

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

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)

Paula Andrea Beltrán García y Gabriela Pineda Ballesteros

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

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
Geología
Bucaramanga
2025

Dedicatoria

A mis padres Olga y Leonardo por apoyarme y acompañarme en cada momento de esta aventura, por darme fuerza y seguridad en mí misma en cada paso que daba para seguir adelante y cumplir mis metas.

A mi familia, que siempre ha estado presente mostrándome su apoyo y confianza en mí, brindándome sus sabios consejos y dulces palabras siempre que las necesité.

A Dios por ayudarme en cada momento de esta etapa permitiéndome superarme en cada adversidad que enfrenté.

Gabriela

Mami, papi, este logro es tan mío como suyo. Esto es tan solo una muestra de todo el esfuerzo que han realizado a través de los años para volver profesionales a sus cuatro hijos; son el ejemplo más grande de amor y perseverancia que existe. Los amo.

A la Paula del pasado, del presente y del futuro, por tener la valentía de enfrentar desafíos a pesar del miedo y por nunca dejar de soñar en grande. Este es un pequeño recordatorio de qué estás destinada a lograr cosas increíbles.

Paula

Agradecimientos

A mis padres Leonardo y Olga porque sin su apoyo nada de esto habría sido posible, que con su voz de aliento y motivación me dieron valor para afrontar todos los retos en esta etapa.

A mis amigos Isabella, Paula, Juan José y Manuel con quienes compartí muchos momentos en esta aventura que nos sacó lágrimas y risas, dejando así muchas alegrías, momentos inolvidables y anécdotas memorables.

A Lizeth quien estuvo presente en los momentos más difíciles, en los que me sentí desfallecer y ella me daba esa fuerza necesaria para seguir afrontando las adversidades a las que me enfrentaba.

A mi entrenador César que en cada entreno me brindaba un espacio seguro, lleno de dedicación, disciplina y mucho esfuerzo, siempre acompañado de chistes malos, comprensión y consejos.

A mis profesores Leonardo y Joaquín por dedicación y sobre todo paciencia para orientarnos y guiarnos en cada paso de este proyecto, por todas sus enseñanzas y esfuerzo por hacer de nosotras unas excelentes profesionales.

A mi compañera Paula por todo el empeño y dedicación que tuvo durante el desarrollo de este trabajo, por su paciencia infinita conmigo, su comprensión y sensibilidad.

A todas las personas que estuvieron presentes en mi proceso de formación profesional y personal.

Finalmente, a Dios por permitirme cumplir todos mi sueños y metas.

Gabriela

Agradecimientos

A mis padres, Dory Alid y Jorge Enrique, por su apoyo constante y por todos los sacrificios que tuvieron que realizar para que yo llegara hasta aquí. Mami, gracias por llevarme café caliente al cuarto cada vez que te levantabas y veías que yo estaba trabajando, y gracias también por aprender a hacer café frío porque me empezó a gustar más así. Papi, gracias por tus palabras de aliento y por comprarme mis primeras botas de campo. Atesoro cada recuerdo en mi corazón.

A mi hermana Anita, gracias por todas las veces que me escuchaste a pesar de no entender nada en absoluto y por animarme con tus palabras y tus acciones. Eres la mejor amiga que puedo tener y te estaré eternamente agradecida por ello.

A mis mascotas, Bongo y Bacon, por su amor incondicional. A Bongo, por quedarse despierto conmigo en noches de desvelo haciéndome compañía y a Bacon, por enseñarme que no importa qué hora del día sea, siempre se puede buscar espacio y tiempo para dormir.

A mis mejores amigos en el mundo, Juan José, Isabella, Gabriela y Manuel, gracias por llegar en el momento justo y acogerme cuando más lo necesitaba, ustedes son el verdadero significado de la amistad y espero que sigamos creando recuerdos juntos toda la vida. Por todas las risas, los llantos, las noches de pinturillo, las reuniones en el sótano de mecánica, nuestros casilleros, la complicidad, nuestro spot de la amistad; son la familia que escogí.

A mi compañero de vida, Juan Manuel, gracias por siempre confiar en mí y hacerme sentir poderosa y valiente con tus palabras. Tu amor me hace sentir en las nubes, y desde que estás en mi vida todo se siente mucho más fácil, me has quitado preocupaciones y haces de mis batallas las tuyas, te agradezco por estar.

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

A mi también compañera de tesis, Gabriela, eres el mejor complemento que pude pedir, sin tu apoyo, dedicación y perseverancia nada de esto hubiera sido posible. Te doy gracias por presionar y sobre todo por tu paciencia y comprensión ante las adversidades, juntas somos poderosas.

A mis jefes y amigos, Luigi y Mayra, gracias por sus palabras de apoyo y su flexibilidad para que yo pudiera culminar esta etapa, por ver mis mapas aun sin entender nada y por darme la oportunidad de utilizar el espacio para avanzar en mi tesis, a pesar de que debería haber estado atendiendo otras obligaciones. Siempre agradecida con ustedes.

A mi director Leonardo y a mi codirector Joaquín, gracias por su dedicación y su apoyo constante, por sus palabras y por acoplarse a nuestros horarios para alguna reunión, por todos esos cafés compartidos y por toda la paciencia requerida para trabajar con mi computador. Son unos mentores increíbles y han sido fuente de inspiración, son los mejores guías.

A la escuela de geología por todo el desarrollo tanto profesional como personal a lo largo de los años. Por brindar un espacio de curiosidad, investigación y enseñanza, por sus docentes, sus estudiantes y su personal administrativo, infinitas gracias.

A la Universidad Industrial de Santander, por sentirse siempre como un segundo hogar y por acoger a aquella niña de 16 años y convertirla en algo grande: hoy, con orgullo, egresada UIS.

Agradezco al universo, al tiempo, a mi computador, a todo lo que he vivido y a todo lo que me ha traído hacia a este momento; a la geología por permitirme conocer personas extraordinarias y por darle un rumbo a mi vida. A los paisajes, las montañas, los ríos y las quebradas. A la vida.

Paula

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Justificación	14
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. Localización	17
4. Marco teórico	19
4.1. Marco conceptual.....	19
4.1.1. Movimientos en masa.....	19
4.1.2. Factores condicionantes.....	19
4.1.3. Factores detonantes	19
4.1.4. Susceptibilidad a movimientos en masa	19
4.1.5. Método estadístico bivariado de peso de evidencia (WofE).....	20
4.2. Antecedentes	20
4.3. Marco geológico regional.....	21
4.3.1. Estratigrafía	21
4.3.2. Geomorfología.....	25
4.3.3. Geología estructural	27
5. Metodología	33
5.1. Fase 1: Recopilación bibliográfica y fotointerpretación preliminar.....	34
5.2. Fase 2: Campo.....	34
5.3. Fase 3: Procesamiento de datos	35
5.4. Fase 4: Análisis de resultados	35
5.5. Fase 5: Elaboración y entrega del documento final.....	36
6. Resultados.....	36
6.1. Caracterización Geo-ambiental.....	36
6.1.1. Inventario de procesos morfodinámicos	37

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

6.1.2. Factores condicionantes.....	40
6.2. Análisis de susceptibilidad por Movimientos en Masa.....	51
6.2.1. Susceptibilidad por Movimientos en Masa tipo deslizamiento y tipo flujo.....	52
7. Conclusiones	65
8. Recomendaciones	68
Referencias bibliográficas.....	70

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de localización de la zona de estudio Escala 1:25.000.....	18
Figura 2 Mapa geológico de la zona de estudio escala 1:25.000	22
Figura 3 Mapa geomorfológico de la zona de estudio escala 1:100.000	26
Figura 4 Panorámica en campo de la Falla Mogotes. A) Falla Mogotes. B) Gancho de Falla relacionado a la Falla Mogotes.....	28
Figura 5 Mapa estructural de la zona de estudio escala 1:25.000	32
Figura 6 Esquema explicativo de la metodología empleada en el proyecto	33
Figura 7 Diagrama ilustrativo del porcentaje de la distribución de movimientos en masa en la zona de estudio.....	39
Figura 8 Mapa movimientos en masa en la zona de estudio.....	39
Figura 9 Diagrama ilustrativo del porcentaje de subunidades geomorfológicas por tipo de ambiente en la zona de estudio.....	41
Figura 10 Mapa Subunidades Geomorfológicas.....	43
Figura 11 Diagrama ilustrativo del porcentaje de las Unidades Geológicas Superficiales en la zona de estudio.....	47
Figura 12 Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS).....	49
Figura 13 Mapa de rangos LSI.....	55
Figura 14 Curva de validación y curva de éxito	56
Figura 15 Diagrama ilustrativo del porcentaje de la categorización de la susceptibilidad en la zona de estudio.....	57
Figura 16 Mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo en el área de estudio.....	59

Lista de tablas

Tabla 1 Coordenadas de la zona de estudio.....	18
Tabla 2 Listado de movimientos en masa en la zona de estudio recopilado por medio de fuentes bibliográficas	38
Tabla 3 Lista de tipos de movimientos en masa y su estado.....	39
Tabla 4 Listado Subunidades Geomorfológicas cartografiadas en campo.....	41
Tabla 5 Clasificación de rangos de pendientes	44
Tabla 6 Pendientes para la zona de estudio	44
Tabla 7 Rangos de curvatura para la zona de estudio.....	45
Tabla 8 Valores de rugosidad para la zona de estudio	45
Tabla 9 Rangos de distancia a fallas para la zona de estudio.....	46
Tabla 10 Listado Unidades Geológicas Superficiales cartografiadas en campo	47
Tabla 11 Coberturas de la tierra año 2020 en la zona de estudio	50
Tabla 12 Vocación de Uso de Suelo 2017 para la zona de estudio	51
Tabla 13 Categorización de la susceptibilidad en la zona de estudio	58

Lista de apéndices

Apéndice A. Inventario de movimientos en masa

Apéndice B. Tabla de movimientos en masa

Apéndice C. Subunidades Geomorfológicas

Apéndice D. Inventario Morfometría

Apéndice E. Unidades Geológicas superficiales

Apéndice F. Cobertura de la tierra y uso de suelo

Apéndice G. Cálculo método bivariado

Apéndice H. Curva de éxito y validación

Resumen

Título: 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). *

Autor: Paula Andrea Beltrán García y Gabriela Pineda Ballesteros. **

Palabras Claves: Susceptibilidad, Movimientos en masa, Método estadístico bivariado, Santander, Colombia.

Descripción:

En este trabajo de investigación presenta un análisis detallado de la susceptibilidad por movimientos en masa de tipo deslizamiento y flujo en un área de estudio de 105 km², ubicada entre los municipios de San Joaquín y Mogotes, Santander. Estos municipios se han visto afectados a lo largo de los años durante temporadas de lluvia, generando afectaciones en la comunidad como daños en vivienda, vías y cultivos, ocasionados por movimientos en masa. Es debido a esto que se propone realizar una cartografía y análisis de la susceptibilidad de estos procesos. La metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de este proyecto de investigación se basó en la propuesta por la Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), donde se utiliza el método estadístico bivariado de pesos de evidencia para el análisis de estos fenómenos. A partir de la caracterización geoambiental se determinaron los factores condicionantes como Subunidades Geomorfológicas (GMF), Unidades Geológicas Superficiales (UGS), cobertura y uso de suelo, cambio de cobertura, pendiente, curvatura, rugosidad y distancia a fallas; junto con un inventario de procesos morfodinámicos con el que, se identificaron un total de 70 movimientos en masa de los cuales 50 son tipo deslizamiento, 9 tipo flujo y 11 deslizamiento y flujo. Los resultados obtenidos clasifican la zona de estudio en 5 categorías de susceptibilidad: muy alta (12,77%), alta (25,76%), media (28,01%), baja (23,84%) y muy baja (9,61%). La eficiencia del análisis estadístico obtenido tras aplicar pruebas de validación da resultados satisfactorios, para el trabajo de investigación con valores de 93,825% y 97,417% para las curvas de éxito y validación respectivamente.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Leonardo Palmera Sánchez, Geólogo, MsC Geociencias. Codirector: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, Geólogo, MsC Geología Ambiental.

Abstract

Title: Susceptibility analysis for landslides between the municipalities of Mogotes and San Joaquín, Santander, scale 1:25,000, applying the methodological guide of the Colombian Geological Service (2017). *

Author: Paula Andrea Beltrán García and Gabriela Pineda Ballesteros. **

Keywords: Susceptibility, Landslides, Bivariate statistical method, Santander, Colombia.

Description:

This research work presents a detailed analysis of susceptibility to mass movements of the landslide and flow type in a study area of 105 km², located between the municipalities of San Joaquín and Mogotes, Santander. These municipalities have been affected over the years during rainy seasons, which have caused damage due to mass movements, impacting homes, roads, and crops, as well as affecting the community. For this reason, it is proposed to carry out a mapping and analysis of susceptibility of these. The methodology used for the development of this research project was based on the proposal of the Methodological Guide for Zoning of Mass Movement Hazards at a scale of 1:25,000 by the Colombian Geological Service (SGC, 2017), where the bivariate statistical method of weights of evidence is used for the analysis of these phenomena. From the geo-environmental characterization, the conditioning factors were determined, such as Geomorphological Subunits (GMF), Surface Geological Units (UGS), land cover and land use, land cover change, slope, curvature, roughness, and faults distance; along with an inventory of morphodynamic processes, which identified a total of 70 mass movements, of which 50 are landslides, 9 are flows, and 11 are a combination of landslides and flows. The results obtained classify the study area into 5 susceptibility categories: very high (12.77%), high (25.76%), medium (28.01%), low (23.84%), and very low (9.61%). The efficiency of the statistical analysis, obtained after applying validation tests, yields satisfactory results for the research work, with values of 93.825% and 97.417% for the success and validation curves, respectively.

* Degree Work

**Faculty of Physical Chemistry. School of Geology Academic program. Director: Leonardo Palmera Sánchez, Geologist, MSc Geosciences. Co-director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, Geologist, MSc Environmental Geology.

Introducción

La susceptibilidad de acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) se refiere a la tendencia o propensión de una zona a verse afectada por algún proceso determinado, en este caso, se enfoca en los movimientos en masa. Estos movimientos se definen como todos aquellos desplazamientos de ladera de una masa de roca, detritos o tierras por efecto de la gravedad que tienen la capacidad de causar afectaciones en la infraestructura y en la población (PMA, 2007).

Para los municipios de Mogotes y San Joaquín, Santander son evidencia de las afectaciones que pueden provocar los movimientos en masa, por ejemplo, daños en viviendas, bloqueos en vías, deterioro de infraestructura y pérdida de cultivos (UNGRD, 2022). Actualmente se cuenta con diversas fuentes de información que llevan un seguimiento a estos eventos como, el Mapa de la Evaluación de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000 (Dirección de Gestión del Riesgo Santander, 2021); datos del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA); informes de la secretaria del Gestión del Riesgo del municipio de Mogotes y los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de ambos municipios. Sin embargo, algo común en estas fuentes es la falta de detalle al delimitar las zonas afectadas por movimientos en masa.

Debido a esto, siguiendo la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.0000 (SGC, 2017) se busca realizar cartografía y análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona que comunica los municipios de Mogotes y San Joaquín a escala 1:25.000 para determinar las áreas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa en la zona de estudio.

1. Justificación

Los movimientos en masa modelan el relieve de una superficie debido a la acción directa o indirecta de diversos procesos de origen geológico, hidrometeorológico y/o químico, entre la corteza terrestre, hidrosfera y atmosfera. Por lo tanto, la interacción de estos provoca la formación de montañas que, con el tiempo, se meteorizan por factores endógenos y exógenos como lluvias, sismos y acciones antropogénicas, generando inestabilidad en la morfología del terreno (PMA, 2007).

El registro de estos eventos ha sido de interés mundial, tanto así, que a lo largo de los años se han firmado diversos tratados para la cooperación internacional y la elaboración de estrategias para la reducción de desastres como, por ejemplo, el tratado Marco de Acción Hygo (MAH) en 2005 y el tratado Marco de Sendai en 2015 (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015). Estas iniciativas se encuentran orientadas a fortalecer la capacidad de respuesta frente a desastres naturales a nivel mundial y reducir los impactos que pueden generar. Colombia en los últimos 100 años ha registrado más de 11.800 eventos asociados a movimiento en masa, lo que ha resultado en alrededor de 7.590 víctimas mortales y cerca de 239.740 familias afectadas (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2020). A causa de esto, el Gobierno Nacional ha tomado medidas con respecto a la planificación de gestión del riesgo; dichas medidas se ven reflejadas en la ley 338 de 1997 en la que se establece y define las normas sobre planes de desarrollo municipal como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) y la Ley 1523 de 2012 que se encarga de la gestión del riesgo de desastres. En el caso de la Gobernación de Santander, esta cuenta con un protocolo de atención a emergencias para la comunidad; dicho protocolo se basa en un mapa de la

evaluación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 (Dirección de Gestión del Riesgo Santander, 2021).

Los municipios de Mogotes y San Joaquín en el departamento de Santander han enfrentado diversos impactos durante la temporada de lluvias a lo largo de los años. Por ejemplo, en 2022, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) clasificó a San Joaquín como uno de los municipios afectados por movimientos en masa, causando daños en vías terciarias y ocasionando pérdida de cultivos (UNGRD, 2022). Además, en 2023 se ha registrado un episodio de avenida torrencial, que afectó parte del casco urbano del municipio y las veredas San Ignacio, Santa Bárbara, Santa Clara y San Isidro (Gobernación de Santander, 2023). De igual manera, el municipio de Mogotes, la Secretaría de Planeación y Obras Públicas como la Oficina de Gestión del Riesgo, tienen un registro de alrededor de 18 informes técnicos (Secretaría de Planeación y Obras Públicas del municipio de Mogotes, 2020; 2023) en los que se evaluaron diferentes afectaciones a la comunidad, como daños a viviendas, vías y cultivos, causados principalmente por eventos de movimientos en masa asociados a épocas de lluvias.

Por otra parte, el SIMMA reporta movimientos en masa a lo largo de estos municipios, concentrándose estos principalmente sobre la vía que comunica Mogotes – Alto de los Cacaos – San Joaquín; de los movimientos en masa reportados, 5 son eventos de inventario, clasificados conforme a la Guía para la Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa (PMA, 2007) en deslizamientos y flujos, de igual manera, se tiene un registro de 16 eventos de formato catálogo donde, la mayoría son tipo deslizamiento (11), caída (4) y tipo flujo (1).

Es por esto que este proyecto de investigación tiene como objetivo implementar la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) para realizar una caracterización a una escala de trabajo 1:25.000, en las zonas susceptibles a movimientos en masa entre los

municipios de Mogotes y San Joaquín, esto a partir de la identificación de los eventos morfodinámicos y la caracterización geoambiental de los elementos inherentes como la geología, la geomorfología, la cobertura y el uso del suelo. Actualmente el área de estudio solo cuenta con un Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa escala 1:100.000 realizado por el Servicio Geológico Colombiano (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2014), por tal motivo, este trabajo de investigación busca ampliar y mejorar el detalle de la información disponible acerca de la susceptibilidad por movimientos en masa en estos dos municipios.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Realizar la cartografía y análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa aplicando el método bivariado entre los municipios de Mogotes y San Joaquín, Santander a partir de la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (2017).

2.2. Objetivos específicos

Generar y analizar el mapa de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y Subunidades geomorfológicas (SGMF).

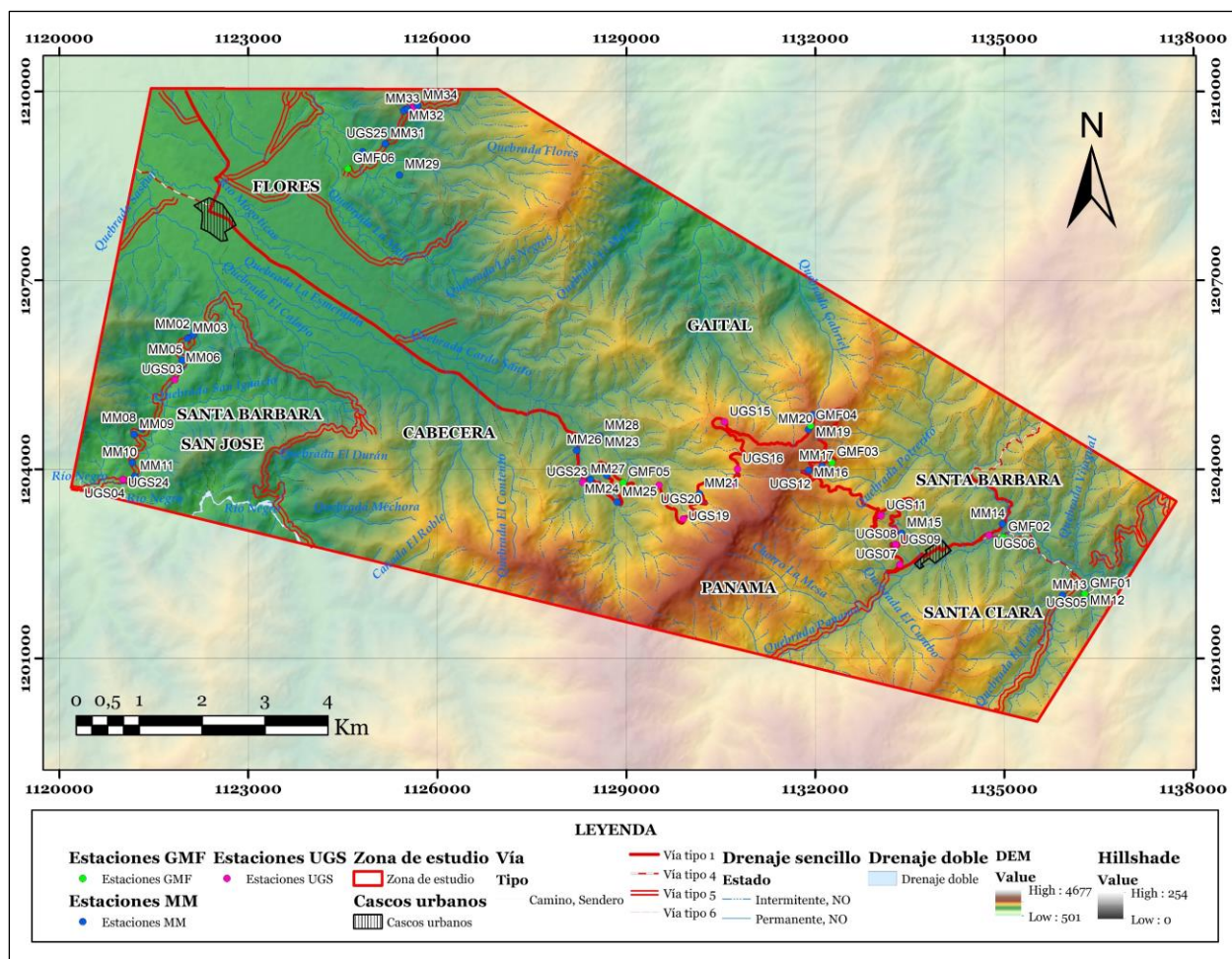
Analizar la cobertura de la tierra y uso del suelo.

Realizar un inventario de procesos morfodinámicos presentes en la zona de estudio.

Crear un mapa de susceptibilidad escala 1:25.000 por movimientos en masa mediante el método bivariado utilizando la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano (2017).

3. Localización

La zona de estudio cuenta con un área de 105 Km² como se muestra en la Figura 1 y se encuentra delimitada como se muestra en la Tabla 1, entre los municipios de San Joaquín y Mogotes, en la zona sur del departamento de Santander; el sistema de referencia corresponde a MAGNA Colombia Bogotá. La zona de estudio se encuentra incorporada en las veredas Santa Clara, Santa Barbara, San Ignacio, Panamá, Gaital, Cabecera, San José, Flores, Santa Barbara, Guaure, Guayaguata, San Emigdio y La Palma. Comprende una altura promedio de 1700 m – 1900 m sobre el nivel del mar, y la temperatura media de la región es de 18° aproximadamente con un clima húmedo y nublado. La mayor parte de su relieve consiste en un abanico aluvial (donde se localiza la cabecera municipal de Mogotes) y un sistema montañoso y escarpado, con pendientes que van hasta los 83°, esto debido a que hace parte de la Cordillera Oriental de los Andes, por lo cual posee elevaciones como el Alto de los Cacaos, Cerros Morro Pardo y la Cuchilla de San José, entre otros.

Figura 1*Mapa de localización de la zona de estudio Escala 1:25.000***Tabla 1***Coordenadas de la zona de estudio*

(1)	N: 718303,80 E: 723437,20	(2)	N: 711963,40 E: 722181,00	(3)	N: 708276,70 E: 737525,00	(4)	N: 711777,70 E: 739734,90	(5)	N: 718299,90 E: 728949,60
-----	------------------------------	-----	------------------------------	-----	------------------------------	-----	------------------------------	-----	------------------------------

4. Marco teórico

4.1. Marco conceptual

4.1.1. *Movimientos en masa*

Son definidos como movimientos en masa a aquellos desplazamientos de una masa de roca, detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Estos procesos pueden variar en velocidad y magnitud, desde movimientos lentos y difusos hasta deslizamientos rápidos y bien definidos, limitados por superficies de ruptura (PMA, 2007).

4.1.2. *Factores condicionantes*

Son un conjunto de datos espaciales donde según las hipótesis planteadas, tienen una influencia o un efecto en la ocurrencia de movimientos en masa y son empleados tanto para explicar los procesos existentes como en los procesos que puedan ocurrir en el área (SGC, 2017).

4.1.3. *Factores detonantes*

Hacen referencia a estímulos externos que afectan el terreno modificando sus condiciones de estabilidad, por ejemplo, lluvias intensas, sismos, erosión de causes o erupciones volcánicas (SGC, 2017).

4.1.4. *Susceptibilidad a movimientos en masa*

Es la medición cuantitativa o cualitativa de la dimensión y distribución geográfica de movimientos en masa que han sucedido o podrían ocurrir en un área determinada. Se basa en el análisis de factores condicionantes o intrínsecos en los que se puede incluir una descripción de la velocidad e intensidad de estos movimientos (SGC, 2017).

4.1.5. Método estadístico bivariado de peso de evidencia (WofE)

Este método asigna valores numéricos (pesos) entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables. Estos pesos se calculan usando un enfoque estadístico (bayesiano) que considera la probabilidad de que ocurran movimientos en masa. La probabilidad final se obtiene sumando los pesos de todos los factores (SGC, 2017).

4.2. Antecedentes

En el año 2023 se registró un episodio de una avenida torrencial, que afectó parte del casco urbano del municipio de San Joaquín y las veredas de San Ignacio, Santa Bárbara, Santa Clara y San Isidro (Gobernación de Santander, 2023). Para el municipio de Mogotes, la Secretaría de Planeación y Obras Públicas y, la Oficina de Gestión del Riesgo, presenta un registro de 18 informes técnicos en los que se informan daños a viviendas, vías y cultivos, causados por eventos de movimientos en masa asociado principalmente a épocas de lluvias (Secretaría de Planeación y Obras Públicas del municipio de Mogotes, 2020; 2023). Además de esto, el SIMMA presenta datos de eventos de movimientos en masa en a lo largo de los municipios de Mogotes y San Joaquín, especialmente en la vía que comunica Mogotes – Alto de los Cacaos – San Joaquín, de estos datos registrados están clasificados de la siguiente manera: 5 eventos de inventario clasificados en tipo deslizamiento y flujo (PMA, 2007); 16 eventos de catálogo donde, 11 corresponden a tipo deslizamiento, 4 tipo caída y 1 tipo flujo. Por otra parte, en el año 2019 se realizó una revisión, actualización y ajuste del componente general y los contenidos del corto, mediano y largo plazo del esquema de ordenamiento territorial E.O.T del municipio de Mogotes, Santander. De la misma manera, en el 2022 se hizo una revisión general, actualización, ajuste y socialización del esquema de ordenamiento territorial (EOT) del municipio de San Joaquín, Santander; en el que se hace un

estudio básico de amenazas de acuerdo con lo establecido en el decreto único reglamentario 1077 de 2015.

Asimismo, se han realizado una variedad de estudios relacionados al tema como, por ejemplo, el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2014), realizó la memoria explicativa de la Zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de la Plancha 136 - Málaga. El resultado fue la zonificación de amenaza, que define cuatro categorías: baja, media, alta y muy alta. También, Rey Ardila (2020), llevó a cabo una caracterización de estructuras hidráulicas y de movimientos en masa en el municipio de Onzaga como parte de un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa para la construcción de una central hidroeléctrica, por medio del *software ArcGIS*. Además, Diaz Villamizar (2022), ejecutó un análisis en los cambios de la susceptibilidad que presentaban los movimientos en masa a través de la relación entre los factores condicionantes y los mecanismos detonantes en el municipio de Mogotes a una escala 1:100.000 para el año 2021, mediante el uso de sensores remotos.

4.3. Marco geológico regional

Este apartado describe de forma detallada las características litológicas, estratigráficas y tectónicas que se encuentran presentes en la zona de estudio.

4.3.1. Estratigrafía

La zona de estudio se caracteriza por una diversidad de unidades geológicas que abarcan desde el Ordovícico hasta el Cuaternario (

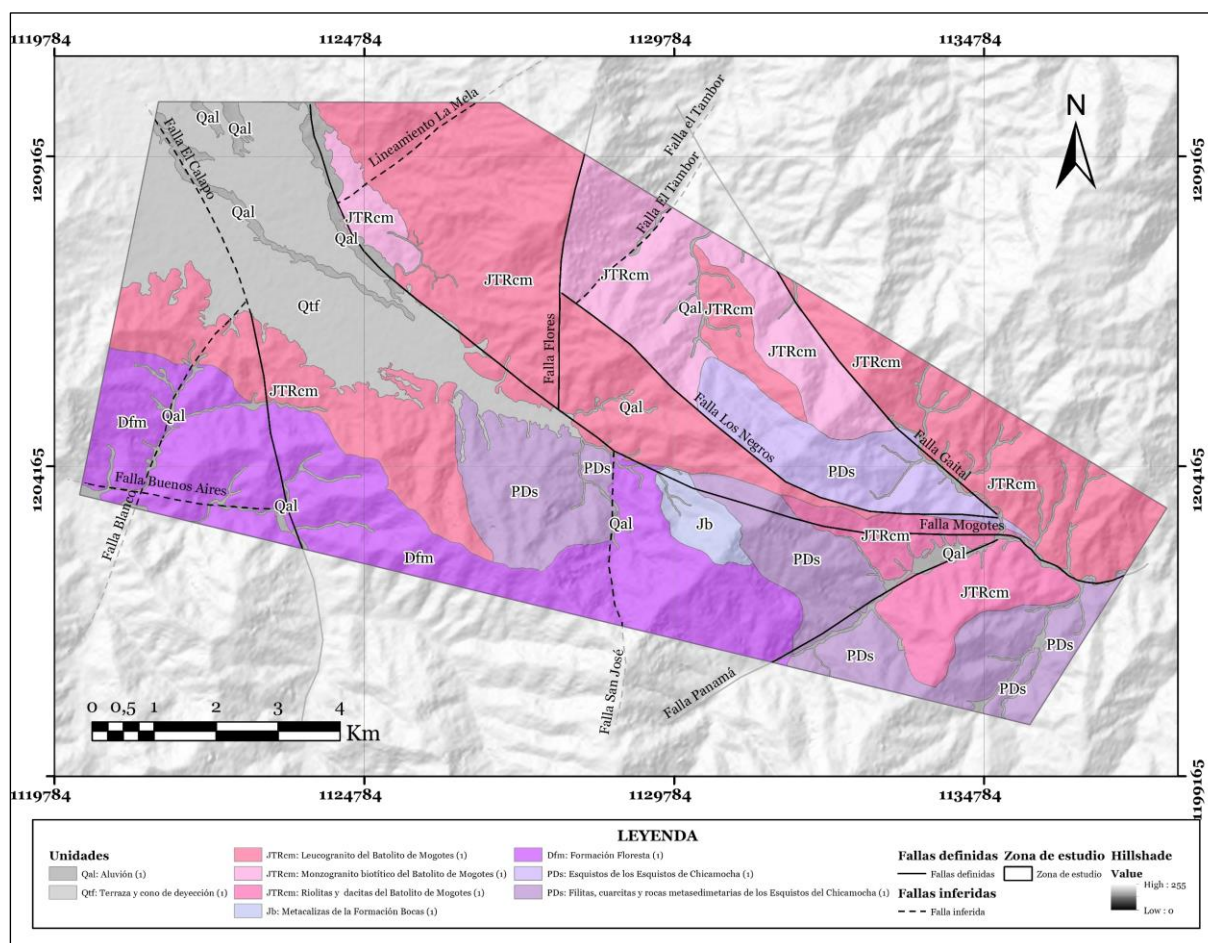
Figura 2). Entre las formaciones más antiguas se destaca el Neis de Bucaramanga (Ordovícico), cuya presencia en campo es limitada, por lo que no es posible hacer su cartografía. También, se encuentra la Formación Silgará, con edades de metamorfismo correspondientes al Ordovícico con protolito de origen Pre-Cámbrico (Mantilla-Figueroa et al., 2016). Además, en el área se identifican rocas de edades comprendidas entre el Devónico y Carbonífero-Pérmico pertenecientes a la Formación Floresta (metamorfizada y no metamorfizada). Hacia el suroeste de la zona de estudio aflora parcialmente la Formación Bocas (Triásico tardío). Asimismo, el Batolito de Mogotes, compuesto por rocas de edad Triásica-Jurásica emplazadas en el Neis de Bucaramanga. Finalmente, se observan depósitos Cuaternarios, donde se encuentra ubicado el municipio de Mogotes (

Figura 2).

Figura

2

Mapa geológico de la zona de estudio escala 1:25.000



4.3.1.1. Formación Silgará. En la zona de estudio, esta unidad se caracteriza por la presencia de varias litologías como cuarcitas y esquistos. Las cuarcitas presentan un color gris oscuro, con estructura masiva a foliada de manera local. Composicionalmente, predomina el cuarzo, moscovita y magnetita, indicando un bajo grado de metamorfismo. De igual manera, se observan esquistos biotíticos con estructura esquistosa y brillo perlado, presentando tonalidades rojizas debido a oxidación y procesos de meteorización. Además, se encuentran esquistos bimicáceos con granate al suroeste de la zona, definiendo así, un grado metamórfico bajo a medio para el área de trabajo, concordante con facies esquistos verdes entre las zonas de la biotita y el granate. De manera local se encuentran esquistos grafitosos pero la relación con el Silgará es dudosa.

4.3.1.2. Formación Floresta. En esta unidad presenta dos secciones principales: una de origen metamórfico y otra de carácter sedimentario. La sección metamorfoseada representa la base de la formación, observando rocas metasedimentarias, entre las que se destacan metalodolitas con una foliación rectilínea plano-subparalela con tamaño de grano fino a muy fino, así como metareniscas de color amarillento que presentan biotita orientada en una matriz masiva, formando pequeños niveles de aproximadamente 50 centímetros de espesor. También se identificaron pizarras de tonalidades grises, las cuales exhiben un clivaje de pizarrosidad subperpendicular al plano de estratificación del protolito. También, afloran filitas de color gris oscuro, con textura esquistosa y un tamaño de grano muy fino. Estas filitas se dividen en dos composiciones principales: filitas pelíticas, compuestas por moscovita, cuarzo y magnetita, y filitas cuarzosas, formadas principalmente por moscovita y cuarzo. Por otro lado, la sección sedimentaria está compuesta por arcillolitas negras y areniscas multicolores de grano fino, con intercalaciones de arcillolitas ocre, amarillas y violetas (Pastrana Caviedes & Blair Camacho). A lo largo del tramo Mogotes – San Joaquín se diferencian tres miembros: el primero, denominado miembro basal, presenta una composición predominantemente arenoso-conglomerático; el segundo, conocido como miembro medio, es de carácter más arenoso-lodoso y el tercero, denominado miembro superior, está dominado por facies lodosas lodoso (Mantilla-Figueroa & García-Ramírez, 2018).

4.3.1.3. Formación Bocas. Esta unidad se caracteriza por la presencia de calizas grises, margas y lodolitas calcáreas. Se encuentran en bloques rodados de tamaño métrico, donde se observan procesos de recristalización en diversos grados, así como venas hidrotermales de cuarzo. Estas características son indicativas de un evento de metamorfismo hidrotermal que ha afectado localmente en la roca (Mantilla-Figueroa & García-Ramírez, 2018).

4.3.1.4. Batolito de Mogotes. Esta unidad presenta una composición monzogranítica, con textura fanerítica de grano medio y colores que varían entre blanco rosáceo y gris rosáceo. En zonas muy localizadas, la textura puede ser profirítico-fanerítica. La litología está cortada por diques de leucogranito y riolitas, estos últimos con textura afanítica- porfirítica cuya frecuencia aumenta al acercarse al municipio de San Joaquín. Además, de manera local se observan franjas de color verde manzana compuestas de cuarzo y sericita, interpretadas como alteraciones hidrotermales hipógenas formadas posteriormente al magmatismo (periodo triásico – jurásico). Se encuentra intruyendo principalmente al Neis de Bucaramanga y Formación Silgará (Mantilla-Figueroa & García-Ramírez, 2018).

4.3.1.5. Cuaternarios. Se encuentra representado principalmente por el abanico de Mogotes, el ápice de este depósito apunta en dirección ESE, de manera progresiva se ensancha en dirección hacia el WNW (Mantilla-Figueroa & García-Ramírez, 2018). Su composición se ve reflejada en la diversidad litológica de la zona incluyendo fragmentos de rocas ígneas provenientes del Batolito de Mogotes, clastos metamórficos derivados de la Formación Silgará y Floresta, junto con material sedimentario de la Formación Bocas.

4.3.2. Geomorfología

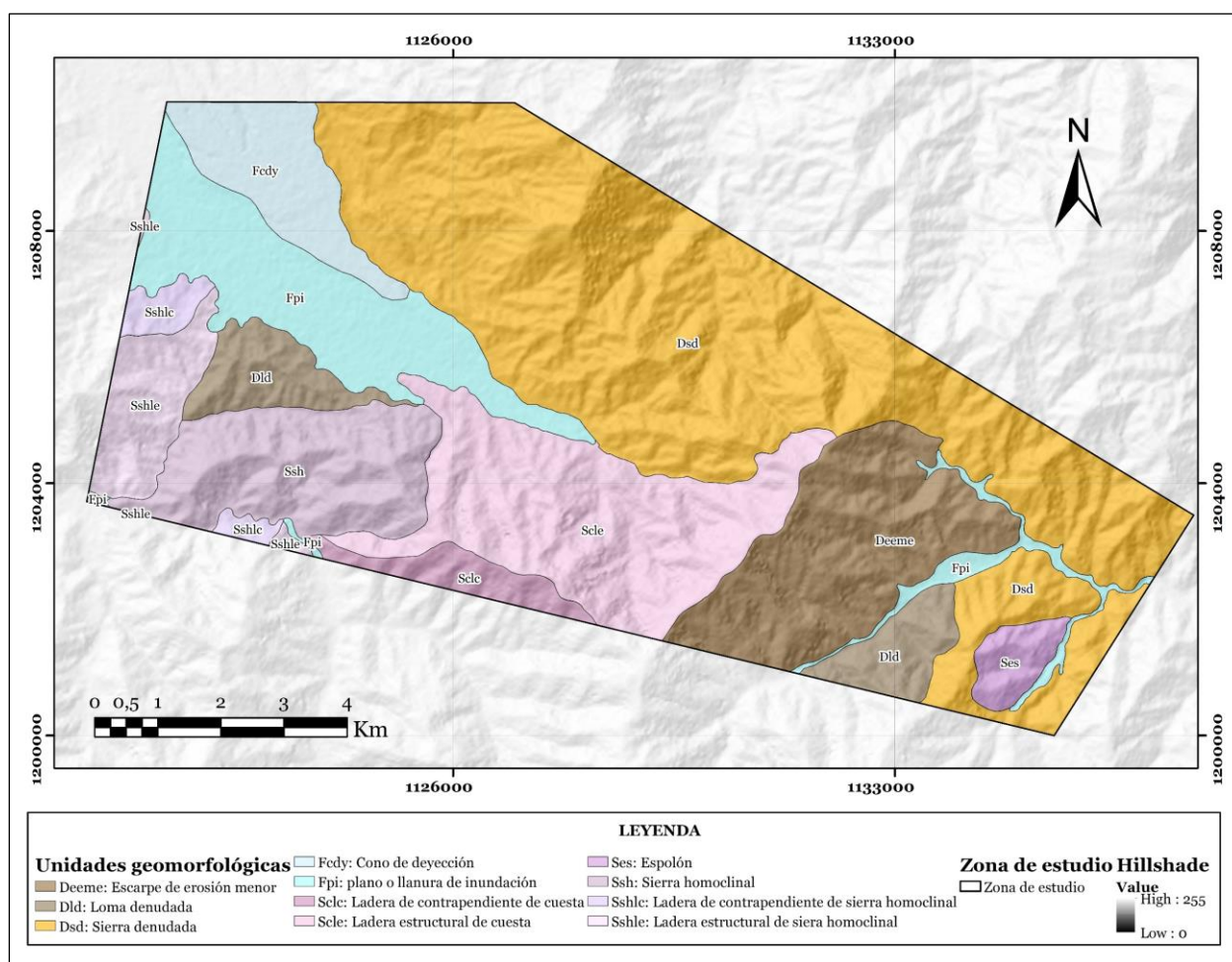
La geomorfología de la plancha 136-Málaga, abarca parte de los departamentos de Santander y Boyacá, se caracteriza principalmente por la presencia de geoformas de origen morfoestructural, son las más comunes en la región y se originan debido a la expresión morfológica de las estructuras geológicas, especialmente influenciadas por fallas tectónicas presentes en el área, seguidas por geoformas denudacionales, que están relacionados con las características climáticas y geográficas del área, dando lugar a una variedad de relieves que reflejan la erosión y el transporte

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

de materiales y en menor medida, por geoformas fluviales, principalmente asociadas con el río Chicamocha, que ha modelado el paisaje a través de su actividad erosional y glaciares, que se relacionan con la Sierra Nevada de El Cocuy. La cartografía geomorfológica aplicada a movimientos en masa es una herramienta valiosa a la hora de entender los procesos geológicos y geomorfológicos que influyen en el territorio, así como su relación con los movimientos en masa. En la Figura 3 se pueden evidenciar las geoformas presentes en la zona de estudio a una escala 1:100.000.

Figura 3

Mapa geomorfológico de la zona de estudio escala 1:100.000



4.3.3. Geología estructural

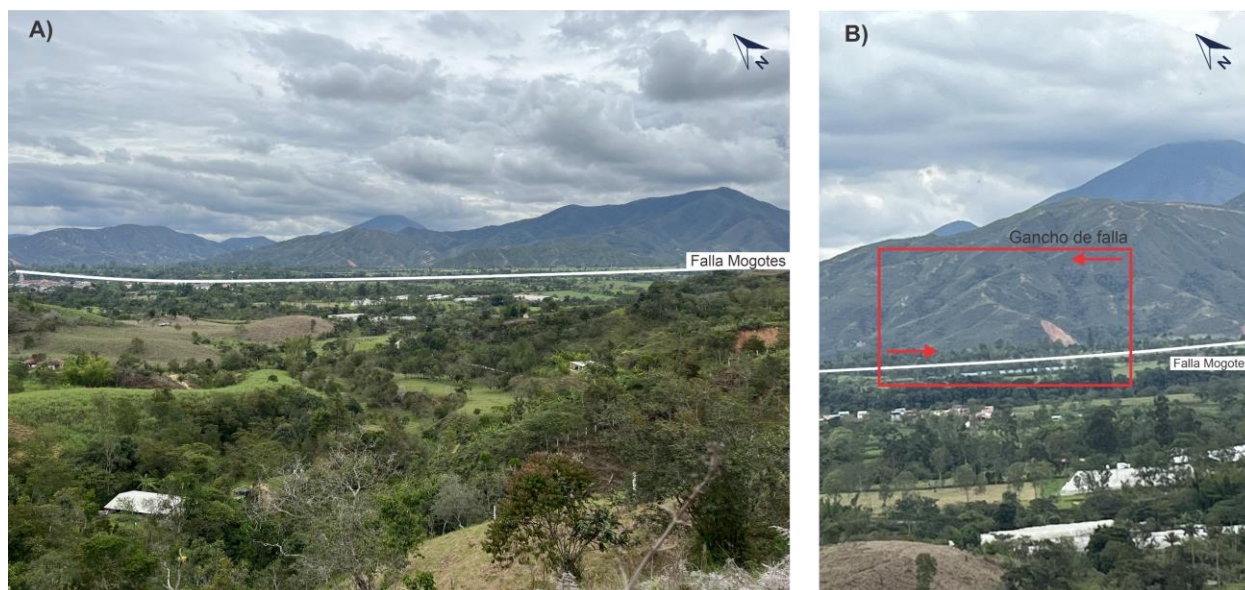
La zona de estudio se encuentra ubicada entre los municipios de Mogotes y San Joaquín, estos municipios se sitúan a SW del complejo estructural del Macizo de Santander (MS). Esta área se halla relacionada con la parte sur de la Falla Bucaramanga y continuación de la Falla Lebrija (ambas con rumbo NW de régimen trasnpresivo) (Velandia Patiño, 2017).

4.3.3.1. Fallas. Las principales estructuras presentes en la zona siguen una dirección NW, que es sub paralela a la Falla Bucaramanga. El área de estudio presenta seis fallas principales que son definidas como Falla Mogotes, Falla Los Negros, Falla Gaital, Falla Panamá, Falla Flores y Falla Río Blanco de San José.

4.3.3.1.1. Falla Mogotes. Esta falla se encuentra definida como Falla Lebrija (Velandia Patiño, 2017) y hace parte del complejo estructural del MS presentando una cinemática sinistral con componente inverso. En la zona de estudio, parte de esta falla se encuentra relacionado con el abanico de Mogotes con una dirección aproximada WNW-ESE (Mantilla-Figueroa & García-Ramírez, 2018), de allí que se le denomine como Falla Mogotes (Figura 4, A). Esta Falla, litológicamente relaciona unidades cuaternarias, con unidades metamórficas Ordovícicas y cuerpos ígneos del Triásico-Jurásico. Geomorfológicamente se relacionan con espolones, lomos de falla, lomeríos estructurales y cerros estructurales, además, se observa en campo un gancho de falla (Figura 4, B) que afirma la cinemática de esta Falla.

Figura 4

Panorámica en campo de la Falla Mogotes. A) Falla Mogotes. B) Gancho de Falla relacionado a la Falla Mogotes



4.3.3.1.2. Falla Los Negros. Es un contacto fallado entre los Esquistos del Chicamocha (Ordovícico) y el Leucogranito del Batolito de Mogotes (Jurásico-Triásico) y lo que evidencia una cinemática inversa. Esta falla tiene dirección NW-SE, y se encuentra ubicada entre las veredas Gaital y Cabecera principalmente. Geomorfológicamente se relacionan con espolones, lomos de falla, sierra y lomeríos estructurales.

4.3.3.1.3. Falla Gaital. Se encuentra ubicada entre las veredas Gaital y Santa Bárbara con una orientación NW-SE con un componente de rumbo sinistral. Litológicamente pone en contacto a los Esquistos del Chicamocha y al Monzogranito del Batolito de Mogotes. Las unidades geomorfológicas presentes son lomeríos estructurales y espolones.

4.3.3.1.4. Falla Panamá. Su orientación es NE-SW y su cinemática es dextral con componente posiblemente normal, se encuentra en las veredas Panamá y San Ignacio, las litologías

aledañas son los Esquistos del Chicamocha y los diques de Riolitas y Dacitas del Batolito de Mogotes. Las características geomorfológicas se relacionan a una serie de espolones a lo largo de la falla.

4.3.3.1.5. Falla Flores. Cuenta con una orientación N-S y un componente inverso. Se encuentra ubicada entre las veredas Gaital y Flores. Las unidades geomorfológicas relacionadas con esta falla son lomeríos estructurales y su litología está relacionada a al monzogranito y el Leucogranito del Batolito de Mogotes.

4.3.3.1.6. Falla Río Blanco de San José. Esta falla se definió gracias al lineamiento del Río Blanco, presenta una orientación N-S y se encuentra entre las Veredas Cabecera y San José. Esta falla se presenta cortando la Formación Floresta (Carbonífero-Pérmico) y Leucogranito del Batolito de Mogotes (Jurásico-Triásico).

4.3.3.2. Fallas inferidas. En la zona de estudio, se identifican diversas fallas inferidas asociadas a las fallas principales, en campo se pudo relacionar ciertos aspectos geomorfológicos que fueron corroborados a partir de fotointerpretación analizando cambios de vegetación, variación de color en el suelo, trazo de drenajes y lineamientos.

4.3.3.2.1. Falla El Tambor. Esta falla se encuentra asociada a la Falla Gaital y la Falla Los Negros, está localizada en las veredas Gaital y Pedregal. Exhibe una orientación NE-SW y está presente en el Monzogranito del Batolito de Mogotes, no hay rasgos geomorfológicos.

4.3.3.2.2. Falla San José. Se ubica en la vereda Cabecera, su orientación es N-S. Esta Falla se encuentra perpendicular a la Falla Mogotes, se fotointerpreta a partir del lineamiento presente en el río Mogoticos y rasgos geomorfológicos como un lomo de falla. La litología aledaña consiste en los Esquistos del Chicamocha y Formación Floresta.

4.3.3.2.3. Falla El Calapo. Se localiza en las veredas Guayaguata y la Palmita, cuenta con una orientación NW-SE. Esta falla de la continuación de la Falla de Río Blanco de San José, sin embargo, se encuentra oculta por la litología del cuaternario conformado por el Abanico de Mogotes.

4.3.3.2.4. Falla Blanco. Está ubicado entre las veredas Santa Barbara y San José, tiene una orientación NE-SW. Se fotointerpreta gracias al lineamiento del drenaje y no presenta rasgos geomorfológicos. Litológicamente se encuentra en la Formación Floresta y el Leucogranito del Batolito de Mogotes.

4.3.3.2.5. Falla Buenos Aires. Está localizada en las veredas San José y Guaure, esta falla está perpendicular a la Falla Río Blanco de San José y la Falla Blanco con orientación W-E, se fotointerpreta a partir del lineamiento del Río Blanco y, se encuentra en la Formación Floresta.

4.3.3.3. Lineamientos. A partir de la foto interpretación de imágenes satelitales se identifica un lineamiento en la zona de estudio.

4.3.3.3.1. Lineamiento la Mela. Este lineamiento se encuentra asociada a la Falla Mogotes, está localizada en la vereda Flores. Exhibe una orientación NE-SW y está presente en el Leucogranito del Batolito de Mogotes, se fotointerpreta gracias al lineamiento de la Quebrada la Mela.

4.3.3.4. Zonas Críticas. A lo largo de la zona de estudio se identificaron cuatro zonas críticas en las que se presenta una mayor cantidad de movimientos en masa como se observa en la Figura 5. Debido a esto, a continuación, se analiza la relación entre los movimientos en masa y las fallas principales e inferidas.

4.3.3.4.1. Zona 1. Esta zona está asociada a las Fallas Mogotes y Los Negros. Esta área exhibe 30 movimientos en masa, en los que se incluyen deslizamientos traslacionales y flujos de detritos. Estos eventos están relacionados con geoformas de ambiente estructural como espolones altos de longitud corta y lomeríos estructurales; se generan en rocas que varían de intermedia calidad de las riolitas y dacitas del Batolito de Mogotes, a rocas de mala calidad del leucograitito del Batolito de Mogotes y de muy mala calidad de los Esquistos del Chicamocha. Como consecuencia de estos movimientos en masa se ha generado afectaciones en la vía que comunica los municipios de San Joaquín y Mogotes.

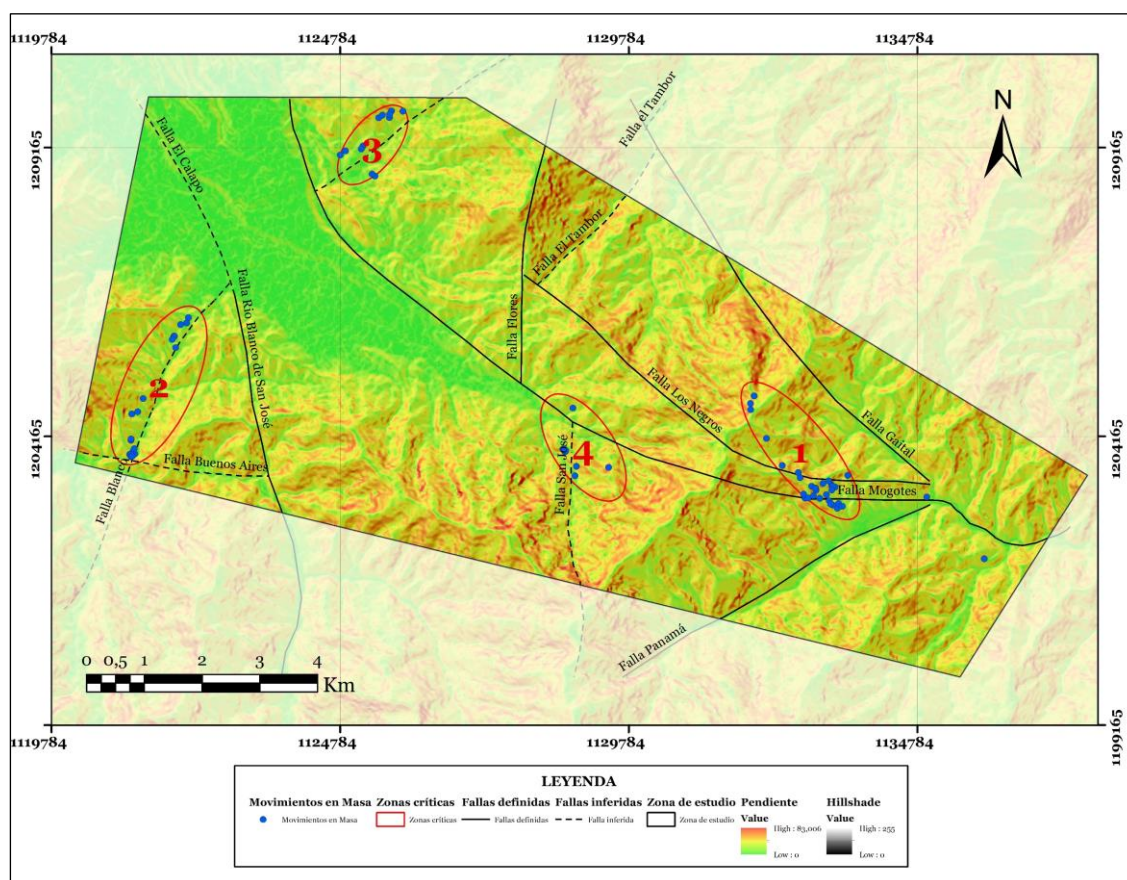
4.3.3.4.2 Zona 2. Esta zona está relacionada con las Fallas Blanco y Buenos Aires. Esta área exhibe 17 movimientos en masa, en los que comprenden deslizamientos traslacionales y flujos de detritos. Estos eventos están relacionados con geoformas de ambiente denudacional expuestos en lomos denudados de moderados a bajos con longitud corta; se generan en rocas de mala calidad metalodolitas de la Formación Floresta. Como consecuencia de estos movimientos en masa se ha generado afectaciones en la vía que comunica las veredas Guaure, San José y Santa Barbara con el municipio de Mogotes.

4.3.3.4.3. Zona 3. Esta zona está asociada a las Fallas Mogotes y el lineamiento La Mela presente en la zona. Esta área exhibe 13 movimientos en masa, en los que se incluyen deslizamientos traslacionales y flujos de detritos. Estos eventos están relacionados con geoformas de ambiente denudacional como lomeríos muy disectados, lomo de falla y lomos disectados; se generan en rocas que varían rocas de mala calidad a muy mala calidad del leucograitito del Batolito de Mogotes. Como consecuencia de estos movimientos en masa se ha generado afectaciones en la vía que comunica la vereda Flores con el municipio de Mogotes

4.3.3.4.4. Zona 4. Esta zona está relacionada con las Fallas Mogotes y San José. Esta área exhibe 10 movimientos en masa, en los que comprenden deslizamientos traslacionales y flujos de detritos. Estos eventos están relacionados con geoformas de ambiente estructural principalmente como lomos de falla, como también geoformas denudacionales como laderas denudadas y lomo denudado alto; se generan en rocas de mala calidad metalodolitas de la Formación Floresta y roca de intermedia y mala calidad de Cuarcitas y Filitas de los Esquistos del Chicamocha. Como consecuencia de estos movimientos en masa se ha generado afectaciones en la vía que comunica con la parte SW de la vereda Cabecera con el municipio de Mogotes y la vía que conecta Mogotes con San Joaquín.

Figura 5

Mapa estructural de la zona de estudio escala 1:25.000



5. Metodología

El desarrollo de este proyecto de investigación se dio a partir de cinco fases metodológicas presentadas a continuación (Figura 6).

Figura 6

Esquema explicativo de la metodología empleada en el proyecto



5.1. Fase 1: Recopilación bibliográfica y fotointerpretación preliminar

En esta primera fase, se llevó a cabo una selección y recopilación de información y datos provenientes de diferentes fuentes correspondientes a la región de estudio; junto con esto, se utilizaron los mapas geológicos (Ingeominas, 1984), geomorfológicos (SGC, 2014) y de susceptibilidad por movimientos en masa (SGC, 2014) de la plancha 136 escala 1:100.000, además, se realizó una revisión detallada de la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017). De igual manera, se analizaron los movimientos reportados por el SIMMA, se utilizaron imágenes satelitales y los valores de las pendientes en la zona de estudio, con el fin de realizar una fotointerpretación de nuevos movimientos en masa, que permitió determinar puntos críticos que se establecieron como estaciones de campo, también, se desarrolló un mapa preliminar de las principales unidades geológicas y estructuras por medio de la fotointerpretación geológica.

5.2. Fase 2: Campo

Con base en la información recolectada en la fase anterior, los mapas disponibles, los trabajos preliminares realizados y la fotointerpretación, se diseñó una ruta que permitiera cubrir las zonas críticas identificadas dentro de la zona de estudio. A lo largo de la ruta se realizaron diferentes paradas para control y registro de los eventos de movimientos en masa de acuerdo con el Formato para Inventario de Movimientos en Masa propuesto por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007), delimitación de las UGS (Unidades geológicas superficiales) utilizando los formatos de campo para la Caracterización de macizo rocoso y Caracterización de suelo utilizado por el SGC, (2017) y la corroboración de datos estructurales, litológicos y geomorfológicos previstos en la fase anterior.

5.3. Fase 3: Procesamiento de datos

En esta fase del proyecto, se verificaron y ajustaron los mapas geológico, geomorfológico y estructural. A partir de la información obtenida, se elaboró el mapa de las unidades geológicas superficiales (UGS), así mismo, se generó el mapa de subunidades geomorfológicas (GMF), con ayuda del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 136 – Málaga 1:100.000 (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2014) y los datos obtenidos en campo; se elaboraron también mapas para la cobertura, el cambio de cobertura, y el uso de suelo, así como un mapa de distancia a fallas que se elaboró tomando como base el mapa estructural resultante, y finalmente se generaron mapas para las variables morfométricas, que corresponden a la pendiente, la curvatura y la rugosidad, las cuales se realizaron mediante un modelo digital de elevación del terreno (MDE) con un tamaño de píxel de 12,5 metros, obtenido a partir del sensor ALOS-PARSAL del año 2010 (University of Alaska Fairbanks, 2010). Además, se delimitaron en polígonos los movimientos en masa documentados en campo y aquellos registrados en el SIMMA, con estos insumos, se completaron las variables para la elaboración el mapa de susceptibilidad.

5.4. Fase 4: Análisis de resultados

En esta paso, ya con todas las variables procesadas se elaboró el mapa de susceptibilidad empleando el método estadístico bivariado WofE, para la aplicación de este método, se calcularon los pesos de evidencia finales de las variables previamente descritas, y por medio de un *Software GIS*, se generaron los Índices de Susceptibilidad de Deslizamientos (LSI), obteniendo así un mapa de rango LSI, al cual se sometió a un proceso de comprobación de la hipótesis por medio de una curva de éxito y de validación para finalmente tener una validación del resultado y así obtener las categorías de susceptibilidad. Para la construcción de las curvas se ordenaron los valores de LSI de forma descendente, para luego ser divididos en 100 rangos de percentiles, donde cada grupo de

1% se relaciona con un porcentaje de la variable de los movimientos en masa para determinar con cuántos píxeles presenta relación. A continuación, se ubican en el eje X los grupos de percentiles de LSI, y en el eje Y se ubican los valores resultantes porcentuales de cada 1% de los movimientos en masa correspondientes con cada percentil de LSI. Una vez la curva se encuentre hecha, se evalúa el área bajo la curva (ABC), esto con el fin de establecer la calidad de ajuste de los datos; entre más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el valor ABC, mayor será la capacidad de la función para describir la distribución de los movimientos en masa; un resultado con un porcentaje adecuado debe ser mayor al 70% (SGC, 2017).

5.5. Fase 5: Elaboración y entrega del documento final

En esta etapa se procedió a hacer la síntesis de la información recopilada a lo largo de la investigación, donde se incluyeron los datos obtenidos en campo y por medio de la revisión bibliográfica. Se realizó una integración de los resultados a través del análisis detallado de los resultados obtenidos, lo que permitió establecer las conclusiones sobre la distribución espacial de la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona de estudio.

6. Resultados

6.1. Caracterización Geo-ambiental

Las características geo-ambientales que se presentan en la zona de estudio permiten la formulación y comprobación de la hipótesis a partir de la cual se establece la relación entre los diversos factores geo-ambientales y la ocurrencia de los movimientos en masa. A través de esta caracterización, se recopiló información detallada, como un inventario de procesos morfodinámicos y factores concionantes. El inventario de procesos proporcionó datos claves para la ubicación de los movimientos en masa, así como sus características, frecuencias, causas,

volúmenes y daños asociados. Por otro lado, los factores condicionantes, representados como un conjunto de datos espaciales, mostraron una relación significativa con la ocurrencia de estos movimientos. Estos factores no solamente explicaron los procesos ya observados, sino que también permitieron estimar la probabilidad de futuros eventos. La relación entre los movimientos en masa y los factores condicionantes varió de acuerdo con las particularidades de cada área, demostrando la importancia de las singularidades locales en el análisis.

6.1.1. *Inventario de procesos morfodinámicos*

El inventario constituye una recopilación detallada de información sobre los factores causales, su distribución espacial y la frecuencia de ocurrencia de los eventos. A continuación, se observan atributos claves que permitieron comprender las dinámicas de los movimientos en masa, así como fuentes de información que respaldaron el análisis.

6.1.1.1. Información secundaria. Esta información se obtuvo a partir del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA). El cual integra y organiza espacialmente datos provenientes de diversas fuentes como la UNGR, el IDEAM, la Unidad de Gestión del Riesgo de Santander, y las Oficinas de Gestión del Riesgo Municipal de Mogotes y San Joaquín. Esta integración de datos contribuyó a una comprensión más detallada de la distribución y características de los movimientos en masa en la zona de estudio.

De acuerdo con datos del SIMMA (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2024) para la zona de estudio, se identificaron cinco (5) movimientos en masa de tipo deslizamiento y ocho (8) movimientos en masa de tipo flujo clasificados como eventos de catálogo, asimismo, esta misma entidad reportó dos (2) movimientos en masa de tipo deslizamiento y dos (2) movimientos en masa de tipo flujo etiquetados como eventos de inventario como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

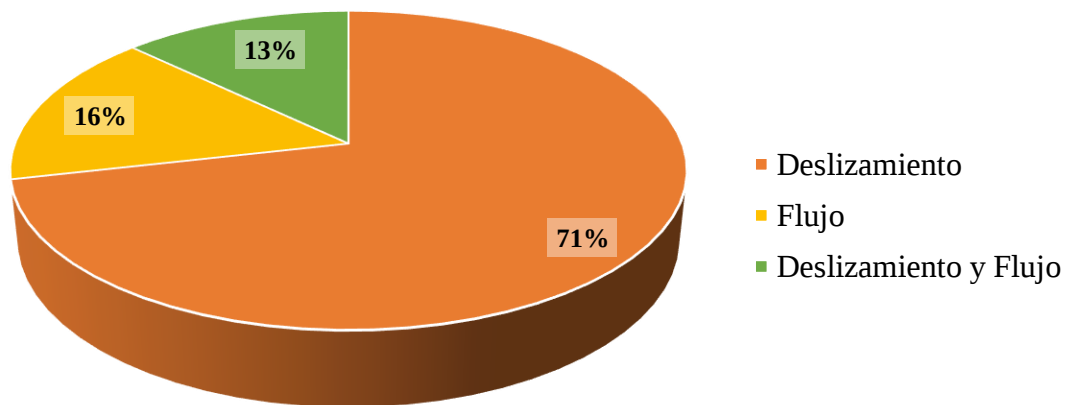
Listado de movimientos en masa en la zona de estudio recopilado por medio de fuentes bibliográficas

Fuente	Fecha	Municipio	Vereda	Tipo de movimiento	Latitud	Longitud
Catálogo	2/09/2024	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	738247	710465
Catálogo	17/07/2024	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	710355	738247
Catálogo	3/05/2024	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	710355	738266
Catálogo	27/04/2024	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	710465	738247
Catálogo	3/04/2024	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	710349	738263
Catálogo	16/03/2024	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	710465	738247
Catálogo	27/10/2023	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	710440,9	738265,4
Catálogo	10/11/2020	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	710354,8	738247,3
Catálogo	22/12/2011	Mogotes	Mogotes	Deslizamiento	710922,4	735835
Catálogo	22/12/2011	Mogotes	Mogotes	Deslizamiento	716283,7	724410,2
Catálogo	2/11/2004	Mogotes	Mogotes	Deslizamiento	713051,4	732921,8
Catálogo	4/05/1990	Mogotes	Mogotes	Deslizamiento	715873,3	724808,3
Catálogo	1/05/1990	Mogotes	Mogotes	Deslizamiento	715873,3	724808,3
Inventario	13/10/2013	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	711731,6	730883
Inventario	12/10/2013	San Joaquín	San Joaquín	Flujo	711502,8	735002,7
Inventario	12/10/2013	San Joaquín	San Joaquín	Deslizamiento	710256,7	738296,9
Inventario	12/10/2013	San Joaquín	San Joaquín	Deslizamiento	711717	734786,6

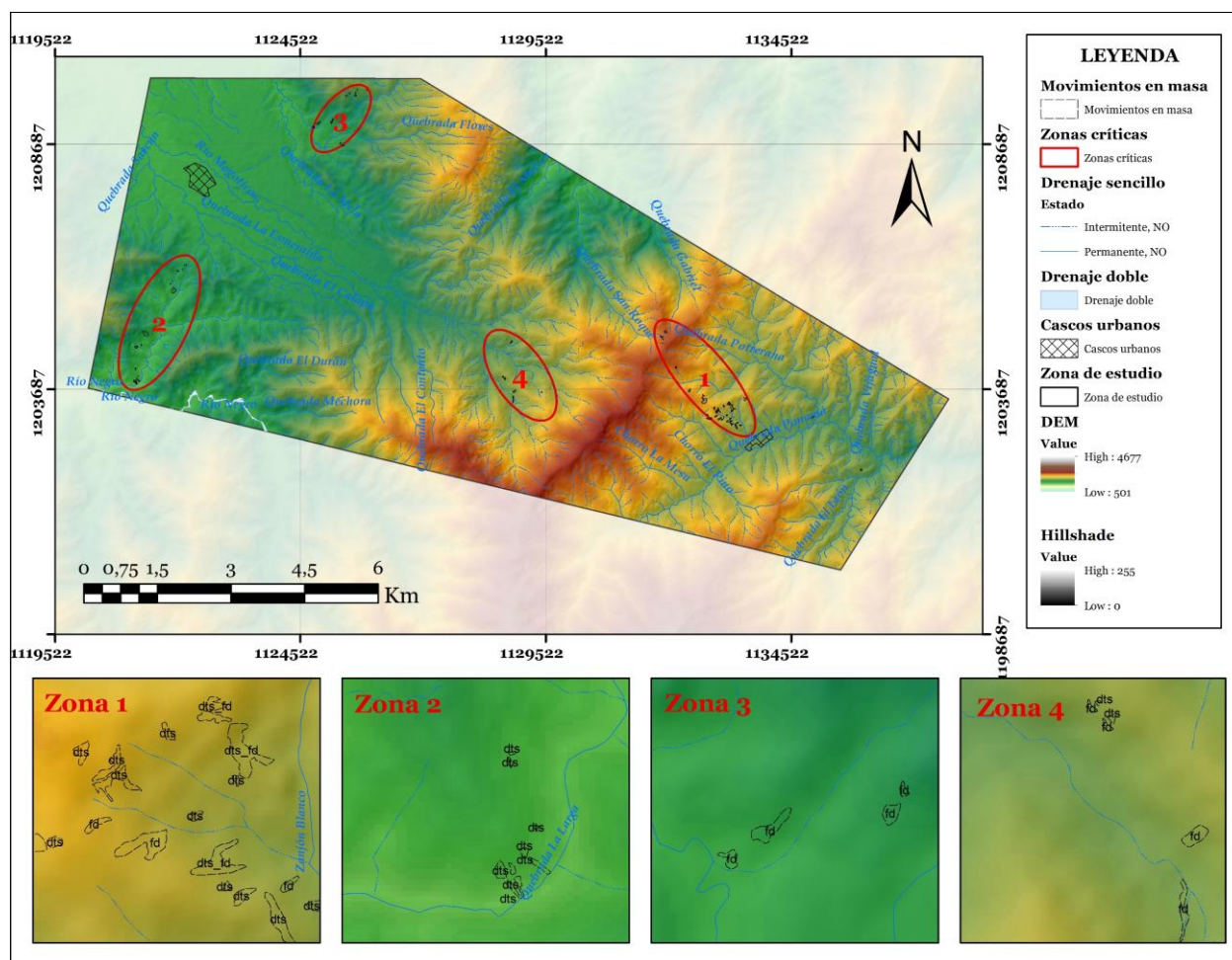
6.1.1.2. Inventario de movimientos en masa. Se realizó un inventario de movimientos en masa para la zona de estudio (Figura 8), donde se registraron 70 movimientos en masa, de los cuales, 50 de ellos son de tipo deslizamientos, 11 son de tipo flujo y 9 presentan ambos tipos de movimientos como se muestra en la Tabla 3. La descripción de los movimientos en masa se encuentra en el Apéndice A.

Tabla 3*Lista de tipos de movimientos en masa y su estado*

Tipo de movimiento en masa	Cantidad de movimientos	Activos	Inactivos
Deslizamientos	50	47	3
Flujos	11	10	1
Deslizamiento y Flujo	9	9	0
Total	70	70	4

Figura 7*Diagrama ilustrativo del porcentaje de la distribución de movimientos en masa en la zona de estudio***Figura 8***Mapa movimientos en masa en la zona de estudio*

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

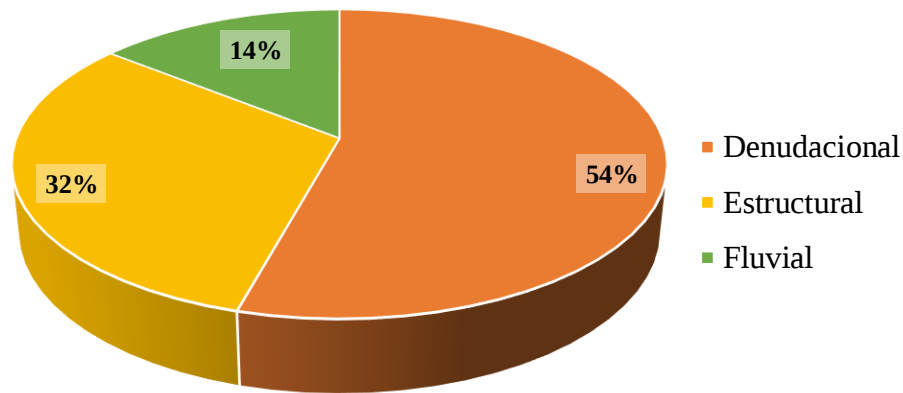


6.1.2. Factores condicionantes

6.1.2.1. Subunidades geomorfológicas. En la zona de estudio se identificaron 35 geoformas, donde 19 corresponden al ambiente denudacional, 11 al ambiente estructural y 5 al ambiente fluvial (Tabla 4). La descripción de estas unidades geomorfológicas se encuentra descritas en el Apéndice C.

Figura 9

Diagrama ilustrativo del porcentaje de subunidades geomorfológicas por tipo de ambiente en la zona de estudio

**Tabla 4**

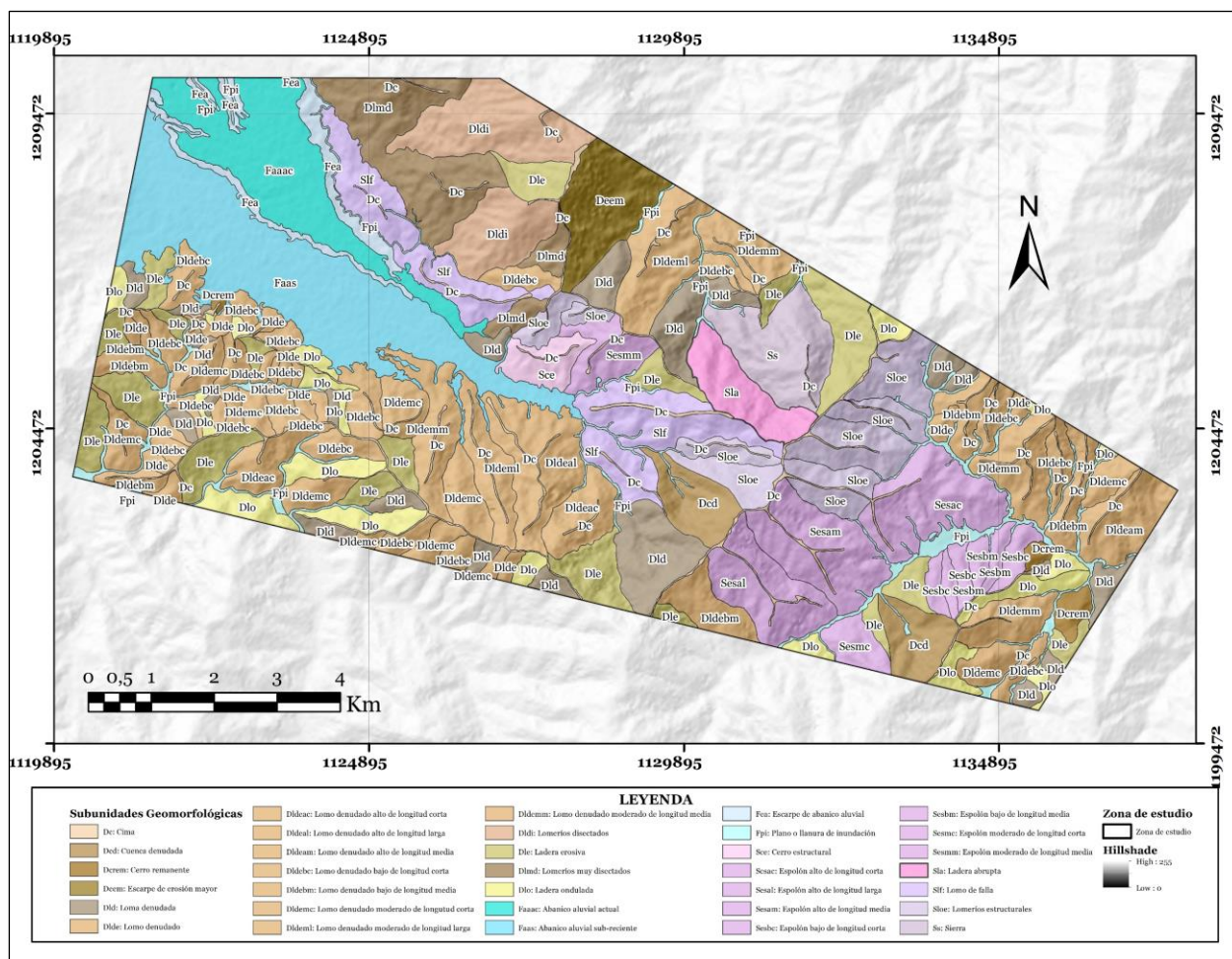
Listado Subunidades Geomorfológicas cartografiadas en campo

Ambiente	Subunidad Geomorfológica	Código	Área [Km ²]	[%]
Denudacional	Cima	Dc	2,1369	2,04%
	Cerro remanente	Dcrem	0,545524	0,52%
	Cuenca denudada	Dcd	2,289374	2,18%
	Escarpe de erosión mayor	Deem	2,208402	2,11%
	Ladera denudada	Dld	1,985066	1,89%
	Ladera erosiva	Dle	7,595972	7,26%
	Ladera ondulada	Dlo	4,132997	3,95%
	Loma denudada	Dld	3,968258	3,79%
	Lomeríos disectados	Dldi	4,279906	4,09%
	Lomo denudado alto de longitud corta	Dldeac	1,822075	1,74%
	Lomo denudado alto de longitud larga	Dldeal	2,228782	2,13%

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

	Lomo denudado alto de longitud media	Dldeam	1,375329	1,31%
	Lomo denudado bajo de longitud corta	Dldebc	5,674071	5,42%
	Lomo denudado bajo de longitud media	Dldebm	2,913113	2,78%
	Lomo denudado moderado de longitud corta	Dldemc	4,544088	4,34%
	Lomo denudado moderado de longitud larga	Dldeml	3,032065	2,89%
	Lomo denudado moderado de longitud media	Dldemm	4,454718	4,25%
	Lomo denudado	Dlde	1,669405	1,59%
	Lomeríos muy disectados	Dlmd	4,186619	4,00%
Estructural	Cerro estructural	Sce	0,808605	0,77%
	Espolón alto de longitud corta	Sesac	2,412273	2,30%
	Espolón alto de longitud largo	Sesal	2,006305	1,91%
	Espolón alto de longitud media	Sesam	2,407163	2,30%
	Espolón bajo de longitud corta	Sesbc	0,860054	0,82%
	Espolón bajo de longitud media	Sesbm	0,695869	0,66%
	Espolón moderado de longitud media	Sesmm	1,666585	1,59%
	Ladera abrupta	Sla	1,549792	1,48%
	Lomeríos estructurales	Sloe	5,524382	5,28%
	Lomo de falla	Slf	5,036123	4,81%
	Sierra	Ss	2,366253	2,26%
Fluvial	Abanico aluvial actual	Faaac	4,750019	4,53%
	Abanico aluvial sub-reciente	Faas	8,80035	8,41%
	Escarpe de abanico fluvial	Fea	1,626505	1,55%
	Llanura de inundación	Fpi	2,444521	2,33%
	Plano de inundación	Fpi	0,629795	0,60%

Mapa Subunidades Geomorfológicas



6.1.2.2. Morfometría. Las variables de morfometría se generaron a partir de un (MDE). Estas variables son; pendiente, curvatura y rugosidad, las cuales se encuentran descritas a detalle en el Apéndice D.

6.1.2.2.1. Pendiente. Para la reclasificación de la pendiente se realizó un análisis estadístico donde se toma como referencia la desviación estándar de los datos para obtener la clasificación de los rangos de las pendientes (Valencia Ortiz y otros, 2023), los resultados se encuentran en la Tabla 5, dando como resulta una división de 6 clases, cada una, con un rango de 12° (Tabla 6); siendo 0° el valor de la pendiente más baja y 69° la más alta.

Tabla 5

Clasificación de rangos de pendientes

Count	Área	Min	Max	Range	Mean	Std
45	7031,25	1,81	42,16	40,35	22,11	11,50

Tabla 6

Pendientes para la zona de estudio

Clases	Rangos	Área [Km ²]	[%]
1	0°-12°	22,963516	21,95%
2	12°-24°	30,61934	29,27%
3	24°-36°	39,912421	38,15%
4	36°-48°	10,56912	10,10%
5	48°-60°	0,524622	0,50%
6	60°-69°	0,018696	0,01%

6.1.2.2.2. Curvatura. Para la reclasificación de la curvatura se definieron 5 rangos, divididos mediante rupturas naturales, o mejor conocido como ‘*natural breaks*’; la cantidad de píxeles de cada rango, así como su área y su porcentaje se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7

Rangos de curvatura para la zona de estudio

Clases	Count	Área [Km ²]	[%]
1	76670	11,9796875	11,45%
2	192516	30,080625	28,75%
3	241546	37,7415625	36,07%
4	124654	19,4771875	18,61%
5	34206	5,3446875	5,10%

6.1.2.2.3. Rugosidad. Para la reclasificación de la rugosidad, nuevamente, se definieron 5 rangos, divididos mediante rupturas naturales, o mejor conocido como ‘*natural breaks*’; la cantidad de píxeles de cada rango, así como su área y su porcentaje se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8

Valores de rugosidad para la zona de estudio

Clases	Count	Área [Km ²]	[%]
1	207704	32,045658	30,63%
2	225794	35,864753	34,28%
3	143861	22,397972	21,41%
4	73452	11,433307	10,92%
5	18781	2,870049	2,74%

6.1.2.3. Distancia a Fallas. Para la variable de distancia a fallas, se utilizó una clasificación que dividiera las clases en rangos de 500m entre sí, dando como resultado 6 clases diferentes, donde el valor más bajo es 0m y el más alto es 3000m (Tabla 9).

Tabla 9

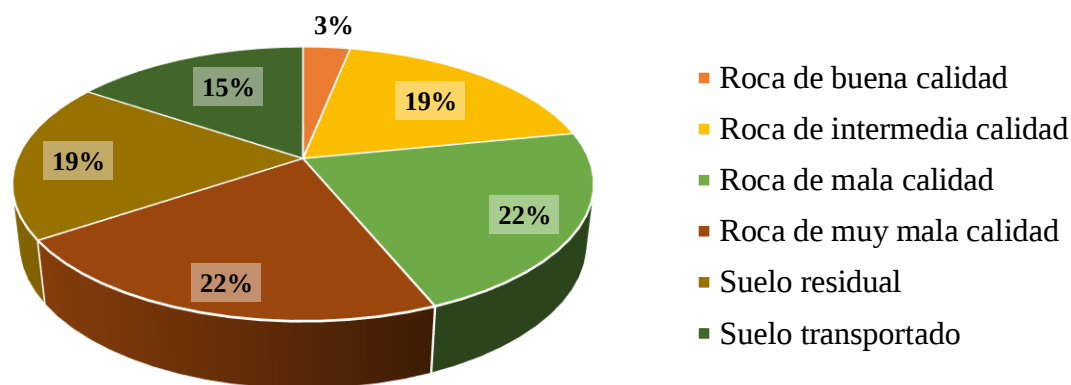
Rangos de distancia a fallas para la zona de estudio

Clases	Rangos	Área [Km ²]	[%]
1	0-500	50,481626	48,25%
2	500-1000	32,514867	31,08%
3	1000-1500	14,300854	13,66%
4	1500-2000	4,965588	4,74%
5	2000-2500	2,316915	2,21%
6	2500-3000	0,036408	0,03

6.1.2.4. Unidades Geológicas Superficiales (UGS). En la zona de estudio se identificaron un total de 32 unidades geológicas superficiales (Figura 12) en las que 1 corresponde a roca de buena calidad, 6 unidades de roca de intermedia calidad, 7 son roca de mala calidad, 7 pertenecen a rocas de muy mala calidad, 6 son de suelo residual y 5 corresponden suelo transportado (Tabla 10). Estas unidades se encuentran descritas en detalle en el Apéndice E.

Figura 11

Diagrama ilustrativo del porcentaje de las Unidades Geológicas Superficiales en la zona de estudio

**Tabla 10**

Listado Unidades Geológicas Superficiales cartografiadas en campo

UGS	Código UGS	Área [Km²]	[%]
Roca de buena calidad riolita y dacitas del Batolito de Mogotes	Rbcrdbm	0,049925	0,04%
Roca de intermedia calidad cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha	Riccfc	6,168878	5,89%
Roca de intermedia calidad leucogranito del Batolito de Mogotes	Riclbm	4,880604	4,66%
Roca de intermedia calidad metalodolitas de la Formación Floresta	Ricmf	4,866023	4,65%
Roca de intermedia calidad monzogranito del Batolito de Mogotes	Ricmbm	4,942623	4,72%
Roca de intermedia calidad riolitas y dacitas del Batolito de Mogotes	Ricrdbm	1,698639	1,62%
Roca de intermedia calidad metacalizas de la Formación Bocas	Ricmb	0,145376	0,13%
Roca de mala calidad cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha	Rmccfc	3,948976	3,77%
Roca de mala calidad esquistos de los Esquistos del Chicamocha	Rmceec	2,901524	2,77%

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

Roca de mala calidad leucogranito del Batolito de Mogotes	Rmclbm	16,070583	15,36%
Roca de mala calidad metalodolitas de la Formación Floresta	Rmcmf	9,628154	9,20%
Roca de mala calidad monzogranito del Batolito de Mogotes	Rmcmbm	4,329845	4,13%
Roca de mala calidad riolita y dacitas del Batolito de Mogotes	Rmcrcdbm	1,055072	1,00%
Roca de mala calidad metacalizas de la Formación Bocas	Rmcmb	0,924852	0,88%
Roca de muy mala calidad cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha	Rmmccfec	3,119247	2,98%
Roca de muy mala calidad esquistos de los Esquistos del Chicamocha	Rmmceec	1,41896	1,35%
Roca de muy mala calidad leucogranito del Batolito de Mogotes	Rmmclbm	11,341946	10,84%
Roca de muy mala calidad metalodolitas de la Formación Floresta	Rmmcmf	3,423335	3,72%
Roca de muy mala calidad monzogranito del Batolito de Mogotes	Rmmcmbm	0,521127	0,49%
Roca de muy mala calidad riolita y dacitas del Batolito de Mogotes	Rmmcrdbm	2,333556	2,23%
Roca de muy mala calidad metacalizas de la Formación Bocas	Rmmcmb	0,154877	0,14%
Suelo Residual	Código	Área [Km²]	[%]
Suelo residual cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha	Srccfec	0,31927	0,30%
Suelo residual esquistos de los Esquistos del Chicamocha	Sreec	0,081049	0,07%
Suelo residual leucogranito del Batolito de Mogotes	Srlbm	1,389426	1,32%
Suelo residual metalodolitas de la Formación Floresta	Srmf	0,360978	0,34%
Suelo residual monzogranito del Batolito de Mogotes	Srmbm	0,201601	0,19%
Suelo residual riolita y dacitas del Batolito de Mogotes	Srrdbm	0,049228	0,04%
Suelo residual de metacalizas de la Formación Bocas	Srmb	0,024645	0,02%
Suelo transportado aluvial	Sta	2,873722	2,74%
Suelo transportado de abanico aluvial	Staa	15,402123	14,72%

Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)



6.1.2.5.1. Cobertura de la tierra. En la zona de estudio se identificaron 18 tipos de coberturas que abarcan desde tejidos urbanos, pastos, mosaicos, bosques, plantaciones forestales, arbustales, vegetación secundaria y herbazales como se presenta en la Tabla 11, de la misma manera, la descripción de cada tipo de cobertura se encuentra en el Apéndice F.

Tabla 11*Coberturas de la tierra año 2020 en la zona de estudio*

Tipo de cobertura	Código	Área [Km²]	[%]
Tejido urbano continuo	111	0,51669	0,49%
Tejido urbano discontinuo	112	0,106344	0,10%
Otros cultivos permanentes herbáceos	2211	8,289719	7,92%
Pastos limpios	231	19,572004	18,70%
Pastos enmalezados	233	5,308128	5,07%
Mosaico de pastos y cultivos	242	6,429201	6,14%
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	11,609055	11,09%
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	17,864841	17,07%
Bosque denso alto de tierra firme	31111	6,658974	6,36%
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	3131	2,34396	2,24%
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	3132	0,036564	0,03%
Bosque de galería y ripario	314	2,314199	2,21%
Plantación forestal	315	0,535851	0,51%
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	321111	2,024062	1,93%
Arbustal denso	3221	0,749479	0,71%
Arbustal abierto	3222	7,535432	7,20%
Vegetación secundaria alta	3231	6,471925	6,18%
Vegetación secundaria baja	3232	6,262095	5,98%

6.1.2.5.2. Vocación de uso de suelo. En la zona de estudio se identificaron 5 vocaciones de uso de suelo distribuidas en, Agrícola con uso principal en cultivos permanentes intensivos de clima medio; Conservación de suelos con uso principal de conservación y recuperación de la erosión; Forestal que presenta dos usos principales, el de protección – producción y forestal de protección; también, presenta vocación Ganadera con uso principal de pastoreo intensivo de clima medio y por último se encuentran las Zonas urbanas cómo se presenta en la Tabla 12, de igual manera, la descripción de cada tipo de cobertura se encuentra en el Apéndice F.

Tabla 12

Vocación de Uso de Suelo 2017 para la zona de estudio

Vocación	Uso principal	Área [Km²]	[%]
Agrícola	Cultivos permanentes intensivos de clima medio	11,168585	10,67%
Conservación de Suelos	Conservación y Recuperación Erosión	16,918938	16,17%
Forestal	Protección – producción	23,930327	22,87%
	Forestal de protección	44,3489	42,38%
Ganadera	Pastoreo extensivo de clima medio	7,914247	7,56%
Zonas urbanas	Zonas urbanas	0,347548	0,33%

6.2. Análisis de susceptibilidad por Movimientos en Masa

El análisis de susceptibilidad representa el primer paso para la zonificación de la amenaza y la evaluación del riesgo (SGC, 2017). En este estudio, se obtuvieron resultados a partir de la aplicación del método de pesos de evidencia (WofE) permitiendo identificar áreas con diferentes niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.

6.2.1. Susceptibilidad por Movimientos en Masa tipo deslizamiento y tipo flujo

6.2.1.1. Unidad de análisis. La unidad de análisis seleccionada fue el píxel, ya que este permite agrupar un conjunto de condiciones comunes dentro de límites específicos y diferenciarse de las unidades adyacentes. Esta elección facilitó la asociación de atributos cualitativos y cuantitativos, optimizando el manejo de los datos en un entorno SIG (SGC, 2017). Por lo tanto, se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) con una resolución de píxel de 12,5m x 12,5m, obtenido a partir del sensor ALOS-PARSAL del año 2010 (University of Alaska Fairbanks, 2010).

6.2.1.2. Aislamiento de la información. Los insumos necesarios para la aplicación del método se acondicionaron mediante la conversión de las capas a formato ráster, considerando la resolución espacial y el área de estudio. Como resultado, la capa de Subunidades Geomorfológicas se rasterizó por unidad definida, mientras que la capa de uso de suelo se procesó según el grupo de uso principal. La rasterización de la capa de cambio de cobertura se basó en el tipo de cambio, y las capas de pendientes y curvatura se derivaron directamente del modelo digital de elevación (SGC, 2017), obteniendo así una base de datos espaciales coherente y precisa.

6.2.1.3. Variable de agrupamiento. Permite establecer una correlación clara entre las condiciones geo-ambientales y la inestabilidad del terreno, en donde las zonas inestables fueron identificadas como áreas donde los procesos morfodinámicos mostraron una relación estadística significativa con los factores condicionantes, permitiendo validar la hipótesis de falla.

En el caso de estudio, esta variable fue definida a partir de la agrupación de los polígonos individuales de las áreas con movimientos en masa de tipo deslizamiento y flujo; para los movimientos en masa representados como puntos, se realizó un buffer de 12,5m.

6.2.1.4. Método pesos de evidencia (WofE). El método aplicado, basado en un enfoque bayesiano, permitió cuantificar las relaciones entre los factores condicionantes y la ocurrencia de movimientos en masa. A través de la asignación de pesos probabilísticos, se evaluó la influencia individual de cada factor en la inestabilidad del terreno (Bonham, (1994) citado en Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Cada variable analizada presentó un peso de evidencia específico siguiendo la propuesta del SGC (2017). El cruce entre el inventario de movimientos en masa y las variables clasificadas reveló una asociación clara entre los movimientos registrados y las categorías de cada factor condicionante. Los cálculos de los pesos de evidencia positivos (W_i^+) y negativos (W_i^-), realizados en una hoja de cálculo de Excel, permitieron integrar esta información en un modelo de susceptibilidad mediante herramientas SIG, de lo cual se obtuvo el Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI), permitiendo evaluar la probabilidad de ocurrencia de futuros movimientos en masa en el área de estudio. Este procesamiento de datos fue documentado en tablas como se aprecia en el Apéndice G.

6.2.1.5. Hipótesis de falla. De acuerdo con el análisis realizado con base en la fotointerpretación preliminar, la información secundaria del área de estudio se plantea como hipótesis de falla preliminar, conforme a la valoración realizada en campo y los factores condicionados utilizados para este caso de estudio (UGS, subunidades Geomorfológicas, pendientes, curvatura, distancia a fallas, cobertura, uso de suelo, etc.) como indicativos de inestabilidad.

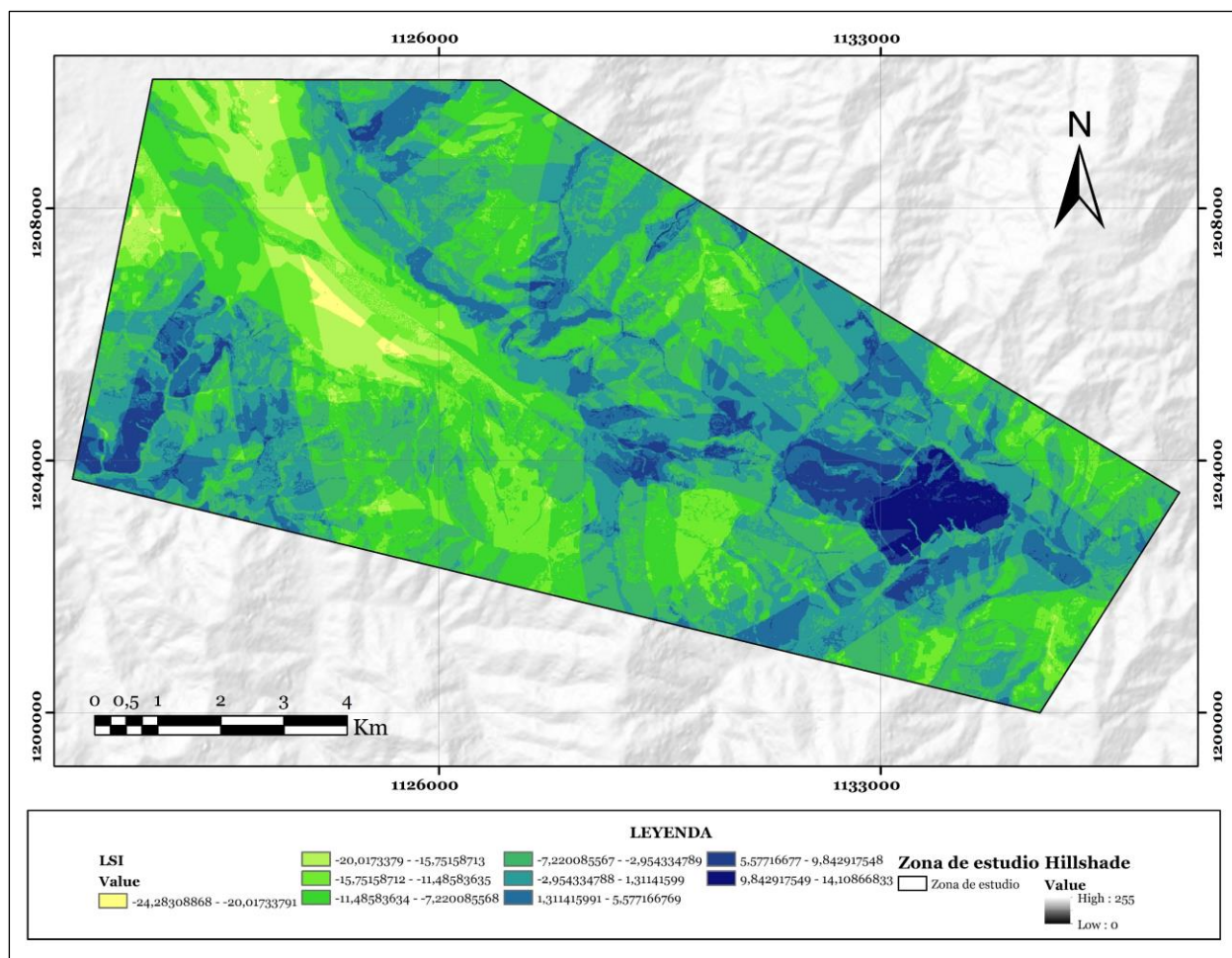
En consecuencia, para los movimientos en masa de tipo deslizamiento se plantea que, de acuerdo con las características expuestas a nivel morfométrico y morfogenético se divide la zona

en 2 áreas principales: occidental y suroriental. La zona occidental es la que presenta mayor cantidad de movimientos en masa, esta área se caracteriza tener un relieve relativo elevado lo que se relaciona con tener una marcada relación tectónica relacionado con las Fallas Mogotes, Los Negros, y San José. también presentan unos valores de pendientes que varían entre los 24° a los 69°, de acuerdo con las diferentes laderas. Por otra parte, el área suroriental, presenta principalmente un ambiente denudativo, donde la gran mayoría de la estas son lomos denudados de diferentes tipos, sin embargo, también es afectado por fallas inferidas como la Falla Blanco y el lineamiento La Mela.

6.2.1.6. Cálculo de la función de susceptibilidad. A partir de los resultados obtenidos en la hoja de cálculo (Apéndice G), se presenta la función final de susceptibilidad (LSI). Este valor corresponde a la suma de los pesos finales (W_f) calculados para cada una de las categorías de cada variable seleccionada.

$$LSI = W_f Pendiente + W_f Curvatura + W_f UGS + W_f Geomorfología + W_f cobertura \\ + W_f Cambio de Cobertura + W_f Uso de suelo + W_f Rugosidad + W_f Distancia fallas$$

Los resultados obtenidos del cálculo de LSI en la zona de estudio (Figura 13). De acuerdo con esto se puede observar que los valores que se encuentran de tonalidades azules son los de mayor peso, es decir, los más susceptibles a generar movimientos en masa y, por el contrario, las tonalidades verdosas y amarillas representan las zonas con menor peso, es decir, las zonas menos susceptibles a la generación de movimientos en masa.

Figura 13*Mapa de rangos LSI*

6.2.1.7. Pruebas de validación. Para el caso del LSI resultante, se escogieron dos pruebas de validación, la curva de éxito y la curva de validación, para corroborar la eficiencia del método bivariado para los movimientos en masa de tipo deslizamiento y flujo, y la ocurrencia de estos en la zona de estudio. Todos los cálculos realizados se encuentran en el Apéndice H.

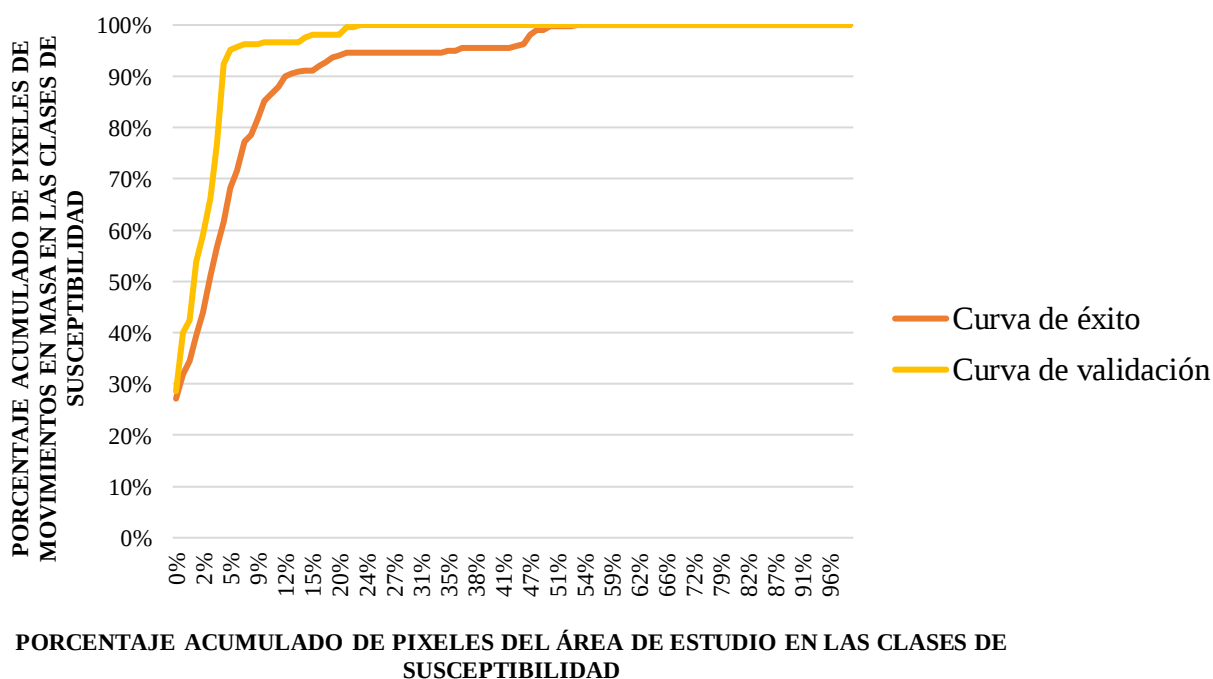
6.2.1.7.1. Curva de éxito. Para el cálculo del área bajo la curva, se obtuvo un resultado del 93,825%, lo cual indica un muy buen ajuste del modelo respecto a los datos de los movimientos en masa, deduciendo así que las causas planteadas como hipótesis de fallas con explicadas por la función calculada.

6.2.1.7.2. Curva de validación. Para la curva de validación se siguió la misma metodología, con la diferencia de qué esta curva se elaboró considerando el área total de estudio y usando el 30% restante de los movimientos en masa considerados en el análisis. Para el cálculo del área bajo la curva, se obtuvo un resultado del 97,417% lo que indica un muy buen ajuste del modelo respecto a los datos de los movimientos en masa.

A la hora de superponer ambas curvas, se puede observar que la diferencia entre ellas es del 3,592%, lo cual muestra un buen ajuste de la modelación de susceptibilidad (Figura 14).

Figura 14

Curva de validación y curva de éxito



6.2.1.8. Categorización de la susceptibilidad por deslizamientos y flujos. De acuerdo con los resultados obtenidos y basados en los criterios del SGC (2017), las áreas de alta susceptibilidad se identificaron como aquellas con mayor densidad de deslizamientos en relación con el área, representando mpas del 75% de los movimientos en masa registrados. Por otro lado, las zonas de susceptibilidad media mostraron una desdidad menor, pero con la probabilidad de ocurrencia eventual de deslizamientos, correspondiendo a un máximo del 25% de los movimientos en masa. Finalmente, las áreas de baja susceptibilidad se caracterizaron por una densidad mínima de deslizamientos, con valores inferiores al 2% de los movimientos en masa de la zona. En la Tabla 13 se presenta la categorización detallada de la susceptibilidad y en la Figura 16 se muestra el mapa final de la suseptibilidad por movimientos en masa escala 1:25.000 para la zona de estudio.

Figura 15

Diagrama ilustrativo del porcentaje de la categorización de la susceptibilidad en la zona de estudio

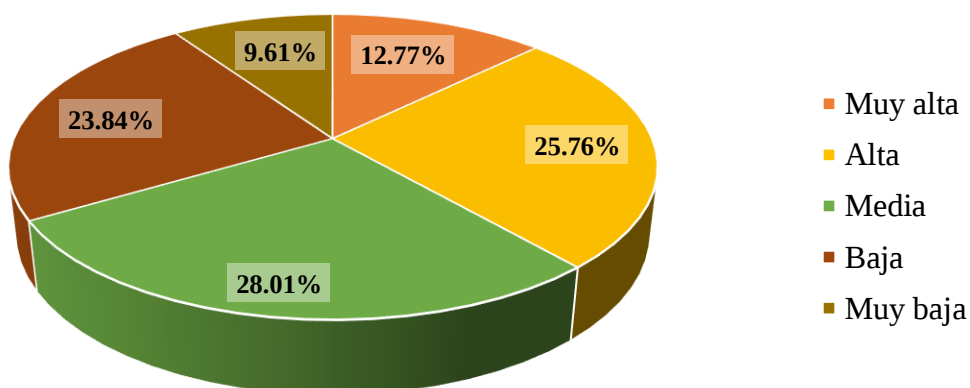
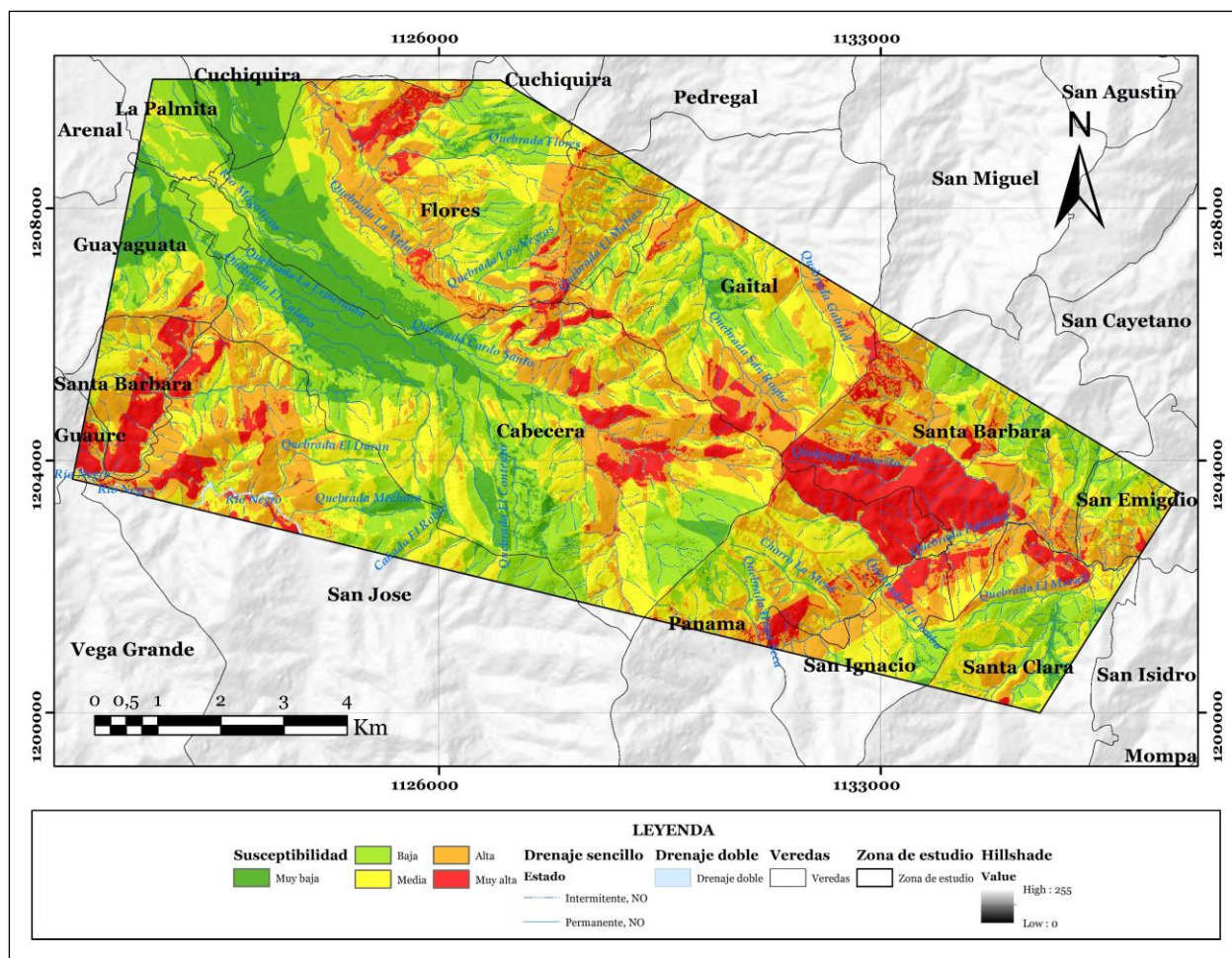


Tabla 13*Categorización de la susceptibilidad en la zona de estudio*

Susceptibilidad por movimientos en masa		
Categoría	Área [Km²]	[%]
Muy alta	13,62	12,77%
Alta	27,47	25,76%
Media	29,87	28,01%
Baja	25,42	23,84%
Muy baja	10,25	9,61%

Figura 16

Mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo en el área de estudio



6.2.1.8.1. Susceptibilidad muy baja. El área se distribuye principalmente en las veredas Cabecera, Flores, Cuchiquira y Guayaguata, abarcando una superficie de 10,25 Km² que representa el 9,61% de la zona de estudio. Aunque en esta categoría no se han identificado movimientos en masa, el área se encuentra próximo a zonas con mayor susceptibilidad a estos fenómenos.

Esta región se caracteriza geológicamente por la presencia de rocas de calidad variable, entre las que destacan cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha, así como metalodolitas de Formación Floresta, ambas de calidad intermedia. También se encuentran rocas de mala calidad de la Formación Bocas y de muy mala calidad del leucogranito del Batolito de Mogotes. complementando, los suelos transportados de origen aluvial provenientes del abanico aluvial sub-reciente. Se presenta una variedad de geoformas distribuidas en dos ambientes principales: denudacional y fluvial. En el ambiente denudacional se observan lomas denudadas, una cuenca denudada y laderas denudadas; Mientras que en el ambiente fluvial predominan el abanico aluvial sub-reciente y el abanico aluvial actual. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes suaves que oscilan entre 0° y 12°.

La cobertura del suelo en esta zona es diversa e incluye otros cultivos permanentes herbáceos, mosaico de pastos y cultivos, tejido urbano continuo, cultivos permanentes herbáceos, vegetación secundaria alta y baja, bosque denso alto de tierra firme. Esta pluralidad de coberturas está relacionada con el uso de suelo, que va orientado hacia cultivos permanentes intensivos de clima medio y actividades de protección – producción.

6.2.1.8.2. Susceptibilidad baja. El área se distribuye principalmente en las veredas Cabecera, Flores, Cuchiquira y Guayaguuata, cubriendo una superficie de 25,42 Km² que representa un 23,84% de la zona de estudio. Aunque en esta categoría no se han identificado movimientos en masa, el área se encuentra próximo a zonas con mayor susceptibilidad a estos fenómenos.

En esta zona geológicamente se caracteriza por la presencia de rocas de calidad intermedia, como las cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha, así como el monzogranito, riolitas y dacitas del Batolito de Mogotes. Además, se encuentra leucogranito del mismo batolito, cuya calidad varía entre intermedia, mala y muy mala. Las geoformas presentes se distribuyen en tres ambientes: estructural, denudacional y fluvial. En el ambiente estructural predominan sierras y lomeríos estructurales; mientras que en el denudacional se observan lomas denudadas, lomos denudados, una cuenca denudada, laderas denudadas, lomeríos disectados. Por su parte, el ambiente fluvial está comprendido de escarpes de abanico aluvial, el abanico aluvial sub-reciente y el abanico aluvial actual. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre 0° y 24°.

Las coberturas vegetales y el uso de suelo en esta zona son igualmente variados. Se encuentran tejidos urbanos continuos, cultivos permanentes herbáceos, otros cultivos permanentes herbáceos, bosque denso alto de tierra firme, arbustal abierto, mosaico de pastos con espacios naturales y pastos enmalezados.

6.2.1.8.3. Susceptibilidad media. El área se distribuye principalmente en las veredas Cabecera, Flores, Gaital y San Emigdio, ocupando una superficie de 29,87 Km², lo que representa el 28,01% de la zona de estudio. En esta categoría se han identificado 2 movimientos en masa, donde 1 corresponde a deslizamiento y 1 corresponde a flujo.

Geológicamente esta región se caracteriza por la presencia de una variedad de rocas con diversas calidades, entre las que destacan cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha, que van de mala a muy mala calidad; metalodolitas de la Formación Floresta, de mala calidad; y leucogranito y monzogranito del Batolito de Mogotes, que presentan calidades intermedias y malas. En cuanto a geoformas, el área muestra una diversidad de ambientes que incluyen el estructural, denudacional y fluvial. En el ambiente estructural predominan sierras, lomeríos estructurales y espolones, mientras que en el denudacional se observan laderas erosivas, lomos denudados, cimas, lomeríos disectados, laderas denudadas. Por su parte, el ambiente fluvial se expresa a través de escarpes de abanico fluvial y el abanico aluvial sub-reciente. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que oscilan entre 12° y 36°.

La cobertura de la tierra de la zona está compuesta principalmente por arbustales abiertos, mosaicos de pastos con espacios naturales, pastos limpios y vegetación secundaria baja. Esta combinación de coberturas está estrechamente relacionada con el uso del suelo, que se encuentra orientado hacia actividades forestales de protección y protección – producción.

6.2.1.8.4. Susceptibilidad alta. El área de interés se distribuye principalmente en las veredas San José, Flores, Cabecera, San Ignacio y Santa Barbara, abarcando una superficie de 27,47 Km² lo que representa un 25,76% de la zona de estudio. En esta categoría se han identificado 6 movimientos en masa, de los cuales 5 corresponden a deslizamientos, y 1 a flujos.

En esta zona prevalece una variedad de calidades de roca, en las que se encuentran esquistos del Chicamocha, clasificados como de mala calidad; cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha, que presentan una calidad intermedia a mala; metalodolitas de la Formación Floresta, también de mala calidad. Además, se identifican rocas del monzogranito y leucogranito del Batolito de Mogotes, con calidades que oscilan entre intermedia, mala y muy mala, así como riolitas y dacitas del mismo batolito, consideradas de muy mala calidad. Complementan suelos residuales derivados de cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha, junto con suelo transportado de origen aluvial. En términos geomorfológicos, el área presenta una variedad de geoformas que se desarrolla en dos ambientes principales: estructural y denudacional. En el primero, destacan espolones, lomos de falla, cerros estructurales, mientras que en el segundo predominan lomos denudados, laderas erosivas, escarpes de erosión mayor y lomeríos muy disectados. Estas geoformas se encuentran asociadas a pendientes que varían entre 24° y 69°.

La cobertura vegetal presenta gran variedad, con presencia de pastos limpios, mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaicos de pastos con espacios naturales, herbazales densos de tierra firme, vegetación secundaria alta y baja y arbustales abiertos. Estas coberturas se relacionan directamente con el uso del suelo, que se orienta principalmente hacia actividades forestales de protección, protección – producción, conservación y recuperación de áreas afectadas por erosión.

6.2.1.8.5. Susceptibilidad muy alta. Esta área comprende principalmente las veredas Santa Barbara, Flores, Cabecera, Santa Barbara y Panamá y cubre un área de 13,62 Km² que representa un 12,77% de la zona de estudio. En esta categoría se han identificado 62 movimientos en masa, de los cuales 44 corresponden a deslizamientos, 9 flujos y 9 a una combinación de ambos.

Esta región está caracterizada por rocas de calidad variable. Entre ellas se presenta rocas de mala calidad de esquistos de los esquistos del Chicamocha; metalodolitas de la Formación Floresta, que oscilan entre rocas de mala y muy mala calidad; y riolitas y dacitas del Batolito de Mogotes, que exhiben calidad intermedia y muy mala. Además, se encuentra leucogranito también del Batolito de Mogotes, clasificados como rocas de mala calidad, así como suelos residuales del monzogranito y leucogranito de la misma formación. En cuanto a geoformas, el paisaje muestra una combinación del ambiente estructural y denudacional. El primero, predominan lomos de falla, espolones, laderas abruptas, lomeríos estructurales, mientras que en el segundo se observan lomos denudados, laderas erosivas, lomeríos muy disectados, laderas onduladas y cerros remanentes. Estas características se acompañan de pendientes que varían entre 24° y 48°, lo que contribuye a la dinámica morfogenética del área.

La cobertura de la tierra en la zona es diversa igualmente, con presencia de pastos limpios, bosques de galería y ripiano, mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales. En cuanto al uso del suelo, predomina la destinación a actividades forestales de protección, protección-producción, conservación y recuperación de áreas afectadas por erosión.

7. Conclusiones

El mapa de Unidades Geológicas Superficiales dio como resultado la identificación de rocas con calidad que va desde buena a muy mala, así como suelos residuales y transportados. La única unidad que posee rocas de buena calidad son las riolitas y dacitas del Batolito de Mogotes, mientras que las demás unidades cuentan con rocas de intermedia, mala y muy mala calidad y suelo residual. Gracias los controles realizados en campo se pudieron identificar otras unidades diferentes a las que se encuentran en el mapa geológico de la plancha H12, como una porción de rocas metacarbonatas, en este caso, metacalizas de la Formación Bocas, ubicada en la parte sur de la zona; a su vez, una diferenciación de las rocas ígneas pertenecientes al Batolito de Mogotes, tales como monzogranito, leucogranito y riolitas y dacitas, y otra diferenciación de las rocas que corresponden a los Esquistos del Chicamocha, tales como esquistos y cuarcitas y filitas.

La evolución geomorfológica del paisaje está definida en gran parte por la presencia de los dos abanicos aluviales que se encuentran en la parte occidental de la zona de estudio, donde se ubica el municipio de Mogotes; esto favorece la generación de procesos denudacionales que dan como resultado la presencia de lomos denudados de diferentes longitudes, de formas alargadas que se encuentran delimitados por drenajes. Asimismo, se encuentran geoformas de ambiente fluvial también gracias al abanico y las quebradas que se encuentran de forma homogénea por toda el área. Finalmente, la zona cuenta con varias fallas definidas e inferidas que han generado y modelado geoformas de origen estructural, es especial la falla Mogotes, que cruza el área de estudio de oeste a este. Gracias a esto se pudo generar un mapa geomorfológico mucho más detallado a una escala 1:25.000 de la zona de estudio.

Para la cobertura de la tierra se identificaron 18 tipos de categorías diferentes en la zona de estudio, entre las cuales están tejido urbano continuo (0,49%), tejido urbano discontinuo (0,10%),

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

otros cultivos permanentes herbáceos (7,92%), pastos limpios (18,70%), pastos enmalezados (5,07%), mosaico de pastos y cultivos (6,14%), mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (11,09%), mosaico de pastos con espacios naturales (17,07%), bosque denso alto de tierra firme (6,36%), bosque fragmentado con pastos y cultivos (2,24%), bosque fragmentado con vegetación secundaria (0,03%), bosque de galería y ripario (2,21%), plantación forestal (0,51%), herbazal denso de tierra firme no arbolado (1,93%), arbustal denso (0,71%), arbustal abierto (7,20%), vegetación secundaria alta (6,18%) y vegetación secundaria baja (5,98%). Respecto al uso de suelos se identificaron 5 vocaciones y sus usos principales: agrícola, con cultivos permanentes intensivos de clima medio (10,67%), conservación de suelos, con conservación y recuperación erosión (16,17%), forestal, con usos de protección – producción (22,87%) y forestal de protección (42,38%), luego ganadería, con pastoreo extensivo de clima medio (7,56%) y finalmente zonas urbanas (0,33%).

Para la zona de estudio se recopilaron un total de 70 movimientos en masa, de cuales 50 son de tipo deslizamiento, 9 de flujo y 11 son de tipo deslizamiento y flujo; estos movimientos fueron identificados mediante el campo realizado en la zona, foto interpretación mediante Google Earth y los datos del SIMMA. Se encuentran separados en 4 zonas críticas: la primera en las veredas de Gaital, Santa Barbara (San Joaquín) y Panamá, y cuenta con 30 movimientos en masa, la segunda se encuentra ubicada en las veredas de Santa Barbara (Mogotes) y Guayaguata, y cuenta con un total de 17 movimientos en masa, siguiendo con la tercera, ubicada en la vereda Flores con 13 movimientos en masa y finalmente la cuarta, ubicada en la vereda Cabecera, con un total de 10 movimientos en masa.

El método bivariado es una buena opción a la hora de realizar análisis y estudios sobre movimientos en masa de tipo deslizamiento y flujo ya que evalúa patrones de asociación entre los

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

factores condicionantes (en este caso 9) y las áreas inestables mediante pesos, esto permite considerar la probabilidad incondicional y condicional de la ocurrencia de un movimiento en masa. Los resultados obtenidos mediante este método arrojan una clasificación de 5 rangos de susceptibilidad para la zona de estudio, que se clasifican en muy alta (12,77%) relacionada con calidad intermedia, mala y muy mala y suelo residual de los Esquistos del Chicamocha, la Formación Floresta, y el Batolito de Mogotes, comprende geoformas de los ambientes estructural y denudacional, y pendientes que van de 24° a 48°, alta (25,76%) corresponde a rocas de calidad intermedia, mala y muy mala de los Esquistos del Chicamocha, la Formación Floresta y el Batolito de Mogotes, respecto a la geomorfología se relaciona con los ambientes estructural y denudacional, y presenta pendientes que van de 24° a 69°, media (28,01%) comprende las rocas de calidad intermedia, mala y muy mala de las cuarcitas y filitas de los Esquistos del Chicamocha, de la Formación Floresta y leucogranito y monzogranito del Batolito de Mogotes, también se encuentra relacionada con los ambientes estructural, denudacional y fluvial y presenta pendientes que van de 12° a 36°, baja (23,84%) que comprende rocas de calidad intermedia, mala y muy mala de los Esquistos del Chicamocha, y del Batolito de Mogotes, con geoformas de ambiente estructural, denudacional y fluvial, y pendientes que van de 0° a 24°, y muy baja (9,61%), que está relacionada con rocas de calidad intermedia, mala y muy mala de los Esquistos del Chicamocha, la Formación Floresta, la Formación Bocas, el leucogranito del Batolito de Mogotes y con suelo transportado, respecto a geomorfología con el ambiente fluvial y el denudacional, y con pendientes que van de 0° a 12°.

Finalmente, los resultados de este proyecto de investigación son satisfactorios y coherentes con la información recopilada, las evidencias recolectadas en campo y los análisis realizados, se

evidencia una curva de éxito del 93,825%, indicativo de un buen ajuste del modelo respecto a los movimientos en masa y la ocurrencia de estos en la zona de estudio.

Gracias a este trabajo de investigación se pudieron conocer a mayor detalle las características geológicas, geomorfológicas de la zona, y las coberturas y uso del suelo, así como otros aspectos relacionados con la morfometría del terreno en el área de estudio, que comprende la zona entre los municipios de Mogotes y San Joaquín.

8. Recomendaciones

Este trabajo de investigación ha seguido la metodología propuesta por el SGC, (2017) hasta la etapa de susceptibilidad. Es por esto por lo que, a continuación, se presenta una serie de recomendaciones cuyo objetivo es incrementar el conocimiento de la susceptibilidad y amenaza en la zona de estudio.

Se recomienda profundizar en estudios geotécnicos y de cobertura y uso de suelo para así contar con información más detallada y determinar el grado de inestabilidad del terreno, permitiendo así la implementación de medidas para la estabilización de zonas críticas y monitoreo constante de taludes

Se sugiere que se haga una recopilación fotogeológica mediante equipos como sensores o drones que permitan una mayor calidad para la interpretación de los movimientos en masa observados en campo y con esto profundizar y completar el estudio de amenaza en la zona de estudio con el fin de mejorar el conocimiento del área de estudio y sus zonas aledañas.

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MM

Se invita a los organismos públicos de los municipios de Mogotes y San Joaquín a tomar este documento como insumos para estudio de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa.

Referencias bibliográficas

Bonham Carter, G. F. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Ottawa: Pergamon Press, 13.

Camacho Rodríguez, D. Y. (2017). *Petrografía de las metasedimentitas aflorantes al sureste de Mogotes, Santander* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander.

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27–29. <https://doi.org/doi:10.1007/bf02590167>

Díaz Villamizar, S. (2022). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL CON ÍNDICES ESPECTRALES PARA EL ESTUDIO DE FACTORES RELACIONADOS CON LA SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS EN MASA EN MOGOTES, SANTANDER*. [Tesis de pregrado]. Universidad de los Andes, Bogotá.

Dirección de Gestión del Riesgo Santander. (2021). *Protocolo de atención de emergencia en la comunidad*. Santander.
<https://santander.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=5102>

Gobernación de Santander. (19 de mayo de 2023). *En San Joaquín se atiende emergencia generada por fuertes lluvias*. Sede Electrónica Gobernación de Santander: <https://santander.gov.co/publicaciones/9251/en-san-joaquin-se-atiende-emergencia-generada-por-fuertes-lluvias/>

Ingeominas. (1984). Geología de la Plancha 136 Málaga [Mapa]. 1:100.000.

<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=Memoria+Explicativa+Mapa+Geol%C3%B3gica+de+la+Plancha+136>

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>

Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C. A., & Valencia, V. A. (2016, Julio 03). Nuevas evidencias que soportan la escisión de la formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia). *Ciencias de la tierra*, 40(155), 320-336. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.303>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Organización de las Naciones Unidas para la Gestión del Riesgo de Desastres: <https://www.un-spider.org/es/riesgos-y-desastres/ONU-y-gesti%C3%B3n-del-riesgo-de-desastres#no-back>

Pastrana Caviedes, J. S., & Blair Camacho, S. D. (s.f.). *ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA FRANJA MOGOTES-ONZAGA, MACIZO DE SANTANDER [Tesis de pregrado]*. Unniversidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

PMA. (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina, una guía para la evaluación de amenazas* (Vol. 4). (S. N. Minería, Ed.) Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2830>

Rey Ardila, G. A. (2020). *ASISTENCIA TÉCNICA EN EL ESTUDIO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELECTRICA EN EL MUNICIPIO DE ONZAGA, SANTANDER*. [Tesis de pregrado]. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga.

Ruiz Peña, G. L., Navarro Alarcón, S., Chaparro Cordón, J. L., Gamboa Rodríguez, C. A., Ramírez Hernández, K. C., Camargo Holguín, B. L., . . . Pérez Cerón, R. (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/https://doi.org/10.32685/9789589952887>

Secretaría de Planeación y Obras Públicas del municipio de Mogotes. (2020; 2023). *Proceso: Gestión del Riesgo y Ambiental*. Santander, Mogotes.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2014). Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa Plancha 136 Málaga. [Mapa].

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2014). Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Plancha 136 Málaga [Mapa]. 1:100.000.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA ESCALA 1: 25.000*.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2024). *Sistema de información de movimientos en masa*. SIMMA: <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>

UNGRD. (17 de 11 de 2022). *UNGRD registra 9 departamentos con más afectaciones por temporada de lluvias en las últimas horas*. Portal Gestión del Riesgo:

<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2022/UNGRD-registra-9-departamentos-con-mas-afectaciones-por-temporada-de-lluvias-en-las-ultimas-horas.aspx>

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia*. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx#:~:text=De%20acuerdo%20con%20datos%20de,familias%20se%20han%20visto%20afectadas.>

University of Alaska Fairbanks. (25 de Septiembre de 2010). *ASF Data Search*. EarthData: [https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&polygon=POLYGON\(\(-73.0184%206.4016,-72.844%206.4016,-72.844%206.4974,-73.0184%206.4974,-73.0184%206.4016\)\)&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP248720110-RTC_HI_RES&zoom=8.909¢er=-73.220,5.766&productTypes=RTC](https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&polygon=POLYGON((-73.0184%206.4016,-72.844%206.4016,-72.844%206.4974,-73.0184%206.4974,-73.0184%206.4016))&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP248720110-RTC_HI_RES&zoom=8.909¢er=-73.220,5.766&productTypes=RTC)

Valencia Ortiz, J., Martínez-Graña, A., & Méndez, L. (2023). Evaluation of Susceptibility by Mass Movements through Stochastic and Statistical Methods for a Region of Bucaramanga, Colombia. *Remote Sensing*, 15(18), 45-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15184567>

Velandia Patiño, F. A. (2017). *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga [Tesis doctoral]*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.