de grado desarrollado por Gutiérrez (2017), se basó en información proveniente de fuentes primarias y datos recogidos en campo, tales como descripciones físicas, fenómenos geológicos y factores hidrogeológicos. Estos insumos facilitaron la comprensión de la manifestación e impacto de los procesos de remoción en masa en el área de estudio. El objetivo principal fue elaborar un mapa de amenazas por remoción en masa en el noroccidente del municipio de Manaure, en el departamento del Cesar. Adicionalmente, se efectuó un análisis porcentual de las pendientes, la geomorfología y los niveles de amenaza por zona. Este antecedente evidencia la utilidad de integrar datos con análisis geomorfológicos para producir cartografía temática que oriente la gestión del riesgo en contextos municipales, enfoque que también se retoma en la presente investigación.

Continuando con los estudios municipales, el trabajo de grado de Briceño y Peñaranda (2024), aplicó la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano para la zonificación del corregimiento de El Rincón. Este sector, ubicado en una zona montañosa tropical, presenta una alta exposición a procesos de remoción en masa debido a factores como la topografía, la meteorización, las lluvias y la sismicidad. Adicionalmente, se incorporaron métodos determinísticos que consideran tanto los rasgos físicos de los materiales como sus propiedades mecánicas, lo que confiere mayor confiabilidad y seguridad a los resultados. El estudio identificó áreas con niveles de amenaza baja y media; no obstante, se registró la constante caída de bloques de material sobre la vía, producto de fallas tipo cuña en los macizos rocosos del sector. Este antecedente es especialmente relevante para el presente trabajo, ya que resalta la importancia de los entornos montañosos en la generación de fenómenos de remoción en masa, condición que también caracteriza al municipio de Pueblo Bello por encontrarse en la zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta.

En un contexto más amplio, Reichenbach et al., (2018) realizaron una revisión de métodos estadísticos empleados en diferentes partes del mundo para el modelado de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra y la zonificación de remoción en masa. El estudio recopiló una base de datos de 565 artículos publicados entre 1983 y 2016, clasificados en 31 categorías y subcategorías que incluyeron criterios como región, extensión y tipo de estudio, número de deslizamientos registrados, modelos estadísticos aplicados, entre otros factores. Los resultados evidenciaron que

el tipo de datos empleados para evaluar la susceptibilidad no ha variado significativamente a lo largo del tiempo y que, en muchos casos, la importancia de los aspectos geomorfológicos tiende a ser subestimada. Esta recopilación de información constituye un referente esencial, ya que demuestra la necesidad de vincular las dinámicas naturales con los riesgos asociados a los procesos de remoción en masa y, al mismo tiempo, ofrece un amplio panorama comparativo que enriquece el presente trabajo al situarlo en el marco de investigaciones desarrolladas en contextos con distintos parámetros.

En concordancia con los avances tecnológicos aplicados al análisis de los fenómenos de remoción en masa, Jianwei et al., (2024), destacan la relevancia de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) en los estudios de deslizamientos de tierra, dado que permiten monitorear la dinámica temporal y espacial de dichos eventos. En su investigación se analizan tanto las funciones como las limitaciones de los UAV equipados con diferentes sensores como son las cámaras RGB, multispectrales, infrarrojas térmicas, SAR y LiDAR. Además, se detallan estrategias de detección automatizada que integran algoritmos de aprendizaje automático. Este antecedente resulta particularmente valioso, pues enfatiza la utilidad de la información geoespacial, especialmente de las imágenes satelitales, en el análisis de fenómenos de remoción en masa, lo que constituye un soporte teórico para el uso de este insumo en el presente trabajo.

De manera complementaria a los avances tecnológicos, la investigación de Gámez et al., (2017) se centró en el área comprendida entre la vereda Puente Quemao y el corregimiento de San Francisco de Asís, en el municipio de El Copey (Cesar), donde se recopiló, analizó e interpretó información con el propósito de identificar la vulnerabilidad frente a movimientos en masa. Para ello, se caracterizaron los perfiles de meteorización y se realizó un reconocimiento macroscópico de las litologías, con el fin de plantear posibles soluciones al riesgo asociado. Este antecedente es de especial importancia, ya que se desarrolla en el mismo departamento donde se enmarca la presente investigación y proporciona variables ambientales de referencia que sirven como punto de partida para comprender la vulnerabilidad generada por los fenómenos de remoción en masa.

En continuidad con los estudios realizados en el departamento del Cesar, la monografía desarrollada por García y Ricardo (2020) revisa diversas metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica, con el propósito de reducir los riesgos que los procesos de remoción en masa generan sobre la infraestructura vial. Los criterios considerados en estas metodologías varían según el país y la zona de aplicación, lo que permitió contrastar enfoques y

escalas de análisis. La investigación avanzó de manera progresiva, iniciando con la recopilación bibliográfica y la selección de información relevante, basada en fuentes nacionales e internacionales, con un énfasis especial en experiencias de países latinoamericanos. Este antecedente constituye una base teórica significativa para presente trabajo, pues resalta la necesidad de profundizar en los estudios de remoción en masa no solo desde la perspectiva ambiental y física, sino también considerando las afectaciones directas e indirectas sobre las comunidades que habitan en las zonas expuestas.

En conformidad con la necesidad de fortalecer la gestión del riesgo, Aceves et al. (2016) evaluaron los deslizamientos de tierra con el propósito de proponer métodos para la elaboración de inventarios y mapas de susceptibilidad. Estos productos cartográficos están orientados a apoyar a las autoridades gubernamentales en la mitigación del riesgo y la planificación territorial. El estudio aplicó, de manera general, un método para la cartografía de deslizamientos y la evaluación de la susceptibilidad en terrenos volcánicos inestables, integrando una base de datos geográfica mediante el uso de análisis digitales apoyados en tecnologías SIG. Entre los resultados más relevantes se destaca la superposición de capas, que permitió determinar tanto la abundancia como los tipos de deslizamientos, en función de las condiciones geomorfológicas y su relación con el uso del suelo. Este antecedente resulta fundamental para el presente trabajo, ya que evidencia la importancia de las herramientas SIG en la zonificación de fenómenos de remoción en masa, particularmente en territorios con inestabilidades topográficas y ambientales, como ocurre en el municipio de Pueblo Bello.

En concordancia con la importancia del uso de herramientas geoespaciales, la investigación de Rivera (2020) tuvo como objetivo generar un modelo computacional que sirviera como herramienta para prevenir futuros eventos de deslizamiento. Para su construcción se empleó tecnología de drones y la técnica de fotogrametría, con el fin de comprender de manera más precisa las amenazas presentes en el área de estudio. La creación de este tipo de modelos tiene un gran potencial para identificar zonas de riesgo a partir del análisis conjunto de datos morfológicos y sociales. En este sentido, la fotogrametría mediante drones se presenta como una alternativa relevante para el análisis espacial apoyado en herramientas SIG, ya que permite contrastar resultados y proponer medidas de mitigación del riesgo, con el propósito de reducir las pérdidas humanas y materiales ocasionadas por fenómenos geomorfológicos. Este antecedente es especialmente útil para la presente investigación, pues resalta la necesidad de seguir explorando el

uso de tecnologías SIG y de imágenes satelitales en los estudios de remoción en masa, con miras a fortalecer la prevención y la protección de las comunidades expuestas.

En línea con el aprovechamiento de herramientas de teledetección y SIG, el proyecto de grado de Villanueva Pinedo (2024) analizó la influencia de la cobertura forestal en la ocurrencia de deslizamientos de masa, utilizando imágenes satelitales del sensor MODIS procesadas en la plataforma Google Earth Engine (GEE). Para ello, se realizó un análisis multitemporal del índice NDVI y una clasificación supervisada que permitió diferenciar suelos desnudos, pastizales y áreas boscosas. El cambio en la cobertura forestal se evaluó comparando imágenes de los años 2003 y 2023, con apoyo de herramientas SIG para cuantificar las áreas de vegetación. Los resultados evidenciaron la importancia de la cobertura forestal en la prevención de deslizamientos, resaltando el papel fundamental de los bosques en la protección del suelo frente a la erosión y en la mitigación de estos fenómenos. Este antecedente es especialmente pertinente para la presente investigación, ya que sirvió como referente para analizar el cambio de la cobertura vegetal en el municipio de Pueblo Bello y considerarlo como un factor determinante en los procesos de remoción en masa.

De manera complementaria, la investigación de Pacurucu et al., (2018) propuso la identificación de zonas vulnerables mediante el uso de herramientas SIG, con el propósito de generar una base de datos que sirviera como insumo para la gestión del ordenamiento territorial. Entre sus principales hallazgos, se evidenció que la combinación de tecnologías SIG con la participación ciudadana permite integrar el conocimiento local en la elaboración de cartografía social, fortaleciendo la precisión de los análisis en las zonas de estudio. Asimismo, mediante técnicas de teledetección fue posible actualizar y analizar los datos geoespaciales, contribuyendo a disponer de cartografía más precisa y actualizada, fundamental para los procesos de planificación territorial. Este antecedente refuerza teóricamente la importancia del uso de herramientas SIG en el estudio de los procesos de remoción en masa y destaca, además, la particularidad de incluir la participación comunitaria como estrategia para alimentar bases de datos más completas y confiables.

Continuando con los antecedentes, la investigación de Pereira et al., (2025) realizó una revisión de artículos que emplearon herramientas SIG para mapear áreas propensas a deslizamientos en Brasil. Para ello, se aplicaron filtros de exclusión sin establecer un límite temporal, con el objetivo de abarcar la totalidad de estudios disponibles sobre esta temática. Los resultados destacan la relevancia del uso de herramientas SIG en la identificación y análisis de

zonas susceptibles a deslizamientos, así como su papel en la articulación entre investigadores y autoridades, lo que favorece una respuesta más efectiva frente a diferentes tipos de desastres naturales. Este antecedente resulta especialmente valioso para el presente estudio, ya que refuerza la pertinencia del empleo de tecnologías SIG en la zonificación de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa y evidencia su utilidad en la gestión integral del riesgo en contextos latinoamericanos.

En el trabajo de grado realizado por Caicedo (2024) se llevó a cabo un análisis mediante herramientas SIG para estudiar los movimientos en masa en la vía que conecta los municipios de Balboa y Argelia, priorizando el punto crítico ubicado en el PR 16+300, donde los deslizamientos se presentan de forma recurrente. La investigación evidenció que el uso de imágenes satelitales facilita el estudio de estos puntos críticos, al permitir una caracterización detallada de la zona y de sus condiciones, con el propósito de identificar los factores que podrían desestabilizar la superficie del terreno. Este antecedente resalta la aplicabilidad de la teledetección y los SIG en la evaluación de riesgos asociados a la infraestructura vial, lo cual aporta un referente metodológico clave para estudios orientados a la gestión y prevención de remociones en masa.

Por otro lado, profundizando en metodologías de zonificación el trabajo de grado realizado por Henao y Hernández (2024) se centró en la zonificación del municipio de Santuario, un territorio con alta propensión a movimientos en masa. El análisis se efectuó mediante la aplicación de los métodos multicriterio y heurístico. Los resultados evidenciaron que la zonificación facilita la identificación de áreas con mayor potencial de riesgo, lo cual contribuye al fortalecimiento de los sistemas de monitoreo y alerta temprana. Este antecedente resulta relevante, ya que en el presente estudio se utilizó la metodología heurística combinada con el método WoE, configurando un enfoque mixto aplicando los criterios dispuestos por el Servicio Geológico Colombiano para la evaluación de procesos de remoción en masa, constituyendo un referente metodológico.

Por otro lado, Reyna et al., (2020) proponen la identificación de asentamientos urbanos dispersos ubicados en zonas de riesgo, a partir de la digitalización de la mancha urbana sobre imágenes satelitales y su cruce con cartografía temática de riesgos, con el fin de prevenir posibles eventos catastróficos. La aplicación de herramientas SIG para el análisis de áreas susceptibles permite la superposición de capas de información, lo que facilita la identificación precisa de sitios localizados en zonas no aptos para la habitabilidad. Este antecedente resulta relevante para la

presente investigación, ya que evidencia cómo los procesos de remoción en masa pueden incidir directamente en zonas urbanas, modificando drásticamente la cobertura y el uso del suelo.

Complementando la importancia de las distintas condiciones del territorio como punto de partida para entender los procesos de remoción en masa, en el trabajo de grado de Medina (2017) se realizó un análisis de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca del río Patía, una zona propensa a este tipo de fenómenos. Para ello, se consideraron factores intrínsecos del terreno y factores desencadenantes que influyen en la ocurrencia de estos eventos. Se utilizó la técnica de Evaluación Espacial Multicriterio, con la cobertura vegetal y el uso del suelo, la pendiente, la precipitación, la geología, la geomorfología, las zonas de influencia de fallas y los eventos de deslizamientos georreferenciados. A partir de este análisis, se logró una sectorización de las áreas con mayor potencial de deslizamiento en la cuenca, con base en las condiciones naturales del terreno y los factores detonantes identificados. Este antecedente es muy útil ya que presenta los factores detonantes y condicionantes que influyen en los fenómenos de remoción en masa.

En la misma línea, Bravo et al., (2024) analizaron los eventos hidrometeorológicos extraordinarios que desencadenaron importantes procesos de remoción en masa ocurridos en la ciudad de Chilpancingo, con el objetivo de diseñar un sistema de monitoreo mediante el uso de herramientas SIG. La finalidad fue comprender la dinámica de dichos deslizamientos y, a partir de ello, identificar las áreas con mayor riesgo, considerando tanto las magnitudes de los desplazamientos como la ocupación del suelo. Este antecedente resulta útil para el presente estudio, ya que resalta la importancia de las herramientas SIG en la identificación de áreas propensas a procesos de remoción en masa, información clave para disminuir los riesgos en la población, además, el municipio de Pueblo Bello presenta eventos importantes de lluvias torrenciales a lo largo del año.

Complementando la información de las diferentes herramientas SIG, en su trabajo de grado, Reyes (2023) buscó identificar zonas propensas a procesos de remoción en masa mediante el uso de diferentes longitudes de onda en imágenes satelitales, analizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Brillantez del Suelo. Como resultado, se construyó un modelo en ModelBuilder como herramienta SIG, que permitió realizar el procesamiento necesario para identificar los posibles movimientos en masa en la zona de estudio. Este antecedente sirve como referencia para el presente estudio, ya que también se emplea información de imágenes

satelitales analizadas con el índice NDVI para entender los cambios en la cobertura vegetal en el municipio y relacionarlos con los eventos de remoción en masa.

En la misma línea, Avilés et al. (2017) identificaron el tipo de amenaza por deslizamientos de tierra en el cantón Ibarra utilizando herramientas SIG, además de analizar factores condicionantes y detonantes mediante la metodología de Mora-Vahrson, con algunas modificaciones. Para el análisis de amenazas por deslizamientos, se emplearon unidades físicas territoriales, lo que permitió una mayor precisión y nivel de detalle en la identificación de los sitios potencialmente afectados por procesos de remoción en masa. Este antecedente resalta el uso de diferentes metodologías apoyadas en SIG para estudiar los fenómenos de remoción en masa, lo cual sirve como referente bibliográfico para comprender y contrastar otros enfoques aplicados en esta investigación.

De manera complementaria, Rebolledo et al. (2015) propusieron la generación de mapas de riesgo por inundaciones y deslizamientos que afectan a las poblaciones del eje mandarinerero Araitha–Salmerón, mediante la incorporación efectiva de tecnologías geomáticas. Se identificó que las zonas más propensas a deslizamientos se ubican en la parte alta de las cuencas, mientras que las áreas más amenazadas por inundaciones se localizan en la parte baja del valle. La cuenca presenta un porcentaje elevado de riesgo, lo cual impacta directamente a la población asentada en la zona de estudio. Por ello, se resalta la necesidad de diseñar acciones de mitigación que contribuyan a reducir el nivel de riesgo, ya sea mediante modificaciones en las condiciones de amenaza o a través de la disminución de la vulnerabilidad existente. Este antecedente enfatiza el impacto de las lluvias continuas en los fenómenos de remoción en masa, lo cual resulta pertinente para el caso de Pueblo Bello, que en diferentes épocas del año enfrenta fuertes eventos pluviales capaces de generar riesgo a la población.

En la misma línea, García et al. (2021) realizaron una investigación con el objetivo de determinar el nivel de riesgo en una zona de estudio. Para ello, se llevó a cabo una evaluación participativa del riesgo, se elaboró un mapeo de la vulnerabilidad mediante herramientas SIG y se utilizaron modelos hidrológicos e hidrodinámicos bidimensionales para la simulación de inundaciones. Los resultados revelaron que las amenazas por deslizamientos están asociadas a factores como precipitaciones intensas, pendientes pronunciadas, ausencia de implementación y mantenimiento de obras, falta de planes de ordenamiento territorial y el incumplimiento de normativas ambientales.

Finalmente, en el estudio realizado por Pineda et al., (2016), se analizó la incidencia de los cambios en la cobertura vegetal sobre la susceptibilidad a deslizamientos de tierra, evaluando dos zonas de estudio. Para ello, se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), calculado en varios periodos sucesivos entre 1986 y 2008. Se encontró que los valores de NDVI disminuyeron en las áreas susceptibles a deslizamientos en ambas zonas. La investigación concluyó que las áreas con mayor pérdida de cobertura vegetal a lo largo del tiempo presentan una mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.

3. Justificación

El municipio de Pueblo Bello, ubicado en el departamento del Cesar, presenta condiciones geológicas, topográficas y climáticas que lo hacen altamente susceptible a los procesos de remoción en masa. Esta vulnerabilidad se ve acentuada por factores como la pérdida de cobertura vegetal y las prácticas agrícolas inadecuadas que favorecen la inestabilidad del terreno. En los últimos 15 años (2010-2025), se han registrado en el Cesar 74 eventos de este tipo, de los cuales seis ocurrieron en Pueblo Bello, representando cerca del 8% del total (Servicio Geológico Colombiano, 2025). Aunque los eventos reportados en el municipio no han ocasionado pérdidas humanas, sí han generado afectaciones significativas en la infraestructura vial, el sistema de acueducto y la producción agrícola, impactando a más de 120 familias (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2012). Estas condiciones evidencian la necesidad de contar con estudios técnicos que permitan zonificar las áreas susceptibles y fortalecer los procesos de gestión del riesgo y planificación territorial en la región.

Entre los años 2010 y 2011, el impacto del Fenómeno de La Niña provocó numerosos deslizamientos en la Sierra Nevada de Santa Marta, afectando significativamente la zona rural del municipio de Pueblo Bello. Estos eventos generaron el bloqueo de vías, la pérdida de cultivos — tanto por destrucción directa como por la imposibilidad de transportar los productos hacia los mercados nacionales— y dejaron al municipio prácticamente incomunicado con el resto del país debido a la falta de acceso vehicular. Esto desencadenó una crisis social caracterizada por la necesidad de albergues y alimentos, cambios en las costumbres de vivienda de las comunidades indígenas, disminución de la productividad, deserción escolar, aumento de problemas psicosociales, descomposición social, dificultades viales para la comunicación terrestre y riesgo de desabastecimiento de agua por daños en los sistemas de acueducto.

De acuerdo con el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) del municipio de Pueblo Bello (CMGRD, 2012), entre los factores que contribuyeron al desencadenamiento de estos eventos se encuentran la ausencia de conciencia sobre la necesidad de implementar prácticas agropecuarias sostenibles y un modelo productivo basado en la ganadería en zonas de alta pendiente, lo cual genera una fuerte dependencia económica sin alternativas claras para las familias. A esto se suma el apego cultural a métodos tradicionales de producción, el desconocimiento y la incredulidad frente a las condiciones de riesgo, así como el uso de técnicas

inadecuadas en las actividades agropecuarias. También influyeron la falta de adopción de tecnologías sostenibles, el incumplimiento de normas de planificación y ordenamiento territorial, y la debilidad institucional reflejada en la escasez de personal, recursos económicos y coordinación entre entidades para hacer cumplir la normativa existente.

En Pueblo bello se ha encontrado que los eventos de remoción en masa representan una amenaza creciente, que se ve agravada por la falta de actualización en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) y por el limitado uso de tecnologías de información geoespacial presente en el plan actual (Lascarro Navarro et al., 2024). La gestión del riesgo de desastres en zonas propensas a la remoción en masa, como Pueblo Bello, requiere de un enfoque actualizado y basado en datos, especialmente en contextos donde los factores naturales del entorno incrementan la vulnerabilidad de las comunidades (UNGRD, 2020).

La concentración de los deslizamientos en áreas específicas sugiere la necesidad urgente de desarrollar un enfoque integral que contemple tanto la prevención como la mitigación de riesgos, priorizando las zonas más afectadas y vulnerables. Además, es fundamental contar con una estrategia de monitoreo y alerta temprana que permita reducir el impacto de futuros desastres, protegiendo así la vida y los bienes de la población en riesgo. Este panorama también subraya la importancia de la implementación de políticas públicas basadas en datos actualizados, la colaboración entre entidades locales y nacionales, y el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria ante los fenómenos de remoción en masa. En la gestión de riesgos por remoción en masa, se determinan las zonas de amenaza mediante diversos modelos, cada uno con un nivel de complejidad y detalle diferente, cuya selección depende del tipo y la calidad de los datos disponibles. La gestión del riesgo de desastres es un proceso dinámico que permite definir acciones específicas para avanzar en el conocimiento y la reducción del riesgo en una zona determinada (Barrantes, 2010).

Desde el enfoque geográfico, la gestión del riesgo de desastres se desarrolla en múltiples escalas, desde lo nacional hasta lo local, lo que requiere la participación activa de todos los niveles territoriales. Las amenazas asociadas a remociones en masa tienden a concentrarse en zonas del territorio con condiciones similares de susceptibilidad (Barrantes, 2010). La delimitación de áreas susceptibles a deslizamientos ha cobrado relevancia dentro de los estudios de riesgo, especialmente en áreas montañosas, ya que permite reconocer los sectores más propensos a estos fenómenos y orientar acciones preventivas y de planificación.

La presente investigación justifica la necesidad de un análisis exhaustivo y una zonificación de amenazas a escala 1:25.000 mediante tecnologías geoespaciales, proporcionando información que podrá ayudar en la planificación territorial, del municipio de Pueblo Bello, Cesar, reduciendo la exposición de la comunidad en el sector al riesgo generado por eventos naturales, para esta investigación no se proyecta realizar la susceptibilidad por movimiento en masa tipo caída puesto que la metodología requiere del mapeo directo en campo (caracterización geomecánica, análisis cinemáticos y de estabilidad) para las subunidades geomorfológicas indicativas de inestabilidad.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Zonificar la amenaza por fenómenos de remoción en masa a escala 1:25.000 en el municipio de Pueblo Bello, Cesar, implementando herramientas SIG mediante la metodología estadística – probabilística WoE propuesta por el SGC para fortalecer la gestión del riesgo y planificación territorial.

4.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura y las bases técnicas sobre eventos de remoción en masa y elaborar un inventario de eventos históricos de remoción en masa ocurridos en los últimos 15 años en el municipio de Pueblo Bello-Cesar, consolidando datos de estudios y registrados por entidades relevantes.
- Identificar y analizar los factores condicionantes y detonantes que inciden en la amenaza por fenómenos de remoción en masa en el municipio de Pueblo Bello – Cesar, mediante el procesamiento y evaluación de información geoespacial como el modelo de elevación digital (DEM) de 12.5 metros, inventarios de eventos de remoción en masa e imágenes de sensores remotos.
- Realizar la zonificación de la susceptibilidad por remoción en masa a escala 1:25.000 para el municipio de Pueblo Bello – Cesar mediante los factores condicionantes, aplicando el método WoE (Weights of Evidence o Pesos de Evidencia)
- Realizar la zonificación de la amenaza por remoción en masa a escala 1:25.000 para el municipio de Pueblo Bello, Cesar, mediante la integración de la susceptibilidad y los escenarios de amenaza de precipitación y sismicidad.

5. Referente normativo y legal

Constitución política de Colombia – Art. 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines (Constitución Política de Colombia, 1991, art. 79).

Constitución política de Colombia – Art. 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas (Constitución Política de Colombia, 1991, art. 80).

Constitución política de Colombia – Art. 311. Al municipio como entidad fundamental de la división político-administrativa del Estado le corresponde prestar los servicios públicos que determine la ley, construir las obras que demande el progreso local, ordenar el desarrollo de su territorio, promover la participación comunitaria, el mejoramiento social y cultural de sus habitantes y cumplir las demás funciones que le asignen la Constitución y las leyes (Constitución Política de Colombia, 1991, art. 311).

Ley 388 del 1997. Define los principios y criterios para la ordenación del territorio a nivel nacional, lo cual está estrechamente relacionado con la gestión del riesgo y la prevención de desastres (Ley 388, 1997).

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

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

Decreto 1077 del 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio (Decreto 1077, 2015).

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

6. Marco teórico

Los fenómenos de remoción en masa (FRM) constituyen una de las amenazas naturales más significativas a nivel mundial, con graves impactos en la infraestructura, el medio ambiente y la vida humana. Este tipo de eventos, que incluyen deslizamientos, derrumbes y flujos de detritos, son desencadenados por factores como la precipitación intensa, la actividad sísmica, la deforestación, y las actividades humanas que alteran el equilibrio geológico de un área. Según la United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNGRD, 2021), los FRM generan pérdidas económicas anuales significativas y afectan predominantemente a regiones con topografía montañosa y alta densidad de población, como los Andes en América del Sur.

En Colombia, los FRM representan una amenaza recurrente debido a las características geológicas, climáticas y socioeconómicas del país. La interacción entre las intensas lluvias asociadas al fenómeno de La Niña, la deforestación masiva y la expansión urbana en zonas de alta pendiente incrementa significativamente la susceptibilidad del territorio. La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2021) señala que más del 60 % del territorio colombiano está expuesto a este tipo de fenómenos, lo que convierte la zonificación de la amenaza y susceptibilidad en una herramienta fundamental para la gestión del riesgo.

6.1 Estado Actual del Conocimiento

A nivel mundial, la investigación sobre zonificación para la susceptibilidad y amenaza a fenómenos de remoción en masa ha avanzado significativamente gracias al desarrollo de sistemas de información geográfica (SIG), modelado estadístico y herramientas de aprendizaje automático. Métodos como Weight of Evidence (WoE), Análisis de Componentes Principales (PCA), y modelos probabilísticos como Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) o Redes Neuronales Artificiales (ANN) han demostrado su eficacia en la predicción de zonas susceptibles a deslizamientos. Estudios recientes de países como Italia, Nepal y Japón han implementado estos enfoques con éxito, combinando variables geológicas, hidrológicas y socioeconómicas.

En Colombia, la implementación de estas metodologías ha sido desigual debido a limitaciones en la calidad y disponibilidad de datos geoespaciales. Los estudios más relevantes, liderados por instituciones como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), han utilizado enfoques multivariados y SIG para generar mapas de susceptibilidad. Sin embargo, estos esfuerzos suelen estar restringidos a escalas locales, dejando una brecha en la cobertura nacional y en la integración de modelos dinámicos que incluyan variabilidad climática y uso del suelo.

6.2 Brechas y Vacíos de Conocimiento

A pesar de los avances globales y nacionales, persisten varias brechas importantes en la investigación de los FRM en Colombia:

- Escalas Espaciales y Temporales: la mayoría de los estudios están enfocados en áreas específicas y no abordan dinámicas regionales o nacionales a largo plazo.
- Integración de Variables Climáticas: existe una limitada incorporación de proyecciones climáticas y su relación con la intensificación de los fenómenos de remoción en masa.
- Datos Incompletos: la falta de datos geoespaciales detallados y actualizados dificulta el desarrollo de modelos precisos.
- Participación Comunitaria: escasez de enfoques participativos que integren el conocimiento local en la zonificación y en la evaluación de riesgos.

6.3 Definiciones y Teoría

6.3.1 Modelo de Datos Ráster

El modelo de datos ráster es una estructura de representación espacial ampliamente utilizada en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se basa en una matriz compuesta por filas y columnas, donde cada celda representa una unidad espacial del terreno y contiene un valor que describe una característica geográfica específica. Este modelo es especialmente eficaz para representar fenómenos continuos como altitud, pendiente, temperatura, cobertura vegetal o humedad del suelo. La principal ventaja del modelo ráster es su capacidad para facilitar cálculos

matemáticos y operaciones espaciales sobre grandes extensiones, debido a su estructura uniforme (Longley et al., 2015).

6.3.2 Ráster

El término ráster hace referencia al conjunto completo de datos organizados en una matriz bidimensional. Esta matriz representa el espacio geográfico a través de celdas o píxeles, donde cada uno almacena un valor asociado a una variable geográfica. El ráster es comúnmente utilizado para representar información proveniente de sensores remotos, modelos digitales del terreno (DEM), imágenes satelitales, entre otros. Su formato permite realizar análisis espaciales avanzados como reclasificación, interpolación, cálculo de pendientes, y análisis multitemporal (Burrough & McDonnell, 1998).

6.3.3 Celda

Una celda es la unidad espacial mínima dentro de un modelo ráster. Tiene forma cuadrada y un tamaño definido (por ejemplo, 10x10 m), que determina la resolución espacial del modelo. Cada celda contiene un único valor numérico que representa una propiedad geográfica del área cubierta, ya sea una variable continua (como altitud) o categórica (como tipo de uso del suelo). En los SIG, el término “celda” se usa de forma intercambiable con “píxel”, aunque se prefiere “celda” cuando se hace énfasis en el análisis espacial (Lo & Yeung, 2015).

6.3.4 Píxel

El píxel, abreviatura de *picture element*, es la unidad básica de una imagen digital. En el contexto de SIG, el píxel representa un área definida del terreno y almacena un valor correspondiente a una característica geográfica. Aunque es sinónimo de “celda” en el modelo ráster, el término “píxel” se utiliza más frecuentemente en el ámbito de la teledetección y procesamiento de imágenes satelitales, donde cada píxel capta información espectral sobre la superficie terrestre (Burrough & McDonnell, 1998).

6.3.5 Movimientos en Masa o Fenómenos de Remoción en Masa

Los movimientos en masa se pueden definir como desplazamientos de material litológico y/o de escombros sobre una ladera por acción de la gravedad (Cruden & Varnes, 1996; Vargas,

2000). Actualmente, se reconocen 6 tipos básicos de movimientos, según la clasificación de Cruden & Varnes (1996), los cuales se describen a continuación:

- Caída: Desprendimiento de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, que desciende a través del aire, principalmente en caída libre (Cruden & Varnes, 1996).
- Volcamiento: Rotación hacia delante de una masa de roca/suelo, alrededor de un eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza (Cruden & Varnes, 1996).
- Deslizamiento: Movimiento ladera abajo de una masa de roca/suelo a lo largo de una superficie de falla. Pueden ser rotacionales, traslacionales o compuestos (Cruden & Varnes, 1996).
- Flujo: Movimientos espacialmente continuos con superficies de corte superficiales y estrechamente espaciadas, cuyo comportamiento se asemeja al de un líquido viscoso (Cruden & Varnes, 1996).
- Propagación lateral: Extensión o dilatación lateral de un suelo cohesivo o masa de roca blanda, manifestándose como una extrusión de material propenso a licuación (Cruden & Varnes, 1996; Olarte, 2017).
- Creep (Reptación): Movimientos de material inconsolidado extremadamente lentos, siendo una deformación del terreno producto de un esfuerzo constante.

6.3.6 Los Factores Condicionantes

Se refieren a los elementos y características intrínsecas del terreno que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa (Rodríguez Valdivia et al., 2014). En el caso de los estudios de susceptibilidad por movimientos en masa en Colombia, se consideran los siguientes factores condicionantes: geomorfología, unidades geológicas superficiales (UGS), y coberturas de la tierra (SGC, 2017).

En la **Tabla 1** se presenta las recomendaciones dadas en la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano para el análisis de susceptibilidad, según el tipo de movimiento en masa a considerar.

Tabla 1

Método de análisis de susceptibilidad por cada tipo de movimiento en masa.

Tipo de movimiento	Metodología	Método
Deslizamientos	Estadístico / Probabilístico	Estadístico bivariado (WoE)
Caídas	Heurístico / Geomorfológico	Criterios geológicos y geomorfológicos
Flujos	Heurístico / Geomorfológico	Criterios geológicos y geomorfológicos
Reptación	Heurístico / Geomorfológico	Criterios geológicos y geomorfológicos

Fuente. (SGC, 2017).

6.3.6.1 Geología

La geología es un componente esencial en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que influye directamente en la resistencia y cohesión del material del terreno. La presencia de rocas fracturadas, materiales no consolidados o zonas de fallamiento estructural puede facilitar procesos de inestabilidad en laderas (Van Westen, 2002).

6.3.6.2 Geomorfología (Modelo Digital de Elevación - DEM)

La geomorfología permite analizar las formas del relieve y sus características morfométricas. A través del uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM), es posible derivar parámetros como pendiente, curvatura y orientación de las laderas, los cuales influyen directamente en la estabilidad del terreno en conjunto con las subunidades geomorfológicas (Burrough & McDonnell, 1998). Estas variables son fundamentales para detectar zonas susceptibles a movimientos en masa.

Para el análisis de pendientes se adoptó la clasificación propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), basada en Van Zuidam (1986), la cual en la **Tabla 2** establece rangos de inclinación y su respectiva denominación.

Tabla 2*Clasificación de pendientes.*

Inclinación (°)	Clasificación
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	Extremadamente abrupto

Fuente. Van Zuidam, 1986. Tomado del SGC, 2017.

6.3.6.3 Cobertura y Uso del Suelo

La cobertura y el uso del suelo afectan la capacidad del terreno para resistir procesos erosivos y de remoción. Por ejemplo, la cobertura vegetal puede actuar como un estabilizador natural, mientras que actividades antrópicas como la deforestación o la urbanización pueden aumentar la vulnerabilidad (Guzzetti et al., 2006). Para analizar este factor, se emplea la clasificación supervisada de imágenes satelitales, técnica mediante la cual se asignan clases temáticas conocidas a cada píxel, con base en algoritmos de aprendizaje y entrenamiento previo (Lillesand et al., 2015).

Para la caracterización de coberturas se empleó la clasificación Corine Land Cover (CLC) este es un sistema jerárquico de categorización de las coberturas de la tierra desarrollado en Europa y adaptado en Colombia por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Su objetivo es estandarizar la identificación, análisis y monitoreo de los diferentes tipos de cobertura del suelo, permitiendo comparaciones a nivel nacional e internacional. El esquema se organiza en tres niveles jerárquicos:

Nivel 1 (más general): agrupa las coberturas en cinco grandes categorías.

Nivel 2: subdivide cada categoría en clases más específicas.

Nivel 3 (más detallado): permite una descripción precisa de la cobertura.

Las cinco categorías principales del Nivel 1 son:

1. Superficies artificiales: incluyen zonas urbanizadas, infraestructura vial, zonas industriales y áreas en construcción.
2. Zonas agrícolas: comprenden cultivos transitorios, permanentes, pastos y mosaicos de uso agropecuario.
3. Bosques y áreas seminaturales: abarcan bosques naturales, vegetación secundaria, matorrales y áreas con escasa vegetación.
4. Humedales: corresponden a pantanos, ciénagas, turberas y áreas temporal o permanentemente inundadas.
5. Superficies de agua: incluyen cuerpos de agua continentales (lagos, embalses, ríos) y, en su versión original, áreas marinas y costeras.

En Colombia, la adaptación del CLC se desarrolló a escalas detalladas como **1:100.000** y **1:25.000**, lo que ha permitido contar con información homogénea y estandarizada para la gestión territorial, los estudios ambientales y la planificación del uso del suelo (IGAC, 2012).

6.3.7 Los Factores Detonantes

Son aquellos estímulos externos que afectan las fuerzas de cohesión de una ladera, generando como respuesta un movimiento en masa (Wieczorek, 1996). En Colombia, debido a sus condiciones geológicas, hidrológicas y meteorológicas, se ha encontrado que los detonantes más comunes suelen ser las lluvias intensas y la actividad sísmica (SGC, 2017).

6.3.7.1 Lluvias

Las lluvias intensas o de larga duración son uno de los principales detonantes de deslizamientos. La infiltración de agua en el suelo reduce la resistencia al corte de los materiales y aumenta la presión intersticial, favoreciendo el colapso de taludes (Crosta & Frattini, 2008).

6.3.7.2 Sismicidad

Los movimientos sísmicos pueden inducir deslizamientos al generar vibraciones que desestabilizan el terreno, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas o materiales sueltos.

La magnitud del sismo, su profundidad y la estructura del subsuelo influyen en la severidad de la respuesta del terreno (Keefer, 1984).

6.3.8 *Análisis de susceptibilidad (Métodos como Weight of Evidence – WoE)*

El análisis de susceptibilidad por movimientos en masa consiste en determinar y evaluar la probabilidad de ocurrencia en un área específica, a partir de los condicionantes del terreno y excluyendo los factores detonantes (Aristizábal et al., 2019). Dependiendo del tipo de movimiento, condiciones del área de estudio y criterio profesional, se pueden utilizar diversos métodos entre ellos el método heurístico y el mapeo geomorfológico, mientras que desde un enfoque cuantitativo se incluyen los métodos estadísticos y determinísticos (Aleotti & Chowdhury, 1999).

Uno de los métodos más utilizados es el Weight of Evidence (WoE), que permite asignar pesos estadísticos a cada variable condicionante según su correlación con la ocurrencia histórica de movimientos en masa. Este enfoque bayesiano facilita la generación de mapas predictivos que muestran la probabilidad relativa de deslizamientos (Van Westen, 2002; Lee & Pradhan, 2007).

Los resultados del método WoE proporcionan un análisis estadístico efectivo ya que los datos son una compilación de muchas variables. El método aplicado a estudios de zonificación a escala 1:25.000 evita la subjetividad de elegir los pesos ya que la relación entre el factor condicionante y los movimientos en masa se evalúa con bases estadísticas (SGC, 2017).

El desarrollo matemático del método fue propuesto por (Bonham-Carter, 1994), para lo cual se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones:

La Ecuación 1 corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento, para esto se asume que el deslizamiento L ha ocurrido en un área p veces en un, donde q es el área total de estudio, donde n es igual al número de veces que se repite L .

$$p(L) = \frac{n(L)}{q} = \frac{p}{q} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En la ecuación 2, se integra la variable w_i que hace referencia al factor condicionante donde se tienen clase de $i= 1 \dots m$.

$$p\left(\frac{L}{w_i}\right) = \frac{p(w_i \cap L)}{p(w_i)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Al expresar la ecuación 2 en función de las proporciones ($O(L)$) en vez de la probabilidad se obtiene la ecuación 3 y 4.

$$O(L) = \frac{p(L)}{p(L)} = \frac{p(L)}{1-p(L)} = \frac{p}{q-p} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$O(L/w_i) = \frac{p(L/w_i)}{p(L/w_i)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Despejando w_i en la ecuación 4 se obtienen las ecuaciones de los pesos de evidencias tanto positivos como negativos que se muestran en la ecuación 5 y 6 respectivamente.

$$W_i^+ = \ln \frac{p(w_i/L)}{p(w_i/L)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$W_i^- = \ln \frac{p(\bar{w}_i/L)}{p(\bar{w}_i/L)} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Van Westen (1993) planteó que en términos de píxeles el área q de las ecuaciones anteriores, está compuesta por un número total de píxeles N , donde:

$$N = N_{pix1} + N_{pix2} + N_{pix3} + N_{pix4} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Según los píxeles de la imagen, el área total está compuesta por un número equivalente de píxeles N que se muestran en la ecuación 7 y que se relacionan de acuerdo con las relaciones representadas en la Figura 1. Estas se explican de la siguiente manera:

Npix1 = Existe presencia simultánea del factor condicionante y del deslizamiento, lo que indica una muy alta significancia del factor en la ocurrencia del evento.

Npix2 = Hay deslizamiento, pero no presencia del factor condicionante, lo que sugiere una alta significancia debido al efecto del deslizamiento.

Npix3 = Hay presencia del factor condicionante, pero no del deslizamiento, lo que indica una significancia media, ya que el factor pudo haber contribuido en algún momento.

Npix4 = no hay presencia ni del factor condicionante ni del deslizamiento, por lo que se considera de baja significancia.

Figura 1

Relación deslizamientos L y factor condicionante w

		w. Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L: Deslizamientos	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad w	Área total sin unidad w	Área total del mapa

Fuente. (SGC, 2017).

De acuerdo con la información anterior los pesos de evidencias positivos (W_i^+) y negativos (W_i^-) se pueden expresar en forma de pixeles con las ecuaciones 8 y 9 respectivamente.

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

Donde, W_i^+ indica la importancia de la presencia del factor en el deslizamiento de la siguiente manera:

$W_i^+ > 0$: positivo, la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento y su magnitud indica el grado de correlación o contribución directa de la variable.

$W_i^+ < 0$: negativo, la presencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación inversa.

$W_i^+ = 0$; el factor no es relevante.

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

En este caso, W_i^- indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento:

$W_i^- > 0$: positivo, la ausencia del factor contribuye en la presencia del deslizamiento.

$W_i^- < 0$: negativo, la ausencia del factor contribuye en la ausencia del deslizamiento.

$W_i^- = 0$: indica que el factor no es relevante.

Para cada clase de factor se deben calcular los pesos W_i^+ y W_i^- , una vez calculados se procede a calcular el peso final (W_f) según la ecuación 10, esta es una medida de correlación entre los factores condicionante y los fenómenos de movimientos en masa, donde:

$W_f = 0$; la distribución espacial de los movimientos en masa es independiente del factor considerado.

$W_f > 0$; positivo, la presencia del factor influye en la ocurrencia del movimiento en masa (asociación positiva).

$W_f < 0$; negativo, la ausencia del factor contribuye a la ocurrencia del fenómeno de movimiento en masa (asociación negativa). (SGC, 2017).

$$W_f = W_i^+ + W_i^- \quad (\text{Ecuación 10})$$

El método de WoE se aplica a cada uno de los factores condicionantes definidos previamente.

6.3.9 Análisis de Amenaza

El análisis de amenaza se genera a partir de la relación entre la probabilidad espacial de la susceptibilidad encontrada y la probabilidad temporal de ocurrencia de los eventos (Corominas & Moya, 2008). Sobre la probabilidad espacial y temporal, SGC (2017) define la espacial como la probabilidad de que el área localizada dentro de un rango de susceptibilidad sea afectada por un movimiento en masa, mientras que, con probabilidad temporal, se refiere a cuantificar los detonantes para cada categoría de susceptibilidad.

Para realizar el análisis y zonificación de la amenaza, es necesario expresar los resultados en tres categorías (baja, media y alta), según lo expuesto en el Decreto 1807 de 2014 (Decreto

1807, 2014). Por lo tanto, al incorporar las categorías de susceptibilidad en el estudio de amenaza, a partir de una integración de la información disponible entre mapas de susceptibilidad y cuantificación de los factores detonantes, la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (2017) recomienda agrupar las categorías de la manera expuesta en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Categorías de amenaza a partir del análisis de susceptibilidad.

Categoría de susceptibilidad	Categoría de amenaza
Muy alta	Alta
Alta	
Media	Media
Baja	Baja

Fuente. (SGC, 2017).

7. Metodología

7.1. Enfoque Metodológico

El enfoque metodológico de esta investigación fue de tipo cuantitativo, debido a que hace énfasis en la recopilación, procesamiento y análisis de datos numéricos y geoespaciales para realizar la *zonificación de la susceptibilidad y amenaza por remoción en masa en el municipio de Pueblo Bello, Cesar*. Para esto, se utilizaron herramientas de análisis espacial en Sistemas de Información Geográfica (SIG), mediante la generación de capas temáticas como subunidades geomorfológicas, unidades geológicas superficiales, coberturas de la tierra entre otras. Estas variables fueron evaluadas a través del modelo estadístico bayesiano Weight of Evidence (WoE), el cual permite evaluar la relación entre la ocurrencia de eventos de remoción en masa y los factores condicionantes, calculando el peso de evidencia (positivo o negativo) de cada clase dentro de las variables temáticas. Este enfoque facilita la cuantificación objetiva de la influencia de cada variable, generando mapas de susceptibilidad con base en datos históricos y geoespaciales, y facilitando su representación cartográfica. La aplicación de este modelo estadístico respalda la solidez técnica de los resultados y contribuye a una toma de decisiones informada y basada en evidencia cuantificable en el área de influencia del proyecto.

7.2. Tipo de Estudio

El tipo de investigación tiene un alcance descriptivo, ya que su propósito es caracterizar y representar espacialmente la susceptibilidad y amenaza por remoción en masa en el municipio de Pueblo Bello, Cesar, a escala 1:25.000. Teniendo en cuenta que, según este tipo de investigación está enfocada en detallar las características de un fenómeno enmarcando sus componentes y estructura (Hernández Sampieri, 2014), por tanto, estas se consideran variables físicas y ambientales del terreno, así como el inventario histórico y reciente de eventos, lo que facilita la zonificación según los niveles de amenaza propuestos por el SGC (2017).

Adicionalmente, el estudio incluye un enfoque correlacional y explicativo, al analizar la relación entre variables como pendiente, unidades geológicas superficiales, cobertura de la tierra y la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa. Para ello, se utiliza el modelo Weight of

Evidence (WoE), una técnica estadística bayesiana que permite evaluar cuantitativamente la influencia de cada variable en la ocurrencia de eventos (Bonham-Carter, 1994). Este método se fundamenta en el análisis de la asociación espacial entre los factores condicionantes y los eventos registrados, asignando pesos positivos o negativos según la evidencia de su relación. Así, se identifican los factores que más contribuyen al comportamiento del terreno, lo que responde al enfoque correlacional planteado por Hernández Sampieri (2014) y se complementa con un nivel explicativo al explorar las posibles causas subyacentes de los eventos, sin requerir un diseño experimental causal.

La combinación de los alcances mencionados con anterioridad resulta importante, ya que facilita la representación del fenómeno analizando las relaciones entre variables y fundamentos técnicos para la gestión del riesgo. Así, se generan insumos útiles para la planificación territorial del municipio de Pueblo Bello que puedan fortalecer las bases para estudios futuros enfocados en vulnerabilidad o riesgo.

7.3. Procedimiento

Para establecer la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa a escala 1:25.000 en el municipio de Pueblo Bello, Cesar., se plantean los lineamientos estipulados por el Servicio Geológico Colombiano en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25.000 del 2017. El desarrollo de la investigación se realizó en 4 fases las cuales se describen en la **Figura 2**:

Figura 2

Esquema de las Fases



7.3.1. Fase I. Revisión Bibliográfica y Documental

El objetivo de esta fase es seleccionar y analizar información técnica, científica y normativa existente relacionada con la amenaza por remoción en masa en el municipio de Pueblo Bello, departamento del Cesar, con el fin de establecer el marco teórico y conceptual que sirva como guía para el desarrollo del estudio.

7.3.1.1. Consulta en Bases de Datos.

Como punto de partida, se definieron términos clave relacionados con la temática del proyecto: remoción en masa, zonificación, susceptibilidad, riesgos geológicos, SIG, metodología WoE. Esto facilitó la búsqueda de información relevante en diversas fuentes.

Posteriormente, se realizó una revisión de estudios científicos y técnicos disponibles en bases de datos académicas como ScienceDirect, Redalyc, Scielo, Google Académico y repositorios institucionales, así como documentos normativos y técnicos emitidos por entidades oficiales como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), SIMMA, IDEAM, IGAC y UNGRD.

7.3.1.2. Análisis y Síntesis del Conocimiento Recopilado.

A partir de la información seleccionada durante la revisión bibliográfica, se identificaron enfoques metodológicos aplicables al estudio de la remoción en masa, así como los criterios utilizados en zonificaciones previas o en zonas con características similares. Esto permitió adaptar la metodología al contexto específico del área de estudio.

Además, se destaca la importancia de recopilar los insumos geoespaciales necesarios para la caracterización del terreno. Para ello, se procedió a la descarga de imágenes satelitales y capas vectoriales del municipio de Pueblo Bello, mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que serán utilizadas en las fases siguientes del análisis. Es por esto por lo que se realiza la descarga de las imágenes satelitales y las capas vectoriales, del municipio de Pueblo Bello.

7.3.1.3. Descarga de Imágenes Satelitales y DEM

Se descargaron 10 imágenes del satélite PlanetScope con resolución de 3 y 5m para el periodo 2016 – 2025. Estas imágenes ya vienen ortorrectificadas, lo que asegura su precisión geométrica. La selección se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad de escenas con baja nubosidad menor al 10% para garantizar la calidad en el análisis.

El Modelo de Elevación del municipio de Pueblo Bello con una resolución de 12 metros del año 2014 fue suministrado por el Instituto Geográfico de Agustín Codazzi (IGAC).

7.3.1.4. Descarga de Capas Vectoriales

Las capas vectoriales de los componentes de geología y geomorfología se obtuvieron de las planchas 26, 27, 33 y 34 del Servicio Geológico Colombiano (SGC), correspondientes al año 2018, en formato GDB a escala 1:25.000.

7.3.1.5. Recopilación del Inventario de Fenómenos de Remoción en Masa

Para el levantamiento y análisis multitemporal de eventos de remoción en masa ocurridos en Pueblo Bello entre 2016 y 2025 se emplearon imágenes ópticas del satélite PlanetScope, que cuenta con las bandas Blue (455–515 nm), Green (500–590 nm), Red (590–670 nm) y Near Infrared – NIR (780–860 nm), para identificar alteraciones en la cobertura vegetal y zonas erosionadas.

Las imágenes del satélite PlanetScope fueron procesadas en ArcGIS Pro mediante la herramienta *Raster Calculator* del módulo de Análisis Espacial, aplicando la fórmula **(NIR – Rojo) / (NIR + Rojo)** para generar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) anual.

Este índice permitió realizar un análisis multitemporal de la cobertura vegetal y detectar su disminución a lo largo del periodo de estudio (2016–2025).

Asimismo, se consultó el historial de eventos de remoción en masa disponible en el aplicativo SIMMA (Sistema de Información de Remoción en Masa) del Servicio Geológico Colombiano, encontrándose registros correspondientes a los años 2011, 2013 y 2018.

El índice diferencial de NDVI no se validó debido a la limitada información disponible en el inventario de movimientos en masa, el cual solo reportan 10 eventos entre 2011 y 2018. Este número reducido de registros no permite un análisis estadístico robusto ni una correlación representativa entre la pérdida de cobertura vegetal y la ocurrencia de deslizamientos, lo que podría generar resultados sesgados y poco confiables.

7.3.2. Fase II. Caracterización de los factores condicionantes y detonantes

Esta fase se comprende por los factores condicionantes que se encuentran representados por la geología, geomorfología, cobertura de la tierra y el uso del suelo, los cuales condicionan el terreno a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa y por los factores detonantes están representados por agentes externos tales como las precipitaciones y la sismicidad; los cuales son de naturaleza temporal y pueden variar en intensidad y duración, provocando la inestabilidad y la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.

7.3.2.1. Factor Geomorfológico

La caracterización del factor geomorfológico se realizó de acuerdo con los lineamientos para cartografía geomorfológica del SGC para la elaboración de mapas geomorfológicos (Carvajal, 2012), a escala 1:25.000, para obtener el Mapa de Subunidades Geomorfológicas (SGMF); a partir de esto se generan capas de información con respecto a la pendiente del terreno, curvatura y subunidades indicativas de procesos. A continuación, se describe el proceso para cada variable que compone el factor geomorfológico.

La variable de **pendiente del terreno** se deriva del Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12m de resolución, 32 bits, con una banda máxima de 44413.92m y mínima de 210.89m, este fue suministrado por el IGAC.

Una vez obtenido el DEM del municipio de Pueblo Bello, se realizó el mapa de pendientes en el Software ArcMap con la herramienta Slope de Arc Toolbox, se encuentra en la siguiente ruta:

3D Analyst Tools → Ráster Surface → Slope.

Posteriormente se realizó la reclasificación del mapa de pendientes con la herramienta Reclass de Arc Toolbox, se encuentra en la siguiente ruta: **3D Analyst Tools → Ráster Reclass → Reclassify.** Para la reclasificación se tienen en cuenta los rangos de pendientes propuestos por Van Zuidam, 1986 (ver **Tabla 4**). Finalmente, se obtuvo el mapa de pendientes reclasificado en formato tipo ráster (.tif).

Tabla 4

Reclasificación de la capa de pendientes.

Inclinación (°)	Clasificación	Reclasificación
0 – 2	Plano a casi plano	1
2 – 4	Suavemente inclinado	2
4 – 8	Inclinado	3
8 – 16	Moderadamente abrupto	4
16 – 35	Abrupto	5
35 – 55	Muy abrupto	6
>55	Extremadamente abrupto	7

Fuente. Van Zuidam, 1986. Tomado del SGC, 2017.

La variable de **curvatura** se deriva también del DEM, el SGC (2017) propone el uso de la curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente (curvatura de plano), este se realizó en el Software ArcMap con la herramienta Slope de Arc Toolbox, se encuentra en la siguiente ruta: **3D Analyst Tools → Ráster Surface → Curvature**, eligiendo la ruta de salida en “plan curvature”.

Una vez obtenida la variable de curvatura, se realizó la reclasificación de este con la herramienta Reclass de Arc Toolbox, se encuentra en la siguiente ruta: **3D Analyst Tools →**

Ráster Reclass → **Reclassify**. Para la reclasificación se tiene en cuenta la clasificación por el método de percentiles propuesto por Süzen & Doyuran, 2004 (ver **Tabla 5**), obteniendo así el mapa de curvatura reclasificado en formato tipo ráster (.tif).

Tabla 5

Reclasificación de la capa de curvatura.

Percentiles	Clasificación	Reclasificación
>-10	Fuertemente cóncava	1
-10 a -2	Cóncava moderada	2
-2 a 2	Casi plano neutra	3
2 a 10	Convexa moderada	4
>10	Fuertemente convexa	5

Fuente. Autores.

La variable **subunidades geomorfológicas indicativas de procesos** se deriva a partir de los mapas geomorfológicos elaborados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) en el marco de la zonificación de amenaza por movimientos en masa, correspondientes a las planchas 26, 27, 33 y 34. Dado que dichos mapas presentan una caracterización geomorfológica hasta el nivel de unidad, fue necesario realizar una desagregación y caracterización de las subunidades geomorfológicas. Este proceso se llevó a cabo mediante la fotointerpretación de imágenes satelitales de PlanetScope, complementada con el análisis del modelo de elevación digital (MED) de 12 metros de resolución.

Una vez obtenido el mapa de subunidades geomorfológicas indicativas de procesos, se realizó la reclasificación de este con la herramienta Reclass de Arc Toolbox, se encuentra en la siguiente ruta: **3D Analyst Tools** → **Ráster Reclass** → **Reclassify**.

7.3.2.2. Factor Geológico

En cuanto al factor geológico se requiere de la recopilación y análisis de la información temática, tales como geología y geomorfología a escalas regional y detallada, DEM 12.5m, inventario de FRM e imágenes de sensores remotos. Con la interpretación se realizó la

representación cartográfica de las diferentes unidades geológicas superficiales (UGS) teniendo en cuenta los parámetros establecidos por el SGC (2017) tales como la densidad de fracturamiento, fábrica y resistencia (ver **Tabla 6**).

Tabla 6

Unidades geológicas Superficiales (UGS) según su origen

Tipo de material	Origen de la UGS	Tipo de UGS
Roca	Roca inalterada	<ul style="list-style-type: none"> • Roca dura (Calidad de macizo buena y muy buena) • Roca intermedia (Calidad de macizo regular) • Roca blanda (Calidad de macizo mala y muy Mala)
	Derivadas de roca in situ	<ul style="list-style-type: none"> • Suelo residual: Horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI.
	Depósitos volcanoclásticos primarios	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caídas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza).
Suelo	Depósitos volcanoclásticos Secundarios	<ul style="list-style-type: none"> • Lahar, avalancha de escombros
	Depósitos aluviales	<ul style="list-style-type: none"> • Aluviones recientes y de cauce activo • Llanura aluvial
	Suelo transportado	<ul style="list-style-type: none"> • Abanicos o conos aluviales • Terrazas aluviales • Depósitos fluviotorrenciales
	Depósitos lacustres y Paludales	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos fluvio lacustre • Suelos paludales
	Depósitos costeros	<ul style="list-style-type: none"> • Deltas, Barras, Playas, etc.
	Depósitos eólicos	<ul style="list-style-type: none"> • Dunas y Médanos • Loess
	Depósitos glaciares	<ul style="list-style-type: none"> • Morrenas y Tillitas • Suelos Fluvioglaciares
	Depósitos de gravedad y ladera	<ul style="list-style-type: none"> • Coluvial • Talus, derrubios de pendiente

Tipo de material	Origen de la UGS	Tipo de UGS
		• Flujos (de lodo, tierra y de escombros)
		• Llenos de basuras
	Depósitos antrópicos	• Llenos de escombros
		• Llenos mixtos

Fuente. Modificado de Hermelín (1985).

7.3.2.3. Factor de Cobertura de la Tierra

Respecto a la caracterización la cobertura de la tierra, se empleó la fuente secundaria de clasificación supervisada ya existente, desarrollada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entidad oficial encargada de la elaboración cartográfica y estudios geospaciales en Colombia. Esta clasificación, correspondiente al año 2022, presenta un alto nivel de detalle y precisión, abarcando hasta siete niveles jerárquicos de información en algunos tipos de coberturas, a una escala 1:25.000, lo que la convierte en un insumo valioso y confiable para el análisis de amenazas por remoción en masa en la zona de estudio.

El mapa obtenido del municipio Pueblo Bello, cuenta con las siguientes coberturas de la tierra y uso del suelo, tal como se observa en la **Tabla 7**.

Tabla 7

Leyenda de Cobertura Vegetal y Usos de la Tierra.

Cobertura	Clase
1.1.1. Tejido urbano continuo	1
1.1.3.1. Vivienda rural dispersa	2
1.1.3.2. Vivienda rural nucleada	3
1.1.3.4. Cabildos y rancherías indígenas	4
1.2.1.2.5. Zonas dotacionales	5
1.2.1.2.5.1. Instalación educativa	6
1.2.2.1.1.1. Vía pavimentada	7
1.2.2.1.1.2. Vía sin pavimentar	8
1.4.2.3.1. Hotel campestre	9
1.4.2.3.3. Finca recreativa y/o de descanso	10
2.1.1. Otros cultivos transitorios	11

Cobertura	Clase
2.2.1.2.2. Caña panelera	12
2.2.1.3. Plátano y banano	13
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	14
2.2.2.2. Café	15
2.2.2.2.1. Café a plena exposición	16
2.2.2.2.2. Café bajo semisombra	17
2.2.2.2.3. Café bajo sombra	18
2.3.1. Pastos limpios	19
2.3.2. Pastos arbolados	20
2.3.3. Pastos enmalezados	21
2.3.5. Pastos arbustivos	22
2.4.1. Mosaico de cultivos	23
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	24
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	25
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	26
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	27
3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	28
3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	29
3.1.1.2.1.2. Bosque enano del Caribe	30
3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme	31
3.1.4.2. Bosque de galería arbolado	32
3.1.4.3. Bosque de galería con arbustal y herbazal	33
3.1.4.4. Bosque de galería mixto	34
3.2.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme	35
3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	36
3.2.1.1.1.1.1. Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado	37
3.2.1.1.1.1.2. Herbazal denso bajo de tierra firme no arbolado	38
3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos	39
3.2.1.1.4. Herbazal denso rocoso	40
3.2.1.2. Herbazal abierto	41
3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso	42
3.2.2.1.1.1. Arbustal denso esclerófilo de tierra firme	43
3.2.2.1.2.1. Arbustal denso mesófilo de tierra firme	44
3.2.2.2.1.1. Arbustal abierto esclerófilo de tierra firme	45
3.2.2.2.1.3. Arbustal abierto esclerófilo rocoso	46

Cobertura	Clase
3.2.2.2.1. Arbustal abierto mesófilo de tierra firme	47
3.2.2.2.3. Arbustal abierto mesófilo rocoso	48
3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	49
3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	50
3.3.2.1. Afloramiento rocoso masivo	51
3.3.2.2. Afloramiento rocoso fragmentado	52
3.3.3.1. Áreas erosionadas	53
3.3.4.1. Zonas quemadas naturales	54
5.1.1. Ríos, caños y quebradas	55
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	56

Fuente. Cobertura de la tierra, Clasificación Corine Land Cover, Escala: 1:25.000, IGAC.

7.3.2.4. Factor de precipitación

La caracterización del factor de precipitación se realizó a partir de los registros meteorológicos proporcionados por el IDEAM, mediante la estimación de la probabilidad anual de excedencia de las precipitaciones máximas mensuales o en 24 horas, para el período comprendido entre los años 1991 y 2020, utilizando el modelo de probabilidad de Poisson.

Para tal fin, se seleccionaron estaciones meteorológicas ubicadas en el municipio de Pueblo Bello, así como en municipios colindantes —Valledupar, Fundación, Algarrobo, Ciénaga y Santa Marta— con el objetivo de cubrir adecuadamente la región de estudio y su entorno inmediato. La **Tabla 8** presenta el listado de las 10 estaciones seleccionadas para el análisis.

Tabla 8

Estaciones meteorológicas seleccionadas para la estimación de la probabilidad anual de excedencia.

Código	Categoría	Estación	Municipio	Dpto	Altitud (msnm)	Este	Norte
28040010	PM	Pueblo Bello	Pueblo Bello	Cesar	1200	4935569.3	2709264.9
29060090	PM	San Sebastian De R	Pueblo Bello	Cesar	1200	4934385.0	2725711.4
28030220	PM	San Angel	Valledupar	Cesar	244	4951712.6	2701833.5
28010360	PM	Atanquez	Valledupar	Cesar	800	4961292.4	2740536.0
28035010	CO	Villa Rosa	Valledupar	Cesar	70	4940085.7	2684376.1
28040150	PM	Bellavista	Algarrobo	Magdalena	140	4886073.1	2694758.0
29060340	PM	El Palmor	Ciénaga	Magdalena	1200	4887909.8	2748689.8

29060100	PM	Santa Rosa de Lima	Fundación	Magdalena	75	4878762.1	2707743.6
15010040	PM	Vista Nieves	Santa Marta	Magdalena	20	4886213.8	2782491.3
29060060	PM	El Cenizo	Aracataca	Magdalena	450	4882662.1	2735239.8

Fuente: IDEAM, 2025.

Una vez seleccionadas las estaciones y organizada la base de datos fue calculada la probabilidad anual de excedencia aplicando la fórmula de Poisson (Ver **Tabla 9**):

$$P = 1 - e^{-\lambda} \tag{Ecuación 11}$$

Donde:

λ es el número promedio de veces por año que se excede el umbral

e es la constante de Euler (~2.718)

El número promedio de veces por año que se excede el umbral (λ) se calculó para cada estación mediante la siguiente formula:

$$\lambda = \frac{n}{T} \tag{Ecuación 12}$$

Donde:

n es número de veces que se excedió el umbral

T es el total de años del registro (30 años)

Tabla 9

Resultados de la probabilidad de excedencia anual para cada estación.

Código	Estación	Umbral_Exc_90	N	T	Landa	P_Anuual_Exc
28010360	Atanquez	471,99	32	30	1,07	0,65585
28040150	Bellavista	237,26	10	30	0,33	0,28347
29060060	El Cenizo	505,60	34	30	1,13	0,67804
29060340	El Palmor	440,40	35	30	1,17	0,68860
28040010	Pueblo Bello	337,00	35	30	1,17	0,68860
28030220	San Angel	193,60	31	30	1,03	0,64418
29060090	San Sebastian De R	213,40	35	30	1,17	0,68860

29060100	Santa Rosa de Lima	274,90	36	30	1,20	0,69881
28035010	Villa Rosa	235,06	32	30	1,07	0,65585
15010040	Vista Nieves	438,10	32	30	1,07	0,65585

Posteriormente, la base de datos con los resultados de la probabilidad de excedencia anual calculados para cada estación meteorológica es cargada en ArcGis Pro y reclasificada (Ver **Tabla 10**), para posteriormente interpolar la probabilidad mediante la herramienta Interpolation de Arc Toolbox, esta se encuentra en la siguiente ruta: **Spatial Analyst > Interpolation**, donde el campo Z corresponde a **P_Excedencia** y se guarda la ruta de salida como: **Precipitacion_R.tif**

Tabla 10.

Reclasificación de la probabilidad anual de excedencia.

Probabilidad anual de excedencia	Clasificación	Reclasificación
<0.2	Baja	1
0.2 – 0.5	Media	2
>0.5	Alta	3

Fuente. IDEAM, 2025.

7.3.2.5. Factor de Sismicidad

Para caracterizar el factor de sismicidad el SGC (2017) propone un enfoque general para estimar la probabilidad temporal de ocurrencia de un sismo capaz de desencadenar movimientos en masa. Esta aproximación se basa en la revisión de registros de sismicidad relacionados con movimientos en masa que se encuentran disponibles en el SGC y en la aplicación de curvas teóricas desarrolladas por Rodríguez et al., (1999).

- **Recolección y procesamiento de datos sísmicos**

Se construyó un inventario de eventos sísmicos históricos y recientes con magnitudes iguales o superiores a 2.0 Mw, registrados en un periodo de al menos 30 años en el área de estudio y sus alrededores. La información se obtuvo de fuentes como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el catálogo sísmico del United States Geological Survey (USGS), y registros locales presentes en literatura académica e informes técnicos.

Cada evento fue georreferenciado y asociado a variables como magnitud, profundidad, fecha, y posibles efectos sobre remociones en masa (Keefer, 1984).

- **Generación de la capa temática: Sismicidad**

Con el objetivo de representar espacialmente la influencia sísmica en la zona de estudio, se elaboró una capa temática ráster a partir de un inventario de eventos sísmicos históricos.

Se aplicó el método de interpolación geoestadística *Kriging Ordinario*, que permite estimar valores continuos a partir de datos puntuales considerando la dependencia espacial entre observaciones. Los pasos seguidos fueron:

- **Análisis Exploratorio:** Se evaluó la distribución estadística del parámetro seleccionado, identificando posibles outliers y transformaciones requeridas logarítmica.
- **Modelado de la Estructura Espacial:** Se construyó un semivariograma experimental y se ajustó un modelo teórico (exponencial), determinando los parámetros de rango, nugget y sill.
- **Ejecutar la Interpolación:** Usando el modelo de semivariograma ajustado, se generó una superficie continua que representa la variación espacial del parámetro sísmico en toda la zona de estudio.
- **Validación Cruzada:** Se llevó a cabo un análisis de validación cruzada (leave-one-out) para evaluar la precisión del modelo y ajustar parámetros si fuera necesario.
- La superficie interpolada se exportó como una capa ráster georreferenciada con resolución espacial de 12m.

7.3.3. Fase III. Análisis de susceptibilidad

En esta fase se desarrolló el análisis de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa, partiendo de la definición de la unidad de análisis; para esto el SGC propone el uso de la celda o píxel (formato ráster) del modelo digital de elevación, puesto que permite la generación de todas las variables geométricas y a cada píxel se le pueden asociar atributos cualitativos o cuantitativos.

Posteriormente, se procede al alistamiento de toda la información de la caracterización de los factores condicionantes según los parámetros de SGC:

- **Corrección topológica de capas vectoriales**

Inicialmente, todas las capas vectoriales que componen la base temática (unidades geológicas superficiales, subunidades geomorfológicas y cobertura de la tierra) fueron validadas topológicamente para garantizar que no contengan errores como polígonos superpuestos, vacíos, líneas sin nodos o geometrías no válidas.

En ArcGIS Pro, se utilizaron las herramientas “Check Geometry” y “Repair Geometry”. Esta validación es crucial para evitar conflictos durante su posterior conversión a formato ráster.

- **Conversión de capas vectoriales a ráster**

Una vez fueron corregidas, todas las capas vectoriales se convirtieron a ráster, tomando como referencia la resolución espacial del Modelo Digital de Elevación (DEM) seleccionado, el cual deberá cubrir toda el área de estudio. Este paso garantiza que todas las capas compartan una misma resolución, proyección y extensión espacial. En ArcGIS Pro la herramienta equivalente es “Feature to Raster”. Durante la conversión, se asignará un valor único a cada clase temática (por ejemplo, tipo de unidad – subunidad o grupo de la cobertura).

El SGC propone el análisis de susceptibilidad según el tipo de movimiento, en el caso de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento se recomienda la aplicación del método estadístico bivariado WoE, el objetivo de este método es evaluar la relación entre las variables de los factores condicionantes y la ocurrencia de movimientos en masa. Luego se procedió a la definición de la variable de agrupamiento para posteriormente combinarla con cada uno de los factores condicionantes (de manera independiente).

Para la modelación de la susceptibilidad a deslizamientos se empleó el complemento Weight of Evidence (WoE) del software QGIS. Este complemento permite aplicar la técnica estadístico-probabilística de pesos de evidencia, la cual establece relaciones cuantitativas entre un inventario de deslizamientos y las variables condicionantes (pendiente, curvatura, unidad geológica superficial, subunidad geomorfológica y cobertura de la tierra) representadas en capas temáticas. Mediante este enfoque, se calcularon los pesos positivos y negativos asociados a cada clase de las variables, permitiendo identificar aquellas con mayor influencia en la ocurrencia de deslizamientos, obteniendo como resultados el mapa de susceptibilidad final y las tablas de pesos de evidencia por cada variable condicionante. En la **Tabla 11** se describen los parámetros que contiene las tablas de evidencia de pesos.

Tabla 11

Significado de parámetros, tablas de pesos de evidencia.

Parámetro	Significado
Class	Identificador numérico de la clase de la variable condicionante
Count	Número total de píxeles en esa clase (con o sin deslizamiento).
Point Count	Número de píxeles con deslizamientos dentro de esa clase de pendiente.
W_Plus	Peso de evidencia positivo: indica la relación entre presencia del factor y del deslizamiento.
S_WPlus	Error estándar del peso positivo.
W_Minus	Peso de evidencia negativo: mide la relación entre ausencia del factor y del deslizamiento.
S_WMinus	Error estándar del peso negativo.
Contrast	$W^+ - W^- - W^+ - W^-$: diferencia entre los pesos, indica la fuerza total del factor en esa clase.
S_Contrast	Error estándar del contraste.
Stud. Contrast	Contraste estandarizado ($\text{Contrast} / S_{\text{Contrast}}$), sirve como prueba estadística de significancia.
Gen. Class	Clase general agrupada (en este caso igual a Class).
S_Weights	Error estándar del peso general.

7.3.4. Fase IV. Zonificación de la Amenaza

Para la caracterización de la amenaza por fenómenos de remoción en masa se realizó la integración de la susceptibilidad con los factores detonantes, los cuales fueron calculados a partir de una ponderación entre la precipitación y la sismicidad, otorgando un peso del 70% a la precipitación y del 30% a la sismicidad, según la **Ecuación 13**. Posteriormente, se sumaron estos factores detonantes a la susceptibilidad para obtener el valor final de la amenaza, de acuerdo con la **Ecuación 14**. Esta integración permitió agrupar los resultados en categorías de amenaza baja, media y alta, conforme a lo establecido en el Decreto 1807 de 2014 (ver **Tabla 12**).

$$\text{Detonantes} = (\text{Precipitación} * 0.7) + (\text{Sismicidad} * 0.3) \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$\text{Amenaza} = \text{Susceptibilidad} + \text{Detonantes} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Tabla 12*Relación de la categoría de amenaza y de susceptibilidad.*

Categoría de susceptibilidad	Categoría de amenaza
Muy alta	Alta
Alta	
Media	Media
Baja	Baja

Fuente. (SGC, 2017).

8. Resultados

8.1.Revisión de Literatura y Bases Técnicas

8.1.1. Ubicación de los eventos de remoción en masa registrados en el aplicativo SIMMA

Como insumo fundamental para la modelación de la susceptibilidad, se elaboró un inventario de movimientos en masa en el municipio de Pueblo Bello, a partir de la información reportada en la base de datos del Sistema de Información Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (SIMMA). El inventario fue georreferenciado y categorizado de acuerdo con el tipo de movimiento identificado, clasificándose en tres tipos principales: *flujos*, *deslizamientos* y *caídas*. La información cartográfica fue complementada con una tabla de inventario en la que se especifican detalles como la ubicación, tipo de movimiento, vereda y coordenadas (ver **Tabla 13**), lo cual permitió una caracterización inicial de los eventos y su utilización posterior en el análisis de susceptibilidad mediante el método de pesos de evidencia.

Tabla 13

Inventario de movimientos en masa en el municipio de Pueblo Bello.

Código	Fecha evento	Fecha reporte	PM_Subtipo Movimiento	Tipo Material	Estado	Sitio	Latitud	Longitud	h (m)	Imp.
36353	10/07/2018	27/07/2018		Tierra	Activo	Finca El Higuito, Región de Gámeke, Resguardo Arhuaco	10° 28' 46.77"	-73° 34' 51.26"	-	Alta
36352	10/07/2018	20/07/2018		Tierra	Activo	Resguardo Arhuaco, Región Chinchigua, predio de Jose Angel Arroyo	10° 29' 3.19"	-73° 35' 25"	-	Media
29791	1/04/2012	29/06/2014	Caída de roca	Roca	Activo	Vereda La Honda	10°27' 4"	-73° 29' 24"	1000	Baja
29764	1/06/2013	1/07/2014	Deslizamiento traslacional	Tierra	Activo	Vereda La Honda	10°26' 12"	-73°29' 33"	767	Baja
29761	16/10/2011	1/07/2014	Deslizamiento traslacional	Tierra	Abandonado	Vereda La Honda	10°26' 25"	-73°29' 27"	800	Baja
29780	16/10/2011	1/07/2014	Flujo de detritos	Detritos	Suspendido	Vereda la honda	10°27' 4"	-73° 29' 24"	1000	Baja

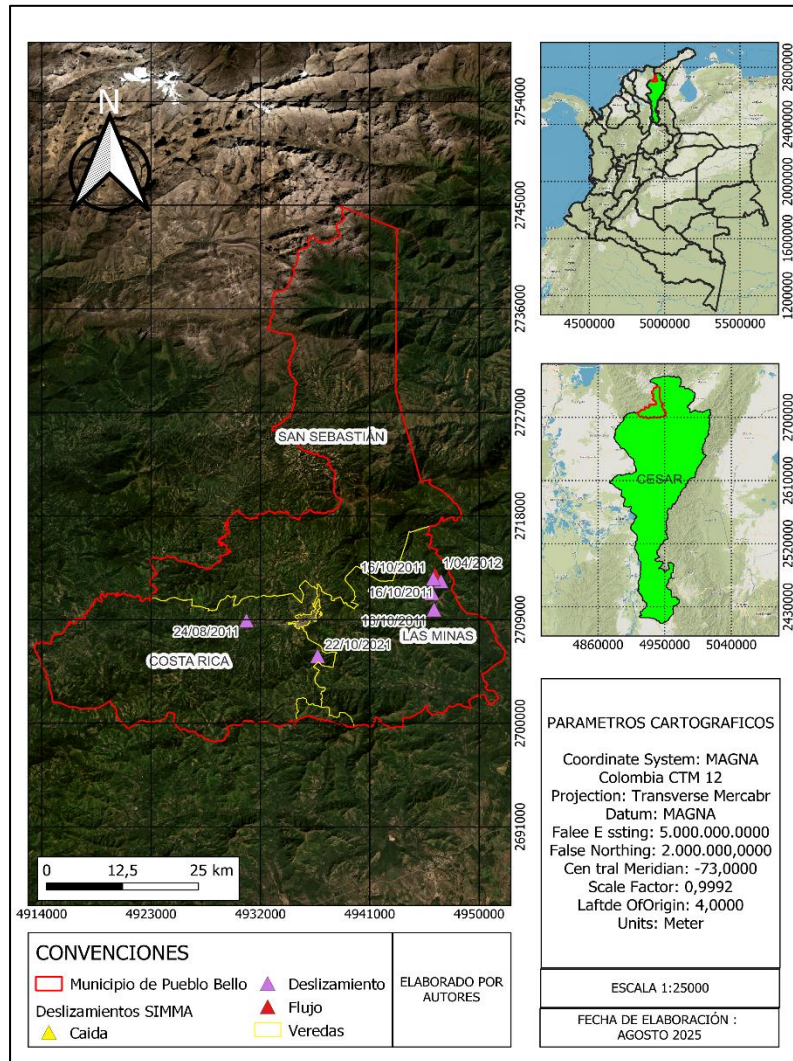
29792	16/10/2011	1/07/2014	Deslizamiento traslacional planar	Tierra	Suspendido	Vereda la honda	10°26' 45"	-73° 29' 8"	1000	Baja
29781	16/10/2011	1/07/2014	Deslizamiento traslacional	Tierra	Suspendido	Vereda la honda	10° 26' 52"	-73°29' 29"	900	Baja
29782	22/10/2011	22/06/2014	Deslizamiento traslacional planar	Tierra	Suspendido	Quebrada los antiguos	10°23' 13"	-73°34' 42"	1453	Baja
29783	24/08/2011	24/06/2014	Deslizamiento traslacional planar		Suspendido	Vereda el cañón. Rio Ariguani	10° 24' 53"	-73°37' 55"	1005	Baja

Fuente. (SIMMA, 2025)

De acuerdo con la información presentada en la **tabla 13**, en el municipio de Pueblo Bello, en un periodo de 14 años (2011-2025) se han presentaron 10 eventos de movimiento en masa reportados antes el portal de Servicio Geológico Colombiano SIMMA, de los cuales el 60% se presentaron en el año 2011, y también según la información reportada el 60% corresponde a eventos de deslizamiento. La distribución espacial de dichos eventos se muestra en la **figura 3**, en la que se evidencia una mayor concentración de movimientos en la zona suroriental del municipio, en la vereda Las Minas y zonas cercanas a la cabecera municipal. Estos eventos se encuentran mayoritariamente asociados a pendientes pronunciadas, lo que refuerza la relación directa entre el relieve montañoso del área de estudio y la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Figura 3

Mapa con la ubicación de los eventos de remoción en masa registrados en el aplicativo SIMMA



Fuente. Adoptado por (SIMMA, 2025).

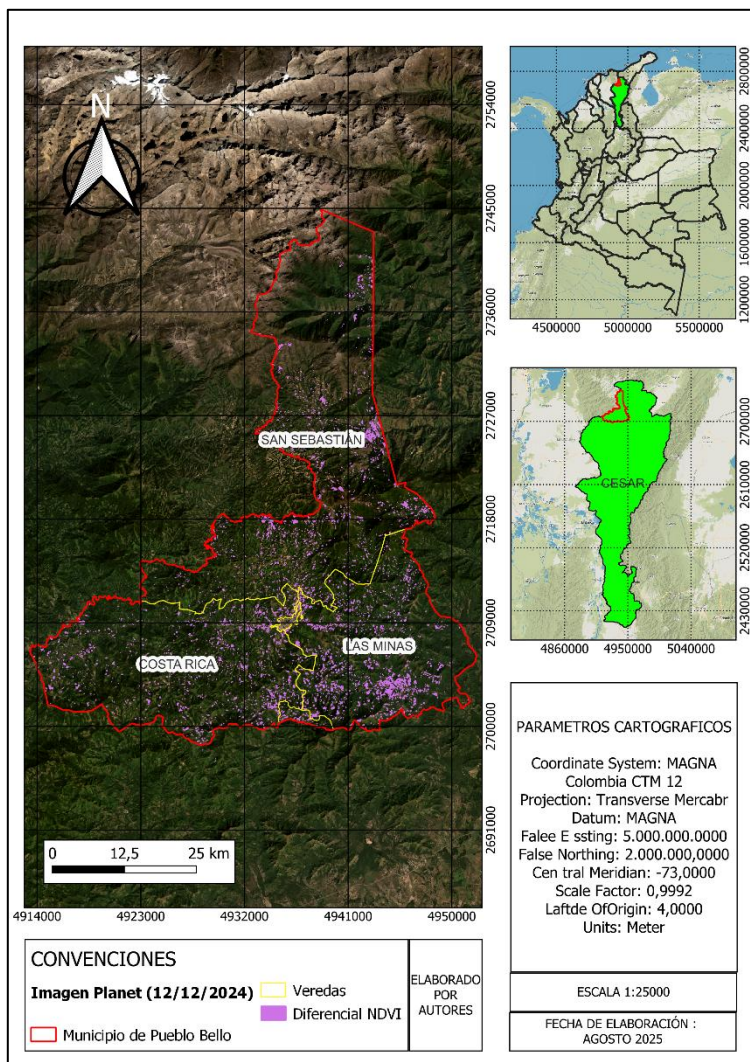
8.1.2. Variación de la cobertura vegetal, resultado del procesamiento y análisis satelital, que evidencia las zonas con mayor disminución del índice NDVI.

Como parte del análisis multitemporal de coberturas, se generó un mapa de variación de la vegetación en el municipio de Pueblo Bello, a partir del procesamiento de imágenes satelitales PlanetScope en un periodo de 9 años (2016 – 2025).

En la **Figura 4** se muestra el resultado del análisis del diferencial del NDVI, donde las zonas en tonos rojizos representan áreas con una mayor disminución de la cobertura vegetal. Estas zonas se concentran principalmente en sectores con pendientes pronunciadas y presencia de actividad antrópica, lo que sugiere una asociación con procesos de deforestación, ampliación de la frontera agrícola y/o la ocurrencia de fenómenos naturales como deslizamientos. En conjunto, estas áreas comprenden aproximadamente 810.3 hectáreas, equivalentes al 1.1 % de la superficie total del municipio.

Figura 4

Mapa de la variación de la cobertura vegetal, resultado del procesamiento y análisis satelital, que evidencia las zonas con mayor disminución del índice NDVI.



8.2. Factores condicionantes y detonantes que inciden en la amenaza por fenómenos de remoción en masa

8.2.1. Factores Condicionantes

8.2.1.1. Análisis de la pendiente

La

Figura 5 muestra la clasificación de las pendientes del terreno en el municipio de Pueblo Bello, divididas en siete categorías que van desde plano hasta extremadamente abrupto, según el grado de inclinación del relieve (ver **Tabla 14**). Las zonas planas y suavemente inclinadas se localizan principalmente en los valles, fondos de quebradas y partes bajas del municipio, especialmente en sectores de las veredas Costa Rica y en el casco urbano. Las áreas moderadamente abruptas predominan en gran parte del territorio, lo que evidencia un relieve irregular y de transición. Finalmente, las zonas muy abruptas y extremadamente abruptas, que representan pendientes pronunciadas superiores al 45%, se concentran en áreas montañosas del occidente y sur del municipio, particularmente en Costa Rica y el sur de Las Minas, donde las condiciones topográficas aumentan la susceptibilidad a movimientos en masa. En la **Tabla 15** se presenta la tabla de evidencia de pesos en relación con las clases de la variable de pendientes.

Tabla 14

Clasificación de la capa de pendientes.

Inclinación de la pendiente (°)	Clasificación	Clase
0 – 2	Plano a casi plano	1
2 – 4	Suavemente inclinado	2
4 – 8	Inclinado	3
8 – 16	Moderadamente abrupto	4
16 – 35	Abrupto	5
35 – 55	Muy abrupto	6
>55	Extremadamente abrupto	7

Fuente. Van Zuidam, 1986. Tomado del SGC, 2017.

Figura 5

Mapa de las Pendientes generadas mediante el DEM de Pueblo Bello – Cesar (resolución 12.5 m).

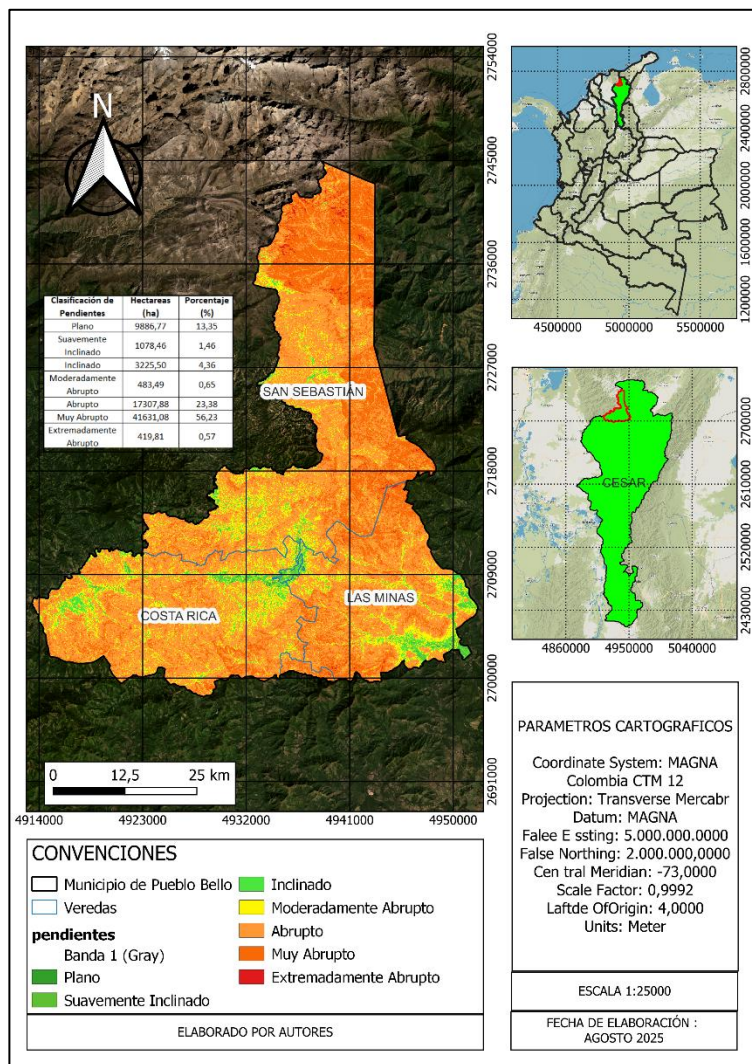


Tabla 15

Tabla de pesos de evidencia de la variable de pendientes.

Class	Count	Point Count	W_Plus	S_WPlus	W_Minus	S_ WMinus	Contrast	S Contrast	Stud. Contrast	S Weights
1	30078	629	0.754	0.0403	-0.0061	0.0045	0.76	0.0405	18.7462	0.0403
2	77085	1437	0.6367	0.0266	-0.0133	0.0045	0.65	0.027	24.0683	0.0266
3	231693	3220	0.3382	0.0177	-0.019	0.0046	0.3572	0.0183	19.4911	0.0177
4	711172	8020	0.1266	0.0112	-0.0211	0.0048	0.1477	0.0122	12.084	0.0112
5	2845966	27808	-0.0183	0.006	0.0221	0.0066	-0.0403	0.0089	-4.5298	0.006
6	1209061	9749	-0.2121	0.0102	0.0572	0.0049	-0.2692	0.0113	-23.8236	0.0102
7	36112	301	-0.1786	0.0579	0.001	0.0044	-0.1797	0.0581	-3.0947	0.0579

La **Tabla 15** de pesos de evidencia para la variable *pendientes* muestra que las clases bajas e intermedias (1, 2 y 3) presentan los mayores valores positivos de W^+ (0.754, 0.637 y 0.338), lo que indica una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en estos rangos de inclinación. En contraste, las pendientes más pronunciadas (clase 6 con W^+ negativo de -0.2121) muestran menor relación con estos procesos. Esto sugiere que en Pueblo Bello los deslizamientos se concentran principalmente en zonas de transición topográfica, donde la acumulación de materiales inestables es mayor, y no en las laderas más abruptas.

8.2.1.2. Curvatura de Terreno

La curvatura del terreno en el municipio de Pueblo Bello, Cesar, fue clasificada en cinco categorías: fuertemente cóncava, cóncava moderada, casi plano neutro, convexa moderada y fuertemente convexa (ver

Tabla 16). En la Figura 6 se observa que gran parte del municipio presenta curvaturas moderadamente convexas y casi planas, especialmente en zonas intermedias y bajas, lo que sugiere una morfología suavemente ondulada. Las áreas de curvatura fuertemente convexa (color rojo), que se asocian a crestas, divisorias o relieves marcadamente elevados, se encuentran dispersas principalmente en zonas montañosas, especialmente en el suroeste de Costa Rica y partes elevadas de Las Minas. Por otro lado, las áreas con curvatura fuertemente cóncava (color verde),

relacionadas con canales de concentración de escorrentía y acumulación de agua o sedimentos, aparecen de forma más puntual a lo largo de las pendientes y zonas de drenaje. En la

Tabla 17 se presenta la tabla de evidencia de pesos en relación con las clases de la variable de curvatura del terreno.

Figura 6

Mapa de Curvatura generado a partir del DEM de Pueblo Bello – Cesar (resolución 12.5m).

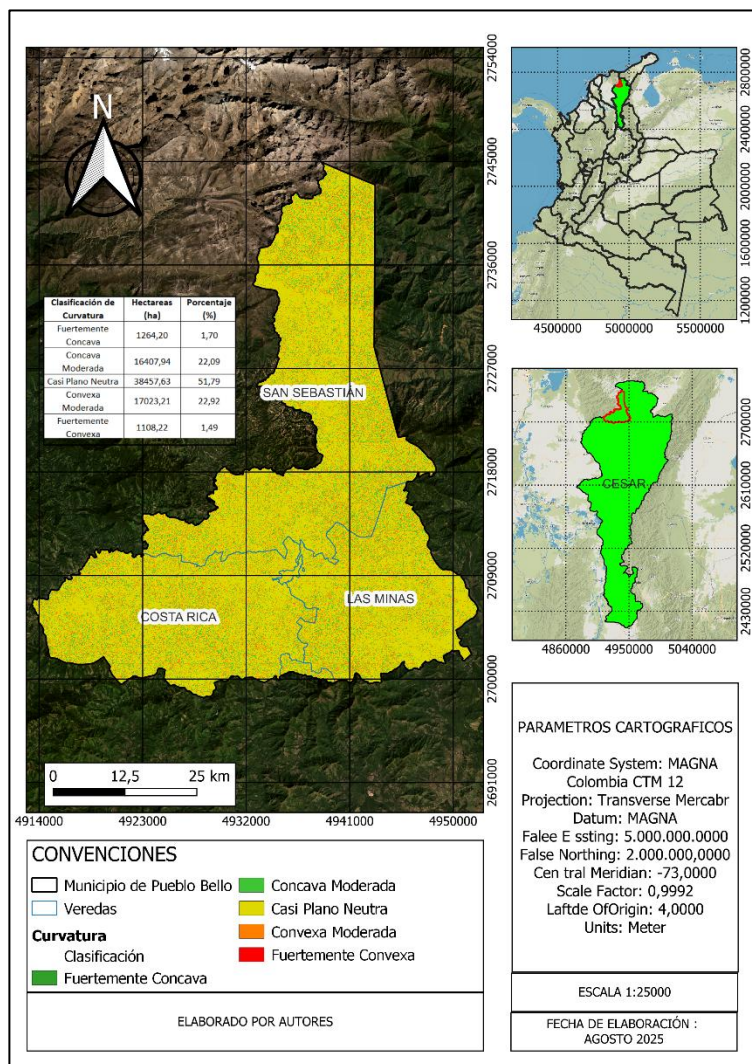


Tabla 16

Clasificación de la capa de curvatura.

Percentiles	Clasificación	Clase
>-10	Fuertemente cóncava	1
-10 a -2	Cóncava moderada	2
-2 a 2	Casi plano neutra	3
2 a 10	Convexa moderada	4
>10	Fuertemente convexa	5

Tabla 17*Tabla de pesos de evidencia de la variable de curvatura del terreno*

Class	Count	Point Count	W Plus	S WPlus	W Minus	S WMinus	Contrast	S Contrast	Stud. Contrast	S Weights
1	89962	461	-0.6571	0.0467	0.0081	0.0045	-0.6652	0.0469	-14.1815	0.0467
2	1179510	9226	-0.2419	0.0105	0.0616	0.0049	-0.3035	0.0115	-26.2897	0.0105
3	2586182	30704	0.1787	0.0057	-0.2162	0.007	0.3948	0.009	43.6303	0.0057
4	1223582	10485	-0.1506	0.0098	0.0437	0.005	-0.1942	0.011	-17.6601	0.0098
5	77903	420	-0.6165	0.0489	0.0071	0.0045	-0.6236	0.0491	-12.6927	0.0489

La **Tabla 17** de pesos de evidencia para la variable *curvatura del terreno* indica que la clase 3 presenta el mayor valor positivo de W^+ (0.1787), lo que significa que en estas formas de relieve existe una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. En contraste, las clases 1 y 5 muestran valores negativos de W^+ (-0.6571 y -0.6165), asociándose con menor susceptibilidad. En términos generales, esto sugiere que las áreas con curvaturas intermedias concentran mayor inestabilidad en Pueblo Bello, mientras que las zonas cóncavas o convexas extremas presentan menor relación con la ocurrencia de movimientos en masa.

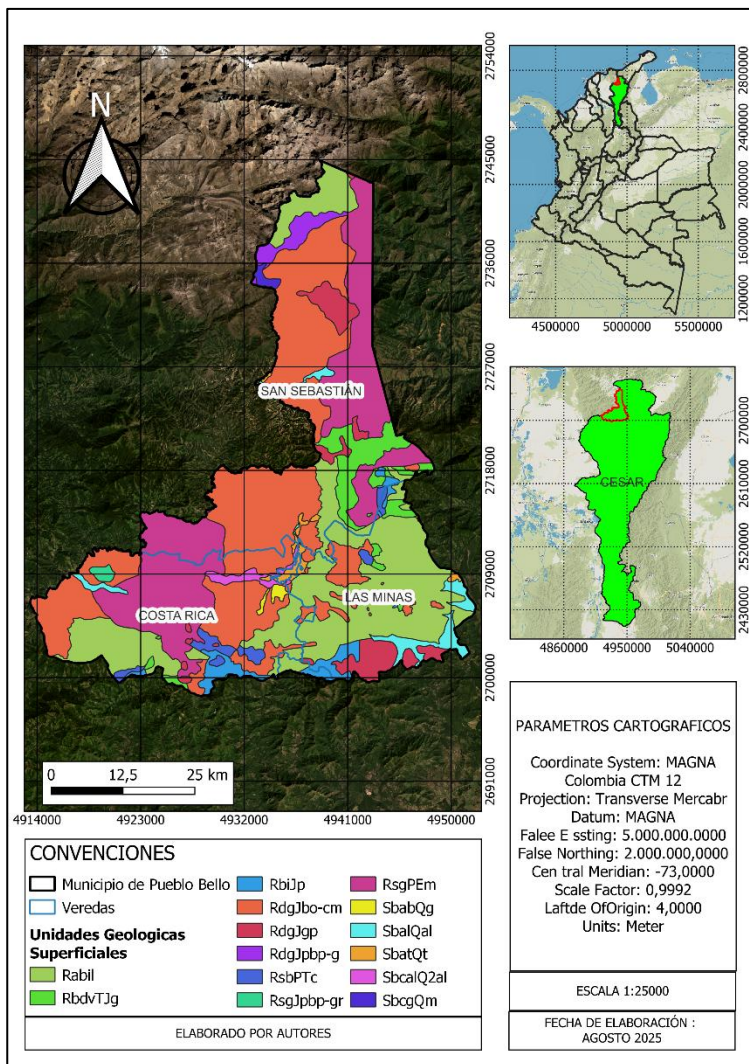
8.2.1.3. Unidades Geológicas Superficiales

En la **Figura 7** se muestra la distribución espacial de las unidades geológicas superficiales (UGS) en el polígono de estudio. En donde, como se puede observar, el porcentaje de unidades geológicas superficiales con mayor presencia en el área de estudio corresponde a rocas blandas, con un 54,69%, seguido de rocas duras con un 38,63%, material tipo suelo con un 4,89% y por último, rocas semicompetentes con un 1,79%. Al traslapar las unidades geológicas superficiales

con el inventario de movimientos en masa del SIMMA, se puede observar que el 66,6% de los procesos del inventario se generaron sobre roca blanda, el 22,2% se generaron sobre roca dura, y el 11,1% se generaron sobre tipo de material tipo suelo. En la **Tabla 19** se presenta la tabla de evidencia de pesos en relación con las clases de la variable de unidades geológicas superficiales.

Figura 7

Mapa de las unidades geológicas superficiales reclasificado con las unidades litológicas según su susceptibilidad estructural.



Fuente. Adaptado del servicio geológico colombiano (SGC, 2007).

Las descripciones de las UGS están enfocadas en su génesis, litología, parámetros de resistencia mecánica de las formaciones, grado de meteorización y rasgos estructurales, puesto que estos factores determinan la competencia del material para mantener unidos sus componentes a los agentes que puedan deteriorarlos o hacerlos susceptibles a la generación de fenómenos de remoción en masa.

En la **Tabla 18** se presenta el listado de unidades geológicas superficiales identificadas y en la **Tabla 19** se presenta la tabla de evidencia de pesos en relación con las clases de la variable de curvatura del terreno.

Tabla 18

Unidades geológicas superficiales

UGS	Nombre	Clase
RdgJgp	Roca dura de la Formación Granito Porfirítico	1
RdgJbo-cm	Roca dura granitoide de la Formación Batolito P. Bello y Patillal – Facies cuarzo monzonita	2
RdgJpbp-g	Roca dura granitoide de la Formación Batolito P. Bello y Patillal – Facies granito	3
RsgJpbp-gr	Roca semi competente granitoide de la Formación Batolito P. Bello y Patillal – Facies ganofírica	4
RsgPEm	Roca blanda volcanoclástica de la formación granulitas de los mangos	5
RsbPTc	Roca semicompetente mixta de la Formación Corual	6
SbcalQ2al	Suelo aluvial reciente	7
SbabQg	Suelo aluvial grueso de depósitos de abanicos y gravas	8
SbcgQm	Suelo coluvial-glaciario de depósitos de morrenas y fluvio-glaciares	9
SbatQt	Suelo aluvial medio de depósitos de terrazas aluviales	10
RbdvTJg	Roca blanda heterogénea de la Formación Guatapurí	11
RbiJp	Roca blanda volcanoclástica de la Formación Ignimbrita de la Piña	12
Rabil	Roca blanda volcanoclástica de la Formación Ignimbrita de Los Clavos	13
SbalQal	Suelo aluvial reciente	14

A continuación, se describe cada UGS identificada en el municipio de Pueblo Bello:

- **Roca blanda volcanoclástica de la formación granulitas de los mangos (RsgPEm):** Unidad compuesta por granulitas, neises y anfíbolitas, con intercalaciones de mármol y metacarbonatos, formadas por metamorfismo regional en facies granulita. Exhibe alta competencia en estado fresco, aunque disminuida por alteración hidrotermal, milonitas y

fallamiento. Presenta foliación, bandeamiento composicional y una estructura intensamente deformada con pliegues, fallas y diques.

- **Roca dura granitoide de la Formación Batolito P. Bello y Patillal – Facies cuarzo monzonita (RdgJbo-cm):** Compuesta por monzogranitos y cuarzo monzonitas con enclaves máficos, esta unidad corresponde a un intrusivo calcoalcalino profundo. Presenta alta resistencia, textura fanerítica, baja porosidad, y alteración hidrotermal local. Se reconocen enclaves, diques y fracturación moderada.
- **Roca dura granitoide de la Formación Batolito P. Bello y Patillal – Facies granito (RdJpbp-g):** Se trata de leucosienogranitos y leucomonzogranitos formados por intrusiones félsicas tardías, con alta competencia estructural aunque localmente afectada por diques y alteraciones. Posee fracturación media y meteorización de bajo a medio grado.
- **Roca semicompetente granitoide de la Formación Batolito P. Bello y Patillal – Facies ganofírica (RsgJpbp-gr):** Conformada por granitos granofíricos de textura heterogranular, enclaves máficos y evidencias de enfriamiento rápido, esta unidad tiene resistencia intermedia. Presenta estructuras anisotrópicas, diques, y alteración clorítica en sectores puntuales.
- **Roca dura de la Formación Granito Porfírico (RdgJgp):** Esta unidad corresponde a un cuerpo ígneo intrusivo, posiblemente vinculado a actividad volcánica, compuesto por granito porfírico con fenocristales de plagioclasa, biotita, cuarzo, feldespato potásico y hornblenda. Posee una textura fanerítica y una matriz afanítica estable, otorgándole alta resistencia y baja porosidad. No se reporta alteración significativa y su presencia ha sido inferida principalmente a partir de sensores remotos
- **Roca blanda volcanoclástica de la Formación Ignimbrita de Los Clavos (PbJlc):** Compuesta por tobas, ignimbritas y brechas de composición traquítica a andesítica, esta unidad tiene un origen piroclástico multievento. Su matriz vítrea devitrificada y alta fragmentación interna resultan en baja resistencia mecánica. La meteorización es alta, con presencia de epidotización, cloritización y sulfuros, y sugiere estructuras de flujo, intercalaciones y diques félsicos y máficos.
- **Roca blanda volcanoclastica de la Formación Ignimbrita de la Piña (JbiJp):** Unidad constituida por ignimbritas, tobas cuarzoláticas y andesitas porfíricas originadas por depósitos piroclásticos y volcanosedimentarios. Se caracteriza por una matriz vítrea con

presencia de autolitos y fragmentos líticos epidotizados, que le confieren baja resistencia y alta heterogeneidad. Presenta un grado de meteorización moderado a alto, especialmente en zonas epidotizadas, y sus principales rasgos estructurales incluyen texturas de flujo, venas de calcita y diques

- **Roca semicompetente mixta de la Formación Corual (RsbPTc):** Unidad geológica con Origen mixto volvaico y sedimentario marino profundo, compuesta por basaltos, diabasas, andesitas porfíricas, limolitas y tobas. Presenta resistencia variable, dependiendo del grado de alteración epidótica o clorítica, y muestra intercalaciones litológicas, foliación secundaria y diques, con un grado de meteorización localizado.
- **Roca blanda heterogénea de la Formación Guatapurí (RbdvTjg):** Formación constituida por una secuencia retrabajada de depósitos volcánicos, piroclásticos y sedimentarios como tobas, ignimbritas, arenitas, limolitas y calizas. Se caracteriza por baja cohesión, alta heterogeneidad y presencia de estructuras erosivas y de flujo. Su meteorización es variable y los rasgos estructurales incluyen pliegues, fallas normales y diques.
- **Suelo coluvial-glaciar de depósitos de morrenas y fluvioglaciares (SbcQm):** Depósito no consolidado originado por procesos de deshielo y transporte glacial, compuesto por bloques angulosos polimícticos en matriz areno-arcillosa. Tiene alta inestabilidad, grado de meteorización bajo a moderado y carece de estructura interna, siendo su espesor dependiente del valle glaciar donde se deposita
- **Suelo aluvial grueso de depósitos de abanicos y gravas (SbabQg):** Depósito conformado por gravas y bloques derivados de rocas ígneas y metamórficas, este depósito se origina por flujos torrenciales en frentes de montaña. Presenta baja cohesión, selección deficiente, estructura caótica e intercalaciones abruptas. Su espesor es variable y la meteorización es baja.
- **Suelo aluvial medio de depósitos de terrazas aluviales (SbatQt):** Corresponde a depósitos fluviales en terrazas sub-actuales, con capas de arenitas conglomeráticas, gravas y limolitas tobáceas. Tiene baja cohesión, estructura estratificada pobremente seleccionada, meteorización de grado bajo a medio y estructuras inclinadas o discordantes
- **Suelo aluvial reciente (SbcalQ2cal y SbalQal):** Unidad formada por arenas, gravas y bloques en matriz lodosa, producto de sedimentación fluvial reciente. Se caracteriza por muy baja

cohesión, alta compresibilidad, posible licuefacción, estructura caótica sin consolidación y espesor bajo a medio según la dinámica del cauce activo.

Tabla 19

Tabla de pesos de evidencia de la variable de unidades geológicas superficiales

Class	Count	Point Count	W Plus	S WPlus	W Minus	S WMinus	Contrast	S Contrast	Stud. Contrast	S Weights
1	231528	3458	0.4113	0.0171	-0.0233	0.0046	0.4346	0.0177	24.4995	0.0171
2	1687655	16160	-0.0387	0.0079	0.0177	0.0054	-0.0564	0.0096	-5.9006	0.0079
3	74134	12	-4.1283	0.2887	0.0151	0.0044	-4.1434	0.2887	-14.3504	0.2887
4	15442	30	-1.6415	0.1828	0.002	0.0044	-1.6435	0.1828	-8.9902	0.1828
5	1142600	8627	-0.2783	0.0108	0.0671	0.0049	-0.3454	0.0119	-29.1453	0.0108
6	77049	430	-0.5826	0.0484	0.0071	0.0045	-0.5896	0.0486	-12.1415	0.0484
7	41844	987	0.8771	0.0322	-0.0112	0.0045	0.8882	0.0325	27.3115	0.0322
8	15407	402	0.9806	0.0505	-0.005	0.0045	0.9856	0.0507	19.4263	0.0505
9	16366	109	-0.4047	0.0961	0.001	0.0044	-0.4057	0.0962	-4.2168	0.0961
10	44759	928	0.7452	0.0332	-0.0091	0.0045	0.7543	0.0335	22.5348	0.0332
11	230748	1181	-0.6696	0.0292	0.0228	0.0045	-0.6924	0.0295	-23.4562	0.0292
12	129327	1798	0.3386	0.0237	-0.0103	0.0045	0.3489	0.0242	14.4322	0.0237
13	1319536	15269	0.1527	0.0081	-0.0595	0.0053	0.2121	0.0097	21.8485	0.0081
14	128456	1905	0.4041	0.0231	-0.0124	0.0045	0.4165	0.0235	17.7058	0.0231

En la **Tabla 19** de las variables de *unidades geológicas superficiales* evidencia contrastes importantes en su relación con los procesos de remoción en masa. Algunas clases, como la 8 ($W^+ = 0.9806$) y la 7 ($W^+ = 0.8771$), muestran valores positivos elevados, lo que indica que en estas formaciones geológicas existe una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. También las clases 10 y 1 reflejan una asociación positiva significativa. En contraste, otras unidades presentan pesos negativos, como la clase 3 ($W^+ = -4.1283$) y la clase 6 ($W^+ = -0.8526$), lo que señala que en esas áreas la relación con los deslizamientos es reducida. En general, los resultados muestran que no todas las unidades geológicas contribuyen de igual forma a la inestabilidad, siendo algunas litologías más susceptibles a procesos de remoción, lo cual coincide con la distribución espacial de los eventos registrados en el municipio.

8.2.1.4. Subunidades Geomorfológicas

Este mapa representa la distribución de subunidades geomorfológicas en el municipio de Pueblo Bello, departamento del Cesar, Colombia. Cada polígono está clasificado mediante códigos alfanuméricos que corresponden a diferentes formas del relieve, las cuales son unidades fundamentales para el análisis de amenazas naturales como los movimientos en masa. Estas subunidades fueron delimitadas mediante fotointerpretación y análisis de relieve.

La cartografía está dividida en tres grandes veredas: San Sebastián, Las Minas y Costa Rica, cada una con una diversidad notable de subunidades. Se observa que San Sebastián está dominada por unidades como *Dsdm*, *Dldem1* y *Slfel*, asociadas a laderas diseccionadas, escarpes y formas estructurales. En Las Minas predominan unidades como *Dsrl*, *Dldeb*, *Diresm* y *Faas*, vinculadas a depósitos coluviales y formas de acumulación o erosión asociadas a procesos fluviales. Por su parte, Costa Rica muestra una alta heterogeneidad geomorfológica, incluyendo subunidades como *Ssl*, *Dldeb*, *Dpdm*, *Slfel* y *Fpac*, lo que sugiere una combinación de terrazas, laderas, piedemontes y formas estructurales (ver

Figura 8).

En la **Tabla 20** se presenta el listado de subunidades geomorfológicas identificadas y en la **Tabla 21** se presenta la tabla de evidencia de pesos en relación con las clases de variables de subunidades geomorfológicas.

Tabla 20

Subunidades geomorfológicas

Nomenclatura	Subunidad geomorfológica	Clase
Faas	Abanico aluvial	1
Scel	Cerro estructural	2
Dcre	Colina remanente	3
Dcrem	Colina remanente muy disectada	4
Dcrd	Colina residual	5
Dcoc	Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión	6
Slfel	Escarpe de línea de falla	7
Ftae	Terraza de acumulación	8
Sesbl	Espolón	9
Slcpc	Ladera ondulada	10
Slcpl	Ladera contrapendiente	11
Slcpm	Ladera contrapendiente	12

Nomenclatura	Subunidad geomorfológica	Clase
Slel	Ladera estructural	13
Slem	Ladera estructural	14

Figura 8

Mapa de unidades geomorfológicas realizado a partir de imágenes satelitales, las unidades geológicas, el DEM y fotointerpretación.

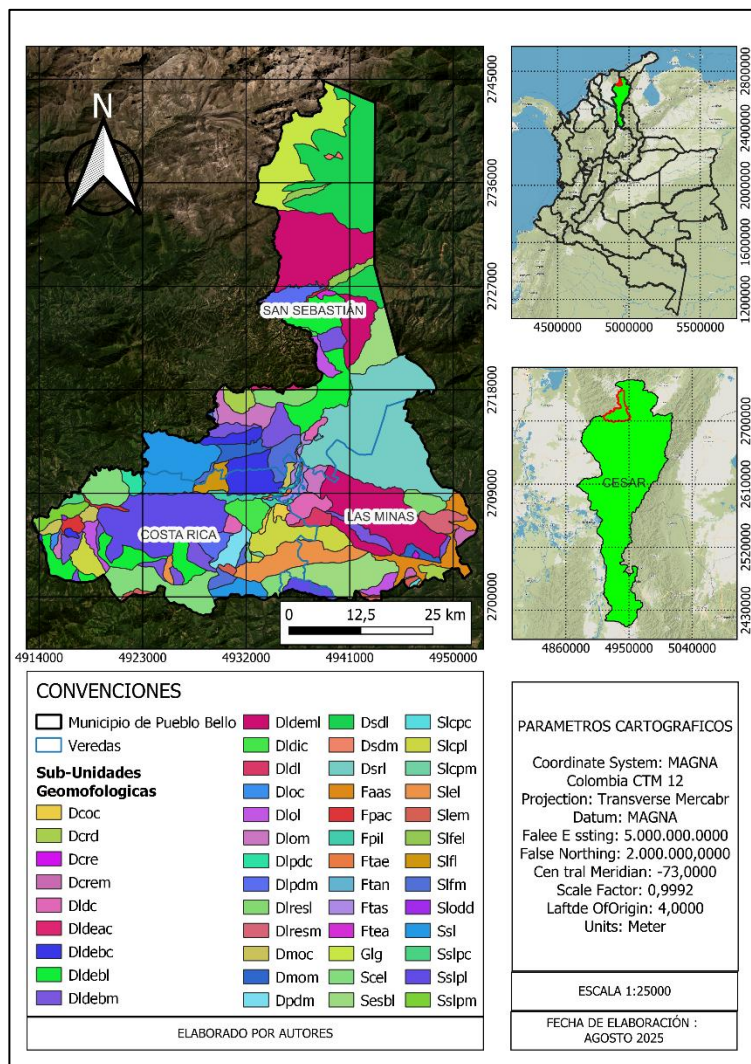


Tabla 21

Tabla de pesos de evidencia de la variable de subunidades geomorfológicas

Class	Count	Point Count	W Plus	S WPlus	W Minus	S WMinus	Contrast	S Contrast	Stud. Contrast	S Weights
1	97726	1621	0.5179	0.025	-0.0133	0.0045	0.5312	0.0254	20.8732	0.025
2	232654	2040	-0.1275	0.0222	0.0052	0.0045	-0.1328	0.0227	-5.8501	0.0222
3	1995	141	2.0239	0.0874	-0.003	0.0044	2.0269	0.0875	23.1722	0.0874
4	16709	45	-1.3141	0.1493	0.002	0.0044	-1.3161	0.1493	-8.8128	0.1493
5	49284	89	-1.7147	0.1061	0.008	0.0044	-1.7227	0.1062	-16.2231	0.1061
6	15407	402	0.9806	0.0505	-0.005	0.0045	0.9856	0.0507	19.4263	0.0505
7	34809	18	-2.9665	0.2358	0.007	0.0044	-2.9735	0.2358	-12.6101	0.2358
8	6180	165	1.0042	0.0789	-0.002	0.0044	1.0062	0.079	12.7309	0.0789
9	230192	4422	0.6673	0.0152	-0.0449	0.0046	0.7123	0.0159	44.8586	0.0152
10	2534	50	0.6947	0.1428	-0.001	0.0044	0.6957	0.1429	4.8679	0.1428
11	153191	1950	0.2492	0.0228	-0.0083	0.0045	0.2575	0.0232	11.0816	0.0228
12	6556	11	-1.7883	0.3018	0.001	0.0044	-1.7893	0.3018	-5.9288	0.3018
13	138883	3473	0.937	0.0172	-0.0431	0.0046	0.98	0.0178	55.093	0.0172
14	24485	346	0.3551	0.0541	-0.002	0.0045	0.3571	0.0543	6.5735	0.0541
15	7284	52	-0.3348	0.1392	0.002	0.0044	-0.3368	0.1392	-2.4186	0.1392
16	64963	746	0.145	0.0368	-0.002	0.0045	0.147	0.0371	3.9624	0.0368
17	89546	816	-0.0887	0.0352	0.001	0.0045	-0.0897	0.0355	-2.5304	0.0352
18	229553	154	-2.706	0.0806	0.043	0.0044	-2.7491	0.0807	-34.0517	0.0806
19	36021	1018	1.0627	0.0318	-0.0132	0.0045	1.0758	0.0321	33.5061	0.0318
20	69702	1156	0.5177	0.0297	-0.0102	0.0045	0.5279	0.03	17.5987	0.0297
21	22947	495	0.7857	0.0454	-0.006	0.0045	0.7917	0.0457	17.3403	0.0454
22	53787	419	-0.2468	0.049	0.002	0.0045	-0.2489	0.0492	-5.0534	0.049
23	21045	45	-1.5454	0.1492	0.003	0.0044	-1.5484	0.1493	-10.3711	0.1492
24	75206	349	-0.768	0.0537	0.0081	0.0045	-0.7761	0.0538	-14.4155	0.0537
25	33523	301	-0.1036	0.0579	0.001	0.0044	-0.1046	0.0581	-1.8015	0.0579
26	77593	518	-0.4023	0.0441	0.0051	0.0045	-0.4074	0.0443	-9.1937	0.0441
27	1256	4	-1.146	0.5008	0.001	0.0044	-1.147	0.5008	-2.2902	0.5008
28	8765	194	0.812	0.0726	-0.002	0.0044	0.814	0.0727	11.1903	0.0726
29	135505	989	-0.3125	0.0319	0.0072	0.0045	-0.3197	0.0322	-9.9185	0.0319
30	327269	2681	-0.1961	0.0194	0.0127	0.0046	-0.2089	0.0199	-10.484	0.0194
31	209434	1830	-0.1311	0.0235	0.0052	0.0045	-0.1363	0.0239	-5.6991	0.0235
32	691694	8403	0.2019	0.011	-0.0353	0.0049	0.2372	0.012	19.7647	0.011
33	85792	2197	0.9614	0.0216	-0.0278	0.0045	0.9892	0.0221	44.7925	0.0216
34	38830	7	-4.0206	0.378	0.008	0.0044	-4.0286	0.378	-10.6571	0.378
35	31743	449	0.3561	0.0475	-0.003	0.0045	0.3591	0.0477	7.5225	0.0475
36	48608	1204	0.9272	0.0292	-0.0142	0.0045	0.9414	0.0295	31.884	0.0292
37	39447	468	0.1779	0.0465	-0.001	0.0045	0.179	0.0467	3.8307	0.0465
38	35130	353	0.01	0.0535	0.008	0.0045	0.002	0.0537	0.037	0.0535

Class	Count	Point Count	W Plus	S WPlus	W Minus	S WMinus	Contrast	S Contrast	Stud. Contrast	S Weights
39	446610	2518	-0.5723	0.02	0.0408	0.0046	-0.6131	0.0205	-29.9122	0.02
40	3439	0	-1.9074	100	0.001	0.0044	-1.9084	100	-0.0191	100
41	231780	800	-1.0652	0.0354	0.0299	0.0045	-1.0951	0.0357	-30.678	0.0354
42	600251	4841	-0.2119	0.0144	0.0257	0.0047	-0.2376	0.0152	-15.6666	0.0144
43	9712	111	0.1402	0.0955	0.003	0.0044	0.1372	0.0956	1.4352	0.0955
44	340050	2249	-0.4117	0.0212	0.0233	0.0045	-0.435	0.0216	-20.1037	0.0212
45	33902	283	-0.1771	0.0597	0.001	0.0044	-0.1782	0.0599	-2.9762	0.0597
46	1585	19	0.1884	0.2308	0.001	0.0044	0.1874	0.2308	0.8118	0.2308
47	35686	828	0.8602	0.0352	-0.0091	0.0045	0.8693	0.0354	24.5255	0.0352
48	6608	26	-0.9337	0.1965	0.002	0.0044	-0.9357	0.1966	-4.7608	0.1965

La **Tabla 21** sobre la variable *subunidades geomorfológicas* evidencia un comportamiento heterogéneo frente a la ocurrencia de deslizamientos. Algunas clases presentan altos valores positivos de W^+ , como la 13 (0.937), 36 (0.9272), 21 (0.7857) y 8 (0.812), lo que indica que en estas geoformas existe una fuerte relación con los procesos de remoción en masa. De igual forma, clases como la 3 (0.4975) y la 10 (0.7452) muestran una asociación positiva significativa, reforzando la importancia de ciertas unidades en la modelación de la susceptibilidad. Por el contrario, se identifican clases con valores marcadamente negativos, como la 12 (-1.7833), 24 (-0.768), 27 (-1.146) y 47 (-0.9337), que evidencian menor probabilidad de deslizamientos en sus condiciones geomorfológicas. En términos generales, estos resultados indican que las áreas de transición morfológica y geoformas intermedias concentran mayor inestabilidad, mientras que otras unidades mantienen un comportamiento más estable. Esta tendencia coincide con la distribución espacial de los eventos históricos en Pueblo Bello, donde los deslizamientos se localizan principalmente en sectores con dinámicas geomorfológicas activas y acumulación de materiales.

8.2.1.5. Cobertura de la tierra Corin Land Cover (2022)

En el territorio se observan amplias zonas ocupadas por bosques naturales y vegetación secundaria, particularmente en la zona norte y nororiental del municipio, donde predominan categorías como bosque denso bajo de tierra firme (3.1.1.1), bosque enano del caribe (3.1.1.2.) y herbal denso de tierra firme no arbolado (3.2.1.1.1); en las zonas centro y sur de pueblo bello, se

evidencia una mayor concentración de usos agropecuarios, con coberturas como mosaico de pastos y cultivos (2.4.2), pastos arbustivos (2.3.5) y café a plena exposición (2.2.2.1), también se identifican sectores con infraestructura rural dispersa (categoría 1.1.2), zonas productivas especializadas como cultivos de plátano, caña y otros frutales, y algunas áreas con uso recreativo o turístico.

Se evidenció mayor ocurrencia de remociones en áreas agropecuarias como cultivos y pastizales. Estas coberturas alteran la estabilidad del terreno. Las zonas boscosas mostraron menor frecuencia de deslizamientos, actuando como barrera protectora (ver **Figura 9**).

En la **Tabla 22** se presenta el listado de la clasificación de la cobertura de la tierra y en la **Tabla 23** se presenta la tabla de evidencia de pesos en relación con las clases de esta variable condicionante.

Figura 9

Mapa de Coberturas de Corin Land Cover del año 2022 Municipio Pueblo Bello- Cesar.

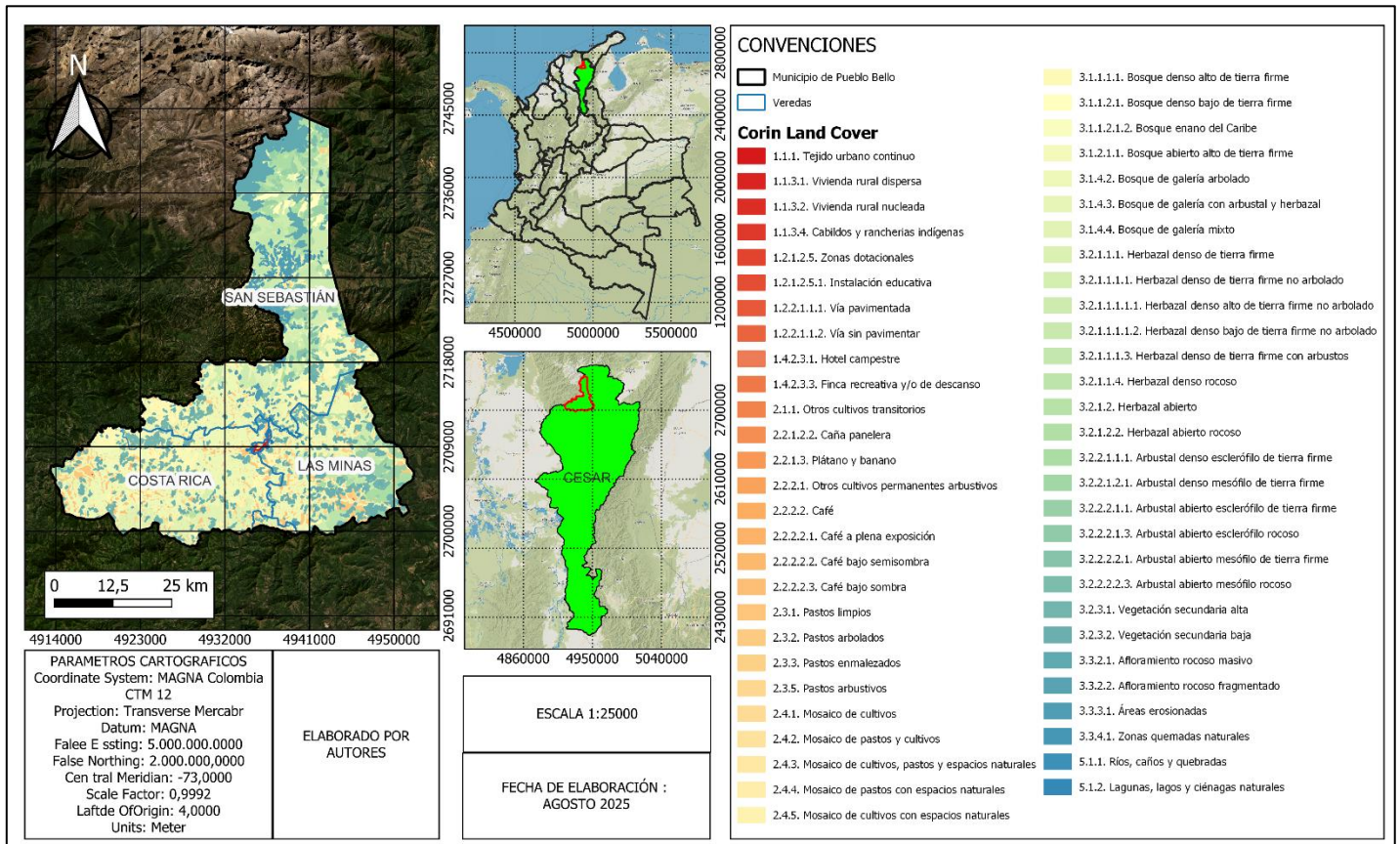


Tabla 22

Clasificación de coberturas de la tierra

Cobertura	Clase
1.1.1. Tejido urbano continuo	1
1.1.3.1. Vivienda rural dispersa	2
1.1.3.2. Vivienda rural nucleada	3
1.1.3.4. Cabildos y rancherías indígenas	4
1.2.1.2.5. Zonas dotacionales	5
1.2.1.2.5.1. Instalación educativa	6
1.2.2.1.1.1. Vía pavimentada	7
1.2.2.1.1.2. Vía sin pavimentar	8
1.4.2.3.1. Hotel campestre	9
1.4.2.3.3. Finca recreativa y/o de descanso	10

Cobertura	Clase
2.1.1. Otros cultivos transitorios	11
2.2.1.2.2. Caña panelera	12
2.2.1.3. Plátano y banano	13
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	14
2.2.2.2. Café	15
2.2.2.2.1. Café a plena exposición	16
2.2.2.2.2. Café bajo semisombra	17
2.2.2.2.3. Café bajo sombra	18
2.3.1. Pastos limpios	19
2.3.2. Pastos arbolados	20
2.3.3. Pastos enmalezados	21
2.3.5. Pastos arbustivos	22
2.4.1. Mosaico de cultivos	23
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	24
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	25
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	26
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	27
3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	28
3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	29
3.1.1.2.1.2. Bosque enano del Caribe	30
3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme	31
3.1.4.2. Bosque de galería arbolado	32
3.1.4.3. Bosque de galería con arbustal y herbazal	33
3.1.4.4. Bosque de galería mixto	34
3.2.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme	35
3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	36
3.2.1.1.1.1.1. Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado	37
3.2.1.1.1.1.2. Herbazal denso bajo de tierra firme no arbolado	38
3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos	39
3.2.1.1.4. Herbazal denso rocoso	40
3.2.1.2. Herbazal abierto	41
3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso	42
3.2.2.1.1.1. Arbustal denso esclerófilo de tierra firme	43
3.2.2.1.2.1. Arbustal denso mesófilo de tierra firme	44
3.2.2.2.1.1. Arbustal abierto esclerófilo de tierra firme	45

Cobertura	Clase
3.2.2.2.1.3. Arbustal abierto esclerófilo rocoso	46
3.2.2.2.2.1. Arbustal abierto mesófilo de tierra firme	47
3.2.2.2.2.3. Arbustal abierto mesófilo rocoso	48
3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	49
3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	50
3.3.2.1. Afloramiento rocoso masivo	51
3.3.2.2. Afloramiento rocoso fragmentado	52
3.3.3.1. Áreas erosionadas	53
3.3.4.1. Zonas quemadas naturales	54
5.1.1. Ríos, caños y quebradas	55
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	56

Tabla 23

Tabla de pesos de evidencia de la variable de cobertura de la tierra.

Class	Count	Point	W	S	W	S	Contrast	S	Stud.	S_Weights
		Count	Plus	WPlus	Minus	WMinus		Contrast	Contrast	
1	9788	92	-0.0574	0.1048	0.003	0.0044	-0.0604	0.1048	-0.5764	0.1048
2	3422	84	0.9179	0.1105	-0.001	0.0044	0.9189	0.1106	8.3115	0.1105
3	2563	96	1.3538	0.104	-0.002	0.0044	1.3558	0.1041	13.0215	0.104
4	159	4	0.9431	0.5064	0.001	0.0044	0.9421	0.5064	1.8603	0.5064
5	66	0	2.0459	100.0001	0.001	0.0044	2.0449	100.0001	0.0204	100.0001
6	137	8	1.8199	0.3644	0.001	0.0044	1.8189	0.3644	4.9917	0.3644
7	1092	54	1.6442	0.1396	-0.001	0.0044	1.6452	0.1396	11.7809	0.1396
8	6042	112	0.631	0.0954	-0.001	0.0044	0.632	0.0955	6.6187	0.0954
9	91	1	0.1004	1.0055	0.001	0.0044	0.0994	1.0055	0.0989	1.0055
10	492	9	0.6175	0.3364	0.001	0.0044	0.6165	0.3365	1.8322	0.3364
11	4065	76	0.6397	0.1158	0.002	0.0044	0.6377	0.1159	5.503	0.1158
12	4982	326	1.9412	0.0573	-0.005	0.0045	1.9463	0.0575	33.8693	0.0573
13	771	12	0.4532	0.2909	0.001	0.0044	0.4522	0.291	1.5539	0.2909
14	2111	108	1.68	0.0988	-0.002	0.0044	1.682	0.0989	17.0095	0.0988
15	1133	83	2.0625	0.114	-0.002	0.0044	2.0645	0.1141	18.0932	0.114
16	25985	259	0.0018	0.0624	0.006	0.0044	-0.0042	0.0626	-0.0669	0.0624
17	91145	783	-0.1482	0.0359	0.0031	0.0045	-0.1512	0.0362	-4.1816	0.0359
18	34085	287	-0.1684	0.0593	0.001	0.0044	-0.1694	0.0594	-2.8502	0.0593
19	619402	15830	0.9593	0.0081	-0.2441	0.0053	1.2033	0.0097	124.6238	0.0081
20	27714	543	0.6875	0.0433	-0.006	0.0045	0.6935	0.0436	15.9171	0.0433

Class	Count	Point Count	W Plus	S WPlus	W Minus	S WMinus	Contrast	S Contrast	Stud. Contrast	S_Weights
21	590444	9121	0.4455	0.0106	-0.075	0.0049	0.5205	0.0116	44.7511	0.0106
22	454	38	2.2072	0.1695	-0.001	0.0044	2.2082	0.1695	13.0254	0.1695
23	27298	340	0.2272	0.0546	-0.002	0.0045	0.2292	0.0548	4.1855	0.0546
24	151217	4489	1.1133	0.0152	-0.0616	0.0046	1.1749	0.0158	74.1376	0.0152
25	77422	1577	0.7271	0.0254	-0.0164	0.0045	0.7435	0.0258	28.7739	0.0254
26	9834	157	0.479	0.0805	-0.001	0.0044	0.48	0.0806	5.957	0.0805
27	117620	616	-0.6465	0.0404	0.0112	0.0045	-0.6577	0.0406	-16.1814	0.0404
28	211911	188	-2.4263	0.073	0.0379	0.0044	-2.4642	0.0731	-33.7098	0.073
29	77485	245	-1.1532	0.064	0.0101	0.0044	-1.1633	0.0641	-18.1354	0.064
30	4858	1	-3.8879	1.0001	0.001	0.0044	-3.8889	1.0001	-3.8885	1.0001
31	169991	502	-1.2217	0.0447	0.0235	0.0045	-1.2452	0.0449	-27.7203	0.0447
32	930157	2672	-1.2494	0.0194	0.1475	0.0046	-1.3969	0.0199	-70.1849	0.0194
33	199456	855	-0.8477	0.0343	0.0226	0.0045	-0.8703	0.0346	-25.1806	0.0343
34	158397	417	-1.3369	0.049	0.0235	0.0045	-1.3603	0.0492	-27.6286	0.049
35	788	0	-0.4339	100	0.001	0.0044	-0.4349	100	-0.0043	100
36	37063	729	0.6914	0.0374	-0.0071	0.0045	0.6985	0.0377	18.541	0.0374
37	294499	4773	0.4943	0.0146	-0.0389	0.0047	0.5332	0.0153	34.8084	0.0146
38	176	3	0.5456	0.5823	0.001	0.0044	0.5446	0.5824	0.9351	0.5823
39	154593	394	-1.3694	0.0504	0.0224	0.0045	-1.3918	0.0506	-27.4847	0.0504
40	53509	743	0.3373	0.0369	-0.004	0.0045	0.3414	0.0372	9.1735	0.0369
41	3207	0	-1.8375	100	0.001	0.0044	-1.8385	100	-0.0184	100
42	74788	223	-1.212	0.0671	0.0111	0.0044	-1.2231	0.0672	-18.1977	0.0671
43	143919	292	-1.598	0.0586	0.0224	0.0044	-1.6204	0.0587	-27.581	0.0586
44	3178	6	-1.6701	0.4086	0.001	0.0044	-1.6711	0.4087	-4.0893	0.4086
45	105741	83	-2.5489	0.1098	0.0192	0.0044	-2.5681	0.1099	-23.3681	0.1098
46	690	0	-0.3011	100	0.001	0.0044	-0.3021	100	-0.003	100
47	23204	120	-0.6592	0.0915	0.003	0.0044	-0.6622	0.0916	-7.2263	0.0915
48	6596	1	-4.1938	1.0001	0.001	0.0044	-4.1948	1.0001	-4.1945	1.0001
49	151047	432	-1.2538	0.0482	0.0214	0.0045	-1.2752	0.0484	-26.3542	0.0482
50	286871	2410	-0.1707	0.0205	0.0095	0.0045	-0.1802	0.021	-8.5997	0.0205
51	174362	35	-3.9131	0.169	0.0336	0.0044	-3.9467	0.1691	-23.3385	0.169
52	6302	56	-0.1141	0.1342	0.002	0.0044	-0.1161	0.1343	-0.8644	0.1342
53	68679	985	0.3701	0.0321	-0.0061	0.0045	0.3762	0.0324	11.6106	0.0321
54	1560	17	0.092	0.2439	0.001	0.0044	0.091	0.2439	0.373	0.2439
55	2239	9	-0.9123	0.334	0.001	0.0044	-0.9133	0.334	-2.7341	0.334
56	77	0	1.8917	100.0001	0.001	0.0044	1.8907	100.0001	0.0189	100.0001

La variable *cobertura de la tierra* representada en la **Tabla 23** presenta una marcada influencia en la ocurrencia de deslizamientos. Algunas clases muestran altos valores positivos de W^+ , como la 22 (2.2072), 24 (1.1133), 3 (1.3538) y 11 (1.6424), lo que indica que estas coberturas favorecen notablemente la inestabilidad. También se destacan valores intermedios positivos en clases como la 25 (0.2711) y la 21 (0.4455), que refuerzan la relación entre ciertas coberturas y la probabilidad de remoción en masa. En contraste, otras coberturas presentan pesos negativos, entre ellas la clase 46 (-0.3511), la 47 (-0.4958), la 35 (-0.8977) y la 52 (-0.912), que evidencian menor asociación con los procesos de inestabilidad. En general, los resultados sugieren que las coberturas asociadas a vegetación secundaria y áreas intervenidas tienden a incrementar la susceptibilidad, mientras que aquellas vinculadas a coberturas más estables, como afloramientos rocosos o zonas densamente forestadas, presentan menor relación con los deslizamientos.

8.2.2. Factores Detonantes

8.2.2.1. Precipitación

La **Figura 10** muestra la clasificación espacial de la probabilidad anual de excedencia de precipitación en el municipio de Pueblo Bello, la cual se refiere a la probabilidad de que se superen determinados umbrales de precipitación en un año determinado. Esta variable es clave en el análisis de amenaza por movimientos en masa, ya que precipitaciones intensas o prolongadas son uno de los principales detonantes de deslizamientos.

La clasificación se realizó con base en los rangos definidos en la **Tabla 24**, donde se establecen tres clases, como se observa la mayor parte del municipio presenta una probabilidad alta de excedencia, especialmente en las veredas San Sebastián, Costa Rica y el norte de Las Minas. Solo una fracción en el extremo suroriental presenta probabilidades medias y bajas, indicando un menor riesgo por precipitaciones extremas en esas zonas.

Figura 10

Mapa de probabilidad de excedencia anual de precipitaciones Municipio Pueblo Bello-Cesar.

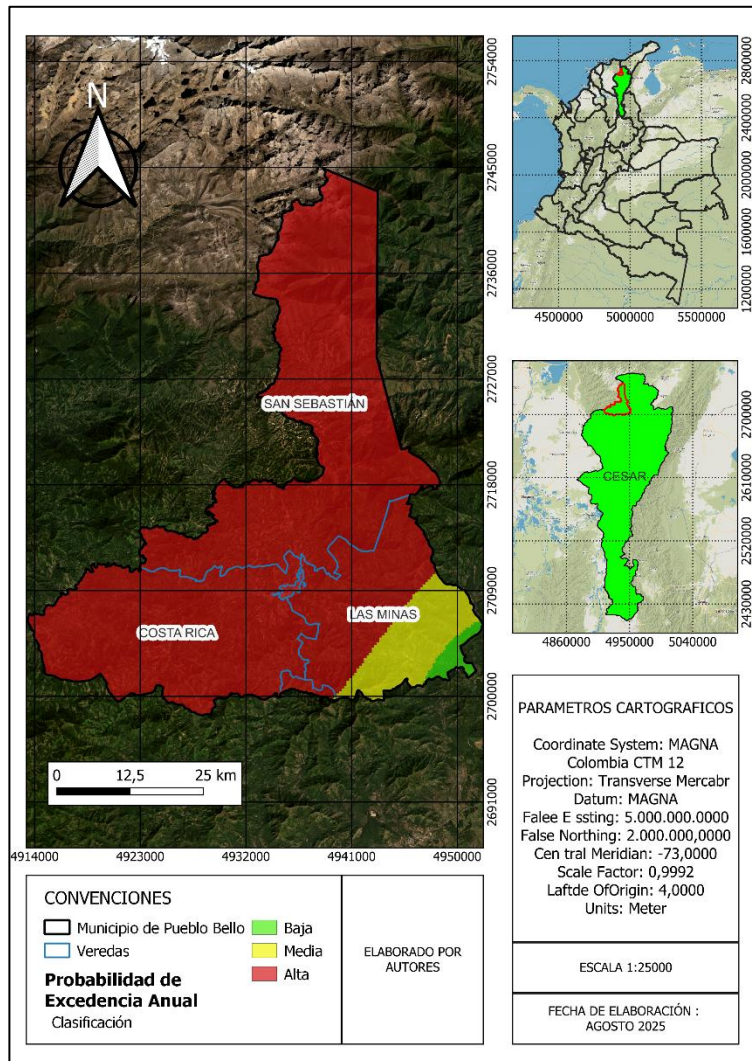


Tabla 24

Clasificación de la probabilidad anual de excedencia.

Probabilidad anual de excedencia	Clasificación
<0.2	Baja
0.2 – 0.5	Media
>0.5	Alta

.2.2.2. Sismicidad

La **Figura 11** presenta el mapa de sismicidad del municipio de Pueblo Bello, expresado a partir de la magnitud sísmica, clasificada según los rangos establecidos en la **Tabla 25**.

Se evidencia que la zona oriental y sudoriental del municipio, correspondiente a la vereda Las Minas y el casco urbano del municipio presentan sismicidad baja, lo cual indica una menor probabilidad de que se presenten eventos sísmicos de magnitud significativa en esta zona, el área central del municipio, especialmente en sectores de Costa Rica y el centro de San Sebastián, se clasifica con sismicidad media, sugiriendo una probabilidad intermedia de ocurrencia sísmica y finalmente, la zona nororiental (parte alta de San Sebastián) y el extremo occidental (oeste de Costa Rica) están clasificadas como áreas de sismicidad alta, lo que implica una mayor frecuencia o intensidad esperada de eventos sísmicos.

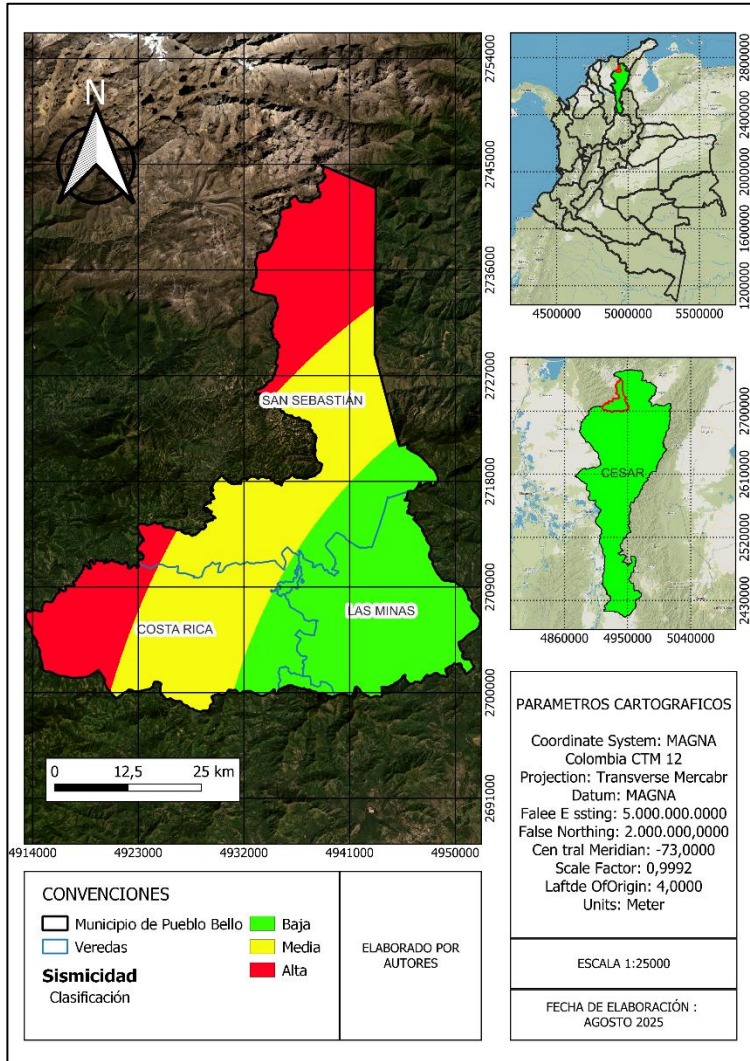
Tabla 25

Clasificación de la magnitud sísmica

Magnitud sísmica	Clasificación
< 2.666	Baja
2.667 – 2.757	Media
>2.758	Alta

Figura 11

Mapa de sismicidad Municipio Pueblo Bello-Cesar.



8.3. Zonificación de la susceptibilidad por remoción en masa

El modelo generó el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para el municipio de Pueblo Bello, elaborado mediante la metodología de Pesos de Evidencia (Weight of Evidence - WoE). Este análisis integró múltiples variables condicionantes —como pendiente, curvatura, cobertura, unidades geológicas superficiales y subunidades geomorfológicas— en conjunto con el inventario de deslizamientos, con el fin de estimar la probabilidad espacial de ocurrencia de nuevos eventos.

El mapa clasifica el territorio en cuatro categorías de susceptibilidad: baja, media, alta y muy alta. Se observa que la mayor parte del municipio presenta susceptibilidad media, mientras que las zonas con susceptibilidad alta y muy alta se concentran principalmente en sectores montañosos de las veredas Costa Rica y Las Minas, especialmente en áreas con fuertes pendientes y presencia de eventos registrados previamente. Sin embargo, las zonas donde se presenta susceptibilidad baja se localizan principalmente en áreas con topografía suave y pendientes bajas, lo que reduce significativamente la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. (ver

Figura 12).

Figura 12

Mapa de Susceptibilidad a eventos de remoción en masa Municipio Pueblo Bello- Cesar.

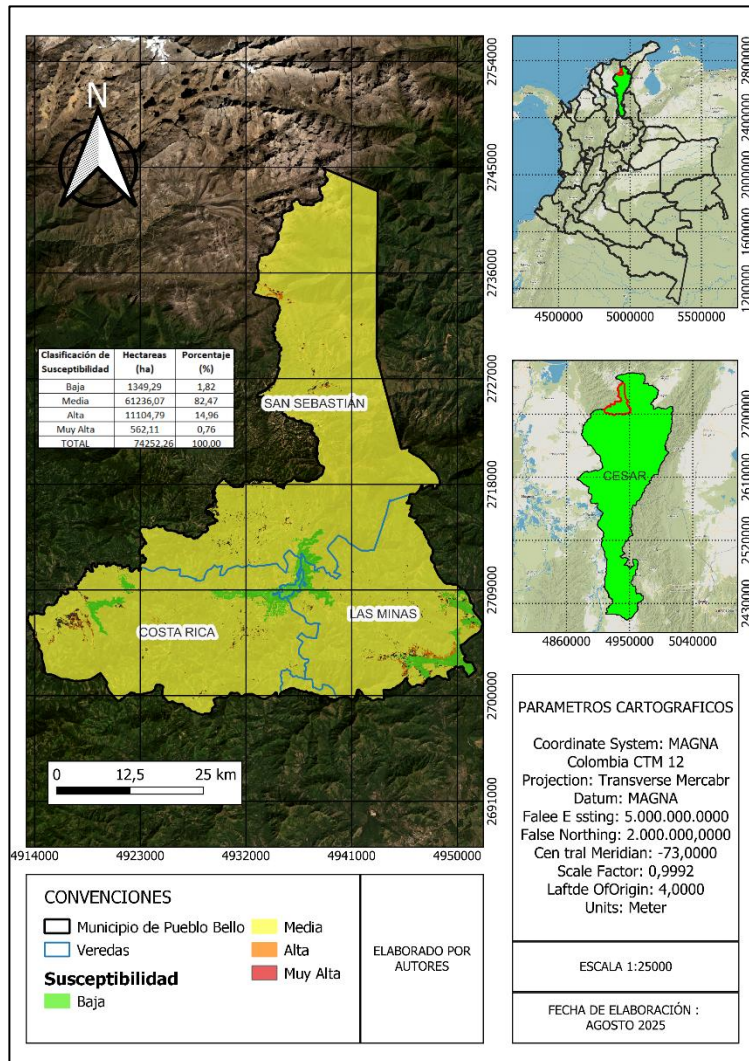


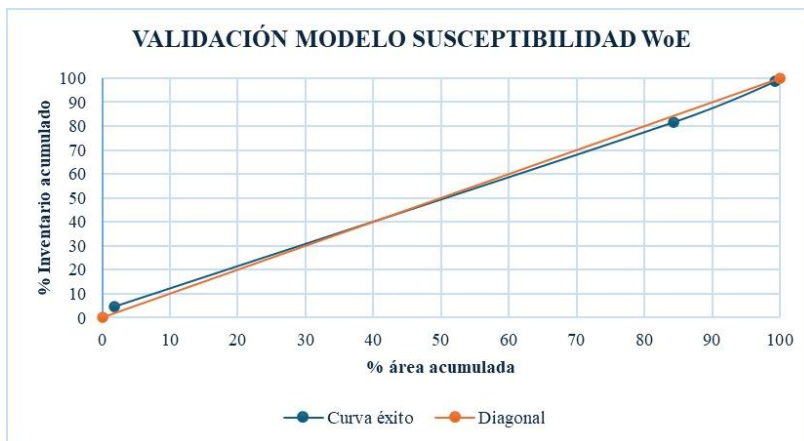
Tabla 26

Distribución del área y del inventario de movimientos en masa por clases de susceptibilidad

Clase Susceptibilidad	Área (m2)	% Área	% Área acumulado	% Inventario	% Inventario acumulado
Baja	334080	1,82	1,82	4,53	4,53
Media	5686848	82,47	84,29	77,06	81,59
Alta	1254528	14,96	99,25	17,00	98,59
Muy alta	104112	0,76	100,00	1,41	100,00

Adicionalmente, se realizó la validación del modelo de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa aplicando la técnica de la curva de éxito (**Figura 14**), la cual evidencia que el modelo elaborado con el método de Pesos de Evidencia (WoE) logra una adecuada relación entre el área clasificada y la distribución del inventario obtenido mediante el diferencial NDVI (**Tabla 26**). Se observa que las clases de susceptibilidad alta y muy alta concentran un mayor porcentaje del inventario en relación con su área, lo que confirma la capacidad del modelo para discriminar zonas críticas. La curva de éxito permanece por encima de la diagonal de referencia durante la mayor parte de su recorrido, lo que refleja un desempeño superior al azar en la predicción espacial de los fenómenos.

Figura 13
Validación modelo susceptibilidad WoE

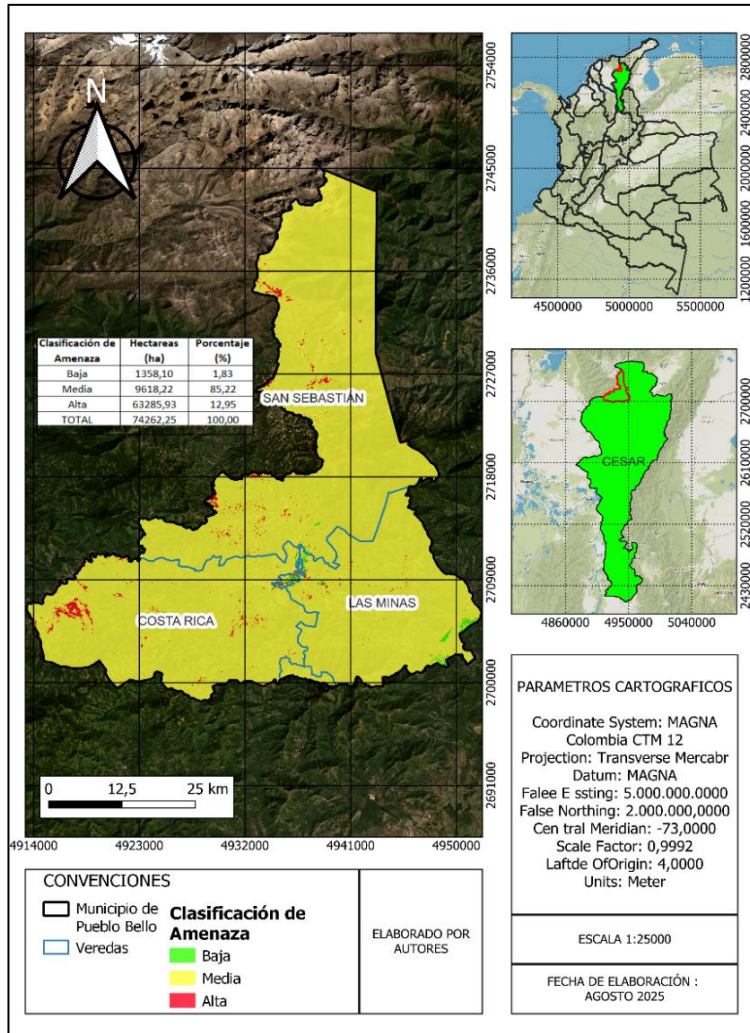


8.4. Zonificación de la amenaza por remoción en masa a escala 1:25.000

El mapa final clasifica la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Pueblo Bello, en tres niveles: baja, media y alta. Al analizar la distribución espacial de la amenaza en relación con las veredas San Sebastián, Las Minas y Costa Rica, se observa que Costa Rica es la vereda con mayor concentración de áreas en nivel alto de amenaza, especialmente en las zonas de mayor pendiente y relieve abrupto. Las Minas también presenta importantes sectores con amenaza alta, aunque en menor proporción que Costa Rica, distribuidos principalmente en el límite con esta última y en el sector sur. Por otro lado, San Sebastián presenta

predominantemente amenaza baja a media, con escasas zonas de amenaza alta localizadas en el borde occidental. Las zonas donde se presenta amenaza baja se concentran principalmente en sectores de topografía suave y pendientes reducidas, donde las condiciones naturales limitan la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. (ver **Figura 14**).

Figura 14
Mapa de Amenaza por remoción en masa Municipio Pueblo Bar.



Discusión

La desarticulación entre las bases nacionales de información, como el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), y los instrumentos de planeación local, como el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD), limita la precisión de los estudios de susceptibilidad y amenaza. Esta falta de integración no es exclusiva de Pueblo Bello; García et al. (2021) señalan que en otras zonas del Caribe colombiano la ausencia de articulación entre los planes de ordenamiento territorial y los lineamientos nacionales ha incrementado la vulnerabilidad frente a deslizamientos. De manera complementaria, Pacurucu et al., (2018) sostienen que la integración de información técnica con mecanismos participativos mejora la pertinencia de la cartografía de riesgos, lo cual resalta la necesidad de fortalecer la coherencia entre escalas de gestión.

En cuanto a los factores condicionantes, los resultados mostraron que los eventos de remoción en masa en Pueblo Bello no ocurren al azar, sino que se concentran en áreas con pendientes pronunciadas y coberturas vegetales degradadas. Estos hallazgos coinciden con Navarro et al., (2024), quienes identificaron la pendiente como uno de los principales factores en la generación de deslizamientos en la cuenca alta del río Ariguaní, también ubicada en el departamento del Cesar. De manera similar, Medina (2017) concluyó que los sectores con mayor porcentaje de pendiente en la cuenca del río Patía presentaban mayor recurrencia de movimientos en masa. Sin embargo, nuestros resultados sugieren que la pendiente, por sí sola, no siempre es determinante, ya que la inestabilidad se agrava cuando se combina con suelos intervenidos o prácticas agrícolas inadecuadas, lo cual amplía el marco de interpretación frente a estudios que priorizan exclusivamente el efecto de la inclinación del terreno.

La geología local también evidenció un papel relevante. En particular, los materiales blandos como lutitas y limolitas se mostraron más susceptibles a deformaciones bajo condiciones de humedad. Este resultado concuerda con lo reportado por Mendoza et al., (2018), quienes destacaron la influencia de una geología compleja en el aumento de la inestabilidad en zonas del departamento del Cesar. Asimismo, Briceño y Peñaranda (2024) documentaron cómo las fallas tipo cuña en macizos rocosos meteorizados favorecen la caída de bloques, lo cual complementa la

evidencia obtenida en Pueblo Bello sobre la importancia de los rasgos geológicos en la caracterización de la amenaza.

Respecto a la precipitación, los resultados evidencian que las zonas con mayor pluviosidad tienden a coincidir con áreas de amenaza alta. Esta relación ha sido ampliamente documentada: Gutiérrez y Mesa (2018) demostraron que la precipitación, combinada con la ausencia de vegetación, favorece la formación de cárcavas y la pérdida del horizonte orgánico del suelo en Pueblo Hundido, al norte de Pueblo Bello. De manera complementaria, Bravo et al., (2024) resaltaron que los eventos hidrometeorológicos extraordinarios fueron los principales detonantes de remociones en masa en la ciudad de Chilpancingo, lo que refuerza la interpretación de que la saturación del suelo es un factor crítico en escenarios de alta amenaza.

Aunque el municipio no presenta una alta recurrencia de sismos, la cercanía a fallas regionales implica que incluso movimientos sísmicos de baja magnitud podrían detonar procesos en laderas ya debilitadas. Briceño y Peñaranda (2024) encontraron un patrón similar en el corregimiento de El Rincón, donde la combinación de lluvias y sismicidad aumentó la probabilidad de movimientos en masa. Esto indica que, si bien la sismicidad en Pueblo Bello no es un factor primario, debe considerarse como un detonante adicional en escenarios de susceptibilidad alta.

Los factores antrópicos desempeñan un rol decisivo en la configuración de la amenaza. El análisis del índice de vegetación (NDVI) mostró una reducción progresiva en la cobertura forestal, lo que coincide con los hallazgos de Villanueva Pinedo, (2024), quien evidenció mediante imágenes MODIS que la disminución del verdor se asocia directamente con un incremento en la probabilidad de deslizamientos. De manera similar, Pineda et al., (2016) documentaron que las áreas con mayor pérdida de cobertura vegetal presentaron mayor ocurrencia de fenómenos de remoción en masa entre 1986 y 2008. En Pueblo Bello, las áreas agrícolas y de pastoreo se expanden hacia laderas inestables, lo que refuerza lo planteado por Gutiérrez y Mesa (2018), quienes señalaron que la escasez de vegetación conduce a la degradación del suelo y aumenta la susceptibilidad a desprendimientos.

El análisis de integración de variables permitió identificar que las zonas más críticas se concentran en el centro-sur y suroccidente del municipio, en veredas como Costa Rica, Las Minas

y San Sebastián. Estos resultados son consistentes con los de Navarro et al., (2024), quienes también encontraron una alta proporción de amenaza en sectores con pendientes pronunciadas y suelos blandos en la misma región geográfica. No obstante, el presente estudio aporta un enfoque adicional al evidenciar la interacción simultánea de factores naturales y antrópicos, lo cual ofrece una visión más integral del problema.

El comportamiento de la curva indica que el modelo presenta una capacidad predictiva aceptable, aunque con limitaciones asociadas a la calidad del inventario utilizado. Dado que en el SIMMA solo se encontraron 10 registros de movimientos en masa entre 2011 y 2018, se construyó un inventario alternativo a partir del análisis diferencial del NDVI, lo que permitió ampliar la base de información. Sin embargo, este procedimiento introduce cierta incertidumbre, pues los cambios en la cobertura vegetal no siempre corresponden exclusivamente a deslizamientos. En consecuencia, aunque el modelo tiende a ubicar adecuadamente los eventos en áreas de mayor susceptibilidad, los resultados deben interpretarse con cautela.

En términos de gestión del riesgo, los resultados constituyen un insumo técnico para definir zonas de intervención prioritaria, orientar obras de mitigación y prevenir ocupaciones en sectores de alto riesgo. Esto se alinea con lo planteado por Aceves et al. (2016), quienes señalan que los mapas de susceptibilidad deben servir como herramientas para la planificación territorial y la toma de decisiones de las autoridades locales. Asimismo, Rebolledo et al. (2015) resaltan la importancia de traducir las zonificaciones de riesgo en medidas concretas de mitigación, lo cual refuerza la necesidad de que los productos generados en Pueblo Bello sean incorporados en políticas públicas y planes de desarrollo municipal.

En síntesis, este trabajo demuestra que la amenaza por remoción en masa en Pueblo Bello responde tanto a factores naturales —pendiente, geología, precipitación y sismicidad— como a factores antrópicos —deforestación, prácticas agrícolas y expansión del uso del suelo—. Coincidiendo con estudios previos (Navarro et al., (2024); Villanueva Pinedo, (2024); Pineda et al., (2016)), se evidencia que la interacción entre ambos tipos de factores intensifica la inestabilidad del terreno. Si bien no es posible controlar variables como la pendiente o la ocurrencia de lluvias, sí es posible reducir la vulnerabilidad mediante la conservación de la vegetación, la regulación del

uso del suelo y la generación de información técnica clara y accesible, capaz de orientar acciones de prevención y preparación frente a futuras emergencias.

Conclusiones

La revisión de la bibliográfica especializada y el análisis detallado de fuentes oficiales como el sistema SIMMA permitieron consolidar un inventario detallado de eventos históricos de remoción en masa en el municipio de Pueblo Bello, Cesar, en donde se registró un consolidado total de diez (10) fenómenos de remoción en masa, de los cuales, ocho (8) se caracterizaron como deslizamiento, uno (1) de tipo flujo y uno (1) de tipo caída, ocurridos entre las épocas del 2011 y 2018, esta recopilación permitió identificar la recurrencia espacial de estos eventos de remoción en masa, en donde seis (6) de estos se registraron en la Vereda las Minas, dos (2) en la Vereda Costa Rica y dos (2) en San Sebastián, así como también, los respectivos factores condicionantes, como lo son; las pendientes pronunciadas, las coberturas vegetales fuertemente intervenidas y los cambios en el uso del suelo.

El análisis y procesamiento de la información geoespacial mediante herramientas SIG permitió identificar, evaluar y representar de manera precisa los factores condicionantes (pendiente, curvatura, unidades geológicas superficiales, unidades geomorfológicas y coberturas de la tierra) y factores detonantes (lluvias y sismos) que inciden en la ocurrencia de remociones en masa en el municipio. Entre los factores condicionantes, se destacan las siguientes categorizaciones por presentar los pesos de evidencia positivos más altos, permitiendo identificar las variables de cada factor condicionante con mayor influencia en la ocurrencia de deslizamientos, dicho lo anterior, se tiene que; la curvatura con mayor peso de evidencia fue casi plano neutra, con un W_Plus de 0.178, la pendiente con mayor peso de evidencia fue la plana, con un W_Plus de 0.754, la unidad geológica superficial con mayor peso de evidencia fue suelos aluvial grueso, depósitos de abanicos y grabas, con un W_Plus de 0.98, la unidad geomorfológica con mayor peso de evidencia fue colinas remanentes con un W_Plus de 2.02 y la cobertura del suelo con mayor peso de evidencia fue cultivos de café con un W_Plus de 2.06, estos elementos demostraron tener un peso significativo en la generación de condiciones de inestabilidad. Entre los factores detonantes se tiene el régimen de precipitación anual y la sismicidad, en donde, si bien la sismicidad presentó un papel menos determinante en comparación con el régimen de precipitación, su influencia fue de importancia en zonas específicas, particularmente en el sur del municipio, donde se han registrado movimientos telúricos de baja a moderada intensidad. De esta manera, los hallazgos obtenidos

validan la hipótesis central del estudio, en la cual se plantea que la interacción entre condiciones naturales (como la morfología, la geología, la geomorfología, las lluvias y la geodinámica del terreno) y la intervención antrópica (por ejemplo, deforestación de bosques para cultivos de café) actúan como desencadenantes del riesgo por remoción en masa.

La aplicación del modelo estadístico Weight of Evidence (WoE), en articulación con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitió elaborar una zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa a escala detallada (1:25.000) en el municipio de Pueblo Bello, Cesar. Los resultados evidenciaron que el 82,47% del territorio presenta susceptibilidad media, seguida por áreas de susceptibilidad alta (14,96%) concentradas principalmente en las veredas Costa Rica y Las Minas, mientras que las categorías de susceptibilidad baja y muy alta corresponden al 1,82% y 0,76% del área municipal, respectivamente. La integración de múltiples capas temáticas y variables condicionantes posibilitó la construcción de un mapa técnicamente fundamentado, el cual mostró una alta correspondencia con zonas históricamente afectadas por procesos de remoción en masa, validando así su consistencia estadística y espacial. Asimismo, se identificaron nuevas áreas críticas no registradas previamente, las cuales constituyen puntos estratégicos que requieren atención prioritaria en términos de monitoreo, mitigación y planificación del uso del suelo. Finalmente, la incorporación del inventario de movimientos en masa derivado del análisis del diferencial NDVI permitió superar la limitación de registros reducidos en el SIMMA y, mediante la validación con la curva de éxito, se confirmó que el modelo alcanza un desempeño superior al azar, consolidándose como una herramienta robusta y de utilidad para la gestión del riesgo y la planificación territorial en el municipio.

La zonificación de la amenaza por remoción en masa fue posible gracias a la integración sistemática de los resultados del modelo de susceptibilidad WoE y la aplicación de los lineamientos establecidos en la Guía Metodológica para estudios de amenaza por fenómenos de remoción en masa del Servicio Geológico Colombiano. El mapa de amenaza, reclasificado conforme al Decreto 1807 de 2014, permitió delimitar de forma clara y precisa los niveles de amenaza en todo el territorio municipal. En donde se tiene que el 85.2% del área total del municipio presenta amenaza media, seguido por el 13% del municipio con amenaza alta y finalmente, el 1.8% con amenaza baja, al analizar la distribución espacial de la amenaza en relación con las veredas San Sebastián,

Las Minas y Costa Rica, se observa que Costa Rica es la vereda con mayor concentración de áreas en nivel alto de amenaza, especialmente en las zonas de mayor pendiente y relieve abrupto. Las Minas también presenta importantes sectores con amenaza alta, aunque en menor proporción que Costa Rica, distribuidos principalmente en el límite con esta última. Por otro lado, San Sebastián presenta predominantemente amenaza media a alta, con escasas zonas de amenaza baja localizadas al sur de la vereda. Las zonas donde se presenta amenaza baja se concentran principalmente en sectores de topografía suave y pendientes reducidas, donde las condiciones naturales limitan la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, evidenciados principalmente al centro del municipio de pueblo bello, y al sur oriente de la vereda Las Minas. Este producto cartográfico se consolida como una herramienta técnica de gran valor para la gestión integral del riesgo, ya que orientará la toma de decisiones relacionadas con la planificación territorial, la formulación de estrategias de mitigación y la implementación de medidas preventivas que salvaguarden la vida e infraestructura de las comunidades más vulnerables.

Recomendaciones

Se recomienda que el municipio de Pueblo Bello, en coordinación con entidades como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), fortalezca el proceso de recolección, actualización y georreferenciación de eventos de remoción en masa. Esto incluye capacitar a los actores locales en el uso de herramientas como SIMMA, así mismo, establecer protocolos comunitarios para el reporte de eventos, con el fin de construir un inventario más dinámico y participativo.

Se sugiere que las autoridades ambientales y de planeación territorial del municipio integren de forma permanente el monitoreo de factores físicos como pendiente, precipitación, pérdida de cobertura vegetal y cambios en el uso del suelo dentro de los sistemas de alerta temprana.

Con base en la zonificación de susceptibilidad obtenida mediante el modelo WoE, se recomienda utilizar estos resultados como insumo técnico para actualizar los instrumentos de planificación territorial, en especial el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT). Esta información debe servir para definir restricciones de uso en áreas de alta susceptibilidad, orientar obras de estabilización y priorizar acciones de adaptación en veredas con mayores niveles de exposición.

Se recomienda que la zonificación de amenaza por remoción en masa a escala 1:25.000 sea incorporada formalmente en los procesos de gestión del riesgo y ordenamiento territorial del municipio, así como en los planes de desarrollo y las estrategias ambientales locales. Además, se sugiere que esta información sea socializada con las comunidades rurales, con el fin de fortalecer la cultura del riesgo, fomentar prácticas de manejo sostenible del suelo y facilitar acciones de prevención lideradas desde el ámbito local.

Referencias

- Aceves, J., Legorreta, G., Lugo, J., Umaña, J., & Legorreta, H. (2016). *Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México*. doi.org/10.14350/rig.46503.
- Alcaldía de Pueblo Bello. (diciembre de 2012). *Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres*. Obtenido de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/2832>
- Alcaldía municipal de Pueblo Bello. (2020). *Plan municipal de gestión de riesgos de desastres*. Municipio de Pueblo Bello - Cesar.
- Avilés, L., Cañar, M., Andrade, S., Moreno, J., Medina, G., López, A., & Pico, P. (2017). Identificación de amenaza por deslizamientos de tierra mediante información geo-espacial en el cantón Ibarra-Ecuador. *CienciAmérica: Revista de Divulgación Científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 6(2).
- Barrantes, G. (2010). *Lecciones aprendidas en gestión del riesgo de deslizamientos: caso zonificación de susceptibilidad por deslizamientos en Cuenca, Ecuador*. Congreso Internacional Gestión de Riesgos, Ambiente y Energías Alternativas.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon.
- Bravo, J., Ramos, R., Vásquez, R., Sánchez, S., Ocampo, A., Neri, I., . . . Liborio, M. (2024). *Monitoreo y análisis de los desplazamientos de tierra y efecto potencial en la zona norponiente en la ciudad de Chilpancingo, guerrero, Mexico*. XIII Congreso Internacional de Geomática, 43 - 53.
- Briceño, A., & Peñaranda, S. (2024). *Zonificación de susceptibilidad a presentar fenómenos de remoción en masa en el tramo 8.4 al 9.42 km al sureste del municipio de San Diego, Cesar*. [Tesis de Especialización, Universidad de Santander].
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.

- Caicedo, D. (2024). Análisis de deslizamientos en la vía Balboa – Argelia empleando herramientas SIG para comprender las causas subyacentes que afectan un punto crítico. *Universidad de Manizales*.
- Carvajal, H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. doi:<https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/52>
- CMGRD. (2012). *Plan municipal de gestión de riesgos de desastres*. Municipio de Pueblo Bello Cesar. doi:https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/bitstream/handle/20.500.11762/28326/PMGRD_PuebloBELLOCesar_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Constitución Política de Colombia, 7 de julio de 1991 (Colombia). (1991).
- Corominas, J., & Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102(3 - 4), 193 - 213. doi:doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.018
- Crosta, G. B., & Frattini, P. (2008). Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. *Geomorphology*, 94(3-4), 267–284. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.008>
- Cruden, D. M., & J., V. D. (1996). Landslide Types and Processes. In Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation. *Turner, A. K. and Schuster R. L. (eds.) TRBNRC, National Academy Press: Washington, pp. 36-75*.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. In Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation. *Turner, A. K. and Schuster R. L. (eds.) TRBNRC, National Academy Press: Washington, pp. 36-75*.
- Cuanalo, O., & Gallardo, R. (2016). Fenómenos de remoción en masa. Acciones para reducir la vulnerabilidad y el riesgo. *Vector*, 11, 30 - 38.
- Decreto 1077, 2015, Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 26 de mayo de 2015. D.O. 49.523.
- Decreto 1807, 2014, Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. 19 de septiembre de 2014. D.O. 49279.

- Decreto 2157, 2017, Por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la Ley 1523 de 2012. 20 de diciembre de 2017. .
- Gómez, E., Pertuz, M., Carrascal, D., Tapia, V., & Rojas, M. (2017). Caracterización geotécnica y vulnerabilidad por movimientos en masas entre la vereda de Puente Quemao y el corregimiento de San Francisco de Asís, en El Copey, Cesar. *Ingeniar*, 22, 37-57. doi:10.18041/1909-2458/ingeniare.22.1341
- García, M., & Ricardo, J. (2020). *Estado del Arte de metodologías para la evaluación de vulnerabilidad a nivel social y económico debido a amenazas de procesos de remoción en masa*. [Tesis de pregrado, Universidad de la Salle].
- García, W., Delfín, M., Ledezma, M., & Arévalo, B. (2021). Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba. *Acta Nova*, 10(1), 61–95.
- Gobernación del Departamento del Cesar. (2012). *Plan Departamental de Gestión de Riesgo, Cesar (Colombia) (PMGRD, Ed.)*. Obtenido de <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/bitstream/handle/20.500.11762/455/PDGR%20Cesar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gutiérrez, M. (2017). *Informe de práctica realizada en la Oficina Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres de la Ciudad de Valledupar*. [Tesis de pregrado, Fundación Universitaria del Área Andina].
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2006). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1-4), 272–299. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- Henao, L., & Hernández, J. (2024). *Zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Santuario (Risaralda)*. [Tesis de especialización, Universidad de Manizales].
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación 6a edición*. McGraw-Hill.
- IGAC. (2012). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:25.000*. Bogotá D.C., Colombia.

- Jianwei, S., Guoqin, Y., Laiyun, S., & Hongwen, Z. (2024). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A review. *Drones*, 8(30), 1-27. doi:doi.org/10.3390/drones8010030
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4), 406–421. doi:https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article/95/4/406/202914/Landslides-caused-by-earthquakes
- Lascarro Navarro, L., Delgado Rodríguez, J., Rojas-Martínez, E. E., Lascarro Navarro, F., & MancoJaraba, D. (2024). Aplicación del método estadístico discriminante en la zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, municipio de Pueblo Bello, Cesar (Colombia). *Prospectiva*, 22 N°1, 56 - 70. doi:10.15665/rp.v22i1.3269
- Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33 - 41. doi:https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y
- Ley 1523, 2012, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 24 de abril de 2012. D.O. 48411.
- Ley 388, 1997, Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. 18 de julio de 2000. D.O. 43.091..
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation (7th ed.)*. Wiley.
- Lo, C. P., & Yeung, A. K. (2015). *Concepts and Techniques of Geographic Information Systems (2nd ed.)*. Prentice Hall.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems*. (4th ed.). Wiley.
- Martínez, N., & Vargas, S. (2022). Zonificación Geomorfológica del Departamento del Cesar, Colombia: una aplicación de la metodología IGAC. *Revista Cartográfica*, 105, 7-30. doi:doi.org/10.35424/rcarto.i105.1071
- Medina, Y. (2017). *Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca del río Patía – departamento del Cauca*. [Tesis de pregrado, Universidad de Manizales].

- Mendoza, J., Navarro, A., & Zequeda, Y. (2018). *Microzonificación y análisis de amenazas por fenómenos de remoción en masa, en la vía entre la cabecera municipal de pueblo bello y la vereda monte grande, dpto del Cesar*. [Monografía de pregrado, Fundación Uiversitaria del Área Andina].
- Pacurucu, N., Acosta, E., & Morocho, V. (2018). Mapeo de zonas vulnerables a deslizamientos usando PP GIS y técnicas de teledetección. *Geoespacial*, 15(2), 53–66. doi:<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/issue/view/118>
- Pereira, A., Collins, D., Armando, L., & Wagner, R. (2025). Análisis bibliométrico del uso de herramientas SIG en escenarios de deslizamientos en Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, 74(1), 415–441.
- Pineda, M., Martínez, J., & Viloría, J. (2016). Relación entre los cambios de cobertura vegetal y la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la Serranía del Interior, Venezuela. *Inverciencias*, 41(3), 190-197.
- Quintero, M. (2023). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres de remoción en masa en las localidades de Usme y Ciudad Bolívar*. [Proyecto de pregrado, Escuela Superior de Administración Pública]. doi:<https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/20.500.14471/27058/MARIA%20ALEJANDRA%20QUINTERO%20REATIGA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rebolledo, R., Vergara, W., Guevara, V., Yepez, S., Reyes, A., & Arismendi, J. (2015). *Sistema de información geográfica para la gestión de riesgo por deslizamiento de tierras e inundación del eje Araira – El Salmerón del municipio Zamora del estado Miranda*. Fundación instituto de ingeniería centro de procesamiento digital de imágenes.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60 - 91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Reyes, Z. (2023). *Índices espectrales para identificar posibles movimientos en masa mediante el uso de imágenes satelitales*. [Tesis de pregrado, Universidad de Manizales].
- Reyna, A., Moreira, D., Bonilla, A., Pisco, J., & Marcias, C. (2020). Asentamientos humanos en zonas susceptibles a riesgos por inundación y deslizamiento de la ciudad de Portoviejo. *Revista San Gregorio*, 43, 109–123.

- Rivera, O. (2020). Rivera, O. (2020). Fotogrametría de drones para la prevención de deslizamientos de tierra en la Ciudad de México. *Reder*, 4(2), 85–96. doi:doi.org/10.55467/reder.v4i2.52
- Rodríguez Valdivia, A., Tapia Tosetti, A., & Espinoza, &. A. (2014). Susceptibilidad de movimientos en masa en el valle de Socoroma, Precordillera andina de Arica y Parinacota. *Diálogo andino*, (44), 25-39.
- Rodríguez, C. E., Bommer, J. J., & Chandler, R. J. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980–1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 325–346|18 (5). doi:https://doi.org/10.1016/S0267-7261(99)00012-3
- SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000*. Bogotá: SGC.
- SIMMA. (2025). *Búsqueda de registros de movimientos en masa*. Obtenido de <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>
- Stralen, H. (2022). *Metodologías para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa*. (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). doi:https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/bitstream/handle/20.500.11762/36839/Metodologias_Zonificacion_MovMasa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). . A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45(5), 665–679. doi:https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8
- UNGRD. (2021). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*.
- Van Westen, C. (2002). *Geo-information tools for landslide risk assessment: An overview of recent developments*. In *Proc. International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage*.
- Van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. ITC.
- Villanueva Pinedo, H. (2024). *Influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la intercuencia del Alto Huallaga durante el periodo 2003–2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de La Selva].
- Wieczorek, G. (1996). *Landslide triggering mechanisms* In: Turner, A.K. and Schuster, R.L., Eds., *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, National

Research Council, Special Report, Washington DC, sportation Research Board, National Research Coun.

Zeballos, C., Delgado, G., Cuzziramos, F., & Poco, S. (2017). Sistemas de Información Geográfica Participativa para la gestión integrada de riesgos en poblaciones vulnerables de la periferia de Arequipa. *Universidad del Azuay*, 125 - 132.