

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

Estudio de la amenaza por movimientos en masa aplicando el método estadístico bivariado a escala 1:25.000 en una región del municipio de San Joaquín, Santander.

Jaiber Steven Roa Jaimes y Raúl Sebastián Patarroyo Silva

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Leonardo Palmera Sánchez

Ms. C. en Geociencias

Codirector

Joaquín Andrés Valencia Ortiz

PhD. en Geología

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

Le dedico este trabajo a mi Madre que con valentía y amor siempre me ha sacado adelante, a mi Padre por siempre apoyarme incondicionalmente, a mi hermano que cuidó de mi hogar mientras estuve lejos, a mis familiares por ayudarme cuando lo necesité, a los amigos y personas que me enseñaron, cuidaron y amaron...

A cada persona que me ayudó a ser quien soy hoy, a crecer como persona y como profesional.

*Raúl Sebastián*

A mi madre Leidy, por ser mi mayor ejemplo de amor, esfuerzo y perseverancia; por su apoyo incondicional en cada paso de este camino y por enseñarme que los sueños se alcanzan con dedicación y fe.

A mi abuela Margarita, cuyo cariño, sabiduría y fortaleza han sido una luz constante en mi vida. Gracias por tus palabras de aliento y por creer siempre en mí.

A mi pareja Leszly, por su amor, paciencia y compañía en los momentos más desafiantes; por ser un apoyo constante y una fuente de inspiración.

A todos mis familiares, amigos y profesores que, con su compañía, consejos y apoyo, hicieron posible la culminación de esta meta. Cada uno de ustedes forma parte esencial de este logro.

*Jaiber Steven*

### **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a mi alma mater, la Universidad Industrial de Santander, por brindarme el espacio y la oportunidad de convertirme en un profesional,

A la escuela de geología y a mis profesores por enseñarme lo hermosa que es la tierra, el cómo entenderla usando la ciencia y a cuidarla,

Agradezco a mi director y codirector, Leonardo y Joaquín por instruirnos, ayudarnos y dirigirnos en el transcurso de la creación de este proyecto.

*Raúl Sebastián y Jaiber Steven*

## Tabla de contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Planteamiento del problema</b> .....	<b>12</b>
<b>2. Justificación</b> .....	<b>13</b>
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>15</b>
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>4. Localización</b> .....	<b>16</b>
<b>5. Marco teórico</b> .....	<b>17</b>
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	17
5.1.1. <i>Movimientos en masa:</i> .....	17
5.1.2. <i>Susceptibilidad</i> .....	17
5.1.3. <i>Amenaza</i> .....	17
5.1.4. <i>Método estadístico bivariado; pesos de evidencia (WoE)</i> .....	18
<b>6. Marco geológico</b> .....	<b>18</b>
6.1 UNIDADES LITOLÓGICAS.....	19
6.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	20
6.3 GEOMORFOLOGÍA .....	21
<b>7. Estado del arte</b> .....	<b>22</b>
<b>8. Metodología</b> .....	<b>23</b>
8.1 FASE I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	25
8.2 FASE II: CARACTERIZACIÓN GEOAMBIENTAL .....	25
8.3 FASE III: VALIDACIÓN EN CAMPO .....	26
8.4 FASE IV: ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD Y APLICACIÓN DEL MÉTODO BIVARIADO .....	27
8.5 FASE V: ANÁLISIS DE LA AMENAZA.....	29
<b>9. Resultados</b> .....	<b>30</b>
9.1 CARACTERIZACIÓN GEOAMBIENTAL .....	30
9.1.1. <i>Factores condicionantes</i> .....	31
9.1.2. <i>Inventario de procesos morfodinámicos</i> .....	39
9.2 MAPA FINAL DE SUSCEPTIBILIDAD PARA LA CUENCA PANAMÁ.....	40
9.2.1 <i>Susceptibilidad muy baja</i> .....	40
9.2.2 <i>Susceptibilidad baja</i> .....	41
9.2.3 <i>Susceptibilidad media</i> .....	41
9.2.4 <i>Susceptibilidad alta</i> .....	42
9.2.5 <i>Susceptibilidad muy alta</i> .....	42
9.2.6 <i>Validación del mapa de susceptibilidad para la cuenca Panamá</i> .....	44
9.3 MAPA FINAL SUSCEPTIBILIDAD PARA LA CUENCA EL LEÓN .....	45
9.3.1 <i>Susceptibilidad muy baja</i> .....	46

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

9.3.2	<i>Susceptibilidad baja</i> .....	46
9.3.3	<i>Susceptibilidad media</i> .....	47
9.3.4	<i>Susceptibilidad alta</i> .....	47
9.3.5	<i>Susceptibilidad muy alta</i> .....	48
9.3.6	<i>Validación del mapa de susceptibilidad para la cuenca El León</i> .....	49
<b>10</b>	<b>Resultados amenaza</b> .....	<b>50</b>
10.1	AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA CUENCA PANAMÁ.....	51
10.1.1	<i>Amenaza baja</i> .....	51
10.1.2	<i>Amenaza media</i> .....	52
10.1.3	<i>Amenaza alta</i> .....	53
10.1.4	<i>Amenaza muy alta</i> .....	53
10.2	AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA CUENCA EL LEÓN .....	54
10.2.1	<i>Amenaza baja</i> .....	54
10.2.2	<i>Amenaza media</i> .....	55
10.2.3	<i>Amenaza alta</i> .....	55
10.2.4	<i>Amenaza muy alta</i> .....	56
<b>11</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>57</b>
<b>12</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>59</b>
	<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>61</b>

**Lista de Tablas**

<i>Tabla 1. Pesos de evidencia para el cálculo de la susceptibilidad según Van Westen (1993).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2. Parámetros y Métricas para la Construcción de la Curva ROC y el AUC según Fawcett (2006).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3. Clasificación de rangos de pendientes.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Pendientes reclasificadas en rangos.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 5. Valores del relieve relativo para la zona de estudio.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 6. Valores de rugosidad para la zona de estudio.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 7. Valores de SPI para la zona de estudio.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 8. Valores de TWI para la zona de estudio.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 9. Listado de las unidades geológicas superficiales en la zona de estudio.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 10. Listado de subunidades geomorfológicas en la zona de estudio.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 11. Valores de densidad de fracturamiento para la zona de estudio.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 12. Número de píxeles para cada categoría de susceptibilidad.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 13. Número de píxeles para cada categoría de susceptibilidad.....</i>	<i>50</i>

### Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de localización donde el polígono rojo representa las zonas de estudio para la cuenca 1 y cuenca 2 las cuales tienen un área de 26,76 Km <sup>2</sup> y 13,21 Km <sup>2</sup> respectivamente. ....	16
Figura 2. Mapa de geología regional.....	19
Figura 3. Esquema metodológico de la investigación, compuesto por seis fases: (I) revisión bibliográfica y recopilación de información, (II) procesamiento y caracterización de datos, (III) validación en campo, (IV) análisis de susceptibilidad, (V) análisis de la amenaza e (VI) interpretación final para la generación de los productos cartográficos a escala 1:25.000. ... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 4. Diagrama del porcentaje correspondiente a cada una de las calidades de roca en la zona de estudio .....	34
Figura 5. Diagrama ilustrativo del porcentaje correspondiente a cada uno de los ambientes geomorfológicos en la zona de estudio.....	36
Figura 6. Cambios en la cobertura bosque y no bosque entre el 2012 y 2023 .....	38
Figura 7. Clasificación y porcentaje de los movimientos en masa registrados en campo .....	40
Figura 8. Porcentajes del área asociada a los movimientos en masa para cada categoría de susceptibilidad a movimientos en masa cuenca Panamá. ....	43
Figura 9. Mapa de susceptibilidad para la cuenca Panamá.....	44
Figura 10. Curva de validación ROC para la cuenca Panamá.....	45
Figura 11. Porcentajes del área asociada a los movimientos en masa para cada categoría de susceptibilidad a movimientos en masa cuenca El León.....	48
Figura 12. Mapa de Susceptibilidad cuenca El León.....	49
Figura 13. Curva de validación ROC para la cuenca El León.....	50
Figura 14. Mapa de amenaza por movimientos en masa para la cuenca Panamá.....	54
Figura 15. Mapa de amenaza por movimientos en masa para la cuenca El León .....	57

**Lista de Apéndices**

<i>Apéndice 1. Mapa de geomorfología regional para el área de estudio.....</i>	<i>67</i>
<i>Apéndice 2. Mapa de estaciones realizadas en campo.....</i>	<i>68</i>
<i>Apéndice 3. Mapa de Pendientes para las cuencas a) Panamá b) El León .....</i>	<i>69</i>
<i>Apéndice 4. Mapa de relieve relativo para las cuencas a) Panamá b) El León .....</i>	<i>70</i>
<i>Apéndice 5. Mapa de rugosidad para las cuencas a) Panamá b) El León.....</i>	<i>71</i>
<i>Apéndice 6. Mapa de Strem Power Index (SPI) para las cuencas a) Panamá b) El León .....</i>	<i>72</i>
<i>Apéndice 7. Mapa de Topographic Wetness Index (TWI) para las cuencas a) Panamá b) El León .....</i>	<i>72</i>
<i>Apéndice 8. Mapa de unidades geológicas superficiales para la zona de estudio .....</i>	<i>74</i>
<i>Apéndice 9. Mapa de subunidades geomorfológicas para la zona de estudio .....</i>	<i>76</i>
<i>Apéndice 10. Mapa multitemporal de cobertura vegetal (bosque no bosque) para las cuencas a) Panamá b) El León .....</i>	<i>77</i>
<i>Apéndice 11. Mapa de densidad de fracturamiento para las cuencas a) Panamá b) El León .....</i>	<i>78</i>
<i>Apéndice 12. Mapa de inventario de procesos morfodinámicos para la zona de estudio.....</i>	<i>79</i>
<i>Apéndice 13. Cálculos para hallar el valor de <math>W_{final}</math> para cada factor condicionante en la creación del mapa de susceptibilidad a movimiento en masa por medio del análisis estadístico bivariado para la cuenca Panamá .....</i>	<i>80</i>
<i>Apéndice 14. Valores de <math>W_{final}</math> para cada factor condicionante en la creación del mapa de susceptibilidad a movimiento en masa por medio del análisis estadístico bivariado para la cuenca El León. ....</i>	<i>84</i>

## Resumen

**Título:** Estudio de la amenaza por movimientos en masa aplicando el método estadístico bivariado a escala 1:25.000 en una región del municipio de San Joaquín, Santander. \*

**Autores:** Raúl Sebastián Patarroyo Silva, Jaiber Steven Roa Jaimes. \*\*

**Palabras Clave:** Susceptibilidad, Amenaza, Método Estadístico bivariado, Pesos de Evidencia, Movimiento en Masa, San Joaquín.

### Descripción:

El municipio de San Joaquín, Santander, presenta condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa, lo que representa una amenaza para su población e infraestructura. Este estudio tiene como objetivo evaluar la probabilidad espaciotemporal por movimientos en masa en dos cuencas hidrográficas del municipio haciendo uso del método estadístico bivariado. La zona de estudio comprende la Cuenca Panamá (26,76 Km<sup>2</sup>), donde se encuentra el casco urbano de San Joaquín, y la Cuenca El León (13,21 Km<sup>2</sup>). Para el análisis, se construyó un inventario de movimientos en masa con información del Sistema de Información de Movimientos en Masa, fotointerpretación y trabajo de campo. Posteriormente, se caracterizaron factores condicionantes, como la pendiente, relieve relativo, rugosidad, SPI, TWI, UGS, SGME, cobertura y uso del suelo (bosque no bosque) y densidad de fracturamiento. A partir de esta información, se aplicó el método WoE para generar los mapas de susceptibilidad y se identificaron zonas de muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad. La validación del modelo se llevó a cabo mediante el uso de la curva ROC, obteniendo un valor de 0.775 para la cuenca Panamá y un valor de 0.810 para la cuenca El León, lo que refleja un buen desempeño de los modelos. El mapa de amenaza se obtuvo integrando el mapa de susceptibilidad para cada una de las cuencas con los factores detonantes de precipitación y sismicidad siguiendo las orientaciones metodológicas descritas en el Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000 del Servicio geológico colombiano. Como resultado para la cuenca Panamá se obtuvieron los siguientes valores: baja (6,97%), media (36,47%), alta (30,03%) y muy alta (26,56%) y para la cuenca El León: baja (2,53%), media (80,27%), alta (15,17%) y muy alta (2,02%). Los resultados obtenidos permiten identificar los sectores con mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa en el municipio de San Joaquín, constituyéndose en un insumo técnico relevante para la gestión del riesgo.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Leonardo Palmera Sánchez, Ms. C. en Geociencias. Codirector: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, PhD. en Geología.

### Abstract

**Title:** Landslide Hazard Assessment Using the Bivariate Statistical Method at a 1:25.000 Scale in a región of a San Joaquín Municipality, Santander. \*

**Author(s):** Raúl Sebastián Patarroyo Silva, Jaiber Steven Roa Jaimes. \*\*

**Key Words:** Susceptibility, Hazard, Bivariate Statistical Method, Weights of Evidence, Landslides, San Joaquín.

#### **Description:**

The municipality of San Joaquín, Santander, presents geological, geomorphological, and climatic conditions that favor the occurrence of mass movements, posing a threat to its population and infrastructure. This study aims to assess the spatiotemporal probability of mass movements in two hydrographic basins of the municipality using a bivariate statistical method. The study area comprises the Panamá Basin (26.76 km<sup>2</sup>), which includes the urban area of San Joaquín, and the El León Basin (13.21 km<sup>2</sup>). For the analysis, a mass movement inventory was compiled using information from the Mass Movement Information System, photointerpretation, and fieldwork. Subsequently, conditioning factors were characterized, including slope, relative relief, roughness, SPI, TWI, UGS, SGMF, land cover and land use (forest and non-forest), and fracture density. Based on this information, the Weights of Evidence (WoE) method was applied to generate susceptibility maps, identifying areas of very low, low, medium, high, and very high susceptibility. Model validation was performed using the ROC curve, yielding a value of 0.775 for the Panamá Basin and 0.810 for the El León Basin, indicating good model performance. The hazard map was obtained by integrating the susceptibility map for each basin with the triggering factors of precipitation and seismicity, following the methodological guidelines described in the Methodological Document for Susceptibility and Hazard Zoning of Mass Movements at a 1:100,000 scale of the Colombian Geological Survey. As a result, the following hazard proportions were obtained for the Panamá Basin: low (6.97%), medium (36.47%), high (30.03%), and very high (26.56%); and for the El León Basin: low (2.53%), medium (80.27%), high (15.17%), and very high (2.02%). The results allow the identification of sectors with a higher probability of mass movement occurrence in the municipality of San Joaquín, constituting a relevant technical input for risk management.

---

\* Degree Work

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Leonardo Palmera Sánchez, Ms. C. en Geociencias. Codirector: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, PhD. en Geología.

## Introducción

Los movimientos en masa son procesos geológicos que involucran el desplazamiento de materiales como rocas, suelos o detritos a lo largo de una pendiente, impulsados principalmente por la gravedad. Estos fenómenos representan una de las amenazas naturales más significativas en regiones montañosas y tropicales, donde las condiciones geológicas, climáticas y topográficas favorecen su ocurrencia (USGS, 2008). A nivel global, los movimientos en masa han sido responsables de una proporción considerable de desastres naturales, especialmente en áreas con alta precipitación y actividad sísmica (Guzzetti, 2012).

En Colombia, la dinámica geológica resultante de la interacción de las placas Sudamericana, de Nazca y del Caribe ha creado un escenario propicio para la ocurrencia de movimientos en masa. Factores como pendientes pronunciadas, lluvias intensas, materiales geológicos fracturados y meteorizados, y en muchos casos, la intervención humana inadecuada, aumentan la susceptibilidad a estos fenómenos (USGS, 2008). En particular, el departamento de Santander, donde se ubica el municipio de San Joaquín, es una de las regiones más afectadas debido a su topografía accidentada, actividad sísmica y una red hidrográfica densa. La presencia de fallas geológicas activas y lluvias intensas durante la temporada invernal ha generado eventos recurrentes de movimientos en masa y avenidas torrenciales, afectando tanto al casco urbano como a las zonas rurales aledañas (Goyes Peñafiel, 2024).

Ante la necesidad de gestionar el riesgo asociado a los movimientos en masa, se han desarrollado diversas metodologías y métodos para evaluar la susceptibilidad y la amenaza a diferentes escalas. Entre estas, los métodos estadísticos han demostrado ser altamente efectivos debido a su objetividad, reproducibilidad y facilidad de aplicación en Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Aristizábal, y otros, 2022). Su uso en el mapeo de la susceptibilidad y la amenaza han evolucionado significativamente, incorporando métodos como el análisis jerárquico de procesos (AHP), regresión logística, pesos de evidencia (WoE) y métodos híbridos (Aristizábal, Vásquez, & Ruíz, 2019).

Teniendo en cuenta los métodos mencionados anteriormente, se optará por seguir la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano - SGC (SGC, 2017) donde se realizará un análisis de susceptibilidad utilizando el método de Pesos de Evidencia (WoE), mientras

que el mapa de amenaza se elaborará integrando los resultados de susceptibilidad con factores detonantes, principalmente la precipitación y la sismicidad como se indica en el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 (SGC, 2013). Los resultados que se presentarán serán de ayuda para identificar zonas de baja, media, alta y muy alta amenaza, proporcionando una herramienta para la gestión del riesgo y la planificación territorial en San Joaquín.

### 1. Planteamiento del Problema

Los movimientos en masa representan una de las principales amenazas geológicas en Colombia, generando impactos significativos en la infraestructura, la seguridad de las comunidades y la planificación territorial. Según los boletines de alertas por pronóstico de la amenaza por deslizamientos de tierra (BADT) (IDEAM, 2025), más del 30% del territorio nacional presenta condiciones de susceptibilidad media a alta por la ocurrencia de estos fenómenos. Esta problemática se ve agravada por factores como las lluvias intensas, la actividad sísmica y la intervención humana en zonas de alta pendiente. A nivel departamental, Santander es una de las regiones más afectadas por movimientos en masa debido a su compleja geología y topografía. Según el Servicio Geológico Colombiano (2017), el departamento se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, sumado a que presenta una red hidrográfica extensa, lo que favorece la ocurrencia de deslizamientos, flujos y avenidas torrenciales. Estas características, propias del departamento de Santander, se observan en el municipio de San Joaquín, donde las condiciones geográficas y climáticas favorecen la ocurrencia de estos fenómenos naturales. El municipio de San Joaquín ha experimentado diversos eventos de movimientos en masa que han afectado la conectividad vial y la seguridad de la población. Según fuentes locales y gubernamentales, estos eventos han sido documentados en múltiples ocasiones, evidenciando la exposición del municipio ante este tipo de amenazas. Por ejemplo, Pineda (2011) reportó las graves consecuencias del invierno en San Joaquín, donde las intensas lluvias provocaron movimientos en masa y crecientes súbitas, afectando la infraestructura vial y aislando comunidades rurales.

Más recientemente, Ríos (2023) documentó un evento ocurrido el jueves 18 de mayo, en el cual un deslizamiento en la parte alta de la montaña sobre la quebrada

Panamá, provocó un represamiento de agua que posteriormente desencadenó una creciente súbita. Este fenómeno causó estragos en el casco urbano y varias veredas, reafirmando la persistencia del problema. Además, según un boletín de prensa de la Gobernación de Santander (2022), las lluvias intensas de ese mismo año generaron una avenida torrencial que dañó la bocatoma del acueducto municipal, afectando puentes peatonales y vehiculares, y obligó a la evacuación de familias hacia albergues temporales. Estos eventos demuestran que estos fenómenos naturales no solo son una amenaza directa, sino que también pueden agravar otros fenómenos, como las crecientes súbitas, lo que aumenta la exposición del municipio ante las lluvias intensas.

A pesar de la recurrencia de estos eventos y de la evidente exposición del municipio ante los movimientos en masa, San Joaquín presenta una limitación en la gestión del riesgo por la ausencia de estudios detallados a escala local. Actualmente, la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos en el municipio se basa en estudios de carácter regional, como la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000 correspondiente a la plancha 136 – Málaga, (2014), donde se menciona que: *“El rango de amenaza muy alta se ubica principalmente en el suroeste de la plancha, en los municipios de Mogotes y San Joaquín, y está compuesto por zonas con pendientes bajas a altas con desarrollo de procesos de erosión, meteorización y movimientos en masa altos”* (p. 45). Sin embargo, al tratarse de una escala regional, estos datos no permiten una evaluación precisa de los factores condicionantes específicos del municipio. Además, la carencia de información geoespacial detallada representa una limitación adicional que dificulta la implementación de medidas preventivas y de mitigación efectivas.

## 2. Justificación

La adecuada gestión del riesgo por movimientos en masa requiere información cartográfica precisa y actualizada que permita comprender las dinámicas del territorio y orientar la toma de decisiones. En municipios con condiciones geológicas y geomorfológicas complejas, como San Joaquín, la disponibilidad de cartografía detallada se convierte en un insumo para anticipar escenarios de peligro. En este contexto, resulta necesario desarrollar estudios a escala local que integren metodologías modernas y herramientas técnicas que faciliten una evaluación más objetiva de la amenaza.

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

En este sentido, el presente trabajo propone la elaboración de una cartografía de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 mediante la integración de métodos cuantitativos y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología contempla la caracterización detallada de los factores condicionantes que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa, así como la aplicación de modelos de evaluación que relacionen dichos factores con el inventario de eventos registrados. Esto permitirá generar mapas temáticos que identifiquen las zonas con mayor probabilidad de deslizamientos, respaldados por un proceso de validación estadística que garantice la confiabilidad de los resultados.

La producción de esta cartografía a escala detallada será importante en la gestión territorial del municipio, ya que permitirá reconocer áreas críticas y priorizar sectores que requieren medidas de mitigación o intervenciones específicas. De igual forma, será un soporte técnico para las autoridades locales en la planificación del uso del suelo y la formulación de planes orientados a la reducción y manejo del riesgo de desastres. Finalmente, los resultados obtenidos servirán como insumo actualizado para la revisión y fortalecimiento del Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD), para así contribuir a un desarrollo territorial más seguro y sostenible para la comunidad de San Joaquín.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Generar la cartografía de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa para el municipio de San Joaquín, Santander, mediante la aplicación del método estadístico bivariado, siguiendo la metodología propuesta en la *“Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000”* del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017).

#### 3.2 Objetivos Específicos

Elaborar un registro de movimientos en masa, tomando como base la información disponible en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano (SGC), y complementado con un análisis de fotointerpretación, con el fin de identificar eventos recientes o no documentados.

Caracterizar las variables geoambientales como los factores condicionantes y factores detonantes, con el fin de construir un modelo de susceptibilidad por movimientos en masa.

Crear un modelo de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 mediante el uso del método Bivariado con base en las variables geoambientales.

Calcular el mapa de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 a través de la combinación espacial del mapa de susceptibilidad con los factores detonantes asociadas a las precipitaciones y la actividad sísmica.

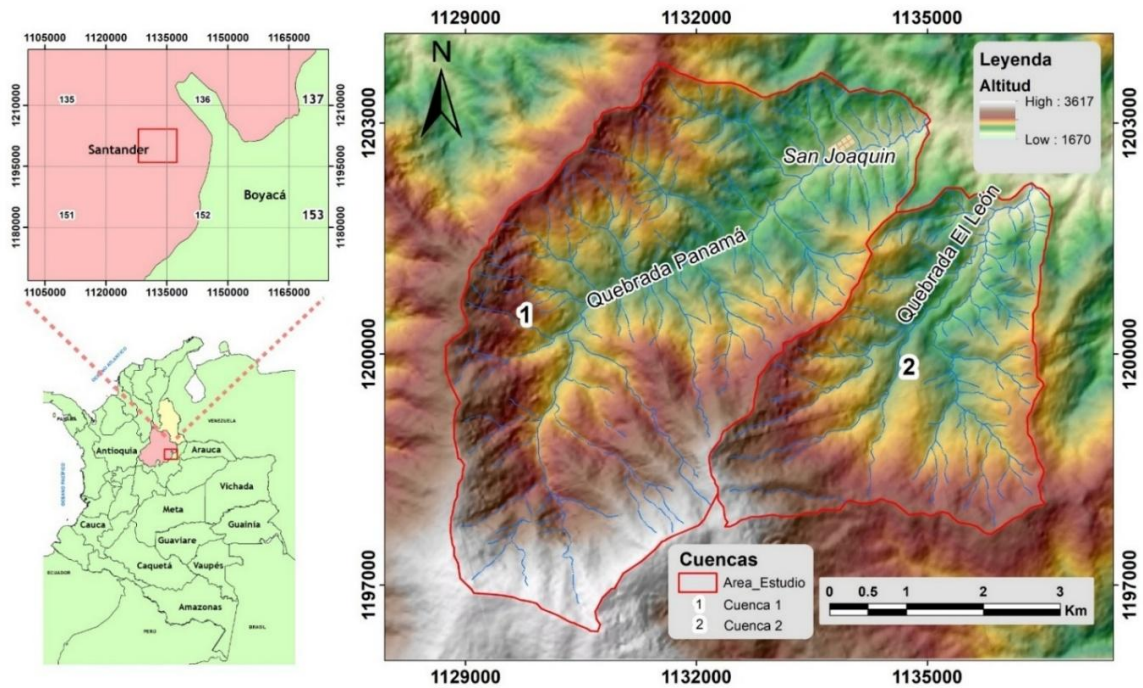
Zonificar la amenaza por movimientos en masa para el municipio de San Joaquín, Santander.

#### 4. Localización

El municipio de San Joaquín se localiza en la región suroriental del departamento de Santander, Colombia, dentro de la provincia de Guanentá, en el flanco occidental de la Cordillera Oriental de los andes colombianos como se observa en la [Figura 1](#). La localización geográfica y cartográfica del área de estudio se expresa en el sistema de referencia geodésico oficial de Colombia, MAGNA-SIRGAS (Origen Nacional, EPSG: 9377). El área de estudio presenta un relieve montañoso escarpado, caracterizado por pendientes que varían de moderadas a muy pronunciadas. Tiene una extensión de 192  $Km^2$ , conformada en su mayoría por zonas rurales. Las altitudes varían desde los 830 hasta 3615 ms.n.m., mientras que la cabecera municipal se ubica en una altitud promedio de 1950 ms.n.m. ([Goyes Peñafiel, 2024](#)). La precipitación anual promedio alcanza los 1458 mm que, en combinación con el relieve abrupto, favorecen la formación de microcuencas activas como las de la quebrada Panamá con un área de 26,76  $Km^2$  y el León de 13,21, estas y el río san Joaquín están representadas por un valle angosto y estrecho que se une con el río Onzaga ([Administración Municipal de San Joaquín , 2014](#)).

##### Figura 1.

Mapa de localización donde el polígono rojo representa las zonas de estudio para la cuenca 1 y cuenca 2 las cuales tienen un área de 26,76  $Km^2$  y 13,21  $Km^2$  respectivamente.



## 5. Marco Teórico

### 5.1 Marco conceptual

#### 5.1.1. *Movimientos en masa:*

A lo largo del tiempo se han realizado diversas investigaciones relacionadas con movimientos en masa, esto con el fin de proveer una definición y clasificación para estos eventos. Una de las primeras definiciones que se tiene describe a los movimientos en masa como *“Un proceso natural mediante el cual la gravedad, junto con el agua y la erosión, actúa para desestabilizar las laderas y modificar el paisaje a lo largo del tiempo”* (Lyell, 1830). Definiciones más recientes como la de Cruden y Varnes (1996) definen los movimientos en masa como *“El movimiento de una masa de roca, detritos o suelo pendiente abajo, debido principalmente a la fuerza de la gravedad”*. Esta última definición es una de las más aceptadas actualmente, es la base de muchas clasificaciones modernas y ha sido adoptada en estudios geotécnicos y geomorfológicos.

En cuanto a su clasificación Varnes (1978) propone dos criterios principales, el tipo de movimiento y el tipo de material. Así divide los movimientos en masa en: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral, creep y flujos.

#### 5.1.2. *Susceptibilidad*

Según el Servicio Geológico Colombiano (2017) es la *“medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área. Su determinación se basa solamente en el análisis de factores intrínsecos o condicionantes y puede también incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos en masa existentes o potenciales”*.

#### 5.1.3. *Amenaza*

Según el Servicio Geológico Colombiano (2017) es la probabilidad de que un área específica del terreno sea afectada por la ocurrencia de un movimiento en masa, es decir, relaciona la posibilidad de que un movimiento en masa impacte en un lugar teniendo en cuenta el grado de susceptibilidad de este.

**5.1.4. Método estadístico bivariado; pesos de evidencia (WoE)**

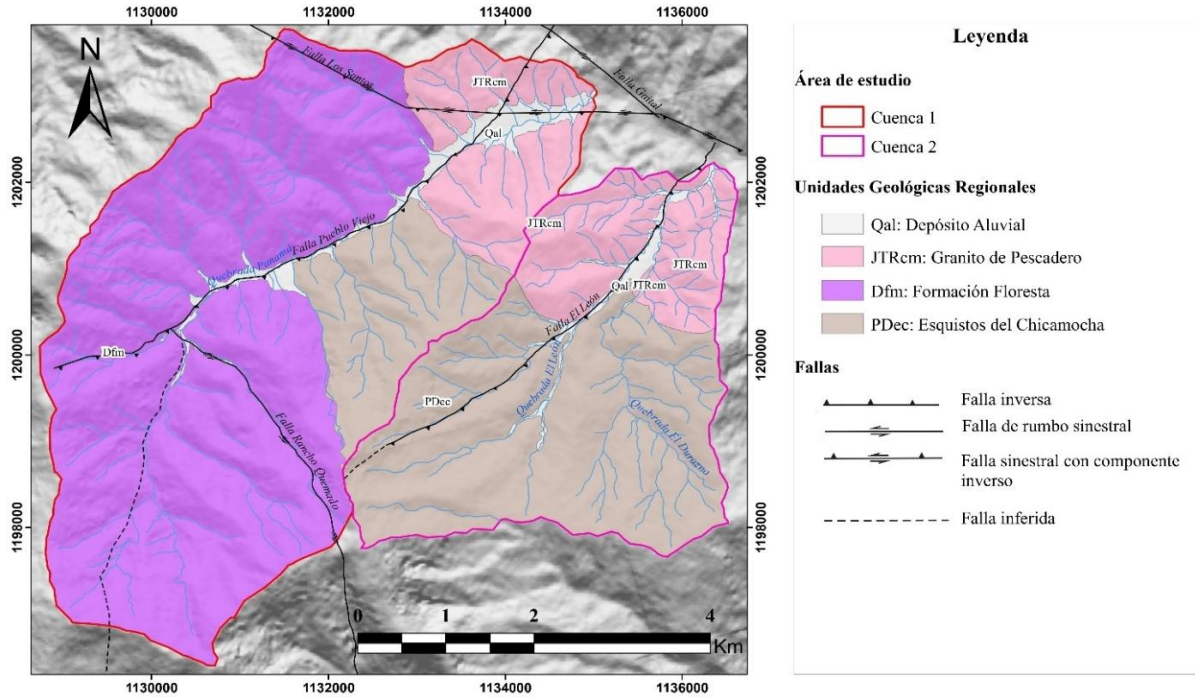
Para evaluar la susceptibilidad en la zona, se utiliza el método de análisis estadístico bivariado. Este método evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos, los cuales se obtienen a partir de la combinación de las densidades de ocurrencia de estos movimientos en masa y los mapas de cada uno de los factores condicionantes asociados a los movimientos (Van Westen, 1993). El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa.

**6. Marco geológico**

La región de estudio se encuentra al SW del Macizo de Santander, bajo la influencia de la parte sur de la falla de Bucaramanga y la prolongación de la falla de Lebrija, las cuales han configurado un sistema estructural complejo que controla la distribución litológica y las geoformas de origen morfoestructural presentes en la zona (Velandia Patiño, 2017). Litológicamente presenta cuatro unidades: la Formación Silgará, la Formación Floresta, el Granito de Pescadero y, por último, se reconocen depósitos cuaternarios (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018), como se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

Mapa de geología regional.



Nota. Modificado Hernández & Navas (2025)

### 6.1 Unidades litológicas

**Formación Silgará:** Según Ward (1973), esta unidad se caracteriza por la presencia de rocas metacuarcofeldespáticas (metaaresniscas, metagrauvacas, cuarcitas) y metapelíticas (esquistos y filitas). Estudios más recientes proponen dividir la Formación Silgará en tres unidades: Esquistos del Silgará (fundamentalmente pelítica y semipelítica), Esquistos del Chicamocha (fundamentalmente metapsamitas, metapelitas y metabasitas, y posiblemente litologías calcosilicatadas) y Filitas de San pedro (fundamentalmente metapsamitas, metapelitas, y metavolcanoclásticas) (Mantilla Figueroa, García Ramírez, & Valencia, 2016). En este contexto, las rocas presentes en el área de estudio corresponden a los Esquistos del Chicamocha, de acuerdo con la clasificación propuesta por Mantilla et al (2016).

**Formación Floresta:** Esta unidad se caracteriza por la presencia de limolitas y arcillas laminadas de aspecto sedoso y areniscas de grano fino, también presenta

conglomerados con guijos y cantos. Entre el tramo Mogotes a San Joaquín se distinguen tres miembros de esta formación: el primero, conocido como miembro basal (composicionalmente más arenoso-conglomerático), el segundo, conocido como miembro medio (más arenoso-lodoso) y el tercero, denominado miembro superior (dominantemente lodoso) (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018). Las rocas que conforman la Formación Floresta están en contacto con la unidad Esquistos del Silgará (Ward, Goldsmith, Cruz, & Restrepo A, 1973), tanto hacia el sector oeste de Mogotes como en el sector este de San Joaquín, en este último sector se expone el miembro metamorfoseado de la Formación Floresta el cual presenta fósiles devónicos en un mármol gris oscuro que se encuentra encima del miembro arenoso-conglomerático y también se presentan pizarras arcillosas a filitas en facies de esquistos verdes.

**Granito de Pescadero:** Esta unidad está compuesta principalmente por litologías cuarzomonzoníticas y monzograníticas, con textura fanerítica de grano medio y tonalidades blanco-rosáceas. Se encuentra intruida por diques leucograníticos y riolíticos, siendo estos últimos más frecuentes hacia el municipio de San Joaquín. De manera local, se observan bandas de color verde manzana constituidas por cuarzo y sericita, interpretadas como productos de alteración hidrotermal hipógena desarrollada posterior al pulso magmático triásico–jurásico. (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018).

**Depósitos Cuaternarios:** Se encuentran representados por depósitos fluvio-torrenciales, de cauce y de llanura aluvial que se encuentran en las quebradas Panamá y El León. Su composición presenta una variedad litológica de gravas, arenas y limos de rocas provenientes del Granito de Pescadero, de las Formaciones Silgará y Floresta (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018).

## 6.2 Geología estructural

La región de estudio se encuentra situada al SW del Macizo de Santander. Esta área se encuentra directamente influenciada por el sector sur de la Falla de Bucaramanga y por la prolongación de la Falla de Lebrija (Velandia Patiño, 2017). Las estructuras geológicas presentes muestran predominantemente una dirección NW, subparalela a la

Falla de Bucaramanga; no obstante, también se identifican estructuras con orientación NE como se observa en la [Figura 2](#).

En el área de estudio se presentan las siguientes fallas principales:

**Falla de Mogotes:** Esta falla fue definida por Velandia (2017), como la proyección más sur de la Falla de Lebrija y hace parte del complejo estructural del Macizo de Santander, presenta una cinemática sinistral inversa. Esta falla tiene relación con el abanico de Mogotes ([Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018](#)), de ahí que se le denomine Falla de Mogotes. En el área de estudio, esta estructura presenta una orientación aproximada NW y afecta a la Formación Floresta y al Granito de Pescadero; geomorfológicamente, da lugar a la formación de espolones, algunos de los cuales exhiben facetas triangulares.

**Falla de Pueblo Viejo:** Esta falla presenta una orientación NE-SW, y constituye un retrocabalgamiento inverso a partir de la falla de Boyacá ([Velandia & Bermúdez, 2018](#)), además, presenta una cinemática sinistral con componente normal. En el área la orientación de la falla es NE y afecta a los Esquistos del Chicamocha y la Formación Floresta y se relaciona geomorfológicamente con espolones a lo largo del trazo de falla.

**Falla Rancho Quemado:** Esta falla presenta una orientación NW-SE, presenta una cinemática sinistral y se encuentra afectando a la Formación Floresta. Se relaciona geomorfológicamente a espolones y lomos de falla.

**Falla El León:** Esta falla presenta una orientación NE-SW y una cinemática inversa, interpretándose como un retrocabalgamiento asociado a la Falla de Boyacá, al igual que la Falla Pueblo Viejo. Afecta las unidades de los Esquistos del Chicamocha y el Granito de Pescadero y, a nivel geomorfológico, se relaciona con la presencia de lomos de falla, espolones y colinas estructurales.

### 6.3 Geomorfología

Según la memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa a escala 1:100.000 correspondiente a la plancha 136 – Málaga ([SGC, 2014](#)) y la

plancha 152–Soatá (2015), esta zona se caracteriza por la presencia de geoformas de origen morfoestructural principalmente, que se originan por la expresión morfológica y la acción de las fallas. En segundo lugar, se encuentran las geoformas denudacionales, que están relacionadas con las características geográficas, climáticas e incluso antropogénicas del área, dando lugar a una variedad de relieves que reflejan los procesos de erosión y transporte de materiales. En menor medida se encuentran geoformas asociadas a los ambientes fluviales asociados principalmente a las quebradas de Panamá y El León, que representan los drenajes de mayor importancia en la zona de estudio. El mapa geomorfológico regional para la zona de estudio se encuentra en el [Apéndice 1](#).

### 7. Estado del Arte

La evaluación de la susceptibilidad y la amenaza frente a movimientos en masa se apoya en una amplia variedad de enfoques metodológicos, que han evolucionado desde aproximaciones cualitativas como los métodos heurísticos (AHP) hasta modelos estadísticos como los pesos de evidencia (WoE) (Soeters & Van Westen, 1996). Los primeros estudios dirigidos a combinar cada factor (por ejemplo, pendiente, geología, uso del suelo) con la distribución de los deslizamientos en el mapa y asignarle un peso para cada clase fue hecho por Brabb et al. (1972) quien proporciono un primer ejemplo para dicho análisis donde desarrollo una combinación simple de la distribución de los movimientos en el mapa con la litología y la pendiente.

En el análisis de la amenaza, uno de los trabajos más relevantes es el de Van Westen (1996), quien se enfocó en establecer las bases metodológicas para el reconocimiento de zonas inestables. En este trabajo se recopilan los diferentes métodos para el análisis y zonificación de la susceptibilidad, haciendo uso del método estadístico bivariado para establecer los diferentes condicionantes en el análisis de la amenaza por deslizamiento y de igual manera define la escala de aplicabilidad para el método. Asimismo, añade a la interpretación imágenes por sensores remotos para realizar los diferentes mapeos temáticos (geomorfología, pendiente, etc.) y habla de la integración de esta información por medio de los Sistemas de información geográfica. Finalmente, se menciona que a pesar de las ventajas del método el grado de objetividad de un estudio depende de las técnicas utilizadas para recolectar los datos y de los métodos de análisis

empleados, es decir, a pesar de la objetividad de estos, los resultados pueden ser subjetivos si la creación de los mapas condicionantes hace uso de juicios subjetivos.

Dentro de Colombia, investigaciones como las de Aristizábal et al. (2022) se han enfocado en algunas metodologías reconocidas en la literatura, las cuales al ser adecuadas y válidas para las condiciones propias del territorio colombiano pueden ser utilizadas para la realización de estudios de amenaza. Dentro de este estudio utilizó principalmente la metodología estadística bivariado (WoE) para el cálculo de la susceptibilidad y la integración de umbrales de lluvia y sismo para el cálculo de la amenaza en el municipio de Andes, Antioquia. Otros autores como Valencia Ortiz, Martínez-Graña, & Méndez (2023) utilizaron la aplicación del método para analizar la susceptibilidad para una región de Bucaramanga, donde correlacionaron variables geoambientales inherentes del terreno con eventos históricos de movimientos en masa donde los asociaban a sitios con pendientes pronunciadas, una elevada rugosidad del terreno y tipos específicos de suelo y roca que tienden a ser más inestables.

Regionalmente el servicio geológico colombiano ha realizado estudios de amenaza relativa por movimientos en masa como se puede evidenciar en la memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000 correspondiente a la plancha 136 – Málaga, (2014) y a la plancha 152- Soatá (2015), donde está incluido el municipio de San Joaquín. Más recientemente en la revisión general, actualización, ajuste y socialización del esquema de ordenamiento territorial (EOT) del municipio de san Joaquín, Santander (Goyes Peñafiel, 2024), se realizaron estudios de amenaza, esto con el fin determinar las diferentes áreas en condición de riesgo. Cabe aclarar que a pesar de que se han realizado estos estudios a escala regional y municipal no hay un estudio detallado en el área urbana y circundante.

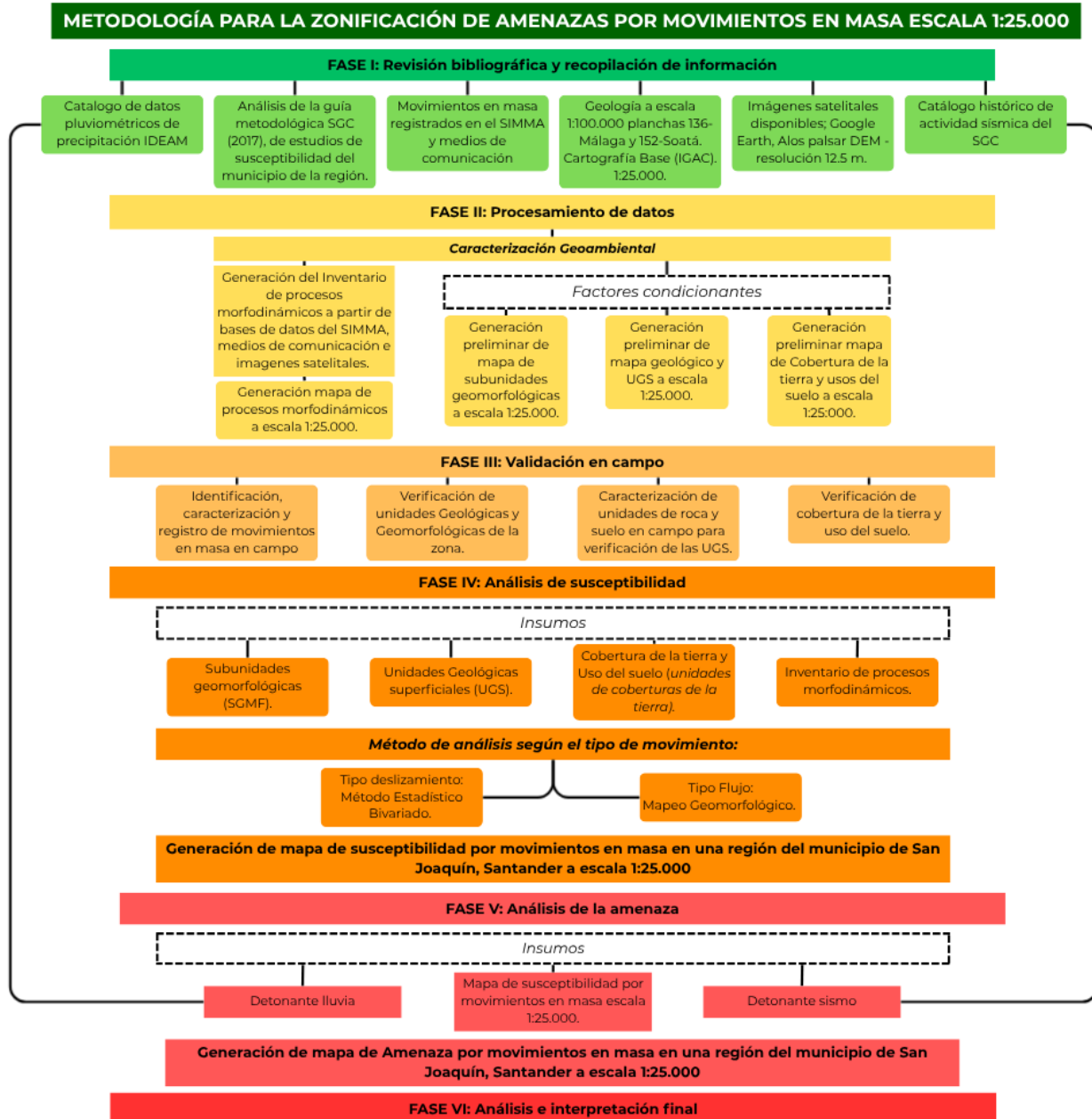
### **8. Metodología**

La metodología empleada para obtener el mapa de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa a escala 1:25.000 en el área de estudio se presenta en el esquema metodológico [Figura 3](#). Esta se estructura en seis fases: revisión bibliográfica y recopilación de información, procesamiento de datos, validación de campo, análisis de susceptibilidad, análisis de amenaza y una interpretación final.

# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

**Figura 3.**

Esquema metodológico de la investigación, compuesto por seis fases: (I) revisión bibliográfica y recopilación de información, (II) procesamiento y caracterización de datos, (III) validación en campo, (IV) análisis de susceptibilidad, (V) análisis de la amenaza e (VI) interpretación final para la generación de los productos cartográficos a escala 1:25.000.



### **8.1 Fase I: Revisión Bibliográfica y recopilación de información**

En esta etapa inicial se recopila toda la información disponible del área de estudio, dando prioridad a fuentes oficiales y bases de datos abiertas provenientes de entidades gubernamentales. Los insumos fundamentales incluyen cartografía base a escala 1:25.000 correspondientes a las planchas 152IB, 152IA, 136IIID y 136IIIC IGAC (2014), junto con las planchas geológicas 136 (Málaga) y 152 (Soatá) a escala 1:100.000 del SGC (2014). Adicionalmente, se incorpora el mapa geomorfológico (SGC, 2014; SGC, 2015) y el Esquema de Ordenamiento Territorial (CAS, 2024).

Para el análisis espacial se descargan imágenes satelitales ALOS PALSAR con resolución de 12,5 m del portal Alaska Satellite Facility (ASF) (2025), que cuentan con corrección radiométrica y topográfica (RTC), necesaria para la generación del modelo de elevación digital base. Dicha resolución es compatible con la escala de trabajo 1:25.000 y cumple los rangos recomendados a escalas medias por el Servicio Geológico Colombiano (2017). Si bien esta resolución no permite identificar microformas menores al tamaño del píxel, esta limitación se mitiga mediante la verificación geomorfológica en campo.

Los datos de cobertura y uso del suelo, incluyendo la relación Bosque/no bosque para los años 2012 al 2023 se obtienen de los repositorios del IDEAM (2025), cuya resolución es de 30 m. Este insumo corresponde a la mejor resolución disponible para el área de estudio y es compatible con la escala 1:25.000, permitiendo caracterizar adecuadamente los cambios en la cobertura vegetal relevantes para los procesos de inestabilidad.

### **8.2 Fase II: Caracterización geoambiental**

Con la información recopilada se elabora el catálogo de movimientos en masa del área mediante fotointerpretación de imágenes satelitales (Google Earth y ALOS PALSAR), análisis morfodinámico y revisión de inventarios históricos disponibles. Este catálogo permite construir un mapa preliminar que servirá para validar visualmente las zonas inestables y guiar la selección de las variables condicionantes.

El procesamiento incluye la generación de capas temáticas para los distintos factores condicionantes. En primer lugar, se consideran factores topográficos como la pendiente (reclasificada en función de los movimientos en masa presentes), relieve relativo y rugosidad. También se consideran factores hidrológicos como el SPI (Stream

Power Index) y el TWI (Topographic Wetness Index). A su vez, el factor geológico está dado por las unidades geológicas superficiales (UGS) y el factor geomorfológico por las subunidades geomorfológicas (SGMF). El factor de cobertura y uso del suelo está dado por la capa de Bosque no Bosque (multitemporal). Finalmente se incorpora un factor estructural dentro del cual se analiza la densidad de fracturamiento. Todo el procesamiento se realiza en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con herramientas de análisis espacial adaptadas a cada tipo de variable. Los datos de cobertura del suelo, específicamente con el Bosque/no bosque se trabaja con series multitemporales (2012-2023) del IDEAM (2025) para identificar pérdida de la cobertura vegetal. Esta caracterización se basa en el esquema metodológico de la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000 (SGC, 2017), que plantea un enfoque integral para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa mediante métodos estadísticos. Aunque las bases de datos públicas utilizadas serán compatibles con la escala de trabajo (1:25.000) y permiten una representación espacial adecuada, existen limitaciones relacionadas con la resolución vertical de algunos insumos y la heterogeneidad temporal de las fuentes, que se consideran en el análisis de resultados.

### **8.3 Fase III: Validación en campo**

Se ejecuta la fase de trabajo de campo, la cual comprende los siguientes componentes metodológicos principales: en primer lugar, se actualiza el inventario de movimientos en masa previamente compilado mediante la aplicación de formatos estandarizados adaptados del Servicio Geológico Colombiano (2017), en los cuales se registran las características morfométricas, tipológicas, de actividad y ubicación geográfica. En segundo lugar, se realiza la elaboración del mapa morfodinámico del área de estudio a partir de la información georreferenciada obtenida mediante los formatos de campo. Finalmente, se lleva a cabo la verificación y ajuste de los mapas preliminares de factores condicionantes mediante observación directa en campo. Cabe mencionar que en la metodología implementada por Aristizábal-Giraldo, Vásquez, & Ruíz (2019) es empleada en la verificación de campo para ajustar y verificar cada uno de los insumos principales utilizados en el análisis de susceptibilidad. El mapa de las estaciones realizadas en campo se encuentra en el Apéndice 2.

#### 8.4 Fase IV: Análisis de susceptibilidad y aplicación del método bivariado

Durante esta etapa se lleva a cabo el análisis de susceptibilidad para los movimientos en masa clasificados como deslizamientos y flujos identificados en el área de estudio, siguiendo las directrices establecidas por el Servicio Geológico Colombiano (2017). Para ambos tipos se aplica el método estadístico bivariado de Pesos de Evidencia (Weight of Evidence), ampliamente documentado en la literatura por su utilidad en la identificación de patrones espaciales y su capacidad para modelar la relación entre los factores condicionantes y la ocurrencia de eventos mediante un marco probabilístico bayesiano (Van Westen, 1993).

En este contexto, los factores condicionantes son aquellos que configuran la predisposición del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa y se consideran intrínsecos o inherentes al área de estudio, dado que prácticamente no varían en el tiempo, la selección de estos factores responde a su estabilidad temporal y a la relevancia que estos pueden tener en la modelación.

Este enfoque evalúa la asociación estadística entre la ocurrencia de movimientos en masa y la distribución espacial de cada factor condicionante (evidencia), asignando un peso calculado a partir de la densidad de ocurrencia de los eventos y la distribución espacial en los mapas de factores condicionantes. Dicho cálculo considera tanto la probabilidad incondicional como la condicional de ocurrencia, verificando así los supuestos básicos que garantizan la validez del modelo.

En la [Tabla 1](#) se presentan las expresiones utilizadas para calcular los pesos: el peso positivo ( $w_i^+$ ) indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento o flujo, mientras que el peso negativo ( $w_i^-$ ) señala que la presencia del factor se asocia a la ausencia del evento. El peso final ( $w_f$ ) resulta de la diferencia entre ambos y se utiliza en la modelación de la susceptibilidad.

La función de susceptibilidad o Landslide Susceptibility Index (LSI) se obtiene sumando los pesos finales de todos los factores condicionantes. Este índice se calculará para cada celda del área de estudio, representando la propensión relativa a la ocurrencia de deslizamientos y flujos.

Para finalizar, se realizará la validación del modelo mediante el análisis de la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), este es un gráfico de “sensibilidad” en

comparación con la “especificidad” (Fawcett, 2006) los cuales son calculados para varios umbrales donde el eje Y corresponde a la tasa de verdaderos positivos los cuales indican la proporción con áreas con deslizamientos reales que fueron correctamente clasificadas como susceptibles, mientras el eje X corresponde a la tasa de falsos positivos que indican la proporción de áreas sin deslizamientos que el modelo marco como susceptibles, es decir compara el mapa predicho con la realidad observada. La validación del modelo de susceptibilidad se realizará siguiendo el procedimiento implementado por Valencia Ortiz & Martínez-Graña (2023), consistente con las recomendaciones de Fawcett (2006) y como se muestra en la [Tabla 2](#) para análisis de modelos predictivos.

Como indicador cuantitativo de desempeño, valores del área bajo la curva cercanos a 1 reflejarán una excelente capacidad de predicción, mientras que valores cercanos a 0.5 indicarán un rendimiento aleatorio. La aplicación de este método de validación garantizará una estimación objetiva de la fiabilidad del modelo y permite evaluar su aplicabilidad para la gestión del riesgo.

**Tabla 1.**

*Pesos de evidencia para el cálculo de la susceptibilidad según Van Westen (1993)*

<b>Peso Positivo</b>
$w_i^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}}$
Positivo, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento
<b>Peso Negativo</b>
$w_i^- = \ln \frac{\frac{Npix2}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}}$
Negativo, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia deslizamiento
$w_f = w_i^+ - w_i^- \quad ; \text{ Peso Final}$
Función de susceptibilidad LSI (landslide susceptibility index):
$LSI = w_f \text{Pendiente} + w_f \text{Curvatura} + w_f \text{UGS} + \dots + w_f \text{Uso del suelo}$

**Tabla 2.**

*Parámetros y Métricas para la Construcción de la Curva ROC y el AUC según Fawcett (2006)*

<b>Tasa de Verdaderos positivos</b>

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

---

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$$

---

### Tasa de Falsos positivos

---

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}$$

---

**TP (Verdadero positivo):** Pixeles clasificados como susceptibles (por encima del umbral) donde si ocurrieron movimientos en masa

**FP (Falsos positivos):** Pixeles clasificados como susceptibles, pero donde no ocurrieron movimientos reales.

**FN (Falsos negativos):** Pixeles clasificados como no susceptibles (por debajo del umbral) pero donde si hubo movimientos.

**TN (verdaderos negativos):** Pixeles clasificados como no susceptibles y donde efectivamente no hubo movimientos.

---

### Cálculo del área bajo la curva (AUC)

---

$$AUC = \int_0^1 TPR(FPR) d(FPR)$$

---

### Interpretación del valor de AUC

---

0.5 (resultado aleatorio)

0.6-0.7 (pobre)

0.7-0.8 (bueno)

0.8-0.9 (excelente)

> 0.9 (sobresaliente)

---

## 8.5 Fase V: Análisis de la amenaza

El análisis de amenaza por movimientos en masa se desarrolla mediante la integración del mapa de susceptibilidad obtenido en la Fase IV con los factores detonantes de lluvia y sismo, siguiendo las directrices metodológicas del Servicio Geológico Colombiano (2017) y adaptando los procedimientos propuestos por Valencia Ortiz & Martínez-Graña (2023) para el cálculo de umbrales. De acuerdo con Turner & Schuster (1996), existen factores naturales que alteran las condiciones de estabilidad del terreno, siendo la lluvia y los sismos los detonantes más comunes de los movimientos en masa. Estos eventos presentan, en muchos casos, una frecuencia de ocurrencia

identificable, lo que permitirá incorporar un componente temporal al análisis de amenaza.

Según Wieczorek (1996), un detonante se define como un estímulo externo, como una lluvia intensa o un sismo, que provocará una respuesta casi inmediata en forma de movimiento en masa, debido a un cambio súbito en el estado de esfuerzos o a una disminución en la resistencia de los materiales que conforman la ladera.

Para la estimación del umbral de precipitaciones se recopila y procesa información histórica de eventos de deslizamientos y flujos ocurridos en el área de estudio, así como registros pluviométricos diarios en las estaciones disponibles. En el caso de la sismicidad, se emplea la capa de aceleración máxima del suelo (Peak Ground Acceleration – PGA, por sus siglas en inglés), estos datos fueron proporcionados por Galvis y Cristancho (2025).

Una vez definidos los umbrales de precipitación y sismicidad, estos se representan espacialmente e integran con el mapa de susceptibilidad mediante análisis en SIG que se propone en el Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000 (SGC, 2013). El resultado se clasifica en cuatro niveles de amenaza relativa: Baja, Media, Alta y Muy Alta de acuerdo con los criterios establecidos por el Servicio Geológico Colombiano (2017). De esta manera, el producto cartográfico permite identificar las zonas con mayor probabilidad de ser afectadas por deslizamientos y flujos ante la ocurrencia de eventos de lluvia o sismos que superen los umbrales determinados.

## 9. Resultados

### 9.1 Caracterización Geoambiental

La caracterización geoambiental de la zona de estudio permite identificar y analizar los factores condicionantes que controlan la ocurrencia de movimientos en masa. A partir de este análisis, se definieron los factores condicionantes y se construyó el inventario de procesos morfodinámicos. Los factores condicionantes corresponden a un conjunto de variables espaciales que, aunque no actúan como detonantes directos de los eventos, sí predisponen a la inestabilidad del terreno; en este sentido, presentan una relación significativa con la ocurrencia de los movimientos en masa identificados en el área de estudio. Por su parte, el inventario de procesos morfodinámicos proporcionó

información sobre la localización, el tipo y la fecha de ocurrencia de los movimientos registrados.

### 9.1.1. Factores condicionantes

#### 9.1.1.1 Factores morfométricos

Las variables morfométricas miden cuantitativamente la forma del relieve, y estas se generarán a partir de un modelo de elevación digital. Estas variables son las siguientes:

**Pendiente:** La clasificación de la pendiente se realizó mediante un análisis estadístico haciendo uso de la desviación estándar de los datos para así obtenerla en rangos (Valencia Ortiz, Martínez-Graña, & Méndez, 2023), como se observa en la [Tabla 3](#), dando como resultado una división en 7 clases, cada una con un rango de 10° como se muestra en la [Tabla 4](#), el valor más bajo es 0° y el máximo de 62.77°. El mapa de pendientes para las cuencas se puede observar en el [Apéndice 3](#).

**Tabla 3.**

*Clasificación de rangos de pendientes*

Count	Area	Min	Max	Range	Mean	Std
4704	735000	0	62.77	62.77	27.46	9.70

**Tabla 4.**

*Pendientes reclasificadas en rangos*

Clases	Rangos
1	0°-10°
2	10°-20°
3	20°-30°
4	30°-40°
5	40°-50°
6	50°-60°
7	60°-70°

**Relieve relativo:** Representa la diferencia de elevación dentro de una unidad espacial. Esta variable fue reclasificada en 9 clases mediante el método de rupturas naturales (Natural Breaks), con el fin de diferenciar sectores con distintos niveles de disección del relieve. Las clases definidas, junto con la cantidad de píxeles, el área

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

correspondiente y porcentaje, se encuentra en la [Tabla 5](#) y el mapa se encuentra en el [Apéndice 4](#).

**Tabla 5.**

*Valores del relieve relativo para la zona de estudio*

Clases	Count	Área (Km <sup>2</sup> )	%
1	4224	0.66	1.65%
2	16425	2.56	6.43%
3	54925	8.58	21.52%
4	99096	15.48	38.80%
5	60055	9.38	23.51%
6	16966	2.65	6.64%
7	2943	0.45	1.15%
8	611	0.095	0.24%
9	114	0.017	0.04%

**Rugosidad:** Mide la irregularidad de la superficie del terreno y refleja la complejidad geomorfológica del área. La variable fue reclasificada en 5 clases utilizando el método de rupturas naturales (Natural Breaks). Las clases definidas, junto con la cantidad de píxeles, el área correspondiente y porcentaje, se encuentra en la [Tabla 6](#) y el mapa se encuentra en el [Apéndice 5](#).

**Tabla 6.**

*Valores de rugosidad para la zona de estudio*

Clases	Count	Área (Km <sup>2</sup> )	%
1	27	0.0042	0.0105%
2	161	0.0251	0.0630%
3	1089	0.1701	0.4263%
4	18218	2.8465	7.1331%
5	235905	36.8601	92.3668%

**Stream Power Index (SPI):** Expresa la capacidad erosiva del flujo superficial en función de la pendiente y el área de contribución. El SPI fue reclasificado en 5 clases mediante rupturas naturales (Natural Breaks). Las clases definidas, junto con la cantidad

de píxeles, el área correspondiente y porcentaje, se encuentra en la [Tabla 7](#) y el mapa en el [Apéndice 6](#).

**Tabla 7.**

*Valores de SPI para la zona de estudio*

Clases	Count	Área (Km <sup>2</sup> )	%
1	2069	0.323	0.81%
2	31835	4.974	12.46%
3	77727	12.144	30.43%
4	138941	21.709	54.40%
5	4796	0.749	1.87%

**Topographic Wetness Index (TWI):** Indica la tendencia del terreno a acumular humedad. Valores elevados representan zonas con mayor saturación del suelo, lo que reduce la resistencia al corte y aumenta la probabilidad de movimientos en masa. Esta variable se reclasificó en 5 clases empleando el método de rupturas naturales (Natural Breaks). Las clases definidas, junto con la cantidad de píxeles, el área correspondiente y porcentaje, se encuentra en la [Tabla 8](#) y el mapa en el [Apéndice 7](#).

**Tabla 8.**

*Valores de TWI para la zona de estudio*

Clases	Count	Área (Km <sup>2</sup> )	%
1	181860	28.415	71.214%
2	66789	10.435	26.154%
3	5319	0.831	2.082%
4	1260	0.196	0.493%
5	140	0.021	0.054%

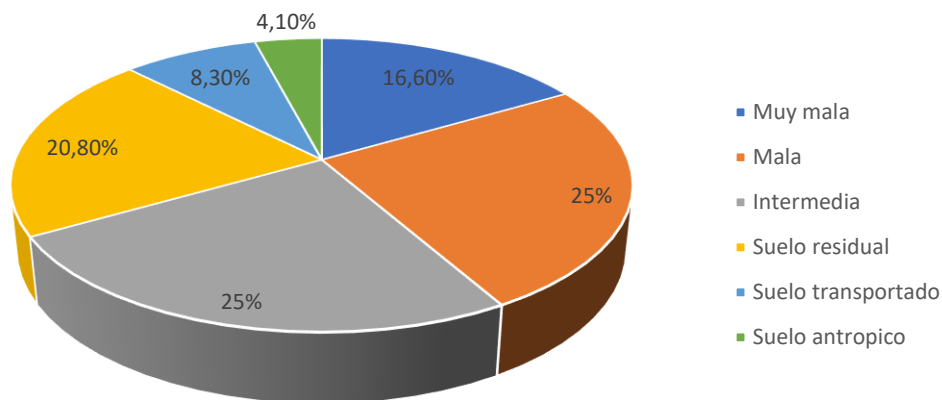
### 9.1.1.2 Subunidades Geológicas superficiales (UGS).

Según Hernández y Navas (2025), en la zona de estudio se identificaron un total de 24 unidades geológicas superficiales, de las cuales seis corresponden a rocas de calidad intermedia, seis a rocas de mala calidad y cuatro a rocas de muy mala calidad. Adicionalmente, se reconocieron cinco unidades de suelos residuales, dos de suelos transportados y una de suelo antrópico, como se presenta en la

Tabla 9, en la Figura 4 y en el Apéndice 9 se puede observar el mapa.

**Figura 4.**

Diagrama del porcentaje correspondiente a cada una de las calidades de roca en la zona de estudio



**Tabla 9.**

Listado de las unidades geológicas superficiales en la zona de estudio

UGS	CODIGO	AREA (Km <sup>2</sup> )	%
Roca calidad intermedia de cuarcitas y filitas de la Formación Floresta	Ricfff	5.96464	14.95%
Roca calidad intermedia de cuarcitas de la Formación Floresta	Ricff	0.286193	0.72%
Roca intermedia de esquistos y cuarcitas de Esquistos de Chicamocha	Riecec	0.114494	0.29%
Roca calidad intermedia de esquistos de Esquistos del Chicamocha	Rieec	0.753971	1.89%
Roca calidad intermedia de filitas de la Formación Floresta	Rifff	0.519623	1.30%
Roca calidad intermedia de monzogranito del Granito de Pescadero	Rimcmgp	0.645425	1.62%
Roca calidad mala de cuarcitas de la Formación Floresta	Rmcff	1.329724	3.33%
Roca calidad mala de cuarcitas y filitas de la Formación Floresta	Rmcfff	4.71952	11.83%

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

Roca calidad mala de esquistos de Esquistos del Chicamocha	Rmeec	5.118332	12.83%
Roca calidad mala de filitas de la Formación Floresta	Rmfff	2.624859	6.58%
Roca calidad muy mala de cuarcitas de la Formación Floresta	Rmmcff	1.533169	3.84%
Roca calidad muy mala de filitas de la Formación Floresta	Rmmfff	0.280192	0.70%
Roca calidad mala de monzogranito del Granito de Pescadero	Rmmcmgp	2.459788	6.16%
Roca calidad muy mala de esquistos de Esquistos del Chicamocha	Rmmeec	5.902513	14.79%
Roca calidad muy mala de monzogranito del Granito de Pescadero	Rmmmcmgp	2.267819	5.68%
Roca calidad mala de riolita del Granito de Pescadero	Rmrcmgp	0.052487	0.13%
<b>SUELO RESIDUAL</b>	<b>CODIGO</b>	<b>AREA (Km)</b>	<b>%</b>
Suelo residual limo-arenoso de cuarcitas de la Formación Floresta	Srlacff	1.775905	4.45%
Suelo residual limo-arenoso de filitas y metareniscas de la Formación Floresta	Srlafmff	0.027589	0.07%
Suelo residual limo-arenoso de monzogranito del Granito de Pescadero	Srlamcmgp	0.256098	0.64%
Suelo residual limo-arenoso de esquistos de Esquistos del Chicamocha	Srlaeec	1.609915	4.03%
Suelo residual limo-arcilloso de esquistos de esquistos del Chicamocha	Srlareec	0.031884	0.08%
Suelo transportado aluvial	Sta	1.30048	3.26%
Suelo transportado coluvial	Stc	0.143114	0.36%
Suelo antrópico	Sa	0.183318	0.46%

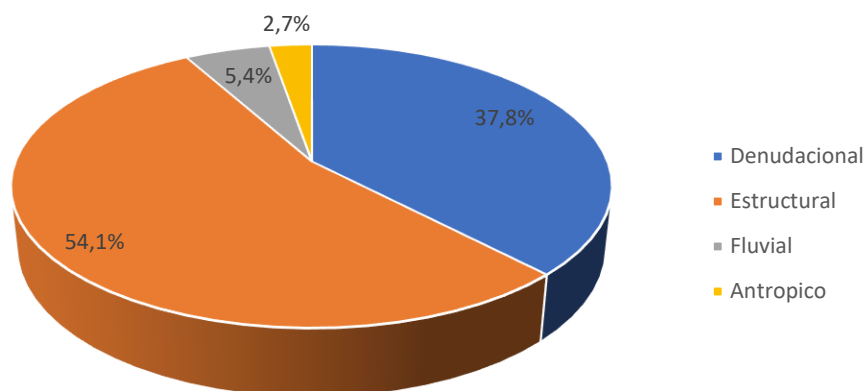
### 9.1.1.3 Subunidades Geomorfológicas (SGMF)

Según Hernández y Navas (2025), en la zona de estudio se identificaron un total de 37 geoformas. De estas, una corresponde al ambiente antrópico (2,7%), catorce al ambiente denudacional (37,8%), dos al ambiente fluvial (5,4%) y veinte al ambiente estructural (54,1%). La distribución de estas geoformas se presenta en la [Figura 5](#), en la [Tabla 10](#) y en el [Apéndice 10](#) el mapa.

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

**Figura 5.**

Diagrama ilustrativo del porcentaje correspondiente a cada uno de los ambientes geomorfológicos en la zona de estudio



**Tabla 10.**

Listado de subunidades geomorfológicas en la zona de estudio

Ambiente	Subunidad Geomorfológica	Código	Área (Km <sup>2</sup> )	%
Denudacional	Cima	Dc	0.732408	1.84%
	Cono de deslizamiento traslacional	Ddtr	0.044	0.11%
	Escarpe de erosion mayor	Deem	0.282444	0.71%
	Ladera abrupta	Dla	0.143212	0.36%
	Ladera erosiva	Dle	1.088805	2.73%
	Ladera escarpada	Dlesc	2.759294	6.92%
	Ladera muy abrupta	Dlma	1.407028	3.53%
	Ladera ondulada	Dlo	0.141035	0.35%
	Ladera suavemente inclinada	Dlsi	0.020874	0.05%
	Loma denudada de longitud media	Dldm	0.143612	0.36%
	Lomo denudado bajo de longitud corta	Dldebc	0.422003	1.06%
	Lomo denudado bajo de longitud larga	Dldebl	2.349916	5.89%
	Lomo denudado bajo de longitud media	Dldebm	0.459847	1.15%
	Lomo denudado bajo de longitud muy larga	Dldebml	1.641388	4.41%
	Estructural	Cerro estructural	Sce	0.294552
Colina estructural		Sces	2.021975	5.07%
Espolón faceteado bajo de longitud larga		Sefcbl	0.226623	0.57%
Espolón faceteado bajo de longitud media		Sefcbm	0.286531	0.72%

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

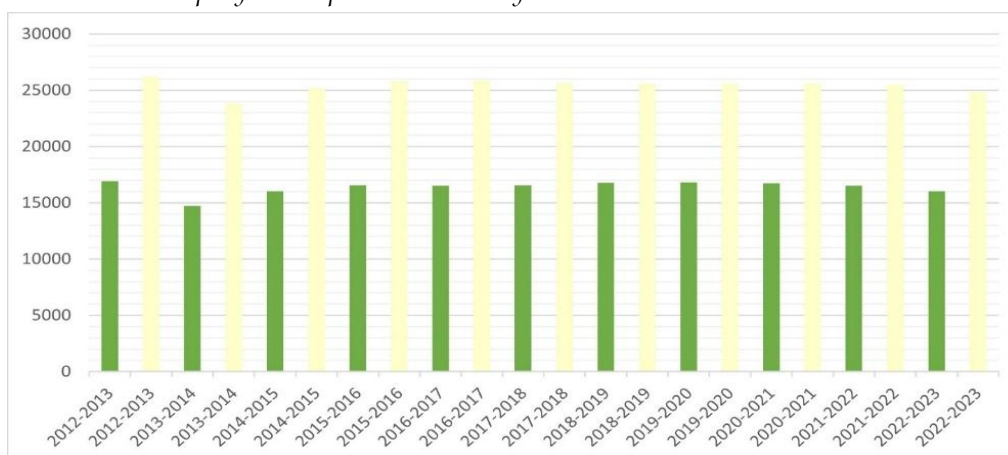
	Espolón facetado bajo de longitud muy larga	Sefcbml	0.89329	2.24%
	Espolón bajo de longitud corta	Sesbc	0.38992	0.98%
	Espolón bajo de longitud larga	Sesbl	2.291304	5.74%
	Espolón bajo de longitud media	Sesbm	3.209133	8.04%
	Espolón bajo de longitud muy corta	Sesbmc	0.061902	0.16%
	Espolón bajo de longitud muy larga	Sesbml	3.874974	9.71%
	Espolón muy bajo de longitud media	Sesmbm	0.241909	0.61%
	Espolón muy bajo de longitud muy corta	Sesmbmc	0.037941	0.10%
	Espolón moderado de longitud larga	Sesml	1.11686	2.80%
	Espolón moderado de longitud media	Sesmm	0.387109	0.97%
	Espolón moderado de longitud muy larga	Sesmml	1.997998	5.01%
	Ladera abrupta	Sla	0.106364	0.27%
	Ladera escarpada	Slesc	2.665737	6.68%
	Lomo de falla	Slf	3.230312	8.10%
	Ladera muy abrupta	Slma	2.879849	7.82%
	Ladera muy escarpada	Slmesc	0.467995	0.48%
Fluvial	Abanico aluvial	Faa	0.239553	0.60%
	Llanura de inundación	Fpi	1.060926	2.66%
Antropico	Superficie de explanación	Asp	0.183318	0.46%

### 9.1.1.4 Cobertura y uso del suelo

La cobertura y el uso del suelo estarán definidos a partir de la capa Bosque–No Bosque. Los datos de cobertura del suelo, específicamente la información Bosque/No Bosque, se analizarán mediante series multitemporales correspondientes al período 2012–2023, obtenidas del IDEAM (2025), con el fin de identificar la pérdida de cobertura vegetal, tal como se presenta en la [Figura 6](#) y en el [Apéndice 10](#).

**Figura 6.**

*Cambios en la cobertura bosque y no bosque entre el 2012 y 2023*



### 9.1.1.5 Densidad de fracturamiento

Para la variable de densidad de fracturamiento, se utilizó la herramienta de densidad de línea (line density), empleando un radio de búsqueda de 500 m<sup>2</sup>. Posteriormente, esta variable fue reclasificada en nueve clases mediante el método de rupturas naturales (Natural Breaks). Las clases obtenidas, junto con la cantidad de píxeles, el área correspondiente y su porcentaje de representación, se presentan en la [Tabla 11](#) y el mapa en el [Apéndice 12](#).

**Tabla 11.**

*Valores de densidad de fracturamiento para la zona de estudio*

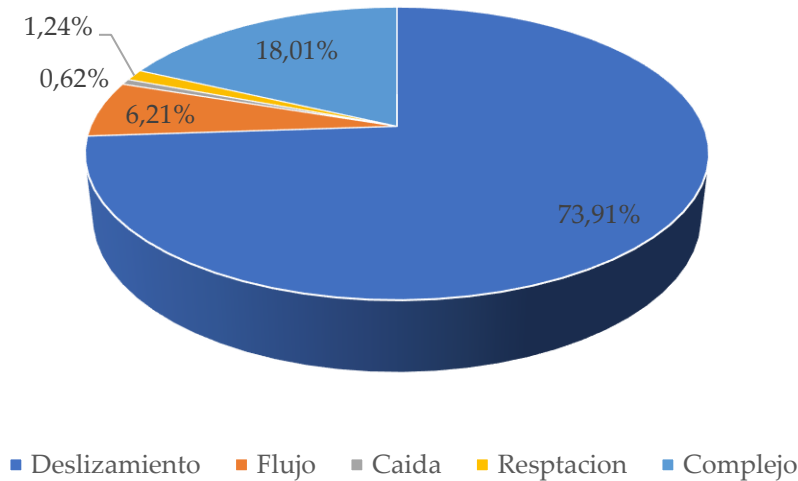
Clases	Count	Área (Km <sup>2</sup> )	%
1	134778	21.059	52.771%
2	12442	1.944	4.871%
3	19657	3.071	7.696%
4	43103	6.734	16.876%
5	8895	1.389	3.482%
6	11991	1.873	4.694%
7	16352	2.555	6.402%
8	4454	0.695	1.743%
9	3728	0.582	1.459%

### 9.1.2. *Inventario de procesos morfodinámicos*

El inventario de movimientos en masa se elaboró a partir de tres fuentes principales: el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), la fotointerpretación de imágenes satelitales y la verificación en campo. A partir del SIMMA se extrajeron siete registros de deslizamientos en el municipio de San Joaquín, de los cuales cinco corresponden a eventos de catálogo y dos a inventario. De manera paralela, se realizó una ampliación de la base de datos mediante un proceso de fotointerpretación utilizando la plataforma Google Earth entre los años 1969 y 2025. La fotointerpretación se llevó a cabo con el apoyo del grupo de trabajo del proyecto *“Evaluación de los procesos de inestabilidad de laderas en las cuencas hidrográficas Panamá y El León en el municipio de San Joaquín, Santander, mediante la relación con parámetros morfométricos y morfoestructurales”* (Quiroga Blanco, 2025), quienes se encargaron de organizar y sistematizar la base de datos de los movimientos en masa identificados a partir de imágenes satelitales. Este proceso permitió identificar de manera preliminar 281 movimientos en masa no reportados previamente, con una precisión temporal a nivel de mes/año. El trabajo de campo se desarrolló siguiendo la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano (2016), lo que permitió diligenciar 161 formatos (156 de catálogo y 5 de inventario), clasificando los eventos de acuerdo con la propuesta de Cruden y Varnes (1996). Finalmente, la información proveniente de la fotointerpretación, el trabajo de campo y los reportes de prensa fue integrada para consolidar el inventario final como se observa en el [Apéndice 13](#), asignando a cada evento un nivel de precisión temporal (día, mes o año) según la disponibilidad de la información.

**Figura 7.**

*Clasificación y porcentaje de los movimientos en masa registrados en campo*



## 9.2 Mapa final de susceptibilidad para la cuenca Panamá

Una vez realizado el análisis del método bivariado por pesos de evidencia (WoE) para cada uno de los factores condicionantes escogidos como se muestra en el [Apéndice 14](#), se obtiene el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:25.000 para la cuenca Panamá [Figura 9](#) el cual se clasifico en cinco rangos: muy baja, baja, media, alta y muy alta. En esta región de estudio no hay una categoría que presente una mayor influencia ya que en su mayoría presentan valores similares como se puede observar en la [Figura 8](#): muy baja (4.87%), baja (22.06%), media (24.64%), alta (24.82%) y muy alta (23.61%). A continuación, se presentará una descripción de las cinco categorías y un análisis de las principales características de cada una.

### 9.2.1 Susceptibilidad muy baja

Esta categoría abarca el 4.87% del área de estudio, que corresponde a 1.29  $km^2$  y se distribuye en las veredas Panamá, Santa Clara y San Ignacio, localizadas en las zonas NW y NE de la cuenca. Esta clase concentra tres movimientos en masa, aunque su frecuencia es baja, el área se encuentra cerca a zonas que presentan una mayor susceptibilidad a estos fenómenos.

Esta zona está caracterizada por la presencia de rocas de diferente calidad, donde se encuentran filitas de las Formación Floresta de mala calidad, Suelo residual de las

formaciones Floresta y Esquistos del Chicamocha, y por último la presencia de Suelo Antrópico. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconocen distintos ambientes. En el ambiente denudacional se desarrollan cimas, laderas escarpadas y laderas muy abruptas; Por su parte, el ambiente estructural está representado por laderas escarpadas, espolones facetados bajo de longitud muy larga, colinas estructurales y espolones bajo de longitudes cortas y muy largas; Finalmente el ambiente antrópico se caracteriza por la presencia de una superficie de explanación. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre  $0^{\circ}$  a  $40^{\circ}$  y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque.

### **9.2.2 Susceptibilidad baja**

Esta categoría abarca el 22.06% del área de estudio, que corresponde a  $5.85 \text{ km}^2$  y se distribuye en las veredas Panamá, Santa Barbara y San Ignacio, localizadas en la zona central de la cuenca. Se puede apreciar que hay una baja ocurrencia a movimientos en masa, con un total de trece eventos, no obstante, el área adyacente a esta zona presenta una mayor susceptibilidad a estos fenómenos.

Esta área está caracterizada por la presencia de rocas de diferente calidad, donde se encuentran filitas y cuarcitas de la Formación Floresta de mala y muy mala calidad y suelo residual de cuarcitas de la Formación Floresta. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconocen distintos ambientes. En el ambiente denudacional predominan las laderas erosivas; mientras que en el ambiente estructural se desarrollan laderas escarpadas, espolones facetados bajo de longitud muy larga, colinas estructurales y laderas muy abruptas. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre  $0^{\circ}$  a  $50^{\circ}$  y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque.

### **9.2.3 Susceptibilidad media**

Esta categoría abarca el 24.64% del área de estudio, que corresponde a  $6.54 \text{ km}^2$  y se distribuye en las veredas Panamá, Santa Barbara y San Ignacio, localizadas en las zonas NE y W de la cuenca. En esta clase se concentran cincuenta y dos movimientos en masa.

Esta zona está caracterizada por la presencia de rocas de diferente calidad, donde se encuentran filitas de las Formación Floresta de mala calidad, cuarcitas de la formación

floresta de muy mala calidad y cuarcitas y filitas de las Formación Floresta de mala calidad, Esquistos del Chicamocha de mala calidad y muy mala calidad, y por último la presencia de Suelo Antrópico. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconoce únicamente el ambiente estructural. En el cual se identifican geoformas tales como laderas escarpadas y muy abruptas, espolones bajo de longitud media y espolones moderados de longitudes muy largas. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre 10° a 50° y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque.

### **9.2.4 Susceptibilidad alta**

Esta categoría abarca el 24.82% del área de estudio, que corresponde a 6.59 km<sup>2</sup> y se distribuye en las veredas Panamá, Santa Barbara y San Ignacio, localizadas en las zonas Norte y Sur de la cuenca. En esta clase se concentran ciento treinta y nueve movimientos en masa.

Esta área está caracterizada por la presencia de rocas de diferente calidad, donde se encuentran filitas de las Formación Floresta de calidad intermedia, cuarcitas y filitas de la Formación Floresta de calidad intermedia y mala, monzogranitos del Granito de Pescadero de calidad muy mala y esquistos de los Esquistos del Chicamocha de calidad muy mala. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconoce únicamente el ambiente estructural. En el cual se identificaron geoformas tales como laderas muy abruptas, espolones bajo de longitud media, larga y muy larga y espolones moderados de longitud muy larga. Estas geoformas se asocian a pendientes que varían entre 0° a 50° y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque seguido de zonas de bosque.

### **9.2.5 Susceptibilidad muy alta**

Esta categoría abarca el 23.61% del área de estudio, equivalente a 6.27 km<sup>2</sup> y se distribuye en las veredas Panamá, Santa Barbara y San Ignacio, principalmente en las zonas Norte y Sur de la cuenca. Esta clase concentra doscientos nueve movimientos en masa, constituyendo el valor más alto en comparación con las demás categorías.

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

Esta área presenta rocas de calidad variable, en las que se identifican filitas de las Formación Floresta de calidad muy mala, cuarcitas y filitas de la Formación Floresta de calidad intermedia y mala, monzogranitos del Granito de Pescadero de calidad muy mala y suelo residual limo-arenoso del Granito de Pescadero. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconocen distintos ambientes. En el ambiente estructural se desarrollan geoformas como laderas muy abruptas y escarpadas, espolones bajo de longitud larga, espolones moderados de longitud muy larga, por su parte, en el ambiente denudacional se desarrollan lomos denudados bajo de longitud larga. Estas geoformas se relacionan con pendientes que varían entre 10° a 60° y la cobertura de la tierra en esta zona se vincula en mayor medida con a zonas de bosque seguido de zonas de no bosque.

**Figura 8.**

*Porcentajes del área asociada a los movimientos en masa para cada categoría de susceptibilidad a movimientos en masa cuenca Panamá.*

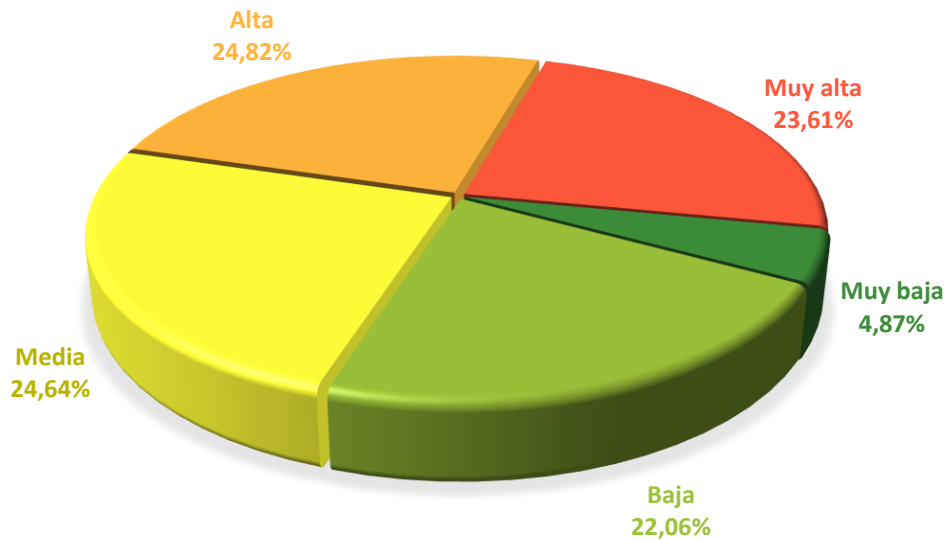
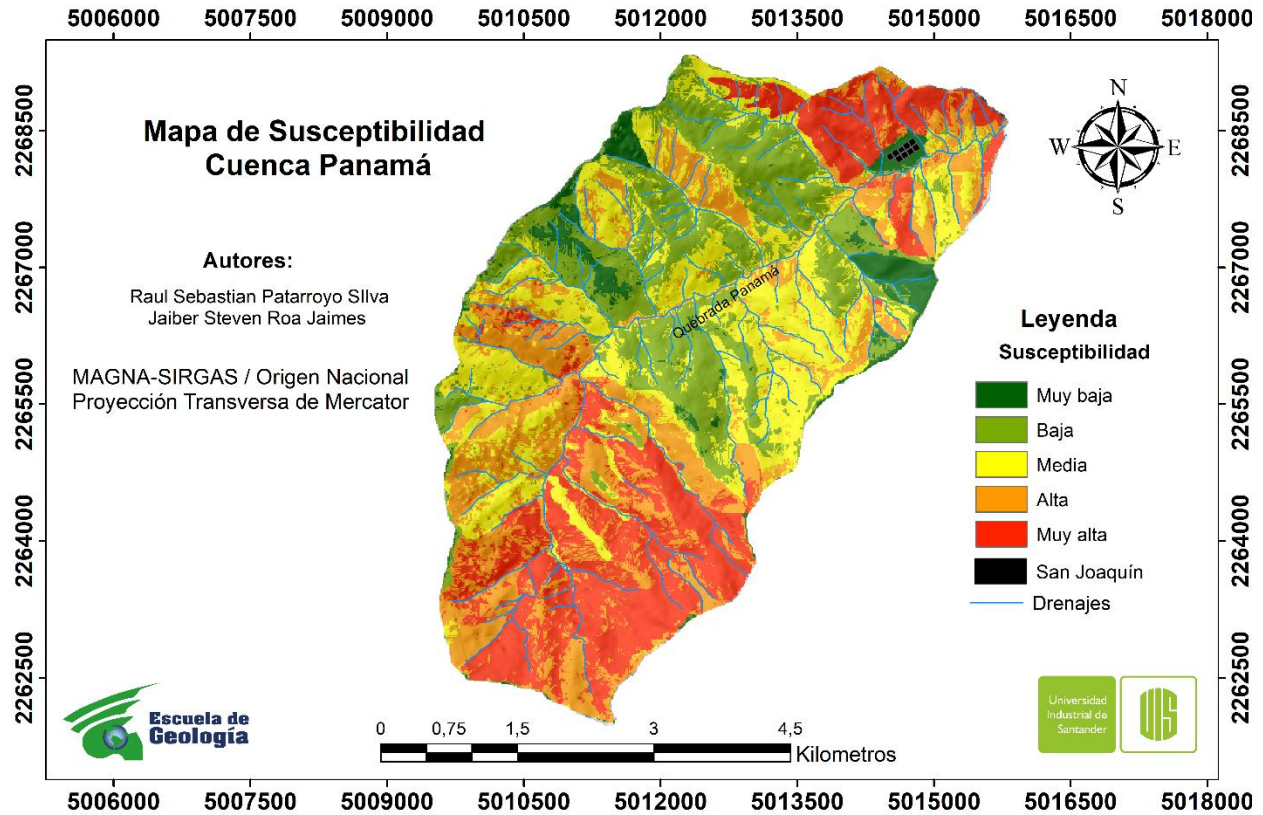


Figura 9.

Mapa de susceptibilidad para la cuenca Panamá



### 9.2.6 Validación del mapa de susceptibilidad para la cuenca Panamá

La curva ROC obtenida a partir de la [Tabla 12](#) corresponde al modelo de susceptibilidad para movimientos en masa de la cuenca 1. En la [Figura 10](#) se observa que la curva está ubicada por encima de la diagonal aleatoria, lo cual indica que el modelo tiene capacidad de discriminación entre zonas con y sin deslizamientos. El valor del área bajo la curva ( $AUC = 0.775$ ) refleja un desempeño bueno, ya que se encuentra por encima de 0.7. Esto significa que, en promedio, el modelo tiene un 77.5% de probabilidad de asignar una mayor susceptibilidad a un píxel con deslizamiento real que a uno sin deslizamiento, lo que hace confiable al modelo.

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

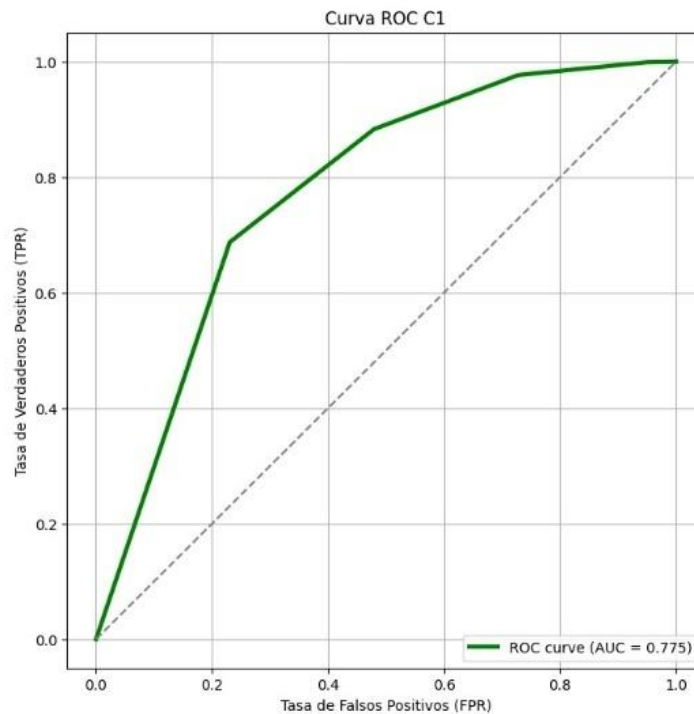
**Tabla 12.**

*Número de píxeles para cada categoría de susceptibilidad*

catgoría de Susceptibilidad	Píxeles de movimientos en masa para cada categoría	Píxeles totales en el mapa
1	2	8268
2	46	37471
3	192	41857
4	402	42167
5	1411	40115
<b>total</b>	<b>2053</b>	<b>169878</b>

**Figura 10.**

*Curva de validación ROC para la cuenca Panamá*



### 9.3 Mapa final susceptibilidad para la cuenca El León

Una vez realizado el análisis del método bivariado por pesos de evidencia (WoE) para cada uno de los factores condicionantes escogidos como se muestra en el [Apéndice](#)

15, se obtiene el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:25.000 para la cuenca El León (Figura 12) el cual se clasifico en cinco rangos: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Las categorías con mayor área de influencia en la zona son: susceptibilidad baja (41.43%) y susceptibilidad media (30.59%). A continuación, se presentará una descripción de las cinco categorías y un análisis de las principales características de cada una.

### **9.3.1 Susceptibilidad muy baja**

Esta categoría abarca el 13.91% del área de estudio, que corresponde a 1.81 km<sup>2</sup> y se distribuye en la vereda Santa Clara, alrededor de toda la cuenca. Esta clase concentra once movimientos en masa, aunque su frecuencia es baja, el área se encuentra cerca a zonas que presentan una mayor susceptibilidad a estos fenómenos.

Geológicamente hay presencia de rocas de diferente calidad, donde se encuentran esquistos de Esquistos del Chicamocha que van de muy mala calidad a una calidad intermedia y monzogranito del Granito de pescadero, que presenta una calidad intermedia. En cuanto a las geoformas, la categoría muestra dos ambientes principales que incluyen el estructural y el denudacional. En el ambiente estructural predominan espolones bajos de longitud larga y laderas muy abruptas. Por su parte, en el ambiente denudacional se desarrollan lomos denudados bajos de longitud larga, laderas muy abruptas y laderas escarpadas. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre 10° a 50° y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de bosque.

### **9.3.2 Susceptibilidad baja**

Esta categoría abarca el 41.43% del área de estudio, que corresponde a 5.4 km<sup>2</sup> y se ubica en la vereda Santa Clara, esta categoría se distribuye mayormente en la zona SE de la cuenca. Esta clase concentra cincuenta y dos movimientos en masa y el área se encuentra cerca a zonas que presentan una mayor susceptibilidad a estos fenómenos.

En esta zona se evidencia una variedad de rocas de diferente calidad, donde se encuentran esquistos de Esquistos del Chicamocha que van desde muy mala calidad a una calidad intermedia; también hay monzogranito del Granito de Pescadero de una mala calidad. En cuanto a las subunidades geomorfológicas, en la zona prevalecen

geoformas de origen denudacional como lomos denudados bajos de longitud muy larga, laderas escarpadas, laderas muy abruptas y lomos denudados bajos de longitud larga, por su parte, el ambiente estructural desarrolla geoformas como espolones bajos de longitud media. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre 10° a 50° y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque.

### **9.3.3 Susceptibilidad media**

Esta categoría abarca el 30.59% del área de estudio, que corresponde a 3.99 km<sup>2</sup> y se ubica en la vereda Santa Clara, distribuida mayormente en la zona NW de la cuenca. En esta categoría se lograron identificar noventa y seis movimientos en masa.

Esta zona esta caracterizada por la presencia de rocas de diferente calidad, donde se encuentran esquistos de Esquistos del Chicamocha de muy mala a mala calidad y monzogranito del Granito de Pescadero de mala calidad. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconocen distintos ambientes. En el ambiente denudacional se observan laderas escarpadas, por su parte, el ambiente estructural presenta lomos de falla, espolones bajos de longitud muy larga, espolones moderados de longitud larga y espolones bajos de longitud media. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre 10° a 40° y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque.

### **9.3.4 Susceptibilidad alta**

Esta categoría abarca el 12.97% del área de estudio, que corresponde a 1.69 km<sup>2</sup> y se ubica en la vereda Santa Clara, principalmente en la zona norte de la cuenca. En esta categoría se han identificado sesenta y siete movimientos en masa.

En esta zona hay diferentes calidades de roca, donde se encuentran monzogranito del Granito de Pescadero de mala calidad, esquistos de Esquistos del Chicamocha de muy mala calidad y suelo transportado aluvial. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconocen distintos ambientes. El ambiente estructural se caracteriza por la presencia de lomos de falla, espolones bajos de longitud muy larga y cerros estructurales, por su parte, el ambiente fluvial se caracteriza por la presencia de llanuras de inundación. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que

oscilan entre 0° a 40° y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque y en menor medida a zonas que cambiaron de bosque a no bosque.

### 9.3.5 Susceptibilidad muy alta

Esta categoría abarca el 1.10% del área de estudio, que corresponde a 0.14 km<sup>2</sup> y se ubica en la vereda Santa Clara, principalmente en la parte sur de la cuenca. En esta zona solo se han identificado solo dos movimientos en masa, pero son los movimientos de mayor tamaño.

Esta región presenta rocas de diferentes calidades, entre las que se encuentran esquistos de Esquistos del Chicamocha de muy mala calidad y suelos transportados aluviales y coluviales. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes en esta clase, se reconocen distintos ambientes. En el ambiente denudacional hay presencia de conos de deslizamiento traslacional y lomos denudados bajos de longitud larga, por su parte, el ambiente estructural presenta lomos de falla y el ambiente fluvial desarrolla llanuras de inundación. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre 20° a 30° y la cobertura de la tierra en esta área se asocia mayormente a zonas de no bosque.

**Figura 11.**

*Porcentajes del área asociada a los movimientos en masa para cada categoría de susceptibilidad a movimientos en masa cuenca El León*

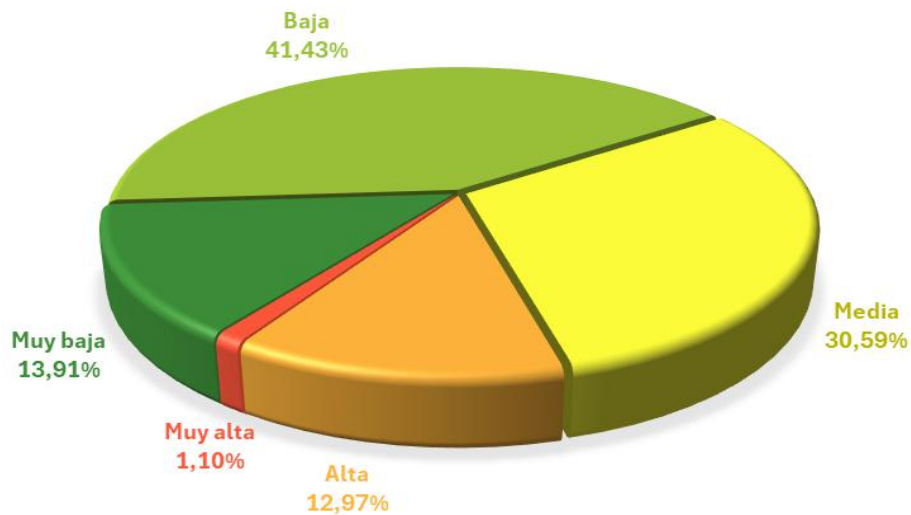
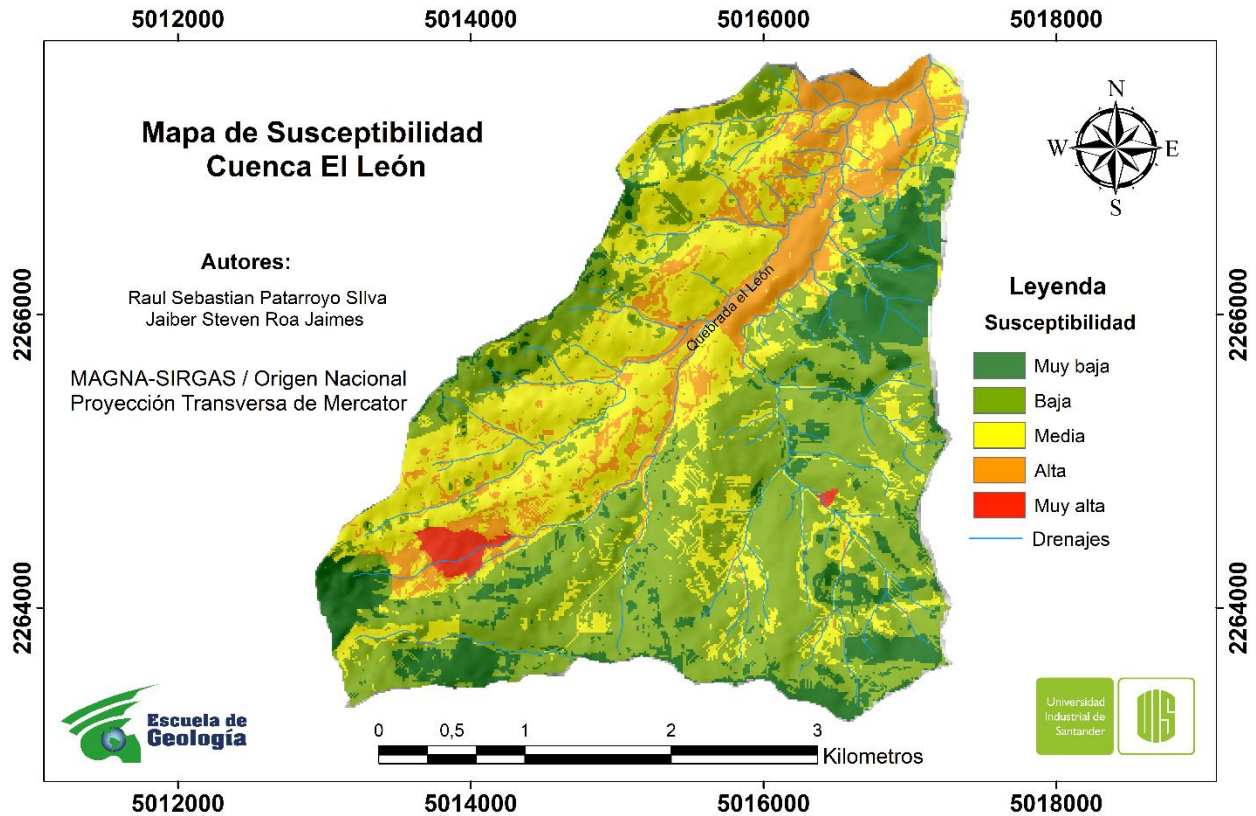


Figura 12.

Mapa de Susceptibilidad cuenca El León



### 9.3.6 Validación del mapa de susceptibilidad para la cuenca El León

La curva ROC presentada corresponde al modelo de susceptibilidad para movimientos en masa de la cuenca 2. En la [Figura 13](#) se observa que la curva se ubica por encima de la diagonal aleatoria, lo cual indica que el modelo tiene capacidad de discriminación entre zonas con y sin deslizamientos. El valor del área bajo la curva (AUC = 0.81) refleja un desempeño excelente, ya que se encuentra por encima de 0.8. Esto significa que, en promedio, el modelo tiene un 81% de probabilidad de asignar una mayor susceptibilidad a un píxel con deslizamiento real que a uno sin deslizamiento, lo que hace confiable al modelo.

## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

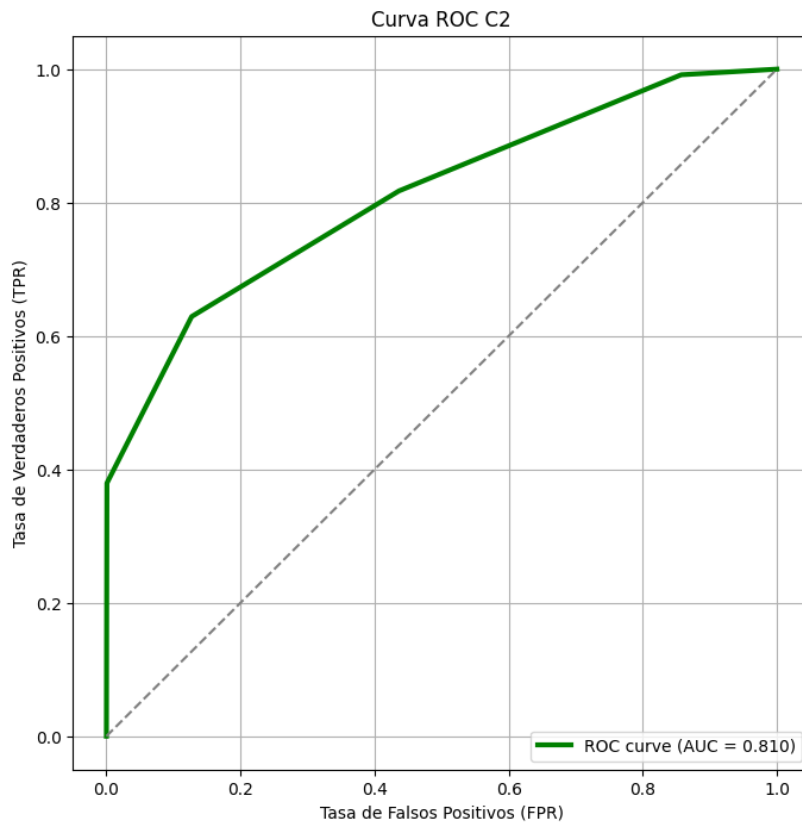
**Tabla 13.**

*Número de píxeles para cada categoría de susceptibilidad*

categoria de Susceptibilidad	Píxeles de movimientos en masa para cada categoría	Píxeles totales en el mapa
1	19	11603
2	392	34568
3	424	25524
4	562	10822
5	854	915
<b>total</b>	<b>2251</b>	<b>83432</b>

**Figura 13.**

*Curva de validación ROC para la cuenca El León*



## 10 Resultados Amenaza

A partir del mapa de susceptibilidad obtenido mediante el método bivariado de pesos de evidencia (WoE), se elaboró el mapa de amenaza por movimientos en masa mediante la integración de la susceptibilidad con los factores detonantes asociados a la precipitación y a la actividad sísmica (Figura 14 y Figura 15). La amenaza fue entendida como una probabilidad espacial de ocurrencia condicionada a la activación de dichos detonantes, para lo cual se consideraron umbrales y recurrencias representativas del área de estudio calculados por Galvis y Hernández (2025). En el caso del detonante lluvia, se establecieron umbrales de 40.54 mm para precipitaciones acumuladas en los dos días previos al evento y de 205.72 mm para acumulados en los quince días antecedentes, junto con un período de retorno (Tr) de 25 años para eventos de lluvia máxima en las zonas hidrográficas de las quebradas Panamá y El León. Para el factor sísmico, se consideró una recurrencia aproximada de eventos con potencial desencadenante cada cinco años, estos factores fueron calculados por Galvis y Hernández (2025). La combinación de una alta probabilidad de recurrencia de eventos sísmicos de baja a moderada magnitud y niveles moderados de PGA, sumada a condiciones de saturación del suelo generadas por lluvias intensas o prolongadas, representa un escenario favorable para la ocurrencia de movimientos en masa. No obstante, a diferencia de la precipitación, la sismicidad no ejerce una influencia directa en la ocurrencia de movimientos en masa en el municipio de San Joaquín, sino que actúa de manera indirecta en conjunto con eventos de lluvia significativos. El mapa de amenaza resultante fue clasificado en cuatro rangos, de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Documento Metodológico para la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013).

### **10.1 Amenaza por movimientos en Masa cuenca Panamá**

#### ***10.1.1 Amenaza baja***

Esta categoría representa el 6,97 % del área de estudio, equivalente a 1,85 km<sup>2</sup>, constituyéndose como la de menor extensión dentro de la clasificación de amenaza. Su distribución espacial se concentra principalmente en las veredas San Ignacio y en el casco urbano de San Joaquín, y de manera secundaria en las veredas Panamá y Santa Bárbara. En esta categoría se identificaron cinco movimientos en masa. Este rango de amenaza

baja se presenta en sectores localizados de la zona de estudio, donde las precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años varían entre 98 y 100 mm/día (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), con una intensidad moderada y sin constituirse en un factor crítico de inestabilidad. En esta zona, las condiciones sísmicas estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 158.3 – 160.5 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), lo cual corresponde a niveles bajos de afectación potencial sobre el terreno y la infraestructura. Esta zona está siendo afectada principalmente por la falla pueblo viejo la cual a su vez está afectando a las rocas del Granito de Pescadero, Esquistos del Chicamocha y formación Floresta (Hernández Grimaldos & Navas Báez, 2025).

### **10.1.2 Amenaza media**

Esta categoría representa el 36,47 % del área de estudio, equivalente a 9,67 km<sup>2</sup>, constituyéndose como la de mayor extensión dentro de la clasificación de amenaza. Su distribución espacial se concentra principalmente en las veredas San Ignacio y Panamá y de manera secundaria en la vereda Santa Bárbara. En esta categoría se identificaron treinta y cinco movimientos en masa. Este rango de amenaza media se presenta en gran parte de la zona central de la zona de estudio, donde las precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años varían entre 98 y 102 mm/día (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), no obstante, la mayor extensión de terreno afectada y la persistencia de lluvias hacen que esta categoría represente un nivel de amenaza más significativo. En esta zona, las condiciones sísmicas estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 158.3 – 162.7 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), lo que refleja un potencial de daño ligero, aunque suficiente para actuar como factor detonante de procesos inestables en condiciones particulares. Esta zona está siendo afectada principalmente por las fallas Pueblo Viejo y Mogotes, las cuales a su vez están afectando a las rocas del Granito de Pescadero, Esquistos del Chicamocha y formación Floresta (Hernández Grimaldos & Navas Báez, 2025).

### ***10.1.3 Amenaza alta***

Esta categoría representa el 30,03 % del área de estudio, equivalente a 7,97 km<sup>2</sup>. Su distribución espacial se concentra principalmente en la vereda Panamá y de manera secundaria en las veredas San Ignacio y Santa Barbara. En esta categoría se identificaron ciento treinta y siete movimientos en masa. Este rango de amenaza alta se presenta en la parte SW y NE de la cuenca. Esta categoría se distribuye en sectores con diferentes niveles de precipitación: en el norte de la zona de estudio los valores de precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años alcanzan los 98 mm/día, mientras que hacia el sur se incrementan hasta 103.9 mm/día (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), lo que evidencia variabilidad espacial en el régimen de lluvias. En esta zona, las condiciones sísmicas estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 157.2 – 162.6 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), valores que, aunque moderados, pueden inducir inestabilidad en sitios con condiciones geológicas y geomorfológicas predisponentes. Esta zona está siendo afectada principalmente por las fallas Pueblo Viejo, Rancho quemado y Mogotes, las cuales a su vez está afectando a las rocas del Granito de Pescadero, Esquistos del Chicamocha y formación Floresta (Hernández Grimaldos & Navas Báez, 2025).

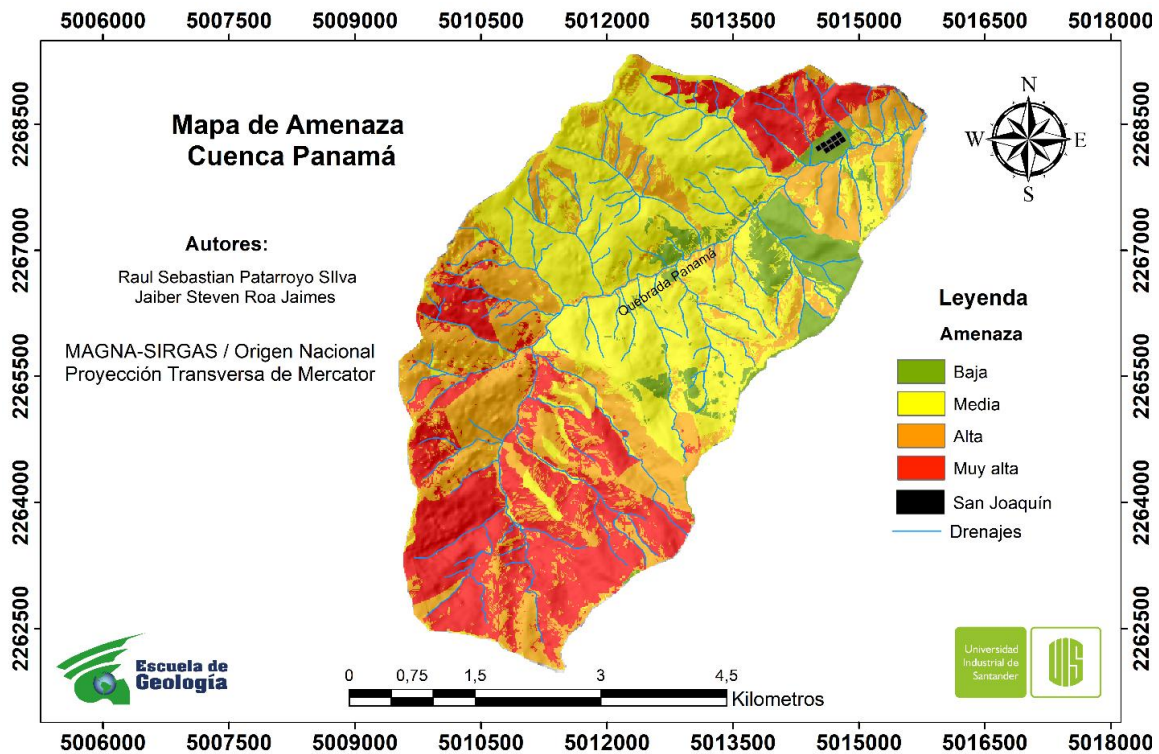
### ***10.1.4 Amenaza muy alta***

Esta categoría representa el 26,56 % del área de estudio, equivalente a 7,04 km<sup>2</sup>. Su distribución espacial se concentra principalmente en la vereda Panamá y de manera secundaria en la vereda Santa Barbara. En esta categoría se identificaron doscientos quince movimientos en masa y representa una de las áreas más críticas por la combinación de precipitaciones intensas y condiciones dinámicas de inestabilidad. Esta categoría se distribuye en sectores con diferentes niveles de precipitación: en el norte del área, aunque las precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años alcanzan los valores de 98 mm/día, la muy alta amenaza se relaciona principalmente con la presencia de fallas geológicas. Por el contrario, en la parte sur, la amenaza muy alta se asocia de manera más directa con precipitaciones entre 100.3 y 103.9 mm/día (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), las cuales actúan como el factor predominante en la inestabilidad del terreno. En esta zona, las condiciones sísmicas

estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 157.2 – 162.6 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025). Esta zona está siendo afectada principalmente por las fallas Pueblo Viejo y Mogotes en la parte norte de la cuenca y la falla Rancho Quemado y Pueblo Viejo en la zona sur de la cuenca, las cuales a su vez está afectando a las rocas del Granito de Pescadero, Esquistos del Chicamocha y formación Floresta (Hernández Grimaldos & Navas Báez, 2025).

**Figura 14.**

*Mapa de amenaza por movimientos en masa para la cuenca Panamá.*



## 10.2 Amenaza por movimientos en Masa cuenca El León

### 10.2.1 Amenaza baja

Esta categoría representa el 2,53 % del área de estudio, equivalente a 0,33 km<sup>2</sup>. Su distribución espacial se concentra en la parte N y S de la vereda Santa Clara. En esta categoría se identificaron cinco movimientos en masa. Esta categoría se distribuye en dos sectores específicos de la zona de estudio con diferentes niveles de precipitación, donde

las precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años alcanzan valores de 99.4 mm/día y 102.7 mm/día (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025). Estos niveles de lluvia, aunque moderados, no constituyen un factor crítico de inestabilidad en esta zona. En esta zona, las condiciones sísmicas estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 156.7 – 157.8 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), lo que corresponde a un daño potencial ligero. Esta zona no está siendo afectada por fallas.

### **10.2.2 Amenaza media**

Esta categoría representa el 80,27 % del área de estudio, equivalente a 10,46 km<sup>2</sup>. Su distribución espacial se concentra en la mayoría de la vereda Santa Clara, lo que la convierte en el área más amplia. En esta categoría se identificaron noventa y seis movimientos en masa. Este rango de amenaza media se presenta en gran parte de la zona de estudio, donde las precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años varían entre 98.6 y 102.9 mm/día (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), evidenciando una mayor intensidad y persistencia de lluvias en comparación con el rango bajo. En esta zona, las condiciones sísmicas estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 156.7 – 159.4 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), esta categoría adquiere relevancia debido a la interacción entre las condiciones climáticas, geológicas locales y la relación con los movimientos en masa. Esta zona está siendo afectada principalmente por la falla El León, la cual a su vez está afectando a las rocas del Granito de Pescadero, Esquistos del Chicamocha y depósitos aluviales (Hernández Grimaldos & Navas Báez, 2025).

### **10.2.3 Amenaza alta**

Esta categoría representa el 15,17 % del área de estudio, equivalente a 1,98 km<sup>2</sup>. Su distribución espacial se concentra en el centro de la vereda Santa Clara. En esta categoría se identificaron setenta y uno movimientos en masa. Este rango de amenaza alta se presenta a lo largo de la quebrada El León, donde las precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años varían entre 98.7 y 101.2 mm/día, alcanzando también valores puntuales de 103 mm/día, lo que refleja un nivel de lluvia

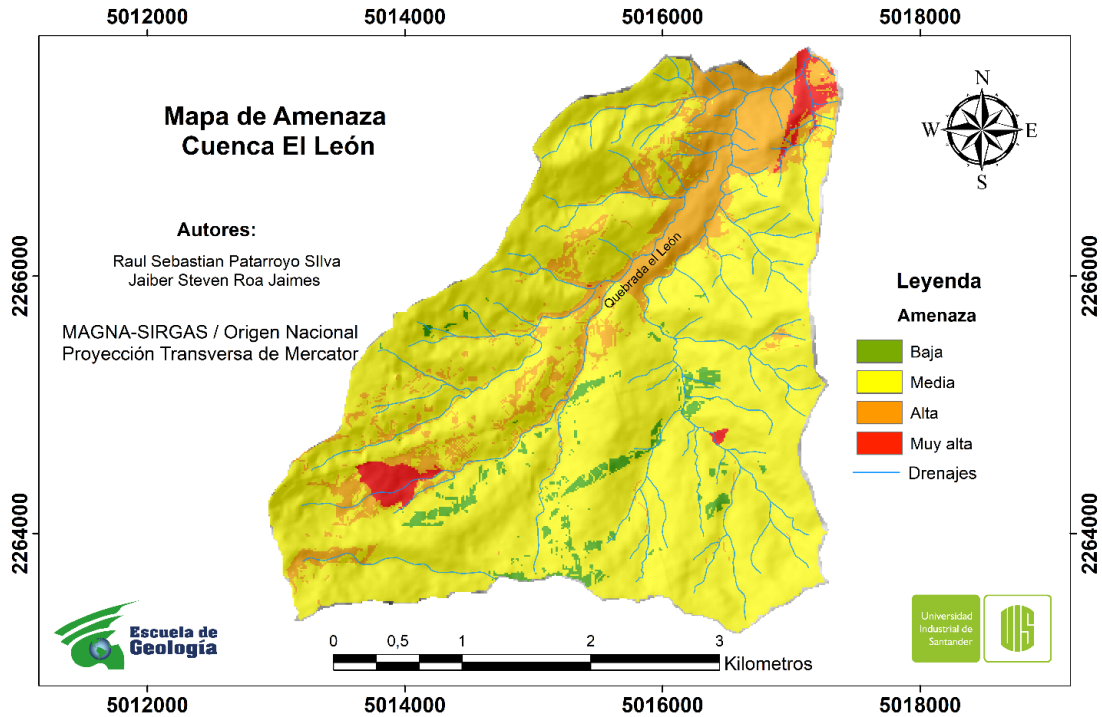
más intenso y crítico (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025). En esta zona, las condiciones sísmicas estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 157.8 – 159.4 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), suficiente para inducir procesos inestables en áreas predisuestas. Esta zona está siendo afectada principalmente por la falla El León, la cual a su vez está afectando a las rocas del Granito de Pescadero, Esquistos del Chicamocha y depósitos aluviales (Hernández Grimaldos & Navas Báez, 2025).

### *10.2.4 Amenaza muy alta*

Esta categoría representa el 2,02 % del área de estudio, equivalente a 0,26 km<sup>2</sup>, siendo la categoría de menor cobertura espacial, pero la de mayor criticidad en términos de amenaza. Su distribución espacial se concentra en el centro de la vereda Santa Clara. En esta categoría se identificaron catorce movimientos en masa. Este rango de amenaza alta se presenta en zonas puntuales al N y S de la cuenca, donde las precipitaciones máximas diarias calculadas en un tiempo de retorno de 25 años varían entre 100 y 102 mm/día, que constituyen el principal factor detonante en esta categoría (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025). En esta zona, las condiciones sísmicas estimadas a partir de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA) se encuentran en un rango de 157.2 – 159.4 cm/s<sup>2</sup> en un periodo de retorno de 475 años (Galvis Cobos & Cristancho Hernández, 2025), la combinación de precipitaciones intensas y factores locales de inestabilidad elevan la amenaza en esta zona. Esta zona está siendo afectada principalmente por la falla El León, la cual a su vez está afectando a las rocas del Granito de Pescadero, Esquistos del Chicamocha y depósitos aluviales (Hernández Grimaldos & Navas Báez, 2025).

Figura 15.

Mapa de amenaza por movimientos en masa para la cuenca El León



## 11 . Conclusiones

El desarrollo del presente estudio permitió abordar de manera integral la evaluación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa en las cuencas Panamá y El León, mediante la integración de información geoambiental, análisis espacial y la aplicación de metodologías estadísticas reconocidas a nivel nacional. La implementación de un enfoque sistemático, apoyado en herramientas SIG y en lineamientos técnicos establecidos por el Servicio Geológico Colombiano, garantizó la coherencia metodológica del proceso y la confiabilidad de los resultados obtenidos, los cuales sirven como base para la generación de cartografía temática orientada a la gestión del riesgo.

En este contexto, se generó la cartografía de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa para las cuencas Panamá y El León, mediante la aplicación del método estadístico bivariado de pesos de evidencia, conforme a lo descrito en la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000

del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017). Los resultados obtenidos evidencian una relación entre las zonas de alta susceptibilidad y los sectores históricamente afectados por movimientos en masa, confirmando que el método usado fue adecuado.

A partir del registro de movimientos en masa, elaborado con base en la información disponible en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), mediante análisis de fotointerpretación y trabajo de campo, se identificaron 435 eventos. Este insumo permitió definir las áreas donde se concentra la ocurrencia de movimientos en masa, sirviendo como referencia para la validación del modelo de susceptibilidad.

La caracterización de las variables geoambientales permitió reconocer los principales factores condicionantes asociados a la inestabilidad del terreno. Entre ellos, se encuentran las variables de: pendiente, relieve relativo, rugosidad, SPI, TWI, UGS, SGMF, bosque no bosque y densidad de fracturamiento. La integración de estas variables en un entorno SIG garantizó un análisis espacial de estas mismas.

En la cuenca Panamá, el modelo de susceptibilidad bivariado permitió definir zonas de susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta, con un valor de validación de 0.775 (AUC), lo que indica una buena capacidad predictiva. Las áreas de mayor susceptibilidad se localizaron principalmente en las zonas más norte y sur, asociadas a pendientes pronunciadas, litologías de mala calidad y alta densidad de fracturamiento. Por su parte, en la cuenca El León, el modelo arrojó un valor de validación de 0.810 (AUC), superior al obtenido en la cuenca Panamá, lo que indica una mejor capacidad predictiva, con zonas de alta susceptibilidad concentradas en sectores con altas pendientes y materiales de mala calidad.

La integración de los detonantes lluvia y sismo permitió generar los mapas de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 para cada cuenca. Este proceso evidenció que las zonas de amenaza alta y muy alta se concentran en sectores donde coinciden altos valores de susceptibilidad con condiciones de detonación.

Finalmente, la zonificación de la amenaza permitió dividir el municipio en áreas con diferentes niveles de amenaza, contribuyendo a orientar las estrategias de ordenamiento territorial y de infraestructura. Los mapas obtenidos constituyen herramientas técnicas que ayudarán a la gestión del riesgo a nivel local. Cabe resaltar que el producto cartográfico generado no solo cumple con los objetivos planteados, sino que

aporta información base para la toma de decisiones por parte de las autoridades municipales.

## **12 . Recomendaciones**

Durante el desarrollo del estudio se aplicó la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 hasta la elaboración del mapa de susceptibilidad. Sin embargo, dentro del capítulo de caracterización de la amenaza, específicamente en el apartado de Zonificación, se identificó que las instrucciones para realizar la zonificación de la amenaza no son suficientemente claras. Este capítulo detalla el cálculo de los factores detonantes, sin establecer de forma explícita el procedimiento de integración y clasificación final de las zonas de amenaza. Debido a esta limitación, fue necesario complementar el proceso utilizando la Guía metodológica a escala 1:100.000. Por ello, se recomienda a las entidades pertinentes aclarar y ampliar el contenido del apartado de Zonificación dentro del capítulo de caracterización de la guía 1:25.000, de manera que se proporcione un lineamiento completo y autosuficiente para la elaboración de mapas de amenaza por movimientos en masa.

Se sugiere verificar y complementar la información proveniente de fuentes oficiales, dado que en algunos casos esta resulta incompleta o presenta vacíos, como ocurre con ciertos registros del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA). Dado que el método de Pesos de Evidencia (WoE) depende directamente de la calidad, precisión y cantidad de los datos disponibles, las limitaciones en las bases de información pueden afectar la confiabilidad de los resultados del modelo. En este sentido, se recomienda a las entidades responsables fortalecer sus procesos de actualización, depuración y estandarización de datos, promoviendo además que estas bases sean de fácil acceso para apoyar futuros estudios de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa.

Es necesario profundizar en estudios geotécnicos detallados en todas las áreas donde el modelo identificó amenaza alta y muy alta por movimientos en masa, especialmente en los sectores adyacentes a la vía principal y también en aquellas zonas habitadas o de tránsito frecuente. Estos estudios permitirán caracterizar con mayor precisión las condiciones del terreno y definir los mecanismos de inestabilidad presentes,

lo que ayudaría a la formulación e implementación de medidas de estabilización y mitigación que reduzcan el riesgo asociado a futuros eventos de movimientos en masa.

Se propone realizar un estudio de vulnerabilidad y exposición de las comunidades que residen dentro y en las zonas cercanas a las áreas clasificadas con amenaza alta y muy alta por movimientos en masa, con el propósito de identificar el grado de afectación potencial y las condiciones socioeconómicas y estructurales de la población expuesta. Esta información servirá como insumo para la formulación o ajuste de los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT), permitiendo integrar criterios de gestión del riesgo y planificación del uso del suelo orientados a la reducción de la vulnerabilidad y la protección de las comunidades en riesgo.

Se recomienda que los resultados obtenidos en el presente estudio de susceptibilidad y amenaza constituyan una base para el desarrollo de investigaciones más detalladas, particularmente estudios específicos por avenidas torrenciales, que permitan profundizar en la caracterización de los procesos hidromorfológicos, la dinámica de escorrentía y los escenarios de riesgo asociados, aportando insumos técnicos para una gestión del riesgo más precisa y efectiva en la zona de estudio.

### Referencias bibliográficas

- Administración Municipal de San Joaquín. (2014). *Plan de Acción Territorial del Municipio de San Joaquín*. San Joaquín: Alcaldía de San Joaquín. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/20.500.14471/23943/28410-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aristizábal, E., Morales García, P., Vásquez Guarín, M., Vásquez Ruíz, D., Palacio Córdoba, J., Ángel Cárdenas, F., Caballero Acosta, H., & Ordóñez Carmona, O. (2022). Metodologías para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa como parte de los estudios básico de amenaza: caso de estudio municipio de Andes, Antioquia, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 199-217. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022009>
- Aristizábal, E., Vásquez, M., & Ruíz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *TecnoLógicas*, 22(46), 43-64. <https://doi.org/10.22430/22565337.1247>
- Beltrán García, P. A., & Pineda Ballesteros, G. (2025). *Análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa entre los municipios de Mogotes y San Joaquín, Santander escala 1:25.000 aplicando la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (2017)*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/71a0198d-c3ff-4bf1-b0f6-b84da9d920a8/download>
- Brabb, E. E., Pampeyan, E. H., & Bonilla, M. G. (1972). *Landslide susceptibility in San Mateo County, California*. San Mateo County: U.S Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/mf360>
- CAS. (2024). *Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de San Joaquin*. San Joaquín: Corporación Autónoma Regional de Santander. <https://cas.gov.co/wp-content/uploads/2023/06/RESOLUCION-DGL-No-819-DE-NOVIEMBRE-29-DE-2024.pdf>
- CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO AMBIENTAL. (2024). *Esquema de Ordenamiento territorial del municipio San Joaquín, Santander*. San Joaquín: Cordeam. <https://drive.google.com/drive/folders/1pqSzVKMPWeR20VDm2Vap8cm03ZWflTj6>
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. En *Landslides: Investigation and Mitigation* (págs. 36-75). <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Science Direct*, 871-874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>

- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Science Direct*, 871-874. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Galvis Cobos, V., & Cristancho Hernández, L. J. (2025). *Caracterización de los umbrales de lluvia y sismo que detonan movimientos en masa para los sectores hidrográficos, quebradas Panamá y el León, pertenecientes al municipio de San Joaquín, Santander*. Bucaramanga: UIS. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/46526>
- Gobernación de Santander. (12 de Diciembre de 2022). *Boletines de prensa*. Gobernación de Santander. <https://goo.su/maZgPJ2>
- Goyes Peñafiel, Y. P. (2024). *Estudio básico de amenazas de acuerdo con los establecido en el decreto único reglamentario 1077 de 2015 para el municipio de San Joaquín, Santander*. Alcaldía de San Joaquín. San Joaquín: Cordeam. [https://drive.google.com/file/d/1H\\_zlLos4Onc1L16fxOihhQAaJpkSiEQs/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1H_zlLos4Onc1L16fxOihhQAaJpkSiEQs/view?usp=drive_link)
- Guzzetti, F. M. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews.*, 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Hernández Grimaldos, A., & Navas Báez, M. (2025). *Caracterización de las unidades geológicas superficiales (UGS) y subunidades geomorfológicas (SGMF) a escala 1:25.000 para el municipio de San Joaquín, Santander, como una herramienta en la evaluación de los factores de inestabilidad superficial*. Bucaramanga.
- IDEAM. (3 de Septiembre de 2025). *Boletín de Alertas por Pronóstico de la Amenaza por Deslizamientos de Tierra (BADT)*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales . <https://goo.su/jF3LX>
- IDEAM. (4 de Septiembre de 2025). *IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Centro de Descarga de Información Geográfica Oficial del IDEAM. <https://experience.arcgis.com/experience/568ddab184334f6b81a04d2fe9aac262/page/Datos-Abiertos-Geogr%C3%A1ficos-/>
- IGAC. (2014). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://geoportal.igac.gov.co>
- Lyell, C. (1830). *Principles of geology being an attempt to explain the former changes of the earth surface, by reference to cause now in operation*. London: Jhon Murray. <https://archive.org/details/PrinciplesgeoloV3Lyel>
- Mantilla Figueroa , L. C., Garcia Ramírez, C. A., & Valencia , V. A. (2016). Propuesta de esición de la denomidana Formación Silgará (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletin de Geología*, 38(1), 33-50. <https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016002>
- Mantilla Figueroa, L. C., & García Ramírez, C. A. (2018). Geología y geocronología de las litologías aflorantes en el tramo Mogotes-San Joaquín (sector SW del Macizo de

- Santander). *Boletín de Geología*, 40(1), 123-144.  
<https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018008>
- NASA. (4 de Septiembre de 2025). *ASF Data search*. EARTHDATA.  
<https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=3.000&center=-97.494,39.673>
- Pineda Salazar, P. (27 de Abril de 2011). *Se agudizan las consecuencias del invierno en San Joaquín*. Vanguardia. <https://goo.su/7qZwmU>
- Quiroga Blanco, D. (2025). *Evaluación de los procesos de inestabilidad de laderas en las cuencas hidrográficas Panamá y El León en el municipio de San Joaquín, Santander, mediante la relación con parámetros morfológicos y morfoestructurales*. Bucaramanga.
- Ríos, J. A. (20 de mayo de 2023). *Creiente Causó Estragos en San Joaquín, Santander*. Vanguardia. <https://goo.su/9LMti>
- Servicio Geologico Colombiano. (2014). Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 136 – Málaga. En U. I. Santander, *Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 136 – Málaga* (pág. 57). Bucaramanga.  
<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=Memoria+Explicativa+Mapa+Geol%C3%B3gico+de+la+Plancha+136>
- SGC. (2013). Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000. En *Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000* (Vol. 2, págs. 118-122). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.  
[https://www.academia.edu/25405288/DOCUMENTO\\_METODOL%C3%93GICO\\_DE\\_LA\\_ZONIFICACION\\_DE\\_SUSCEPTIBILIDAD\\_Y\\_AMENAZA\\_POR\\_MOVIMIENTOS\\_EN\\_MASA](https://www.academia.edu/25405288/DOCUMENTO_METODOL%C3%93GICO_DE_LA_ZONIFICACION_DE_SUSCEPTIBILIDAD_Y_AMENAZA_POR_MOVIMIENTOS_EN_MASA)
- SGC. (2014). *Memoria explicativo del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 136-Málaga, departamentos de Santander y Boyacá*. Bucaramanga: Servicio Geológico Colombiano .  
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B21/GmfMM136Malaga/Documento/Pdf/MemoGmf136.pdf>
- SGC. (2015). *Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000 correspondiente a la plancha 152 – Soatá*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.  
[https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/AmeMM152\\_Soata/Documento/Pdf/MemoAme152.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/AmeMM152_Soata/Documento/Pdf/MemoAme152.pdf)
- SGC. (2015). *Memoria explicativa del mapa Geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 planca 152, Soatá, Departamentos de Santander y Boyacá*. Bogotá:

- Servicio Geológico Colombiano  
[https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/GmfMM152\\_Soata/Documento/Pdf/MemoGmf152.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/GmfMM152_Soata/Documento/Pdf/MemoGmf152.pdf)
- SGC. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.32685/9789589952856>
- SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano - SGC.  
<https://doi.org/10.32685/9789585978225>
- Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1996). Landslides: Investigation and Mitigation. En R. Soeters, & C. J. Van Westen, *Slope instability recognition, analysis, and zonation* (págs. 129-177). Washington D.C. : National Academy Press.  
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-008.pdf>
- Turner, A., & Scuster, R. (1996). *Landslides - investigation and mitigation*. Washington D.C.: National Academy of Sciences.  
<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf>
- USGS. (2008). The landslide handbook: A guide to understanding landslides. En L. Highland , & P. Bobrowsky, *The landslide handbook: A guide to understanding landslides* (Vol. 1, págs. 1-40). Reston, Virginia, Estados Unidos: U.S. Geological Survey. <http://pubsdata.usgs.gov/pubs/circ/1325/index.html>
- Valencia Ortiz, J. A., & Martínez-Graña, A. M. (2023). Calculation of precipitation and seismicity thresholds as triggers for mass movements in the region of Bucaramanga, Colombia. 18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110355>
- Valencia Ortiz, J. A., Martínez-Graña, A. M., & Méndez, L. M. (2023). Evaluation of Susceptibility by Mass Movements through Stochastic and Statistical Methods for a Region of Bucaramanga, Colombia. *Remote Sensing*, 26. <https://doi.org/10.3390/rs15184567>
- Van Westen, C. (1993). *Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation* (Vol. 15). Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).  
[https://www.researchgate.net/publication/233865351\\_Application\\_of\\_Geographic\\_Information\\_Systems\\_to\\_Landslide\\_Hazard\\_Zonation](https://www.researchgate.net/publication/233865351_Application_of_Geographic_Information_Systems_to_Landslide_Hazard_Zonation)
- Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. In *Landslides: Analysis and Control*. National Academy of Sciences.  
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>
- Velandia , F., & Bermúdez, M. A. (2018). The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): Insights from geological mapping, stress tensors,

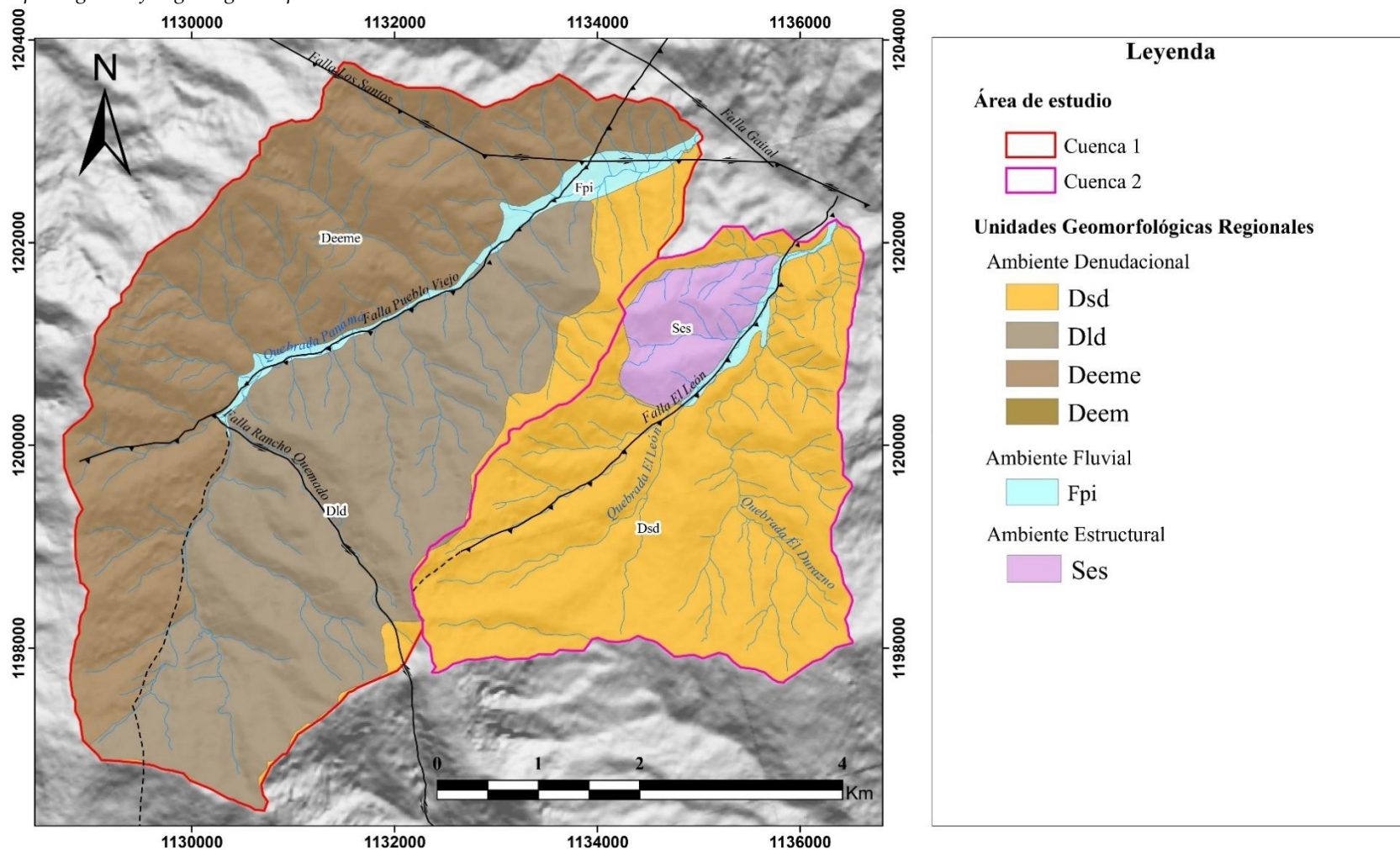
- and fractal analysis. *Journal of Structural Geology*, 190-207. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.020>
- Velandia Patiño, F. A. (2017). *Cinémática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstreams/d65aa25e-cc39-4e92-b117-7dda58b47c30/download>
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo A, H. (1973). Geología de los cuadrangulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. *Bolentín Geológico*, 21(1-3), 1-132. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol21.1-3.1973.383>
- Wieczorek, G. (1996). Landslide triggering mechanisms. En K. Turner, & R. L. Schuster, *Landslides: Investigation and Mitigation* (págs. 76-90). Washington D.C.: Transportation Research Board National Research Council. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-004.pdf>

## **Apéndices**

# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 1.

Mapa de geomorfología regional para el área de estudio.

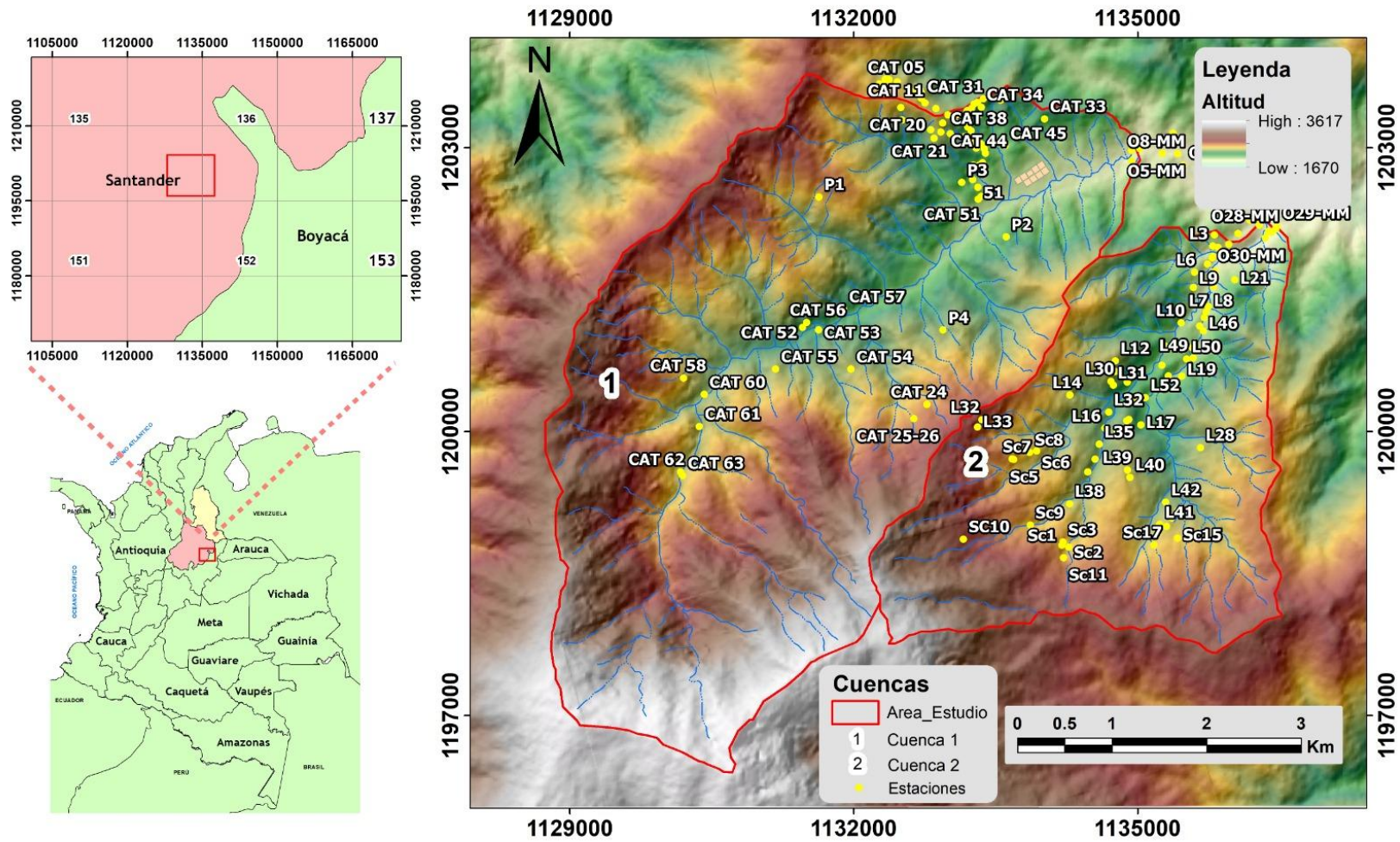


Nota. Elaborado por Hernández & Navas (2025)

# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 2.

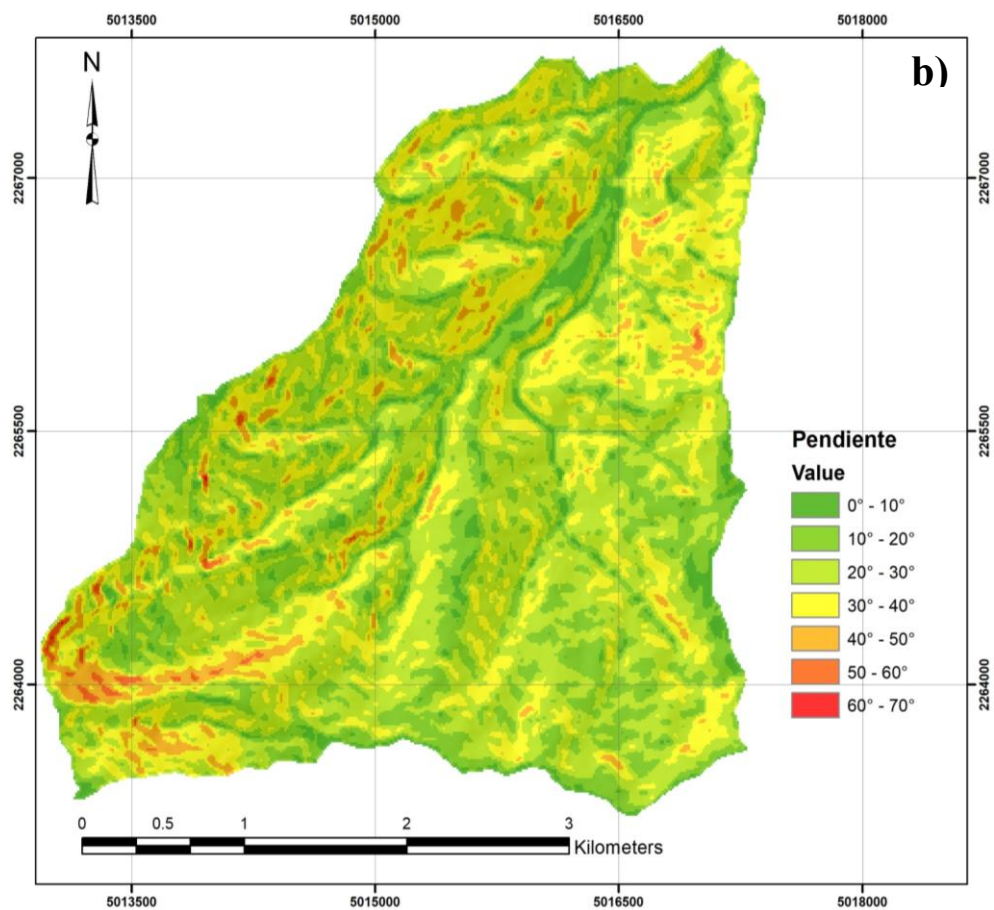
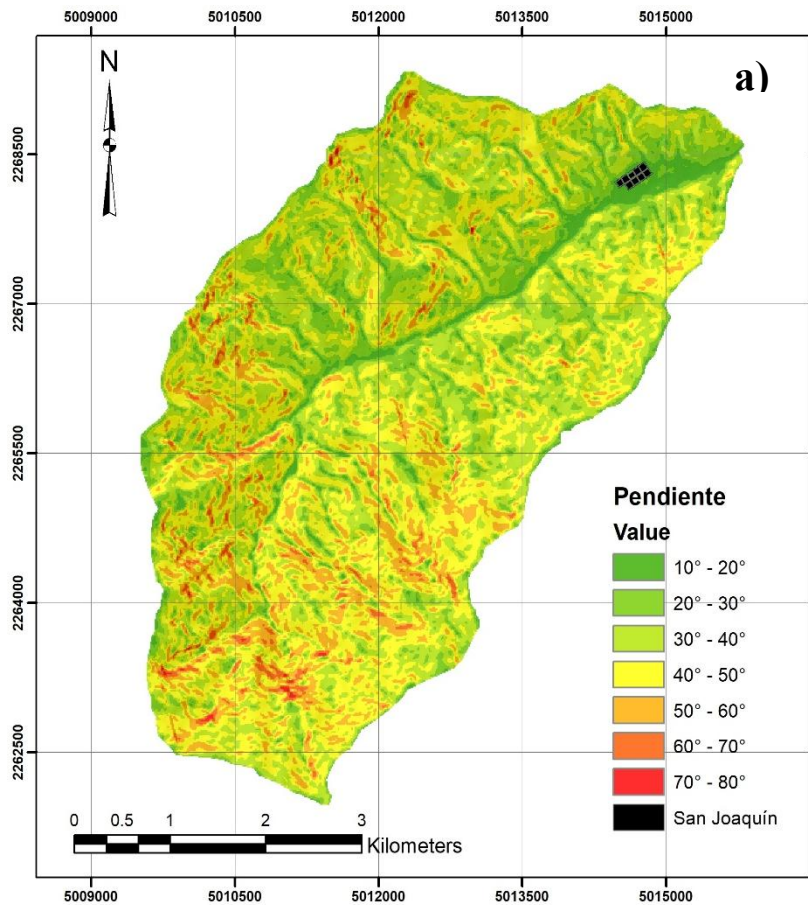
Mapa de estaciones realizadas en campo



# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 3.

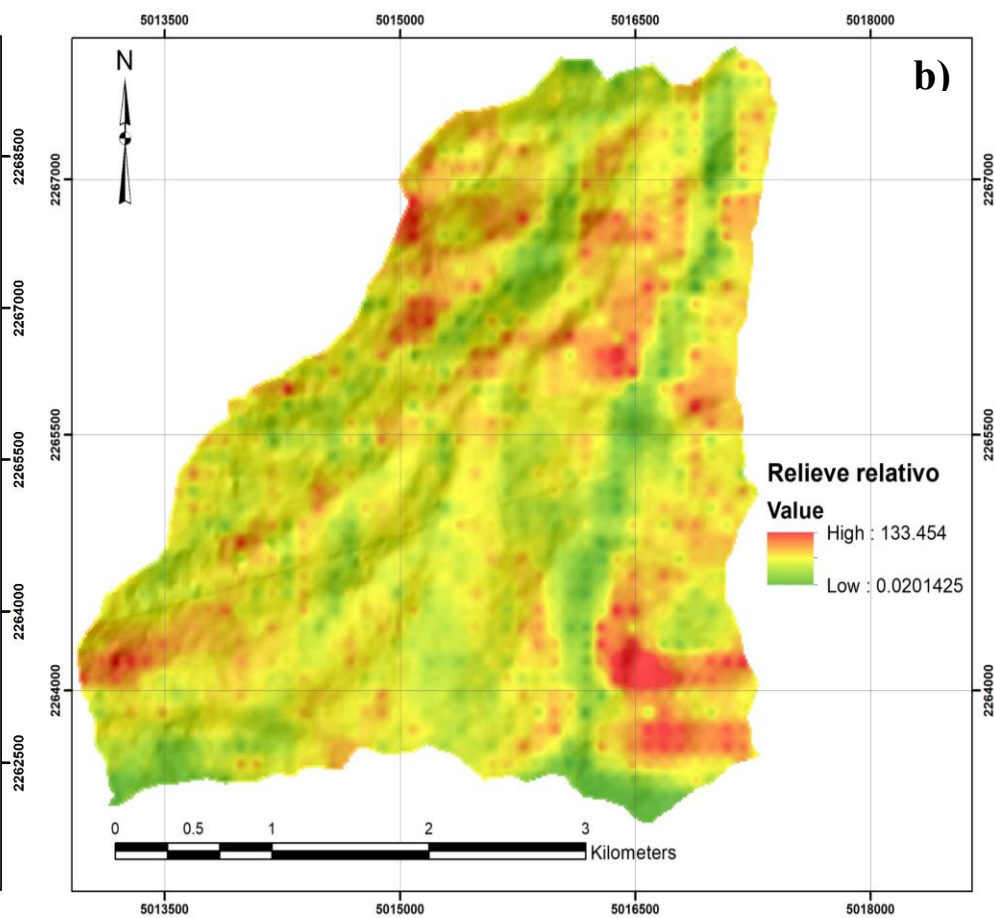
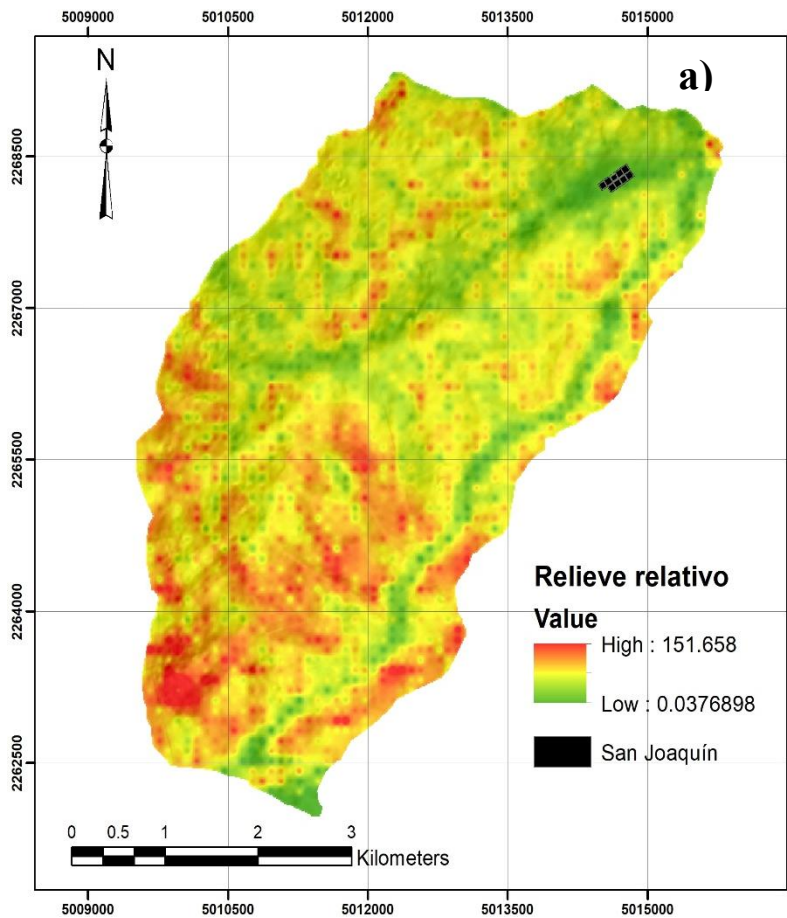
Mapa de Pendientes para las cuencas a) Panamá b) El León



# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 4.

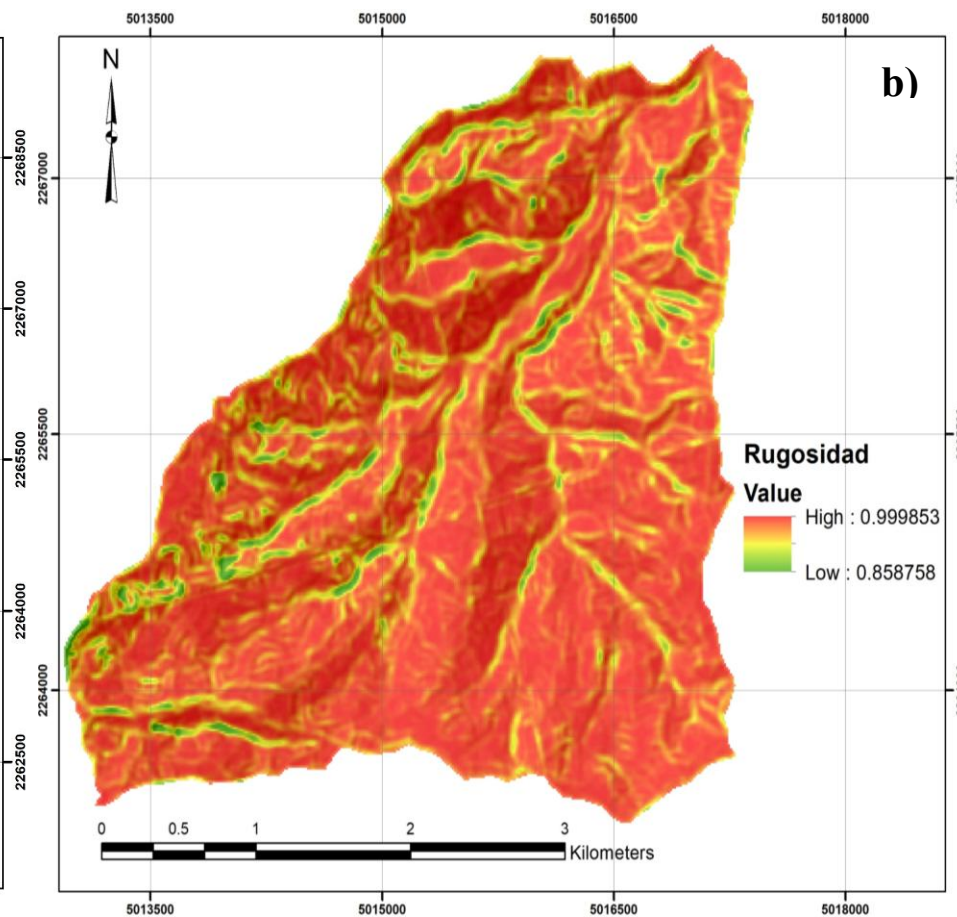
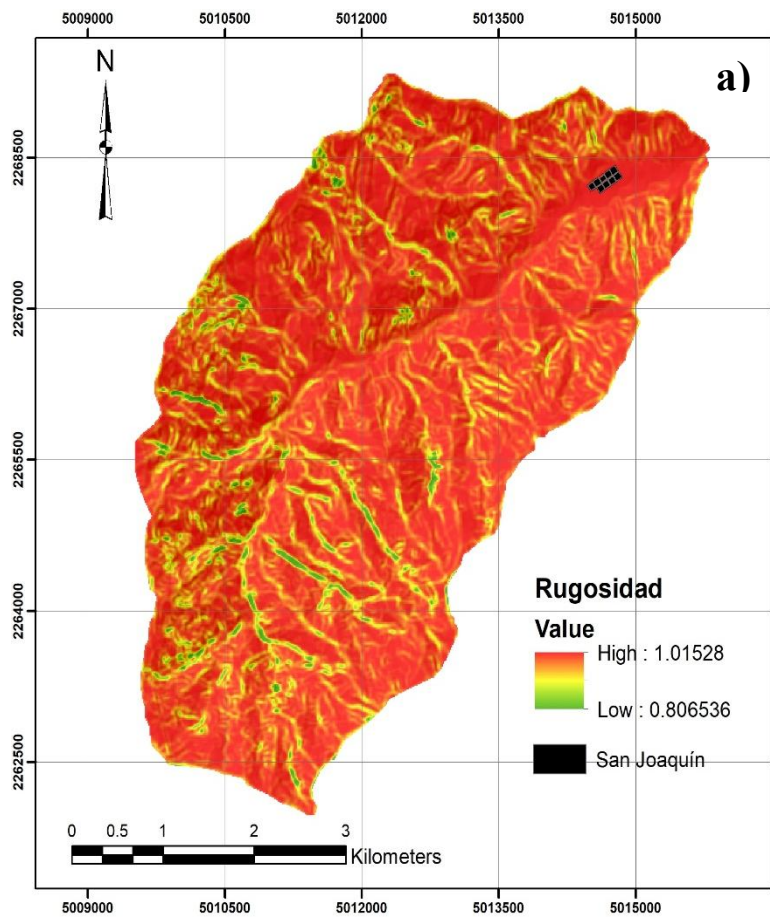
Mapa de relieve relativo para las cuencas a) Panamá b) El León



# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 5.

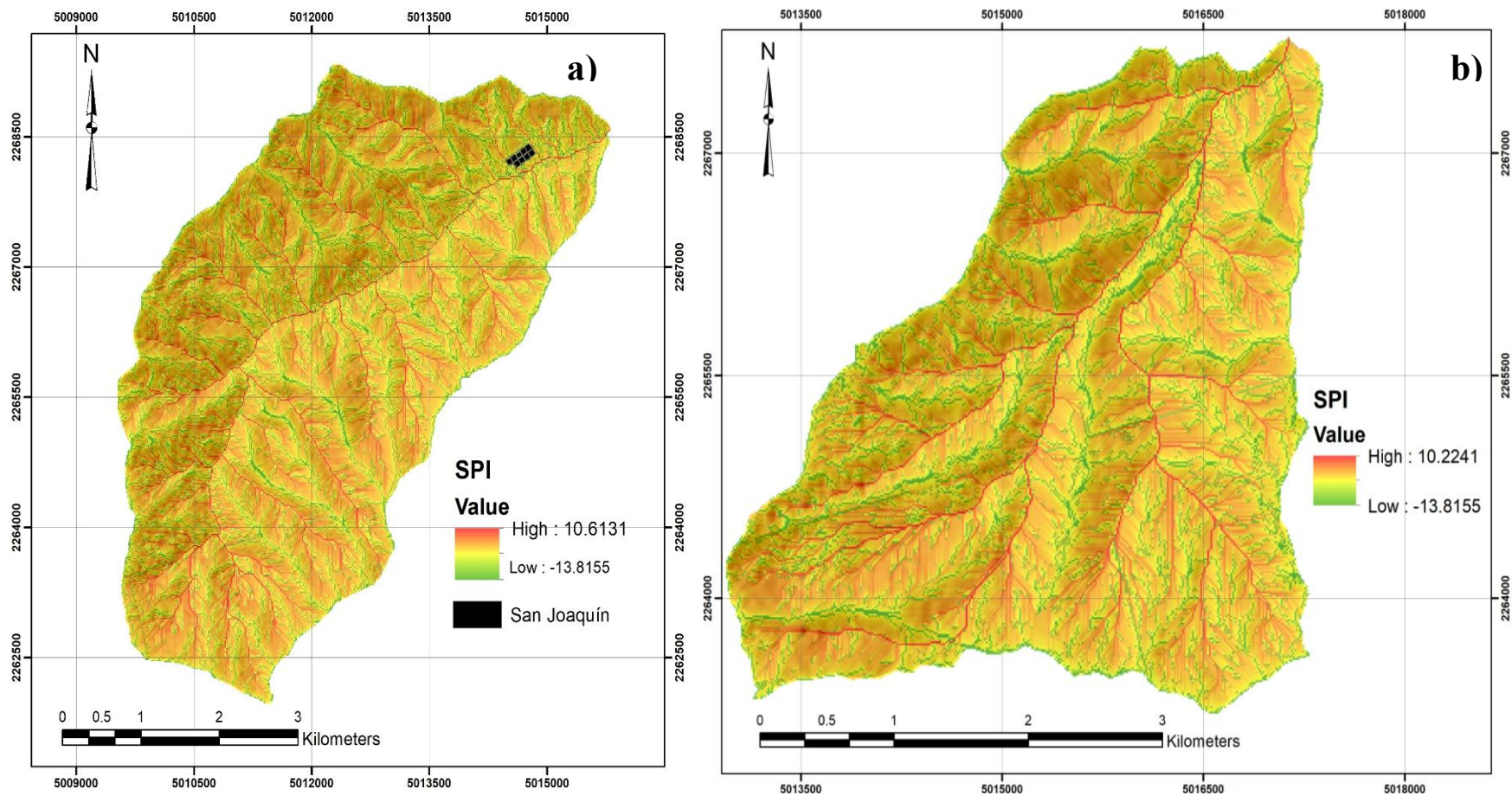
Mapa de rugosidad para las cuencas a) Panamá b) El León



# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 6.

Mapa de Stream Power Index (SPI) para las cuencas a) Panamá b) El León

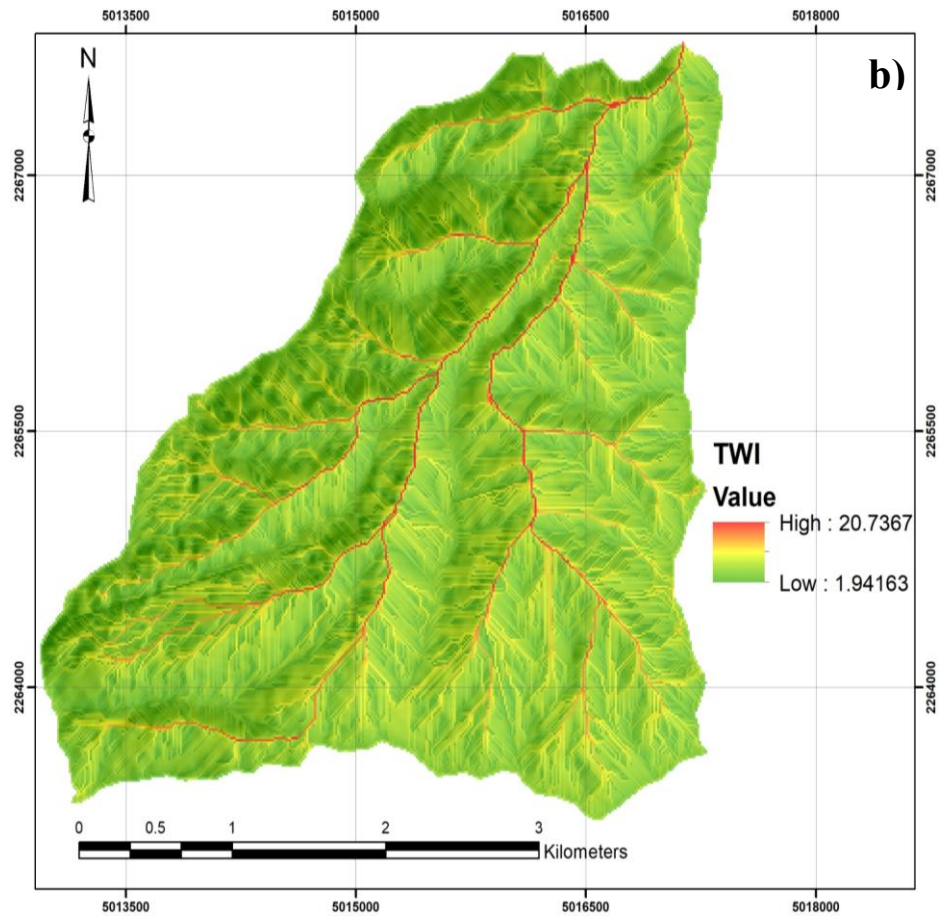
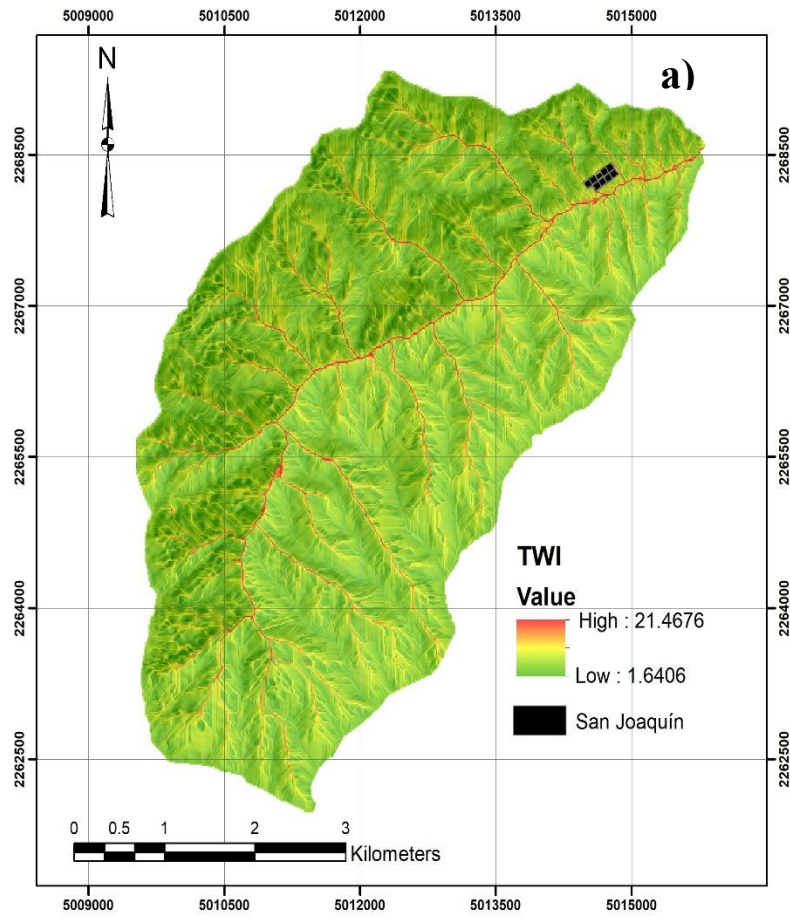


Apéndice 7. Mapa de Topographic Wetness Index (TWI) para las cuencas a) Panamá b) El León

# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 8.

Mapa de Topographic Wetness Index (TWI) para las cuencas a) Panamá b) El León

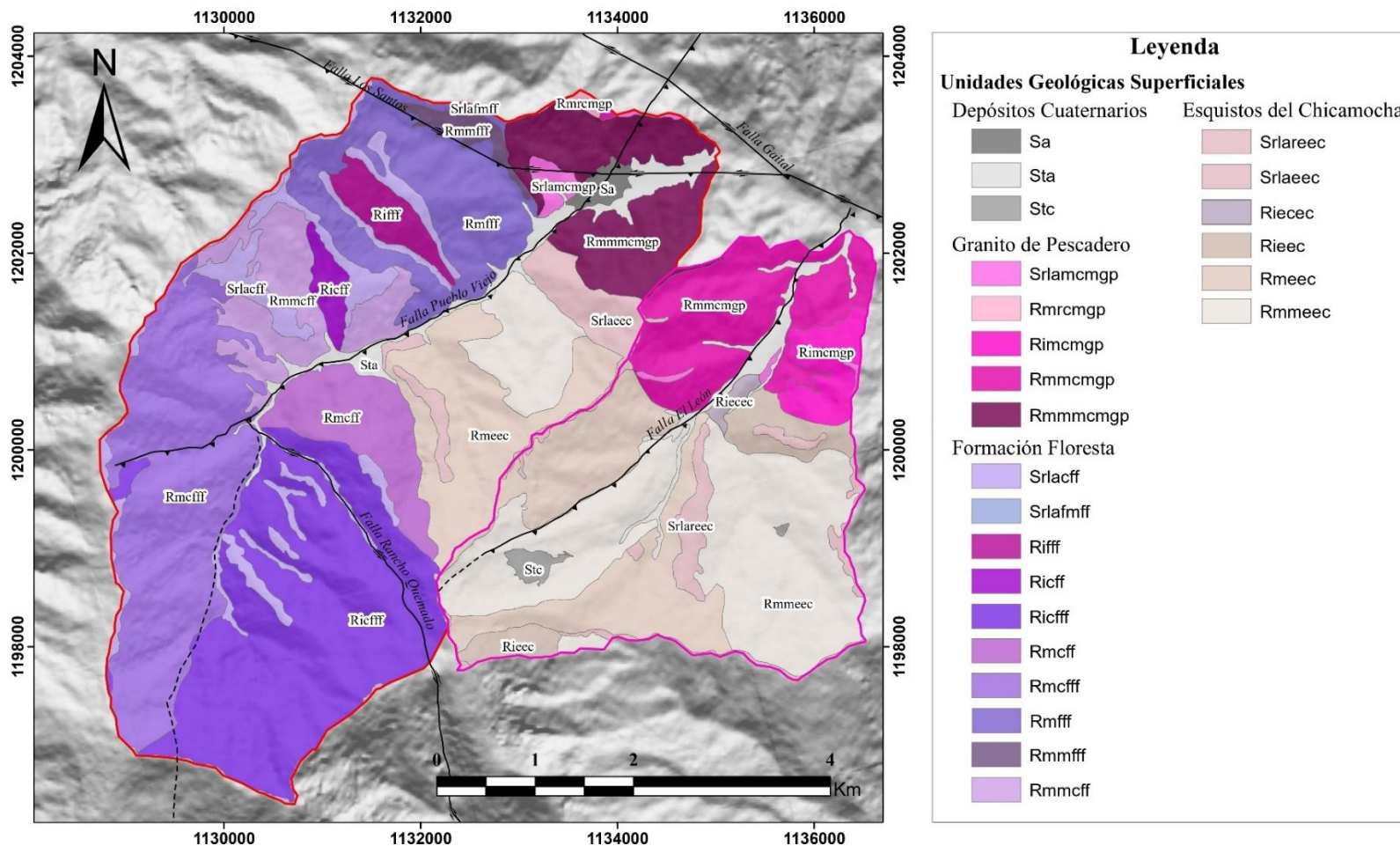


## AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

**Apéndice 9.** *Mapa de unidades geológicas superficiales para la zona de estudio.*

**Apéndice 8.**

Mapa de unidades geológicas superficiales para la zona de estudio.

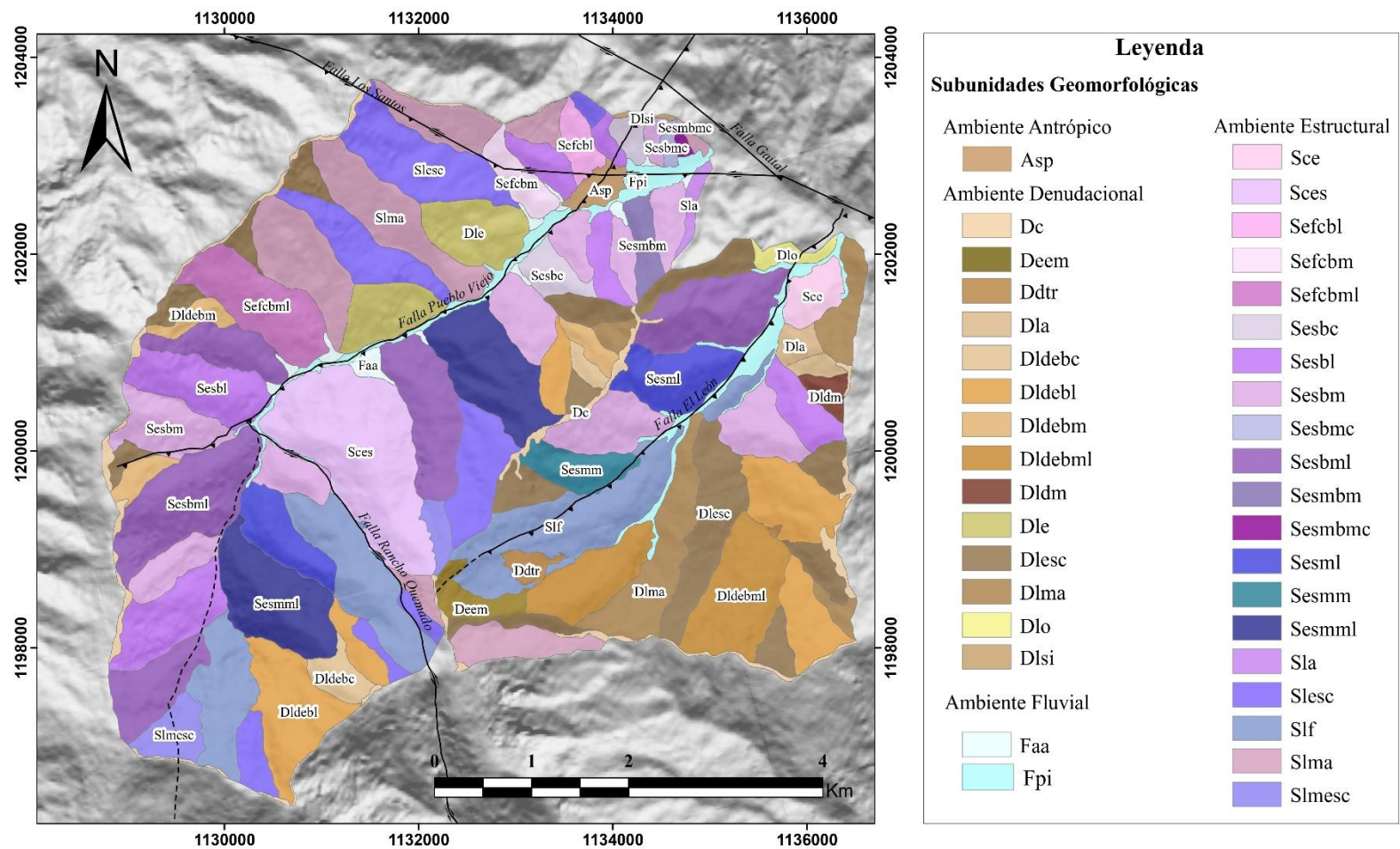


Nota. Elaborado por Hernández & Navas (2025)

# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 10.

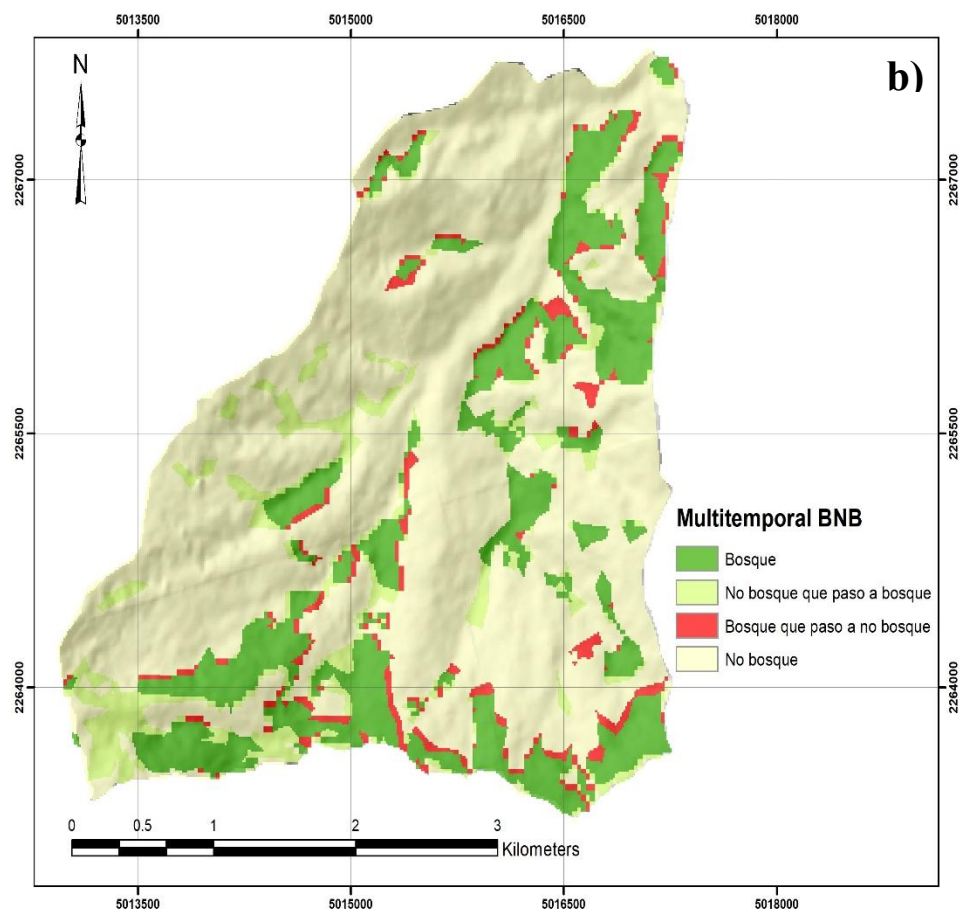
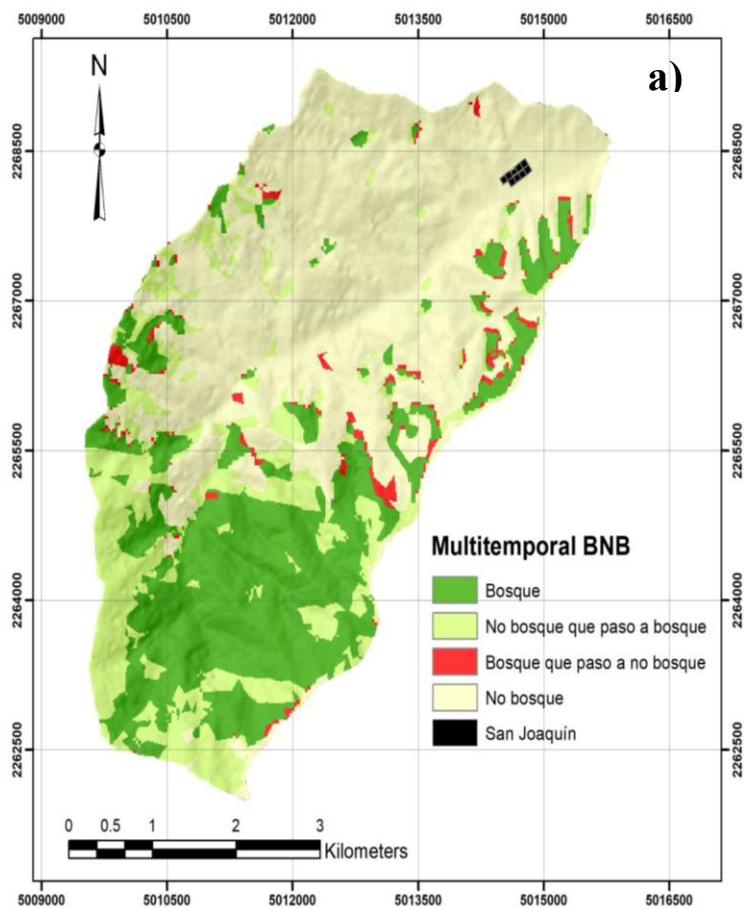
Mapa de subunidades geomorfológicas para la zona de estudio.



Nota. Elaborado por Hernández & Navas (2025)

**Apéndice 11.**

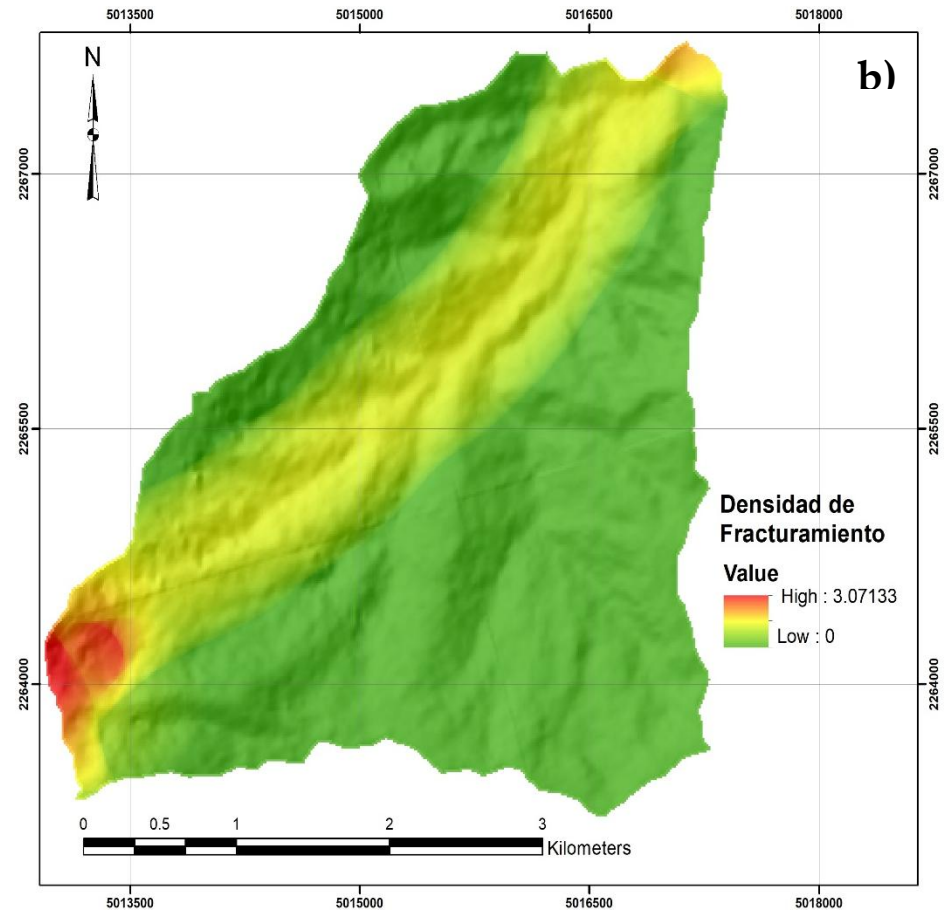
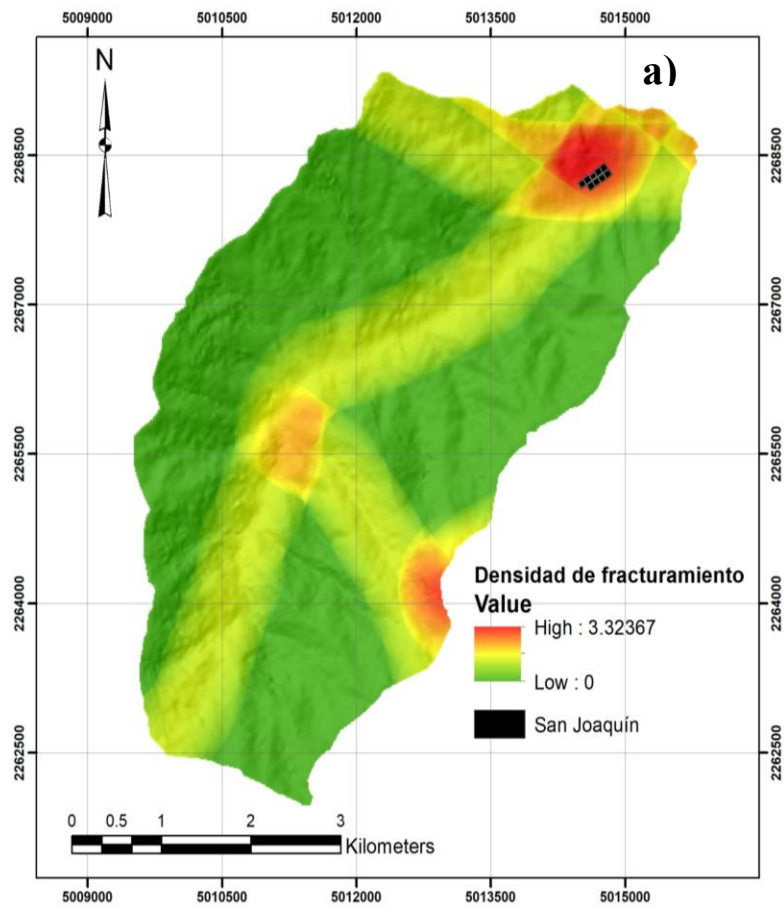
*Mapa multitemporal de cobertura vegetal (bosque no bosque) para las cuencas a) Panamá b) El León*



# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 12.

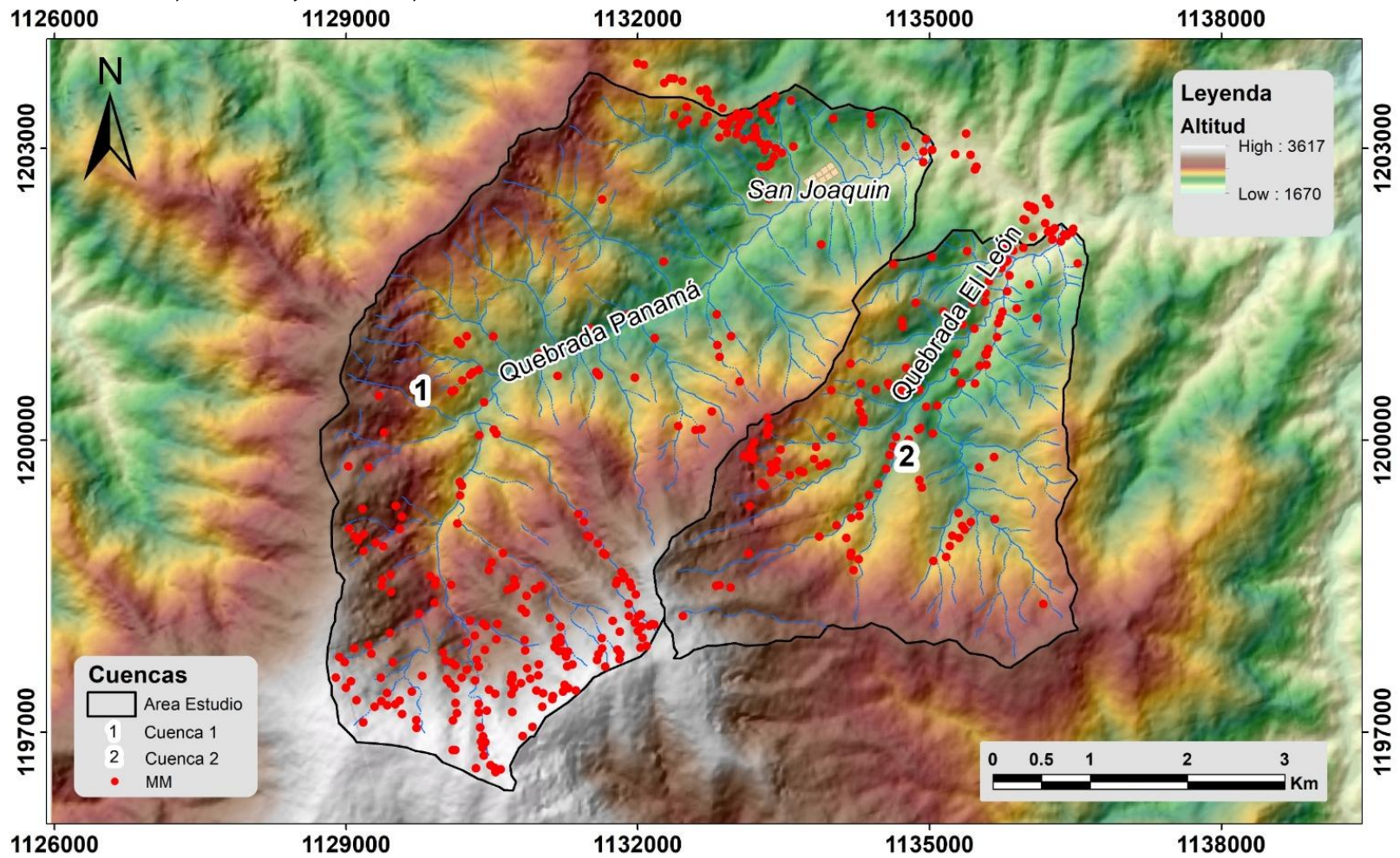
Mapa de densidad de fracturamiento para las cuencas a) Panamá b) El León



# AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

## Apéndice 13.

Mapa de inventario de procesos morfodinámicos para la zona de estudio.



Nota. Elaboración propia de Roa y Patarroyo (2025) junto con Quiroga (2025).

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

**Apéndice 14.**

*Cálculos para hallar el valor de W<sub>final</sub> para cada factor condicionante en la creación del mapa de susceptibilidad a movimiento en masa por medio del análisis estadístico bivariado para la cuenca Panamá*

<b>Pendiente</b>											
<b>clasificación</b>	<b>Nmap</b>	<b>Nslide</b>	<b>Nclass</b>	<b>NSLclass</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W+</b>	<b>W-</b>	<b>W_final</b>
0-10	170960	2063	6888	52	52	2011	6836	162061	-0,473586498	0,015787131	-0,4893736
10-20	170960	2063	25659	216	216	1847	25443	143454	-0,3637897	0,052676102	-0,4164658
20-30	170960	2063	58987	680	680	1383	58307	110590	-0,046256808	0,023553211	-0,06981
30-40	170960	2063	58021	728	728	1335	57293	111604	0,039495145	-0,020897772	0,06039292
40-50	170960	2063	18748	285	285	1778	18463	150434	0,234092999	-0,032907485	0,26700048
50-60	170960	2063	2500	87	87	1976	2413	166484	1,082409881	-0,028696782	1,11110666
60-70	170960	2063	157	15	15	2048	142	168755	2,157350971	-0,006456424	2,1638074
<b>Densidad de Fracturamiento</b>											
<b>clasificación</b>	<b>Nmap</b>	<b>Nslide</b>	<b>Nclass</b>	<b>NSLclass</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W+</b>	<b>W-</b>	<b>W_final</b>
1	170960	2063	85359	795	795	1268	84564	84333	-0,261793981	0,207795436	-0,4695894
2	170960	2063	10006	63	63	2000	9943	158954	-0,656361511	0,029660156	-0,6860217
3	170960	2063	16521	97	97	1966	16424	152473	-0,726660153	0,054141318	-0,7808015
4	170960	2063	39307	487	487	1576	38820	130077	0,026701094	-0,008108764	0,03480986
5	170960	2063	4135	88	88	1975	4047	164850	0,576733497	-0,019339744	0,59607324
6	170960	2063	5269	214	214	1849	5055	163842	1,242970711	-0,079129769	1,32210048
7	170960	2063	5459	262	262	1801	5197	163700	1,417635516	-0,104565591	1,52220111
8	170960	2063	2562	34	34	2029	2528	166369	0,096304597	-0,001537325	0,09784192
9	170960	2063	2342	23	23	2040	2319	166578	-0,208269294	0,002613967	-0,2108833
<b>Rugosidad</b>											
<b>clasificación</b>	<b>Nmap</b>	<b>Nslide</b>	<b>Nclass</b>	<b>NSLclass</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W+</b>	<b>W-</b>	<b>W_final</b>
1	170960	2063	20	1	1	2062	19	168878	1,46	-0,000372348	1,4610612
2	170960	2063	116	1	1	2062	115	168782	-0,339804301	0,000196272	-0,3400006
3	170960	2063	857	13	13	2050	844	168053	0,23192469	-0,001311785	0,23323648

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

4	170960	2063	14573	204	204	1859	14369	154528	0,150419434	-0,015208773	0,16562821
5	170960	2063	155394	1844	1844	219	153550	15347	-0,016961294	0,155524263	-0,1724856
<b>SPI</b>											
<b>clasificación</b>	<b>Nmap</b>	<b>Nslide</b>	<b>Nclass</b>	<b>NSLclass</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W+</b>	<b>W-</b>	<b>W_final</b>
1	170935	2063	1362	3	3	2060	1359	167513	-1,710912328	0,00662482	-1,7175371
2	170935	2063	21206	190	190	1873	21016	147856	-0,301035462	0,036282394	-0,3373179
3	170935	2063	53721	561	561	1502	53160	115712	-0,14636081	0,060673005	-0,2070338
4	170935	2063	91651	1253	1253	810	90398	78474	0,12629833	-0,168508594	0,29480692
5	170935	2063	2995	56	56	2007	2939	165933	0,444506822	-0,009963225	0,45447005
<b>TWI</b>											
<b>clasificación</b>	<b>Nmap</b>	<b>Nslide</b>	<b>Nclass</b>	<b>NSLclass</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W+</b>	<b>W-</b>	<b>W_final</b>
1	170935	2063	122934	1393	1393	670	121541	47331	-0,063812162	0,147336759	-0,2111489
2	170935	2063	43656	603	603	1460	43053	125819	0,1367098	-0,051428133	0,18813793
3	170935	2063	3528	47	47	2016	3481	165391	0,100052511	-0,00221722	0,10226973
4	170935	2063	703	19	19	2044	684	168188	0,821460859	-0,005193932	0,82665479
5	170935	2063	114	1	1	2062	113	168759	-0,322408021	0,000184521	-0,3225925
<b>Relieve Relativo</b>											
<b>clasificación</b>	<b>Nmap</b>	<b>Nslide</b>	<b>Nclass</b>	<b>NSLclass</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W+</b>	<b>W-</b>	<b>W_final</b>
1	170960	2063	2641	25	25	2038	2616	166281	-0,24539806	0,003417634	-0,2488157
2	170960	2063	11107	128	128	1935	10979	157918	-0,046581545	0,003159243	-0,0497408
3	170960	2063	35380	524	524	1539	34856	134041	0,207638944	-0,061885041	0,26952398
4	170960	2063	64006	641	641	1422	63365	105532	-0,188509653	0,098177934	-0,2866876
5	170960	2063	42556	523	523	1540	42033	126864	0,018498989	-0,006205403	0,02470439
6	170960	2063	12825	165	165	1898	12660	156237	0,064870606	-0,005445557	0,07031616
7	170960	2063	2040	41	41	2022	1999	166898	0,51829756	-0,008167899	0,52646546
8	170960	2063	355	15	15	2048	340	168557	1,284232411	-0,005282437	1,28951485
9	170960	2063	50	1	1	2062	49	168848	0,513307529	-0,000194689	0,51350222
<b>BNB</b>											

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
11	170537	2056	47071	681	681	1375	46390	122091	0,184783745	-0,080252301	0,26503605
12	170537	2056	29510	464	464	1592	29046	139435	0,269309129	-0,066546819	0,33585595
21	170537	2056	3284	6	6	2050	3278	165203	-1,897168654	0,016725409	-1,9138941
22	170537	2056	90672	905	905	1151	89767	78714	-0,190977124	0,180870736	-0,3718479

UGS

clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
Rmmcmgp	170960	2063	14333	494	494	1569	13839	155058	1,072417373	-0,188232939	1,26065031
Rmeec	170960	2063	14277	64	64	1999	14213	154684	-0,997901407	0,056390557	-1,054292
Srlareec	170960	2063	1496	1	1	2062	1495	167402	-2,904753658	0,008406108	-2,9131598
Rmcff	170960	2063	8514	23	23	2040	8491	160406	-1,506140014	0,040369534	-1,5465095
Rmmcmgp	170960	2063	124	1	1	2062	123	168774	-0,407056528	0,000243671	-0,4073002
Srlaeec	170960	2063	4262	1	1	2062	4261	164636	-3,952131326	0,025067237	-3,9771986
Rmfff	170960	2063	16802	18	18	2045	16784	152113	-2,432681745	0,095901951	-2,5285837
Rmmfff	170960	2063	1792	73	73	1990	1719	167178	1,246089263	-0,025796647	1,27188591
Srlacff	170960	2063	11331	21	21	2042	11310	157587	-1,883792304	0,059079861	-1,9428722
Rmmeec	170960	2063	6499	34	34	2029	6465	162432	-0,842669939	0,022411436	-0,8650814
Ricfff	170960	2063	38209	797	797	1266	37412	131485	0,556235719	-0,237902625	0,79413834
Rmcfff	170960	2063	30207	314	314	1749	29893	139004	-0,150858805	0,029669314	-0,1805281
Ricff	170960	2063	1829	1	1	2062	1828	167069	-3,105849924	0,010397312	-3,1162472
Riff	170960	2063	3327	28	28	2035	3299	165598	-0,364042333	0,006060482	-0,3701028
Rmmcff	170960	2063	9835	44	44	2019	9791	159106	-0,999901414	0,03815952	-1,0380609
Srlamcmgp	170960	2063	1214	94	94	1969	1120	167777	1,927338646	-0,039982089	1,96732074
Sa	170960	2063	1172	1	1	2062	1171	167726	-2,660485536	0,006472518	-2,6669581
Sta	170960	2063	5231	39	39	2024	5192	163705	-0,486184785	0,012137551	-0,4983223
Rmrcmcp	170960	2063	338	13	13	2050	325	168572	1,186252003	-0,004395338	1,19064734
Srlafmff	170960	2063	168	2	2	2061	166	168731	-0,01371278	1,33987E-05	-0,0137262

Geomorfología

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

<b>clasificación</b>	<b>Nmap</b>	<b>Nslide</b>	<b>Nclass</b>	<b>NSLclass</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W+</b>	<b>W-</b>	<b>W_final</b>
Sesmml	170960	2063	12782	193	193	1870	12589	156308	0,227239321	-0,020762161	0,24800148
Sces	170960	2063	12948	30	30	2033	12918	155979	-1,660051757	0,064918979	-1,7249707
Dc	170960	2063	2587	3	3	2060	2584	166313	-2,353353749	0,013962255	-2,367316
Sefcbml	170960	2063	5726	4	4	2059	5722	163175	-2,860651485	0,032525011	-2,8931765
Dle	170960	2063	6974	47	47	2016	6927	161970	-0,587906669	0,018832045	-0,6067387
Sefcbm	170960	2063	1830	88	88	1975	1742	167155	1,419675485	-0,0332253	1,45290078
Sesbm	170960	2063	14380	49	49	2014	14331	154566	-1,273232176	0,064629432	-1,3378616
Sesbml	170960	2063	19159	166	166	1897	18993	149904	-0,334710153	0,035406429	-0,3701166
Sesbc	170960	2063	2494	26	26	2037	2468	166429	-0,147939019	0,002037173	-0,1499762
Sesbl	170960	2063	12456	333	333	1730	12123	156774	0,810410564	-0,101556042	0,91196661
Slesc	170960	2063	17058	126	126	1937	16932	151965	-0,495550867	0,042617981	-0,5381688
Slma	170960	2063	15691	277	277	1786	15414	153483	0,386113867	-0,048483502	0,43459737
Faa	170960	2063	1524	1	1	2062	1523	167374	-2,923309525	0,008573384	-2,9318829
Dldebl	170960	2063	8180	186	186	1877	7994	160903	0,644427962	-0,045999114	0,69042708
Sesmbmc	170960	2063	242	12	12	2051	230	168667	1,451955168	-0,00447105	1,45642622
Dlma	170960	2063	639	1	1	2062	638	168259	-2,053210456	0,003299754	-2,0565102
Dldebc	170960	2063	2102	94	94	1969	2008	166889	1,343528129	-0,034675294	1,37820342
Dlesc	170960	2063	4907	1	1	2062	4906	163991	-4,093086397	0,028992665	-4,1220791
Fpi	170960	2063	3707	39	39	2024	3668	165229	-0,13871236	0,002871189	-0,1415835
Dldebm	170960	2063	2943	9	9	2054	2934	165963	-1,381769554	0,013152067	-1,3949216
Sesmbm	170960	2063	1548	1	1	2062	1547	167350	-2,938945023	0,008716786	-2,9476618
Slmesc	170960	2063	2988	102	102	1961	2886	166011	1,062473902	-0,033471676	1,09594558
Sesbmc	170960	2063	396	1	1	2062	395	168502	-1,573757937	0,001856594	-1,5756145
Sesml	170960	2063	3153	31	31	2032	3122	165775	-0,207114069	0,00351691	-0,210631
Asp	170960	2063	1172	1	1	2062	1171	167726	-2,660485536	0,006472518	-2,6669581
Slf	170960	2063	11103	192	192	1871	10911	157986	0,365096466	-0,030905547	0,39600201
Sefcbl	170960	2063	1452	33	33	2030	1419	167478	0,643927712	-0,007688379	0,65161609

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

Dlsi	170960	2063	135	1	1	2062	134	168763	-0,492711972	0,000308849	-0,4930208
Sla	170960	2063	684	16	16	2047	668	168229	0,673428376	-0,003823012	0,67725139

**Apéndice 15.**

Valores de  $W_{final}$  para cada factor condicionante en la creación del mapa de susceptibilidad a movimiento en masa por medio del análisis estadístico bivariado para la cuenca El León.

<b>Pendiente</b>											
clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
0-10	84440	2260	3839	84	84	2176	3755	78425	-0,206479615	0,008892725	-0,2153723
10-20	84440	2260	18671	469	469	1791	18202	63978	-0,065136839	0,017781999	-0,0829188
20-30	84440	2260	36213	1232	1232	1028	34981	47199	0,247380958	-0,233210389	0,48059135
30-40	84440	2260	21516	428	428	1832	21088	61092	-0,303789092	0,086574492	-0,3903636
40-50	84440	2260	3815	45	45	2215	3770	78410	-0,834620641	0,026848083	-0,8614687
50-60	84440	2260	381	1	1	2259	380	81800	-2,346624103	0,004192144	-2,3508162
60-70	84440	2260	5	1	1	2259	4	82176	2,207252789	-0,000393901	2,20764669
<b>Densidad de Fracturamiento</b>											
clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
1	84440	2260	49419	552	552	1708	48867	33313	-0,889762405	0,622922534	-1,5126849
2	84440	2260	2436	79	79	2181	2357	79823	0,1978501	-0,006481046	0,20433115
3	84440	2260	3136	125	125	2135	3011	79169	0,411833359	-0,019571011	0,43140437
4	84440	2260	3796	222	222	2038	3574	78606	0,814783836	-0,058931947	0,87371578
5	84440	2260	4760	315	315	1945	4445	77735	0,946584641	-0,094496479	1,04108112
6	84440	2260	6722	488	488	1772	6234	75946	1,046089096	-0,164366559	1,21045565
7	84440	2260	10893	376	376	1884	10517	71663	0,262388019	-0,045030249	0,30741827
8	84440	2260	1892	102	102	2158	1790	80390	0,728549065	-0,024160773	0,75270984
9	84440	2260	1386	1	1	2259	1385	80795	-3,639908268	0,016554305	-3,6564626
<b>Rugosidad</b>											
clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

1	84440	2260	7	1	1	2259	6	82174	1,80	-0,000369563	1,80215724
2	84440	2260	45	1	1	2259	44	82136	-0,190642484	9,29777E-05	-0,1907355
3	84440	2260	232	1	1	2259	231	81949	-1,84887056	0,002372285	-1,8512428
4	84440	2260	3645	83	83	2177	3562	78618	-0,165689706	0,006894252	-0,172584
5	84440	2260	80511	2174	2174	86	78337	3843	0,009095906	-0,206114144	0,21521005

**SPI**

clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
1	84433	2260	707	3	3	2257	704	81469	-1,8647041	0,007275886	-1,87198
2	84433	2260	10629	235	235	2025	10394	71779	-0,195936514	0,025439714	-0,2213762
3	84433	2260	24006	621	621	1639	23385	58788	-0,035057021	0,013610515	-0,0486675
4	84433	2260	47290	1252	1252	1008	46038	36135	-0,011262902	0,014168213	-0,0254311
5	84433	2260	1801	149	149	2111	1652	80521	1,18766632	-0,047894283	1,2355606

**TWI**

clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
1	84433	2260	58926	1396	1396	864	57530	24643	-0,125233579	0,242786573	-0,3680202
2	84433	2260	23133	691	691	1569	22442	59731	0,112912309	-0,045950707	0,15886302
3	84433	2260	1791	146	146	2114	1645	80528	1,171572926	-0,046561095	1,21813402
4	84433	2260	557	26	26	2234	531	81642	0,576796484	-0,005088167	0,58188465
5	84433	2260	26	1	1	2259	25	82148	0,374586143	-0,000138293	0,37472444

**Relieve Relativo**

clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
1	84439	2260	1583	17	17	2243	1566	80613	-0,929531551	0,01168931	-0,9412209
2	84439	2260	5318	76	76	2184	5242	76937	-0,640190062	0,031706134	-0,6718962
3	84439	2260	19585	326	326	1934	19259	62920	-0,4853014	0,111261301	-0,5965627
4	84439	2260	35090	938	938	1322	34152	48027	-0,001291498	0,00091737	-0,0022089
5	84439	2260	17499	865	865	1395	16634	65545	0,637060416	-0,256307533	0,89336795
6	84439	2260	4141	35	35	2225	4106	78073	-1,171321554	0,035647611	-1,2069692
7	84439	2260	903	1	1	2259	902	81277	-3,211079538	0,010594145	-3,2216737

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

8	84439	2260	256	1	1	2259	255	81924	-1,947728563	0,002665231	-1,9503938
9	84439	2260	64	1	1	2259	63	82116	-0,549599745	0,000324337	-0,5499241
<b>BNB</b>											
clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
1	83587	2251	16913	271	271	1980	16642	64694	-0,530351918	0,100642544	-0,6309945
2	83587	2251	6523	153	153	2098	6370	74966	-0,141702666	0,011163994	-0,1528667
3	83587	2251	3026	34	34	2217	2992	78344	-0,890122653	0,022259705	-0,9123824
4	83587	2251	57125	1793	1793	458	55332	26004	0,157752953	-0,451922306	0,60967526
<b>UGS</b>											
clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
Rimcmgp	84438	2260	4127	7	7	2253	4120	78058	-2,78417548	0,048333334	-2,8325088
Srlamcmgp	84438	2260	419	44	44	2216	375	81803	1,450786421	-0,015087336	1,46587376
Rmmmcmgp	84438	2260	181	11	11	2249	170	82008	0,855619649	-0,002808317	0,85842797
Rmeec	84438	2260	18504	181	181	2079	18323	63855	-1,023892536	0,168794934	-1,1926875
Rmmcmgp	84438	2260	15639	412	412	1848	15227	66951	-0,016279284	0,003665778	-0,0199451
Srlaeec	84438	2260	1789	19	19	2241	1770	80408	-0,940773033	0,013331334	-0,9541044
Srlareec	84438	2260	2953	54	54	2206	2899	79279	-0,389614269	0,011730457	-0,4013447
Rmmeec	84438	2260	31280	392	392	1868	30888	51290	-0,773338385	0,280895351	-1,0542337
Stc	84438	2260	908	907	907	1353	1	82177	10,40366526	-0,513028295	10,9166936
Riecec	84438	2260	735	55	55	2205	680	81498	1,0787632	-0,016328158	1,09509136
Rieec	84438	2260	4842	21	21	2239	4821	77357	-1,842691404	0,05112108	-1,8938125
Sta	84438	2260	3061	157	157	2103	2904	79274	0,675924242	-0,036022496	0,71194674
<b>Geomorfología</b>											
clasificación	Nmap	Nslide	Nclass	NSLclass	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W+	W-	W_final
Dc	84439	2260	2086	4	4	2256	2082	80097	-2,661254906	0,023889915	-2,6851448
Dlesc	84439	2260	12755	166	166	2094	12589	69590	-0,735055926	0,089990215	-0,8250461
Sce	84439	2260	1891	80	80	2180	1811	80368	0,473927158	-0,013756229	0,48768339
Sesbml	84439	2260	5674	72	72	2188	5602	76577	-0,760677855	0,038226096	-0,798904

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA (WOE)

Sesml	84439	2260	3998	29	29	2231	3969	78210	-1,325438641	0,036587381	-1,362026
Sesbm	84439	2260	6151	61	61	2199	6090	76089	-1,009994515	0,049633985	-1,0596285
Sesmm	84439	2260	2476	41	41	2219	2435	79744	-0,490594987	0,011770122	-0,5023651
Slf	84439	2260	9575	218	218	2042	9357	72822	-0,165849961	0,019446594	-0,1852966
Slfe	84439	2260	1802	9	9	2251	1793	80386	-1,700885915	0,018069512	-1,7189554
Dldebml	84439	2260	10516	193	193	2067	10323	71856	-0,385904524	0,044969146	-0,4308737
Dldebl	84439	2260	6880	65	65	2195	6815	75364	-1,058959093	0,057387321	-1,1163464
Dlma	84439	2260	8368	132	132	2128	8236	73943	-0,539933164	0,045423027	-0,5853562
Dla	84439	2260	915	9	9	2251	906	81273	-1,018279747	0,007095686	-1,0253754
Dldebc	84439	2260	606	1	1	2259	605	81574	-2,811693476	0,006946635	-2,8186401
Fpi	84439	2260	3061	157	157	2103	2904	79275	0,675936411	-0,036022942	0,71195935
Ddtr	84439	2260	908	906	906	1354	2	82177	9,709427107	-0,512277301	10,2217044
Slma	84439	2260	2747	18	18	2242	2729	79450	-1,427783781	0,025775413	-1,4535592
Dlo	84439	2260	900	85	85	2175	815	81364	1,332998125	-0,028369269	1,36136739
Dldm	84439	2260	924	1	1	2259	923	81256	-3,234094253	0,010852555	-3,2449468
Sesbl	84439	2260	2206	13	13	2247	2193	79986	-1,534541409	0,021279356	-1,5558208