

**DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCION
EN MASA EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO, A PARTIR DEL USO DE
ANÁLISIS ESPACIAL**



**DANIEL FRANCISCO COMBARIZA FERNANDEZ
INGENIERO GEOLOGO**

**ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA
UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
JULIO 2022**

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	5
2	ABSTRACT	5
3	INTRODUCCIÓN	6
4	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
5	OBJETIVOS	10
5.1	OBJETIVO GENERAL	10
5.2	OBJETIVO ESPECIFICO	10
5.3	ÁREA DE ESTUDIO	10
6	INFORMACIÓN BASE	11
7	METODOLOGÍA	12
7.1	IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA	12
7.2	IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE FACTORES DIRECTA O INDIRECTAMENTE RELACIONADOS CON LA OCURRENCIA DE MOVIMIENTOS EN MASA	13
7.2.1	Unidades geológicas	13
7.2.2	Geomorfología	13
7.2.3	Unidades de cobertura del suelo	15
7.2.4	Uso del suelo	15
7.3	ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE CADA FACTOR CONDICIONANTE EN LA OCURRENCIA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA. 16	
7.4	ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	18
7.5	La evaluación del desempeño del modelo y su capacidad de predicción CON LA CURVA DE ÉXITO	18
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
8.1	IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA	18
8.2	IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE FACTORES DIRECTA O INDIRECTAMENTE RELACIONADOS CON LA OCURRENCIA DE MOVIMIENTOS EN MASA	20
8.2.1	Unidades geológicas	20
8.2.2	Geomorfología	22

8.2.3	Unidades de cobertura del suelo	26
8.2.4	Uso del Suelo	27
8.3	ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE CADA FACTOR CONDICIONANTE EN LA OCURRENCIA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA. 28	
8.4	ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.....	32
8.5	LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO Y SU CAPACIDAD DE PREDICCIÓN CON LA CURVA DE ÉXITO.....	34
8.6	DISCUSIÓN	35
9	CONCLUSIONES	37
10	RECOMENDACIONES	38
11	BIBLIOGRAFÍA	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Localización general del municipio de Sogamoso. Fuente Imagen: galería ArcGis, Base IGAC.....	11
Figura 2.	Metodología para la zonificación de procesos de remoción en masa. 12	
Figura 3.	Mapa de procesos de remoción de masa. Fuente: Autor	19
Figura 4.	Geología del área de estudio. Fuente: Modificado SGC.....	21
Figura 5.	Pendientes del área de estudio. Fuente: Autor.....	22
Figura 6.	Curvatura del terreno. Fuente: Autor.	24
Figura 7.	Geomorfología del área de estudio. Fuente: Modificado SGC.	25
Figura 8.	Cobertura del suelo. Fuente: Modificado mapa de Cobertura IDEAM 2018. 27	
Figura 9.	Uso del Suelo. Fuente: Autor.....	28
Figura 10.	Zonificación de la susceptibilidad procesos de remoción en masa. Fuente: Autor.....	33
Figura 11.	Curva de éxito (ABC=87.97%). Fuente: Autor	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Fuentes de información para la construcción del mapa de susceptibilidad geotécnica.....	11
Tabla 2.	Reclasificación de las pendientes. Fuente: (Rodríguez Castiblanco et	

al., 2017).	14
Tabla 3. Reclasificación de la curvatura plana del terreno.	14
Tabla 4. Relación de deslizamientos L y factor condicionante w . Fuente: (Rodríguez Castiblanco y otros, 2017)	16
Tabla 5. Área de los procesos de remoción en masa identificados en el municipio de Sogamoso.	19
Tabla 6. Área de las unidades geológicas presentes en el municipio de Sogamoso.	21
Tabla 7. Clase de pendientes.	23
Tabla 8. Área unidades geomorfológicas identificadas en el municipio de Sogamoso.	25
Tabla 9. Área cobertura del suelo en el municipio de Sogamoso	26
Tabla 10. Área uso del suelo en el municipio de Sogamoso.	27
Tabla 11. Peso de las unidades geológicas en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.	29
Tabla 12. Peso de las categorías de pendiente en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.	29
Tabla 13. Peso de las categorías de curvatura del terreno en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.	30
Tabla 14. Peso de las unidades geomorfológicas del terreno en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.	30
Tabla 15. Peso de las unidades de cobertura del terreno en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.	31
Tabla 16. Peso de las unidades de uso de suelo en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.	32
Tabla 17. Susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Sogamoso.	34

1 RESUMEN

Con el fin obtener la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Sogamoso a escala 1:25.000, se realizó una suma de mapas involucrando variables temáticas espaciales como las unidades geológicas, unidades geomorfológicas, pendiente del terreno, curvatura del terreno, unidades de cobertura del suelo, uso de suelo y delimitación de procesos de remoción en masa existentes, donde se aplica un método estadístico bivariado (peso – evidencia) para la determinación del índice de susceptibilidad a deslizamientos implementando la “Guía metodología para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en escala 1:25,000”, propuesta por el Servicio Geológico Colombiano en el 2017. Logrando como resultado una clasificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en cuatro categorías correspondientes con baja 24%, media 68%, alta 6.9% y muy alta 1.1% del área total del municipio. Encontrando que los desarrollos urbanos se deben proyectar hacia la zona del valle aluvial, y los proyectos industriales, proyectos lineales o de asentamientos humanos hacia la zona montañosa requieren estudios geotécnicos que incluyan la estabilidad de las laderas.

2 ABSTRACT

In order to obtain the susceptibility to mass removal processes in the municipality of Sogamoso at a scale of 1: 25,000, a sum of maps was made involving spatial thematic variables such as geological units, geomorphological units, slope of the terrain, curvature of the terrain, units of land cover, land use and delimitation of existing mass removal processes, where a bivariate statistical method (weight - evidence) is applied to determine the index of susceptibility to landslides, implementing the “Methodology Guide for the zoning of the threat due to mass movements on a scale of 1: 25,000 ”proposed by the Colombian Geological Survey in 2017. As a result, achieving a classification of susceptibility to mass removal processes in four corresponding categories with low 24%, medium 68%, high 6.9% and very high 1.1% of the total area of the municipality. Finding that urban developments should be projected towards the alluvial valley area, and industrial projects, linear projects or human settlement towards the mountainous area require geotechnical studies that include the stability of the slopes.

3 INTRODUCCIÓN

En diversas partes del mundo los desastres asociados a la inestabilidad de laderas generan impactos negativos en la sociedad, ambiente y economía. Además de las pérdidas de vidas, los daños sobre los suelos, las viviendas e infraestructura son frecuentes; en los últimos años, el deterioro y pérdida en la infraestructura vial ha sido importancia. En las diferentes zonas del país suelen ser afectadas por inestabilidad de laderas de manera recurrente (Galindo Serrano y Alcántara Ayala, 2015).

La zonificación del territorio como instrumento de planificación facilita la identificación de áreas con características comunes físicas, biológicas, humanas e institucionales, bien sea en la superficie terrestre o marina, que pueden ser interpretadas como objetivos para la gestión territorial. La aplicación de sistemas de información geográfica debe estar respaldada por información que permita evaluar los diferentes procesos naturales que identifican la heterogeneidad y particularidad de una extensión de terreno (Villa, 2016).

Los métodos más usados para el análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa se basan en la hipótesis de que las condiciones en que ocurrieron los movimientos en masa son indicativas de las condiciones en las que puedan generarse en el futuro. Este enfoque resalta la necesidad de tener inventarios completos de movimientos en masa en un sector determinado, antes de realizar cualquier análisis de susceptibilidad. Existen diferentes métodos para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, donde la implementación se deriva de aspectos como el tamaño del área de estudio, el tipo de movimiento en masa, la información disponible, la escala de análisis y el conocimiento de los expertos que ejecutan los estudios.

Una completa revisión sobre los tipos de métodos disponibles para este tipo de análisis, requiere de información y ejemplos de aplicación. Es importante resaltar que estos métodos no deben ser automatizados y dependen en gran medida del conocimiento experto del área de estudio (Van Westen, 2013).

En el área del municipio de Sogamoso se han presentado movimientos en masa que han afectado la infraestructura en áreas que actualmente se utilizan como terrenos agrícolas, áreas residenciales o vías. Estas afectaciones generan pérdidas económicas y detrimento en la calidad de vida de los habitantes de Sogamoso, por este motivo se han implementado planes de ordenamiento territorial que permitan

establecer un uso eficiente y racional del suelo, que prevenga afectaciones a la infraestructura y a la comunidad en general por eventos naturales o intervenciones antrópicas. En este sentido es importante identificar los diferentes tipos de riesgos que se presentan en el municipio de Sogamoso, dentro de los que se encuentra el riesgo a procesos de remoción en masa.

4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Los deslizamientos se pueden explicar cómo el movimiento hacia abajo de un macizo rocoso (R M y Dolui, 2021), escombros menores o arena en la pendiente debido a la inmensa gravedad de la Tierra (C.J.F. Chung, 2003). Las influencias geomorfológicas y geológicas son la principal causa determinante de deslizamientos de tierra ((P. Tsangaratos, 2016), (L. Highland, s/f)) y se considera que son desencadenadas o iniciadas por otros factores, por ejemplo, aguaceros, terremotos, actividad intensa de volcanes, cambios en las aguas subterráneas y actividades de los humanos modernos (H. Hemasinghe, R.S.S. Rangali, N.L. Deshapriya, 2018). Los deslizamientos de tierra provocados por las precipitaciones son un problema general en zonas montañosas ((NDMG, 2009),(L. Ayalew, 2004),(T. Ayenew, 2005)), como es el caso del territorio del municipio de Sogamoso.

Para el mapeo de la susceptibilidad de deslizamientos a escala 1:50.000, los factores que son considerados contribuyentes a la ocurrencia de deslizamientos deben ser mapeados. Estos factores pueden diferir en las diferentes localizaciones, pero los más importantes según (Van Westen, 2013) son:

- A. Capas topográficas: Modelo digital de elevación, zonas altitudinales, grados de pendiente, dirección de la pendiente, longitud de la pendiente, área de contribución superior.
- B. Factores relacionados con el drenaje: Secciones de erosión de los ríos principales, cercanía a corrientes de erosión, distancia desde el inicio de la corriente.
- C. Capas geológicas: Mapa litológico, mapa de tipo de suelo, mapa de fallas.
- D. Capas relacionadas con la cobertura del suelo: Cobertura del suelo (existente), cobertura del suelo (10 años atrás), cambios en la cobertura del suelo, cortes de vías, edificaciones con cortes en taludes.
- E. Capas relacionadas con factores desencadenantes: Distribución espacial de los aguaceros máximos, mapa de aceleraciones sísmicas máximas (solo en áreas sísmicamente propensas).

F. Deslizamientos: Mapeo de deslizamientos de tierra más antiguos a través de interpretación de imágenes, deslizamientos de tierra históricos verificados en campo.

En los últimos cincuenta años los sistemas de información geográfica han evolucionado, de ser una herramienta a convertirse en una poderosa plataforma para comprender eventos naturales y antrópicos, y planificar el uso de los recursos naturales.

Existen varios métodos de evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos a través de SIG. Soeters y van Westen (1996), Aleotti y Chowdhury (1999) y Guzzetti et al. (1999), entre otros autores, generan conocimiento de los más utilizados, dentro de los que se tienen principalmente los métodos estadísticos, determinísticos, indexación y de evaluación directa de la susceptibilidad. Las condiciones de funcionamiento de cada método a un área de interés depende sobre todo de las características y extensión de dicha area, de la extensión del proceso, del tipo de deslizamientos existentes, de la escala de trabajo y de los datos geotécnicos e hidrogeológicos disponibles (Hervas, 2001).

Con respecto a la utilización de los Sistemas de información geografica en estudios de amenaza de movimientos en masa, Mora y Vahrson (1993), realizaron estudios sobre casos donde se presentaron fallas de taludes en Centroamérica y propusieron un método de predicción de la amenaza, donde tienen tres factores principales relacionados con la susceptibilidad como: relieve relativo, condiciones litológicas y humedad.

El método aplicado para la valoración de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa requiere la creación de información base mediante la selección de cartografía y mapas temáticos de los factores condicionantes del terreno y de la inestabilidad. Para ello se utilizan técnicas, como la fotointerpretación, visitas de inspección en campo, calibración de modelos, tratamiento digital de imágenes de satélite, Modelo digital del terreno (DEM) de alta resolución (Hervas, 2001).

En América Latina se han realizado estudios sobre el campo de investigación de procesos de remoción en masa, destacando los realizados por (Mora Chinchilla, Cahves Gamboa y Vásquez Fernández, 2002) en el que se aplica una modificación de la metodología propia para la determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos de Mora-Vahrson, incluyendo el ángulo de la pendiente del terreno en lugar del índice relativo de relieve, incluye además la consideración de

parámetros de resistencia al corte de los suelos y la clasificación de macizos rocosos de Bieniawski (1989) en el parámetro de susceptibilidad litológica. Logrando con su aplicación una mejor comprensión de los procesos de remoción en masa en el área de análisis, lo cual incide en su desarrollo eficiente y duradero (Mora, R. et al., 1992).

En el Valle de Aburrá, (Hidalgo Montoya & Vega Gutiérrez, 2014) realizó la estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia, utilizando sistemas de información geográfica, considerando la topografía, geología, geotecnia e hidrología de la zona de estudio, implementando un modelo pseudoestático de Newmark con enfoque probabilístico calculando la probabilidad que se presente un deslizamiento posterior a un sismo. Obteniendo resultados de probabilidad de falla del 100% en suelos saturados con una aceleración horizontal de 0.2 g en los corregimientos Las Palmitas, San Cristóbal, Altavista y Santa Elena.

En Cali (Arango D, 2001) implementa un análisis determinativo de riesgos por deslizamientos de suelos en el área de la comuna 20, seleccionada debido a sus características topográficas, determinando una zona que corresponde al 36.4% del área de la comuna con riesgo alto, adicionalmente incluye que se requieren desarrollar métodos novedosos para la ponderación de los resultados en miras de obtener un modelo mejor calibrado.

En 2016 (Abril González, Amaya Reyes y Fonseca Peralta, 2016), realizaron la evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011), en el que, mediante un método heurístico en sistemas de información geográfica, se establecieron las zonas de alta, media y baja susceptibilidad a procesos de remoción en masa en las veredas Cheva, Tintoba, Ovejeras, Cocubal y La estancia, a escala 1:10.000.

El análisis de la condición del departamento de Boyacá frente a la susceptibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa, se realizó sobre el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de Colombia, elaborado por el IDEAM en el año 2010, donde se identificó que las condiciones del territorio de Boyacá podrían afectarse en más del 50% de su territorio.

El Servicio Geológico Colombiano presentó en el año 2018 el mapa de susceptibilidad a remoción en masa de la plancha 172 y 192 a escala 1:100.000, en las que se encuentra el área del municipio de Sogamoso, en esta se evidencian niveles de susceptibilidad entre baja a alta, donde la zona de susceptibilidad baja

se encuentra principalmente en la zona de valle de Sogamoso y en la zona de relieve montañoso se encuentran áreas con susceptibilidad media a alta.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la zonificación de la susceptibilidad de procesos de remoción en masa del municipio de Sogamoso a escala 1:25.000, implementando algebra de mapas.

5.2 OBJETIVO ESPECIFICO

Identificar las unidades geológicas y geomorfológicas que son más susceptibles a la generación de procesos de remoción en masa.

Realizar el análisis espacial de las variables para la zonificación de procesos de remoción en masa en el municipio de Sogamoso.

5.3 ÁREA DE ESTUDIO

En la base cartográfica escala 1:100.00 del IGAC el municipio de Sogamoso se localiza en el departamento de Boyacá en la sección centro del departamento, entre la longitud 72.971° y 72.793° oeste y la latitud 5.586° y 5.776° norte. El municipio de Sogamoso limita por el norte con los municipios de Nobsa, Corrales y Topaga, por el oriente con los municipios de Mongui, Mongua y Aquitania, por el sur con los municipios de Aquitania y Cuitiva y por el occidente con los municipios de Iza, Firavitoba y Tibasosa (**Figura 1**). En el modelo de elevación del Alos Palsar el municipio de Sogamoso tiene una elevación máxima de 3979. m.s.n.m y mínima de 2484 m.s.n.m, con una elevación media de 2569 m.s.n.m.

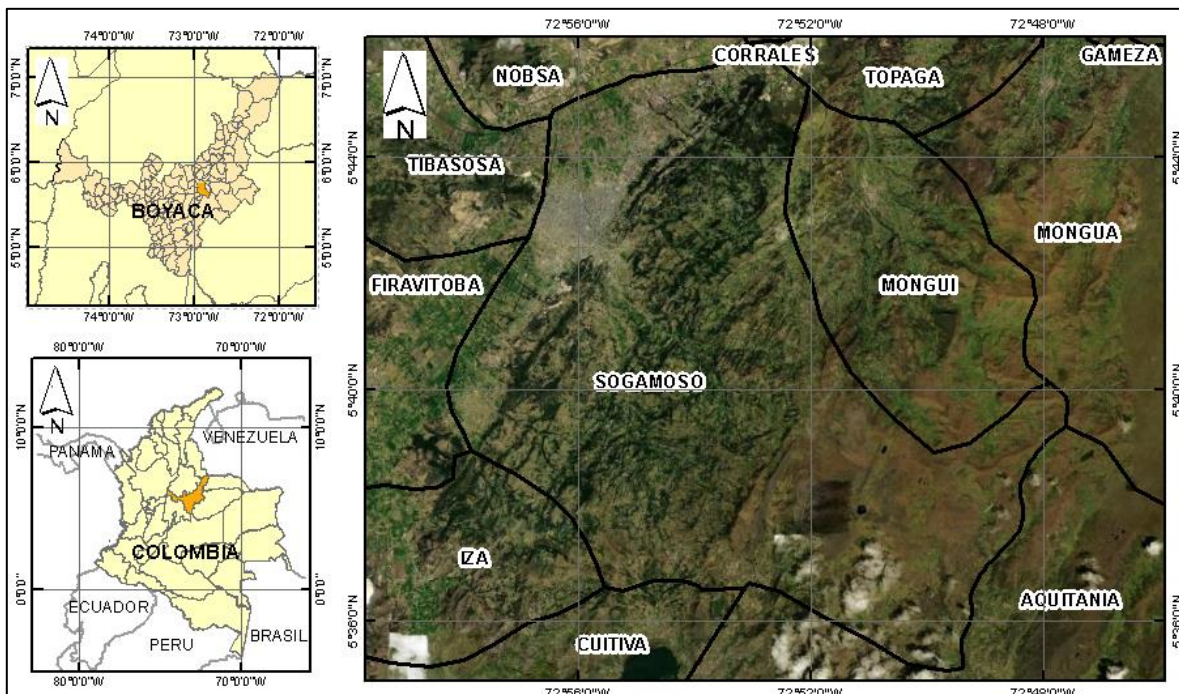


Figura 1. Localización general del municipio de Sogamoso. Fuente Imagen: galería ArcGis, Base IGAC.

6 INFORMACIÓN BASE

Como fuentes de información se cuenta con la proveniente de entidades gubernamentales IDEAM, SGC, IGAC e información libre de imágenes satelitales (Tabla 1).

Tabla 1. Fuentes de información para la construcción del mapa de susceptibilidad geotécnica.

INFORMACIÓN	FUENTE
Modelo de Elevación Digital (DEM) 12.5 m píxel	Sensor Alos Palsar (AP_26885_FBS_F0100_RT1.tif) (2011)
Coberturas de la tierra, metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM - 2018
Plancha geológica 192 y 172 escala 1:100.000	Servicio Geológico Colombiano – SGC – actualizadas 2014
Plancha geomorfológica 192 y 172 escala 1:100.000	Servicio Geológico Colombiano – SGC - 2018
Imágenes Satelitales	Google Earth, ESRI
Base cartográfica escala 1:100.000	IGAC - 2018

7 METODOLOGÍA

Para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, (Guzzetti y otros, 2006), recomienda la ejecución de los siguientes pasos (**Figura 2**):

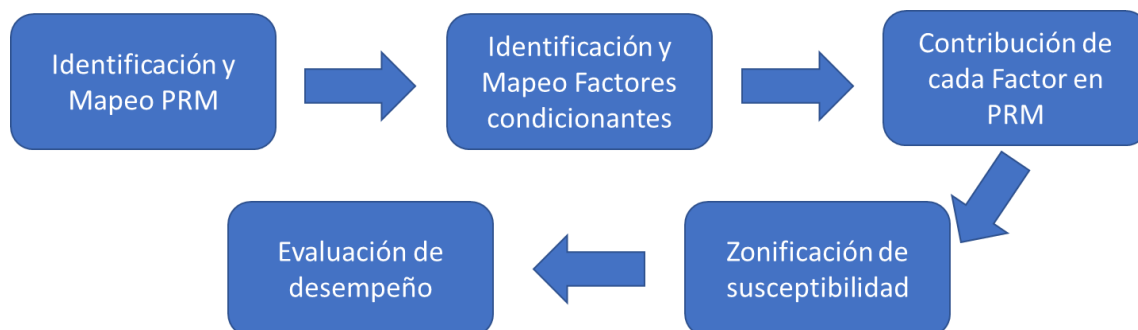


Figura 2. Metodología para la zonificación de procesos de remoción en masa.

7.1 IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA

La identificación de los movimientos en masa es de vital importancia para la determinación de la susceptibilidad con la implementación de métodos estadísticos, ya que proporcionan la fuente de comparación y calibración de los resultados finales obtenidos.

Inicialmente se revisó el registro de procesos de remoción en masa almacenado en el geoportal SIMMA del Servicio Geológico Colombiano, al que se puede acceder desde el link <http://simma.sgc.gov.co/> y se encuentra contenido un catálogo e inventario de procesos, categorizados por tipo de procesos, debidamente georeferenciados en coordenadas geográficas (WGS84), con descripción del proceso, esquemas, registro fotográfico, entre otras descripciones.

Posteriormente se realizó la delimitación de los procesos inventariados en el Servicio Geológico Colombiano, sobre imágenes satelitales de la galería de Google Earth, que poseen una resolución espacial aproximada de 1.0 m de tamaño de pixel.

En una segunda etapa se realizó la fotointerpretación de la totalidad del área del municipio de Sogamoso donde se delimitaron otros procesos de remoción en masa que no se encuentran incluidos en el registro de procesos del SIMMA.

Obteniendo de esta forma el inventario de procesos de remoción en masa para el municipio de Sogamoso.

7.2 IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE FACTORES DIRECTA O INDIRECTAMENTE RELACIONADOS CON LA OCURRENCIA DE MOVIMIENTOS EN MASA

Como se mencionó anteriormente la determinación de la susceptibilidad se realizó implementando la Guía metodológica propuesta por el Servicio Geológico Colombiano en el 2017, en esta se integran los siguientes factores relacionados con la ocurrencia de movimientos en masa.

7.2.1 Unidades geológicas

Las unidades geológicas representan un factor con relación directa en la ocurrencia de procesos de remoción, ya que las unidades geológicas enmarcan en gran medida las características físicas de las rocas que forman la superficie terrestre, clasificándolas de forma general principalmente en rocas de composición fina o granular, siendo una característica que se puede relacionar con la dureza y a su vez con la susceptibilidad. Por consiguiente, las rocas granulares generalmente son más duras y presentan una menor susceptibilidad a la formación de procesos de remoción en masa, por el contrario, rocas con granulometría fina generalmente son más susceptibles a generación de movimientos en masa.

Por este motivo y entre otros se incluyen las unidades geológicas como factor relacionado el cual es obtenido mediante el refinamiento de las unidades geológicas de las planchas geológicas en escala 1:100.000, con insumos satelitales como lo son las imágenes de la galería de Google Earth y el modelo digital de elevación del sensor Alos Palsar con resolución de 12.5 m el pixel.

Este refinamiento busca principalmente definir con mejor exactitud las áreas de depósitos recientes (Cuaternario). Donde especialmente los depósitos coluviales se pueden asociar directamente a procesos de remoción en masa tipo deslizamiento o flujo de tierras. Adicionalmente se pueden determinar áreas con desarrollo de suelos que no son cartografiables a escala 1:100.000.

7.2.2 Geomorfología

Las unidades geomorfológicas se relacionan con otros dos factores condicionantes en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, los cuales corresponden a la pendiente del terreno y la curvatura (plana) del terreno.

7.2.2.1 Pendientes del Terreno

La pendiente corresponde a un factor directo, donde a mayor pendiente del terreno mayor es la susceptibilidad del terreno a presentar procesos de remoción en masa, en este caso se realizó una reclasificación de las pendientes en siete categorías (**Tabla 2**).

Tabla 2. Reclasificación de las pendientes. Fuente: (Rodríguez Castiblanco et al., 2017).

INCLINACIÓN (°)	PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0-2	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable.
2-4	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (soliflucción) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4-8	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8-16	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente soliflucción periglacial, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos.
16-35	Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.
35-55	Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudación de escarpe"; susceptible a rodamiento de rocas.

7.2.2.2 Curvatura del terreno

La curvatura es un factor de relación directa en la ocurrencia de movimientos en masa, esta se obtiene con la herramienta "Curvatura plana" en el software Arcgis y se expresa en valores negativos y positivos, donde los valores negativos indican áreas cóncavas, los valores próximos a cero indican áreas planas y los valores positivos indican áreas convexas (**Tabla 3**).

Tabla 3. Reclasificación de la curvatura plana del terreno.

Valor de curvatura	Clasificación
< -4	Cóncavo
-4 a -0.5	Ligeramente cóncavo
- 0.5 a 0.5	Plano
0.5 a 4.0	Ligeramente convexo
>4.0	Convexo

7.2.2.3 Unidades Geomorfológicas

Finalmente, las unidades geomorfológicas representan un factor con relación

directa en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, ya que las unidades geomorfológicas representan en gran medida las características de modelamiento del terreno, es decir los procesos endógenos o exógenos a los que debe principalmente su forma el terreno en la actualidad.

En este factor se involucra la génesis, la morfo estructura y la morfodinámica, donde la morfodinámico hacer referencia directa a los procesos dinámicos que presentan en la actualidad las formas del terreno donde se encuentran los procesos denudativos y depositacionales.

Para el presente estudio, la delimitación de las unidades se realizó mediante la refinación de las unidades geomorfológicas definidas en las planchas geomorfológicas 172 y 192 del Servicio Geológico Colombiano, sobre imágenes satelitales de la galería de Google Earth y el modelo digital de elevación del sensor Alos Palsar con resolución de 12.5 m el pixel.

Este refinamiento busca principalmente definir con mejor exactitud las áreas con unidades asociadas a ambientes denudacionales que se asocian especialmente a procesos de remoción en masa.

7.2.3 Unidades de cobertura del suelo

Las unidades de cobertura del suelo representan un factor indirecto en la susceptibilidad de procesos de remoción en masa, ya que tienen una configuración temporal donde esta puede variar en el tiempo. Para la elaboración de la cobertura se utilizó como base el mapa de cobertura IDEAM 2018 y se reclasifica a través de clasificación supervisada de imágenes satelitales.

7.2.4 Uso del suelo

Los usos de los suelos se obtienen de la reclasificación de las coberturas del suelo y clasificación supervisada de imágenes satelitales obtenidas la Base de ESRI y Google Earth. Las unidades de uso del suelo representan un factor indirecto en la susceptibilidad de procesos de remoción en masa, ya que tienen una configuración temporal donde este puede variar en el tiempo. Las unidades de uso de suelo se determinan mediante la reclasificación de las unidades de cobertura del suelo en un nivel básico.

7.3 ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE CADA FACTOR CONDICIONANTE EN LA OCURRENCIA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA.

El método estadístico bivariado implementado para la determinación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables (pesos). El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa (Bonham Carter, 1994).

La probabilidad incondicional (previa) se calcula sobre los procesos de remoción en masa que ocurrieron en el pasado en un periodo determinado y puede ser ajustado para poder agregar una nueva evidencia con la que cambia la probabilidad y se genera entonces una probabilidad (condicionada) llamada probabilidad posterior (Bonham Carter, 1994). La probabilidad posterior resulta de la suma de los pesos de cada factor. Por cada mecanismo analizado se puede generar una función de probabilidad.

(Van Westen, 2013) plantea que en términos de píxeles el área “q” está compuesta por un número total de píxeles $N = N_{pix1} + N_{pix2} + N_{pix3} + N_{pix4}$, y que se cumplen las relaciones presentadas en la **Tabla 4**.

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

Tabla 4. Relación de deslizamientos L y factor condicionante w. Fuente: (Rodríguez Castiblanco y otros, 2017)

Donde los pesos se pueden expresar en términos de píxeles como pesos positivos que indican la importancia del factor condicionante en el deslizamiento y pesos

negativos que indican la importancia de la ausencia del factor condicionante en el deslizamiento.

Para el peso positivo se implementa la siguiente expresión.

$$W_i^+ = \ln \left[\frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}} \right]$$

Para el peso negativo se implementa la siguiente expresión.

$$W_i^- = \ln \left[\frac{\frac{Npix2}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}} \right]$$

Finalmente se define la expresión para la asignación final del peso de cada factor condicionante (W_f) (unidades de cada capa), mediante la diferencia del peso positivo (W_i^+) y el peso negativo W_i^- , como se presenta a continuación.

$$W_f = W_i^+ - W_i^-$$

En resultado del peso final será cero cuando la distribución espacial de los procesos de remoción en masa es independiente del factor considerado, es positivo cuando la presencia del factor contribuye a la ocurrencia del proceso de remoción en masa y es negativo cuando la ausencia del factor aporta a la ocurrencia del proceso de remoción en masa.

Conforme a la metodología se obtiene el índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (LSI), que corresponde a la suma algebraica de los pesos de cada variable asignado para cada unidad, este proceso se realiza de forma más eficiente mediante algebra de mapas, en este caso realizando la suma del peso de cada unidad geológica, geomorfológica, de pendiente, de curvatura, de cobertura de suelo y de uso de suelo.

En esta suma se obtienen valores de índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, donde los valores más bajos indican menor susceptibilidad a la generación de procesos de remoción en más y los valores más altos indican una mayor susceptibilidad.

7.4 ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Como lo propone la Metodología del Servicio Geológico Colombiano se realizó una categorización de la susceptibilidad para movimientos en masa correspondiente al LSI del 0% al 75% (% acumulado) de los procesos en masa identificados para la susceptibilidad alta, susceptibilidad media del 75% al 98% (% acumulado), susceptibilidad baja para los LSI entre el 98% al 100% (% acumulado) y finalmente susceptibilidad muy alta para los procesos que se encuentran activos en la actualidad.

Posteriormente se incluye la categoría de susceptibilidad muy alta en los procesos activos delimitados en el área de análisis, tal como lo establece la metodología de Servicio Geológico Colombiano.

7.5 LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO Y SU CAPACIDAD DE PREDICCIÓN CON LA CURVA DE ÉXITO

Se realizó la curva de éxito y validación para el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

La elaboración de la curva de éxito, se realizó conforme lo describe la metodología del SGC, donde se trazan en el eje "X" los grupos percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, donde a la izquierda se ubica el percentil 1 que corresponde a la calificación de susceptible y la derecha el percentil 100% donde se representa la calificación no susceptible. En el eje "Y" se ubican los valores porcentuales cada 1% de los procesos de remoción en masa correspondientes con el percentil del LSI (Blahut et al., 2010). Esta curva se construye en términos del área total de estudio y el área total de los movimientos en masa cartografiados (Rodríguez Castiblanco y otros, 2017).

8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Se realizó la revisión de los procesos que se encuentran en el municipio de Sogamoso reportados en el catálogo e inventario de procesos de remoción en masa del Sistema de información de movimientos en masa del Servicio Geológico

Colombiano (SIMMA), en el que se encontraron 20 registros en el área de análisis, los cuales corresponden con 20 deslizamientos de dos tipos traslacionales, rotacionales.

Posteriormente, se implementó la delimitación de procesos, a partir de la elaboración de capas cartográficas a través de las imágenes satelitales, factores litológicos y geología estructural, identificándose en el área de estudio 85 deslizamientos (D), 36 flujos de detritos (Fd), 27 flujos de tierras (Ft) (**Figura 3 y Tabla 5**).

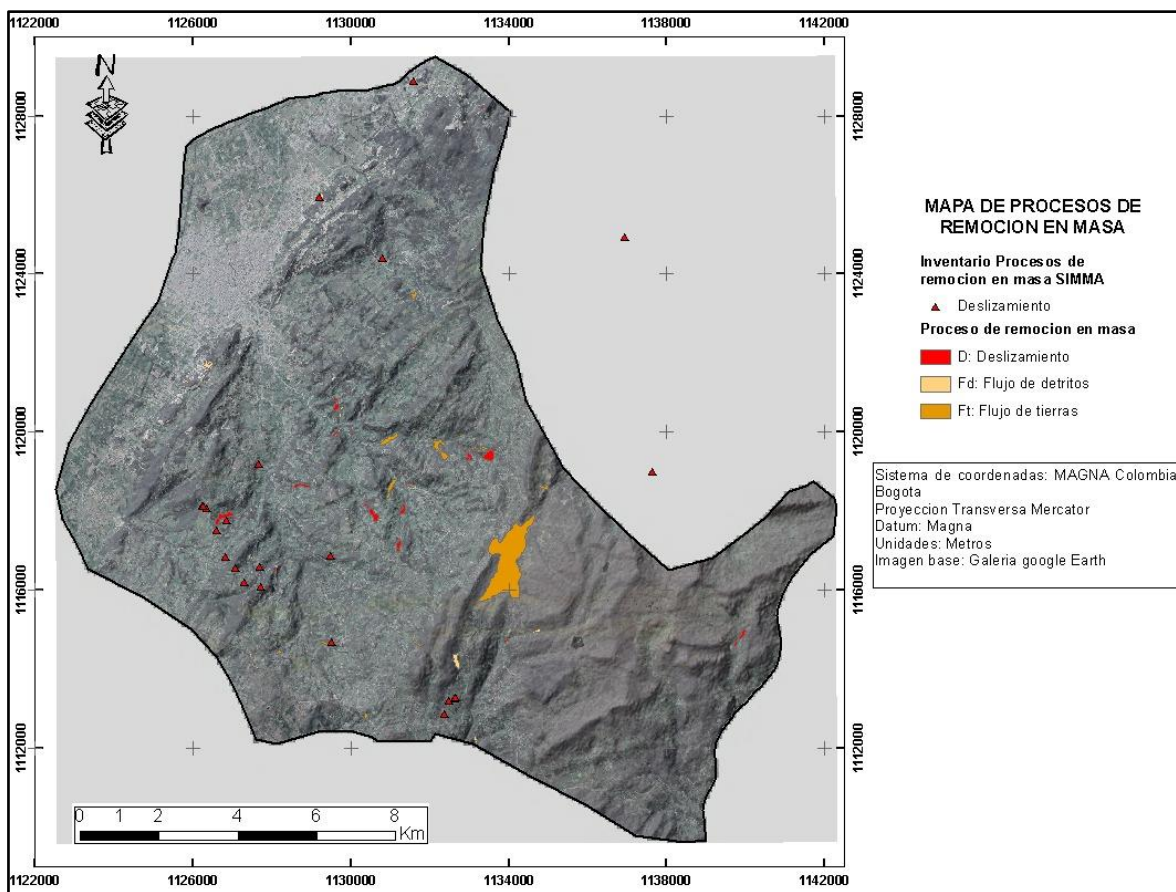


Figura 3. Mapa de procesos de remoción de masa. Fuente: Autor

Tabla 5. Área de los procesos de remoción en masa identificados en el municipio de Sogamoso.

Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)
D	3.6014	D	0.6443	D	3.163	Fd	0.0323	Fd	1.6934
D	2.7496	D	0.117	D	1.9229	Fd	0.0367	Ft	124.5299
D	6.1574	D	0.2504	D	6.2956	Fd	0.0891	Ft	0.066

Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)	Proceso	Área (Ha)
D	2.6582	D	0.289	D	3.6014	Fd	0.5573	Ft	0.4687
D	5.795	D	0.1678	D	2.7496	Fd	0.1265	Ft	0.4832
D	3.163	D	0.2509	D	6.1574	Fd	0.1777	Ft	1.9152
D	3.8571	D	0.2511	D	2.6582	Fd	0.1363	Ft	0.087
D	6.2956	D	0.6699	D	5.795	Fd	0.3662	Ft	0.5073
D	3.6014	D	0.1629	D	3.163	Fd	0.2389	Ft	1.4657
D	2.7496	D	0.1192	D	1.9229	Fd	0.0268	Ft	1.232
D	2.6582	D	0.0883	D	6.2956	Fd	0.0753	Ft	0.1946
D	5.795	D	0.4652	D	0.098	Fd	0.1949	Ft	3.6384
D	3.163	D	0.3417	D	3.6014	Fd	0.0768	Ft	0.4452
D	6.2956	D	0.046	D	2.7496	Fd	0.0892	Ft	0.3209
D	0.2895	D	0.2745	D	6.1574	Fd	0.1946	Ft	0.3586
D	0.66	D	0.0659	D	2.6582	Fd	0.0923	Ft	0.4936
D	0.2227	D	0.3926	D	5.795	Fd	0.2271	Ft	4.3588
D	0.4378	D	0.3759	D	3.163	Fd	0.1109	Ft	0.2837
D	0.2599	D	1.2085	D	1.9229	Fd	1.502	Ft	1.7431
D	0.0642	D	0.1713	D	6.2956	Fd	0.0634	Ft	0.2999
D	0.0789	D	1.6656	D	0.2021	Fd	0.0394	Ft	0.098
D	0.142	D	0.9397	D	0.6886	Fd	0.5297	Ft	0.787
D	0.2378	D	0.0985	D	0.2416	Fd	1.1024	Ft	1.7319
D	0.0986	D	0.365	D	1.1113	Fd	1.1056	Ft	1.1066
D	0.3776	D	0.4855	Dr	0.6058	Fd	0.2554	Ft	0.4235
D	0.0845	D	3.6014	Fd	0.1761	Fd	0.5297	Ft	7.006
D	0.1555	D	2.7496	Fd	4.1124	Fd	0.2561	Ft	0.1557
D	0.0635	D	6.1574	Fd	0.1006	Fd	0.1301	Ft	0.1337
D	0.1282	D	2.6582	Fd	0.1309	Fd	0.5546		
D	0.0585	D	5.795	Fd	0.0751	Fd	2.8369		

8.2 IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE FACTORES DIRECTA O INDIRECTAMENTE RELACIONADOS CON LA OCURRENCIA DE MOVIMIENTOS EN MASA

8.2.1 Unidades geológicas

El área de estudio se localiza sobre la cordillera oriental de Colombia, dentro de las planchas Geológicas 172 Paz de Río y 192 Laguna de Tota, escala 1:100.000 publicada por el Servicio Geológico Colombiano (**Figura 4** y **Tabla 6**).

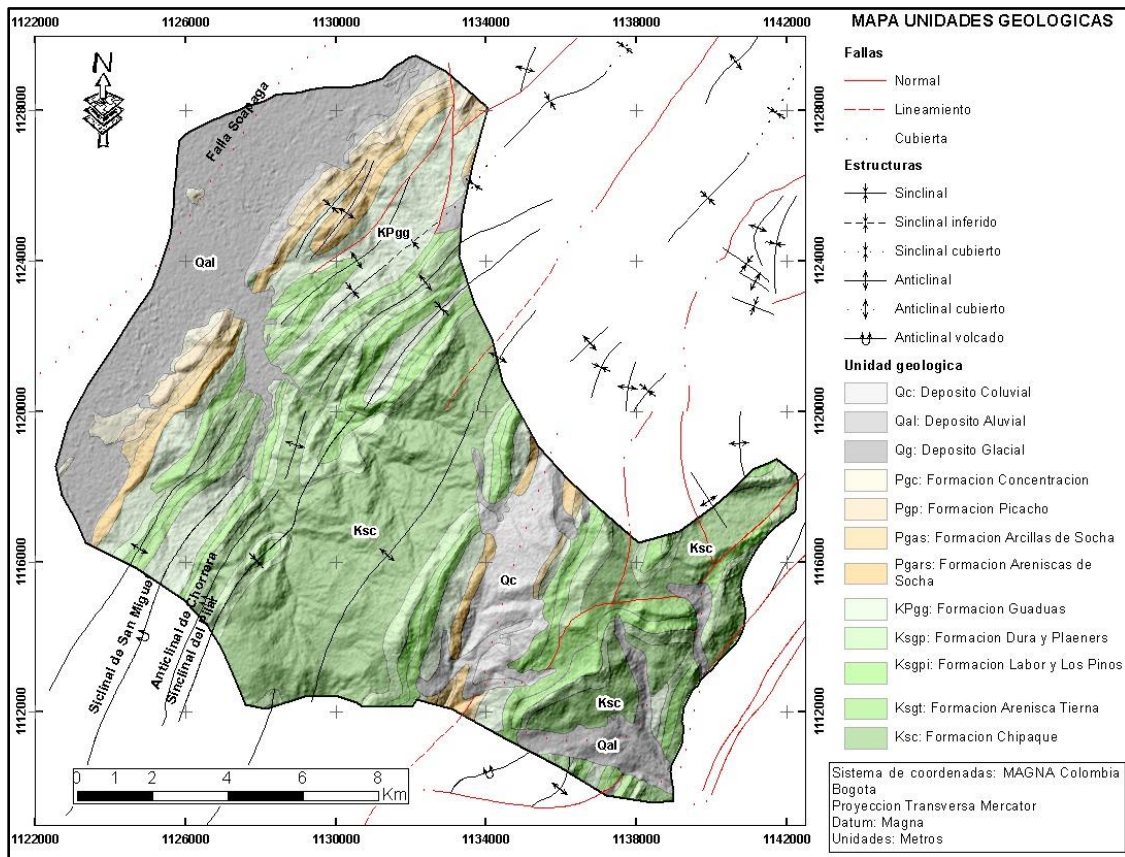


Figura 4. Geología del área de estudio. Fuente: Modificado SGC.

Tabla 6. Área de las unidades geológicas presentes en el municipio de Sogamoso.

Unidad geológica	Área (Ha)
Predominancia arenosa	
Formación Arenisca Tierna (Ksqt)	1490.7903
Formación Dura y Plaeners (Ksgp)	1370.8051
Formación Picacho (Pgp)	298.1636
Predominancia fina	
Formación Chipaque (Ksc)	5437.2623
Formación Guaduas (KPgg)	2518.1165
Formación Labor y Los Pinos (Ksgpi)	1453.4712
Formación Arenisca de Socha (Pgars)	720.2194
Formación Plaeners (Ksp)	634.3034
Formación Arcillas de Socha (Pgas)	464.6140
Formación Concentración (Pgc)	244.6590
Depósitos recientes	
Cuaternario aluvial (Qal)	4182.9427
Cuaternario coluvial (Qc)	851.4509

Unidad geológica	Área (Ha)
Cuaternario glacial (Qg)	69.0269

8.2.2 Geomorfología

8.2.2.1 Pendientes del Terreno

Se observa que en el área de estudio predominan las moderadamente abruptas a abruptas, seguido suavemente inclinado a inclinado y con menor proporción pendientes muy abruptas (**Figura 5**).

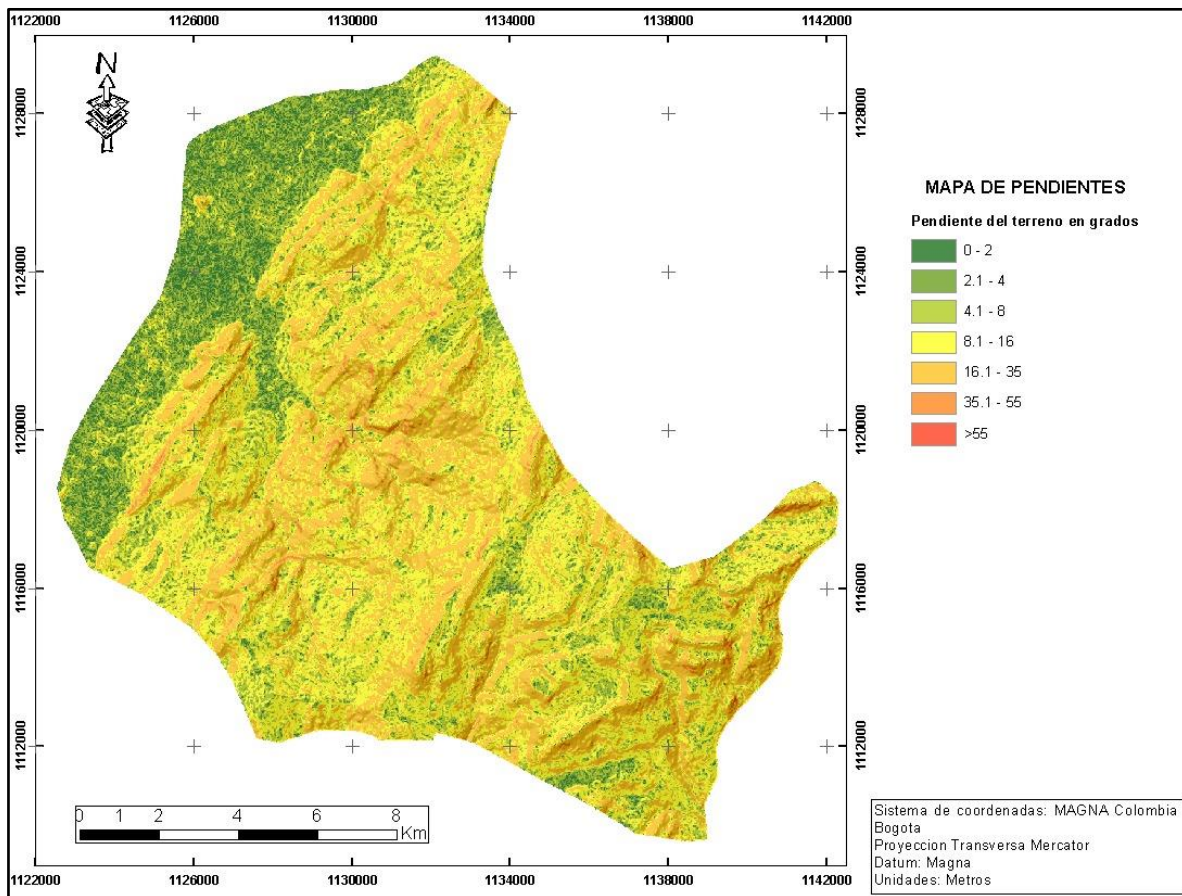


Figura 5. Pendientes del área de estudio. Fuente: Autor.

Las clases de pendientes se han clasificado de acuerdo a la modificación de Van Zuidam (1986) (**Tabla 7**).

Tabla 7. Clase de pendientes.

Inclinación (°)	Calificación	Área (Ha)
0 -2	Plano a casi plano	824
2 - 4	Suavemente Inclinado	1,593
4 -8	Inclinado	3,601
8-16	Moderadamente Abrupto	7,362
16- 35	Abrupto	6,123
35 -55	Muy Abrupto	231
> 55	Escarpado	1

8.2.2.2 Curvatura del Terreno

El valor de curvatura se calibró visualmente sobre el raster, buscando la configuración de valores que se aproxime de mejor manera a la realidad, los valores iniciales para la calibración son los sugeridos por el software Arcgis en la sección de ayudas, correspondiente a los intervalos entre valores -0.5 para superficies cóncavas, valores entre -0.5 a 0.5 para superficies planas y valores mayores a 0.5 para superficies convexas

La clasificación utilizada resultado de la calibración manual se estableció para superficies cóncavas con valores menores a -0.2, superficies planas entre -0.2 a 0.2 y superficies convexas para valores mayores a 0.2.

Encontrando que en el área del municipio posee aproximadamente una relación similar de superficies cóncavas, convexas y planas con un 35%, 34% y 31% respectivamente (**Figura 6**).

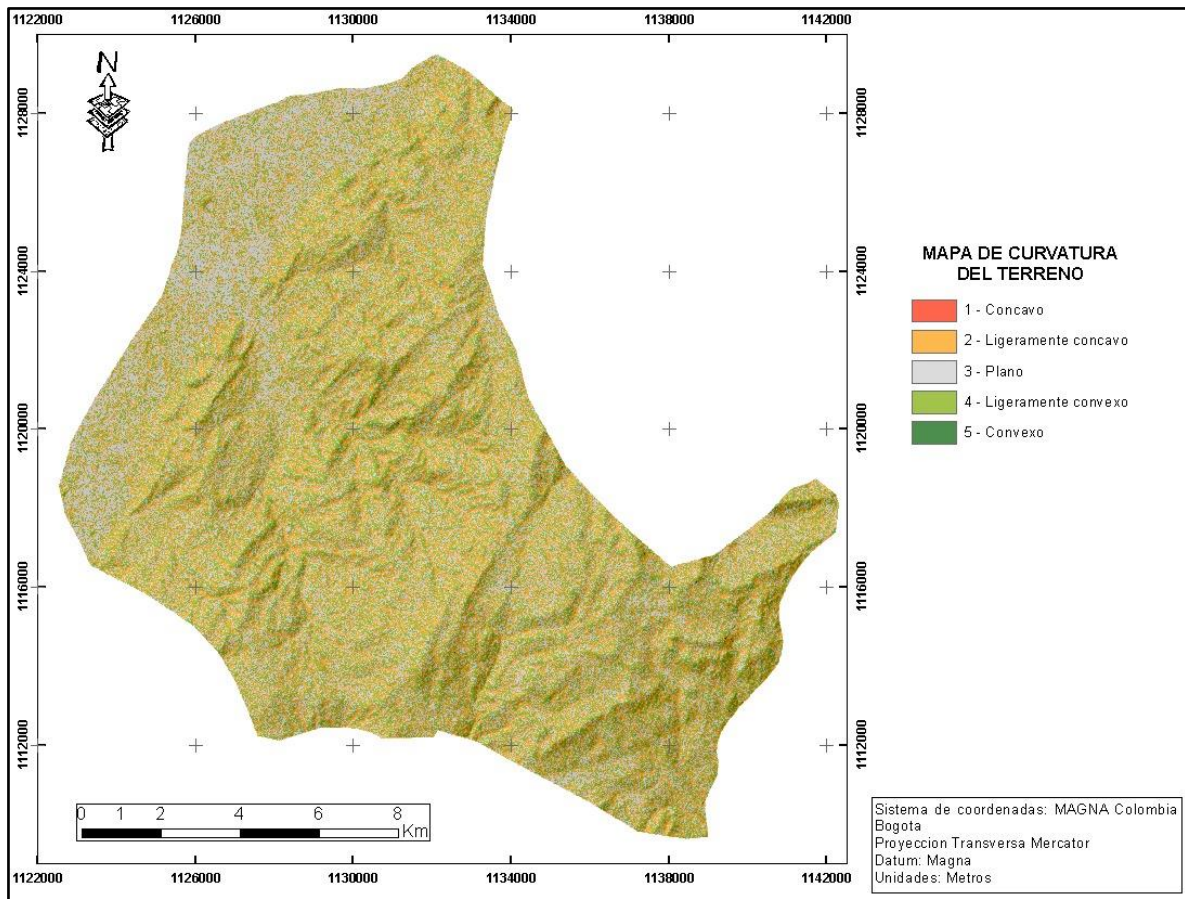


Figura 6. Curvatura del terreno. Fuente: Autor.

8.2.2.3 Unidades Geomorfológicas

El municipio de Sogamoso está conformado por geformas de origen denudacional, fluvial y lagunar, estructural, antrópico, glacial y periglacial. (Figura 7 y Tabla 8).

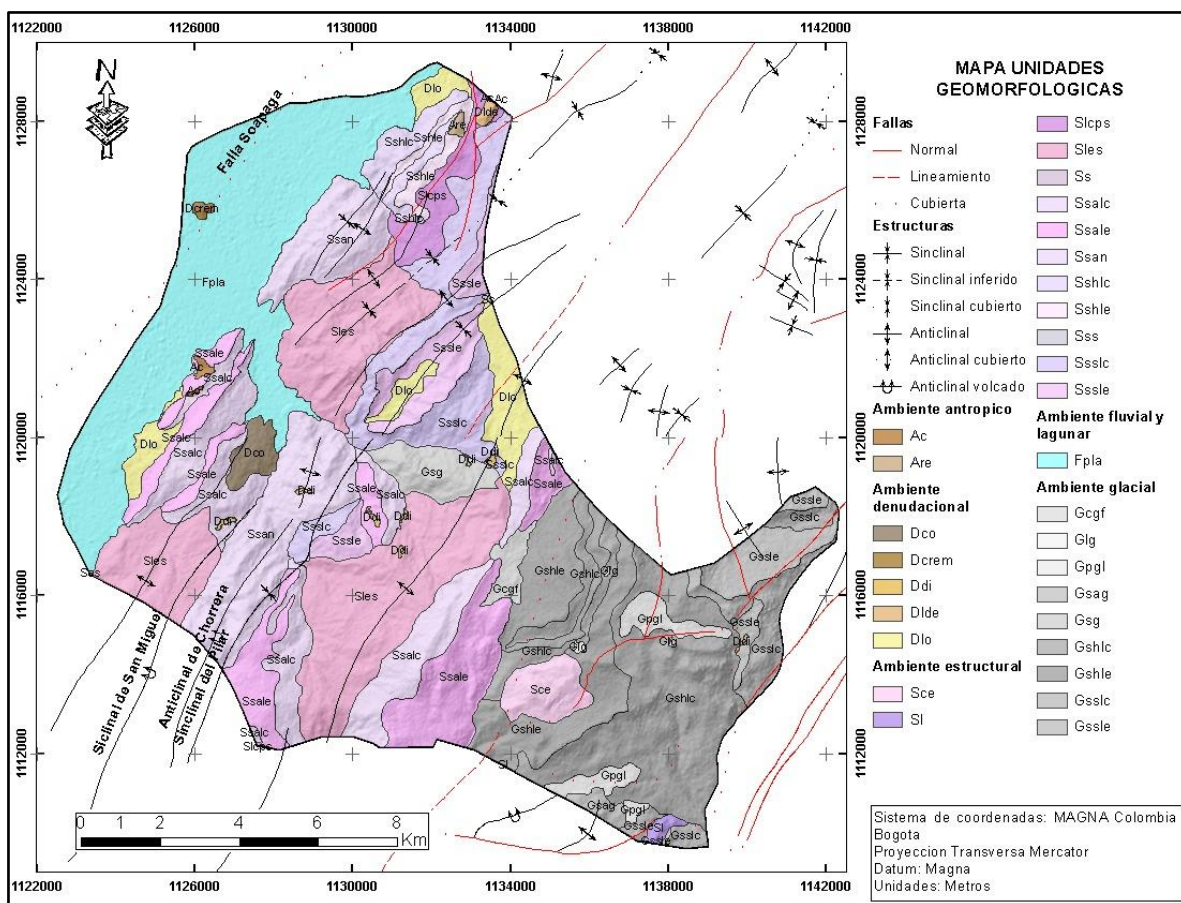


Figura 7. Geomorfología del área de estudio. Fuente: Modificado SGC.

Tabla 8. Área unidades geomorfológicas identificadas en el municipio de Sogamoso.

Geoforma	Área (Ha)	Geoforma	Área (Ha)
Planicie y delta lacustrino (Fpla)	3203.21	Cerro estructural (Sce)	284.2675
Ladera escalonada (Sles)	3115.63	Plano Glaciolacustre (Gpgl)	278.22
Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal glaciada (Gshlc)	2005.4	Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle)	161.67
Sierra anticlinal (Ss)	1666.93	Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción (Dco)	146.88
Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal (Ssalc)	1578.835	Conos glaciofluviales (Gcgf)	124.535
Ladera estructural de sierra anticlinal (Sssale)	1531.515	Sierra anticlinal glaciada (Gsag)	73.4425
Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada (Gshle)	1206.4175	Lomos (SI)	40.1225
Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc)	1105.55	Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi)	32.3825
Ladera Ondulada (Dlo)	624.165	Lomo denudado (Dlde)	22.795
Ladera estructural de sierra sinclinal	579.03	Canteras (Ac)	20.32

Geoforma	Área (Ha)	Geoforma	Área (Ha)
(Sssle)			
Ladera estructural de sierra sinclinal glaciada (Gssle)	493.5825	Cerro remanente o relicto (Dcrem)	17.1475
Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal glaciada (Gsslc)	461.3125	Rellenos de escombros y/o escombreras (Are)	15.8025
Ladera de contrapendiente suave (Slcps)	327.085	Laguna Glaciar (Glg)	11.2
Sierra Glaciada (Gsg)	315.29	Sierra (Ss)	1.3475
Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc)	291.465	Sierra sinclinal (Sss)	0.2075

8.2.3 Unidades de cobertura del suelo

Con base en los datos tomados en campo y fotointerpretación de imágenes satelitales se cartografiaron y establecieron las siguientes unidades de uso de cobertura del suelo en el área de estudio.

El área de estudio se encuentra en mayor proporción coberturas de tipo pastos y cultivos, posteriormente herbazal, luego bosque y en menor proporción vivienda, cuerpos de agua, suelo desnudos y vías (**Tabla 9** y **Figura 8**).

Tabla 9. Área cobertura del suelo en el municipio de Sogamoso

Unidad	Área (Ha)
Pastos y cultivos	6705.9
Herbazales	4364.3675
Bosque	2959.62
Arbustal	2212.3025
Roca	1479.735
Suelos desnudos	653.5075
Vía pavimentada	543.015
Vivienda	465.89
Cuerpo de agua	238.8125
Vía destapada	113.2375

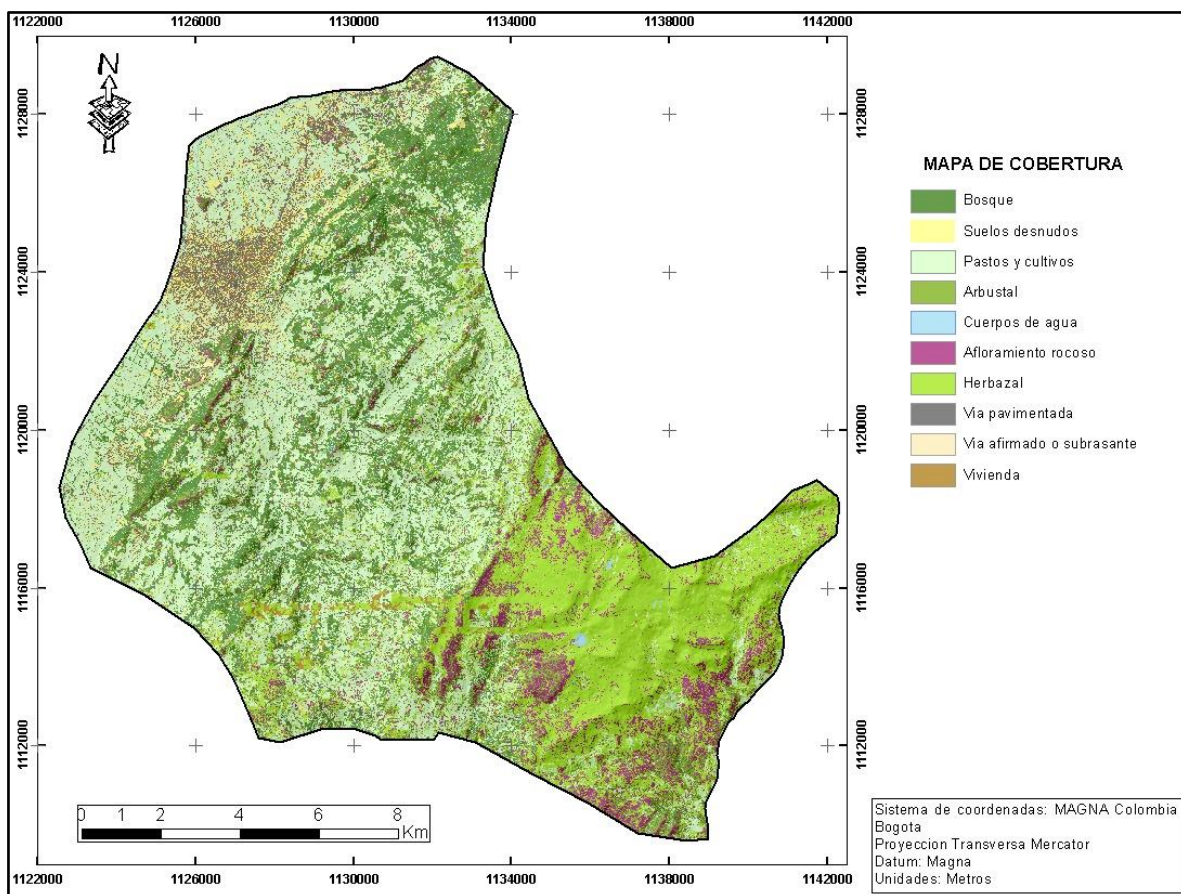


Figura 8. Cobertura del suelo. Fuente: Modificado mapa de Cobertura IDEAM 2018.

8.2.4 Uso del Suelo

El área de estudio está conformada en mayor proporción uso de suelo pecuario y agrícola y en menor proporción por transporte y residencial (**Tabla 10** y **Figura 9**).

Tabla 10. Área uso del suelo en el municipio de Sogamoso.

Unidad	Área (Ha)
Protección y producción	2959.62
Sin uso	8709.9125
Pecuario y agrícola	6705.9
Protección	238.8125
Transporte	656.2525
Residencial	465.89

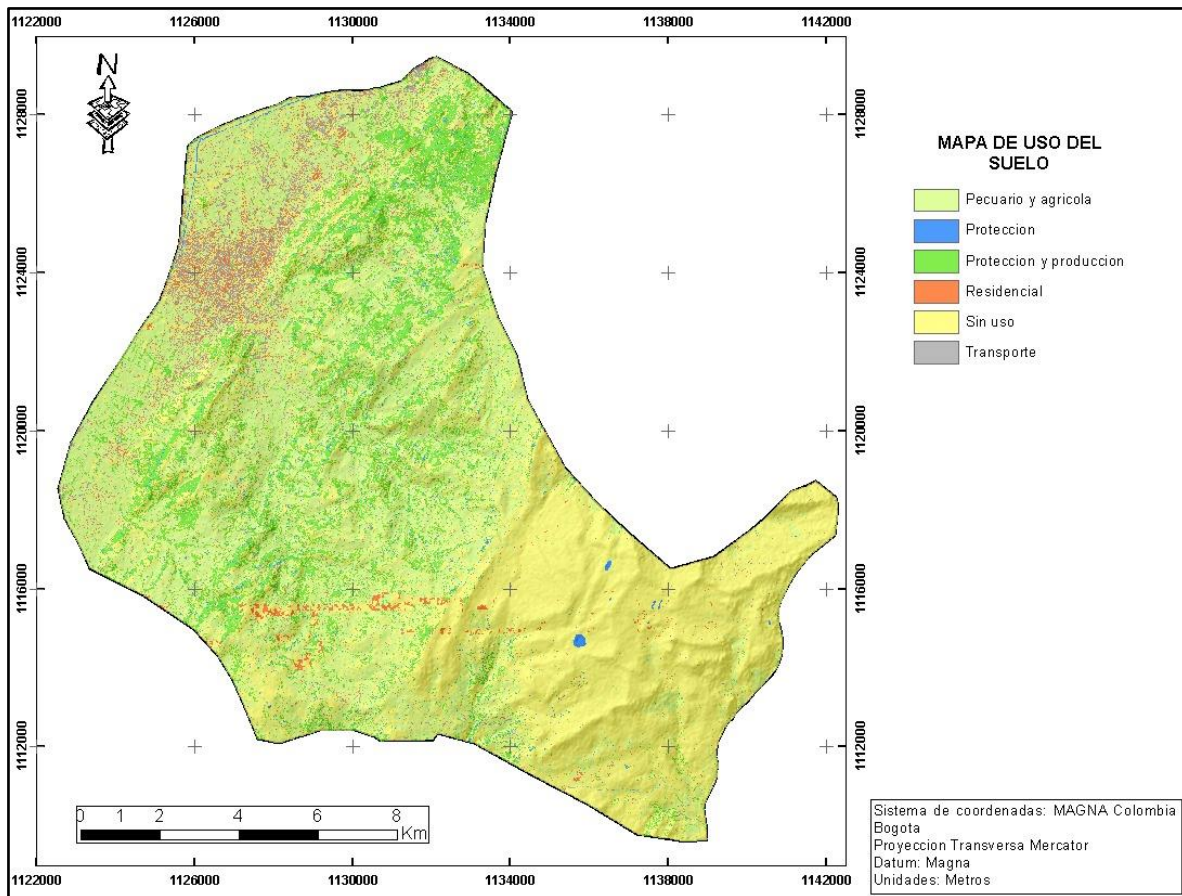


Figura 9. Uso del Suelo. Fuente: Autor

8.3 ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE CADA FACTOR CONDICIONANTE EN LA OCURRENCIA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA.

De la **Tabla 11** a la **Tabla 16** se presenta la calificación por peso de cada una de las variables que forman parte de la determinación de la susceptibilidad de procesos de remoción en masa.

En la **Tabla 11** se puede apreciar que las unidades geológicas que presentan una mayor susceptibilidad corresponden a los depósitos coluviales, la formación Areniscas de Socha y la formación Guaduas. Siendo estos valores los que se esperarían en el caso de los depósitos Coluviales y la formación Guaduas desde el punto de vista geológico. La presencia de la formación Areniscas de Socha se correlaciona directamente con los flujos de detritos localizados en la montaña localizada en proximidad al sur oriente del centro poblado de Sogamoso.

Tabla 11. Peso de las unidades geológicas en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Unidad	Pixeles mov	Pixeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
Qal	9,020	1,673,145	9020	80107	1664125	6221157	-0.73	0.13	-0.87
Pgas	110	185,822	110	89017	185712	7708480	-2.95	0.02	-2.97
KPgg	18,924	1,007,268	18924	70203	988344	6887034	0.53	-0.10	0.63
Pgp	1,508	119,282	1508	87619	117774	7775020	0.13	0.00	0.13
Pgc	263	97,882	263	88864	97619	7796420	-1.43	0.01	-1.44
Pgars	9,627	288,073	9627	79500	278446	7606229	1.12	-0.08	1.20
Ksgpi	4,115	581,406	4115	85012	577291	7312896	-0.46	0.03	-0.49
Ksgt	2,686	596,367	2686	86441	593681	7297935	-0.91	0.05	-0.96
Ksc	21,544	2,174,841	21544	67583	2153297	5719461	-0.12	0.04	-0.17
Ksgp	5,261	802,019	5261	83866	796758	7092283	-0.54	0.05	-0.58
Qc	16,069	340,588	16069	73058	324519	7553714	1.48	-0.16	1.63
Qg	0	27,609	0	89127	27609	7866693	-	0.00	-
Total	89,127	7,894,302							

La pendiente que más se relaciona con procesos de remoción en masa se encuentran entre 4° a 8° o terrenos inclinados (**Tabla 12**). Los valores encontrados respecto a la pendiente parecen ser un poco bajos a los esperados, y puede deberse a que los procesos se encuentran en un área de menor pendiente a la que presentaba el terreno antes de activarse el proceso de remoción en masa.

Tabla 12. Peso de las categorías de pendiente en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Pendiente	Pixeles mov	Pixeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
0-2	3,724	329,693	3724	85403	325969	7564452	0.01	0.00	0.01
2-4	8,636	637,334	8636	80491	628698	7256811	0.20	-0.02	0.21
4-8	24,535	1,440,559	24535	64592	1416024	6453586	0.43	-0.12	0.55
8-16	28,882	2,944,670	28882	60245	2915788	4949475	-0.13	0.07	-0.21
16-35	22,706	2,449,043	22706	66421	2426337	5445102	-0.19	0.07	-0.27
35-55	644	92,402	644	88483	91758	7801743	-0.48	0.00	-0.48
>55	0	444	0	89127	444	7893701	-	0.00	-
Total	89,127	7,894,145							

La curvatura del terreno que más se asocia con procesos de remoción en masa son áreas convexas (**Tabla 13**) siendo similares a lo esperado conforme con modelos cuantitativos simples de estabilidad, en la que una ladera convexa tiene un mayor volumen que su contraparte cóncava en una misma longitud y pendiente media.

Tabla 13. Peso de las categorías de curvatura del terreno en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Curvatura		Pixeles mov	Pixeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
Muy convexa	1	8	752	8	89119	744	7893393	-0.05	0.00	-0.05
Convexa	2	33,380	2,678,870	33380	55747	2645490	5215275	0.11	-0.06	0.17
Plana	3	28,465	2,484,100	28465	60662	2455635	5410045	0.02	-0.01	0.03
Cóncava	4	27,274	2,729,329	27274	61853	2702055	5164816	-0.12	0.06	-0.17
Muy Cóncava	5	0	1,094	0	89127	1094	7893051	-	0.00	-
Total		89,127	7,894,145							

Las unidades geomorfológicas de mayor susceptibilidad son los conos glaciofluviales y los conos de deslizamiento indiferenciados (**Tabla 14**), teniendo una gran correlación con lo que se espera respecto a la definición propia de las geoformas, que en este caso representan unidades denudacionales producto del desplazamiento de volúmenes de tierra (procesos de remoción en masa antiguos) donde las condiciones de estabilidad son cercanas al equilibrio límite.

Tabla 14. Peso de las unidades geomorfológicas del terreno en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Unidad	Pixeles mov	Pixeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
Dcrem	29	6,859	29	89098	6830	7887444	-0.98	0.00	-0.98
Dlde	563	9,118	563	88564	8555	7885185	1.76	-0.01	1.77
Dlo	336	249,666	336	88791	249330	7644637	-2.13	0.03	-2.15
Fpla	41	1,281,284	41	89086	1281243	6613019	-5.87	0.18	-6.04
Slcps	844	130,834	844	88283	129990	7763469	-0.55	0.01	-0.56
Sles	3,287	1,246,252	3287	85840	1242965	6648051	-1.45	0.13	-1.59
Ss	120	539	120	89007	419	7893764	3.23	0.00	3.23
Sslac	5,057	631,534	5057	84070	626477	7262769	-0.34	0.02	-0.36
Ssale	2,193	612,606	2193	86934	610413	7281697	-1.15	0.06	-1.20
Ssan	2,020	666,772	2020	87107	664752	7227531	-1.31	0.07	-1.38
Sshcl	261	116,586	261	88866	116325	7777717	-1.62	0.01	-1.63
Sshle	12	64,668	12	89115	64656	7829635	-4.11	0.01	-4.12
Ssscl	3,743	442,220	3743	85384	438477	7452083	-0.28	0.01	-0.29
Sssle	358	231,612	358	88769	231254	7662691	-1.99	0.03	-2.01
Ac	0	8,128	0	89127	8128	7886175	-	0.00	-
Are	0	6,321	0	89127	6321	7887982	-	0.00	-
Dco	56	58,752	56	89071	58696	7835551	-2.47	0.01	-2.48
Ddi	12,690	12,953	12690	76437	263	7881350	8.36	-0.15	8.51

Unidad	Pixeles mov	Pixeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
Gcgf	49,598	49,814	49598	39529	216	7844489	9.91	-0.81	10.73
Glg	0	4,480	0	89127	4480	7889823	-	0.00	-
GlgI	0	111,288	0	89127	111288	7783015	-	-0.01	-
Gsag	95	29,377	95	89032	29282	7864926	-1.25	0.00	-1.25
Gsg	6,267	126,116	6267	82860	119849	7768187	1.53	-0.06	1.59
Gshlc	927	802,160	927	88200	801233	7092143	-2.28	0.10	-2.37
Gshle	337	482,567	337	88790	482230	7411736	-2.78	0.06	-2.84
Gsslc	192	184,525	192	88935	184333	7709778	-2.38	0.02	-2.40
Gssle	44	197,433	44	89083	197389	7696870	-3.92	0.02	-3.95
Sce	0	113,707	0	89127	113707	7780596	-	0.01	-
SI	57	16,049	57	89070	15992	7878254	-1.15	0.00	-1.15
Sss	0	83	0	89127	83	7894220	-	0.00	-
Total	89,127	7,894,303							

Las unidades de cobertura del suelo que presenta una mayor susceptibilidad a procesos de remoción en masa son los herbazales, áreas donde aflora unidades rocosas, áreas de vía destapada y suelos desnudos (**Tabla 15**), que tienen una gran correlación de las áreas donde se esperaría se tenga mayor presencia de procesos de remoción en masa.

La cobertura de pastos y cultivos es la única que se esperaría se encontrara en este grupo, sin embargo, sucede una apreciación similar a que se tiene en la revisión de las pendientes, posterior al proceso de remoción en masa el terreno queda afectado, perdiendo generalmente la capacidad de aprovechamiento como áreas de cultivo o zonas de pastoreo, abriendo paso a coberturas naturales de poco porte como los son los herbazales. Se aprecia que las áreas de bosques están menos asociadas a procesos de remoción en masa, obteniendo el menor peso con un valor de -1.20.

Tabla 15. Peso de las unidades de cobertura del terreno en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Unidad	Pixeles mov	Pixeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
Bosque	4,469	1,183,848	4469	84658	1179379	6710707	-1.09	0.11	-1.20
Suelos desnudos	4,326	261,403	4326	84801	257077	7633152	0.40	-0.02	0.42
Pastos y cultivos	24,136	2,682,360	24136	64991	2658224	5212195	-0.22	0.10	-0.32
Arbustal	5,933	884,921	5933	83194	878988	7009634	-0.52	0.05	-0.56

Unidad	Píxeles mov	Píxeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
Cuerpo de agua	528	95,525	528	88599	94997	7799030	-0.71	0.01	-0.71
Roca	10,916	591,894	10916	78211	580978	7302661	0.51	-0.05	0.56
Herbazales	36,695	1,745,747	36695	52432	1709052	6148808	0.64	-0.29	0.92
Vía pavimentada	646	217,206	646	88481	216560	7677349	-1.33	0.02	-1.35
Vía destapada	854	45,295	854	88273	44441	7849260	0.53	0.00	0.54
Vivienda	624	186,356	624	88503	185732	7708199	-1.21	0.02	-1.23
Total	89,127	7,894,555							

Las áreas con uso de suelo de mayor susceptibilidad a procesos de remoción en masa son las áreas sin uso, correspondiendo a áreas que representan coberturas vegetales poco aprovechables, zonas de terreno desprovistas de suelo orgánico donde es demasiado difícil procurar cultivos e inclusive pastoreo (**Tabla 16**).

Tabla 16. Peso de las unidades de uso de suelo en la determinación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Unidad	píxeles mov	Píxeles clase	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	w+	w-	Wf
Protección y producción	4,469	1,183,848	4469	84658	1179379	6710707	-1.09	0.11	-1.20
Sin uso	57,870	3,483,965	57870	31257	3426095	4410590	0.40	-0.47	0.87
Pecuario y agrícola	24,136	2,682,360	24136	64991	2658224	5212195	-0.22	0.10	-0.32
Protección	528	95,525	528	88599	94997	7799030	-0.71	0.01	-0.71
Transporte	1,500	262,501	1500	87627	261001	7632054	-0.68	0.02	-0.69
Residencial	624	186,356	624	88503	185732	7708199	-1.21	0.02	-1.23
Total	89,127	7,894,555							

8.4 ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Como lo propone la Metodología del Servicio Geológico Colombiano se propone una categorización de la susceptibilidad para movimientos en masa correspondiente al LSI del 0% al 75% (% acumulado) de los procesos en masa identificados para la susceptibilidad alta, susceptibilidad media del 75% al 98% (% acumulado), susceptibilidad baja para los LSI entre el 98% al 100% (% acumulado) y finalmente susceptibilidad muy alta para los procesos que se encuentran activos en la actualidad.

Posteriormente, se incluye la categoría de susceptibilidad muy alta en los procesos activos delimitados en el área de análisis, tal como lo establece la metodología de Servicio Geológico Colombiano.

Finalmente se obtuvo en el área del municipio de Sogamoso una distribución de susceptibilidad a procesos de remoción en masa como se presenta la **Figura 10**, donde se aprecia que el valle aluvial hacia el noroccidente del municipio se encuentra en susceptibilidad baja, la mayor parte del municipio sobre las montañas presentan susceptibilidad media. La susceptibilidad alta se localiza únicamente en las áreas de montaña asociado principalmente a geformas cerro estructural, plano glaciolacustre, sierra glaciada y lomo denudado, con cobertura vegetal de herbazales, arbustales y pastos con cultivos, principalmente de sobre la formación Chipaque y Guaduas, en laderas de pendiente abrupta con curvatura variada, finalmente la susceptibilidad muy alta conforme a la metodología se localiza sobre áreas donde se identificaron procesos de remoción en masa activos.

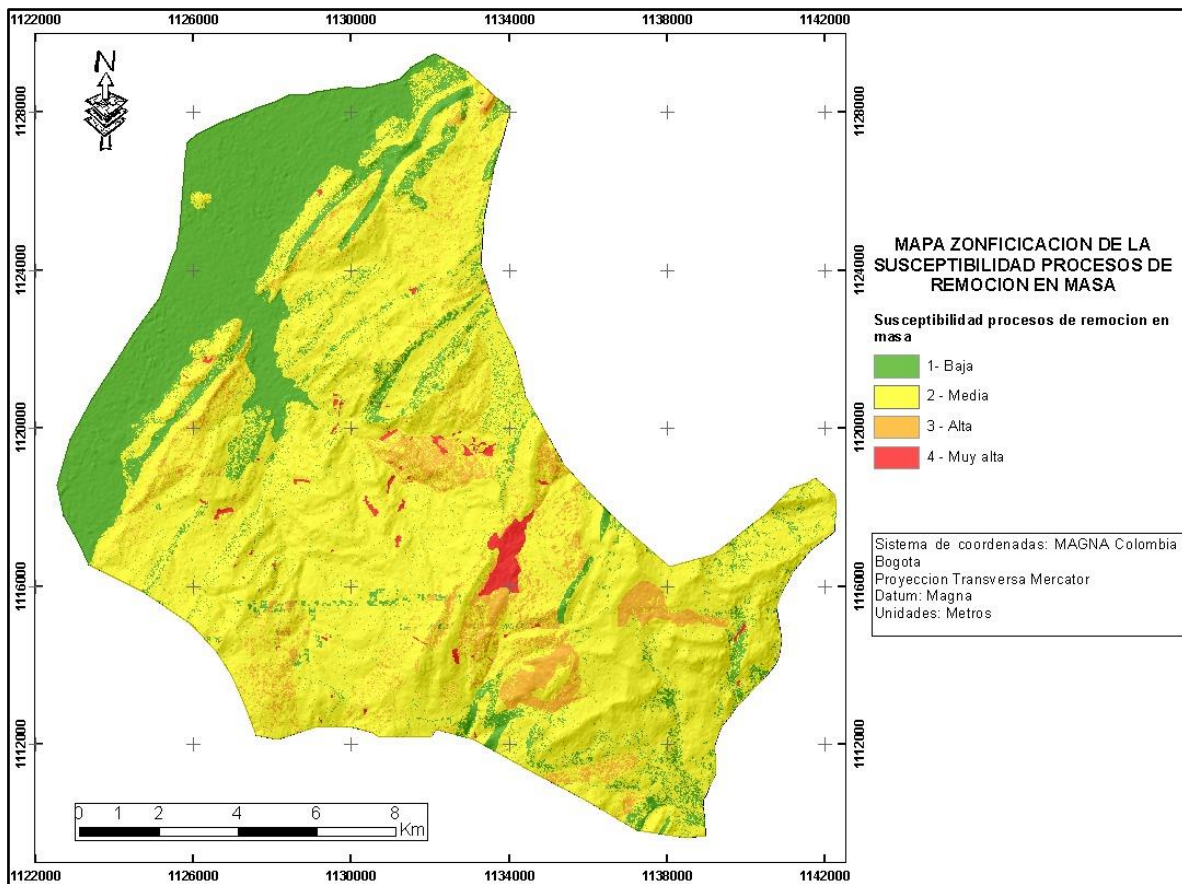


Figura 10. Zonificación de la susceptibilidad procesos de remoción en masa. Fuente: Autor.

En la **Tabla 17** se presenta el porcentaje que ocupa cada categoría de susceptibilidad en el municipio de Sogamoso. Se aprecia que el municipio tiene un cuarto de su área en zona de amenaza baja, asociado al valle aluvial donde se pueden proyectar desarrollo urbanístico o industrial sin grandes requerimientos geotécnicos. Aproximadamente dos tercios del municipio requieren estudios detallados de amenaza geotécnica para desarrollos urbanísticos o industriales, mientras aproximadamente el 8% del municipio, donde se presentan procesos de remoción en masa se debería destinar a zonas de protección y reforestación.

Tabla 17. Susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Sogamoso.

Susceptibilidad	% Área
1 – Baja	24.0%
2- Media	68.0%
3 – Alta	6.9 %
4- Muy Alta	1.1 %

8.5 LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO Y SU CAPACIDAD DE PREDICCIÓN CON LA CURVA DE ÉXITO

Se realiza la curva de éxito y validación para el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

La elaboración de la curva de éxito, se realizó conforme lo describe la metodología del SGC, donde se trazan en el eje “X” los grupos percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, donde a la izquierda se ubica el percentil 1 que corresponde a la calificación de susceptible y la derecha el percentil 100% donde se representa la calificación no susceptible. En el eje “Y” se ubican los valores porcentuales cada 1% de los procesos de remoción en masa correspondientes con el percentil del LSI (Blahut et al., 2010). Esta curva se construye en términos del área total de estudio y el área total de los movimientos en masa cartografiados (Rodríguez Castiblanco y otros, 2017) (**Figura 11**).

Para el análisis de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa se obtuvo un porcentaje de éxito del 87.97 % superior al mínimo aceptable establecido en la metodología del Servicio Geológico Colombiano en 70%.

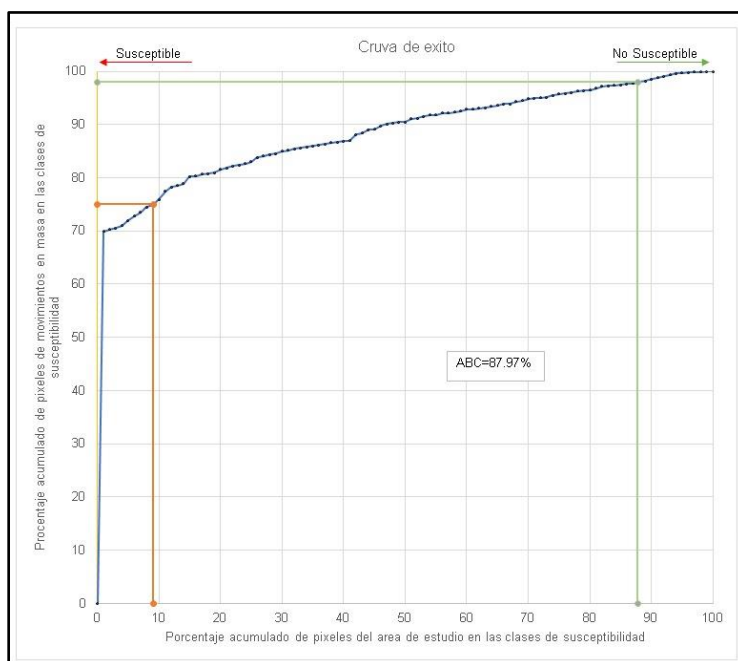


Figura 11. Curva de éxito (ABC=87.97%). Fuente: Autor

8.6 DISCUSIÓN

Se obtiene un nivel de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Sogamoso, muy similar al mapa de susceptibilidad del SGC, con nivel de susceptibilidad baja hacia el valle del río Chicamocha y Río Chiquito principalmente por su baja pendiente. Las áreas con susceptibilidad media y alta presentan una similitud alta, sin embargo, en este trabajo se aprecia una disminución del área de susceptibilidad alta y un aumento de la susceptibilidad media, lo que puede indicar que la escala local limitada al área municipal de Sogamoso genera cambios respecto al mapa en escala 1:100.000 del SGC. Esta variación puede deberse a una mayor ocurrencia de procesos de remoción en masa en unidades geológicas y geomorfológicas que se encuentren fuera del área de análisis, que regionalmente puedan aumentar el nivel de susceptibilidad de estas.

Se aprecia que el método presenta una buena aproximación de las áreas en las que se esperaría una mayor susceptibilidad una vez se realiza la suma de los pesos para cada área (resultado final).

Por otra parte, se aprecia una baja correlación de lo que se esperaría en la calificación de los pesos por cada variable en cada componente como se puede apreciar en el numeral **8.3**, donde aparentemente existen unidades que deberían

tener un mayor peso ante lo que se preconice de la calificación por experiencia, indicando que los cambios que está facultado a realizar el experto conforme a la metodología se deben realizar una vez se obtenga el resultado final y si realmente es necesario ajustar en la experiencia el peso de alguna unidad por componente se debe realizar de forma iterativa hasta lograr el ajuste deseado.

Como opciones de mejora para la determinación de la susceptibilidad se podría incluir en la calibración la distancia a drenajes principales en áreas de montaña, incluir geología estructural mediante clasificación de densidad de fracturamiento, distancias a vías y altura relativa de los taludes. Ya que estas variables no son contempladas en el modelo y pueden tener gran relevancia ya que son características que influyen en la estabilidad de los taludes.

En el artículo (Abril González, Amaya Reyes y Fonseca Peralta, 2016), realizando sobre el municipio de Jericó Boyacá, se identificó que las unidades geológicas de mayor susceptibilidad a los procesos de remoción en masa son la Formación Chipaque, Formación La Luna y Formación Los Pinos y los depósitos coluviales. Esto se encuentra en concordancia con lo evidenciado en este trabajo donde las unidades geológicas que se encuentran con mayor calificación de susceptibilidad son los depósitos Coluviales, la formación Chipaque y la formación Guaduas. Lo que indica que estas unidades pueden considerarse como indicadores de áreas que son susceptibles a procesos de remoción en masa, por lo menos en condiciones topográficas que similares a las que presenta el departamento de Boyacá.

9 CONCLUSIONES

Se realiza el mapa de zonificación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Sogamoso a escala 1:25.000, obteniendo una susceptibilidad baja en el 24% del área ubicada principalmente hacia el valle aluvial, donde se encuentra el centro urbano del municipio; se obtiene susceptibilidad media en la sección oriental del municipio hacia la zona montañosa con un porcentaje 68%, las áreas de susceptibilidad alta corresponden al 6.9%, localizadas principalmente en las formación Chipaque y Guaduas y los depósitos Coluviales; finalmente la susceptibilidad muy alta representa el 1.1% del área del municipio en el que se encuentra procesos de remoción en masa activos.

Las unidades geológicas de mayor susceptibilidad corresponden a la formación Chipaque y la formación Guaduas que corresponden a unidades blandas en las que se desarrolla principalmente flujos de tierra y deslizamientos. La formación Picacho y la formación Los Pinos y Plaeners son susceptibles a procesos de flujos de detritos. Finalmente, los depósitos coluviales presentan susceptibilidad a procesos tipo flujo de tierras y deslizamientos.

En el municipio de Sogamoso no se obtuvo una relación directa entre el cambio de cobertura de bosques en los últimos años, sin embargo, se aprecia una menor susceptibilidad a generación de procesos de remoción en masa con respecto las demás coberturas, tal como se evidencia en los pesos de las unidades de cobertura, donde la cobertura de bosque tiene un peso de -1.20 en contraste con los herbazales y suelos desnudos con peso de 0.92 y 0.56 respectivamente.

La zonificación de amenaza por movimientos en masa para el municipio de Sogamoso resultante, obtiene un porcentaje de aprobación mediante la curva éxito del 87.97%, indicando que se tiene un modelo de buena aproximación con la realidad en la zonificación de amenaza a procesos de remoción en masa.

10 RECOMENDACIONES

Se recomienda que la expansión urbana del municipio de Sogamoso, se realice sobre el valle aluvial, teniendo en cuenta que es la zona con menor susceptibilidad.

Se recomienda que los asentamientos humanos u obras lineales (vías, acueductos, líneas de energía, gasoductos, otros) que se proyecten en las zonas montañosas, realicen estudios geotécnicos de detalle, ya que en esta zona se aprecia predominancia de la susceptibilidad media, y una mala ejecución de las obras anteriormente mencionadas podría desmejorar las condiciones de estabilidad del terreno y progresar a procesos de remoción en masa.

Las zonas de susceptibilidad alta son áreas en donde se podría recomendar la proyección de zonas de protección ambiental y de reforestación, en caminado a mejorar las condiciones del terreno.

Se recomienda realizar un estudio que permita enforzar esfuerzos sobre las áreas delimitadas en susceptibilidad alta y muy alta con una escala de detalle mayor 1:10.000 en áreas rurales con viviendas dispersas y 1:1000 para áreas de asentamientos poblados densos.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Abril González, N. A., Amaya Reyes, E. G. & Fonseca Peralta, H. A. (2016), "Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011," *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 16, No. 1.
- Arango D, D. (2001), "Determinación de áreas de riesgo por deslizamientos en la Comuna 20 del Municipio de Cali, utilizando sistemas de información geográfica.," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 3, No. 2.
- Bonham Carter, G. F. (1994), "Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS."
- C.J.F. Chung, A. G. F. (2003), "Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping."
- Galindo Serrano, J. A. & Alcántara Ayala, I. (2015), "Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: Análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México," *Investigaciones Geograficas*, vol. 2015, No. 88, Elsevier.
- Guzzetti, F. y otros (2006), "Estimating the quality of landslide susceptibility models," *Geomorphology*, vol. 81, No. 1–2.
- H. Hemasinghe, R.S.S. Rangali, N.L. Deshapriya, L. S. (2018), "Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla district, Sri Lanka)."
- Hidalgo Montoya, C. A. & Vega Gutierrez, J. A. (2014), "ESTIMACION DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMOS Y LLUVIA (VALLE ABURRÁ-COLOMBIA)," *Revista EIA*.
- L. Ayalew, H. Y. (2004), "Slope failures in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective."
- L. Highland, P. T. B. (s/f), *The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides*.
- Mora Chinchilla, R., Cahves Gamboa, J. & Vásquez Fernández, M. (2002), "Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método de Mora-Vahson," noviembre.
- NDMG (2009), "National disaster management guidelines—management of landslides and snow avalanches."
- P. Tsangaratos, I. I. (2016), "Comparison of a logistic regression and Naïve Bayes classifier in landslide susceptibility assessments: the influence of models complexity and training dataset size."
- R M, Y. & Dolui, B. (2021), "Statistical and machine intelligence based model for landslide susceptibility mapping of Nilgiri district in India," *Environmental*

- Challenges*, vol. 5, No. July, Elsevier B.V.
- Rodríguez Castiblanco, E. A. y otros (2017), "GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1: 25.000."
- T. Ayenew, G. B. (2005), "Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia."
- Villa, A. (2016), "Modelos de zonificación utilizando SIG," No. c.
- Van Westen, C. J. (2013), "Guidelines for the generation of 1:50000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Nghe An," *A Report to Vietnam Inst. of Geosc. & Mineral Resources*, 66 pp, No. November.
- Zonificaci, P. L. A. y otros (2017), *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*, Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000.