

**ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA
EL MUNICIPIO DE VILLAMARÍA EN LA ZONA URBANA Y RURAL**

DANIEL GÓMEZ ARBELÁEZ



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES®**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2020**

**ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA
EL MUNICIPIO DE VILLAMARÍA EN LA ZONA URBANA Y RURAL**

DANIEL GÓMEZ ARBELÁEZ

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de: Especialista en Información Geográfica.

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2020**

RESUMEN

Se realiza la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:100.000 para el municipio de Villamaría, Caldas, Colombia, el cual se caracteriza por presentar un relieve contrastado y periodos lluviosos con una distribución bimodal. Se utiliza una combinación del método heurístico, con el método estadístico bivariado. Para este análisis, se implementa una base de datos espacial de movimientos en masa mediante el uso de sensores remotos y fuentes bibliográficas, recolectando en total 323 movimientos en masa, de los cuales, 41 fueron recolectados bibliográficamente y 282 recolectados utilizando sensores; se utilizaron parámetros obtenidos a partir del DEM (Modelo de Elevación Digital) de 12.5 metros de la NASA como el grado de inclinación de las pendientes, el sentido de las pendientes, la elevación y parámetros obtenidos de información secundaria como la litología, la geomorfología, tipo de suelo, tipo de cobertura, distancia a los drenajes y distancia a fallas. Estos parámetros se ponderan con base en la densidad de movimientos en masa en cada unidad utilizando el método del valor máximo con un rango de 0 a 1 y se suman utilizando el método de combinación lineal ponderada (WLC) obteniendo el mapa de susceptibilidad. La utilización de sensores remotos permite una mayor recopilación de movimientos en masa que utilizando fuentes bibliográficas permite no entrar en errores de sesgo de información, debido a información recolectada únicamente cerca a centros poblados y vías principales.

PALABRAS CLAVES: SIG, gestión del riesgo, sensores remotos, remoción en masa.

ABSTRACT

The susceptibility zoning is carried out by landslide at a scale of 1: 100.000 for the municipality of Villamaría, Caldas, which is characterized by presenting a contrasting relief and rainy periods with a bimodal distribution. A combination of the heuristic method is used with the bivariate statistical method. For this analysis, a spatial database of landslide is implemented through the use of remote sensing and bibliographic sources, collecting a total of 323 landsides, of which 41 were bibliographically collected and 282 collected using remote sensing; Parameters obtained from NASA's 12.5 meter DEM (Digital Elevation Model) were used such as the degree of inclination of the slopes, the direction of the slopes, the elevation and parameters obtained from secondary information such as lithology, geomorphology, type of soil, type of cover, distance to drains and distance to faults. These parameters are weighted based on the density of landsides in each unit using the maximum value method with a range from 0 to 1 and are added using the weighted linear combination (WLC) method obtaining the susceptibility map. The use of remote sensors allows a greater collection of landsides than using bibliographic sources allows to avoid errors of information bias, due to information collected only near populated centers and main roads.

KEY WORDS: GIS, risk management, remote sensing, landslide

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	2
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GENERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. JUSTIFICACIÓN	4
4. REFERENTE TEÓRICO	5
4.1 REFERENTE CONCEPTUAL	5
4.1.1 Movimientos en masa	5
4.1.1.1 Tipos de movimientos en masa	5
4.1.2 Métodos de zonificación	5
4.1.2.1 Método Heurístico	6
4.1.2.1.1 Análisis Geomorfológico	6
4.1.2.1.2 Mapa de combinación cuantitativa	6
4.1.2.2 Métodos estadísticos	6
4.1.2.2.1 Análisis estadísticos bivariado	6
4.1.2.2.2 Análisis estadísticos multivariado	7
4.1.2.3 Método determinístico	7
4.1.3 Susceptibilidad	7
4.2 REFERENTE LEGAL Y NORMATIVO	7
4.2.1 Legislación internacional	7
4.2.2 Legislación nacional	7
4.2.2.1 Gestión del riesgo	7
4.2.2.2 Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres	8
4.2.2.3 Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA)	8
4.2.2.4 Planes de Ordenamiento Territorial (POT)	8
4.3. REFERENTE CONTEXTUAL	9
4.3.1 Extensión y división territorial	9
4.3.2 Población	9
4.3.3 Geografía y clima	9
4.4 ANTECEDENTES	10

4.4.1 Antecedentes internacionales.....	10
4.4.2 Antecedentes nacionales.....	11
4.4.3 Antecedentes locales.....	11
5. METODOLOGÍA.....	12
5.1 TIPO DE TRABAJO.....	12
5.2 PROCEDIMIENTO.....	12
5.2.1 Catálogo de movimientos en masa.....	12
5.2.2 Parámetros.....	14
5.2.2.1 Pendientes.....	15
5.2.2.2 Sentido de las pendientes.....	17
5.2.2.3 Litología.....	20
5.2.2.4 Geomorfología.....	22
5.2.2.5 Suelos.....	24
5.2.2.6 Cobertura.....	28
5.2.2.7 Distancia a drenajes.....	31
5.2.2.8 Distancia a fallas.....	32
5.2.2.9 Elevación.....	34
5.2.3 Integración de los parámetros.....	36
6. RESULTADOS.....	38
7. CONCLUSIONES.....	41
8. RECOMENDACIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de movimientos en masa	5
Figura 2. Ubicación de Villamaría	10
Figura 3. Número total de movimientos en masa según su fuente de obtención.	12
Figura 4. Ubicación de movimientos en masa en la zona de estudio	13
Figura 5. Áreas afectadas por movimientos en masa en la zona de estudio	14
Figura 6. Flujo de trabajo realizado para calcular la susceptibilidad.	15
Figura 7. Mapa de pendientes de la zona de estudio.	16
Figura 8. Mapa de pendientes ponderado.	17
Figura 9. Mapa de sentido de pendientes de la zona de estudio.	18
Figura 10. Mapa de sentido de pendientes ponderado.	19
Figura 11. Mapa de litología de la zona de estudio.	20
Figura 12. Mapa de sentido de litología ponderado.	21
Figura 13. Mapa de geomorfología de la zona de estudio.	22
Figura 14. Mapa de geomorfología ponderado.	24
Figura 15. Mapa de suelos de la zona de estudio.	25
Figura 16. Mapa de suelos ponderado.	27
Figura 17. Mapa de cobertura de la zona de estudio.	28
Figura 18. Mapa de cobertura ponderado.	30
Figura 19. Mapa de distancia a drenajes de la zona de estudio.	31
Figura 20. Mapa de distancia a drenajes ponderado.	32
Figura 21. Mapa de distancia a fallas de la zona de estudio.	33

Figura 22. Mapa de distancia a fallas ponderado.	34
Figura 23. Mapa de elevación de la zona de estudio.	35
Figura 24. Mapa de elevación ponderado.	36
Figura 25. Gráfico de porcentaje acumulado de ocurrencia de movimientos en masa contra el porcentaje acumulado de susceptibilidad.	38
Figura 26. Mapa de susceptibilidad final para el municipio de Villamaría.	39
Figura 27. Comparación de los resultados obtenidos para la zona de estudio con otras metodologías utilizadas en la zona de estudio.	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de pendientes.	16
Tabla 2. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de sentido de pendientes.	19
Tabla 3. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de litología.	21
Tabla 4. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de geomorfología.	23
Tabla 5. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de suelos.	26
Tabla 6. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de cobertura.	29
Tabla 7. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de distancia a drenajes.	31
Tabla 8. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de distancia a fallas.	33
Tabla 9. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de elevación.	35
Tabla 10. Integración de los parámetros y ponderación con base en densidad de movimientos en masa.	37
Tabla 11. Área y porcentaje en el municipio de Villamaría de cada grado de susceptibilidad.	38

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa del municipio de Villamaría, Caldas, Colombia, donde, mediante la utilización de información secundaria, herramientas SIG y sensores remotos, se asignaron valores de peso ponderados a partir del método del valor máximo, al cual se le asignaron rangos de 0 a 1 (Castellanos & Van Westen, 2008) (Muñiz & Hernández, 2012) a cada una de las clases y parámetros tenidos en cuenta, los parámetros considerados son: el grado de inclinación y sentido de las pendientes y la elevación, los cuales se obtuvieron a partir del DEM (Modelo de Elevación Digital) de 12.5 metros de tamaño de pixel y la litología, la geomorfología, los tipos de suelos, la cobertura, la distancia a drenajes y la distancia a fallas. Los parámetros anteriormente mencionados fueron obtenidos a partir de información secundaria obtenida de Servicio Geológico Colombiano (SGC) y de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Adicionalmente, se recopilaron los movimientos en masa de la zona de estudio utilizando métodos heurísticos (Bransford & Stein, 1993), los ortofotomosaicos de Google Earth, el mapa base World Imagery de ESRI, el inventario y catálogo del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), y el catálogo de movimientos en masa de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de las planchas 205, 206, 224 y 225. Una vez georreferenciados los movimientos en masa y zonificada su área de afectación, se analizaron utilizando herramientas SIG, con el propósito de determinar el grado de afectación de unidades de cada parámetro y el área de cada unidad afectada, buscando obtener la densidad de movimientos en masa en cada una de las unidades, a fin de ponderarlas mediante el método estadístico bivariado e integrando todos los parámetros mediante el método de combinación lineal ponderado.

Es pertinente anotar que este tipo de estudio se considera fundamental y obligatorio en Colombia como un insumo para la realización de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y planes de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica (POMCA) reglamentados los decretos 1077 y 1640.

Al encontrarse el municipio de Villamaría, en una zona caracterizada por sus elevados grados de pendiente y precipitaciones bimodales, la pertinencia de este estudio se convierte en una herramienta que facilita el reconocimiento y la prevención de riesgos. Es pertinente anotar, que en la zona de estudio, se han realizado trabajos similares como: el Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca (POMCA) del río Chinchiná, el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres y Las amenazas por movimientos en masa de Colombia una visión a escala 1:100.000, los cuales se diferencian de este estudio por el método estadístico utilizado, la escala de trabajo y el número de movimientos en masa utilizados, pues en este trabajo se zonificaron y cartografiaron un mayor número movimientos en masa que en estudios anteriores para Villamaría, y adicionalmente, que se hace uso de sensores remotos, con el fin de evidenciar con mayor precisión las condiciones de susceptibilidad de movimientos en masa para dicho municipio municipio.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

Los movimientos en masa son un problema a nivel nacional generados principalmente por las características físicas del entorno, ya que el país se encuentra en la zona ecuatorial, presentándose climas tropicales que generan grandes espesores de suelos y precipitaciones intensas y constantes, su relieve contrastado, montañoso y factores antrópicos.

En Colombia, se presentan a diario casos de movimientos en masa detonados principalmente por fenómenos de precipitación, generando daños a la infraestructura y pérdidas humanas. Se considera que es fundamental conocer los factores climáticos, geomorfológicos, geológicos y tectónicos que tienen lugar en los sectores de montaña, y los ambientes andinos, constituidos por secuencias sedimentarias y volcanoclásticas sometidas a intensas deformaciones tectónicas postcretácicas, junto a terrenos vinculados a actividad eruptiva terciaria a moderna, resultan especialmente favorables para el desarrollo de procesos de remoción en masa. (Rodríguez, Tapia, & Albornoz, 2014)

Se tuvo como área de estudio el municipio de Villamaría del departamento de Caldas en Colombia, con una extensión de 461 Km² y un relieve contrastado con alturas desde los 1400 msnm hasta los 5200 msnm, el cual está ubicado en la cordillera central presentando condiciones de relieve montañoso y clima tropical con precipitaciones recurrentes.

El presente trabajo responde a la pregunta:

¿Cuál es la distribución de las condiciones de susceptibilidad en el municipio de Villamaría, Caldas?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:100.000 para el municipio de Villamaría en su área urbana y rural a partir de la integración de los factores causales para así tener un mayor conocimiento del riesgo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar las herramientas de los *Sistemas de Información Geográfica* para conocer y gestionar las condiciones de susceptibilidad a movimientos en masa.
- Implementar una base de datos espacial de movimientos en masa mediante la utilización de sensores remotos y fuentes bibliográficas.
- Determinar los parámetros que causan susceptibilidad en el área de estudio.
- Analizar el grado de susceptibilidad de cada factor causal en el terrero, mediante el método de combinación lineal ponderada a partir de una combinación del método heurístico con el método estadístico bivariado.
- Integrar los valores de los factores causales de inestabilidad con base al grado de ponderación de cada uno.

3. JUSTIFICACIÓN

La gestión del riesgo de desastres ha sido esencial en la planificación territorial (Ramírez Calderon, 2016), la cual está reglamentada por el gobierno en el decreto 1077 como de obligatorio cumplimiento la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza para la realización del POT (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2018) y en el decreto 1640 para la realización del POMCA (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2012). En el caso de estudio para el municipio de Villamaría, se realizó la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a partir de la combinación del método heurístico (Saaty, 1987), el método de combinación lineal (Weighted Linear Combination) (Bennema, van Setten, 't Hoen, & Voogd, 1984) y el método estadístico bivariado, destacando que la combinación del análisis multicriterio con el método heurístico es una herramienta óptima para la zonificación por movimientos en masa (Muñiz & Hernández, 2012) y destacando el método heurístico por permitir análisis en menor tiempo de estabilidad en una zona de estudio (Aleotti & Chowdhury, 1999) (Roa, 2006) y además que el método de combinación lineal es un método híbrido de métodos cuantitativos y cualitativos, donde se asignan niveles primarios y secundarios de pesos ponderados (Ayalew, Yamagishi, & Ugawa, 2004) (Bennema, van Setten, 't Hoen, & Voogd, 1984). La combinación de dichos métodos logra permitir integrar los factores en un conjunto para su análisis en la inestabilidad lo cual carecen otros métodos, lo cual lo hace la aproximación de más confianza a la zonificación de la susceptibilidad (Muñiz & Hernández, 2012) y además de poder utilizarse en zonas sin registro de movimientos en masa (SGC, 2013).

Al utilizar únicamente información secundaria para realizar la zonificación, se considera un método muy económico y pertinente para hacer estimación de la susceptibilidad en diversos municipios de Colombia que, sin un catálogo suficiente de movimientos en masa, compilados generalmente del sistema de información de movimientos en masa SIMMA, en la parte rural, se presenta un sesgo en la información como es el caso de Villamaría. Esto debido a que en las áreas urbanas de una capital de departamento, el levantamiento de la información es más sistemático, mientras que en el área rural, los registros están asociados más a vías principales y contar con menos soporte técnico para su caracterización, donde se estaría confirmando un carácter marcadamente sociocultural del fenómeno de deslizamientos (Corpocaldas, 2014). Por consiguiente, se hace necesario utilizar herramientas como los sensores remotos para identificar movimientos en masa en zonas rurales. Debido a su cobertura global y periódica, el uso de las imágenes de satélite en la obtención de información de la superficie terrestre es de gran utilidad (G Trejos & J Sandoval, 2012) en este caso para el mapeo de movimientos en masa.

Se favorecen principalmente con la zonificación de la susceptibilidad entidades del estado como Corpocaldas, la alcaldía de Villamaría y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).

4. REFERENTE TEÓRICO

4.1 REFERENTE CONCEPTUAL

4.1.1 Movimientos en masa

Los movimientos en masa incluyen un conjunto de movimientos pendiente debajo de un cuerpo de roca, detritos o suelos por efectos de la gravedad (Flentje, Miner, Whit, & Fell, 2007), se presentan diferentes clasificaciones de movimientos en masa; en las cuales la mayor parte de estas se basan en el tipo de materiales, el grado de saturación, los mecanismos de movimiento y el grado de deformación del material (GCA, 2007)

4.1.1.1 Tipos de movimientos en masa

La clasificación de movimientos en masa descrita por Varnes y Hutchinson es de los sistemas más ampliamente aceptados y utilizados, este emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material (Varnes J. D., 1958) (Hutchinson, 1968) (GCA, 2007). Los tipos y subtipos de movimientos se describen en la figura 1.

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque)
	Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña
	Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta
	Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos, lodo tierra o de turba
	Crecida de detritos
	Avalancha de detritos o de rocas
	Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación
Reptación	Reptación de suelos
	Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

Figura 1. Tipos de movimientos en masa. Tomado de (GCA, 2007).

4.1.2 Métodos de zonificación

Se define el término de zonificación como una división de la superficie en áreas y la clasificación de acuerdo con el grado actual o potencial de amenaza por deslizamientos u otros movimientos en masa en las laderas. (Varnes D. J., 1984) (SGC, 2013)

La selección del método de zonificación más adecuada depende de diferentes factores, tales como: disponibilidad, calidad y exactitud de los datos; la resolución de zonificación, los resultados requeridos y la escala de la zonificación (SGC, 2013). Estos métodos se

dividen en métodos cualitativos (heurístico, análisis geomorfológico) y métodos cuantitativos (estadísticos y determinísticos). (Mendoza & Aristizábal, 2017)

El método más directo de hacer una zonificación de amenaza es mediante el inventario de movimientos en masa con actividades de fotointerpretación, datos de investigación del subsuelo y registro histórico de movimientos ocurridos en la zona. (SGC, 2013), este inventario contiene la distribución espacial de los movimientos en masa, su clasificación, volumen y fecha de ocurrencia (Flentje, Miner, Whit, & Fell, 2007), estos eventos son identificados con base a criterios morfométricos y ambientales en campo, tales como rugosidad del terreno, cambio de pendientes, usos del suelo, tipo de cobertura (Mendoza & Aristizábal, 2017)

4.1.2.1 Método Heurístico

Definido por Saaty, 1987, en el método heurístico se categoriza y pondera los factores causantes de inestabilidad según su grado de incidencia esperada en la generación de movimientos en masa, además los resultados se pueden extrapolar a zonas sin movimientos en masa según una combinación de factores similar (SGC, 2013), este se basa en el conocimiento de expertos, en virtud la escala de trabajo y las limitaciones en la consecución y el detalle de la información de las variables (G Trejos & J Sandoval, 2012)

4.1.2.1.1 Análisis Geomorfológico

Se conoce como método directo ya que la susceptibilidad se determina directamente en el campo por los expertos, se basa en la experiencia individual y el uso de razonamiento por analogía, las reglas de decisión son entonces difíciles de formular a causa de que varía según la zona de estudio (SGC, 2013).

4.1.2.1.2 Mapa de combinación cuantitativa

En este mapa, se utiliza el criterio de un experto para asignar pesos ponderados en una serie de mapas de parámetros, los cuales se suman de acuerdo con estos pesos para obtener valores de susceptibilidad que se puedan agrupar en clases (SGC, 2013).

4.1.2.2 Métodos estadísticos

En los análisis estadísticos de susceptibilidad por movimientos en masa se combinan factores que han generado los movimientos en masa en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística, de esta manera se hacen predicciones cuantitativas para áreas libres de movimientos en masa donde existen condiciones similares (SGC, 2013).

4.1.2.2.1 Análisis estadísticos bivariado

En el análisis estadístico bivariado cada factor de mapeo se combina con la distribución de los movimientos en masa en el mapa y se calculan valores ponderados de densidades de movimientos en masa para cada clase. (SGC, 2013)

4.1.2.2 Análisis estadísticos multivariado

En este análisis, se muestrean todos los factores relevantes. Para cada unidad muestreada se determina la presencia o ausencia de movimientos en masa, la matriz que resulte se analiza usando regresiones múltiples o análisis discriminantes (SGC, 2013). La diferencia entre en análisis bivariado y el multivariado es que en el análisis multivariados, se asume correlación entre los factores, mientras que en los bivariados se supone independencia, y la influencia de cada factor se trata independientemente para después ser acumulada (Corpocaldas, 2014)

4.1.2.3 Método determinístico

Los métodos determinísticos utilizan análisis mecánicos y modelos de estabilidad para determinar el factor de seguridad de una ladera concreta (SGC, 2013)

4.1.3 Susceptibilidad

Es una evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación de un volumen o área y su distribución espacial de movimientos en masa donde existe o potencialmente puede ocurrir en un área. (Flentje, Miner, Whit, & Fell, 2007)

4.2 REFERENTE LEGAL Y NORMATIVO

4.2.1 Legislación internacional

El mundo ha sido testigo de un alarmante aumento en la frecuencia y severidad de los desastres, dejando millones de personas afectadas y provocando pérdidas humanas y económicas, estos temas se debatieron de manera exhaustiva durante La Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres (CMRD) en Kobe, Hyogo, Japón, donde los gobiernos, las agencias de Organización de Naciones Unidas (ONU) y las Organizaciones de la Sociedad Civil (OSC) presentes en Kobe insistieron en la necesidad de avanzar desde la teoría hacia la acción concreta en la Reducción del Riesgo de Desastres, donde el resultado de esta conferencia fue el Marco de Acción de Hyogo (MAH) (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación, 2009). Este marco, respaldado por 168 Estados Miembros, marcó un hito en los esfuerzos nacionales y locales para reducir el riesgo de desastres, fortaleciendo al mismo tiempo la cooperación internacional mediante la elaboración de estrategias, planes y políticas regionales (United Nations Officer for Outer Space Affairs, 2014)

4.2.2 Legislación nacional

4.2.2.1 Gestión del riesgo

La gestión del riesgo de desastres nace como una medida de la nación para garantizar la gobernanza del país en situaciones de fuertes emergencias y con ello realizar acciones

enmarcadas en brindar apoyo las comunidades afectadas por estos eventos (González, 2014), esta “se constituye en una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población”. Ley 1523 de 2012. (Congreso de la República de Colombia, 2012)

Se señala además la existencia de condiciones en el ordenamiento territorial que se establecen como determinantes (normas de superior jerarquía) del mismo (Ley 388 de 1997) (Congreso de la República de Colombia, 1997)

4.2.2.2 Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres

La Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres es creada mediante la resolución 795 del 29 de julio del 2014, la cual tiene como objetivo orientar la construcción de lineamientos y promover procesos investigativos en Gestión del Riesgo de Desastres, para aumentar el conocimiento del riesgo y la cultura de investigación en el país, en el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (Comisión Nacional para la Investigación en Gestión del Riesgo, 2015)

4.2.2.3 Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA)

El POMCA, reglamentado en el decreto 1640, es un determinante ambiental para la elaboración y adopción de los POT (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), donde en el decreto 1077 en los estudios básicos para la revisión o expedición de planes de ordenamiento territorial, se menciona que si al momento de la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de un nuevo POT, se cuenta con un Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas aprobado y el mismo incluye los análisis de amenazas, estos sirven de insumo para la elaboración de los estudios básicos en suelo rural.

4.2.2.4 Planes de Ordenamiento Territorial (POT)

Los Planes de Ordenamiento Territorial están reglamentados en el decreto 1640 de 2012 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2012), los cuales son definidos como instrumentos técnicos y normativos de planeación y gestión de largo plazo, los cuales son el conjunto de acciones y políticas, administrativas y de planeación física, que orientarán el desarrollo del territorio municipal por los próximos años y que regularán la utilización, ocupación y transformación del espacio físico urbano y rural. (Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2004)

4.3. REFERENTE CONTEXTUAL

4.3.1 Extensión y división territorial

Villamaría se encuentra ubicado en el extremo sur occidental del departamento de Caldas, en límites con los departamentos de Risaralda y Tolima, por el norte con el Municipio de Manizales, al occidente con el municipio de Chinchiná, al oriente con los municipios de Herveo y Murillo (Tolima) y al sur con el municipio de Santa Rosa de Cabal (Risaralda), a unos 5° 3' latitud norte y 75° 31' de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, su altitud es de 1.920 msnm su superficie aproximada es de 461Km2 distribuidos así: 185 Km2 de páramos, incluida la nieve perpetua; 230 Km2 de clima frío y 46 Km2 de clima medio (CMGRD, 2017)

4.3.2 Población

Villamaría, según el plan de desarrollo del municipio, cuenta con una población de 56.303 habitantes, de los cuales 46.491 viven en la cabecera municipal y los otros 9.812 en el área rural (CMGRD, 2017).

4.3.3 Geografía y clima

Presenta periodos lluviosos con una distribución Bimodal que van desde Marzo a Mayo y desde Septiembre a Noviembre; periodos secos que van desde Junio a Agosto y desde Diciembre a febrero, su temperatura promedio es de 18°C. (CMGRD, 2017)

Presenta un relieve contrastado con alturas desde los 1400 msnm hasta los 5200 msnm, estas variaciones altitudinales otorgan al municipio de Villamaría la posibilidad de tener tres pisos térmicos, identificados en microrregiones (zona alta o de páramo, zona media u hortofrutícola, zona baja cafetera), con un alto potencial productivo y turístico, además se caracteriza por el contraste de las pendientes suaves con las más fuertes, que originó fenómenos deposicionales y erosivos, que al conjugarse con los procesos tectónicos, volcánicos y antrópicos formaron el relieve actual. El territorio está conformado por materiales característicos de rocas ígneas y metamórficas, resultado de una serie de erupciones del Volcán Nevado del Ruiz y de transformaciones operadas por largo tiempo sobre rocas. En una dirección general de norte a sur, se hallan delimitadas las capas geológicas y los componentes de pizarra y arcilla que se localizan casi en forma vertical, lo cual da origen a láminas perforadas de manera paralela. (CMGRD, 2017) (García & Ferlín, 2014)



Figura 2. Ubicación de Villamaría.

4.4 ANTECEDENTES

Actualmente existen diversos trabajos de susceptibilidad tanto a nivel internacional como local de susceptibilidad de movimientos en masa aplicando utilizando diferentes tipos de sensores remotos y métodos de análisis. Se considera a Newman et al (1978) como el primero en utilizar un SIG en la zonificación de procesos de movimientos en masa.

4.4.1 Antecedentes internacionales

Rodríguez et al (2014) en el artículo “Susceptibilidad de movimientos en masa en el Valle de Socoroma, precordillera Andina de Arica y Parinacota”, utiliza el método de análisis multicriterio basado en factores tenidos en cuenta en trabajos análogos, así como aquellos considerados relevantes para el área estudiada permitió ingresar los resultados (pesos) obtenidos de análisis jerárquico a cada capa raster, correspondiente a cada factor manipulado. Prasanna y Saranaathan (2018) y Paz et al (2017) utilizan igual que Rodríguez el análisis multicriterio, pero Paz utiliza este combinado con el método heurístico apoyado de cartografía temática igual que lo hace Muñiz y Hernández (2012), el cual afirma que el modelo heurístico es un método rápido, razonable y consistente con las condiciones físicas de la zona de estudio y combinación del método heurístico con el análisis multicriterio resulta ser una herramienta óptima para la identificación de las zonas susceptibles a los procesos de remoción en masa. La elaboración de este tipo de trabajos, que integran diversos factores locales para la modelización de la susceptibilidad, tienen un importante potencial para la toma de decisiones al proporcionar un producto gráfico que ayuda a su interpretación y fácil análisis (Muñiz & Hernández, 2012).

Cartaya et al (2006) en cambio, utiliza un método explícito semianalítico asignando valores ponderados a cada variable, el cual puede alternarse con formulaciones matemáticas como el análisis univariado y multivariado igual que (Ayalew et al 2004) que utiliza el método de “Weighted Linear Combination (WLC)” combinando métodos cualitativos y cuantitativos (método estadístico bivariado) y Berhane et al (2020) utiliza igualmente métodos estadísticos para la susceptibilidad.

La utilización de sensores remotos tales como el índice de vegetación, es utilizado en trabajos como el de Fernández et al (2010) y Rodríguez et al (2014) debido a que en

laderas desprovistas de vegetación y con pendiente alta en zonas de desmonte pueden ser más susceptible a la erosión y a movimientos en masa (Muñiz & Hernández, 2012) siendo una variable a tener en cuenta para la identificación de movimientos en masa.

También se pueden aplicar varias técnicas para hacer una primera aproximación visual en las imágenes satelitales, desde realces y filtrados texturales de las imágenes pancromáticas, hasta composiciones en color real y falso y fusiones (Fernández, y otros, 2010). Las imágenes de alta resolución y los modelos de elevación derivados de estas, se ofrecen como una alternativa a las interpretaciones de fotografías aéreas (Barlow, Franklin, & Martin, 2006).

4.4.2 Antecedentes nacionales

En Colombia, se tienen diferentes trabajos de cubrimiento nacional de las amenazas por movimientos en masa tales como el “Mapa de amenaza por movimientos en masa (escala 1:500.000)” el cual se obtuvo aplicando un modelo heurístico basado en el conocimiento experto a través de comparaciones por pares conocido como Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1987) apoyados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Ruiz, y otros, 2012) y posteriormente se realizó el mapa de “Las amenazas por movimientos en masa de Colombia una visión a escala 1:100.000”, este utilizando una escala de mayor detalle y aplicando igualmente el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1987)

También existe el “Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000” SGC (2013) el cual es un insumo válido para el ordenamiento territorial regional, planeación del desarrollo y la gestión de riesgo, de los entes del orden departamental y nacional para estandarizar los criterios e insumos en la elaboración de mapas de susceptibilidad (SGC, 2013). Trejos y Sandoval (2012) describen este documento, el cual utilizó la evaluación multicriterio a través del Proceso analítico jerárquico.

4.4.3 Antecedentes locales

En la zona de estudio se han realizado trabajos similares tales como el plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el departamento de Caldas – Colombia (Corpocaldas, 2014) el cual estudia una parte del área del municipio de Villamaría contenida en la cuenca de río Chinchiná, este utilizó varias metodologías como análisis discriminantes, funciones de favorabilidad o relación de frecuencias (Corpocaldas, 2014) y trabajos más detallados como el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD, 2017), el cual realiza una zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa únicamente en la zona urbana y una descripción de las principales causas de la inestabilidad y principales veredas afectadas por estas.

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE TRABAJO

Se realizó la zonificación por susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:100.000 para el municipio de Villamaría, Caldas utilizando una combinación del método heurístico y el método estadístico bivariado utilizando información secundaria e información generada utilizando sensores remotos.

5.2 PROCEDIMIENTO

5.2.1 Catálogo de movimientos en masa

Para este estudio, se recopiló información bibliográfica de movimientos en masa presentes en el inventario y catálogo del *Sistema de Información de Movimientos en Masa* (SIMMA), el catálogo de movimientos en masa de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de las planchas 205, 206, 224 y 225; se cartografiaron movimientos en masa utilizando los ortofotomosaicos de Google Earth en los diferentes años disponibles y el mapa base World Imagery de ESRI el cual presenta imágenes de alta resolución en diferentes escalas. Para esta cartografía se utilizaron métodos heurísticos (Bransford & Stein, 1993) donde a través del criterio profesional se cartografiaron los movimientos en masa evidentes en la zona de estudio (Mendoza & Aristizábal, 2017).

Se descartó la utilización de otros sensores e imágenes gratuitas al no tener una resolución mínima para la cartografía de movimientos en masa. Se recopilaron en total 323 movimientos en masa, 41 recolectados bibliográficamente y 282 recolectados utilizando sensores remotos.

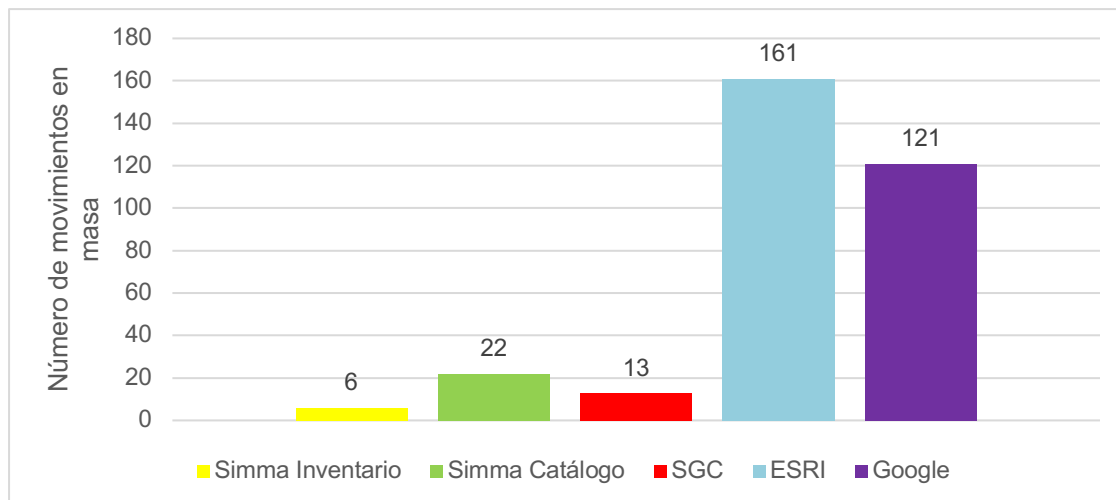


Figura 3. Número total de movimientos en masa según su fuente de obtención.

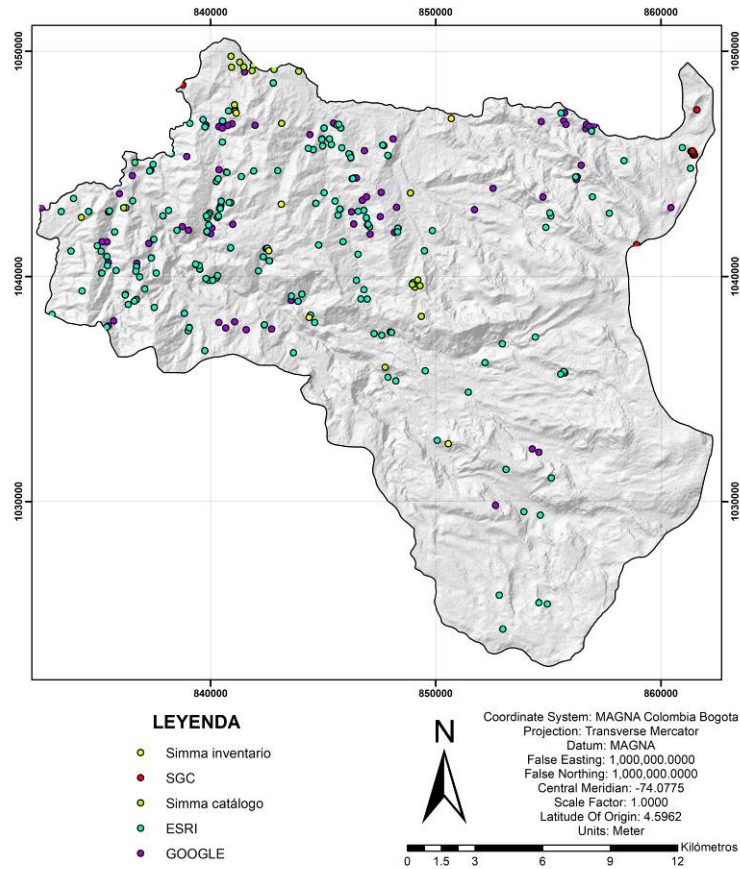


Figura 4. Ubicación de movimientos en masa en la zona de estudio.

Además, se zonificaron los límites de los movimientos en masa a partir de los ortofotomosaicos de ESRI y Google para determinar el área total afectada por movimientos en masa y movimientos en masa cartografiados en la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de las planchas 205, 206, 224 y 225, teniendo en total un área afectada de 1.5 km² en todo el municipio.

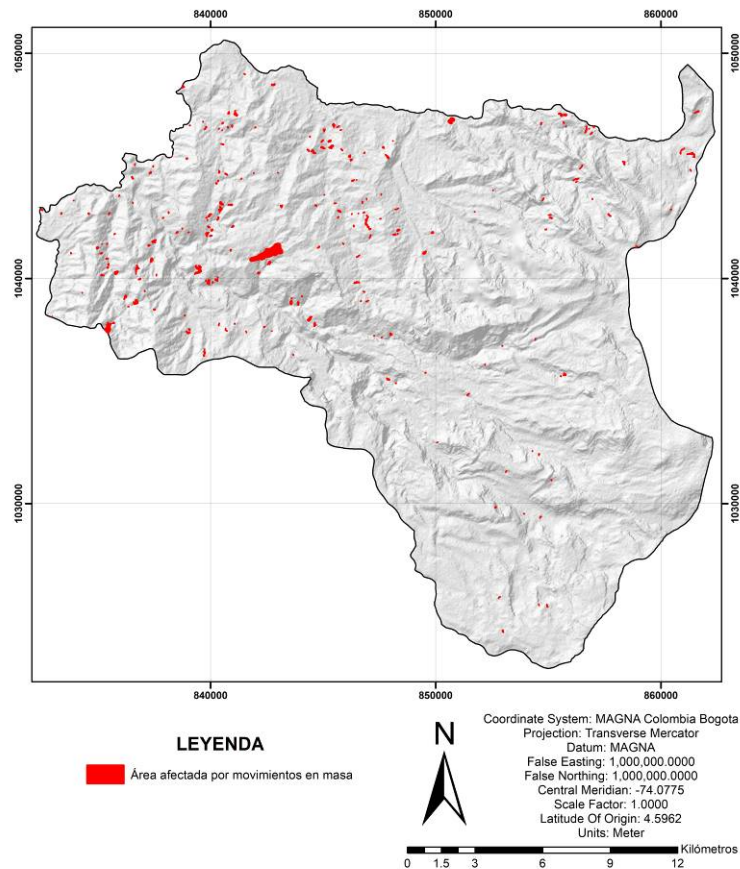


Figura 5. Áreas afectadas por movimientos en masa en la zona de estudio.

5.2.2 Parámetros

Para la realización de la susceptibilidad se utilizaron parámetros derivados del DEM de 12.5 metros de la NASA los cuales son grado de inclinación de pendientes, el sentido de las pendientes, la elevación y parámetros obtenidos a partir de información secundaria como la litología, la geomorfología, los suelos, la cobertura, distancia a drenajes y la distancia a fallas, los cuales se cruzaron con el área afectada por movimientos en masa, para asignarle a cada clase de cada parámetro un valor de ponderación. Esta se ponderó con el método del valor máximo con un rango de 0 a 1 con el propósito de trabajar sobre una misma escala (Castellanos & Van Westen, 2008) (Muñiz & Hernández, 2012). Para cada clase, se determinó su extensión total en el área de estudio, su área afectada por movimientos en masa, la densidad de movimientos en masa, donde según el área total de cada clase y su área afectada y con base en la densidad de los movimientos en masa, se determinó el peso ponderado para cada clase, dividiendo la densidad de cada clase entre la sumatoria de la densidad de movimientos en masa de todas las clases.

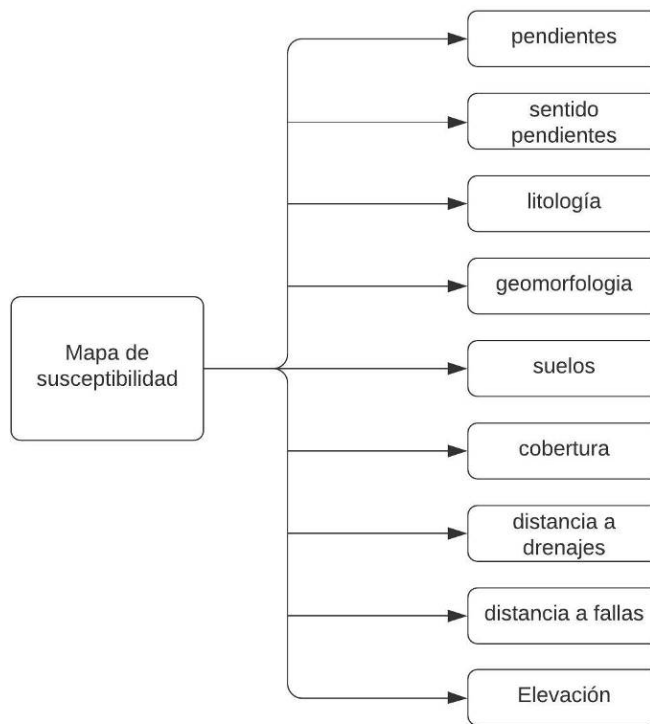


Figura 6. Flujo de trabajo realizado para calcular la susceptibilidad.

5.2.2.1 Pendientes

El mapa de pendientes se elaboró a partir del DEM de la NASA de 12.5 metros de tamaño de pixel, el cual se clasificó en 7 clases según su grado de inclinación en porcentaje.

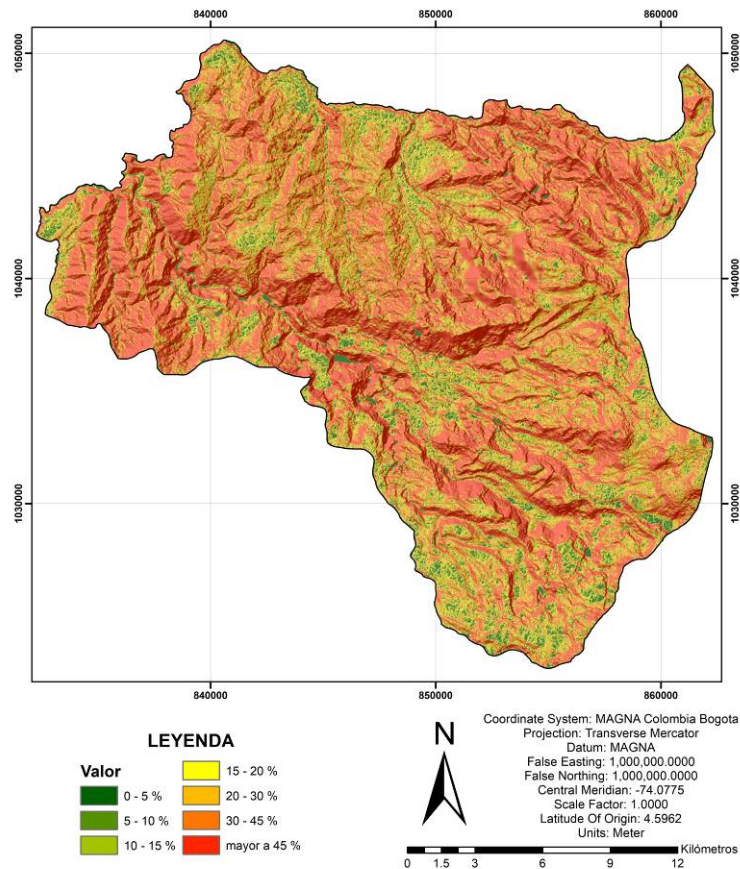


Figura 7. Mapa de pendientes de la zona de estudio.

Para el área de estudio, la clase con mayor extensión fue de pendientes mayores al 45% y siendo además la que presenta mayor densidad de movimientos en masa como se puede observar en la tabla 1.

Porcentaje de pendiente	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
0 - 5%	11.66	0.02	0.16	0.10
5 - 10%	18.29	0.02	0.10	0.06
10 - 15%	27.83	0.04	0.14	0.09
15 - 20%	34.06	0.06	0.17	0.10
20 - 30%	79.82	0.19	0.24	0.15
30 - 45%	114.12	0.43	0.38	0.23
mayor a 45%	169.79	0.74	0.43	0.27
TOTAL	455.57	1.49	1.62	1.00

Tabla 1. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de pendientes.

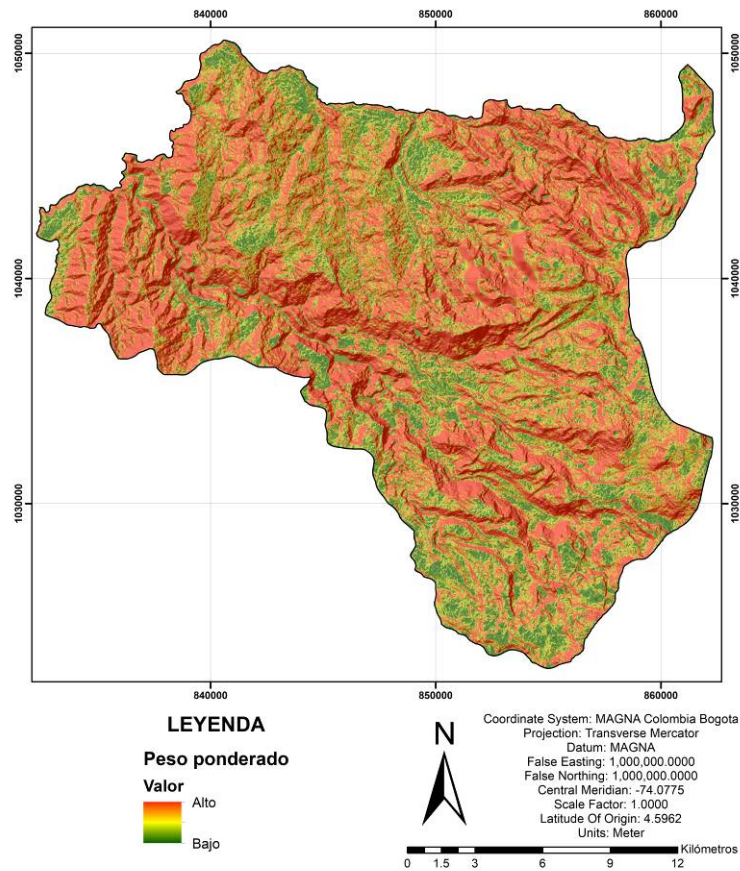


Figura 8. Mapa de pendientes ponderado.

5.2.2.2 Sentido de las pendientes

El mapa de sentido de pendientes se elaboró a partir del DEM de la NASA de 12.5 metros de tamaño de pixel, el cual se clasificó en 8 clases según la dirección de su inclinación en el terreno.

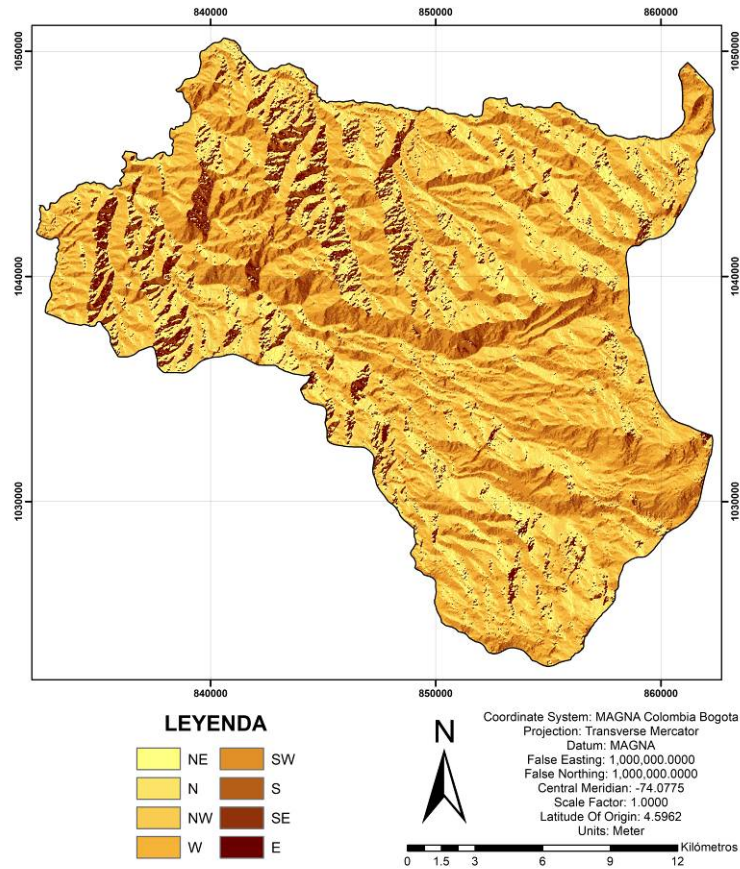


Figura 9. Mapa de sentido de pendientes de la zona de estudio.

Para el área de estudio, la clase con mayor extensión fue la de sentido oeste y la clase con mayor densidad de movimientos en masa fue la de sentido sureste.

Sentido	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
NW	81.93	0.15	0.19	0.06
NE	50.33	0.11	0.22	0.06
N	80.55	0.21	0.26	0.08
W	88.85	0.24	0.27	0.08
SW	70.39	0.29	0.41	0.12
E	30.46	0.15	0.48	0.14
S	36.55	0.18	0.48	0.14
SE	16.51	0.17	1.04	0.31
TOTAL	455.57	1.49	3.34	1.00

Tabla 2. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de sentido de pendientes.

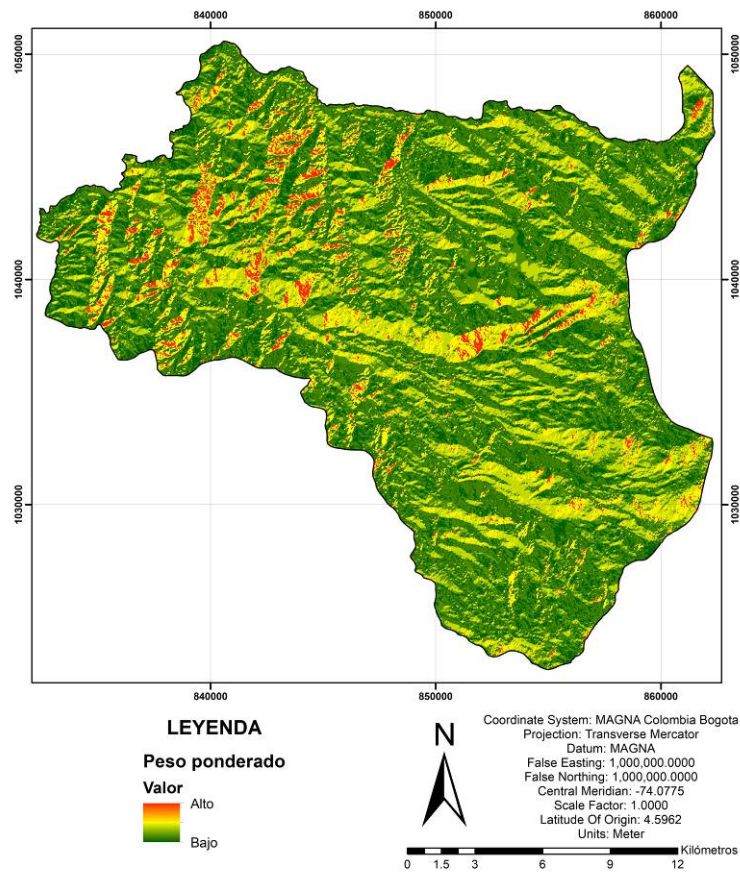


Figura 10. Mapa de sentido de pendientes ponderado.

5.2.2.3 Litología

Se utilizó como insumo las unidades geológicas superficiales de las planchas 205, 206, 224 y 225 del mapa geológico de Colombia a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, donde para el área de estudio, se tienen un total de 18 unidades geológicas superficiales.

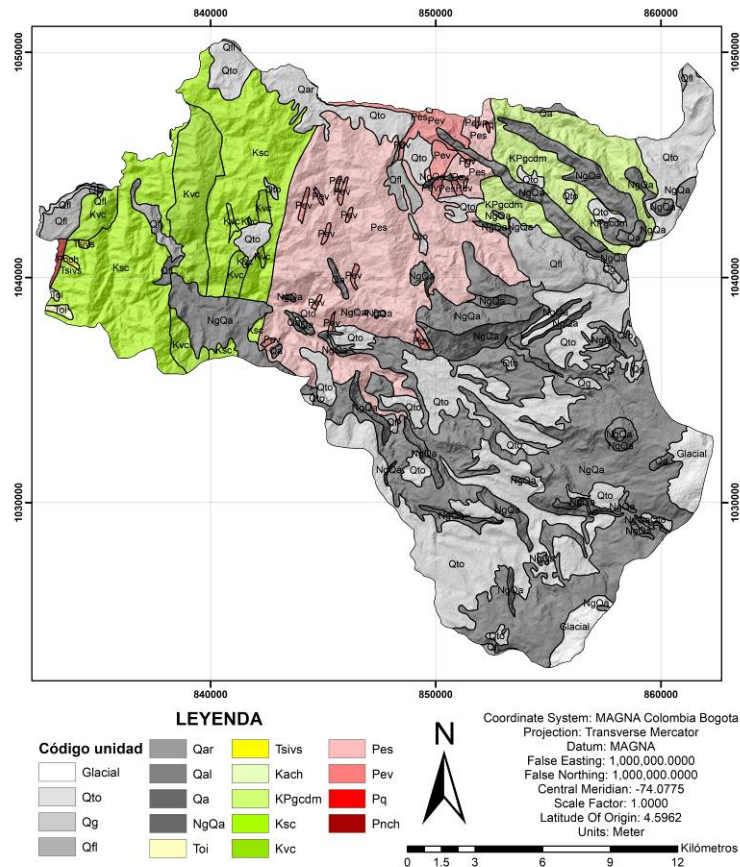


Figura 11. Mapa de litología de la zona de estudio.

Para el área de estudio, la unidad geológica con mayor extensión fueron las Andesitas (NgQa) y la unidad geológica con mayor densidad de movimientos en masa fue el Complejo Quebradagrande (Ksc).

Código	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
Glacial	8.66	0.00	0.00	0.00
Kach	0.00	0.00	0.00	0.00
Pnch	0.53	0.00	0.00	0.00
Pq	0.06	0.00	0.00	0.00

Código	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
Qal	0.25	0.00	0.00	0.00
Qar	0.09	0.00	0.00	0.00
Qg	2.12	0.00	0.00	0.00
Toi	0.63	0.00	0.00	0.00
Tsivs	0.34	0.00	0.00	0.00
Qfl	17.90	0.01	0.04	0.01
NgQa	138.37	0.07	0.05	0.01
Qto	96.90	0.09	0.09	0.03
Qa	3.03	0.00	0.10	0.03
KPgcdm	23.79	0.05	0.23	0.07
Pes	74.09	0.38	0.51	0.15
Pev	7.83	0.05	0.63	0.18
Kvc	22.01	0.17	0.79	0.23
Ksc	67.24	0.70	1.04	0.30
TOTAL	463.84	1.53	3.49	1.00

Tabla 3. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de litología.

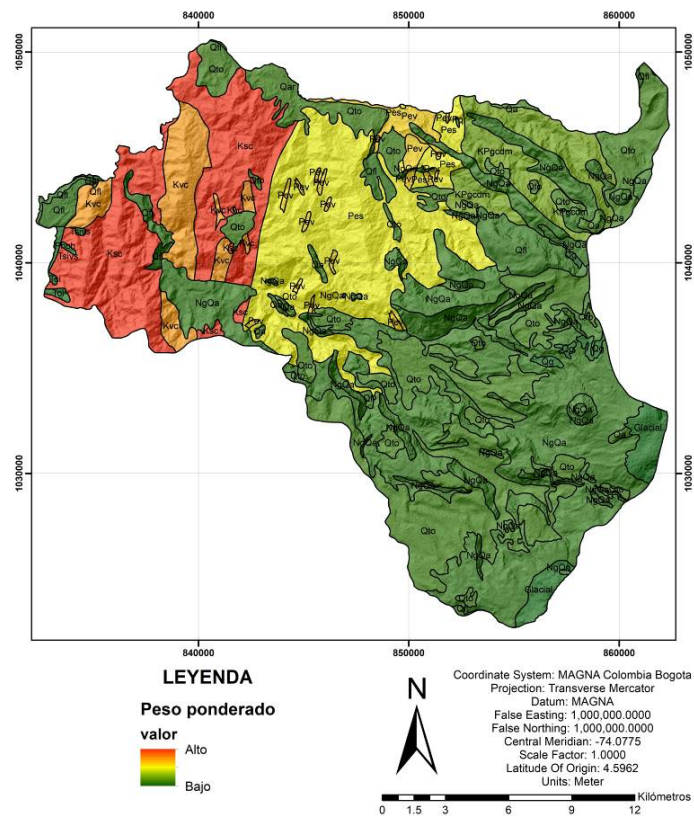


Figura 12. Mapa de sentido de litología ponderado.

5.2.2.4 Geomorfología

Se utilizó como insumo las unidades Geomorfológicas de las planchas 205, 206, 224 y 225 del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, donde para el área de estudio se tienen un total de 30 unidades geomorfológicas.

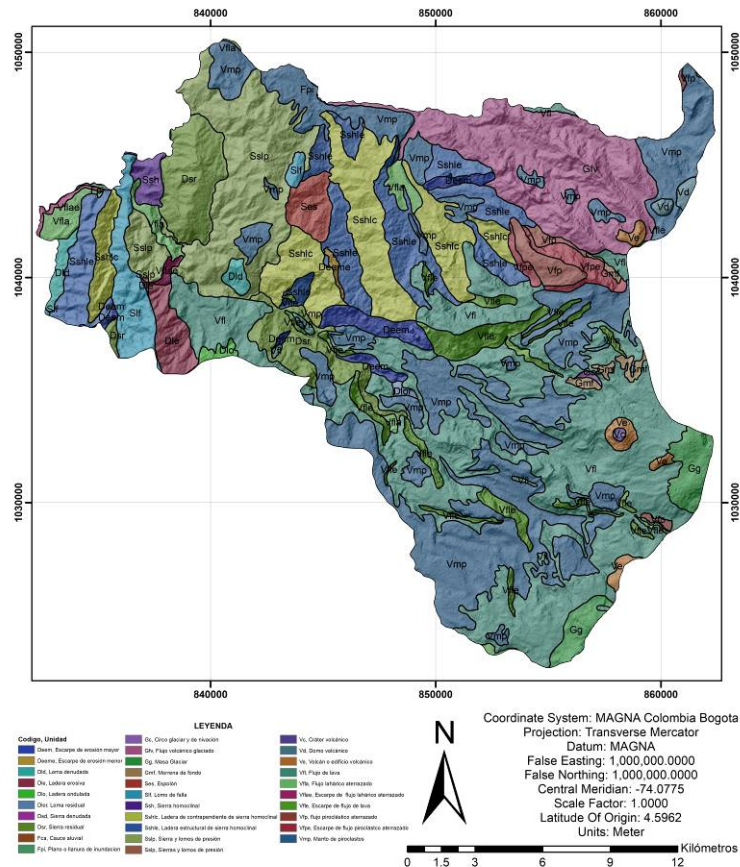


Figura 13. Mapa de geomorfología de la zona de estudio.

Para el área de estudio, la unidad geomorfológica con mayor extensión fueron los flujos de lava (Vfl) y la unidad geomorfológica con mayor densidad de movimientos en masa fueron las sierras y lomos de presión (Sslp)

Código	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
Deeme	0.54	0.00	0.00	0.00
Dld	3.12	0.00	0.00	0.00
Dsd	0.00	0.00	0.00	0.00
Fca	0.08	0.00	0.00	0.00
Fpi	0.19	0.00	0.00	0.00

Código	Área total (km²)	Área afectada (km²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
Gc	0.28	0.00	0.00	0.00
Gg	8.66	0.00	0.00	0.00
Gmf	2.12	0.00	0.00	0.00
Vc	0.27	0.00	0.00	0.00
Vfp	4.94	0.00	0.00	0.00
Vfpe	4.61	0.00	0.00	0.00
Vfl	106.74	0.04	0.03	0.00
Vfla	7.74	0.00	0.05	0.01
Vfle	15.86	0.01	0.07	0.01
Ses	4.57	0.00	0.08	0.01
Vd	1.34	0.00	0.08	0.01
Ve	3.36	0.00	0.09	0.01
Vmp	96.51	0.09	0.09	0.01
Dle	5.41	0.01	0.20	0.03
Dlor	0.47	0.00	0.28	0.04
Vflae	1.43	0.00	0.30	0.04
Gfv	40.30	0.12	0.31	0.04
Sshle	33.33	0.11	0.33	0.04
Ssh	3.92	0.01	0.36	0.05
Sif	9.90	0.05	0.47	0.06
Deem	7.56	0.05	0.62	0.08
Sshlc	36.25	0.23	0.64	0.08
Dsr	22.29	0.22	0.97	0.12
Dlo	0.94	0.01	1.21	0.15
Sslp	38.91	0.64	1.64	0.21
TOTAL	461.67	1.61	7.83	1.00

Tabla 4. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de geomorfología.

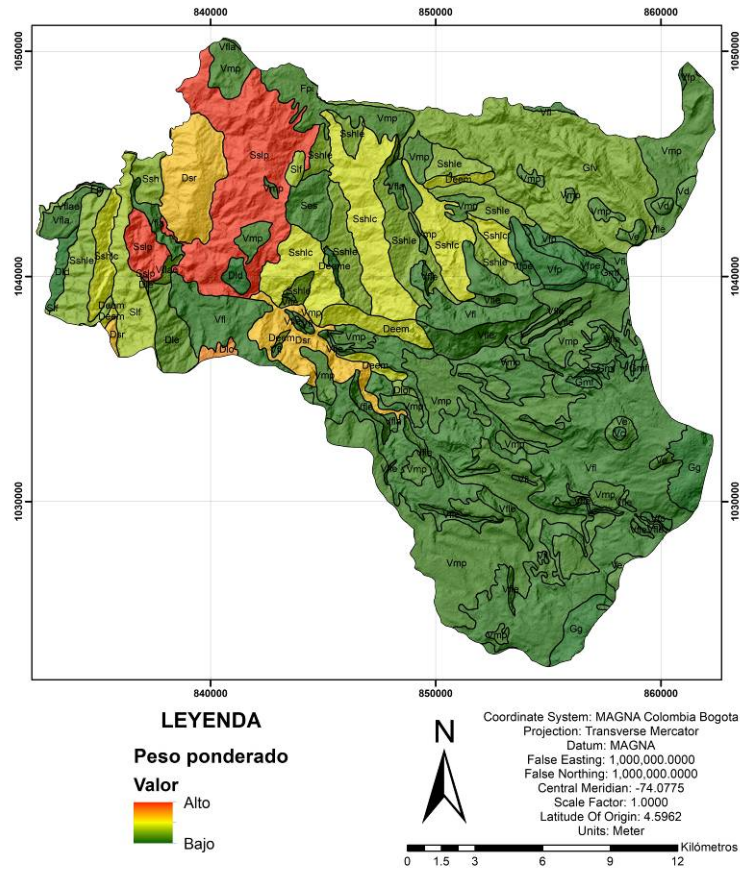


Figura 14. Mapa de geomorfología ponderado.

5.2.2.5 Suelos

Se utilizó como insumo las unidades de suelos del mapa de suelos del territorio Colombiano escala 1:100.000 para el departamento de Caldas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, donde para el área de estudio se tienen un total de 39 unidades de suelos. Los suelos al ser más evolucionados son menos susceptibles que los más jóvenes y de igual manera, a mayor profundidad son más susceptibles (G Trejos & J Sandoval, 2012).

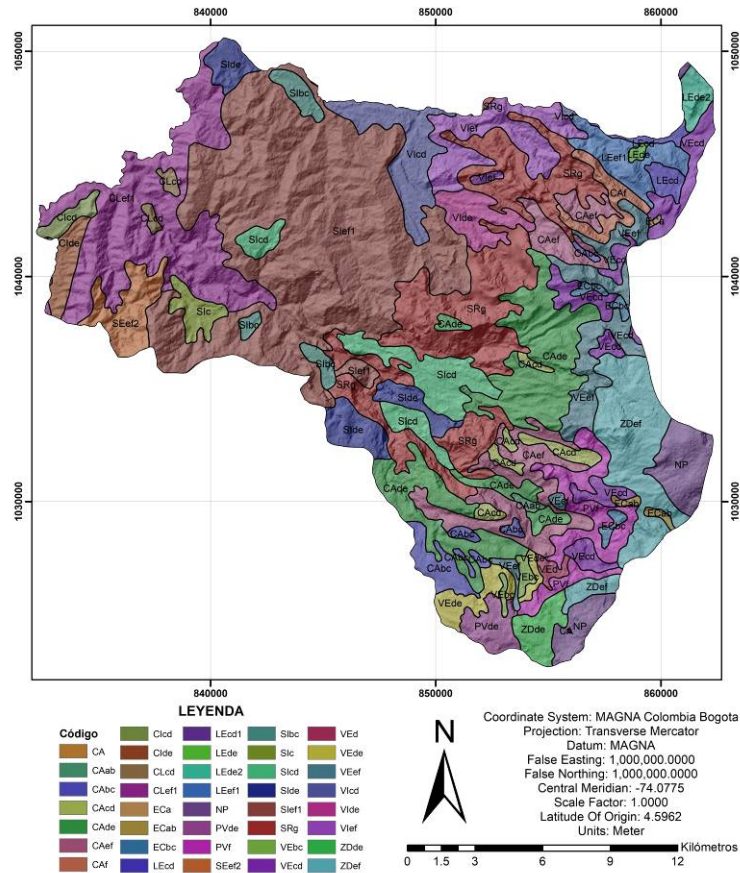


Figura 15. Mapa de suelos de la zona de estudio.

Para el área de estudio, el tipo de suelo con mayor extensión fue el suelo de ceniza volcánica de textura franco arenosa, buen desarrollo de estructura y una adecuada porosidad y aireación (Slef1), el tipo de suelo con mayor densidad de movimientos en masa fue suelo de ceniza volcánica de textura franco arenosa, buen desarrollo de estructura y una adecuada porosidad y aireación (SEef2).

UCS_F	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
CA	0.02	0.00	0.00	0.00
CAab	0.55	0.00	0.00	0.00
CAbc	6.14	0.00	0.00	0.00
CAcd	4.27	0.00	0.00	0.00
CAf	4.45	0.00	0.00	0.00
CLcd	1.36	0.00	0.00	0.00
Eca	0.15	0.00	0.00	0.00
ECab	0.96	0.00	0.00	0.00

UCS_F	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
ECbc	1.88	0.00	0.00	0.00
LEcd1	0.19	0.00	0.00	0.00
LEde	0.48	0.00	0.00	0.00
NP	11.91	0.00	0.00	0.00
VEd	1.16	0.00	0.00	0.00
ZDef	21.60	0.00	0.00	0.00
VEef	14.07	0.00	0.00	0.00
Vide	6.19	0.00	0.01	0.00
Slide	11.15	0.00	0.01	0.00
PVf	11.60	0.00	0.02	0.00
VEbc	1.41	0.00	0.02	0.00
VEde	5.01	0.00	0.03	0.00
Cide	3.90	0.00	0.03	0.00
CAde	36.36	0.01	0.04	0.01
Slbc	4.70	0.00	0.05	0.01
LEcd	3.00	0.00	0.07	0.01
SRg	52.25	0.04	0.07	0.01
CAef	20.74	0.02	0.07	0.01
PVde	4.31	0.00	0.09	0.01
ZDde	4.51	0.00	0.09	0.01
Clcd	2.11	0.00	0.12	0.02
Vlcd	11.59	0.02	0.13	0.02
VEcd	13.96	0.02	0.17	0.02
LEde2	2.72	0.01	0.26	0.04
Slc	3.48	0.01	0.34	0.05
LEef1	7.45	0.03	0.35	0.05
Vlef	13.60	0.06	0.43	0.06
CLef1	40.55	0.24	0.59	0.08
Slef1	103.23	0.63	0.61	0.09
Slcd	14.61	0.25	1.70	0.24
SEef2	7.89	0.14	1.79	0.25
TOTAL	455.53	1.49	7.11	1.00

Tabla 5. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de suelos.

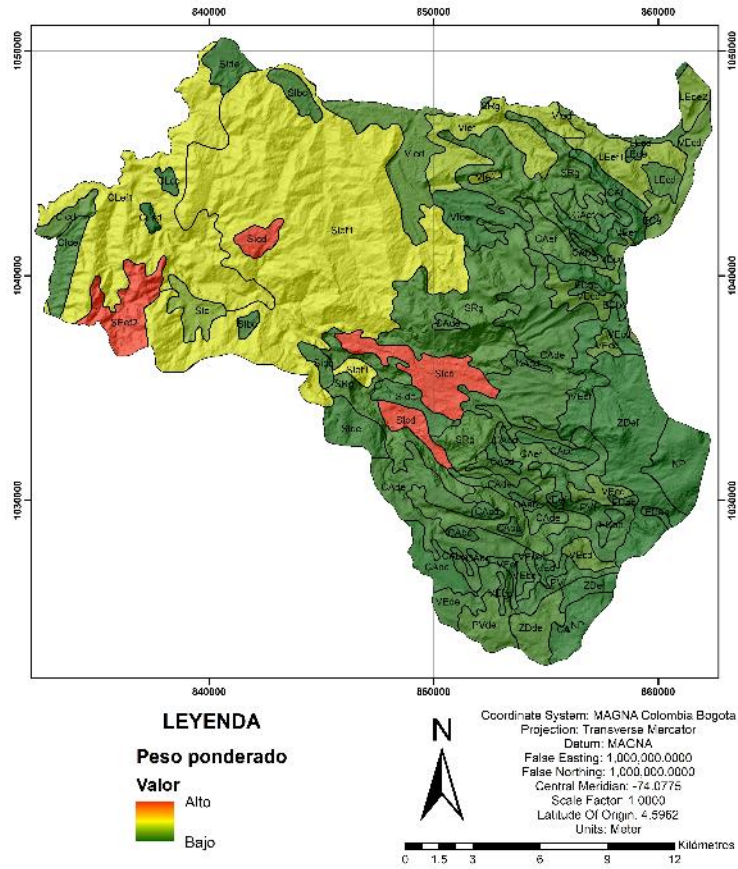


Figura 16. Mapa de suelos ponderado.

5.2.2.6 Cobertura

Se utilizó como insumo los tipos de cobertura en el terreno utilizados en las planchas 205, 206, 224 y 225 de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, donde para el área de estudio se tienen un total de 25 tipos de coberturas. Las coberturas al ser intervenidas, provocan cambios en las características físicas generando casos de movimientos en masa (G Trejos & J Sandoval, 2012).

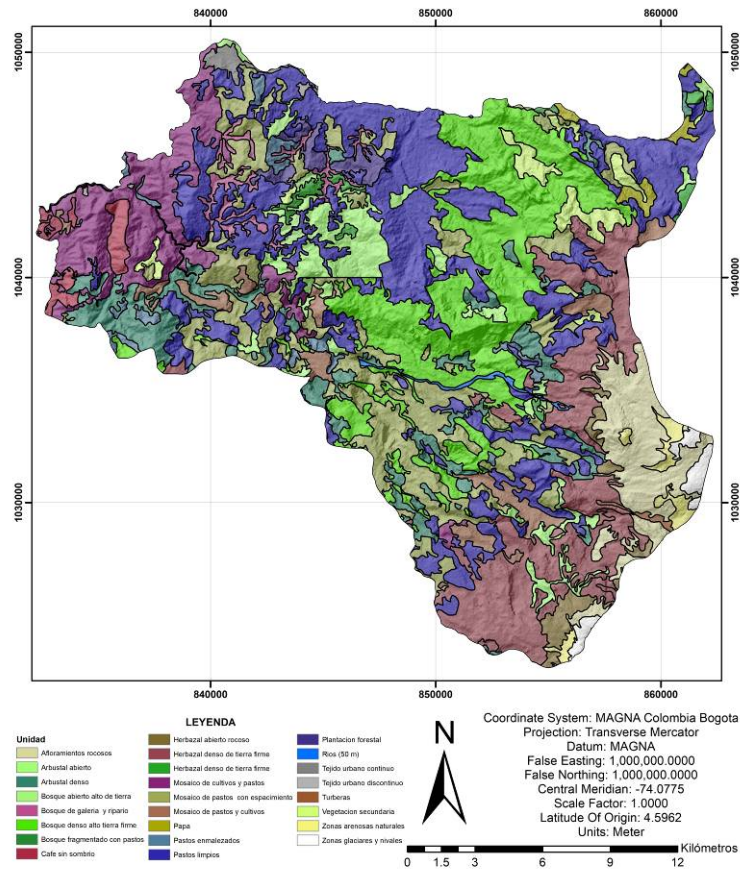


Figura 17. Mapa de cobertura de la zona de estudio.

Para el área de estudio, la cobertura con mayor extensión fue los pastos limpios y la cobertura con mayor densidad de movimientos en masa fue el bosque de galería y ripario.

Cobertura	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
Afloramientos rocosos	22.58	0.00	0.00	0.00

Cobertura	Área total (km²)	Área afectada (km²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
Herbazal abierto rocoso	5.41	0.00	0.00	0.00
Tejido urbano continuo	1.93	0.00	0.00	0.00
Tejido urbano discontinuo	0.43	0.00	0.00	0.00
Turberas	0.70	0.00	0.00	0.00
Zonas arenosas naturales	4.00	0.00	0.00	0.00
Zonas glaciares y nivales	3.72	0.00	0.00	0.00
Ríos (50 m)	1.83	0.00	0.01	0.00
Herbazal denso de tierra firme	51.50	0.02	0.03	0.00
Bosque abierto alto de tierra	2.10	0.00	0.05	0.01
Bosque denso alto tierra firme	71.47	0.09	0.12	0.02
Bosque fragmentado con pastos	0.32	0.00	0.12	0.02
Mosaico de pastos y cultivos	13.94	0.02	0.13	0.02
Pastos enmalezados	7.05	0.01	0.16	0.02
Herbazal denso de tierra firme	3.57	0.01	0.16	0.02
Mosaico de cultivos, pastos	32.95	0.10	0.31	0.04
Mosaico de pastos con esparcimiento	56.63	0.24	0.42	0.06
Plantación forestal	5.12	0.02	0.42	0.06
Pastos limpios	98.26	0.49	0.50	0.07
Vegetación secundaria	8.46	0.04	0.52	0.07
Arbustal denso	29.26	0.16	0.55	0.07
Café sin sombrío	7.73	0.04	0.57	0.08
Arbustal abierto	22.00	0.14	0.62	0.08
Papa	2.74	0.02	0.76	0.10
Bosque de galería y ripario	6.10	0.12	2.01	0.27
TOTAL	459.80	1.52	7.46	1.00

Tabla 6. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de cobertura.

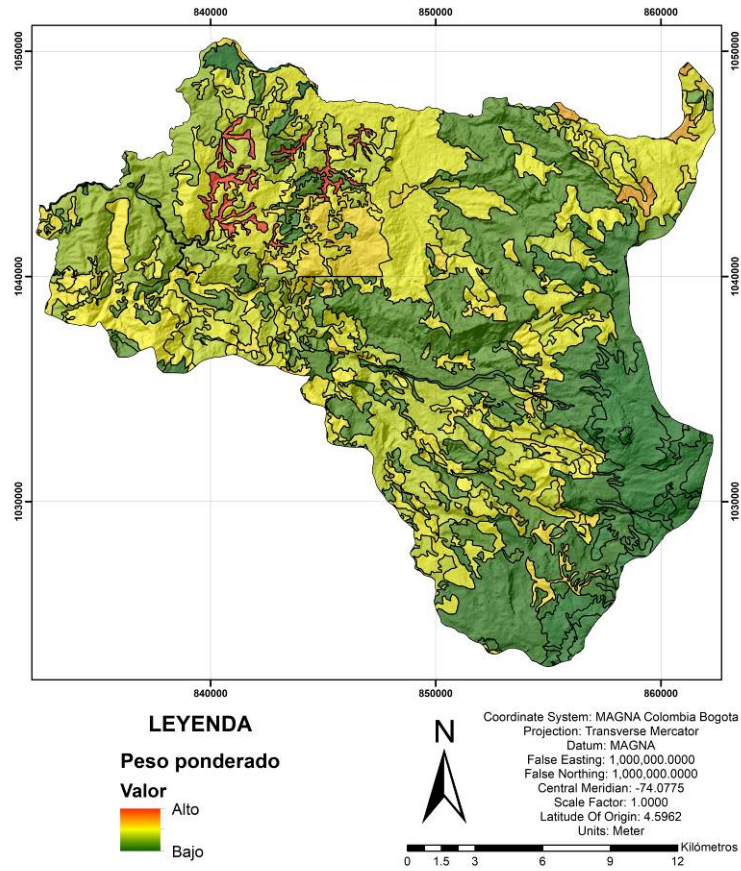


Figura 18. Mapa de cobertura ponderado.

5.2.2.7 Distancia a drenajes

Se utilizó como insumo los drenajes sencillos de Caldas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, donde se clasificó en 5 clases en base a la distancia a los drenajes sencillos.

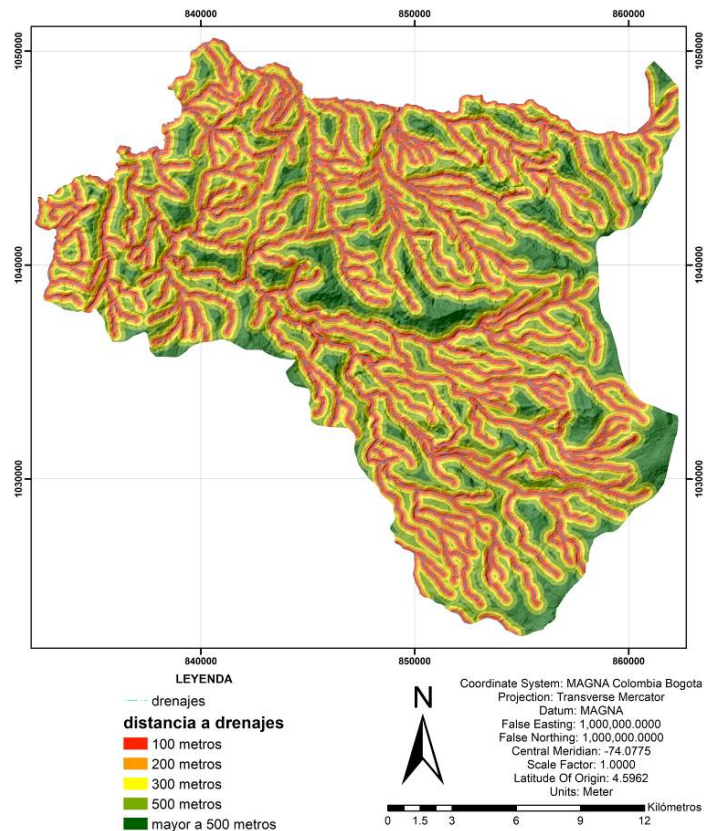


Figura 19. Mapa de distancia a drenajes de la zona de estudio.

Para el área de estudio, a menor distancia a los drenajes, mayor densidad de movimientos en masa, por lo que el peso ponderado será menor al irse alejando de los drenajes.

DISTANCIA A DRENAJE	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
100	118.65	0.47	0.40	0.26
200	224.52	0.87	0.39	0.25
300	309.59	1.19	0.38	0.25
500	408.56	1.44	0.35	0.23
TOTAL	1061.32	3.98	1.53	1.00

Tabla 7. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de distancia a drenajes.

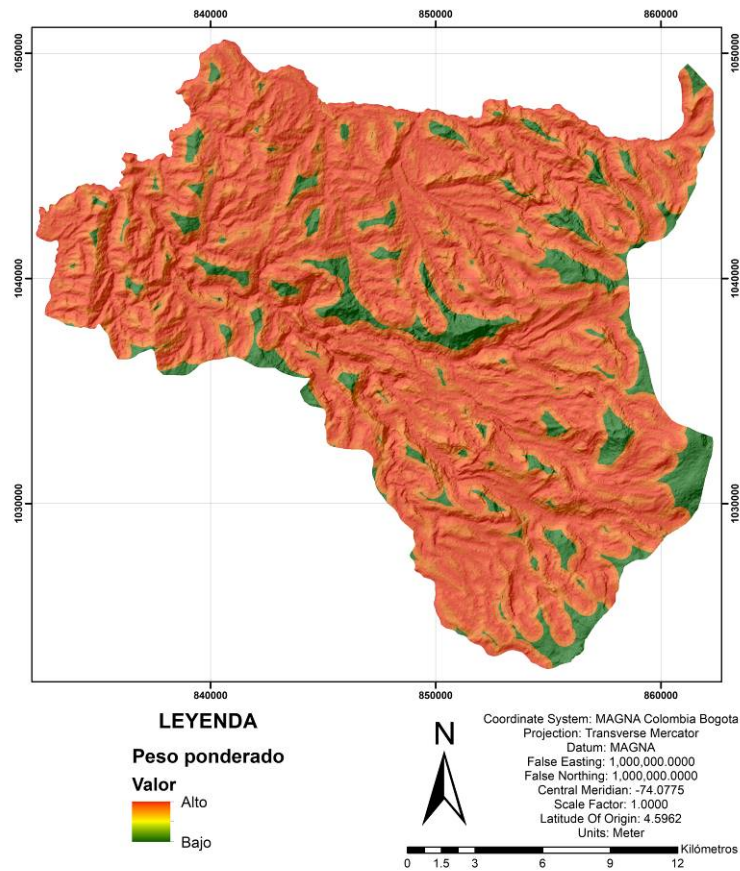


Figura 20. Mapa de distancia a drenajes ponderado.

5.2.2.8 Distancia a fallas

Se utilizó como insumo las fallas de las planchas 205, 206, 224 y 225 del mapa geológico de Colombia a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, el cual se clasificó en 4 clases con base a la distancia a las fallas.

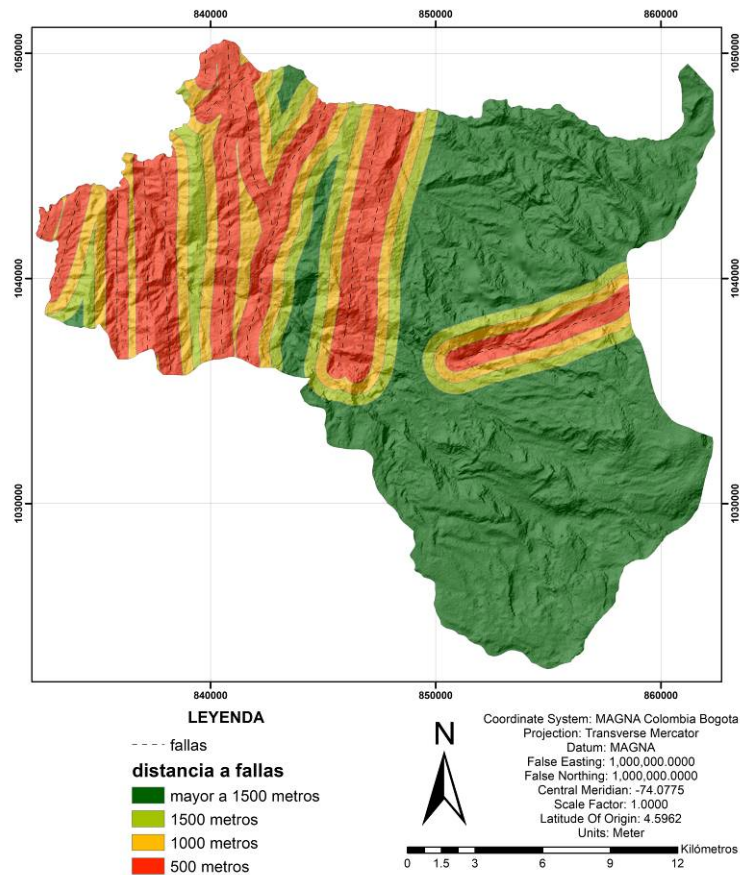


Figura 21. Mapa de distancia a fallas de la zona de estudio.

Para el área de estudio, a menor distancia a las fallas, mayor densidad de movimientos en masa, por lo que el peso ponderado será menor al irse alejando de las fallas.

Distancia	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
500 metros	95.99	0.84	0.87	0.39
1000 metros	155.33	1.10	0.71	0.32
1500 metros	198.25	1.24	0.63	0.28
TOTAL	449.57	3.18	2.21	1.00

Tabla 8. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de distancia a fallas.

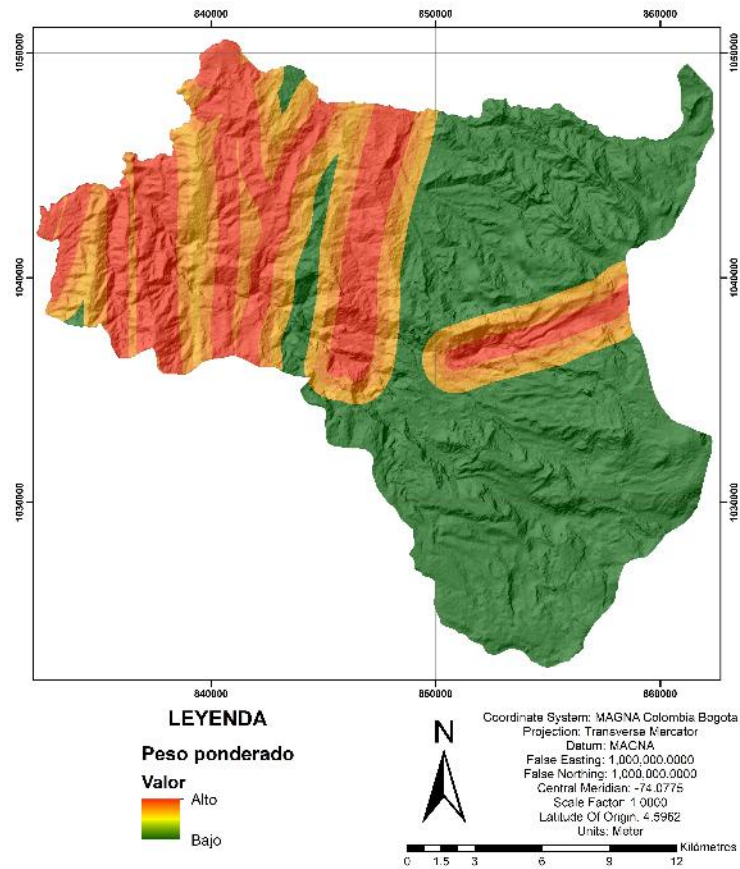


Figura 22. Mapa de distancia a fallas ponderado.

5.2.2.9 Elevación

El mapa de elevación se elaboró a partir del DEM de la NASA de 12.5 metros de tamaño de pixel, el cual se clasificó en 9 clases según su elevación sobre el nivel del mar.

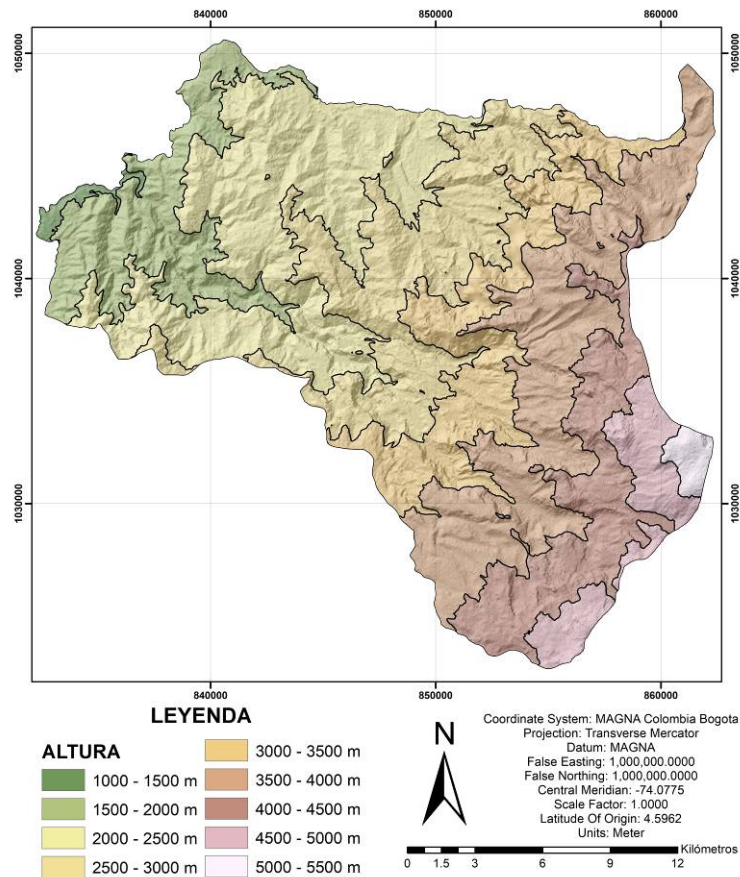


Figura 23. Mapa de elevación de la zona de estudio.

Para el área de estudio, la elevación entre 2000 y 2500 metros sobre el nivel del mar, es la clase que presenta mayor área total y mayor densidad de movimientos en masa.

Elevación	Área total (km ²)	Área afectada (km ²)	Densidad de movimientos en masa (%)	Peso ponderado
4500 - 5000 m	23.20	0.00	0.00	0.00
5000 - 5500 m	4.67	0.00	0.00	0.00
4000 - 4500 m	48.60	0.02	0.03	0.02
3500 - 4000 m	88.57	0.06	0.07	0.04
3000 - 3500 m	57.81	0.06	0.10	0.05
2500 - 3000 m	75.79	0.11	0.14	0.07
1000 - 1500 m	3.14	0.01	0.18	0.09
1500 - 2000 m	48.44	0.28	0.57	0.28
2000 - 2500 m	105.34	0.97	0.92	0.46
TOTAL	455.57	1.49	2.01	1.00

Tabla 9. Área total, afectada, densidad de movimientos en masa y jerarquización analítica para el mapa de elevación.

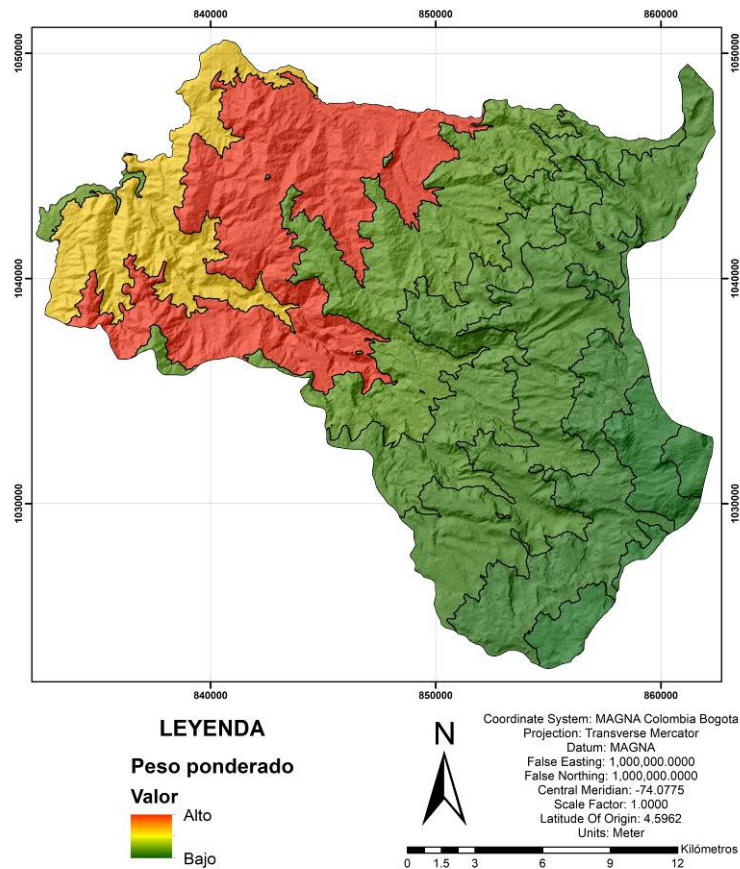


Figura 24. Mapa de elevación ponderado.

5.2.3 Integración de los parámetros

Una vez ponderadas las clases de cada parámetro a tener en cuenta, se da un valor de peso de susceptibilidad para cada uno de los parámetros con base en el promedio de la densidad de movimientos en masa de las clases que presentan áreas afectadas por movimientos en masa, estos valores se presentan en la tabla 10.

Parámetros	Densidad promedio (%)	Peso ponderado
Cobertura	0.415	0.117
Elevación	0.287	0.081
Geomorfología	0.412	0.116
litología	0.387	0.109
Pendiente porcentaje	0.232	0.065
sentido de pendientes	0.418	0.118
Suelos	0.284	0.080

Parámetros	Densidad promedio (%)	Peso ponderado
Distancia a drenajes	0.381	0.107
Distancia a fallas	0.736	0.207
Total	3.553	1

Tabla 10.integración de los parámetros y ponderación con base en densidad de movimientos en masa.

Finalmente se suman todos los parámetros ponderados a través de un SIG para dar como resultado la zonificación por susceptibilidad a movimientos en masa utilizando el método de combinación lineal ponderado (Ayalew, Yamagishi, & Ugawa, 2004) (Bennema, van Setten, 't Hoen, & Voogd, 1984), donde LSI= Índice de Susceptibilidad de Movimientos en masa (landside susceptibility index), n= número de variables, W_i =Peso del parámetro y R_i = peso de la clase (Rodríguez, Tapia, & Albornoz, 2014) (G Trejos & J Sandoval, 2012) (Saaty, 1987)

$$LSI = \sum_{i=1}^n (W_i * R_i)$$

6. RESULTADOS

Se tiene como resultado final la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:100.000 para el municipio de Villamaría en su área urbana y rural, producto de la sumatoria de los parámetros evaluados anteriormente, el cual se clasificó en 5 rangos a través de un SIG para una visualización óptima a partir de límites naturales o natural breakes según su susceptibilidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad (Rodríguez, Tapia, & Albornoz, 2014), donde en la tabla se muestra la ocupación de cada rango en el área de estudio. En la figura 25, se valida el modelo de zonificación de la susceptibilidad, mostrando el mayor porcentaje de ocurrencia de movimientos en masa para susceptibilidades alta y muy alta.

Susceptibilidad	área km ²	Porcentaje en el área de estudio
Muy baja	123.44	27.1%
Baja	127.23	27.9%
Media	67.11	14.7%
Alta	77.43	17.0%
Muy alta	60.32	13.2%

Tabla 11. Área y porcentaje en el municipio de Villamaría de cada grado de susceptibilidad.

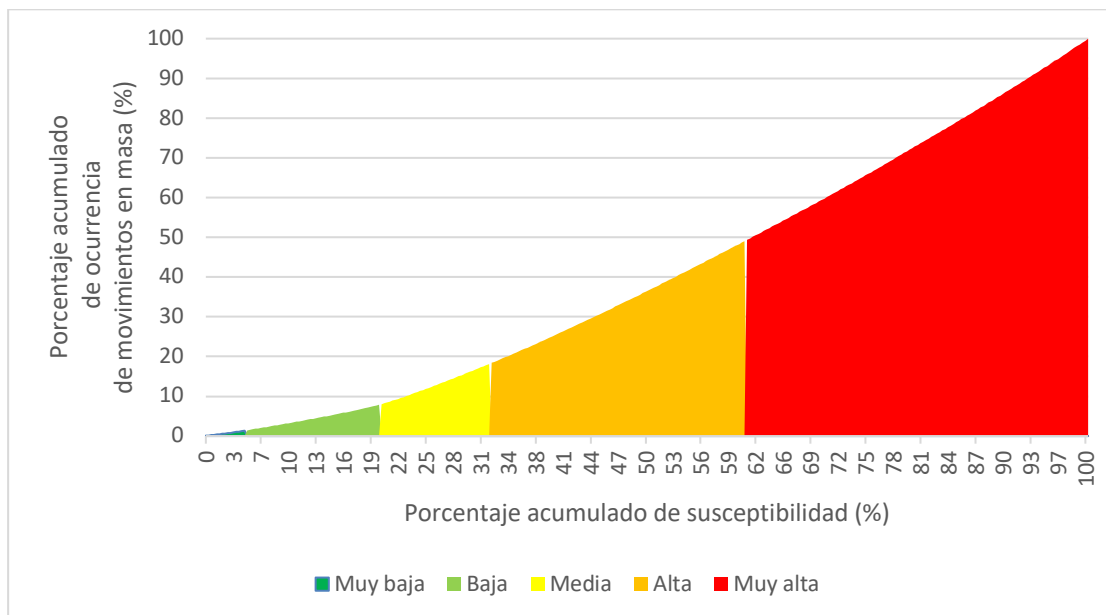


Figura 25. Gráfico de porcentaje acumulado de ocurrencia de movimientos en masa contra el porcentaje acumulado de susceptibilidad.

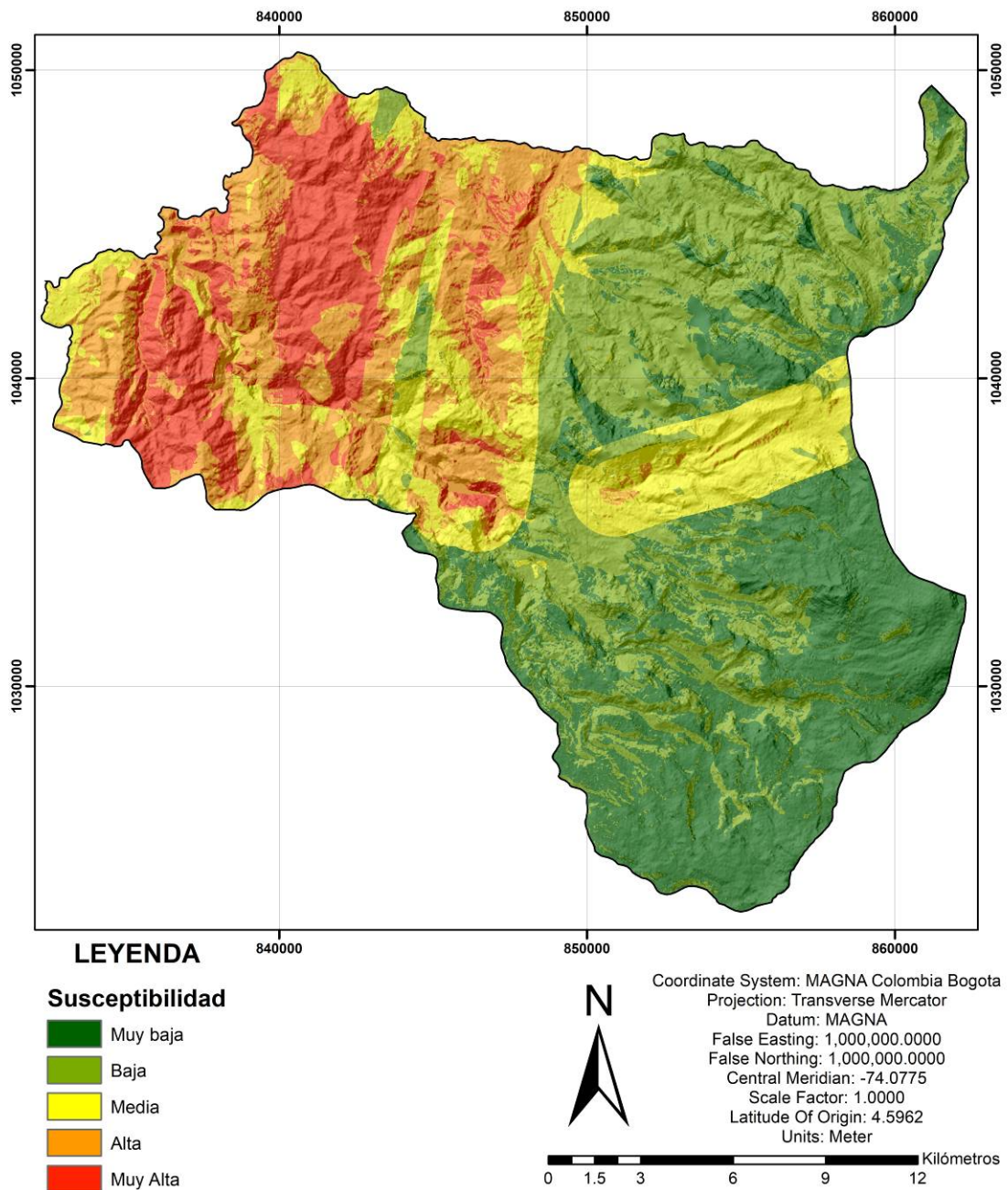


Figura 26. Mapa de susceptibilidad final para el municipio de Villamaría.

Comparando los resultados obtenidos con estudios anteriores, se observa una marcada diferencia en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, en donde se

observa que, en el mapa del POMCA del río Chinchiná se presenta una susceptibilidad mayor en la zona urbana, esto debido a datos tomados únicamente asociados a elementos claves como vías y áreas pobladas, generando un problema de sesgo en la información y que tampoco cubre el total del municipio. Para el mapa del SGC se evidencia una susceptibilidad predominantemente media y alta, marcando lugares con zonificación alta donde no se presentan movimientos en masa ni indicios de estos, generando un modelo no acorde con la distribución de movimientos en masa obtenidos para el municipio.

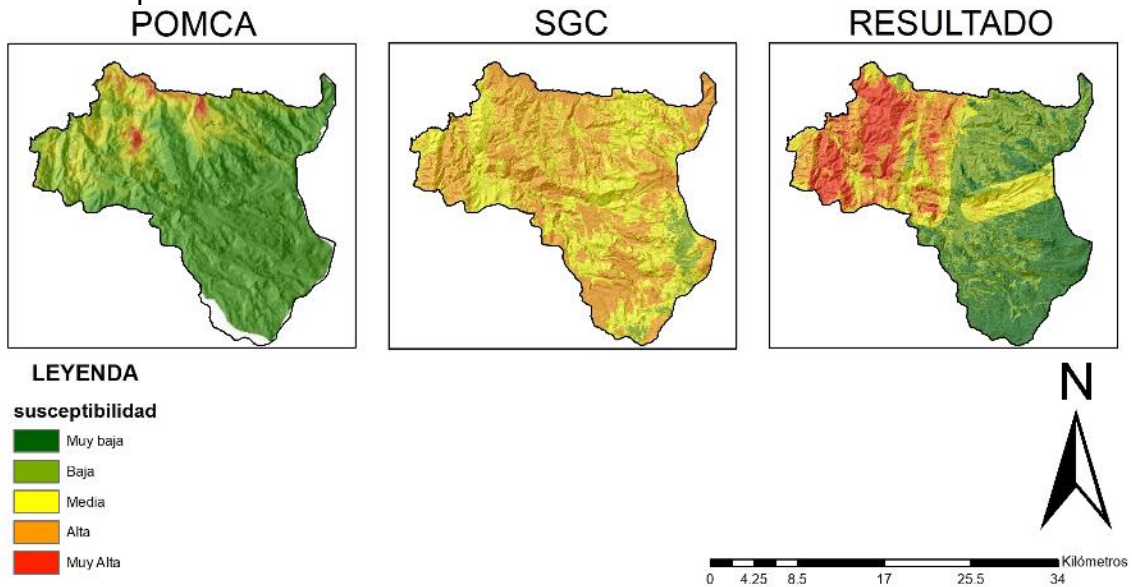


Figura 27. Comparación de los resultados obtenidos para la zona de estudio con otras metodologías utilizadas en la zona de estudio.

7. CONCLUSIONES

- La utilización de sensores remotos para la identificación de movimientos en masa es una herramienta fundamental y gratuita, ya que si se utiliza únicamente fuentes bibliográficas como en trabajos anteriores en la zona de estudio, se tiene menos conocimiento de las condiciones de susceptibilidad del terreno, en cambio, en el caso de estudio, se obtuvo un total de 41 movimientos en masa recolectados bibliográficamente y 13 movimientos en masa con su área delimitada de afectación, mientras que con la utilización de sensores remotos se obtuvo un total de 282 movimientos en masa incluyendo su área de afectación. Además permitió no entrar en errores de sesgo de información debido a información recolectada únicamente cerca a centros poblados y vías principales como ocurre en las fuentes bibliográficas, sino que se recolectó en la totalidad del municipio como en sitios no registrados y de difícil acceso.
- Para el área de estudio, con base a la densidad de movimientos en masa, se determinó los parámetros más significativos para generar movimientos en masa son las altas pendientes, pendientes en sentido SE debido a la luminosidad del sol y su afectación en la humedad del terreno, el complejo Quebradagrande (Ksc), las geoformas de sierras y lomos de presión, los suelos de ceniza volcánica de textura franco arenosa, los bosques de galería y ripario y la mayor cercanía a drenajes y fallas, donde a menor distancia, mayor susceptibilidad a movimientos en masa.
- El uso de Sistemas de Información Geográfica es un método simplificado para la integración de valores cualitativos y cuantitativos en la susceptibilidad.
- Se determinó una marcada mayor susceptibilidad a movimientos en masa al noroeste de la zona de estudio según la sumatoria final de todos los parámetros, mientras que al sur se presenta un menor grado de susceptibilidad.
- Se permitió conocer las condiciones de susceptibilidad para el municipio de Villamaría, aportando al conocimiento de las condiciones de riesgo en el municipio y su planificación.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios de mayor escala de trabajo para las zonas de alta y muy alta susceptibilidad.
- Se debe corroborar los resultados obtenidos con salidas de campo, tanto para confirmar los resultados como para alimentar la base de datos espacial de movimientos en masa. Para este caso de estudio, se utilizó información gratuita y secundaria sin verificación de campo.
- Se deben generar insumos con escala más detallada para un conocimiento más preciso de las condiciones de susceptibilidad, por lo que los municipios deberían invertir la mayor cantidad de recursos posibles a mejorar y actualizar su cartografía para una mejor gestión del territorio.
- Los sensores remotos ideales para cartografiar movimientos en masa son los que presentan mayor resolución espacial para cartografiar adecuadamente los deslizamientos.
- Se debe realizar corroboraciones de campo para validar los modelos de susceptibilidad, que en el caso de la zona de estudio, no fue posible debido a las condiciones de cuarentena presentes en la fecha de realización del estudio

BIBLIOGRAFÍA

- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 21-44.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., & Ugawa, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Springer*.
- Barlow, J., Franklin, S., & Martin, Y. (2006). High Spatial Resolution Satellite Imagery, DEM Derivatives, and Image Segmentation for the Detection of Mass Wasting Processes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 687-692.
- Bennema, S., van Setten, A., 't Hoen, H., & Voogd, H. (1984). Multicriteria evaluation for regional planning: Some practical experiences. *Papers of the Regional Science Association*, 59-69.
- Berhane, G., Kebede, M., Alfarah, N., Hagos, E., Grum, B., Giday, A., & Abera, T. (2020). Landslide susceptibility zonation mapping using GIS-based frequency ratio model with multi-class spatial data-sets in the Adwa-Adigrat mountain chains, northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*.
- Bransford, J., & Stein, B. (1993). The Ideal Problem Solver. *Centers for Teaching and Technology - Book Library*.
- Cartaya, S., Méndez, W., & Pacheco, H. (2006). Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia*, 638-646.
- Castellanos, E., & Van Westen, C. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, 453-466.
- CMGRD. (2017). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Villamaría*. Villamaría.
- Comisión Nacional para la Investigación en Gestión del Riesgo. (2015). *Sistema nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*. Obtenido de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Comision-Nacional-para-la-Investigacion-en-Gestion-del-Riesgo.aspx>
- Congreso de la República de Colombia. (Septiembre de 1997). Ley 388 de 1997. *Ley 388 de 1997*. Bogotá, Colombia.
- Congreso de la República de Colombia. (Abril de 2012). Ley 1523 de 2012. *Ley 1523 de 2012*. Bogotá, Colombia.
- Corpocaldas. (2014). *Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el departamento de Caldas - Colombia*. Manizales.
- Fernández, T., Jiménez, J., Pérez, J. L., Delgado, J., Cardenal, F. J., Irigaray, C., & Chacón, J. (2010). Identificación de escarpes de movimientos de ladera mediante técnicas de teledetección. *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*, 818-829.
- Flentje, P. N., Miner, A., Whit, G., & Fell, R. (2007). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Australian Geomechanics Journal*, 13-36.
- G Trejos, G. R., & J Sandoval, H. M. (2012). Guía metodológica para la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100.000. .
- García, J., & Ferlín, S. (2014). Una apuesta a la sostenibilidad, caso Villamaría, Caldas.

- GCA, P. (2007). Movimientos en masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. *Publicación Geológica Multinacional*.
- González, J. C. (2014). *La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica*. Bogotá: Especialización en Recursos Hídricos, Universidad Católica de Colombia.
- Hutchinson, J. N. (1968). Mass Movement. *Encyclopedia of Geomorphology*, 688 - 695.
- Mendoza, J., & Aristizábal, E. (2017). Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia. *Ingeniería y ciencia*, 173–206.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2004). *Guía Metodológica Información práctica para formulación de Planes de Ordenamiento Territorial*. Bogotá: Dirección de Desarrollo Territorial.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2 de agosto de 2012). Decreto número 1640. *Decreto número 1640*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (22 de agosto de 2018). Decreto número 1077 DE 2015. *Decreto número 1077 DE 2015*. Bogotá, Colombia.
- Muñiz, J. A., & Hernández, V. M. (2012). Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 103-114.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación. (2009). *Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres Una Guía*. roma: FAO.
- Paz, J. A., González, R., Gómez, M., & Velasco, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 128-143.
- Prasanna, S., & Saranaathan, S. (2018). Identification of landslide susceptibility zonation in CNG ghat section, Gudalur, The Nilgiris – Using GIS based ANN/Multi criteria method . *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 871-875.
- Ramírez Calderon, D. (2016). El ordenamiento territorial para la gestión del riesgo de desastres en Colombia. *Territorios*.
- Roa, J. G. (2006). Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela. *Ágora-Trujillo*, 185-205.
- Rodríguez, A., Tapia, A., & Albornoz, C. (2014). Susceptibilidad de movimientos en masa en el Valle de Socoroma, Precordillera Andina de Arica y Parinacota. *Diálogo Andino*, 25-39.
- Rojas, P. (2015). *La gestión del riesgo en el ordenamiento jurídico colombiano*. Universidad de los Andes, Centro Interdisciplinario de Estudios sobre Desarrollo.
- Ruiz, G., Medina, E., Alvarado, C., Trejos, G., Sandoval, Montero, J., Ortegón, C. (2012). Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en masa (escala 1:500.000) . *Conference: Congreso de Geotecnia, Manizales Colombia*.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathl Modelling* , 161-176.

- SGC. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*. Bogotá.
- United Nations Officer for Outer Space Affairs. (2014). *United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response*. Obtenido de <http://www.un-spider.org/risks-and-disasters/the-un-and-disaster-risk-management>
- Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards*.
- Varnes, J. D. (1958). Landslides types and processes. *Landslides and engineering practice*, 20 - 47.