

**ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA EN EL
MUNICIPIO DE SANTUARIO (RISARALDA)**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2024**

**ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA EN EL
MUNICIPIO DE SANTUARIO (RISARALDA)**

**Luis Miguel Henao Idárraga
Juan Pablo Hernández García**

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
2024**

Tabla de Contenido

Resumen.....	8
Introducción	9
Localización	10
Objetivos.....	12
Objetivo General.....	12
Objetivos Específicos.....	12
Justificación	13
Marco Conceptual.....	14
Referente Normativo y Legal.....	14
Referente Teórico	15
Antecedentes	17
Clasificación de movimientos en masa.....	25
Metodología	30
Recopilación de Información	31
Estructuración de Información de Eventos De Remoción En Masa Registrados Y	
Análisis Multitemporal	32
Procesamiento de las Variables Cartográficas	33
Realización de la Zonificación De Susceptibilidad Por Movimientos En Masa	33
Análisis de Resultados	35

	4
Resultados	37
Eventos Registrados y Análisis Multitemporal.....	37
Variables y Características Biofísicas	44
Geología.....	45
Geología estructural	52
Geomorfología	54
Pendientes	69
Cobertura de la tierra	71
Susceptibilidad a movimientos en masa	74
Análisis de Resultados	85
Eventos registrados y análisis multitemporal	85
Susceptibilidad a movimientos en masa	87
Conclusiones.....	92
Recomendaciones	93
Bibliografía	95

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de localización municipio de Santuario Risaralda. (Fuente: Elaboración propia).....	11
Ilustración 2. Etapas del proyecto. (Fuente: Elaboración propia)	30
Ilustración 3. Metodología para la zonificación. (Fuente: (Turner & McGuffey, 1996))	34
Ilustración 4. Mapa de distribución de puntos en aplicación web ArcGIS Online (Fuente: Elaboración propia).....	44
Ilustración 5. Mapa de calor en aplicación web ArcGIS Online. (Fuente: Elaboración propia).....	44
Ilustración 6. Mapa geológico Santuario Risaralda. (Fuente: Tomado y modificado de SGC)	51
Ilustración 7. Mapa geológico estructural Santuario Risaralda. (Fuente: Tomado y modificado de SGC).	54
Ilustración 8. Esquema de jerarquización para estudios geomorfológicos. (Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2012)	59
Ilustración 9. Mapa Geomorfológico, Santuario Risaralda. Fuente: Tomado y modificado de SGC.....	68
Ilustración 10. Mapa Pendientes, municipio de Santuario Risaralda.	70
Ilustración 11. Mapa de cobertura de la tierra Santuario Risaralda. (Fuente: Tomado y modificado de Gobernación de Risaralda, (2021)).....	74
Ilustración 12. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de geología. (Fuente: Elaboración propia).....	79

Ilustración 13. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de geología estructural. (Fuente: Elaboración propia).	80
Ilustración 14. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de geomorfología. (Fuente: Elaboración propia).....	81
Ilustración 15. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de pendientes. (Fuente: Elaboración propia).	82
Ilustración 16. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor cobertura de tierra. (Fuente: Elaboración propia).	83
Ilustración 17. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. (Fuente: Elaboración propia).	84
Ilustración 18. Numero de eventos de remoción en masa registrados para cada año. (Fuente: Elaboración propia).	86
Ilustración 19. Numero de procesos de remoción en masa registrados según el tipo de evento. (Fuente: Elaboración propia).....	87
Ilustración 20. Rangos de susceptibilidad a movimientos en masa. (Fuente: Elaboración propia).	88
Ilustración 21. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa con relación a eventos registrados. (Fuente: Elaboración propia).	91

Lista de Tablas

Tabla 1. Tipos y subtipos de movimientos en masa y sus características más importantes. (Fuente: Tomado y modificado de: (Servicio Geológico Colombiano, 2017))	28
Tabla 2. Grados de susceptibilidad.....	35
Tabla 3. Eventos de remoción en masa registrados en el municipio de Santuario Risaralda.	37
Tabla 4. Unidades cronoestratigráficas en las planchas del Servicio Geológico Colombiano.....	45
Tabla 5. Unidades geológicas presentes en el municipio de Santuario.....	46
Tabla 6. Gama de colores designados por ambiente geomorfológico.....	63
Tabla 7. Rangos de pendiente en porcentaje presentes en el municipio de Santuario con sus respectivas áreas y porcentajes de ocupación.	69
Tabla 8. Factores condicionantes y criterios para establecer pesos en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.	77
Tabla 9. Resultados zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.....	88

Resumen

El presente estudio se centra en el desarrollo de una zonificación por susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Santuario (Risaralda). Para realizar la zonificación se tuvieron en cuenta factores intrínsecos del terreno como pendientes, geología, geología estructural, geomorfología y cobertura de la tierra, mediante un análisis multicriterio y heurístico. Adicionalmente, se hizo una recopilación y estructuración de los eventos de remoción en masa del municipio en los últimos 5 años. Esto se realizó mediante los softwares ArcMap y ArcGIS online. A partir de los procedimientos efectuados se obtuvo como resultado un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, una tabla estructurada con la información de eventos de remoción en masa en los últimos 5 años en el municipio y una aplicación web de control deslizante en ArcGIS online.

La mayor parte del municipio se encuentra en un rango de susceptibilidad alta con 10900,58 hectáreas y un 57,07% de ocupación en el territorio, seguido de las susceptibilidades media y alta con un 18,93% y 16,94% de ocupación respectivamente. La susceptibilidad baja ocupa 1304,33 hectáreas y 6,83%, por último, la susceptibilidad muy baja abarca tan solo el 0,23% del área de estudio con 42,65 hectáreas. Adicionalmente se hizo una comparación en la distribución de los eventos registrados y la zonificación, donde los puntos de los eventos de procesos de remoción en masa registrados en el municipio coinciden con áreas que tienen rangos de susceptibilidad altas a muy altas, lo cual valida los resultados obtenidos en la zonificación.

Introducción

Los procesos de remoción en masa son uno de los tipos más comunes y recurrentes de desastres naturales que ocurren en todo el mundo, estos procesos incluyen deslizamientos, caídas, flujos y reptaciones (Rodríguez Castiblanco, 2017). El cambio climático y la actividad del ser humano sobre su territorio, ha contribuido a un aumento en la frecuencia y la intensidad de los movimientos en masa en todo el mundo, principalmente debido al aumento de las precipitaciones. Colombia no es ajeno a esto, su territorio con una topografía abrupta, complejidad estructural y geomorfológica, sus altas tasas de precipitación, sumado a su alta densidad poblacional y características socioeconómicas, lo convierten en un territorio vulnerable a este tipo de sucesos, especialmente en su zona andina.

El municipio de Santuario se ubica en el flanco Oriental de la Cordillera Occidental, en el centro del departamento de Risaralda. Geomorfológicamente se caracteriza por presentar relieves montañosos y colinados, pendientes medias a altas, con geoformas de origen denudacional. Así mismo, las altas tasas de precipitación y los fenómenos climáticos como La Niña contribuyen a la ocurrencia de este tipo de procesos. Durante el año 2022 se presentaron por lo menos 30 eventos de remoción en masa que afectaron a la comunidad perteneciente a la zona rural del municipio. A manera de resumen se presentaron aproximadamente seis mil (6000) metros cúbicos de material de movimientos en masa que se dieron en el municipio, diecinueve (19) pérdidas de banca, diecinueve (19) crecientes súbitas con afectación de la malla vial rural, cuatro (4) puentes, tres (3) placa huellas, un (1) Box Culvert, una (1) batea, tres (3) muros de contención, treinta y cuatro (34) alcantarillas afectadas y tres (3) tramos de pavimento en la vía La Marina – Santuario, cuatro (4) árboles caídos sobre las vías provocando cierres parciales,

quince (15) veredas afectadas y aproximadamente cuatro mil ochocientos (4.800) habitantes afectados.

La ocurrencia de movimientos en masa en la zona rural genera una alta exposición de la población a escenarios de riesgo, además, afecta el estado de la infraestructura pública y privada, esto genera pérdidas económicas, aumenta los costos de vida, y afecta la prestación de servicios básicos. La incapacidad de brindar la respuesta y atención oportuna por parte de las entidades municipales ante la ocurrencia de movimientos en masa está relacionada con el desconocimiento de las características del territorio que habitan. Es por ello, que todos los esfuerzos que se realicen en torno a la generación de conocimiento y entendimiento del contexto físico y natural constituyen una herramienta de uso potencial en escenarios de planeación, ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

Localización

El municipio de Santuario se ubica en el flanco Oriental de la Cordillera Occidental, en el centro del Departamento de Risaralda, dentro de la cuenca hidrográfica del río Risaralda. El municipio limita con los municipios de Apia, Pueblo Rico, La Celia, Balboa y La Virginia, y con los departamentos de Caldas, Chocó y Valle del Cauca. El área urbana se encuentra sobre una ladera inclinada en dirección SE, con pendientes que varían desde 0 a mayores de 27 grados.

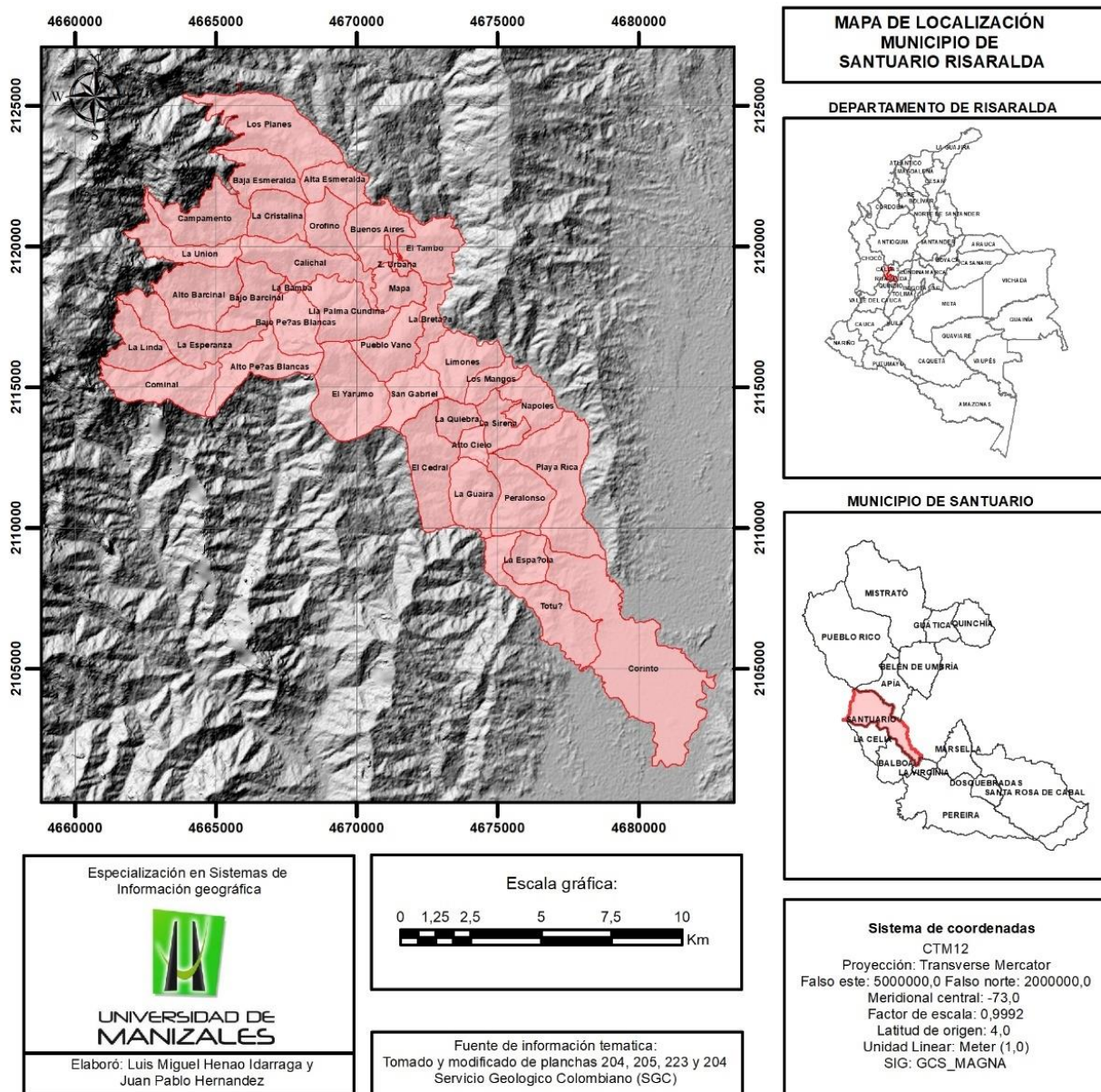


Ilustración 1. Mapa de localización municipio de Santuario Risaralda. (Fuente: Elaboración propia)

Objetivos

Objetivo General

- Determinar la distribución geográfica y espacial de las zonas con susceptibilidad por movimientos en masa en la zona rural del municipio de Santuario Risaralda, mediante un método multicriterio de superposición ponderada.

Objetivos Específicos

- Estructurar la información disponible de los procesos de remoción en masa obtenida por las entidades gubernamentales.
- Analizar mediante fotografías aéreas y satelitales, e información bibliográfica disponible las características geológicas, geomorfológicas y coberturas de la tierra, para realizar un ajuste de las cartografías.
- Elaborar un mapa de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en la zona rural del municipio de Santuario, utilizando el software ArcMap, mediante un análisis multicriterio y heurístico.
- Realizar un análisis multitemporal con la información de los eventos de movimientos en masa disponible.

Justificación

La frecuente ocurrencia de eventos de remoción en la zona rural del municipio de Santuario (Risaralda) ha generado daños en la infraestructura pública y privada, y ha aumentado la exposición de la población ante dichos procesos. Es por ello, que en el año 2022 se declaró calamidad pública, la cual se extendió por un periodo superior a un año. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario realizar acciones que permitan prevenir la ocurrencia de este tipo de fenómenos, como una zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en la zona rural del municipio.

Dentro de las novedades del presente trabajo se encuentra la estructuración de la información disponible de los procesos de remoción en masa, la realización de una zonificación de susceptibilidad para la zona rural del municipio a una escala 1:50.000, lo cual representa un avance en el nivel de detalle sobre el territorio en la zona rural, dado que actualmente las cartografías departamentales y nacionales tienen escalas más pequeñas, y solo la zona urbana cuenta con una zonificación de susceptibilidad a detalle.

Estas actividades se realizan con el fin de consolidar conocimiento sobre el territorio que permitan a los entes gubernamentales y organismos de socorro plantear acciones para disminuir la exposición de la población ante escenarios de riesgo, fortalecer los programas y estrategias de atención y prevención de desastres, conservar la infraestructura pública y privada, y planificar correctamente la ocupación del territorio.

Marco Conceptual

Referente Normativo y Legal

A continuación, se hace una breve reseña de las principales normas que sustentan la realización de la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Santuario Risaralda, actividad de gran importancia en la gestión del riesgo de desastres, ordenamiento territorial y desarrollo sostenible.

LEY 46 DE 1988 CREACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL PARA LA ATENCIÓN Y PREVENCIÓN DE DESASTRES

El Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres creado por la Ley 46 de 1988 y organizado por el Decreto Ley 919 de 1989, establece competencias y mecanismos económicos y jurídicos para la atención y prevención de desastres. De manera específica se plantea: “Todas las entidades territoriales tendrán en cuenta en sus planes de desarrollo, el componente de prevención de desastres y especialmente, disposiciones relacionadas con el ordenamiento urbano, las zonas de riesgo y los asentamientos humanos.” (Artículo 6º, Decreto 919 de 1989).

LEY 1523 DE 24 DE ABRIL DE 2012

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

DECRETO 1807 DE 2014

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

DECRETO 1077 DE 2015

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

PLAN NACIONAL PARA LA GESTION DEL RIESGO DE DESASTRES 2015 - 2030

El Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia, “una Estrategia de Desarrollo” es el instrumento de la Ley 1523, que define los objetivos, programas, acciones, responsables y presupuestos, mediante las cuales se ejecutan los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres en el marco de la planificación del desarrollo nacional.

DECRETO MUNICIPAL 10-100-18-036 DE 05 DE JULIO DE 2022.

Por el cual se declara la calamidad pública en el Municipio de Santuario Risaralda y se dictan otras disposiciones.

Referente Teórico

Susceptibilidad: Se refiere a la predisposición o la probabilidad de que algo sea afectado o influenciado por un determinado fenómeno o evento. (Subdirección de Proyección Institucional, 2020)

Amenaza: Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar

pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (Congreso de la República de Colombia, 2012)

Riesgo: Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. (Congreso de la República de Colombia, 2012)

Geomorfología: La geomorfología es la ciencia de la tierra que estudia la relación entre las formas de la superficie terrestre, los materiales que la componen, su disposición estructural y los procesos que la modelaron. Según (Van Zuidan, 1985) la geomorfología involucra conceptos importantes como morfometría, morfogénesis, morfodinámica y morfoestructural.

Uso del suelo: Serie de operaciones en la tierra llevadas a cabo por el ser humano con la intención de obtener productos y/o beneficios a través del uso de los recursos de la tierra. (Coffey, 2013)

Cobertura de la tierra: Definido como la vegetación (natural o plantada) o las construcciones hechas por el hombre (edificios, etc.) que se encuentran en la superficie de la tierra. El agua, el hielo, los afloramientos rocosos, la arena y superficies similares también son consideradas como cobertura del suelo. (Coffey, 2013)

Movimiento en masa: Incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de suelo, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. (Sharpe, 1938), define los deslizamientos como “un desplazamiento o caída perceptible ladera abajo de materiales (tierra o

roca) relativamente secos”. Existen diferentes clasificaciones para los movimientos en masa, como lo son las propuestas por: (Sharpe, 1938), (Varnes D. J., 1958), (Varnes D. J., 1978), (Hutchinson, 1988), (Cruden & Varnes, 1996) y (Hungry, Evans, & Bovis, 2001).

Antecedentes

En diferentes partes del mundo se ha visto la necesidad de prestar atención a los fenómenos naturales que afectan a la sociedad, es por ello que a lo largo de los años se han realizado diferentes estudios enfocados a la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. A continuación, se hace una revisión de diferentes trabajos realizados alrededor del mundo orientados a la zonificación de susceptibilidad y amenaza con herramientas SIG.

(Chau, 2004) 429-443, realizaron un análisis del riesgo por deslizamientos para la ciudad de Hong Kong, mediante la construcción de un inventario de movimientos en masa y el uso de herramientas SIG para los análisis de riesgo. El análisis se ejecuta para el lapso entre 1984 a 1998, con un total de 1448 deslizamientos.

El cálculo de los mapas de amenaza y riesgo se realizó mediante cálculo ráster, las cuales permiten incluir diversas capas de información, particularmente para este caso se incluyeron datos del terreno como el ángulo de pendiente y elevación, además del efecto ambiental principalmente lluvia, así misma información geológica correspondiente al depósito de suelo y litología y los datos sobre los deslizamientos. Para cada capa el mapa ráster se normaliza a su valor máximo, de tal manera que abarque los valores máximos posibles de índice de riesgo y se le asignan ponderaciones a cada capa de acuerdo a la importancia e influencia observada. El enfoque adoptado permite correlacionar la ocurrencia

y distribución de movimientos en masa con las condiciones de precipitación dominantes y las pérdidas y afectaciones generadas.

Otro ejemplo de este tipo de estudios, en este caso enfocado a Latinoamérica, fue el realizado por (Moreiras, 2005) 345-357, donde realizó un estudio para determinar y evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa en el Valle del Río Mendoza, Argentina, utilizando técnicas de teledetección y SIG, donde obtuvo un mapa cualitativo de susceptibilidad por deslizamientos en escala 1:100.000. El Valle del Río Mendoza ha sufrido desastres por deslizamientos con víctimas y daños severos, por lo que este estudio tiene como finalidad contribuir al conocimiento de susceptibilidad por movimientos en masa en la zona, e implementar este análisis en futuros estudios para reducir el impacto de procesos erosivos, y evitar pérdidas humanas y económicas.

Para realizar este mapa ella involucra factores importantes que condicionan la distribución de movimientos en masa en la zona, como la topografía, la geología, la geomorfología y el uso del suelo. Con la ayuda de un sistema de información geográfica (AutoCAD Map) realizó la superposición de cada uno de estos parámetros, los cuales cumplen la función de parámetros condicionantes. Además, para efectuar esta zonificación elaboró un inventario de movimientos en masa basado en la fotointerpretación de fotografías aéreas tomadas en 1963 a escala 1:50.000, el análisis digital de imágenes satelitales de 1985, 1986, 1997 y 2000, y observaciones de campo, exponiendo la importancia de considerar la distribución de los procesos morfodinámicos activos y que han ocurrido históricamente en la zona de estudio. En el mapa se establecieron cuatro categorías de susceptibilidad final: Alta, moderada, baja y muy baja.

Por su parte, (Colombo, 2005) 291-301, resaltan la importancia de consolidar un inventario de procesos morfodinámicos y los SIG como herramientas fundamentales para la gestión del riesgo, la adecuada ocupación del territorio y uso del suelo, siendo este el objeto principal del proyecto de “Inventario de deslizamiento de tierra en Italia”, en el que además de recopilar la información existente en registros históricos, datos a partir jornadas de campo, también identificaron procesos de remoción en masa mediante la interpretación de fotografías aéreas. Posteriormente llevaron a cabo el diseño y construcción, en la que se almacenó y procesó de manera sistemática la información obtenida. Lo anterior basado fundamentalmente en las tecnologías SIG, las cuales no solo permiten recopilar y gestionar la información, sino además analizar y difundir múltiples datos. Esta herramienta requiere de un acompañamiento y retroalimentación constante, donde se aborden desde un enfoque multidisciplinario las condiciones del terreno, los procesos existentes y la articulación con las entidades encargadas de la planeación territorial y gestión del riesgo, permitiendo así la incorporación de estos insumos en la toma de adecuadas decisiones.

(Chacón, 2006) 341–111, realizaron una revisión de la importancia de los sistemas de información geográfica (SIG) y mapas de geología para ingeniería para el estudio y la evaluación de movimientos en masa, con el fin de prevenir y mitigar riesgos asociados.

Estos autores expresan que los SIG son fundamentales para capturar, almacenar, analizar y visualizar datos geoespaciales relevantes, como la topografía, la geología, la hidrología y otros factores que influyen directamente en la generación de procesos erosivos. Además, indican que son de gran importancia para el tratamiento estadístico de datos y métodos cuantitativos y cualitativos por ejemplo basados en parámetros geológicos y geomorfológicos.

Estos autores también señalan que realizar un inventario de los movimientos en masa presentes en una región particular es importante para una adecuada evaluación de la susceptibilidad y amenaza de estos fenómenos erosivos. Además, en la evaluación de susceptibilidad también es importante tener en cuenta la información disponible de desarrollo de movimientos, como grietas y escalonamientos en el terreno, lo que permite identificar los movimientos que permanecen en estado latente.

(Pandey, Dabral, Chowdary, & Yadav, 2008), utilizaron la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para llevar a cabo la zonificación del peligro de deslizamientos de tierra en la cuenca del río Dikrong, ubicada en Arunachal Pradesh, India. Como metodología para realizar la zonificación utilizaron el sistema de calificación de ponderación basado en la importancia relativa de varios factores causales derivados de datos de sensores remotos y otros mapas temáticos. A cada clase dentro de una capa temática se le asignó una calificación ordinal de 0 a 9. Luego, la suma de estos mapas de atributos se multiplicó por los pesos correspondientes. El mapa de amenaza obtenido se clasificó en las categorías, "peligro muy bajo", "peligro bajo", "peligro moderado", "peligro alto"

Por su parte (Van Westen, 2008) 112-131, abordan los aspectos más relevantes relacionados con los cuatro conjuntos de datos espaciales de interés para la evaluación en cuestión, estos corresponden al inventario de deslizamientos, los factores ambientales, factores desencadenantes y elementos en riesgo, brindando un panorama integral sobre los insumos requeridos, las técnicas de recopilación, las metodologías a implementar para la obtención de análisis y sus potenciales usos. Lo anterior, haciendo especial énfasis en los avances de los sistemas de información geográfica y teledetección, como herramientas que dan lugar a análisis y permiten superar las limitaciones de información levantada en campo,

que por lo general se asocia a vacíos o faltantes de información. Con el fin de instruir sobre los múltiples conceptos listados, implementan datos espaciales de la ciudad de Tegucigalpa, evidenciando los mapas derivados que se generan a partir de los DEM, capas de información implementadas para la generación de una base de datos, entre otros. Este trabajo permite vislumbrar cómo debe ser abordado un estudio de este tipo, sorteando las dificultades en la obtención de información y las posibles alternativas a implementar y si están son aplicables o no dependiendo de la escala y propósito del estudio.

(Arnous, 2011) realizó una zonificación de amenaza por movimientos en masa donde se utiliza una combinación de técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el área de Wadi Watier, en el sur del Sinaí, Egipto. El objetivo principal del estudio es identificar y mapear las áreas de la zona de Wadi Watier que presentan un mayor peligro de deslizamientos de tierra. Para lograrlo, se recopilan datos de teledetección, como imágenes satelitales Landsat, y se procesan en un SIG. En el análisis, se consideran una serie de factores que pueden influir en el riesgo de deslizamientos de tierra, como la pendiente del terreno, la geología, la cobertura vegetal y la precipitación. Estos factores se combinan y se ponderan utilizando técnicas de análisis espacial en el SIG. Para realizar la zonificación crearon un algoritmo en base a los factores derivados de los datos de herramientas de teledetección y calificar la zona de estudio y clasificarla en diferentes zonas de riesgo.

(Akgun, 2012) hicieron uso de datos de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) para evaluar el riesgo de deslizamientos de tierra en la ciudad de Izmir, ubicada en el oeste de Turquía. En el estudio, se utilizaron datos de teledetección, que incluyen imágenes satelitales de alta resolución, para obtener información sobre la topografía, la vegetación y otros factores relacionados con los deslizamientos de tierra. Estos datos se

combinaron y analizaron en un entorno de SIG para evaluar la vulnerabilidad de diferentes áreas de la ciudad y generar mapas de riesgo de deslizamientos.

A partir de datos como la geología, geomorfología, pendientes, distancia a fallas, distancia a vías se construyó un modelo de susceptibilidad a movimiento en masa utilizando un modelado de regresión logística que refleja la probabilidad espacial relativa a la ocurrencia de movimientos. En el sector, el efecto detonante más importante es la actividad sísmica, la precipitación se tuvo en cuenta como un dato detonante secundario. Con los detonantes se calculó la amenaza a movimiento en masa.

Otro estudio a tener en cuenta fue el realizado en el área de Devrek Turquía por (Yilmaz, 2012), los cuales generaron mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, utilizando datos geoespaciales y variables temáticas relacionadas con los deslizamientos, como la topografía, la geología, la cobertura vegetal y la proximidad a las fuentes fluviales. Estos datos fueron procesados en un SIG y se sometieron a análisis estadístico bivariado para identificar las relaciones y correlaciones entre las variables y la ocurrencia de movimiento en masa. Para este estudio los autores implementaron tres etapas principales; adquisición de datos, producción y manipulación de datos, análisis y construcción de los mapas susceptibilidad.

En la etapa de adquisición de datos recopilaron información cartográfica disponible del área de estudio como la geología y se elaboró el mapa de inventario de movimientos en masa. En la etapa de producción de datos realizaron el ingreso de datos, la creación de mapas de parámetros a tener en cuenta en la zonificación y la construcción de las bases de datos para los análisis de datos.

Para la construcción del mapa de susceptibilidad utilizaron el método del índice estadístico (W_i) el cual es un método bivariado. Para su construcción de este mapa se consideró el inventario de movimientos, las pendientes, las curvaturas del terreno, la topografía, el análisis de cuencas (distancia y densidad de drenajes), geología y geomorfología. Después de esto calcularon los pesos, y se le asignaron a cada uno de los parámetros de las capas temáticas. Seguidamente las capas temáticas se cruzan. El mapa resultante luego lo reclasificaron en cuatro clases de susceptibilidad (muy baja, baja, alta, muy alta) utilizando los parámetros de distribución del mapa de susceptibilidad.

Por su lado, (Medina Quira, 2017) implementó una metodología de Evaluación Espacial Multicriterio –EEM para realizar la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra de la Cuenca del río Patía, al sur del departamento del Cauca. Para ello involucró variables como la cobertura vegetal y uso del suelo, pendientes, precipitación, geología, geomorfología, zonas de influencia de fallas y eventos de deslizamientos georreferenciados. A cada uno de los parámetros le asignó un peso porcentual y los combinaron mediante un método lineal ponderado establecido por (Voogd, 1983).

(Quiroz Hernandez, 2019) en su tesis de especialización realizó un análisis de susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca del río San Francisco, Risaralda, donde implementó una metodología que consta de cinco fases principales: Recopilación de información, procesamiento SIG de variables cartográficas, Obtención de variables derivadas de MDE, ponderación de las variables y análisis de susceptibilidad. Para obtener el mapa de susceptibilidad implementó un análisis multicriterio donde evaluó y calificó cada una de las variables involucradas (pendientes, geomorfología, geología, cobertura de la tierra y variable

de proximidad a vías, drenajes y fallas), y definió tres categorías de susceptibilidad como alta, media y baja.

Otro estudio de interés realizado en la zona andina colombiana es el de (Aristizábal E. L.-V., 2019) 85-105, donde los autores proponen el estudio de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia para el Valle de Aburrá, subregión de Antioquia, esto implementando un método cuantitativo en el que se analizan aspectos como probabilidad espacial, mediante métodos estadísticos como el peso de la evidencia. En esta misma línea evaluaron la probabilidad temporal, teniendo en cuenta las condiciones de precipitación en términos de los umbrales de lluvia y lluvia antecedente que han detonado o desencadenado procesos de remoción en masa. Finalmente, analizaron la probabilidad de magnitud, implementando la curva de magnitud – frecuencia con base en el inventario de movimientos en masa elaborado.

Por último, y teniendo en cuenta los avances tecnológicos de los últimos años algunos autores como (Merghadi, 2020), exponen la importancia de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para estudios de susceptibilidad por movimientos en masa, y realizan una descripción general de los modelos actuales de aprendizaje automático para estudios de susceptibilidad a movimientos en masa.

El aprendizaje automático puede analizar gran cantidad de datos históricos que influyen en la ocurrencia de procesos erosivos, permite identificar relaciones y patrones complejos entre variables. Al aprender de estos datos, los modelos de aprendizaje automático pueden realizar predicciones precisas sobre la ocurrencia de movimientos en masa, la probabilidad de deslizamientos de tierra y los posibles impactos. Sin embargo, (Merghadi et al., 2020) señalan que la presión de esta inteligencia artificial aún es debatible debido al alto nivel

de incertidumbre detrás de la dificultad de implementar un modelo único o particular sea favorecido como el más adecuado para todos los escenarios de riesgo.

(Aristizábal, y otros, 2022) se enfocan en abordar diferentes metodologías encontradas en la literatura, las cuales pueden ser objeto de implementación para zonas rurales y urbanas, su uso dependerá de la adaptabilidad a las condiciones del terreno, particularmente las metodologías mencionadas en el presente artículo fueron aplicadas en el municipio de Andes, suroeste del departamento de Antioquia.

A lo largo del artículo abordan la evaluación y zonificación en suelo rural por factor detonante lluvia y sismo, para el primero sugieren implementar tres metodologías de análisis, como lo son el método del peso de la evidencia, el método estadístico multivariado regresión logística y un método híbrido entre el peso de la evidencia y el método heurístico análisis jerárquico de procesos.

Clasificación de movimientos en masa

En este trabajo se tuvo en cuenta la clasificación de movimientos en masa establecida en la Clasificación de movimientos en masa y su distribución en diferentes terrenos geológicos de Colombia del Servicio Geológico Colombiano (SGC), donde realizan una recopilación de diferentes sistemas de clasificación, e identifican los tipos de movimientos más comunes en el medio colombiano.

- Caídas

Las caídas se deben al desprendimiento súbito de masas de roca o suelo desde la cara de laderas empinadas, precedido o no por volcamiento y seguido por lo general de rebote y rodamiento. Para (Hutchinson, 1988) las caídas corresponden a descensos más o menos libres y

extremadamente rápidos de masas de suelo o roca de cualquier tamaño. La caída es un tipo de movimiento muy rápido a extremadamente rápido.

- Volcamiento

Según (Cruden & Varnes, 1996), comprende la rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un pivote o eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza. Son comunes en laderas o taludes de roca con discontinuidades fuertemente inclinadas.

- Deslizamientos

Se refiere a tipos y subtipos de desplazamientos de masas a lo largo de superficies de ruptura, creadas en el desarrollo del proceso o de discontinuidades originales. (Hutchinson, 1988) define los deslizamientos como movimientos relativamente rápidos pendiente abajo de suelo o roca a lo largo de una o más superficies discretas que delimitan la masa movilizada en el proceso. Por su parte, (Cruden & Varnes, 1996) definen este tipo de desplazamiento como un movimiento de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte.

Existen tres tipos de deslizamientos, rotacionales traslacionales y compuestos. Estos tres tipos son comunes en toda la extensión de la región Andina de Colombia y demás zonas montañosas. Estos tres tipos se describen a continuación.

Deslizamientos rotacionales: Corresponde a movimientos lentos a moderadamente lentos, con una superficie de falla curva y cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento. Generalmente no está controlada estructuralmente

Deslizamientos traslacionales: Corresponde a movimientos a lo largo de una superficie de falla planar, por lo general, estructuralmente controlada. Estos movimientos tienden a ser rápidos, especialmente si la superficie de falla está muy inclinada, la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo.

Deslizamiento compuesto: estos movimientos tienen características tanto de los rotacionales como de los traslacionales. La corona del movimiento puede presentar bloques desplazados en forma de graben, además, la superficie de falla puede presentar un escarpe muy pendiente que se suaviza en profundidad.

- Flujos

El término flujo se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada se asemeja a la de un líquido viscoso. Su límite inferior puede ser una superficie a lo largo de la cual se ha presentado un movimiento diferencial apreciable o una zona espesa de cizallamiento distribuido (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Se incluyen aquí todos los deslizamientos de tipo flujo que comprenden movimientos viscosos, generados en muchos casos a partir de deslizamientos de masas en la parte superior de las laderas, los cuales recorren luego largos trayectos en forma canalizada (flujos de detritos) o extendida (avalancha de detritos). Los flujos en Colombia son muy frecuentes y se desencadenan más que todo en épocas de fuertes lluvias (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

- Creep (reptaciones)

Los creeps corresponden a movimientos extremadamente lentos, que requieren largos periodos de observación y medición. Como en muchas partes del mundo, en el territorio colombiano se presentan procesos de creep, este proceso es generado por la escasa consolidación en la parte superior del perfil de suelo, la deforestación, cambios e inadecuados usos de suelo y plantaciones de cultivos limpios, y en general con usos y manejos del suelo que producen altas concentraciones de humedad.

En Colombia, estos materiales corresponden a saprolitos y suelos residuales, suelos volcánicos, laderas de rocas lodosas hídricamente degradadas y, con más frecuencia, coluviones arcillosos asociados a rocas lodosas (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Tabla 1. Tipos y subtipos de movimientos en masa y sus características más importantes. (Fuente: Tomado y modificado de: (Servicio Geológico Colombiano, 2017))

Tipo	Mecanismo	Material desplazado	Subtipo
Caídas	Desprendimiento de material que se desplaza por el aire, brinca o rueda	Rocas, Suelos	Caída de rocas y suelos Rodamiento de bloques Torrentes de bloques
Volcamientos	Masas que rotan en un punto sin desprenderse	Rocas, detritos	Único o múltiple de conjunto de bloques de roca. De bloques individuales liberados por tensión. De detritos.
Deslizamientos	La masa se desplaza sobre una superficie de falla por cortante sin desintegrarse apreciablemente	Rocas, Suelos	Rotacional (hundimiento) Rotacional retrogresivo múltiple Traslacional planar Traslacional en cuña Compuesto

Tipo	Mecanismo	Material desplazado	Subtipo
Flujos, avalanchas y deslizamientos por flujo	La masa se mueve grandes distancias la mayor parte del trayecto en forma viscosa	Rocas, detritos, tierras, Lodos, turba	Flujos de detritos (lahares y avenidas torrenciales) Flujos de tierras, Flujos de lodo, Avalanchas de detritos, Deslizamiento por flujos de material granular-licuación (Flow slide) Deslizamiento por flujo de arcilla sensitiva (Clay-flow slide)
Creep (Reptación)	La masa se deforma muy lentamente sin fallar.	Rocas, suelos, talus	Creep superficial Creep profundo Soliflucción y Geliflucción (flujo)

Metodología

El presente capítulo expone la metodología empleada en la realización de la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Santuario Risaralda. Se detalla el proceso de recopilación, procesamiento y análisis de datos geoespaciales, así como la aplicación de técnicas especializadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG). El enfoque metodológico abarca desde la obtención y validación de datos hasta la generación de mapas temáticos y la interpretación detallada de resultados. Se describen los procedimientos utilizados para evaluar la susceptibilidad, destacando la relevancia de esta investigación para la identificación de áreas de riesgo y la posterior formulación de estrategias de gestión del riesgo de desastres en la región estudiada. La metodología consta de 4 etapas principales como se muestra a continuación.

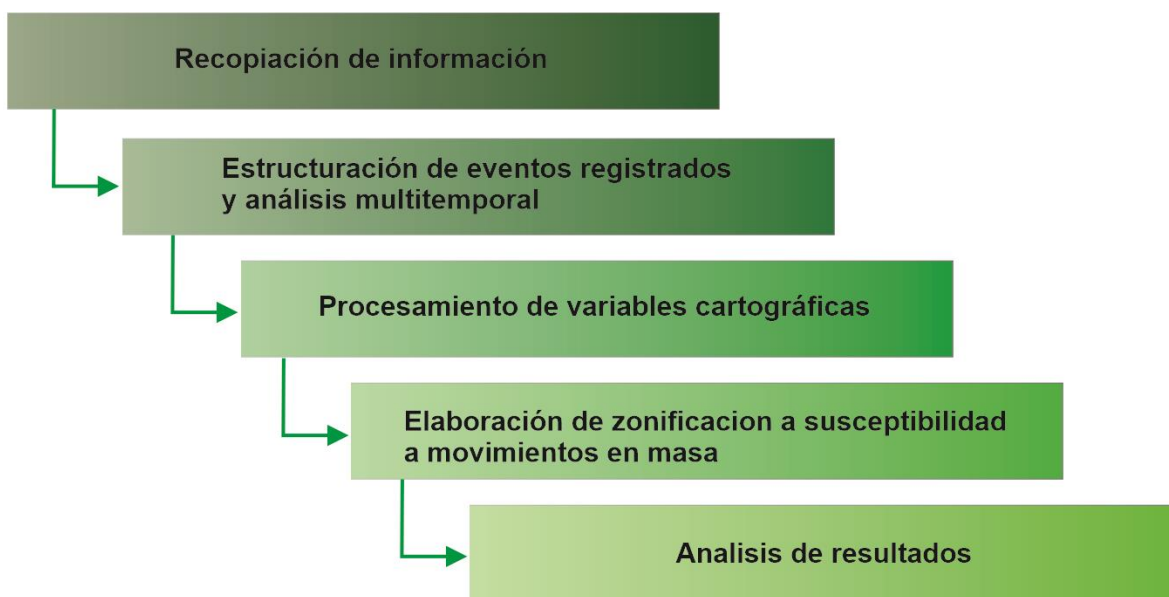


Ilustración 2. Etapas del proyecto. (Fuente: Elaboración propia)

Recopilación de Información

Acorde a la adquisición de información bibliográfica de las características biofísicas del municipio de Santuario y los eventos de remoción en masa registrados, se realizó en primera instancia un análisis de la información que aplica para la zona, dentro de los estudios que se tuvieron en cuenta se relacionan los siguientes:

- Datos nativos y memoria explicativa de La Plancha 204 Pueblo Rico.
- Datos nativos y memoria explicativa de La Plancha 205 Chinchiná.
- Datos nativos y memoria explicativa de La Plancha 223 El Cairo.
- Datos nativos y memoria explicativa de La Plancha 224 Pereira.
- Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia.
- Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a La Zonificación de Amenaza por Movimientos En Masa Escala 1:100.000.
- Elaboración de cartografías geomorfológicas aplicada al levantamiento de suelos, IGAC.
- Portal Alaska Satélite Facility <https://search.asf.alaska.edu/#/> donde se encuentra la información de Modelos digitales de terreno con valor de 12,5m por celda.
- Actualización del inventario de viviendas localizadas en zonas de alto riesgo por inundaciones y fenómenos de remoción en masa y del mapa de aptitud del suelo en la zona urbana municipio de Santuario Risaralda. CARDER y Gobernación de Risaralda, (2011).
- Instrumentos para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, municipio de Santuario, Risaralda. Gobernación de Risaralda y EDURED, (2021).

- Instrumentos para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa e inundaciones, municipio de Santuario, Risaralda. Gobernación de Risaralda y EDURED, (2021).
- Informes de visitas técnicas realizadas por parte de la Coordinación Departamental de Gestión de Riesgo de Desastres de Risaralda (CDGRD) y la alcaldía municipal de Santuario a los puntos de riesgo y eventos de remoción en masa registrados.

Estructuración de Información de Eventos De Remoción En Masa Registrados Y Análisis Multitemporal

En la etapa de estructuración de información se hizo la revisión de los reportes disponibles en relación a desprendimientos de material y después de la depuración de datos se obtuvo un compilado con los reportes de movimientos en masa registrados desde el año 2018 hasta el año 2023 en el municipio de Santuario, se enlistaron un total de 43 eventos de remoción de material y de cada informe se extrajo información que para el desarrollo del trabajo se pudiera considerar útil, obteniendo datos de cada deslizamiento como la fecha del evento, el tipo de movimiento, el nombre de la vereda donde ocurrió, la estructura afectada, las zonas perjudicadas indirectamente y un resumen o descripción de las características observadas en campo. La relevancia de esta tabla para el informe radica en que cada uno de los movimientos en masa tiene datos de coordenadas lo que hace que puedan ser ubicados espacialmente. Las coordenadas se encontraban en varios sistemas por lo que se unificaron en WGS84 para que sea más preciso a la hora de trabajar con los servicios online de ESRI donde se realizan los mapas para el análisis multitemporal utilizando la aplicación web denominada “control deslizante”.

Procesamiento de las Variables Cartográficas

Una vez recopilada la información, en esta etapa se procedió a definir las variables que se tuvieron en cuenta para realizar la zonificación y que están involucradas en la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Estas variables condicionantes son: Geología, geología estructural, geomorfología, pendientes y cobertura de la tierra.

Ya definidas las variables cartográficas a tener en cuenta se procedió a ajustar las capas vectoriales de cada una, las cuales fueron sometidas a una rigurosa corrección con el respaldo de imágenes satelitales, visitas de campo y modelos de elevación digital (DEM), lo cual implica la corrección de errores, la proyección a un sistema de coordenadas uniforme (CTM12) y la consistencia entre los diferentes conjuntos de datos.

El modelo de elevación digital utilizado tiene una definición de 12,5m y fue descargado del Portal Alaska Satélite Facility. Las imágenes satelitales utilizadas, estas fueron descargadas desde el portal del USGS Earth Explorer, utilizando como referencia un polígono de interés para el área de estudio. Fueron utilizadas una imagen Landsat 8 y una Landsat 9, ambas de nivel 2, lo que significa que los efectos de la atmósfera, como la dispersión y la absorción de la luz, se han eliminado de las imágenes. Lo anterior permite el uso directo de las imágenes para realizar análisis geoespaciales.

Realización de la Zonificación De Susceptibilidad Por Movimientos En Masa

La metodología que se adoptó para realizar el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa es un proceso que requiere de la interacción e intervención de diferentes disciplinas, y un amplio conocimiento del área de análisis, teniendo en cuenta el criterio experto para cada una de las etapas de análisis, sin embargo, para que la evaluación de susceptibilidad sea un proceso

objetivo se han introducido una serie de técnicas que permiten alejarse razonablemente de factores subjetivos y preestablecidos.

En la figura siguiente se muestra un esquema general de la metodología de (Turner & McGuffey, 1996), que se utilizó como guía para realizar la zonificación por movimientos en masa en el área de estudio.

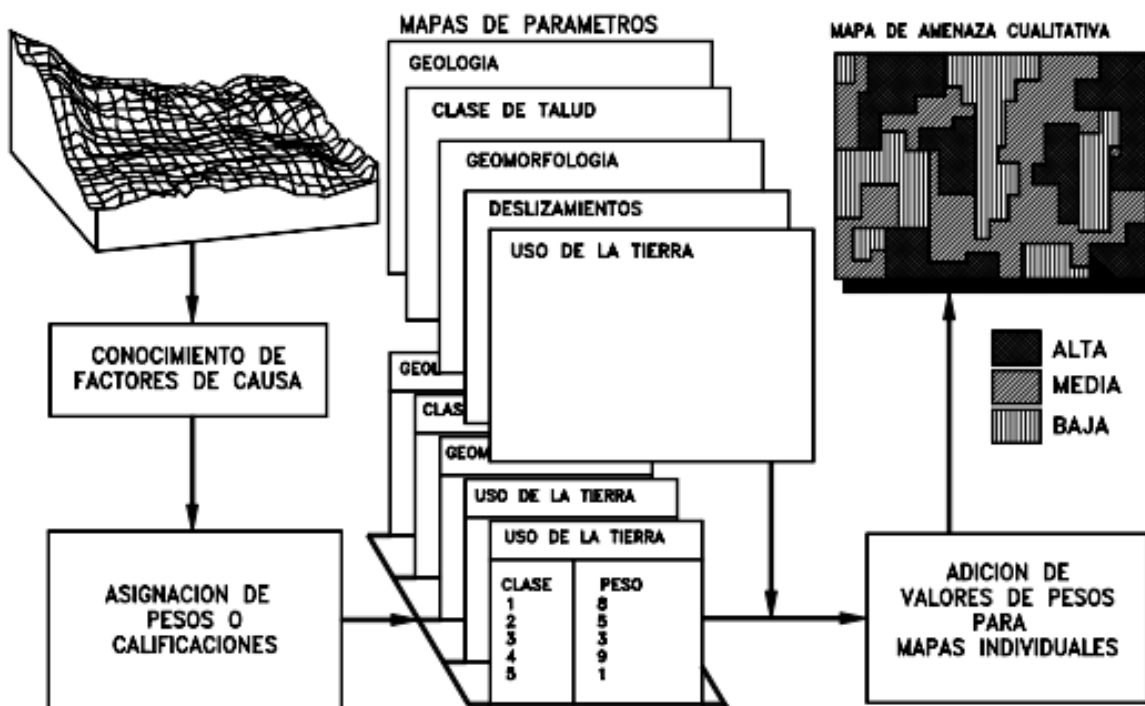


Ilustración 3. Metodología para la zonificación. (Fuente: (Turner & McGuffey, 1996))

Para realizar el análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa para el área de influencia del proyecto, se emplearon los siguientes parámetros: Pendientes, geología, geología estructural, geomorfología y cobertura de la tierra. Una vez definidos los parámetros, y teniendo en cuenta la influencia que tiene cada uno de ellos en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, se le asigna un peso porcentual a cada parámetro. Así mismo, a cada factor de cada parámetro se le asigna una calificación en términos de susceptibilidad, siguiendo como referencia las cinco categorías que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Grados de susceptibilidad.

CATEGORIA DE LA SUSCEPTIBILIDAD	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD
1	Susceptibilidad muy baja
2	Susceptibilidad baja
3	Susceptibilidad media
4	Susceptibilidad alta
5	Susceptibilidad muy alta

Una vez asignados los pesos porcentuales a los parámetros y la calificación a los factores, y tomando como base el método de combinación lineal ponderada establecido por (Voogd, 1983) en (Medina Quira, 2017), se realiza la suma de cada uno de los factores multiplicado por su respectivo peso, como se muestra a continuación.

$$SUSC = \sum_{i=1}^n \%P \cdot f$$

Donde:

SUSC: Susceptibilidad a la vegetación

n= Numero de variables

%P= Peso porcentual de parámetro

f= Peso de cada factor

Análisis de Resultados

En esta etapa se generaron y analizaron las salidas gráficas y mapas temáticos que muestran la distribución espacial de la susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio. Estos mapas incluyen capas de información superpuestas y clasificadas, lo que permite identificar y resaltar zonas con diferentes niveles de susceptibilidad como muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Lo anterior permite identificar áreas críticas con la mayor probabilidad de sufrir eventos de remoción en masa, lo que proporciona una visión clara de las áreas prioritarias para la toma de medidas preventivas y de gestión de riesgos. A partir de la información conseguida, se elaboraron tablas, gráficas y mapas que facilitarán al lector la interpretación de los resultados y de las condiciones predominantes del área de estudio.

Adicionalmente, en este ítem se realizó una comparación entre el análisis multitemporal con los resultados de la zonificación, lo cual permite validar y entender de mejor manera los resultados obtenidos por medio de la distribución y temporalidad de los eventos.

Resultados

Eventos Registrados y Análisis Multitemporal

Una vez recopilada y depurada la información de eventos de remoción en masa registrados se hace un listo con los eventos, donde se hicieron las correcciones estructurales y ortográficas necesarias, y se unificaron los datos en el sistema de coordenadas WGS84 con el objetivo de realizar el análisis multitemporal. A continuación, se presenta la tabla con los eventos registrados.

Tabla 3. Eventos de remoción en masa registrados en el municipio de Santuario Risaralda.

FECHA	EVENTO	LUGAR	ESTRUCTURA AFECTADA	CANTIDAD DE POBLACIÓN AFECTADA	x	y
30/10/2022	MOVIMIENTO EN MASA ROTACIONAL	VEREDA EL TAMBO SECTOR RIO SAN RAFAEL	VIA Y SERVICIOS PUBLICOS	TODA LA POBLACIÓN DE LA VEREDA EL TAMBO Y EL MUNICIPIO	-75,963632	5,089798
30/10/2022	CAIDA DE ROCA	VEREDA LOS PLANES	VIA	POBLACIÓN DE LA VEREDA LOS PLANES	-75,97235	5,08899
proceso activo desde el 28/07/2022 hasta la actualidad	SOCAVACIÓN HIDRICA LATERAL	VEREDA BARCINAL - ALTO BARCINAL	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BARCINAL Y ALTO BARCINAL	-76,02491	5,06318
procesos activos desde el 08/04/2022 hasta la actualidad	SOCAVACIÓN HIDRICA LATERAL	VEREDA TOTUI	VIA	POBLACIÓN VEREDA TOTUI	-75,938794	4,989318
Proceso generado el 19 de abril de 2022, se encuentra activo actualmente	MOVIMIENTO EN MASA ROTACIONAL	VEREDA EL YARUMO	VIA	POBLACIÓN VEREDAS EL YARUMO Y SAN GABRIEL	-75,95861	5,03996
proceso activo desde el 28/07/2022 hasta la actualidad	SOCAVACIÓN HIDRICA LATERAL	VEREDA TOTUI	VIA	POBLACIÓN VEREDA TOTUI	-75,927026	4,96849

FECHA	EVENTO	LUGAR	ESTRUCTURA AFECTADA	CANTIDAD DE POBLACIÓN AFECTADA	x	y
28/4/2021	SOCAVACIÓN HIDRICA LATERAL	VEREDA BARCINAL - ALTO BARCINAL SECTOR PUENTE LA CUSUMBERA	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BARCINAL, ALTO BARCINAL Y LA LINDA	-76,026399	5,06131
El proceso se encuentra activo, el ultimo pulso se dio el 29/09/2022 obstaculizando totalmente la vía	FLUJO DE DETRITOS Y SUELO	VEREDA BARCINAL - ALTO BARCINAL SECTOR PUENTE LA CUSUMBERA	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BARCINAL, ALTO BARCINAL Y LA LINDA	-76,02649	5,06046
La problemática se presenta desde agosto de 2018 hasta la actualidad. El ultimo suceso tuvo lugar el 1 octubre.	AVENIDA TORRENCIAL	VEREDA BARCINAL - ALTO BARCINAL SECTOR QUEBRADA EL MUERTO	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BARCINAL, ALTO BARCINAL Y LA LINDA	-76,0211	5,06017
27/07/2022	SOCAVACIÓN HIDRICA LATERAL	VEREDA BARCINAL - ALTO BARCINAL SECTOR HOYO GRANDE	VIA Y VIVIENDA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BARCINAL, ALTO BARCINAL Y LA LINDA	-76,024236	5,061249
Proceso evidenciado el 27/04/2022, se encuentra activo en la actualidad	SOCAVACIÓN HIDRICA LATERAL	VEREDA BAJA ESMERALDA SECTOR LA PLAYA	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BAJA ESMERALDA, LA CRISTALINA Y CAMPAMENTO.	-75,99437	5,085899
21/5/2021	MOVIMIENTO EN MASA Y AVENIDA TORRENCIAL	VEREDA PEÑAS BLANCAS SECTOR LA ARABIA	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BLANCAS Y COMINAL	-76,001021	5,058949
12/12/2021	MOVIMIENTO EN MASA ROTACIONAL	VEREDA PEÑAS BLANCAS SECTOR LA ARABIA	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS BLANCAS Y COMINAL	-76,001515	5,058866
21/5/2021	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA DE CUNDINA	VIA	POBLACIÓN VEREDAS DE CUNDINA Y PUEBLO VANO	-75,983425	5,062055
Este proceso tuvo lugar el 21 de mayo de 2021, pero se encuentra activo en la actualidad	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA DE CUNDINA, SECTOR LA JULIA	VIA	POBLACIÓN VEREDAS DE CUNDINA Y PUEBLO VANO	-75,982081	5,059756

FECHA	EVENTO	LUGAR	ESTRUCTURA AFECTADA	CANTIDAD DE POBLACIÓN AFECTADA	x	y	
	Este proceso erosivo se ha presentado desde hace décadas. El ultimo desprendimiento de masa importante se presentó el 09/09/2022 y se encuentra activo en la actualidad.	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA ORO FINO	VIA	DEBIDO A LA IMPORTANCIA DE ESTA VIA SE VE AFECTADA LA POBLACION DE AL MENOS 15 VEREDAS DEL MUNICIPIO	- 75,980806	5,082869
4/12/2020	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K5+076)	VIA	DEBIDO A LA IMPORTANCIA DE ESTA VIA SE VE AFECTADA LA POBLACION DE AL MENOS 15 VEREDAS DEL MUNICIPIO	- 75,950347	5,069769	
	Esta problemática se viene presentando desde el 14 de noviembre de 2020, actualmente está activo donde el desprendimiento de materia es continuo	CARCAVAMIENTO	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K6+180)	VIA	DEBIDO A QUE ESTA ES LA VIA DE ACCESO AL MUNICIPIO, SE VE AFECTADA DE MANERA INDIRECTA CASI TODA LA POBLACIÓN	-75,95272	5,06315
28/10/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K0+946)	VIA	DEBIDO A QUE ESTA ES LA VIA DE ACCESO AL MUNICIPIO, SE VE AFECTADA DE MANERA INDIRECTA CASI TODA LA POBLACIÓN	- 75,964119	5,08196	
28/10/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K0+254)	VIA	DEBIDO A QUE ESTA ES LA VIA DE ACCESO AL MUNICIPIO, SE VE AFECTADA DE MANERA INDIRECTA CASI TODA LA POBLACIÓN	-75,96421	5,077376	

FECHA	EVENTO	LUGAR	ESTRUCTURA AFECTADA	CANTIDAD DE POBLACIÓN AFECTADA	x	y
20/7/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K4+634)	VIA	DEBIDO A QUE ESTA ES LA VIA DE ACCESO AL MUNICIPIO, SE VE AFECTADA DE MANERA INDIRECTA CASI TODA LA POBLACIÓN	- 75,953678	5,071618
28/7/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K4+280)	VIA	DEBIDO A QUE ESTA ES LA VIA DE ACCESO AL MUNICIPIO, SE VE AFECTADA DE MANERA INDIRECTA CASI TODA LA POBLACIÓN	- 75,955961	5,073592
29/10/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K4+175)	VIA	DEBIDO A QUE ESTA ES LA VIA DE ACCESO AL MUNICIPIO, SE VE AFECTADA DE MANERA INDIRECTA CASI TODA LA POBLACIÓN	- 75,956707	5,074162
4/11/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA EL TAMBO SECTOR CAÑADA ONDA	VIA	TODA LA POBLACIÓN DE LA VEREDA EL TAMBO	-75,962	5,083
10/11/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA BARCINAL - ALTO BARCINAL	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS ALTO BARCINAL Y LA LINDA	-76,02485	5,06067
20/6/2022	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - LA MARINA (K0+561)	VIVIENDA	DIRECTAMENTE A LOS HABITANTES DE LA VIVIENDA, INDIRECTAMENTE TODA LA POBLACIÓN DEL MUNICIPIO	- 75,963686	5,08068
15/3/2019	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - VEREDA LOS PLANES (K3+900)	VIA	POBLACIÓN DE LAS VEREDAS ALTO BARCINAL Y LA LINDA	- 75,988557	5,109105
3/1/2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA SANTUARIO - ALTA ESMERALDA	VIA	OBLACIÓN DE LAS VEREDAS LOS PLANES Y ALTA ESMERALDA	- 75,987174	5,095373

FECHA	EVENTO	LUGAR	ESTRUCTURA AFECTADA	CANTIDAD DE POBLACIÓN AFECTADA	x	y
18/3/2023	MOVIMIENTO EN MASA ROTACIONAL	FINCA LA MANUELA, VEREDA NÁPOLES	VIVIENDA	HABITANTES DE LA FINCA	- 75,912025	5,027033
16/3/2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VÍA CORINTO - PERALONSO	VIA	HABITANTES DE LAS VEREDAS PERALONSO, EL CEDRAL Y SAN GABRIEL	-75,91821	4,986892
19/4/2023	CARCAVAMIENTO	VÍA SANTUARIO - LA MARINA, SECTOR CAÑADA HONDA	VIVIENDA	HABITANTES DE LA VIVIENDA (3 PERSONAS)	- 75,963889	5,081201
PROCESO EROSIVO ACTIVO HACE APROXIMADAMENTE 1 AÑO	CARCAVAMIENTO	VÍA SANTUARIO - LA BANBA, SECTOR LA FRONTERA	VIA	AFECTA INDIRECTAMENTE A LA POBLACION DE LAS 16 VEREDAS QUE USAN CONTINUAMENTE ESTA VÍA	- 75,967214	5,074967
PROCESO EROSIVO ACTIVO HACE APROXIMADAMENTE 2 AÑOS	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	ZONA URBANA calle 6 # 7 - 30	VIVIENDA	HABITANTES DE LA VIVIENDA (1 PERSONA)	- 75,966482	5,074446
PROCESO EROSIVO ACTIVO HACE APROXIMADAMENTE 2 AÑOS	CARCAVAMIENTO	VEREDA COMINAL. FINCA LA NUEVA	VIVIENDA Y SERVICIOS PUBLICOS	HABITANTES DE LA FINCA LA NUEVA Y USUARIOS ACUEDUCTO	- 76,019393	5,034453
Agosto de 2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA CALICHAL, FINCA LOS GUAYABOS	VIVIENDA	HABITANTES DE LA FINCA LOS GUAYABOS	- 75,998073	5,072339
21/8/2023	MOVIMIENTO EN MASA ROTACIONAL	VEREDA BAJO BARCINAL, FINCA ALEJANDRIA	VIVIENDA	HABITANTES DE LA FINCA ALEJANDRIA (6 PERSONAS)	- 76,014598	5,057738
15/3/2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA TOTUI, SECTOR ESCUELA RODADERO	VIA	HABITANTES VEREDA TOTUI	- 75,944167	4,99012
15/3/2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA LA CRISTALINA	VIA	HABITANTES VEREDAS LA CRISTALINA Y CAMPAMENTO	- 76,009822	5,084632
28/3/2023	MOVIMIENTO EN MASA ROTACIONAL	VEREDA LA QUIEBRA	VIA Y SERVICIOS PUBLICOS	HABITANTES VEREDAS LA QUIEBRA Y PERALONSO	- 75,949807	5,026912

FECHA	EVENTO	LUGAR	ESTRUCTURA AFECTADA	CANTIDAD DE POBLACIÓN AFECTADA	x	y
28/4/2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA COMINAL	VIA	HABITANTES VEREDAS LA QUIEBRA Y COMINAL	-76,0244	5,0302
14/8/2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA ORO FINO	VIA	DEBIDO A LA IMPORTANCIA DE ESTA VIA SE VE AFECTADA LA POBLACION DE AL MENOS 15 VEREDAS DEL MUNICIPIO	- 75,978975	5,081869
21/8/2023	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA EL CEDRAL	VIA	HABITANTES VEREDA EL CEDRAL	- 75,963588	5,031214
10/2019	MOVIMIENTO EN MASA TRASLACIONAL	VEREDA EL CEDRAL	VIA	HABITANTES VEREDA EL CEDRAL	- 75,949807	5,026912

Una vez recopilados y estructurados los datos, se creó la Geodatabase en el programa ArcMap, donde se creó el feature dataset denominado “Eventos” y dentro de éste el shapefile tipo punto denominado “Eventos”. Posteriormente, se abrió la Geodatabase en el programa ArcGIS Pro con el fin de agregarle el filtro del tiempo basado en la columna “fecha” de la tabla de atributos, determinando intervalos de 1 año para la visualización y adicionalmente se clasifican los puntos simbólicamente por el tipo de evento. También se evalúan otras formas para la representación de los movimientos en masa y se escoge una clasificación por densidad denominada “mapa de calor” que es útil para resaltar las zonas con mayor número de deslizamientos por área. El paso a seguir para la obtención de los mapas finales es la publicación de las capas en la Web con el dominio de la Universidad de Manizales desde la opción compartir Web Layer y se realizan las correcciones necesarias al shapefile para poder publicarlo.

Teniendo la información del Web Map en el contenido de ArcGIS Online se procede a crear la aplicación seleccionando la denominada “Control deslizante” que se encuentra disponible en las aplicaciones instantáneas de la plataforma. Allí se carga el mapa que se va a utilizar como base y se hacen las modificaciones visuales necesarias como el tema y el diseño, el título de la aplicación, las descripciones que se deseen anexar como complemento, la interactividad, el tipo de control deslizante y la velocidad en la que se van a mostrar los eventos por año. Una vez se organizados los detalles de la aplicación se procede a hacer la publicación. En este caso se incluyeron 3 capas, la primera de los movimientos en masa clasificados por el tipo de evento, la segunda de los movimientos en masa clasificados por densidad en un mapa de calor y la tercera corresponde al perímetro del municipio de Santuario.

Para acceder a la aplicación web creada se puede seguir el siguiente enlace:

<https://umanizales.maps.arcgis.com/apps/instant/slider/index.html?appid=cb5d99bb7fe7421091cbdd094e814bfa>”

A continuación, se muestra una vista previa del mapa de la distribución de los eventos y un mapa de calor que permite apreciar de mejor manera la concentración de procesos de remoción en masa en el municipio de Santuario.

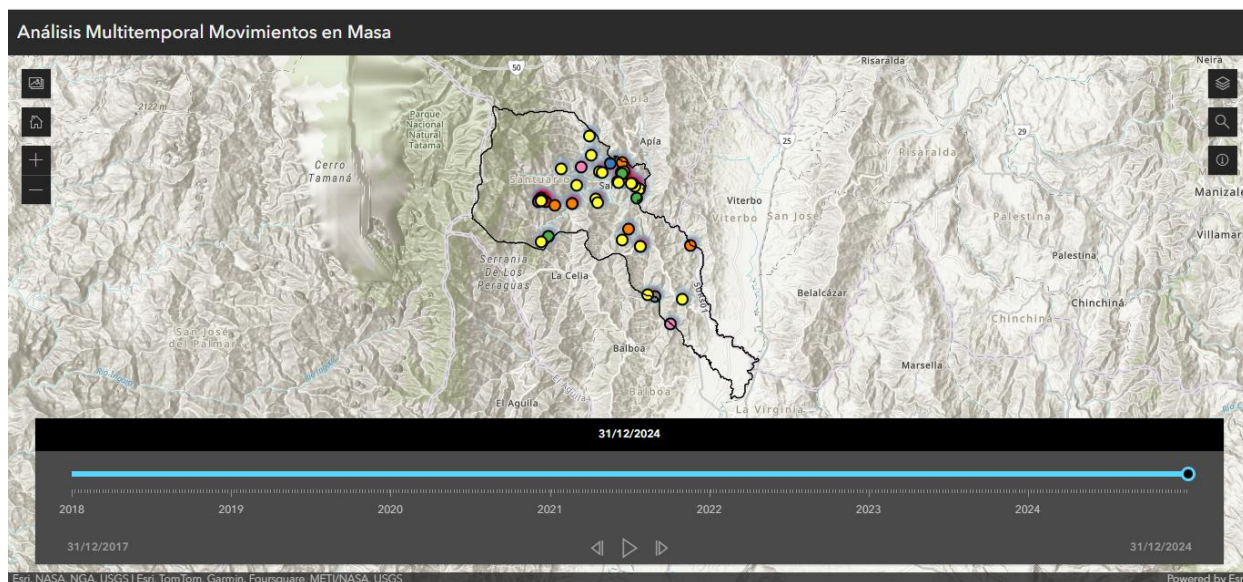


Ilustración 4. Mapa de distribución de puntos en aplicación web ArcGIS Online (Fuente: Elaboración propia)

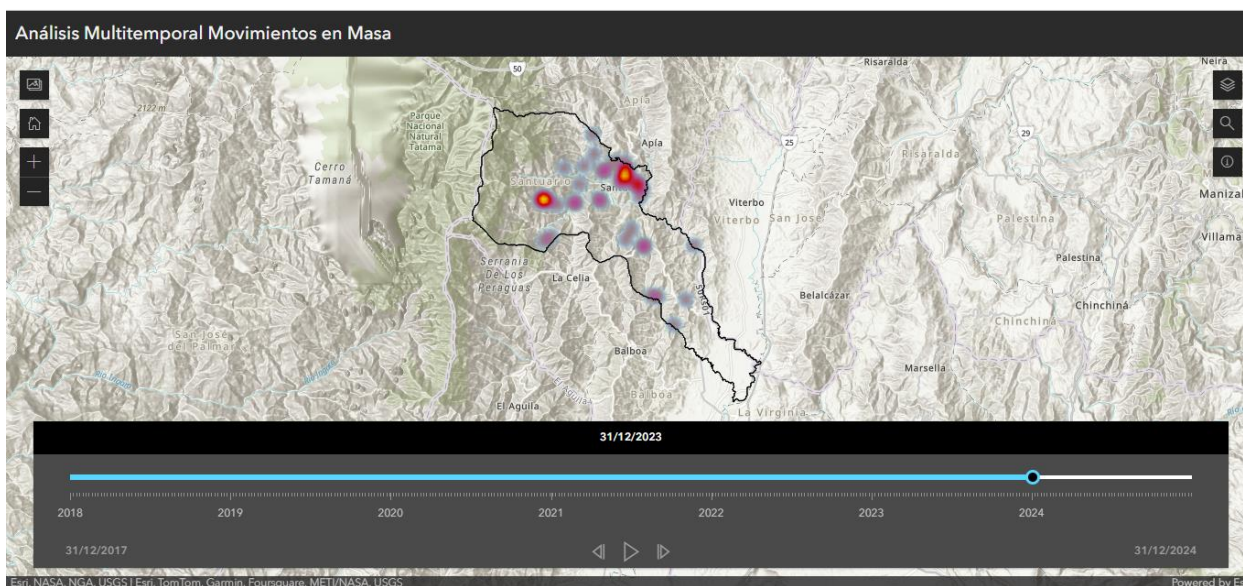


Ilustración 5. Mapa de calor en aplicación web ArcGIS Online. (Fuente: Elaboración propia)

Variables y Características Biofísicas

En este apartado se describen las características biofísicas del municipio, las cuales son consideradas variables cartográficas que son los insumos básicos para el análisis de la susceptibilidad y amenaza por movimiento en masa.

Geología

Estratigrafía

El municipio de Santuario se encuentra en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental como ya se mencionó en el apartado de localización. De manera general, esta zona geológicamente se compone principalmente de rocas sedimentarias y volcánicas de origen oceánico, y depósitos cuaternarios que han sufrido (exceptuando los últimos) fallamiento y plegamiento, debido a su ubicación en la esquina noroccidental de la placa tectónica Sudamericana, la cual se encuentra subduciendo a la Placa Nazca, creando así esfuerzos compresivos que causan deformación en las rocas preexistentes.

La cartografía existente en la zona está dividida en 4 planchas a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, las cuales manejan diferentes nomenclaturas para las unidades cronoestratigráficas ya que sus campañas se desarrollaron en épocas distintas, abarcando desde el año 1984 hasta el año 2001. Debido a esto, es necesario unificar la información. A continuación (Tabla 4), se presentan las unidades que abarca la zona por cada plancha:

Tabla 4. Unidades cronoestratigráficas en las planchas del Servicio Geológico Colombiano.

Plancha	Código	Unidad
204	Ksn	Formación Penderisco, Miembro Nutibara
	Ksu	Formación Penderisco, Miembro Urrao
	Ngtt	Plutón del Tatamá
	Qd	Depósitos de Derrubio
	Qal	Depósitos Aluviales
205	Kaa	Formación Penderisco
	Kvb - Klb	Formación Barroso
205	Kgub	Gabro Uralítico de Belén de Umbría
	Tmp	Formación La Paila
	Tplz	Formación Zarzal
	Qtsv	Sedimentos de Viterbo
	Qal	Depósitos Aluviales
224	Kso	Grupo Dagua

Plancha	Código	Unidad
	Kvo	Grupo Dibásico
	Kch	Grupo Dagua
	Tmp	Formación La Paila
	Tplz	Formación Zarzal
	Tpv	Pórfido Andesítico de la Virginia
	Qtl	Depósitos de Pendiente
	Qal	Depósitos Aluviales
223	Kcaa	Formación Lázaro
	Kst	Basaltos de la Trinidad
	Kmst	Formación Consolidada
	Tplz	Formación Zarzal
	Qal	Depósitos Aluviales

Con la información recopilada de las planchas de Servicio Geológico Colombiano, y teniendo en cuenta la nomenclatura utilizada por diferentes autores en los últimos años, toda esta información se unificó y se logró agrupar en las siguientes unidades cronoestratigráficas:

Tabla 5. Unidades geológicas presentes en el municipio de Santuario.

Nombre	Nomenclatura
Formación Penderisco	Kaa
Formación Penderisco, Miembro Urrao	Ksu
Formación Penderisco, Miembro Nutibara	Ksn
Formación Barroso	Kvb - Klb
Gabro Uralítico de Belén de Umbría	Kgub
Plutón del Tatamá	Nggt
Formación Zarzal	Tplz
Depósitos Aluviales	Qal

Una vez clara la unificación de las unidades cronoestratigráficas presentes en la zona se describen y caracterizan en orden cronológico ascendente:

Grupo Cañasgordas

Denominado Grupo Cañasgordas por (Alvarez & Gonzales, 1978), corresponde a una unidad volcano-sedimentaria que ocupa gran parte del norte de la Cordillera Occidental. Este grupo está conformado por la Formación Barroso, y la Formación Penderisco que a su vez se divide en los miembros Nutibara y Urrao.

Kaa - Formación Penderisco

Las rocas sedimentarias de la Formación Penderisco afloran en ambos flancos de la cordillera occidental y se extiende desde el departamento de Antioquia al norte, hasta los departamentos de Risaralda, Chocó y Valle de Cauca al sur. Las variaciones litológicas de esta formación permiten dividirla en dos miembros, el Miembro Urrao conformado por rocas limo arcillosas, y el Miembro Nutibara conformado por rocas calcáreas y chert (Zapata, 2001). Gran parte de la extensión del municipio se compone de rocas pertenecientes a esta formación, especialmente al Miembro Urrao.

Ksu - Miembro Urrao

Está constituido por arenitas, limolitas, arcillolitas y localmente conglomerados en capas delgadas a gruesas, planas paralelas y planas no paralelas desarrolladas especialmente en las fracciones más finas. Las areniscas se encuentran en paquetes de varios metros de espesor con estructuras plana paralelas y lenticulares, interestratificaciones en las limolitas y arcillolitas. Las limolitas y lodolitas se encuentran intercaladas entre sí y son las rocas más abundantes de esta unidad, presentan laminación marcada por cambios en el color y la composición y en algunos sectores presentan estratificación cruzada (Estrada, Viana, & Gonzales, 2001).

Sus contactos con los Basaltos de La Trinidad, las rocas del Complejo Santa Cecilia – La Equis y el Miembro Nutibara son fallados y es intruida por el Plutón de Tatamá. En el sector, se encuentra en contacto fallado con rocas volcánicas de la Formación Barroso por la Falla Apia. Respecto a su edad, la fauna encontrada y reportada en las secuencias sedimentarias del Miembro Urrao indica una edad cretácica tardía (Zapata, 2001).

Ksn - Miembro Nutibara

Este miembro está constituido por intervalos gruesos de chert negro a gris verdoso, con lentes de caliza micrítica de color gris claro e interstratificaciones muy finas de material tobáceo. Los chert se encuentran en capas centimétricas algunas veces plegadas generalmente con venillas en enrejado de cuarzo y calcita. Las rocas calcáreas son micritas interstratificadas con el chert (Zapata, 2001). Los contactos del Miembro Nutibara con el Miembro Urrao, en unos puntos, son fallados y, en otros, son como interdigitaciones.

Kvb – Klb - Formación Barroso

La unidad fue definida (Alvarez & Gonzales, 1978) como Formación Barroso; esta corresponde a una unidad volcano sedimentaria heterogénea que forma una franja alargada N-S, al occidente del río Cauca en el flanco oriental de la Cordillera Occidental, alcanza un ancho entre 5 y 15 km. La Formación Barroso está constituida por derrames lávicos basálticos y andesíticos, intercalados con tobas, aglomerados, paquetes sedimentarios de chert, lodolitas, limolitas y grauwacas que por lo general reposan discordantes sobre las rocas volcánicas de la Formación Barroso. Los basaltos y andesitas de la Formación Barroso presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, en una matriz microcristalina a hialocristalina microlítica localmente con amígdalas (Rodríguez & Arango, 2013)

El vulcanismo representado por la Formación Barroso ocurrió en un ambiente marino, con intercalaciones delgadas de chert y limolitas silíceas (Alvarez & Gonzales, 1978). Respecto a su edad, el material sedimentario intercalado con los flujos basálticos, contiene localmente fauna que ha permitido, indirectamente, determinar la edad para las rocas volcánicas; esta fauna ha sido asignada al Campaniano – Maastrichtiano (Hall, Álvarez, & Rico, 1972) (Alvarez & Gonzales, 1978)

Kgub - Gabro Uralítico de Belén de Umbría

Corresponden a rocas de color gris oscuro a negro con tamaños de grano de medio a fino y de medio a grueso, presentan texturas subofítica a hipidiomórfica granular compuesta por plagioclasas y clinopiroxenos, y están con magnetita accesoria. El anfíbol uralítico es incoloro a ligeramente verdoso y es predominantemente de hábito fibroso (Estrada, Viana, & Gonzales, 2001). Al norte está en contacto fallado con las rocas ultramáficas de Puente Umbría – La Isla y con rocas volcánicas de la Formación Barroso.

Ngtt - Plutón del Tatamá

Corresponde a Las rocas intrusivas de composición tonalítica, granodiorítica y diorítica, estas afloran en las partes altas del Macizo de Tatamá y el cerro Tatamá en lugares con difícil acceso por lo que los límites de este cuerpo no están bien definidos. Macroscópicamente presentan una estructura fanerítica equigranular, compuesta por cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita. Microscópicamente presenta una estructura holocristalina inequigranular de grano fino a medio con texturas hipidiomórficas y graníticas. Mineralógicamente se compone de oligoclasa-andesina zonada, y alterada a sericita y saussurita (35-45%), hornblenda alterada a clorita (30-40%), cuarzo (15-40%), ocasionalmente biotita (5-10%) y ortoclasa (5-10%) (Zapata, 2001).

Este cuerpo instruye rocas de la Formación Penderisco, lo que generó una aureola de contacto de aproximadamente 1Km de ancho que se puede observar en la Quebrada La Cristalina y Rio San Rafael. Respecto a su edad, dataciones realizadas en cuerpos de correlacionables presentes en la cordillera occidental como el Batolito de Mandé, por el método en hornblenda y biotita, se obtienen edades de 17 ± 1 y 19 ± 1 Ma, correspondiente al Mioceno Temprano (Brook, 1984).

Tplz - Formación Zarzal

La formación Zarzal se compone de por diatomitas, arcillas y arenas tobáceas. Las arenas localmente son conglomeráticas con guijos finos subredondeados de chert. Intercaladas en estas rocas se encuentran capas muy gruesas de arcillolitas tobáceas de color blanco con intercalaciones de capas delgadas de diatomitas. Los rasgos litológicos y sedimentarios indican un medio sedimentario mixto, en donde el material arenoso y conglomerático indica condiciones de sedimentación fluvial, mientras que los niveles arcillosos con diatomitas muestran condiciones de sedimentación en un medio lacustre (Estrada, Viana, & Gonzales, 2001)

Respecto a la edad de la formación (Van Der Hammen, 1958) con base en análisis palinológicos y relaciones litoestratigráficas en el Valle del Cauca, asignó una edad pliocena a esta formación.

Qal - Depósitos Aluviales

Son depósitos que se encuentran en ríos y quebradas, con formas angostas y alargadas, compuestos predominantemente por gravas, arenas y arcillas no consolidadas, caracterizados por su morfología plana muy suave. Al sur del municipio se encuentran los depósitos más

importantes y de mayor extensión los cuales se asocian a las llanuras de los ríos Mapa y Risaralda.

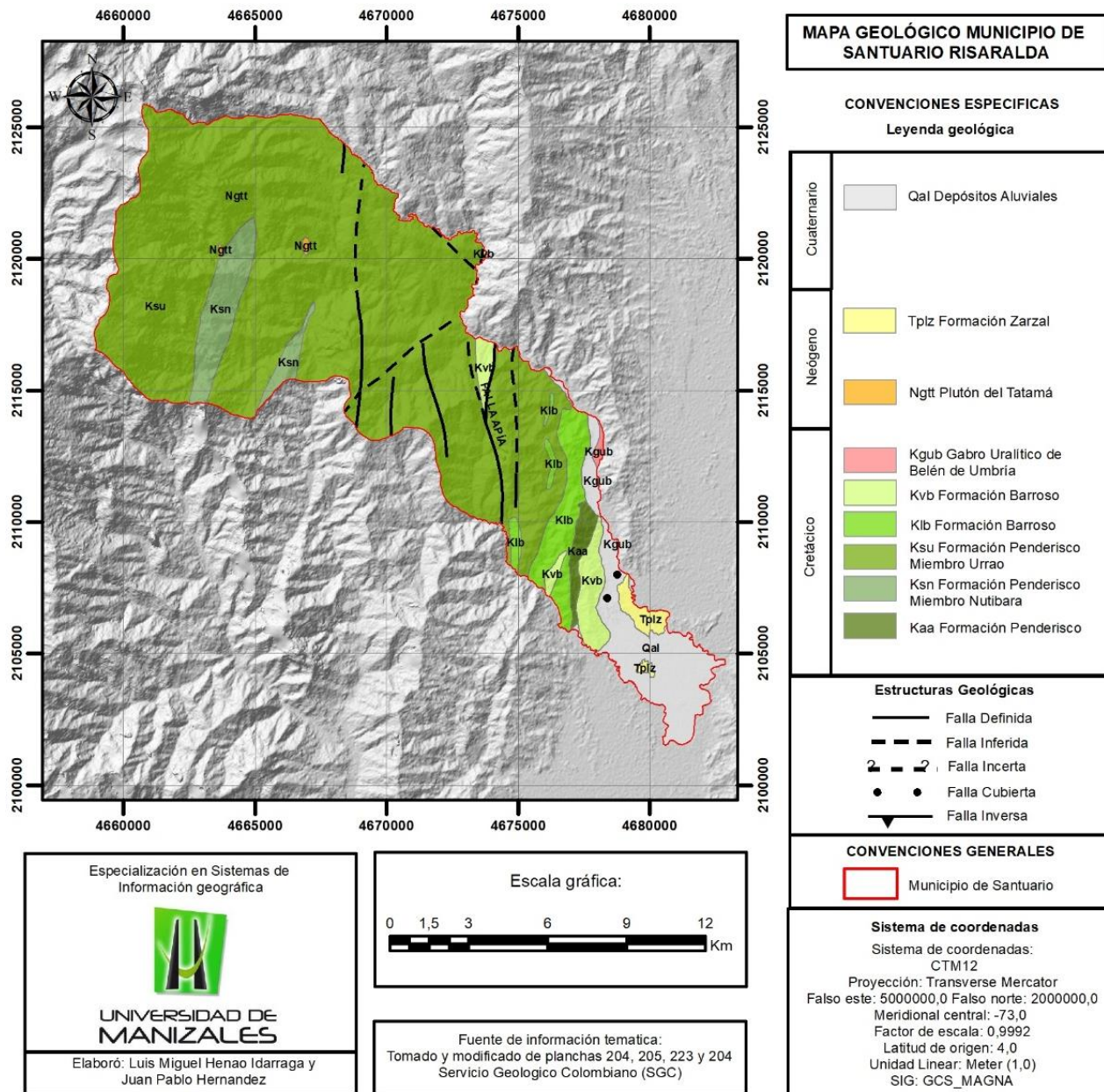


Ilustración 6. Mapa geológico Santuario Risaralda. (Fuente: Tomado y modificado de SGC)

Geología estructural

El área de estudio tiene una complejidad estructural considerable e influenciada principalmente por el Sistema de Fallas Romeral. La nomenclatura de Romeral fue propuesta por (Grosse, 1926) para una falla inversa sobre la cuchilla Romeral al W de Medellín cerca al municipio de Heliconia en Antioquia. El Sistema de Fallas de Romeral es un conjunto de fallas paralelas a subparalelas (París & Romero, 1994) que delimita dos dominios geológicos, uno de corteza oceánica al W con otro de corteza continental al E (Murcia & Cepeda, 1991), que se extiende desde la región central de Colombia hasta el SW de Ecuador (Marín Cerón & Vinasco Vallejo, 2012). Para (Naranjo, 2005) el sistema de fallas presenta una geometría donde los trazos de falla son curvilíneos, rectos y sinuosos y sus planos de falla en profundidad son no planares con buzamientos cambiantes.

Las estructuras que se encuentran en municipio y sus alrededores presentan una tendencia N – S que varía hacia el NE – SW. En su mayoría son fallas inversas, pero algunas de ellas presentan movimiento en rumbo importantes. A continuación, se describe la falla Cauca Almaguer que es la estructura regional de mayor importancia en el sector, la falla Argelia que tiene implicaciones sísmicas en la región y las estructuras presentes en el municipio.

Falla Cauca Almaguer

La falla fue nombrada de esta manera por Mosquera & Orrego, (1990), según (Orrego & París, 1999) es una falla regional que se extiende cientos de kilómetros a lo largo de la cual se encuentran cuerpos ofiolíticos del Cretácico Inferior que pone en contacto la Formación Barroso – Amaime al occidente con el Complejo Arquía al oriente. (Maya & González, 1995) la definen como una falla regional que marca el límite entre rocas metamórficas del Complejo Arquía al oriente y rocas con metamorfismo dinámico-térmico al occidente.

Falla Argelia

La Falla la Argelia presenta un rumbo N25°E y buzamiento de 55° al SE, y su bloque oeste está levantado y presenta una componente de movimiento dextral lateral morfológicamente forma silletas y espolones. Esta falla pone en contacto las rocas del Miembro Urrao con las del Miembro Nutibara (Zapata, 2001).

Falla de Mistrató

La Falla de Mistrató corresponde a una estructura de dirección NS que pasa por la población de Mistrató. Hacia el sur, pasa al oeste de Viterbo y desaparece al encontrarse con la Falla de Toro. La Falla Mistrató pone en contacto el Plutón de Mistrató con rocas volcánicas de la Formación Barroso. Esta falla tiene una expresión geomorfológica clara con alineamiento de quebradas, valles estrechos y silletas (Estrada, Viana, & Gonzales, 2001)

Falla de Apia

Esta falla corresponde a una estructura de dirección N-S que pone en contacto limolitas del Miembro Urrao con rocas volcánicas de la Formación Barroso. Sobre el trazo de esta falla se observan una serie de estructuras NW y es la más clara la que cruza la población de Apía con un movimiento aparente lateral izquierdo. El movimiento relativo de la Falla Apía es de tipo inverso, aunque los pitch (25-30) medidos en estrías sugieren un movimiento de rumbo importante (Estrada, Viana, & Gonzales, 2001).

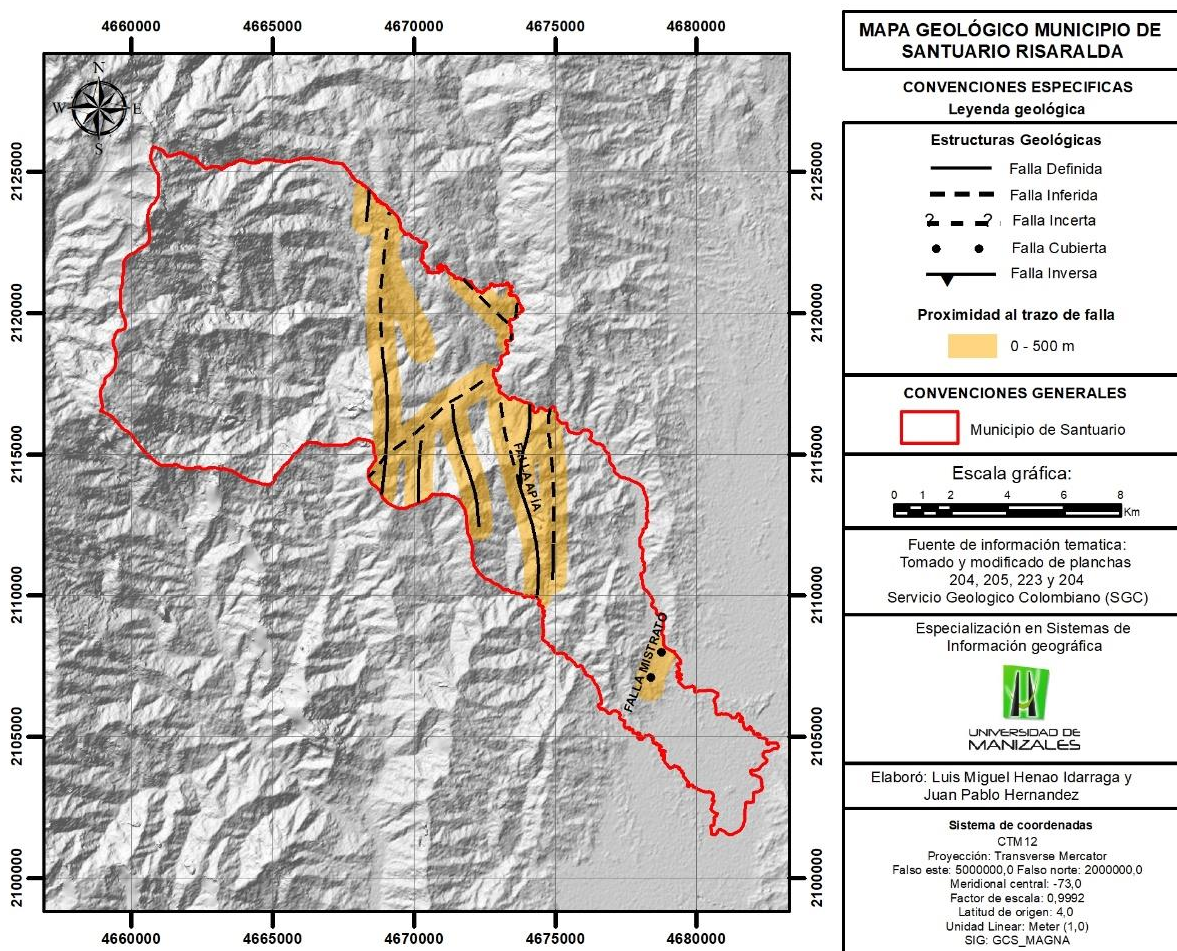


Ilustración 7. Mapa geológico estructural Santuario Risaralda. (Fuente: Tomado y modificado de SGC).

Geomorfología

Geomorfología regional

La geomorfología es la ciencia de la tierra que estudia la relación entre las formas de la superficie terrestre, los materiales que la componen, su disposición estructural y los procesos que la modelaron es así como esta ciencia vincula el paisaje actual con los procesos que le dieron origen y las condiciones ambientales.

Geomorfológicamente el municipio de Santuario se compone principalmente de relieves montañosos y colinados, con importantes procesos denudativos, y pendientes medias a altas, con

geoformas de origen denudacional como resultado de los procesos de erosión y meteorización de rocas pertenecientes al Miembro Urrao (grauvacas, limolitas silíceas) de la Formación Penderisco.

Al sur del municipio, la llanura aluvial de los Ríos Risaralda y Mapa conforma una zona con morfología totalmente plana, en parte con pequeños montículos conformados por rocas pertenecientes a la Formación Zarzal.

En este documento las unidades geomorfológicas son descritas según el ambiente morfogenético que las modeló. El ambiente morfogenético hace alusión a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se generaron las geoformas. Se determina con base en la interpretación de los procesos geomorfológicos registrados (origen tanto endógeno como exógeno), que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de estas (Carvajal Perico J. H., 2011)

Unidades geomorfológicas de origen denudacional

Está relacionado a procesos exógenos con una intensa meteorización con posterior erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que moldean y remodelan las unidades preexistentes dejando remanentes de las geoformas morfoestructurales y creando nuevas geoformas por la acumulación de sedimentos.

- **Dfv - Filas y Vigas**

La unidad denominada como filas y vigas ocupa casi en su totalidad la extensión del municipio. El relieve conformado por esta unidad corresponde a elevaciones naturales del terreno con alturas considerables que puede alcanzar hasta los 3.700 m.s.n.m.

El origen de esta unidad está determinado especialmente por procesos endógenos de levantamiento, fracturamiento y fallamiento en diferentes grados de intensidad sobre materiales litológicos, en este caso sedimentarios, volcanosedimentarios e ígneos, los cuales, posteriormente se sometieron a la acción de procesos denudacionales intensos. Las pendientes fuertes y las laderas largas favorecen la remoción y arrastre de material por gravedad o escorrentía de la parte alta de la ladera, que luego se deposita en la base de esta y en los valles. Esta unidad se compone de laderas, laderas coluviales, cimas y escarpes.

- **DLC - Lomas y colinas**

Esta unidad corresponde a una serie de elevaciones naturales de terreno, de perfil topográfico convexo de altura menor a 100 metros con respecto a su nivel de base local, configuración alargada (lomas) y/o semiredondeada (colinas).

El origen de esta unidad se relaciona a procesos erosivos en sistemas montañosos, como erosión gradual y diferencial en la superficie. La formación de relieves de lomas y colinas se ve favorecido por largos periodos de estabilidad tectónica y climática. Esta unidad se compone de laderas, laderas y cimas.

Unidades geomorfológicas de origen estructural

Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados a plegamiento y fallamiento. Estas unidades dependen en gran medida de la resistencia de las rocas, la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes.

- **SEh - Espinazo**

Los espinazos corresponden a una estructura de perfil transversal convexo, generalmente asimétrico, constituida por rocas de origen sedimentario con alternancia de estratos duros y

blandos, lo que generó una resistencia diferencial a los procesos denudacionales y permitió el desarrollo de resaltos y escarpes asociados a discontinuidades y fallas geológicas.

El origen de esta unidad está relacionado con la formación de relieves tabulares muy inclinados y disimétricos como consecuencia del fallamiento y levantamiento de las masas rocosas de las cordilleras, donde la acción de la erosión diferencial permitió que se erigieran por su resistencia y continuidad las capas rocosas duras inclinadas. Esta unidad se compone de laderas estructurales y erosivas.

Unidades geomorfológicas de origen fluvial y lacustre

Incluye las geoformas que se originan por procesos erosivos de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación en zonas aledañas a dichas corrientes o cuencas restringidas.

- **FPI - Planos de inundación**

Esta unidad corresponde a una serie de depósitos aluviales que de forma periódica son temporalmente inundados, constituido por pendiente plana a ligeramente plana y configuración alargada, que están asociados a la dinámica fluvial de una corriente permanente que adapta su geometría a los variables parámetros hidráulicos, como el cambio de caudal. Comprende geoformas asociadas a la dinámica fluvial actual que son susceptibles a las inundaciones periódicas y ocasionales.

El origen de esta unidad es el resultado de procesos morfodinámicos en zonas inundables y la interacción de factores físicos de la cuenca (como tipo de litología, gradiente medio, forma y longitud).

- **FTa - Terrazas**

Las terrazas se encuentran limitada por taludes, presenta una configuración alargada y continua de forma paralela a la dirección de cauce, con pendientes planas a ligeramente planas, pueden presentar disección. Su origen está relacionado con la incisión realizada por las corrientes de agua sobre los depósitos aluviales conformados previamente por el río principal, debido al descenso del nivel de base local provocado por cambios en los factores tectónico y climático.

Esta unidad se compone depósitos aluviales de materiales heterogéneos que van desde finos hasta gruesos. El tamaño de la terraza es variable y depende de la dimensión del cauce, del cual está separado por un talud. Esta unidad se compone por el plano de terraza y por el talud que lo limita.

Geomorfología local

Jerarquización geomorfológica

(Carvajal Perico J. H., 2008), plantea enfocar el análisis geomorfológico de un sitio o lugar, siguiendo un proceso analítico del terreno desde un punto de vista regional hasta llegar a uno local. Para tal efecto desarrolla una propuesta de jerarquización geomorfológica, en la cual relaciona las escalas de trabajo con las jerarquías geomorfológicas.

En este trabajo se sigue la jerarquización geomorfológica adoptada por el Servicio geológico colombiano SGC, la cual relaciona las escalas de trabajo con la génesis de las geoformas asociadas a los diferentes ambientes morfogenéticos y cuya aplicación es variada de acuerdo con los objetivos de trabajo como se aprecia en la ilustración 6, donde se evidencia que el alcance del presente estudio aborda hasta componente geomorfológico.

ESQUEMA DE JERARQUIZACION GEOMORFOLOGICA



Ilustración 8. Esquema de jerarquización para estudios geomorfológicos. (Fuente: *Servicio Geológico Colombiano, 2012*)

Los componentes geomorfológicos están definidos fundamentalmente por contrastes morfológicos y morfométricos que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de los mismos, así como por los rasgos particulares del terreno.

Siguiendo entonces en orden de menor escala a mayor se tienen para la zona de estudio las siguientes categorizaciones:

Geomorfoestructura

Esta categoría es también llamada Morfogeoeestructura y comprende escalas entre 1:2.500.000 – 1:1.000.000 y está referida a grandes áreas o amplios espacios continentales o intercontinentales caracterizados por estructuras geológicas y topográficas regionales tales como: Cratones, Escudos, Plataformas, Grandes cuencas, Cinturones Orogénicos y Valles en Rift (Carvajal, 2005)

Colombia se divide en 7 geomorfoestructuras: dorsales oceánicas, escudo de la Guyana, fosas y planicies, orogénico andino, orogénico costero, planicies pericratónicas y plataforma continental; el área de estudio se encuentra contenida dentro de la morfogeoestructura orogénico andino la cual comprende las 3 cordilleras de los Andes.

Provincia Geomorfológica

Comprende escalas entre 1:1.000.000 a 1:500.000 y corresponde a conjuntos de regiones con geoformas similares definidas por un mismo origen geológico y geomorfológico. En general están determinadas por mega geoformas que puede asimilarse a regiones naturales o terrenos geológicos, demarcados por fallas regionales y continentales bien definidas. Dentro de esta clasificación de acuerdo con (Carvajal Perico, J. H; Carrillo, E; Padilla., 2003) y (Carvajal Perico, J. H., 2003), en Colombia se pueden definir como provincias: Peneplanicies y llanuras de la Orinoquía, Peneplanicies de la Amazonía, Cordilleras (Oriental, central, Occidental), Valles Interandinos (Magdalena, Cauca – Patía, Cesar) (Carvajal, 2005), dentro de las 37 provincias definidas en el territorio Colombiano, la zona de estudio se encuentra en la Provincia Cordillera Occidental

Región Geomorfológica

Es la agrupación de geoformas relacionadas genética y geográficamente. Están definidas por los ambientes morfogenéticos y geológicos afectados por procesos geomorfológicos similares y comprende escalas entre 1:500.000 a 1:250.000. Aquí se pueden agrupar áreas equivalentes a vertientes que estén contenidas dentro de una provincia geomorfológica y que representen un ambiente morfogenético particular con condiciones climáticas homogéneas.

El ambiente morfogenético hace alusión a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se generaron las geoformas. Se determina con base en la interpretación

de los procesos geomorfológicos registrados (origen tanto endógeno como exógeno), que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las mismas (Carvajal Perico J. H., 2011).

Entre los ambientes morfogenéticos se encuentran: Ambiente morfoestructural, ambiente eólico, ambiente fluvial y lagunar, ambiente volcánico, ambiente glaciar y periglacial, ambiente denudativo, ambiente marino y costero, ambiente kárstico, ambiente estructural y ambiente antropogénico. En la zona se encuentran los enlistados a continuación.

Ambiente estructural (S)

Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente la asociada a plegamientos y fallamientos.

Ambiente denudacional (D)

Determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales, y principalmente producto de procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas preexistentes.

Ambiente fluvial y lagunar (F)

Corresponde a las geoformas generadas por procesos (erosión –sedimentación), generadas por corrientes de agua tales como ríos y arroyos, y lagos y lagunas respectivamente.

Ambiente Antropogénico (G)

Definido por las geoformas originadas por la intervención del hombre sobre el terreno en la mayoría de los casos en la construcción de viviendas, vías y demás obras de ingeniería.

Unidad Geomorfológica

Está determinada con criterios genéticos, morfológicos y geométricos en función de la escala de trabajo propuesta de 1:50.000 a 1:100.000. Es la unidad básica de la cartografía geomorfológica.

Subunidad geomorfológica

Esta categoría corresponde a una subdivisión de las unidades geomorfológicas y está determinada fundamentalmente por los contrastes morfológicos y morfométricos, que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de los mismos, con la correspondiente topografía del terreno. Igualmente está definida por el contraste dado por las formaciones superficiales asociadas a procesos morfodinámicos actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación bien definidos o determinados. La escala de trabajo está definida entre 1:10.000 y 1: 25.000 (Carvajal Perico J. H., 2011)

Componente geomorfológico

Esta subdivisión está determinada por los rasgos del relieve (escarpes naturales o antrópicos, relieves internos de laderas o flancos, crestas, formas de valle) definidos en sitios puntuales y determinados por la morfometría detallada del terreno en una subunidad geomorfológica. Esta subdivisión representa el máximo nivel de detalle en la jerarquización, con una escala de trabajo definida entre 1:2000 A 1:10.000.

Como se mencionó anteriormente, las características morfométricas y morfogenéticas son de gran importancia para la delimitación y caracterización de las subunidades por lo que se exponen a continuación.

Morfogénesis

La morfogénesis estudia el origen y evolución de las formas del terreno. La información morfogenética se representa en forma de unidades y subunidades geomorfológicas con polígonos coloreados y rotulados con letras dependiendo del ambiente morfogenético dominante, tomando la siguiente gama de colores para cada ambiente:

Tabla 6. Gama de colores designados por ambiente geomorfológico.

Ambiente dominante	Color
Estructural	
Denudacional	
Fluvial y lagunar	
Antrópico	

Subunidades geomorfológicas de origen denudacional

Está relacionado a procesos exógenos con una intensa meteorización con posterior erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que moldean y remodelan las unidades preexistentes dejando remanentes de las geoformas morfoestructurales y creando nuevas geoformas por la acumulación de sedimentos.

- Dlres - Lomos residuales

Estas subunidades se desarrollan sobre materiales afectados por meteorización diferencial intensa, es una elevación del terreno menor de 200 metros que presentan una morfología alomada y alargada, laderas cortas a moderadamente largas, convexas a eventualmente cóncavas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas y con drenaje dendrítico. Localizada al sur de la zona de estudio.

- Dcrd - Colina residual disectada

Esta subunidad geomorfológica se localiza al suroccidente del área del municipio. Corresponde a cimas redondeadas y amplias, de elevaciones entre los 200 y 400 metros sobre el nivel base local, limitadas por laderas cortas y largas de formas convexas y rectas, con pendientes inclinadas a abruptas. Su origen se relaciona a procesos tectónicos y la acción de procesos denudativos y de meteorización.

- Dcrmd - Colina residual muy disectada

Cima redondeada y amplia limitada por laderas cortas a moderadamente largas de forma convexa a recta y pendientes muy abruptas a escarpadas, su topografía se encuentra entre 200 a 400 metros sobre el nivel base local. Su origen se relaciona a procesos tectónicos y la acción de procesos denudativos y de meteorización. Esta geoforma se distingue por desarrollar redes de drenajes en forma de V. Esta subunidad se localiza al suroriente del municipio.

- Deem - Escarpe de erosión mayor

Esta subunidad geomorfológica se localiza en la zona oeste del municipio en el área del Parque Nacional Natural Tatamá. Corresponde a laderas abruptas de alturas variables, con longitudes cortas a largas, de forma cóncava, convexa y recta, con pendientes escarpadas a muy escarpadas. Estas pueden formarse por abrasión (erosión fluvial), por procesos gravitacionales y glaciales.

- Deeme - Escarpe de erosión menor

Ubicada en la zona oeste del municipio sobre las veredas Barcinal y La Linda, corresponde a laderas abruptas o a desplomes de longitud corta a larga, de forma cóncavo

convexa y eventualmente recta, con pendiente escarpada a muy escarpada, originado por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje.

- Dmo - Montículo y ondulaciones denudacionales

Geoforma localizada al sur de la zona de estudio a las márgenes de la llanura aluvial del río Mapa, corresponde a colinas de alturas menores a 50 metros sobre el nivel base local, suavemente inclinadas y con drenajes divergentes. Su origen se da por intensos procesos de meteorización y erosión sobre rocas sedimentarias.

Subunidades geomorfológicas de origen estructural

Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados a plegamiento y fallamiento. Estas unidades dependen en gran medida de la resistencia de las rocas, la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes.

- Sce - Cerro estructural

Prominencia topográfica aislada de morfología montañosa a colinada, con laderas de longitud corta a moderadamente larga, cóncavas a irregulares, poco disectadas. Presenta pendientes muy abruptas a escarpadas, las cuales han sido parcialmente aisladas de las zonas montañosas por fallamiento. Esta geoforma se localiza en la zona centro del municipio.

- Scor - Cornisa estructural

Subunidad formada por la acción de procesos erosivos diferenciales y estructurales, corresponde a una saliente estructural suavemente inclinada de forma alomada y tabular. Se presenta como repisa en laderas de contrapendiente generalmente irregulares a escalonadas.

- Sefcml - Espolón facetado moderado de longitud larga

Subunidad conformada por sierras colinadas y salientes naturales que se desprenden de estructuras mayores como plegamiento, fallamiento y erosión diferencial sobre rocas de distinta competencia. Su origen se relaciona a fallamientos inversos y de rumbo que general truncamientos a manera de facetas triangulares. La forma predominante es colinada con laderas de pendiente inclinada a abrupta. Esta se localiza al occidente del municipio.

- Sefes - Espolón festoneado

Geoforma de gran extensión en el municipio, localizada al oeste del mismo, corresponde a laderas y crestas simétricas de morfología alomada, cimas agudas, pendiente muy inclinada a muy abrupta, forma recta a cóncava, dispuestas perpendicularmente al rumbo de las estructuras geológicas definiendo salientes cortas y largas.

- Sles - Ladera estructural

Esta subunidad se presenta como superficies de morfología regular a irregular, definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) paralelos al sentido de la inclinación del terreno. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros).

- Ssbe - Sierra de barras estructurales

Localizada al sur de la cabecera municipal al centro de la zona de estudio, se observa como una prominencia topográfica elongada de morfología alomada de laderas irregulares a

escalonadas cortas, definidas por la disposición estructural vertical o casi vertical de secuencias sedimentarias y metamórficas foliadas.

- Ssh - Sierra homoclinal

Sudunidad definida por una secuencia de estratos o capas apilados e inclinados ($> 35^\circ$) en una misma dirección. Generalmente es producto del desarrollo o erosión de un solo flanco de una estructura geológica. Esta geoforma se puede observar al occidente y zona centro del área de estudio.

Subunidades geomorfológicas de origen fluvial

Incluye las geoformas que se originan por procesos erosivos de las corrientes de los ríos y quebradas, por la acumulación o sedimentación en zonas aledañas a dichas corrientes o cuencas restringidas.

- Fpi - Planicies o Llanuras de Inundación

Unidad geomorfológica localizada al sureste del área del proyecto, corresponde a superficies con morfología baja, plana y ondulada, con áreas de 0.05 a 5 km, eventualmente inundable, se presenta bordeando los cauces fluviales de los ríos Mapa y Risaralda, y se limita localmente por escarpes de terraza. Se constituye de 3 - 5 m de arcillas y limos producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial. Se incluyen los planos fluviales menores en formas de “U” o “V” y conos coluviales menores, localizados en los flancos de los valles intramontañosos.

Subunidades geomorfológicas de origen antrópico

Este ambiente se caracteriza por presentar geoformas generadas por la alteración significativa de la morfología natural que tiene la superficie terrestre por la acción del hombre.

Generalmente estas modificaciones en el terreno se realizan con la finalidad de construir viviendas, obras de ingeniería, disposición de desechos y adecuaciones de nuevas vías.

- Ape - Planos de excavación

Planos hechos en laderas con el fin de adecuar el terreno para la construcción ya que disminuyen la pendiente del terreno, en este caso corresponde al área donde se encuentra construido el casco urbano de Santuario, también el corregimiento de La Marina y el centro Poblado de Corinto.

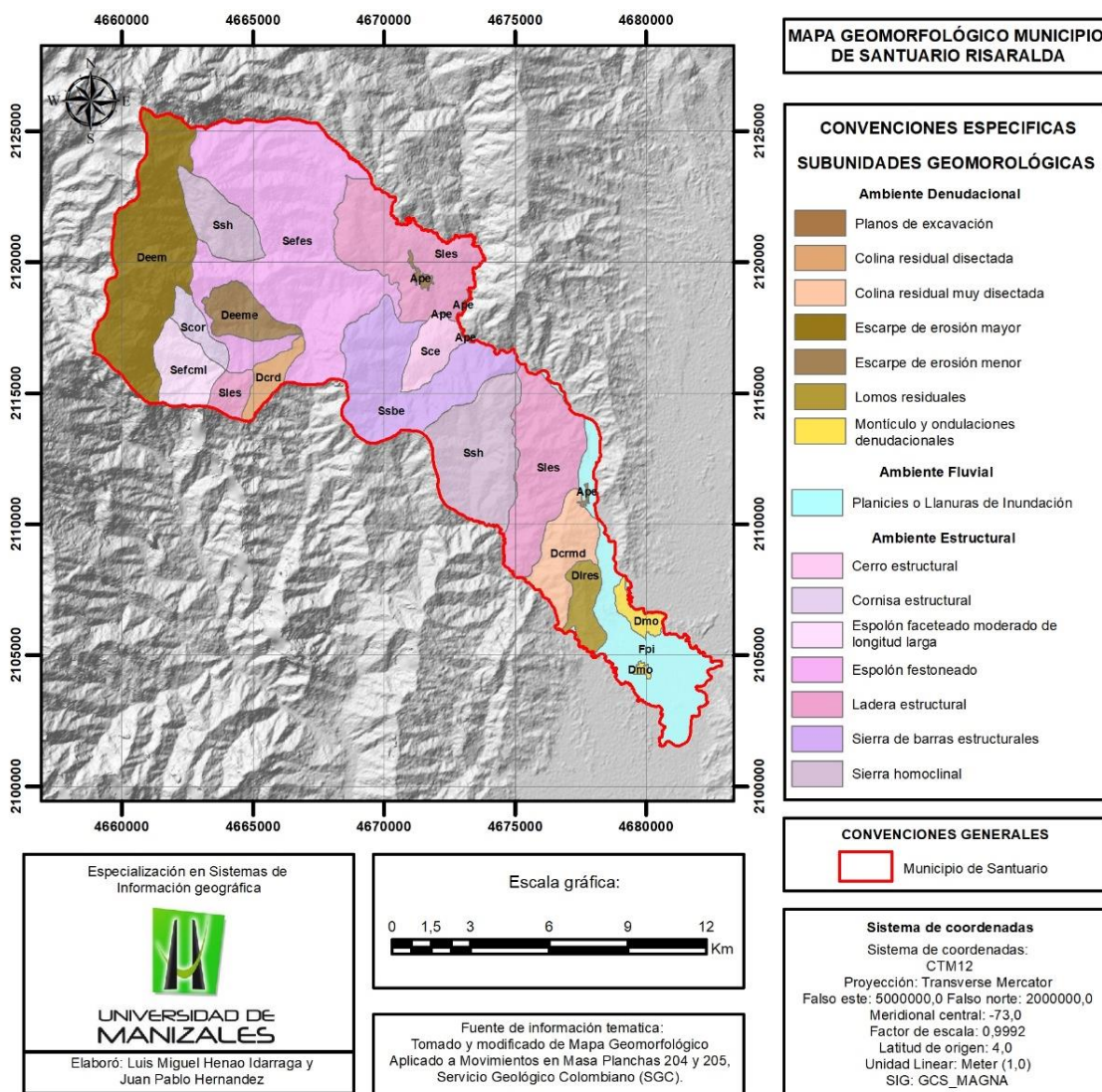


Ilustración 9. Mapa Geomorfológico, Santuario Risaralda. Fuente: Tomado y modificado de SGC.

Pendientes

En la gestión del riesgo, el mapa de pendientes es una de las principales variables a tener en cuenta a la hora de realizar zonificaciones de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, esta es una herramienta muy importante de planificación para establecer zonas de restricción, limitaciones de uso y regulaciones para el desarrollo en áreas de alto riesgo. Las pendientes fueron generadas a partir del modelo de elevación digital utilizado en este proyecto.

En la zona de estudio se encuentran presentes todos los rangos ya que se tienen ambientes deposicionales como los fluviales donde abundan las pendientes planas, como los ambientes estructurales y denudacionales donde por morfogénesis las pendientes son mucho mayores generando así escarpes y contrastes de relieve.

Como se observa en la Tabla 7 e ilustración 10 esta variable presenta un predominio de pendientes ligeramente escarpadas a fuertemente escarpadas (25% – 75%) las cuales ocupan el 76.68% del área del municipio. Las pendientes totalmente planas a inclinadas (0% - 25%) representan apenas el 18.86% del área, estas se encuentran concentradas al suroriente del municipio, sobre los depósitos aluviales de los ríos mapa y Risaralda. Por su parte, las pendientes totalmente escarpadas (>100%) están concentradas al occidente del municipio, sobre las laderas del Parque Nacional Natural Tatamá.

Tabla 7. Rangos de pendiente en porcentaje presentes en el municipio de Santuario con sus respectivas áreas y porcentajes de ocupación.

Pendientes	Área Ha	Porcentaje
0-1% a nivel	91,8806	0,48%
1-3% ligeramente plana	211,5476	1,11%
3-7% ligeramente inclinada	853,1834	4,47%
7-12% moderadamente inclinada	669,7104	3,51%
12-25% fuertemente inclinada	1772,9437	9,29%

Pendientes	Área Ha	Porcentaje
25-50% ligeramente escarpado o ligeramente empinada	6613,9624	34,65%
50-75% moderadamente escarpada o moderadamente empinada	5856,9376	30,69%
75-100% fuertemente escarpada o fuertemente empinada	2164,4304	11,34%
>100% totalmente escarpada	850,6203	4,46%
Total	19085,2165	100%

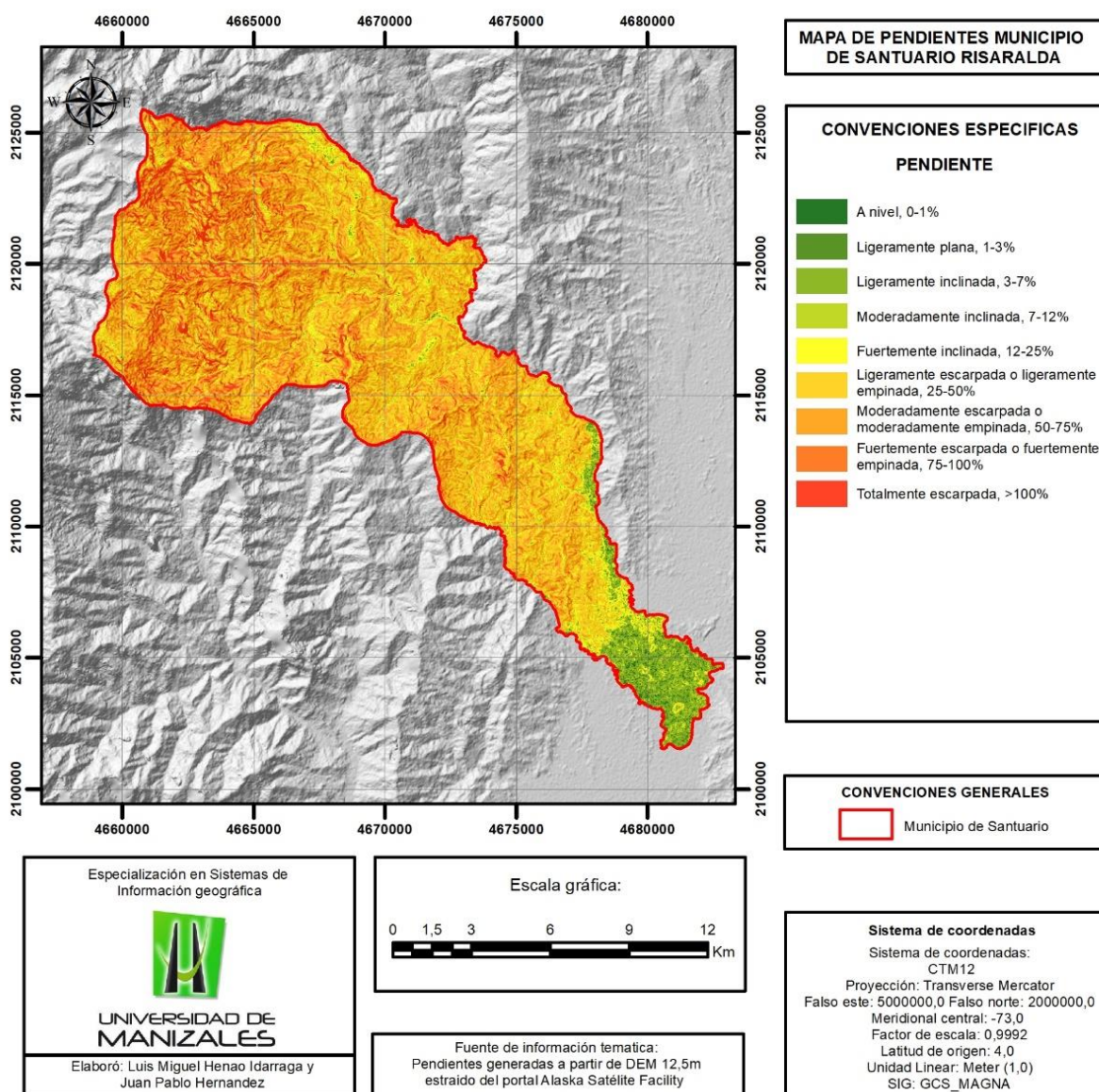


Ilustración 10. Mapa Pendientes, municipio de Santuario Risaralda.

Cobertura de la tierra

El uso y cobertura de la tierra son factores condicionantes y de gran importancia para la ocurrencia de procesos de remoción en masa, estos factores influyen directamente en la estabilidad de las laderas. Factores como deforestación, prácticas inadecuadas de uso y manejo del suelo, sobrepastoreo, deficiente manejo de aguas, prácticas constructivas inadecuadas, introducen un cambio de esfuerzos y formas del terreno que pueden desencadenar o contribuir a causar movimientos en masa. (Montero, 1991)

Las características de cada cobertura influyen directamente en la estabilidad del terreno, las coberturas y el sistema radicular asociado a cada una de ellas incide en la absorción y filtración de agua, en el aumento o reducción de la humedad del suelo y la rugosidad del terreno. Por ejemplo, los cultivos con sistemas radiculares poco profundo, como lo son el café y el plátano, no brindan la adherencia suficiente al terreno y favorecen una mayor infiltración hacia los estratos superficiales del suelo, saturándolos hídricamente y permitiendo que actúe la erosión interna que es uno de los procesos causantes de la apertura de grietas por tensión y posteriores deslizamientos. La presencia vegetación de raíces cortas, genera que la tasa de filtración y la escorrentía superficial aumente, contribuyendo con el incremento de los procesos erosivos no solo internos, sino también superficiales. Por lo tanto, el incremento en la tasa de filtración de las aguas hacia los estratos más superficiales influye negativamente en la estabilidad de la ladera, dado a que puede presentarse una sobresaturación hídrica del material constituyente, ya sea de suelo residual o transportado.

El municipio es agrícola principalmente, siendo el cultivo de café la principal fuente de ingresos, también se tienen cultivos de caña, cultivos de maíz, frijol, aguacate y siembras

transitorias. En el municipio también se encuentran áreas de pastos, bosques y vegetación herbácea. A continuación, se describen las coberturas presentes en el municipio:

Zona Urbanizada

Las zonas urbanizadas que se caracterizan por presentar edificaciones y estructuras urbanas, como viviendas. Estas incluyen los tejidos urbanos continuos y discontinuos, es decir, los centros poblados del municipio.

Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación

Aquí se incluyen principalmente las redes viales y territorios asociados a las mismas, como vías pavimentadas, sin pavimentar y algunos caminos de herradura.

Zonas de extracción minera

Es un área que está ocupada por operaciones mineras, incluyendo áreas de extracción, procesamiento y almacenamiento de minerales. Esta corresponde a una mina de extracción de material granular del río Mapa, al límite este del municipio.

Pastos

Son áreas que están cubiertas por pastos naturales o cultivados, utilizados principalmente para la actividad ganadera, aquí se incluyen pastos limpios, arbolados y enmalezados. Los pastos se encuentran principalmente a la zona suroriental del municipio.

Cultivos permanentes

Estos son terrenos destinados a la producción agrícola a largo plazo, aquí se incluyen los cultivos de café, aguacate, caña y cultivos confinados. Esta cobertura abarca gran parte del área del municipio.

Bosques

Áreas cubiertas predominantemente por árboles con una cobertura arbórea significativa. Aquí se incluyen los bosques fragmentados, densos y de galería. La concentración principal de esta cobertura se encuentra al oeste del municipio sobre el Parque Nacional Natural Tatamá.

Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva

Áreas dominadas por vegetación herbácea (como praderas, pastizales) y/o arbustiva (como matorrales), que no cumple con los criterios para ser clasificada como bosque.

Áreas agrícolas heterogéneas

Estas son áreas donde la cobertura del suelo está compuesta por una combinación de campos de cultivo, pastizales, pequeñas áreas boscosas dispersas, setos, caminos rurales, entre otros elementos característicos de paisajes agrícolas diversificados. Aquí se incluyen los mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales.

Áreas abiertas, sin o con poca vegetación

Las áreas abiertas, sin o con poca vegetación se caracterizan por no estar cubiertas por vegetación, o por estar cubiertas por vegetación escasa. Aquí se incluyen las tierras desnudas y degradadas.

Aguas continentales

Aquí se incluyen los cuerpos de agua como el Río Mapa.

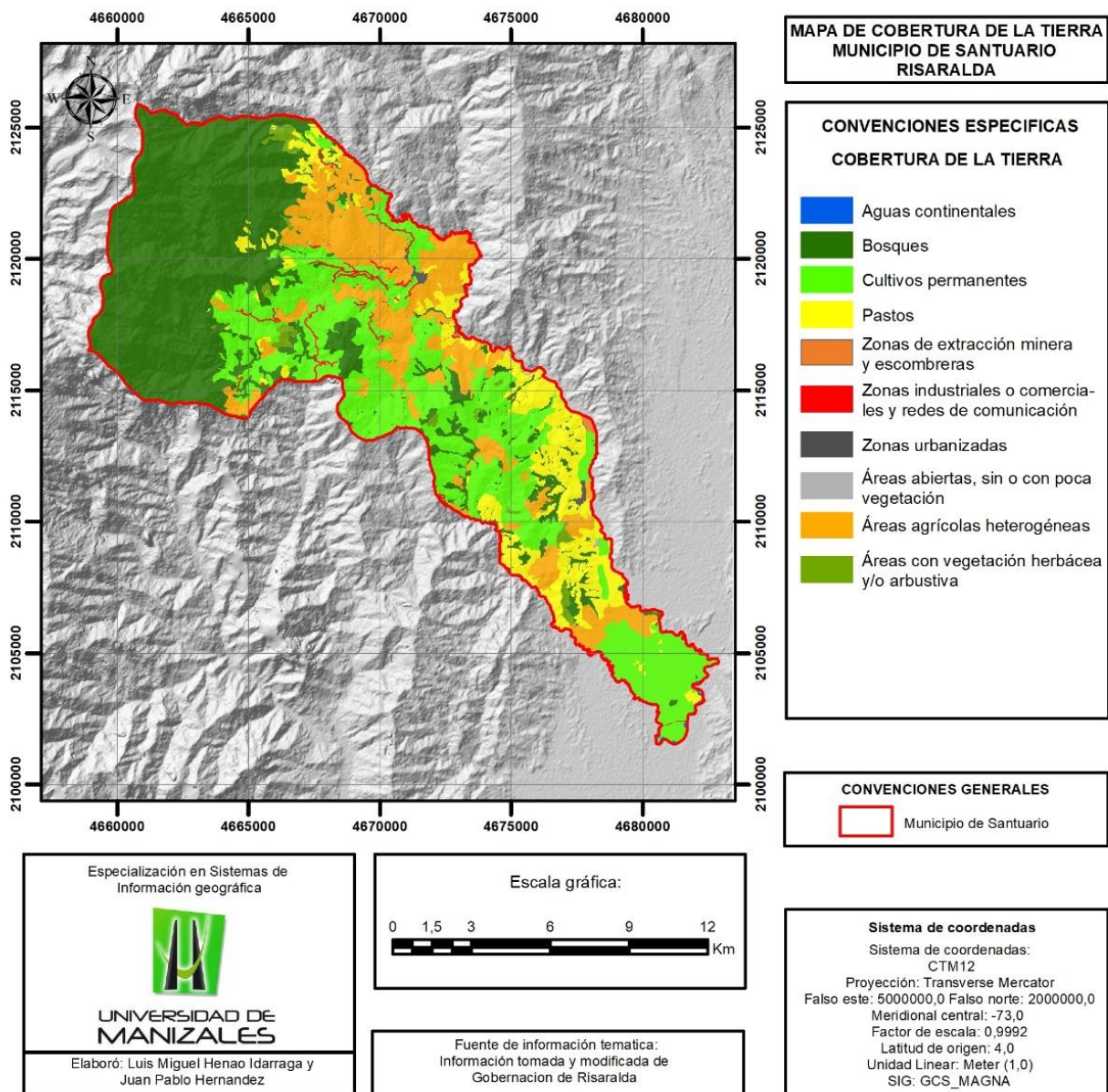


Ilustración 11. Mapa de cobertura de la tierra Santuario Risaralda. (Fuente: Tomado y modificado de Gobernación de Risaralda, (2021))

Susceptibilidad a movimientos en masa

Una vez identificadas y caracterizadas todas las variables condicionantes de terreno a tener en cuenta para la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa, se hace un análisis de la influencia que tiene cada uno de los parámetros y sus factores en la ocurrencia de

procesos erosivos, y se les asignan sus valores correspondientes. A continuación, se argumentan los valores que se le dieron cada uno de los factores y condiciones.

Geología: La geología es un factor importante en la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que determina la naturaleza de las rocas y su estabilidad, así como las características del suelo residual. Por ello se le dio un valor de 10%. A los depósitos se les asigno un valor del 1 debido a que son materiales que se encuentran en zonas de baja pendiente en las llanuras aluviales. A la Formación Barroso y Gabro Uralítico de Belén de Umbría se les asigno un valor de 2 ya que se componen rocas sedimentarias de origen volcánico y basaltos. Al Plutón del Tatamá y al Miembro Nutibara de la Formación Penderisco se les asigna un valor de 3. Por último, a la Formación Zarzal que se compone principalmente de diatomitas y arenas tobáceas, y al Miembro Urrao que se compone de arenitas, limolitas y arcillolitas se les dio un valor de 4.

Geología estructural: La presencia de diaclasas, fallas, pliegues, o demás discontinuidades estructurales favorecen la ocurrencia de movimientos en masa, por lo que se les dio un valor del 10%. En el área de estudio se encuentran principalmente fallas y lineamientos, a los cuales se les dio una calificación de 5 a las áreas que se encuentran 500m alrededor del trazo de estas.

Geomorfología: Las características topográficas y morfológicas del terreno son factores fundamentales en la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que intrínsecamente las unidades geomorfológicas contemplan las pendientes y características de los materiales, además, tienen en cuenta los procesos morfológicos que se dan en superficie, por lo tanto, se le dio un valor de 20%. A las geoformas fluviales y antrópicas se les dio un valor de 1. A las geoformas estructurales relacionadas a sierras, cerro y cornisas se les asigno una calificación de 3 y a las laderas estructurales una calificación de 4. A las subunidades geomorfológicas denudacionales

cuyo origen se relaciona a procesos de meteorización y erosión como lomos, colinas residuales y montículos ondulados se les asigno un valor de 4, y a los escarpes de erosión una calificación de 5.

Pendientes: Las pendientes son un factor crucial que influye directamente en la susceptibilidad a movimientos en masa. Indiferentemente de tipo de material que conforma el terreno o su cobertura, cuando las pendientes son muy altas la probabilidad de que se dé un proceso erosivo de remoción en masa aumentan considerablemente, es por ello se le asigna un valor del 35%.

A mayor pendiente más alta es la susceptibilidad, así pues, a las pendientes de 0 a 7% se les dio un valor de 1, a las pendientes de 7 a 12% se les dio valor de 2, las pendientes de 12 a 25% un valor de 3, las pendientes de 25 a 75% un valor de 4, y a las pendientes mayores a 75% un valor de 5.

Cobertura de tierra: Las características de las diferentes coberturas de tierra como pueden ser la profundidad radicular, la calidad de drenaje y la evapotranspiración influyen en la ocurrencia de movimientos en masa, por esta razón, a este factor se le dio un valor del 25%. En el caso de las zonas urbanas, industriales y de extracción minera se les dio un valor de 1. A los bosques se les asigno una calificación de 2, debido a que posee sistemas radiculares profundos y no favorecen la infiltración de agua al suelo. Las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva fueron calificadas con 3. Las áreas agrícolas heterogéneas que incluyen los mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales se les dio una calificación de 4.

Por último, a los pastos, Cultivos permanentes y las áreas abiertas, sin o con poca vegetación, se les dio una calificación de 5, ya que estas coberturas poseen sistemas radiculares

poco profundo, favorecen una mayor infiltración hacia los estratos superficiales del suelo saturándolos hídricamente.

En la siguiente tabla se pueden observar cada uno de los parámetros y factores con sus respectivos pesos porcentuales y calificaciones.

Tabla 8. Factores condicionantes y criterios para establecer pesos en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.

Susceptibilidad a movimientos en masa			
Parámetro	Factor	Peso Porcentual %	Calificación
Geología	Qal Depósitos Aluviales	10	1
	Tplz Formación Zarzal		4
	Nggt Plutón del Tatamá		3
	Kgub Gabro Uralítico de Belén de Umbría		2
	Kvb – Klb Formación Barroso		2
	Ksn Miembro Nutibara		3
	Ksu Miembro Urrao		4
	Kaa Formación Penderisco		3
Geología estructural	Cercanía a fallas (0 - 500 m)	10	5
geomorfología	Dlres Lomos residuales	20	4
	Dcrd Colina residual disectada		4
	Dcrmd Colina residual muy disectada		4
	Deem Escarpe de erosión mayor		5
	Deeme Escarpe de erosión menor		5
	Dmo Montículo y ondulaciones denudacionales		4
	Sce Cerro estructural		3
	Scor Cornisa estructural		3
	Sefcml Espolón facetado moderado de longitud larga		3
	Sefes Espolón festoneado		3
	Sles Ladera estructural		4
	Ssbe Sierra de barras estructurales		3
	Ssh Sierra homoclinal		3
	Fpi Planicies o Llanuras de Inundación		1
	Ape Planos de excavación		1
Pendientes	0-1% a nivel	35	1
	1-3% ligeramente plana		1
	3-7% ligeramente inclinada		1

Susceptibilidad a movimientos en masa			
Parámetro	Factor	Peso Porcentual %	Calificación
	7-12% moderadamente inclinada		2
	12-25% fuertemente inclinada		3
	25-50% ligeramente escarpado o ligeramente empinada		4
	50-75% moderadamente escarpada o moderadamente empinada		4
	75-100% fuertemente escarpada o fuertemente empinada		5
	>100% totalmente escarpada		5
Cobertura de la tierra	Zona Urbanizada	25	1
	Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación		1
	Zonas de extracción minera		1
	Pastos		5
	Cultivos permanentes		5
	Bosques		2
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva		3
	Áreas agrícolas heterogéneas		4
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación		5
	Aguas continentales		0

A continuación, se presentan los mapas con los valores de peso que se le asignaron a cada una de las variables donde se observa la susceptibilidad del terreno de acuerdo con cada una de ellas.

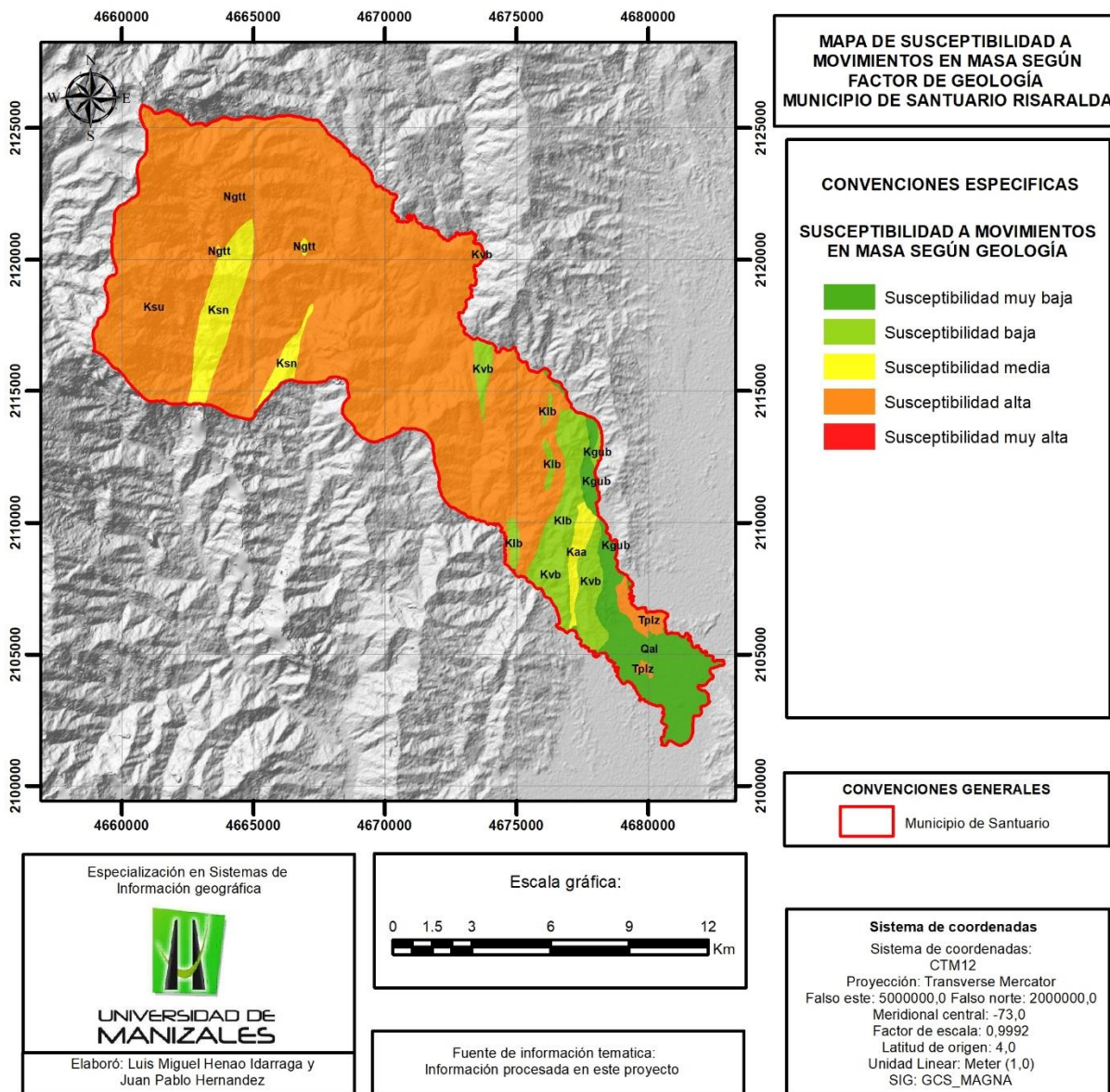


Ilustración 12. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de geología. (Fuente: Elaboración propia).

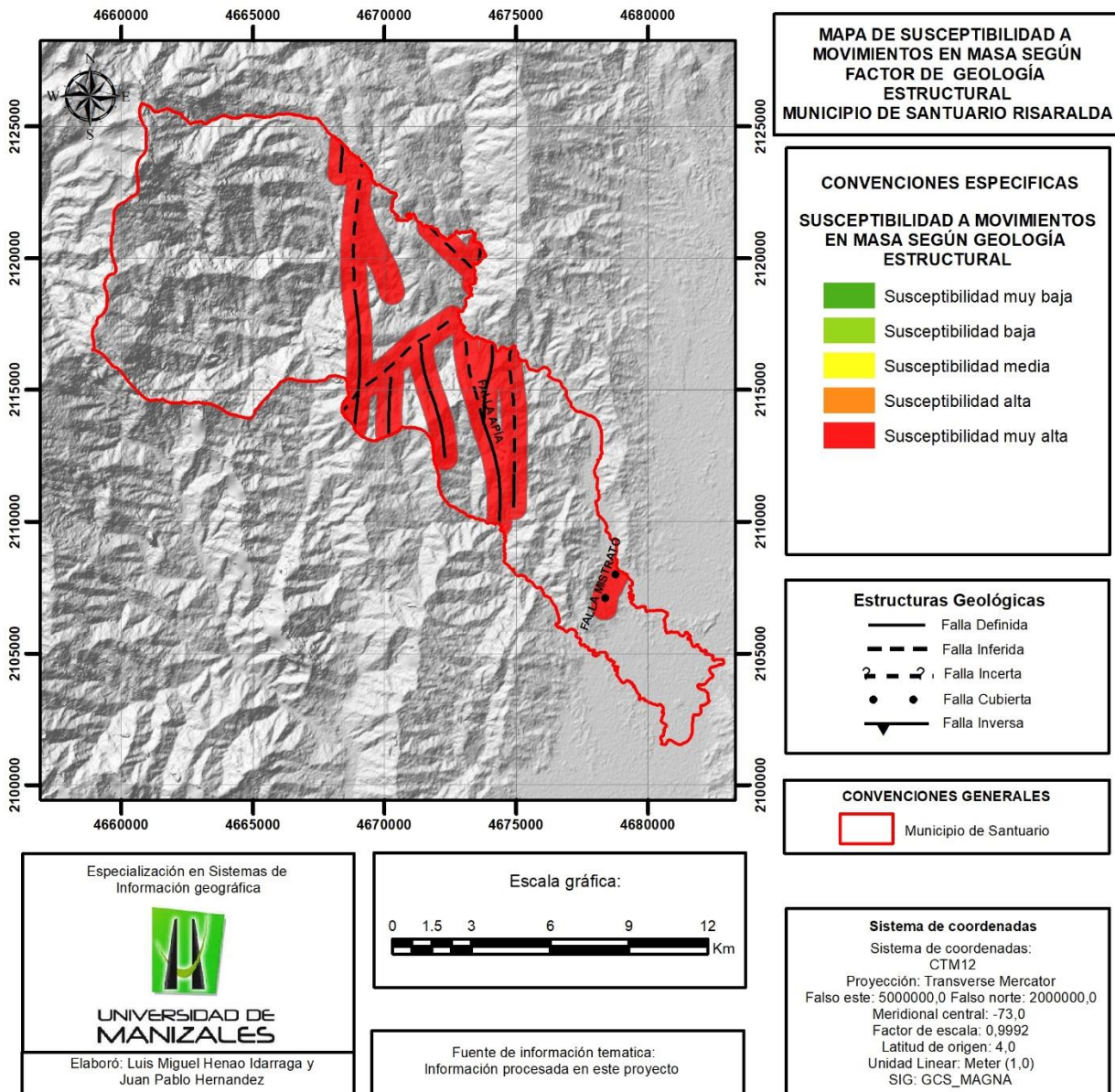


Ilustración 13. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de geología estructural. (Fuente: Elaboración propia).

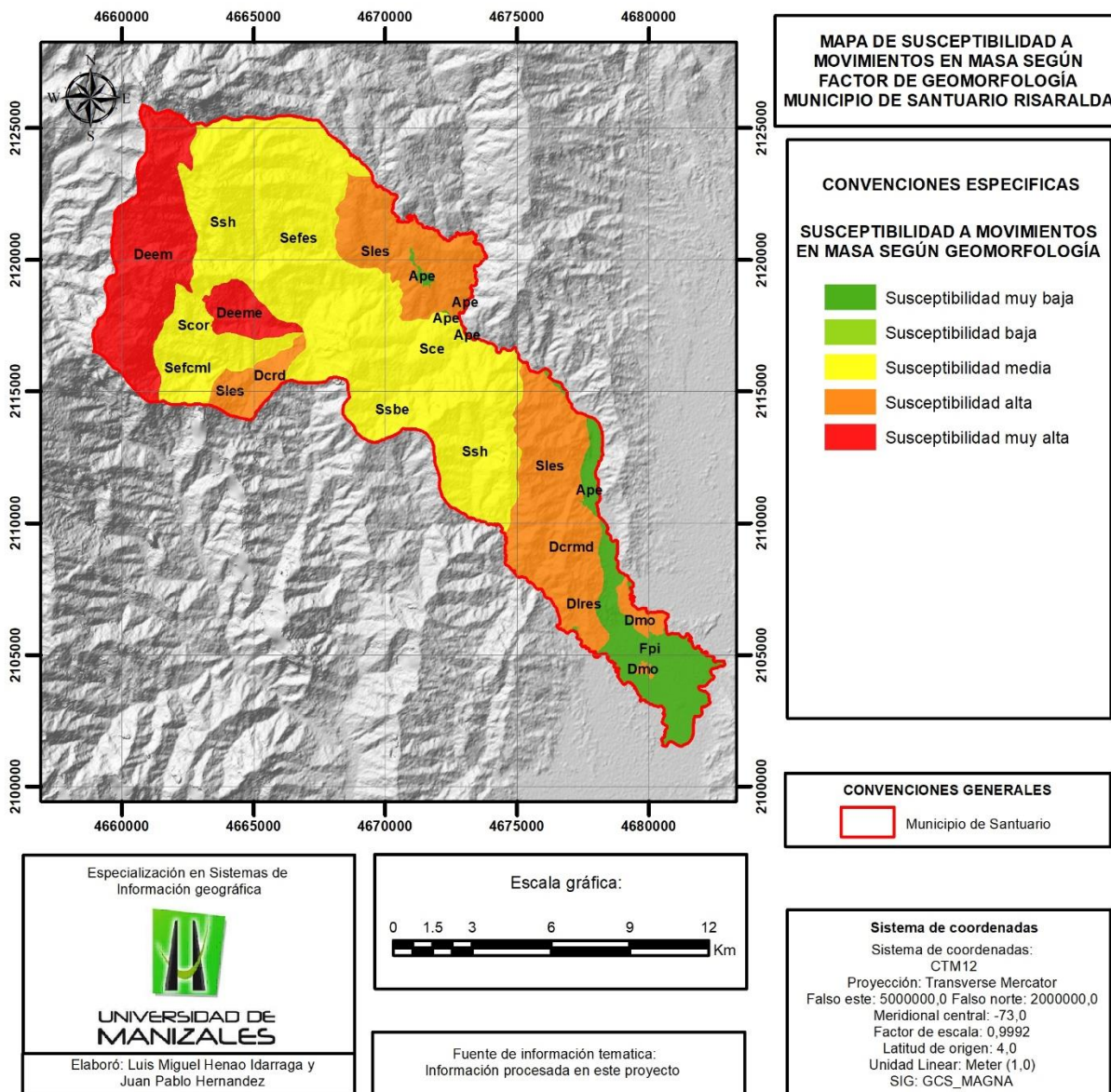


Ilustración 14. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de geomorfología. (Fuente: Elaboración propia).

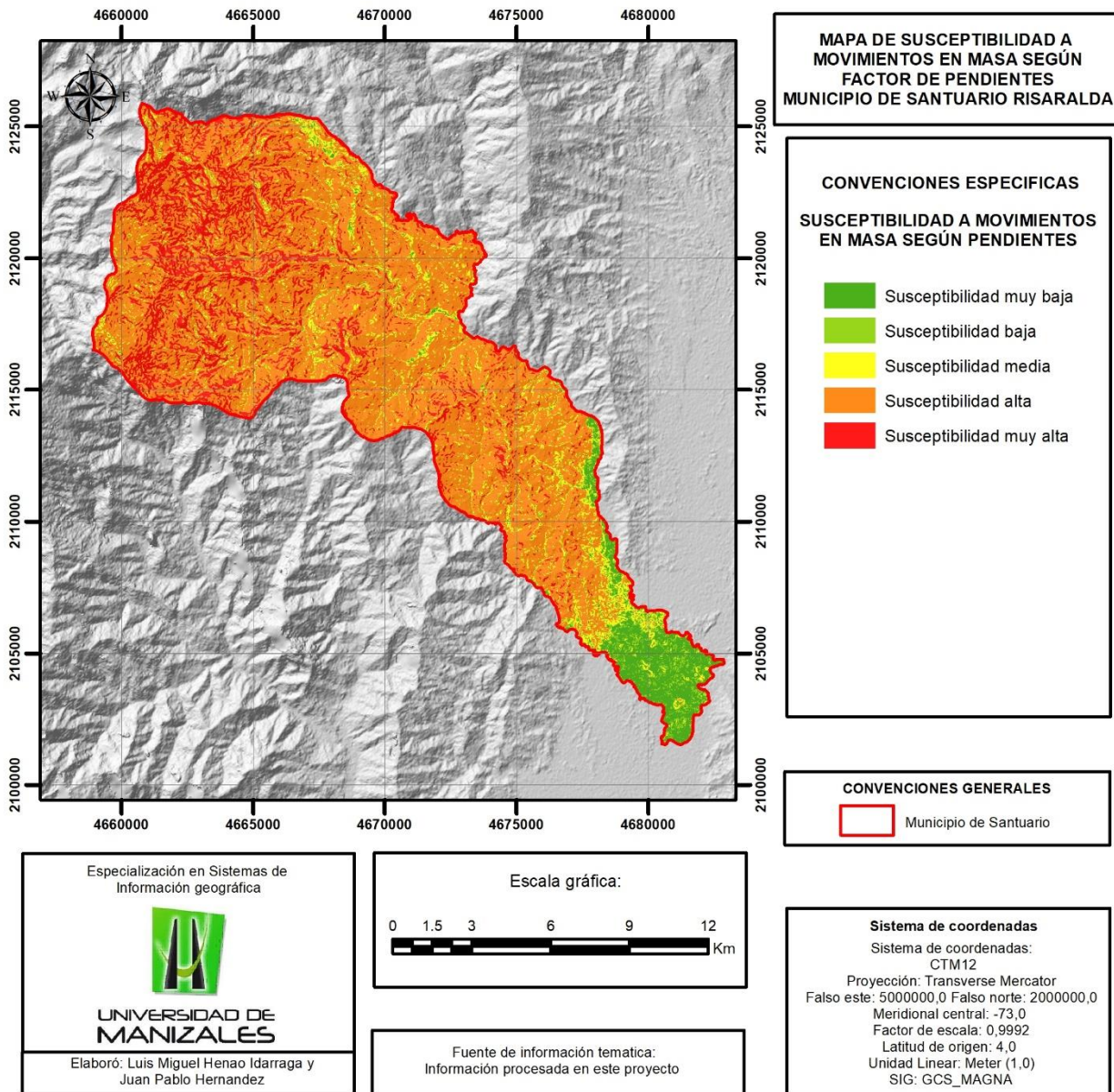


Ilustración 15. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor de pendientes. (Fuente: Elaboración propia).

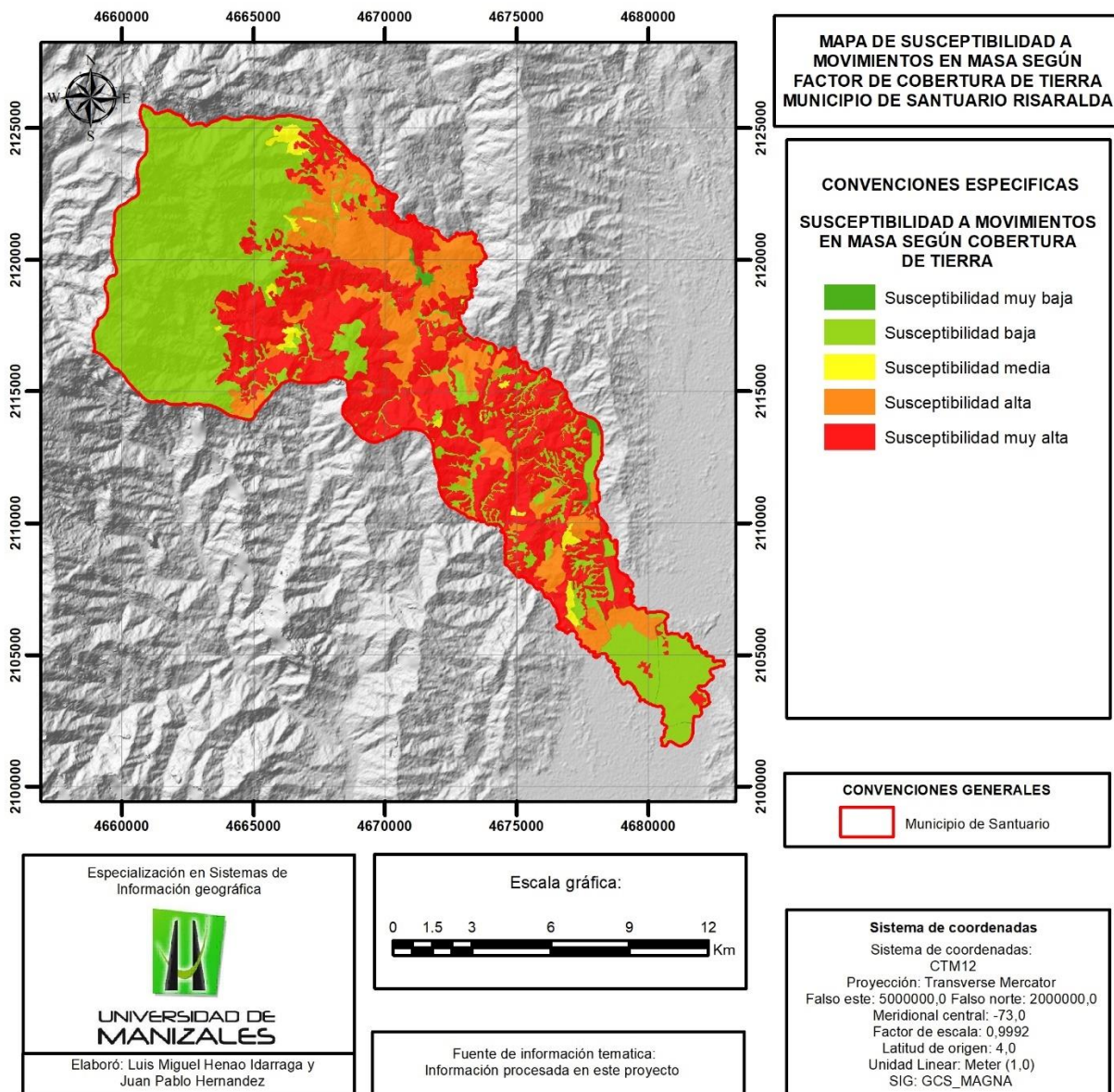


Ilustración 16. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa según factor cobertura de tierra. (Fuente: Elaboración propia).

Ya implementada la metodología anteriormente propuesta, por medio del software SIG (Arcmap) se obtuvo la siguiente cartografía de la zonificación a susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio.

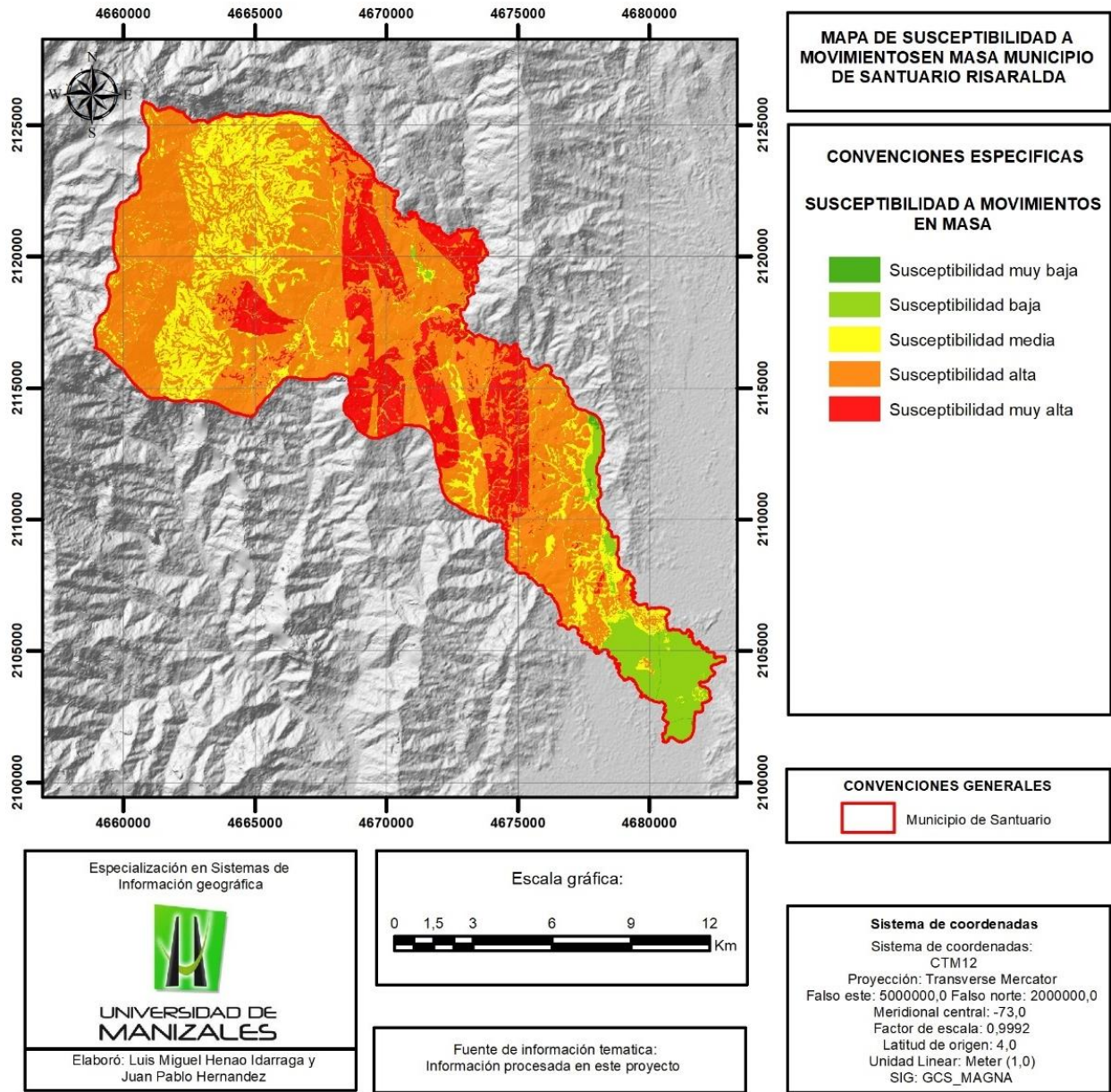


Ilustración 17. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. (Fuente: Elaboración propia).

Análisis de Resultados

Eventos registrados y análisis multitemporal

Para el año 2018 se tiene registro de dos eventos de remoción de material, uno de tipo avenida torrencial en la vereda Alto Barcinal y un movimiento en masa de tipo traslacional en la vereda Orofino. Para el año 2019 se reportaron otros dos movimientos en masa traslacionales en las veredas Los Planes y la Quiebra, sumado al ocurrido en el año 2020 en la vereda El Tambo, periodo en el cual también se registró la ocurrencia de un carcavamiento en la vereda La Bretaña. Para el año 2021 aumenta el número de eventos y se presenta la primera afectación de la zona urbana en límites con la vereda Buenos Aires, los demás registros se ubican principalmente en la zona central del municipio afectando las veredas de La Baja Cundina. Alto Barcial, Alto Peñas Blancas y Bajo peñas blancas con 3 movimientos en masa traslacionales, un movimiento en masa rotacional, un flujo de detritos y suelo, un movimiento en masa y avenida torrencial, una socavación hídrica lateral y un carcavamiento. Del año 2022 se tienen 17 eventos de movimientos en masa distribuidos en gran parte de la superficie del municipio, de los cuales 10 fueron muy cercanos a la zona urbana en las veredas de El Tambo y Buenos Aires (sobre la vía de ingreso a la cabecera municipal), 7 de ellos movimientos en masa traslacionales, un movimiento en masa rotacional, una caída de rocas y un carcavamiento. Los demás eventos de ese año fueron en su mayoría socavaciones hídricas laterales en las veredas Totu, La Guaira, San Gabriel, Orofino y Bajo Barcinal donde también se registró un movimiento en masa traslacional. En el año 2023 los eventos de remoción de material estuvieron muy dispersos y no hubo concentración en ninguna zona específica, se registraron 8 movimientos en masa traslacionales, 3 movimientos en masa rotacionales y un carcavamiento, todos ellos en 12 veredas diferentes.

De los 43 eventos totales registrados en el periodo 2018-2023, el 67% datan de los últimos 2 años, esto relacionado en parte con la alta pluviosidad en la región durante este bienio, pero también debido a la disponibilidad de la información ya que posiblemente muchos movimientos en masa ocurridos antes de ese tiempo no hayan sido debidamente documentados. Las 3 veredas más afectadas fueron el Tambo y Buenos Aires que limitan con la zona urbana del municipio con 7 eventos cada uno, y Alto Barcinal con 6 eventos abarcando el 47% de los deslizamientos registrados.

Al momento de revisar las condiciones físicas del terreno que abarcan dichas veredas se logra evidenciar como la mayoría de los parámetros son altamente favorables para la ocurrencia de movimientos en masa, las pendientes que se determinaron como el factor más relevante son mayores al 75%, además de eso son zonas de cultivos especialmente de plátano y café y geomorfológicamente hablando corresponden a geoformas estructurales y denudacionales.



Ilustración 18. Numero de eventos de remoción en masa registrados para cada año. (Fuente: Elaboración propia).

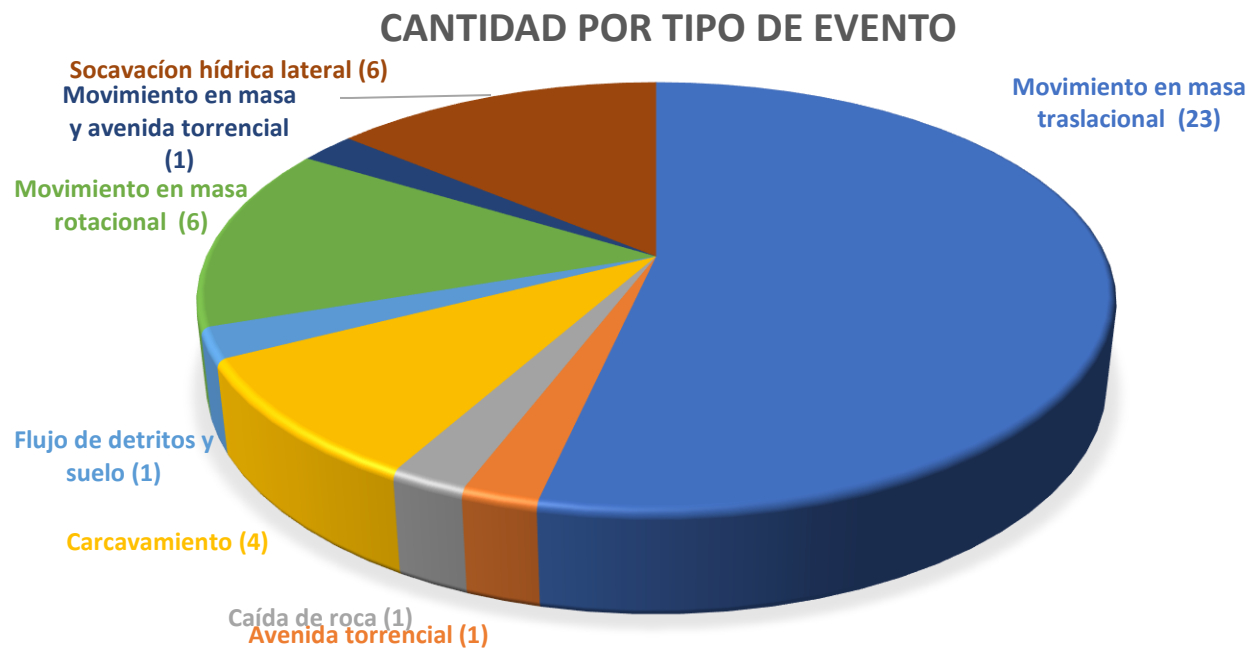


Ilustración 19. Numero de procesos de remoción en masa registrados según el tipo de evento. (Fuente: Elaboración propia).

Susceptibilidad a movimientos en masa

En función a la cartografía obtenida anteriormente, el rango de susceptibilidad que mayor área ocupa en el municipio es la susceptibilidad alta con 10900,58 hectáreas y un 57,07% de ocupación en el territorio, seguido de las susceptibilidades media y alta con un 18,93% y 16,94% de ocupación respectivamente. La susceptibilidad baja ocupa 1304,33 hectáreas y 6,83%, por último, la susceptibilidad muy baja abarca tan solo el 0,23% del área de estudio con 42,65 hectáreas.

Tabla 9. Resultados zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.

Susceptibilidad a movimientos en masa			
Categoría de susceptibilidad	Grado de susceptibilidad	Área (Ha)	Ocupación %
1	Susceptibilidad muy baja	42,65	0,23
2	Susceptibilidad baja	1304,33	6,83
3	Susceptibilidad media	3616,28	18,93
4	Susceptibilidad alta	10900,58	57,07
5	Susceptibilidad muy alta	3235,46	16,94

**Ilustración 20.** Rangos de susceptibilidad a movimientos en masa. (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se hace una breve descripción de cada uno de los rangos de susceptibilidad y sus características.

Susceptibilidad muy baja: Fue la categorización con menor porcentaje (0.23%). Las zonas que quedaron en susceptibilidad muy baja se ubican en la parte sureste del municipio y se caracterizan principalmente por presentar pendientes casi planas o a nivel (cercanas al 1%), que

corresponden a depósitos cuaternarios (Qal) con geoformas de ambientes fluviales como causes o llanuras de inundación. En estas pequeñas zonas hay 2 tipos de uso del suelo que son el cultivo de caña y extracción minera en cercanías al río. Hay que tener en cuenta que es una zona que se encuentra fuera del rango de influencia de las fallas activas que pasan por el municipio.

Susceptibilidad baja: Las zonas que quedaron en este rango representan el 6.83% de la superficie municipal y se ubican principalmente hacia el sur del municipio y en parte de la zona urbana. Se caracterizan por presentar pendientes ligeramente planas o hasta ligeramente inclinadas (menores al 7%) en zonas de llanura de inundación correspondientes a depósitos cuaternarios (Qal) donde el principal uso que se le da al suelo es el cultivo de caña con aisladas áreas de pastos limpios. Al igual que en la susceptibilidad baja se encuentran fuera del área de influencia de las fallas.

Susceptibilidad media: La cantidad de terreno que entra en este rango de susceptibilidad es el del 18.93% y se encuentra bien distribuida a lo largo de todo el municipio incluyendo parte de la zona urbana, aunque la mayoría se encuentran hacia la parte noroccidental. Estas zonas presentan pendientes que van desde ligeramente inclinadas hasta fuertemente inclinadas (entre 7 y 25%). Geológicamente están ubicadas principalmente sobre la Formación Penderisco y la Formación Barroso, y unidades geomorfológicas de colinas residuales, sierras residuales, espolones y sierras. Estas zonas también están fuera de la zona de afectación de las fallas y el uso del suelo se representa principalmente por cultivos de café y en menor proporción por bosques riparios y mosaicos de cultivos y pastos.

Susceptibilidad alta: La mayor parte del municipio quedó en esta categoría con un 57.07% de la superficie. Estas zonas se encuentran distribuidas desde la parte sureste hasta la parte noroeste del municipio donde se encuentra el Parque Nacional Natural Tatamá. Las

pendientes de esta categoría oscilan principalmente entre el 25 y 50% siendo una topografía ligeramente escarpada o empinada. Geológicamente es abarcada principalmente por la Formación Barroso y la Formación Penderisco Miembro Urrao y Miembro Nutibara con geoformas como escarpes erosivos, sierras, espolones y laderas estructurales. El uso de la tierra corresponde a cultivos de café y aguacate, bosques riparios y bosques densos. Las zonas de susceptibilidad alta tampoco se ven afectadas por las zonas de incidencia de las fallas.

Susceptibilidad muy alta: El 16.94% del municipio se encuentra en esta categoría que se distribuye principalmente en las zonas central y centro-occidental del municipio. En general las pendientes de estas zonas son superiores al 25% y la topografía puede ir de levemente escarpada a fuertemente escarpada. La mayor parte de las zonas de susceptibilidad alta se encuentran en las zonas de influencia de las fallas que pasan por el municipio. En cuanto a la geología y la geomorfología se encuentran la Formación Penderisco Miembro Urrao y Miembro Nutibara con geoformas como escarpes erosivos, sierras, cerros y laderas estructurales. En cuanto al uso del suelo se tienen principalmente cultivos de café y bosques riparios y de transición.

Por último, se realiza una comparación entre la distribución de los eventos registrados con los resultados de la zonificación, lo cual permite validar y entender de mejor manera los resultados obtenidos por medio de la distribución y temporalidad de los eventos.

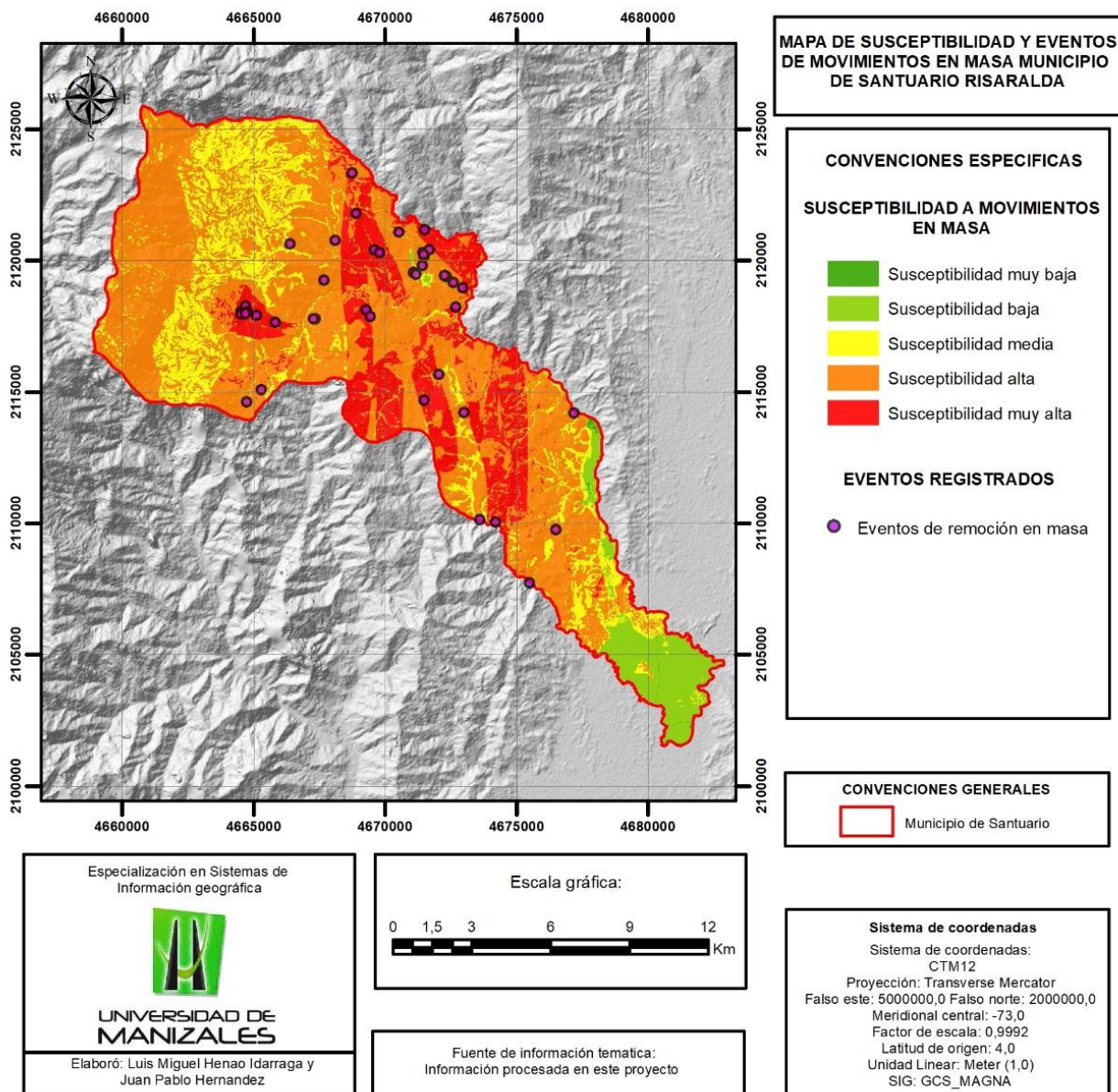


Ilustración 21. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa con relación a eventos registrados. (Fuente: Elaboración propia).

Como se observa en la ilustración 16, los puntos de los eventos de procesos de remoción en masa registrados en el municipio coinciden con áreas que tienen rangos de susceptibilidad altas a muy altas, lo cual refuerza robustamente los resultados obtenidos en la zonificación. Esta coherencia entre los datos observados y los resultados obtenidos de la evaluación geoespacial

respalda la precisión y validez de la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Santuario Risaralda. Este hallazgo subraya la utilidad práctica de la metodología aplicada, proporcionando una base confiable para la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas en las áreas más propensas a estos eventos.

Conclusiones

- La zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa permite identificar áreas con mayor potencial de ocurrencia de este tipo de fenómenos, resultando ser un insumo de gran importancia en la toma de decisiones sobre políticas locales y regionales para la gestión, conocimiento y reducción del riesgo, lo cual permite orientar el desarrollo urbano y rural, implementar medidas de mitigación y fortalecer el sistema de monitoreo y alerta temprana.
- El análisis detallado revela que factores como la pendiente del terreno, la geomorfología y la cobertura vegetal juegan un papel crucial en la generación de áreas susceptibles a movimientos en masa. La comprensión de estos factores resulta ser esencial para desarrollar estrategias efectivas de gestión del riesgo.
- La metodología aplicada en este proyecto permitió obtener una zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de Santuario. Esta depende en gran medida de la experiencia y conocimiento que tengan los profesionales por lo que puede ser subjetiva, pero es flexible de acuerdo con las características del territorio, relativamente simple y fácil de aplicar. La metodología fue adecuada debido a la disponibilidad de información y al tiempo disponible para realizar el estudio.
- Los eventos de remoción en masa registrados en este trabajo se encuentran en zonas con rangos de susceptibilidad altas a muy altas, lo cual refuerza los resultados obtenidos en la zonificación.

- La zona suroriental del municipio no presenta registro de eventos de remoción en masa y tiene rangos de susceptibilidad de baja a muy baja, debido a que su topografía es muy suave y su génesis se relaciona a procesos fluviales, a diferencia de la zona central y noroccidental del municipio cuya topografía es abrupta y se relaciona a geoformas estructurales y denudacionales.

Recomendaciones

- Debe considerarse la posibilidad de realizar una zonificación de amenaza y riesgo por movimiento en masa en el municipio, donde se involucre factores detonantes como variables climáticas y sísmicas que puedan desencadenar estos procesos erosivos, y análisis de la vulnerabilidad con un enfoque ante la capacidad de adaptación o recuperación donde se tengan en cuenta factores como los planes de emergencia y la condición socioeconómica de la población.
- Se sugiere establecer un sistema de monitoreo en las zonas de riesgo identificadas, especialmente aquellas que albergan viviendas expuestas a movimientos en masa con una alta vulnerabilidad. Esto permitirá detectar cambios en las condiciones geotécnicas y tomar medidas preventivas o de respuesta temprana en caso de alertas o situaciones de emergencia
- Se recomienda a la administración municipal realizar un control y prestar especial atención a los futuros licenciamientos y construcciones que se realicen en el municipio, se debe prohibir todo tipo de construcción en los sectores y zonas en condición de susceptibilidad alta por procesos de remoción en masa. Adicionalmente, se debe evitar hacer cortes o intervenciones en las laderas y taludes sin la asesoría de un profesional en geotecnia.

- Es necesario desarrollar estrategias y campañas educativas que capaciten y concienticen a la comunidad ante la prevención y reducción del riesgo, para que reconozcan los riesgos asociados a los taludes y las medidas de seguridad que se deben adoptar, además, trabajar con la comunidad para la implementación de acciones que no favorezcan la generación de procesos de remoción en masa, medidas de seguridad y la importancia de adoptar buenas prácticas constructivas, considerando la opción de reubicar los elementos que se encuentren en riesgo.

Bibliografía

- Akgun, A. K. (2012). Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to Izmir city (west Turkey). . *Environmental monitoring and assessment*, 184(9).
- Alvarez, E., & Gonzales, H. (1978). *Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 Urrao. I.* NGEOMINAS, Informe 1761, 370 p. Medellín.
- Aristizábal, E. L.-V. (2019). Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial temporal y magnitud. *Boletín de geología* 41(3).
- Aristizábal, E., Morales-García, P., Vásquez-Guarín, M., Ruíz-Vásquez, D., Palacio-Córdoba, J., Ángel-Cárdenas, F. P., . . . & Ordóñez-Carmona, O. (2022). Metodologías para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa como parte de los estudios básico de amenaza: caso de estudio municipio de Andes, Antioquia, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 199–217. doi:<https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022009>
- Arnous, M. (2011). Integrated remote sensing and GIS techniques for landslide hazard zonation: a case study Wadi Watier area, South Sinai, Egypt. *Journal of Coastal Conservation*, 15, 477 - 497. doi:<https://doi.org/10.1007/s11852-010-0137-9>
- Brook, M. (1984). *New Radiometric age data from SW Colombia.* . Cali: Ingeominas - Misión Británica, Report 10, 18 p. .
- Carvajal Perico, J. H. (2003). *Documento del modelo de datos conceptual detallado. Documento Inedito.* Bogotá: Ingeominas, 54 pp.

- Carvajal Perico, J. H. (2008). *Primeras Aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Carvajal Perico, J. H. (2011). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Instituto Colombiano de geología y minería.
- Carvajal Perico, J. H.; Carrillo, E; Padilla. (2003). *Vision integral de la geomorfología colombiana*. Medellín: Memoria del IX Congreso Colombiano de Geología.
- Carvajal, J. H. (2005). *Zonificación geomorfológica de la Sabana de Bogotá*. . Proyecto Compilación y Levantamiento de La Información Geomecánica, 81.
- Chacón, J. I. (2006). Engineering geology maps: Landslides and geographical information systems. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 65(4).
- Chau, K. S. (2004). Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. . *Computers & geosciences*, 30(4).
- Coffey, R. (2013). The difference between «land use» and «land cover». *Journal of Agricultural Geography*.
- Colombo, A. L. (2005). Systematic GIS-based landslide inventory as the first step for effective landslide-hazard management. *Landslides*, 2(4).
- Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2012 por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*.

- Cruden, D. M., & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. In Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation. Turner, A. K. and Schuster R. L. *National Academy Press*, 36-75.
- Estrada, J., Viana, R., & Gonzales, H. (2001). *Geología de la plancha 205 Chinchiná. Escala 1:100.000*. Boletín Geológico. INGEOMINAS. p 1-92.
- Grosse, E. (1926). *Estudio geológico del terciario carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el río Arma y Sacaoyal*. Dietrich Reimer. Alemania. 374pp.
- Hall, R., Álvarez, J., & Rico, H. (1972). *Geología del departamento de Antioquia y Caldas (Subzona IIA)*. INGEOMINAS, Bol. Geol., 20(1):1- 85. Bogotá.
- Hungr, O., Evans, S. G., & Bovis, M. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 221-238.
- Hutchinson, J. N. (1988). General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, 3-35.
- Marin Cerón, M. I., & Vinasco Vallejo, C. (2012). *Presentación tema especial contribuciones al conocimiento de la evolución geológica del Sistema de Fallas de Romeral*. Medellín: Boletín Ciencias de la Tierra, Nro. 32, pp. 61-64.
- Maya, M., & González, H. (1995). *Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia*. . Boletín Geológico, INGEOMINAS, Vol. 35 p.43-57.

- Medina Quira, Y. (2017). *Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca del río Patía – departamento del Cauca*. Universidad de Manizales.
- Merghadi, A. Y. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207.
- Montero, J. (1991). *Inventario de deslizamientos en Suramerica. Conferencia espacial del Comité Panamericano Movientos en Masa*. IX Congreso Panamericano de Mecanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones de la ISSMGE. Viña del Mar, Chile.
- Moreiras, S. (2005). Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorfology*, 66(1).
- Murcia, A., & Cepeda, H. (1991). *Geología de la Plancha 410 La Unión Departamento de Nariño, Memoria explicativa, Escala 1:100.000*. Ingeominas.
- Naranjo, J. L. (2005). *Modelo de evolución morfotectónica del Sistema de Fallas de Romeral entre Pereira (Risaralda) y Filadelfia (Caldas)*. . Universidad de Caldas.
- Orrego, L. A., & Paris, G. (1999). *Cuadrángulo N-6 Popayán: Geología, Geoquímica y Ocurrencias Minerales (Versión resumida)*. Bogotá.: Publicaciones geológicas especiales de INGEOMINAS. No. 22.
- Pandey, A., Dabral, P., Chowdary, V., & Yadav, N. (2008). Landslide Hazard Zonation using Remote Sensing and GIS: a case study of Dikrong river basin, Arunachal Pradesh, India. *Environmental Geology*, 54, 1517–1529. doi:<https://doi.org/10.1007/s00254-007-0933-1>
- París, G., & Romero, J. (1994). *Fallas activas en Colombia. Boletín Geológico*. INGEOMINAS, Vol. 34, No 2-3, p. 3-25.

- Quiroz Hernandez, N. (2019). *Análisis de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa. Caso de estudio: Subcuenca del río San Francisco, departamentode Risaralda.* Universidad de Manizales.
- Rodríguez Castiblanco, E. A. (2017). *Rodríguez Castiblanco, E. A., Sandoval Ramírez, J. H., Chaparro Cordón, J. L., Trejos González, G. A., Medina Bello, E., Ramírez* *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000.* Servicio Geológico Colombiano.
- Rodríguez, G., & Arango, M. I. (2013). *Reinterpretación geoquímica y radiométrica de las metabasitas del Complejo Arquía.* . Boletín de geología. Vol. 35, No 2, p.65-81.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por remoción en masa escala 1:100.000.* . Bogotá.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000.* Servicio Geológico Colombiano.
- Sharpe, C. F. (1938). *Landslide and Related Phenomena.* New York: Columbia University Press.
- Subdirección de Proyección Institucional. (2020). *Introducción a la gestación del riesgo de desastres - interpretaciones de los riesgos y los desastres a través de la historia de la humanidad.* ESAP.
- Turner, A., & McGuffey, V. (1996). Organization of Investigation Process: in Landslides: Investigation and Mitigation (AK Turner and RL Schuster, eds.). *Trans. Res. Board Spec. Rept.,247: 121-128.*

- Van Der Hammen, T. (1958). *Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos*. . Bogotá: Serv. Geol. Nal., Bol. Geol., 6 (1-3): 67 - 128. .
- Van Westen, C. J. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering geology*, 102(3).
- Van Zuidan, R. (1985). *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*. Hague: Smits Publishers.
- Varnes, D. J. (1958). *Landslide Types and Processes, in Special Report 29: Landslides and Engineering Practice* . Washington D. C: National Research Council.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. En Special Report 1976: Landslides Analysis and control. *Washington D. C: TRB-NRC* .
- Voogd, H. (1983). Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. *Pion Ltd., London*.
- Yilmaz, C. T. (2012). GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak-Turkey). *Environmental Earth Sciences*.
- Zapata, G. (2001). *Geología y geoquímica de la plancha 204 Pueblo Rico. Escala 1:100.000*. . Boletín Geológico. INGEOMINAS. p 1-63. .