

Contribución en la zonificación de las amenazas por movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales, presentes en el departamento de Santander.

David Felipe Gomez Ayala

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Dilan Arturo Martínez Sánchez

Magister en Geología/Ciencias de la Tierra

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, por su apoyo incondicional, amor y sacrificio, que me motivaron a alcanzar mis metas. A mis profesores, por su guía y enseñanza constante, y a mis amigos, por compartir conmigo esta etapa de mi vida.

A toda mi familia, que ha sido mi pilar en cada paso de este camino. A mi madre, por su fortaleza y amor infinito, y a mi padre, quien siempre creyó en mis capacidades. Gracias por iluminar mi vida con su ejemplo y sabiduría.

Agradecimientos

(Agradezco a mi director de tesis, Dilan Martínez, por su orientación constante, su paciencia y los valiosos conocimientos compartidos durante el desarrollo de este trabajo. Su dedicación y compromiso fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.

Expreso mi sincera gratitud a la Universidad Industrial de Santander y a toda la Escuela de Geología por brindarme la formación académica y los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio.

Asimismo, agradezco a la Oficina de Gestión de Riesgo de Desastres del departamento de Santander y a todas las personas que trabajan en ella, por su amabilidad, disposición y apoyo constante. Su colaboración fue invaluable para la obtención de datos y la realización de este proyecto.

A los ingenieros Eduard Sánchez y Sergio Ferro, por darme la oportunidad de ser parte de su equipo.

Al geólogo Jose Jaime Martínez, quien dedicó su tiempo y conocimientos a la revisión de mi trabajo, por su asistencia, recomendaciones, y consejos para mi vida profesional.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al éxito de este trabajo. A todos ustedes, muchas gracias.)

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco teórico	14
2.1 Movimientos en masa.	14
2.2 Incendios Forestales.....	17
2.3 Inundaciones.	19
2.4 Análisis Jerárquico.....	19
3. Metodología	20
3.1 Etapa 1. Identificación de fenómenos recurrentes y metodología para la zonificación de amenazas.	20
3.2 Etapa 2. Obtención de información.	21
3.3 Etapa 3. Recopilación y selección de insumos.	21
3.4 Etapa 4. Procesamiento de la información y producción de mapas.....	21
3.4.1 Movimientos en masa.	22
3.4.1.1 Geología.....	23
3.4.1.2 Geomorfología.	25
3.4.1.3 Suelos edáficos.....	31
3.4.1.5 Factor Histórico.	34
3.4.2 Medidas mínimas a Cauces (Amenaza por Inundaciones).	35

3.4.2.1 Uso de Suelo/Coberturas.....	37
3.4.2.2 Elevación.....	37
3.4.2.3 Pendiente.....	38
3.4.2.4 Factor Histórico.	38
3.4.2.5 Precipitación.	39
3.4.2.6 Distancia a corrientes de agua.....	39
3.4.3 Incendios de la cobertura vegetal.....	40
3.4.3.1 Susceptibilidad de Coberturas.....	41
3.4.3.2 Relieve.	44
3.4.3.3 Factores Climáticos.....	45
3.4.3.4 Factor Histórico.	51
3.4.3.5 Accesibilidad.....	51
4. Resultados.....	52
4.1 Mapas preliminares de susceptibilidad a movimientos en masa.	52
4.2 Mapas preliminares de amenaza por movimientos en masa.....	58
4.3 Mapas preliminares de amenaza por inundaciones.....	59
4.5 Mapas preliminares de amenaza por incendios de la cobertura vegetal.	67
5. Conclusiones.....	78
6. Recomendaciones.....	80
Referencias Bibliográficas.....	82
Apéndices.....	86

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Matriz de pares para la determinación del peso de cada variable</i>	22
Tabla 2 <i>Propuesta de clasificación para la estructura/fábrica de las rocas</i>	24
Tabla 3 <i>Propuesta de clasificación para la resistencia de las rocas</i>	25
Tabla 4 <i>Propuesta de peso para las variables de morfometría</i>	25
Tabla 5 <i>Susceptibilidad de la pendiente.</i>	26
Tabla 6 <i>Susceptibilidad de la variable A. cuenca</i>	28
Tabla 7 <i>Susceptibilidad de la curvatura.</i>	29
Tabla 8 <i>Calificación del relieve relativo</i>	29
Tabla 9 <i>Calificación de la inclinación de la ladera</i>	30
Tabla 10 <i>Calificación de unidades geomorfológicas</i>	31
Tabla 11 <i>Criterios de evaluación de la variable Suelos edáficos.</i>	31
Tabla 12 <i>Calificación de la textura</i>	32
Tabla 13 <i>Calificación de la taxonomía, orden de suelos</i>	33
Tabla 14 <i>Calificación de la profundidad total</i>	33
Tabla 15 <i>Calificación de coberturas</i>	34
Tabla 16 <i>Calificación del registro histórico de movimientos en masa.</i>	34
Tabla 17 <i>Matriz de pares para la determinación del peso de cada variable</i>	36
Tabla 18 <i>Calificación del Uso de Suelo/Coberturas.</i>	37
Tabla 19 <i>Calificación de la pendiente.</i>	38
Tabla 20 <i>Calificación del registro histórico.</i>	39

Tabla 21 <i>Calificación para la distancia a corrientes de agua.</i>	40
Tabla 22 <i>Calificación de la cobertura por tipo de combustible</i>	42
Tabla 23 <i>Calificación de la cobertura por duración de combustible</i>	43
Tabla 24 <i>Calificación de la cobertura por tipo de combustible</i>	43
Tabla 25 <i>Calificación de la cobertura clasificación de la pendiente</i>	45
Tabla 26 <i>Calificación de la precipitación</i>	45
Tabla 27 <i>Calificación de la cobertura clasificación de la pendiente</i>	46
Tabla 28 <i>Calificación de la dirección de vientos</i>	48
Tabla 29 <i>Calificación del brillo solar medio anual</i>	49
Tabla 30 <i>Calificación Solana / Umbría</i>	50
Tabla 31 <i>Calificación Registro histórico de incendios</i>	51
Tabla 32 <i>Calificación de la distancia a la vía</i>	51

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Partes de los movimientos en masa. a) Movimiento tipo flujo: escarpe (e) y cuerpo(d); b) Partes de un flujo clasificado como avenida torrencial: zona de tránsito(t) y zona de depósito(d)</i>	15
Figura 2 <i>Triangulo del fuego (a), Triangulo de comportamiento del fuego (b)</i>	17
Figura 3 <i>Partes anatómicas de un incendio</i>	18
Figura 4 <i>Modelo conceptual de los factores considerados para la evaluación de la susceptibilidad por MRM con las modificaciones realizadas y metodología del SGC.</i>	23
Figura 5 <i>Modelo para producir el raster de pendiente clasificado</i>	26
Figura 6 <i>Modelo para producir el raster de rugosidad clasificado</i>	27
Figura 7 <i>Modelo para producir el raster A. Cuenca clasificado</i>	27
Figura 8 <i>Modelo para producir el raster de curvatura clasificado.</i>	28
Figura 9 <i>Modelo para producir el raster de inclinación de la ladera clasificado</i>	30
Figura 10 <i>Modelo conceptual de los factores considerados para la evaluación de la susceptibilidad por inundaciones con sus respectivos pesos en porcentaje.</i>	36
Figura 11 <i>Clasificación de precipitación por el método "Natural Breaks" de Jenks</i>	38
Figura 12 <i>Modelo para producir el raster de distancia a corrientes de agua clasificado.</i>	40
Figura 13 <i>Modelo conceptual de los factores considerados para la evaluación de la amenaza por incendios de la cobertura vegetal con sus respectivos pesos en porcentaje</i>	41
Figura 14 <i>Representación de las alineaciones del fuego</i>	47
Figura 15 <i>Rosa de Vientos Multianuales de Colombia</i>	48

Figura 16 <i>Gráfico de la variable dirección de vientos</i>	49
Figura 17 <i>Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia García Rovira</i>	54
Figura 18 <i>Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia Guanentá</i>	55
Figura 19 <i>Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia Metropolitana</i>	56
Figura 20 <i>Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia Soto norte</i>	57
Figura 21 <i>Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia García Rovira</i>	60
Figura 22 <i>Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Guanentá.</i>	61
Figura 23 <i>Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Metropolitana.</i>	62
Figura 24 <i>Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Soto norte</i>	63
Figura 25 <i>Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Yariguies</i>	64
Figura 26 <i>Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Comunera</i>	65
Figura 27 <i>Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Vélez.</i>	66
Figura 28 <i>Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia García Rovira.</i>	69
Figura 29 <i>Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Guanentá</i>	70
Figura 30 <i>Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Metropolitana.</i>	71
Figura 31 <i>Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Soto Norte</i>	72
Figura 32 <i>Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Yariguies.</i>	73
Figura 33 <i>Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Comunera</i>	74
Figura 34 <i>Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Vélez</i>	75

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Modelo para producir el raster de relieve relativo clasificado.	86
Apéndice B. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia García Rovira.....	87
Apéndice C. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia Guanentá.....	88
Apéndice D. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia Metropolitana.	89
Apéndice E. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia Soto Norte.....	90

Resumen

Título: Contribución en la zonificación de las amenazas por movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales, presentes en el departamento de santander.*

Autor: David Felipe Gomez Ayala**

Palabras Clave: Amenaza, Susceptibilidad, Zonificación, Movimientos en masa, Inundaciones, Incendios forestales.

Descripción: El presente estudio tiene como objetivo contribuir a la zonificación de amenazas naturales en el departamento de Santander, centrándose en los movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales. Para ello, se empleó el método de Análisis Jerárquico (AHP) en conjunto con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la generación de mapas preliminares de amenaza a escala 1:25.000. La metodología incluyó la recopilación de información geoespacial proveniente de diversas fuentes oficiales, la asignación de pesos a factores determinantes mediante matrices de comparación por pares y la modelización cartográfica de cada fenómeno.

Los resultados evidencian que existen zonas con alta susceptibilidad a cada una de las amenazas analizadas. En los movimientos en masa, las áreas con pendientes pronunciadas, suelos de baja cohesión y alta densidad de fracturamiento presentan mayor susceptibilidad. En las inundaciones, se identificaron zonas de alto riesgo en áreas bajas cercanas a cuerpos de agua, con alta precipitación y baja pendiente. Respecto a los incendios forestales, se evidenció que las zonas con coberturas vegetales secas, alta exposición a la radiación solar y cercanía a vías de acceso presentan mayor peligro.

Estos mapas preliminares permitirán fortalecer los procesos de gestión del riesgo y planificación territorial en la región, brindando información clave para la toma de decisiones. La integración de registros históricos y el uso de metodologías híbridas contribuirán a mejorar la precisión de la zonificación en estudios futuros.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Magister en Geología/Ciencias de la Tierra.

Abstract

Title: Contribution to the zoning of landslide, flood, and wildfire hazards in the department of Santander. *

Author(s): David Felipe Gomez Ayala **

Key Words: Hazard, Susceptibility, Zoning, Landslides, Floods, Wildfires.

Description: This study aims to contribute to the hazard zoning of natural threats in the department of Santander, focusing on landslides, floods, and wildfires. The Analytical Hierarchy Process (AHP) was combined with Geographic Information System (GIS) tools to generate preliminary hazard maps at a 1:25,000 scale. The methodology involved collecting geospatial data from various official sources, assigning weights to determining factors using pairwise comparison matrices, and cartographic modeling of each phenomenon.

The results indicate that certain areas exhibit high susceptibility to each analyzed hazard. For landslides, steep slopes, low-cohesion soils, and high fracture density were identified as the most critical factors. Flood-prone areas were mainly found in lowlands near water bodies, characterized by high precipitation and low slope gradients. Regarding wildfires, regions with dry vegetation cover, high solar radiation exposure, and proximity to roads showed a higher fire hazard.

These preliminary maps will enhance risk management and territorial planning processes in the region by providing essential information for decision-making. The integration of historical records and the use of hybrid methodologies will improve zoning accuracy in future studies.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Master in Geology/Earth Sciences.

Introducción

El departamento de Santander enfrenta diversas amenazas naturales. Según la Oficina para la Gestión del Riesgo de Desastres entre las más recurrentes durante el cuatrienio anterior se encuentran: los incendios forestales (228), las inundaciones (114) y los movimientos en masa (160). Estos fenómenos generan un alto impacto en la sociedad, afectando tanto la infraestructura como el bienestar de la población. Durante los últimos años, eventos naturales como los mencionados han afectado a miles de personas en la región, lo que pone en evidencia la necesidad de mejorar los procesos de gestión de riesgo. Por tanto, se espera fortalecer el sistema de información geográfica (SIG) de la Oficina de Gestión de Riesgo de Desastres del departamento de Santander mediante la creación preliminar de mapas de zonificación de amenazas naturales a escala 1:25.000. Para ello, se empleará el método de análisis jerárquico (AHP). Teniendo en cuenta las metodologías ya establecidas por el SGC, el IDEAM, y la lectura de diversos artículos científicos, usando herramientas SIG y mediante la creación de “model builders” con el fin de evaluar y priorizar los factores que influyen en la susceptibilidad del territorio ante las distintas amenazas ya mencionadas.

Durante esta práctica no solo se pretende proporcionar herramientas actualizadas para la gestión del riesgo, sino también contribuir a la planificación territorial del departamento, mejorando la toma de decisiones frente a futuros eventos naturales adversos. Por lo tanto, con el aporte de la práctica empresarial se pretende que la información generada sea clave para la implementación de estrategias de mitigación y prevención, contribuyendo a reducir la vulnerabilidad de la población y el impacto de los desastres en la región.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Contribuir a la base de datos del sistema de información geográfico de la oficina para la gestión de riesgo de desastres, mediante la zonificación de las amenazas por movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales en el departamento de Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Actualizar el registro histórico de fenómenos naturales ocurridos durante la temporada seca y de lluvias del departamento con la información obtenida en la sala de crisis.

Apoyar la elaboración de mapas de amenaza por inundaciones a escala 1:25.000.

Apoyar la elaboración de mapas amenaza por incendios de la cobertura vegetal a escala 1:25.000.

Apoyar la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:25.000 para las provincias: Guanentá, Metropolitana, Soto Norte y García Rovira.

Apoyar la elaboración de mapas de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000.

2. Marco teórico

2.1 Movimientos en masa.

Los movimientos en masa se describen como el movimiento pendiente abajo de; suelo, roca, y materiales orgánicos provocados por efectos gravitacionales, y también la forma del relieve resultante de dicho movimiento (USGS, 2008).

Las partes de un movimiento en masa se pueden simplificar en (Figura 1): zona de inicio (e) y zona de depósito (d), así como las zonas de tránsito (t) y depósito (d) para movimientos de tipo flujo, con el fin de lograr una representación del proceso adecuada a la cartografía (SGC, 2017).

Figura 1

Partes de los movimientos en masa. a) Movimiento tipo flujo: escarpe (e) y cuerpo(d); b) Partes de un flujo clasificado como avenida torrencial: zona de tránsito(t) y zona de depósito(d)



Nota. Tomado de SGC., 2017.

La mecánica interna del despliegue del movimiento se encuentra descrita por el tipo de movimiento (USGS, 2008):

- Caídas: Movimientos abruptos hacia abajo de rocas, tierra o ambas, que se desprenden de pendientes pronunciadas u acantilados a lo largo de una superficie donde no ha ocurrido desplazamiento por cizalla tales como diaclasas y planos de estratificación. El material puede descender en caída, rebotes o, rodando.

- Volcamiento: Se describe como la rotación hacia adelante fuera de la pendiente de una masa de suelo o roca sobre un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada. A veces puede ser impulsado por el peso ejercido por el material arriba de la masa desplazada.
- Deslizamientos: Es el movimiento cuesta abajo de una masa de roca o suelo que ocurre en superficies de ruptura o en zonas relativamente delgadas de intenso cizallamiento. Estos pueden ser traslacionales (El movimiento del material se da sobre una superficie plana con un componente rotacional mínimo o inclinación hacia atrás.) o rotacionales (El movimiento del material es rotativo y la superficie de ruptura es curva hacia arriba.) El movimiento no ocurre simultáneamente sobre todo lo que eventualmente será la superficie de ruptura. El volumen de material desplazado aumenta desde un área de falla local.
- Extensiones: Extensión suelo cohesivo o masa de roca combinado con la subsidencia general de la masa fracturada de material cohesivo sobre un material subyacente más blando. Son resultado de procesos de licuefacción o flujo (y extrusión) de material más blando subyacente.
- Flujos: Son un movimiento espacial continuo en donde las superficies de corte son temporales y muy cercanas, En donde suelo suelto, rocas y en ocasiones materia orgánica se combinan con agua para formar un “lodo” que fluye pendiente abajo. El componente de velocidad de las masas desplazadas por estos flujos es similar a las de un líquido viscoso. Existe una gradación entre el cambio de deslizamientos a flujos, dependiendo del contenido de agua, movilidad, y evolución del movimiento.

Estos fenómenos pueden tener diferentes causas probables, pero únicamente un factor detonante. Estos son estímulos externos donde la respuesta casi instantánea es un movimiento en

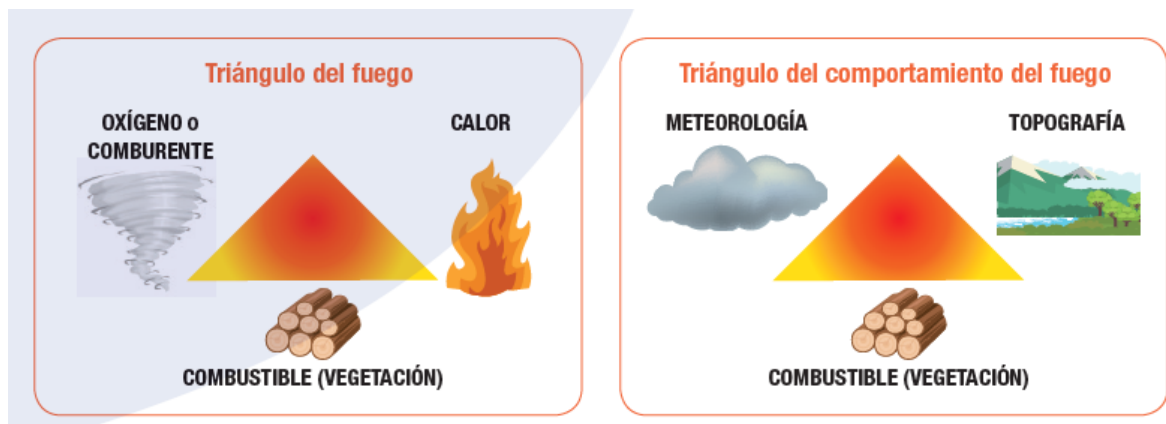
masa, debido a cambios en los esfuerzos y/o resistencia del material. Entre los factores detonantes más comunes se encuentran las lluvias y sismos (SGC., 2017).

2.2 Incendios Forestales.

Los incendios son por definición, la propagación no controlada del fuego sobre cobertura vegetal, y se producen por la combustión de esta, ya sea a partir de fuego de origen natural o humano. Tres elementos son necesarios para que se genere fuego (Figura 2): una fuente de calor, material combustible y aire. Una vez generado el fuego, su propagación depende del tipo de combustible, la climatología y la topografía. (Plana et al., 2016)

Figura 2

Triángulo del fuego (a), Triángulo de comportamiento del fuego (b)



Nota. Tomado de Plana et al., 2016.

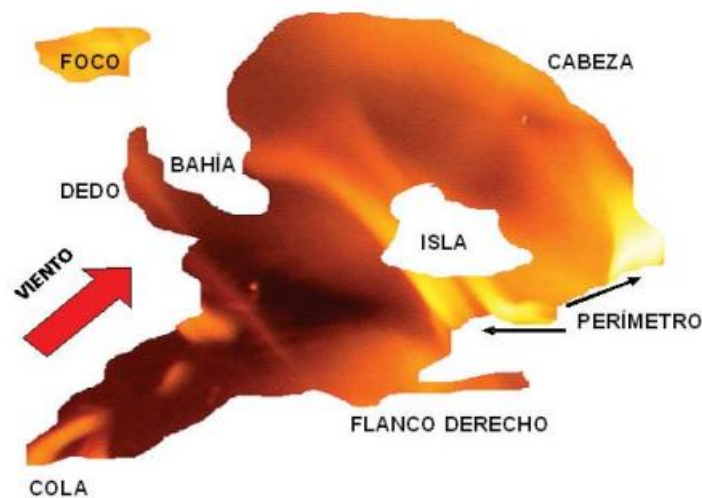
Según Moscovich, et al., 2014, la anatomía de un incendio está dada por la Figura 3:

- Cabeza: Zona donde el incendio se propaga más rápidamente e indica su dirección de avance.
- Cola: Zona opuesta a la cabeza, donde el incendio avanza con lentitud.

- Flancos: Laterales del incendio, para definir entre el flanco izquierdo y derecho el observador debe imaginar que los ve desde la cola.
- Borde: Límite que divide las áreas quemadas de las no quemadas.
- Perímetro: Longitud del borde.
- Dedos: Parte del incendio que se quema de forma larga y angosta.
- Bahías: Áreas no quemadas entre dedos u otras partes del incendio, estos forman entradas de determinada profundidad en el borde del incendio.
- Islas: Áreas aisladas dentro del incendio que no han sido quemadas.
- Focos secundarios: Fuegos separados del cuerpo principal del incendio, son producidos por desprendimientos del mismo.

Figura 3

Partes anatómicas de un incendio



Nota. Tomado de Moscovich, et al., 2014.

2.3 Inundaciones.

Las inundaciones se definen como el desbordamiento del cauce de agua fuera de sus límites habituales (Moreno, et al., 2020). El principal factor detonante de este fenómeno son las fuertes precipitaciones; sin embargo, la precipitación por sí sola no necesita ser extrema para causar un fuerte impacto por inundación (Johnson, et al., 2016).

Las inundaciones pueden clasificarse en diversos tipos, dependiendo de los causales y zonas afectadas:

- **Inundaciones Fluviales:** Estas ocurren cuando el caudal de un río supera su capacidad y se desborda, cubriendo áreas adyacentes. Estas inundaciones pueden deberse a lluvias intensas o prolongadas y al deshielo de nieve, afectando generalmente zonas extensas (Johnson, et al., 2016).
- **Inundaciones Flash (“Flash Floods”):** Inundaciones que ocurren rápidamente en áreas impermeables, dificultando la infiltración del agua lo que acelera la acumulación de la misma (Johnson, et al., 2016).
- **Inundaciones Costeras:** Se deben a la subida del nivel del mar, mareas altas o ciclones que desplazan el agua hacia la tierra (Moreno, et al., 2020). Además de la precipitación intensa existen otros factores que contribuyen a la aparición de este fenómeno: Saturación del suelo, Topografía y, Cambios en el uso de suelo (Moreno, et al., 2020).

2.4 Análisis Jerárquico.

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) es una herramienta multicriterio que facilita la toma de decisiones en situaciones complejas que involucran múltiples factores. En este estudio, se emplea el AHP para la zonificación de susceptibilidad, según las recomendaciones del grupo de la

oficina de gestión del riesgo de desastres de la gobernación de Santander. En este proceso se integran datos de diversas fuentes en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta metodología permite organizar y evaluar de forma sistemática los factores que influyen en la susceptibilidad de una región a distintas amenazas naturales.

El proceso comienza con la identificación de los factores relevantes que contribuyen en la susceptibilidad, tales como variables ambientales, geológicas y climáticas. Estos factores se estructuran en una jerarquía que clasifica los criterios de mayor a menor importancia. A través de una matriz de comparación por pares, se evalúa la importancia relativa de cada factor frente a los demás, lo que permite asignar un peso numérico a cada criterio (Chandio, et al., 2013).

3. Metodología

El proyecto se desarrolla bajo la supervisión de la Oficina para la gestión del riesgo de desastres de la gobernación de Santander y se llevará a cabo en las siguientes cinco etapas:

3.1 Etapa 1. Identificación de fenómenos recurrentes y metodología para la zonificación de amenazas.

Obtención de información cuantitativa en la sala de crisis, con el fin de determinar y cuantificar los fenómenos naturales más recurrentes en el departamento, así como la búsqueda de guías metodológicas para la evaluación de dichos fenómenos (movimientos en masa, incendios e inundaciones).

3.2 Etapa 2. Obtención de información.

Búsqueda bibliográfica respecto a la ocurrencia de los fenómenos, factores detonantes, características morfológicas, teniendo en cuenta: Artículos científicos, proyectos de grado, páginas web, informes, y libros, mediante recursos como la base de datos de la Universidad Industrial de Santander y otros recursos electrónicos, además del conocimiento humano de los integrantes de la oficina para la gestión de riesgo departamental. Esta información fue clasificada teniendo en cuenta su relevancia para el proyecto.

3.3 Etapa 3. Recopilación y selección de insumos.

Mediante canales abiertos como el portal Colombia en mapas, así como la base de datos abiertos del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), la base de datos del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), el portal web de la ICDE (Infraestructura colombiana de datos espaciales), y el geoportal del SGC (Servicio geológico colombiano) se obtuvieron los insumos de: Geomorfología nacional 1:100.000, Uso de Suelo 1:100.000, Mapa geológico de Colombia 1:100.000, Datos de precipitación y temperatura para las estaciones meteorológicas en el departamento de Santander con registros de los últimos 14 años.

El modelo de elevación digital con resolución espacial de 12.5m se obtuvo desde el portal “Alaska Satellite Facility” mediante el satélite ALOS PALSAR.

3.4 Etapa 4. Procesamiento de la información y producción de mapas.

Para realizar el análisis espacial de cada amenaza, es necesario aplicar una reclasificación adaptada a las características específicas de cada fenómeno. Por ello, se definen factores y subfactores, a los cuales se asignan pesos determinados.

3.4.1 Movimientos en masa.

Revisando el ‘Documento Metodológico para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a escala 1:100.000’. Para incluir el factor histórico en el modelo se generó una matriz por pares (Tabla 1) para asignar los valores de peso a cada factor. Los factores a tener en cuenta para la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa son (Figura 4):

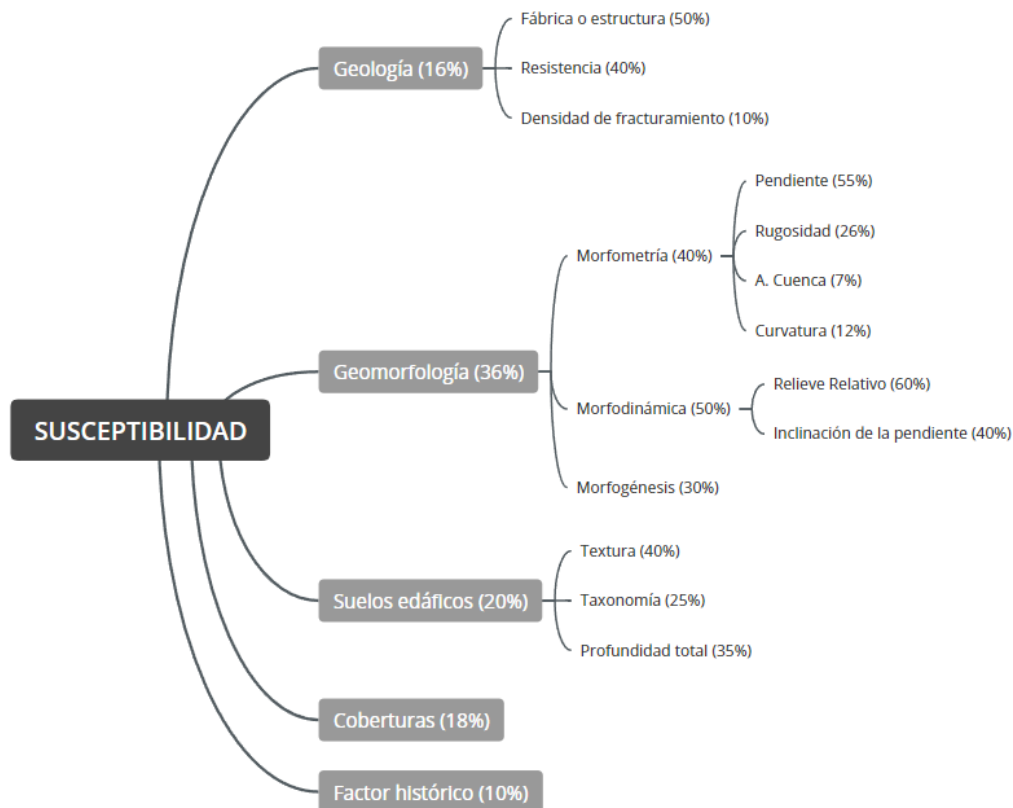
Tabla 1

Matriz de pares para la determinación del peso de cada variable

	Uso de Suelo/Coberturas	Elevación	Pendiente	Factor Histórico	Precipitación	Distancia a corrientes de agua	Vector propio
Uso de Suelo/Coberturas	1	1	2/3	2	1/3	1/3	0.1
Elevación	1	1	2/3	2	1/3	1/3	0.1
Pendiente	1.5	1.5	1	3	1/2	1/2	0.15
Factor Histórico	1/2	1/2	1/3	1	1/6	1/6	0.05
Precipitación	3	3	2	6	1	1	0.3
Distancia a corrientes de agua	3	3	2	6	1	1	0.3

Figura 4

Modelo conceptual de los factores considerados para la evaluación de la susceptibilidad por MRM con las modificaciones realizadas y metodología del SGC.



3.4.1.1 Geología. Para el factor de geología se tienen en cuenta las siguientes características de las rocas: densidad de fracturamiento, fábrica/estructura, y resistencia a la compresión simple.

a. Densidad de fracturamiento.

En esta capa se tienen en cuenta fallas, pliegues y lineamientos, para calcular la densidad de fracturamiento se utiliza el MDE, procesándolo en geomática 2018 con la herramienta “LINE: lineament extraction”, se hace una revisión del resultado, eliminando posibles errores.

Posteriormente usando el algoritmo “Line Density” en ArcGIS se calcula la densidad de líneas en el radio de búsqueda definido.

b. Fábrica/Estructura.

Se entiende como fábrica a la disposición de partículas y espacios vacíos en un área, esta es un factor determinante en el comportamiento de las rocas y suelos. Debido a que se genera una dirección de orientación preferencial entre las partículas lo cual establece la anisotropía en las propiedades geomecánicas. La estructura comprende de forma combinada la fábrica, composición y cohesión entre partículas. Para su calificación se tendrá en cuenta la Tabla 2.

Tabla 2

Propuesta de clasificación para la estructura/fábrica de las rocas

Fábrica/Estructura	
Atributo	Propuesta de Calificación
N/A	0
Cristalina Masiva	1
Cristalina Bandeadas	2
Clásticas Cementadas	3
Clásticas Consolidadas	4
Cristalina Foliada y Rocas de falla	5

Nota. Adaptado de Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, 2014.

c. Resistencia.

La resistencia a la compresión simple permite especificar comportamientos geomecánicos y de rotura en rocas. Para su cartografía se usa el mapa de unidades geológicas, asignándoles un

grado de resistencia según la categorización de resistencia a la compresión simple elaborada por Hooke en (1996), y se clasifica según la Tabla 3.

Tabla 3

Propuesta de clasificación para la resistencia de las rocas

Grado	Termino	Propuesta de Calificación
R6	Extremadamente dura	1
R5	Muy dura	1
R4	Dura	2
R3	Moderadamente dura	3
R2	Blanda	4
R1	Muy blanda	5
R0	Extremadamente blanda	5

Nota. Adaptado de Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, 2014.

3.4.1.2 Geomorfología. Las características geomorfológicas se clasifican de acuerdo a la cartografía de unidades geomorfológicas y el modelo de elevación digital. Este factor se divide en 3 subcriterios: Morfometría, Morfodinámica y, Morfogénesis.

a. Morfometría.

Aspectos cuantitativos correspondientes a: pendiente, rugosidad, A. cuenca y curvatura. Estas capas “Raster” se generan usando como insumo principal el modelo de elevación digital (MDE). El peso de cada variable esta dado en la Tabla 4.

Tabla 4

Propuesta de peso para las variables de morfometría

MORFOMETRÍA	
Atributos	Ponderados

Pendientes	55%
Rugosidad	26%
A. Cuenca	12%
Curvatura	7%

Nota. Adaptado de Linares, 2017.

- Pendiente.

Inclinación del terreno respecto a la horizontal. Es expresada en grados de 0 a 90°. Respecto a los movimientos en masa, una mayor pendiente provoca una mayor susceptibilidad al fenómeno.

El raster clasificado con la Tabla 5 se obtiene ejecutando el modelo de la Figura 5.

Figura 5

Modelo para producir el raster de pendiente clasificado



Tabla 5

Susceptibilidad de la pendiente.

Clasificación	Descripción	Grados
1	Plana a Suavemente inclinada	0 - 7
2	Inclinada	7 - 11
3	Muy inclinada	11 -19
4	Abrupta	19 - 40
5	Escarpada	40 - 90

Nota. Adaptado de Linares, 2017.

- Rugosidad.

Es determinada como las irregularidades o variaciones de la pendiente en la superficie de una forma o terreno. Una alta rugosidad representa también una alta susceptibilidad a movimientos en masa debido a que favorecen la infiltración de agua lo que incrementa la inestabilidad del terreno. El raster clasificado se obtiene ejecutando el modelo de la Figura 6.

Figura 6

Modelo para producir el raster de rugosidad clasificado



- A. cuenca.

Esta variable se define como el área de la cuenca en relación con la cantidad de agua que puede recolectar e infiltrarse, Una mayor área, significa una mayor capacidad de recolección e infiltración, lo que genera inestabilidad en la zona. El raster clasificado con la Tabla 6 se obtiene ejecutando el modelo de la Figura 7.

Figura 7

Modelo para producir el raster A. Cuenca clasificado

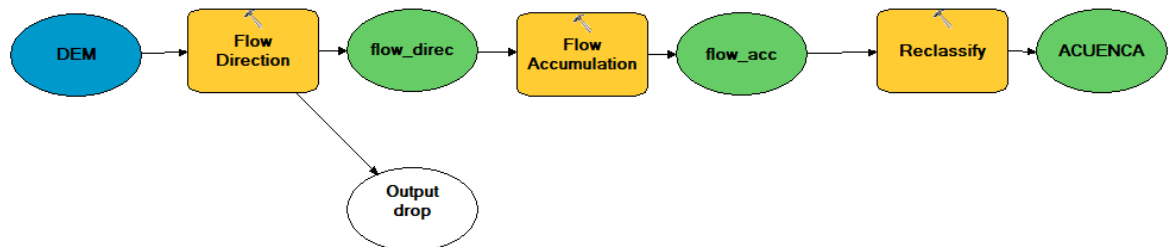


Tabla 6

Susceptibilidad de la variable A. cuenca

Clasificación	Descripción	Grados
1	Divisorias de aguas	0
2	Escorrentías lentas	0 - 3500
5	Flujo Acumulado	> 3500

Nota. Tomado de Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, 2014.

- Curvatura.

Representa los grados de curvatura del terreno, que es la curvatura perpendicular a la dirección máxima. Los valores positivos representan áreas convexas, los valores negativos áreas cóncavas y los valores alrededor de 0 representan áreas planas. Una curvatura cóncava representa una mayor susceptibilidad del terreno a movimientos en masa. El raster clasificado con la Tabla 7 se obtiene ejecutando el modelo de la Figura 8.

Figura 8

Modelo para producir el raster de curvatura clasificado.

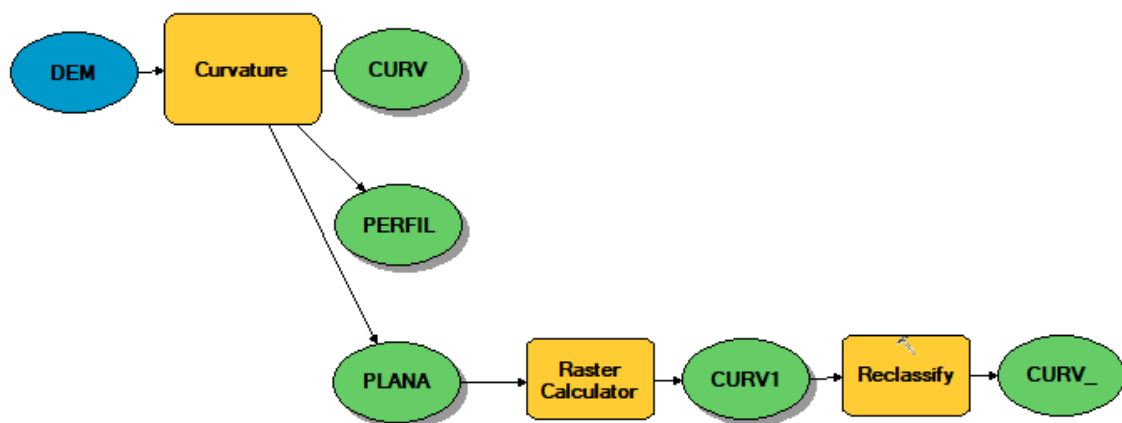


Tabla 7*Susceptibilidad de la curvatura.*

Clasificación	Descripción
1	Superficie Convexa
2	Superficie plana
3	Superficie Cóncava

b. Morfodinámica.

Debido a falta de información, o baja calidad de la misma. Solo se tomará en cuenta la clasificación a partir de las capas generadas del MDE. Este factor está dividido en: Relieve relativo e, Inclinación de la ladera.

- Relieve Relativo.

El relieve relativo representa la diferencia de altura entre la parte más baja y más alta de la geoforma. Está expresada como la máxima diferencia de altura del terreno por Km². El raster clasificado con la Tabla 8 se obtiene ejecutando el modelo del Apéndice A en la página 86.

Tabla 8*Calificación del relieve relativo*

Intervalos de Altura	Descripción del Relieve	Resistencia Relativa del material	Cal. Relieve
< 50 m	Muy bajo	Materiales muy blandos y erosionables	1
50 - 200 m	Bajo	Blando erosionable	1
200 - 400 m	Moderado	Moderadamente blando y erosión alta	2
400 - 1000 m	Alto	Resistente y erosión moderada	3
1000 - 2500 m	Muy alto	Muy resistente y erosión baja	3

> 2500 m	Extremadamente alto	Extremadamente resistente y erosión muy baja	3
----------	---------------------	--	---

Nota. Adaptado de Carvajal, 2012.

- **Inclinación de la ladera.**

Variable relacionada con el tipo de material que compone la geoforma y su susceptibilidad a movimientos en masa, se califica considerando la degradación que experimenta una cuenca hidrográfica en función de su topografía. Esto se debe a que la erosión ocurre en mayor o menor medida dependiendo de la inclinación de la ladera. El raster clasificado con la Tabla 9 se obtiene ejecutando el modelo de la Figura 9.

Figura 9

Modelo para producir el raster de inclinación de la ladera clasificado



Tabla 9

Calificación de la inclinación de la ladera

Inclinación (Grados)	Descripción	Características del material	Cal. Inclinación
< 5	Plana a Suavemente inclinada	Materiales muy blandos	1
5 - 10	Inclinada	Blando	1
10 - 15	Muy Inclinada	Moderadamente blando	2
15 - 20	Abrupta	Moderadamente resistente	2

20 - 30	Muy abrupta	Resistente	3
30 - 45	Escarpada	Muy resistente	3
> 45	Muy escarpada	Extremadamente resistente y erosión muy baja	3

Nota. Adaptado de Carvajal, 2012.

c. Morfogénesis.

Esta capa se presenta en unidades geomorfológicas, en la Tabla 10 se encuentran únicamente las unidades existentes en la zona de estudio con su respectiva calificación.

Tabla 10

Calificación de unidades geomorfológicas

Unidades Geomorfológicas	Calificación
Zonas Urbanas, Cuerpos de Agua	0
Abanicos de Explayamiento, Abanicos torrenciales, Lomas Kársticas, Plano deltaico, Vallecitos	2
Escarpes, Filas, Vigas, Colinas, Mesas, Terrazas	3
Glacis, Vegas	4
Sin información.	5

Nota. Adaptado de Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, 2014.

3.4.1.3 Suelos edáficos. Las características de los suelos edáficos se clasifican de acuerdo al mapa de suelos a escala 1:100.000 del departamento. Este factor debido a falta de información disponible se divide en 3 subcriterios (Tabla 11): Textura, Taxonomía y, Profundidad total.

Tabla 11

Criterios de evaluación de la variable Suelos edáficos.

SUELOS EDÁFICOS	
Atributos	Ponderados

Textura	40%
Taxonomía	25%
Profundidad Total	35%

a. Textura.

Los grupos texturales se definen como Arenoso (A), Arcilloso (Ar), Gravoso (Gr), Franco(F), Piedra (P), Limoso (L) y, Orgánico (Org). En relación a los movimientos en masa los suelos arcillosos al ser menos permeables son más susceptibles a este fenómeno. Tal y como los suelos con alto contenido de materia orgánica al saturarse. Se califican según la Tabla 12.

Tabla 12

Calificación de la textura

Clase Textural	Calificación
Gr, A, FAGrP, Agr, AFP	1
AF, FAGr, FArAGr, FArGr, FGr, FGrP	2
ArA, ArGr, FA, FArLGr, ArLGr, FLGr, ArAGr	3
F, F-Org, Far, FArA, FArL, FL, FLOrg	4
Ar, ArL	5

Nota. Adaptado de Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, 2014.

b. Taxonomía.

La clasificación taxonómica indica que tan evolucionado está un suelo, siendo los suelos más recientes los más susceptibles a movimientos en masa. Se califican según la Tabla 13.

Tabla 13*Calificación de la taxonomía, orden de suelos*

Orden de Suelos	Calificación
Oxisol, Ultisol	1
Alfisol	2
Molisol, Andisol, Espodosol	3
Ertisol, Aridosol	4
Inceptisol, Entisol, Histosol	5

Nota. Adaptado de Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, 2014.

c. Profundidad total.

Además de indicar características como hasta donde pueden llegar las raíces, o infiltrarse el agua, este factor nos sugiere el volumen de suelo que se puede transportar si se produce el fenómeno. Se califican según la Tabla 14.

Tabla 14*Calificación de la profundidad total*

Profundidad (cm)	Categoría	Calificación
0 - 25	Muy baja o superficial	1
25 - 50	Baja o superficial	2
50 - 100	Media o moderadamente profunda	3
100 - 150	Alta o profunda	4
> 150	Muy alta o muy profunda	5

Nota. Adaptado de Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, 2014.

3.4.1.4 Cobertura y uso de suelos.

Las coberturas vegetales generan un impacto bastante importante en los suelos, esto debido a que pueden reducir la velocidad escorrentía, disminuyendo así la erosión generada por la misma,

así mismo las raíces de cierto tipo de vegetación pueden actuar como un “amarre” entre los perfiles del suelo, haciéndolo menos susceptible a un movimiento en masa. Para esta capa se usará la capa de uso de suelo con la metodología “CORINE LAND COVER” proporcionada por la gobernación de Santander. Se califican según la Tabla 15.

Tabla 15

Calificación de coberturas

Parámetro	Unidad cartográfica del parámetro	Calificación
Uso y Cobertura del suelo	Bosques y arbustos	1
	Arbustos y pastos	3
	Pastos y cultivos	2
	Rastrojos	3
	Afloramientos Rocosos	3
	Suelos desnudos	3
	Suelos desnudos removidos	5

Nota. Adaptado de Linares, 2017.

3.4.1.5 Factor Histórico. Los registros históricos de movimientos en masa facilitados en la sala de crisis de los últimos 10 años no tenían registro de sistema de coordenadas, por lo que se optó por hacer un recuento por municipios y realizar la reclasificación a partir del mismo. Se califica según la Tabla 16.

Tabla 16

Calificación del registro histórico de movimientos en masa.

Registro de Movimientos en masa	Calificación
0 - 2	1
2 - 4	2
4 - 7	3
7 - 9	4
> 9	5

Para el presente proyecto la amenaza se evaluará considerando las fuertes precipitaciones como factor detonante. Por ello, se ha tomado como referencia la máxima precipitación registrada en 24 horas, con un periodo de retorno de 14 años, utilizando los datos de las estaciones climatológicas del IDEAM para generar un mapa de precipitaciones con la herramienta “IDW” en ArcGIS. Por tanto la evaluación de la amenaza está dada por:

$$A = \text{Susc} + \text{Fc}$$

Siendo: Amenaza (A), Susceptibilidad (Susc), Factor climático (Fc).

Un factor detonante es un estímulo externo donde la respuesta casi instantánea es un movimiento en masa, debido a cambios en los esfuerzos y/o resistencia del material. Entre los factores detonantes más comunes se encuentran las lluvias y sismos (SGC., 2017). Teniendo esto en cuenta es entendible porqué este factor posee tanta influencia al momento de evaluar la amenaza. En este caso el factor detonante evaluado fueron las precipitaciones, es necesario evaluar también los sismos como factor detonante para poder tener el escenario completo. Además, debido a que los valores de precipitación se toman de forma espacial mediante un mapeo, la exactitud y precisión de los mismos dependen de la cantidad de estaciones y datos que se tomaron en cada una de ellas.

3.4.2 Medidas mínimas a Cauces (Amenaza por Inundaciones).

Los criterios para el análisis de susceptibilidad se establecieron en base a lectura de bibliografía y la información que se encuentra disponible. Teniendo esto en cuenta se realizará una matriz por pares (Tabla 17) para asignar los valores de peso a cada factor. Evaluando: Uso de

Suelo/Coberturas, Elevación, Pendiente, Factor Histórico, Precipitación y, Distancia a corrientes de agua (Figura 10).

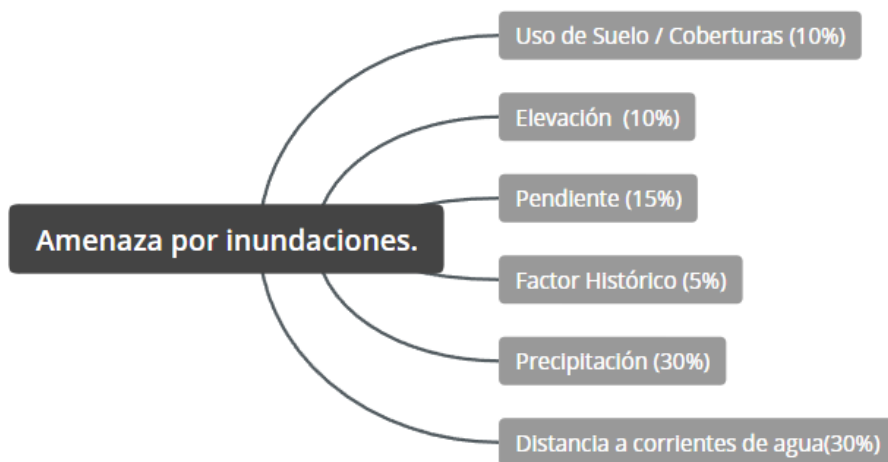
Tabla 17

Matriz de pares para la determinación del peso de cada variable

	Geología	Geomorfología	Suelos Edáficos	Coberturas	Factor Histórico	Vector propio	Vector propio (N)
Geología	1	1/3	3/4	1	3	0.151	0.162
Geomorfología	3	1	4	2	5	0.329	0.354
Suelos Edáficos	1.33	1/4	1	1.50	4	0.189	0.203
Coberturas	1	1/2	2/3	1	3	0.163	0.176
Factor Histórico	1/3	1/5	1/4	1/3	1	0.096	0.103

Figura 10

Modelo conceptual de los factores considerados para la evaluación de la susceptibilidad por inundaciones con sus respectivos pesos en porcentaje.



3.4.2.1 Uso de Suelo/Coberturas. El uso de suelo es un factor importante puesto que, existen áreas que presentan alta susceptibilidad al fenómeno. Las coberturas naturales presentan variaciones en cuanto a capacidad de infiltración. Sin embargo, la pérdida de coberturas naturales reduce la evapotranspiración del área lo que la hace más susceptible a inundarse. Como base para la calificación de las coberturas de la tierra se usará la capa de uso de suelo con la metodología “CORINE LAND COVER”. Se califican según la Tabla 18.

Tabla 18

Calificación del Uso de Suelo/Coberturas.

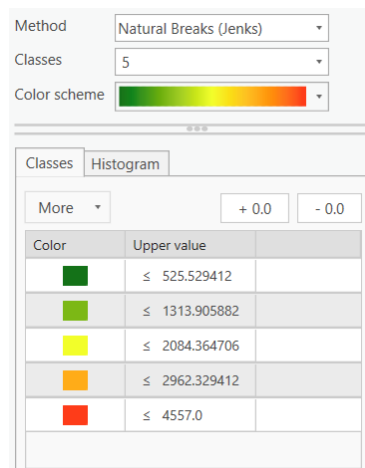
Uso de Suelo/ Coberturas	Calificación
Nieves perpetuas, Zonas urbanas, Territorios artificializados, Hidrosogamoso, Areas abiertas, Zonas verdes.	1
Bosques densos, Bosques, Bosques fragmentados, Palma, Cacao, Arbustales, Arbustal abierto, Pastos, Herbazal con arbustos, Herbazal arbolado, Arbustiva, Herbacea	2
Herbazales, Cultivos, Caña, Agrícolas, Suelos desnudos, Afloramientos rocosos	3
Humedales	4
Sin información, Ríos, Cuerpos de Agua	5

3.4.2.2 Elevación. Para la variable de elevación se utilizará el Modelo Digital de Elevación (MDE), a partir del cual se clasificarán los valores mediante una curva hipsométrica dividida en 5 clases (Figura 11), empleando el método de clasificación Jenks "Natural Breaks" puesto que este método minimiza la varianza interna dentro de cada clase y maximiza la diferencia entre clases, lo que asegura que las categorías reflejen patrones significativos en la

distribución altitudinal. Este enfoque permite identificar agrupaciones naturales en los datos de altitud, donde las áreas con menores valores de elevación se consideran más susceptibles al fenómeno de inundación.

Figura 11

Clasificación de precipitación por el método "Natural Breaks" de Jenks



3.4.2.3 Pendiente. Este factor determina la velocidad de escorrentía y percolación vertical. Se obtendrá procesando el modelo de elevación digital MDE, con la herramienta “slope” en ArcGIS. Se califican según la Tabla 19.

Tabla 19

Calificación de la pendiente.

Calificación	Pendiente (°)
1	60 - 90
2	40 - 60
3	20 - 40
4	10 - 20
5	0 - 10

3.4.2.4 Factor Histórico. Los registros históricos de inundaciones facilitados en la sala de crisis de los últimos 10 años no tenían registro de sistema de coordenadas, por lo que se optó

por hacer un recuento por municipios y realizar la reclasificación a partir del mismo. Se califican según la Tabla 20.

Tabla 20

Calificación del registro histórico.

Registro de Inundaciones	Calificación
0 - 2	1
2 - 5	2
5 - 8	3
8 - 10	4
> 10	5

3.4.2.5 Precipitación. La precipitación es uno de los factores más importantes y determinantes en esta amenaza, los datos para esta variable se obtendrán desde la base de datos del IDEAM, para todas las estaciones disponibles con datos de precipitación total anual en un intervalo de 14 años (2010 – 2024). En ArcGIS se usará un “JOIN” para incluir los valores de precipitación anual media en cada estación y posteriormente con la herramienta “IDW” se producirá el mapa de precipitación. Para determinar la calificación de cada intervalo de precipitación se usará la clasificación de Jenks “Natural breaks”. Tomando el intervalo con el mayor valor como la calificación más alta.

3.4.2.6 Distancia a corrientes de agua. La distancia a corrientes de agua es uno de los factores más importantes para evaluar la amenaza a inundaciones, puesto que estas se producen en gran medida por el desbordamiento de los caudales de las mismas. Siendo las zonas de ronda hídrica las más susceptibles a esta amenaza, se generará un buffer a partir de estas áreas. El raster clasificado con la Tabla 21 se obtiene ejecutando el modelo de la Figura 12.

Figura 12

Modelo para producir el raster de distancia a corrientes de agua clasificado.

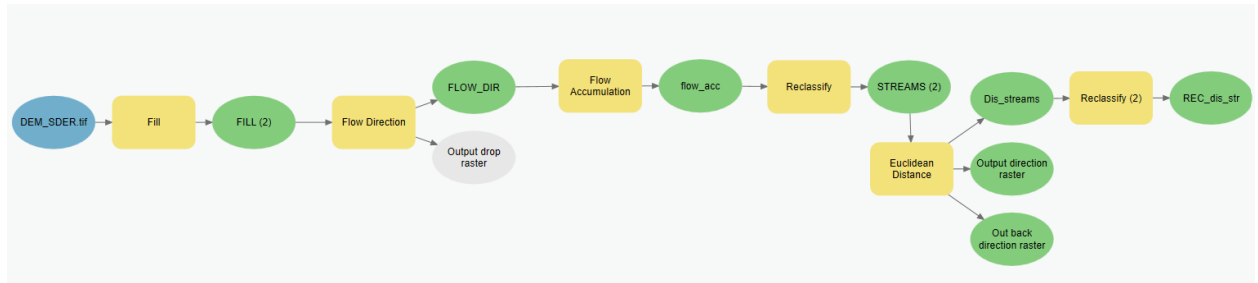


Tabla 21

Calificación para la distancia a corrientes de agua.

Distancia a cuerpos de agua	Calificación
0 - 30 m	1
30 - 100m	2
100 - 500m	3
500 - 1000m	4
> 1000m	5

Finalmente, para obtener el raster de amenaza por inundaciones se hace la suma de cada una de las capas con su respectivo peso de la siguiente forma:

$$\text{Amenaza por Inundación} = \text{Uso de Suelo (0.10)} + \text{Elevación (0.10)} + \text{Pendiente (0.15)} + \text{Factor Histórico (0.05)} + \text{Precipitación (0.30)} + \text{Distancia a corrientes de agua (0.30)}$$

3.4.3 Incendios de la cobertura vegetal.

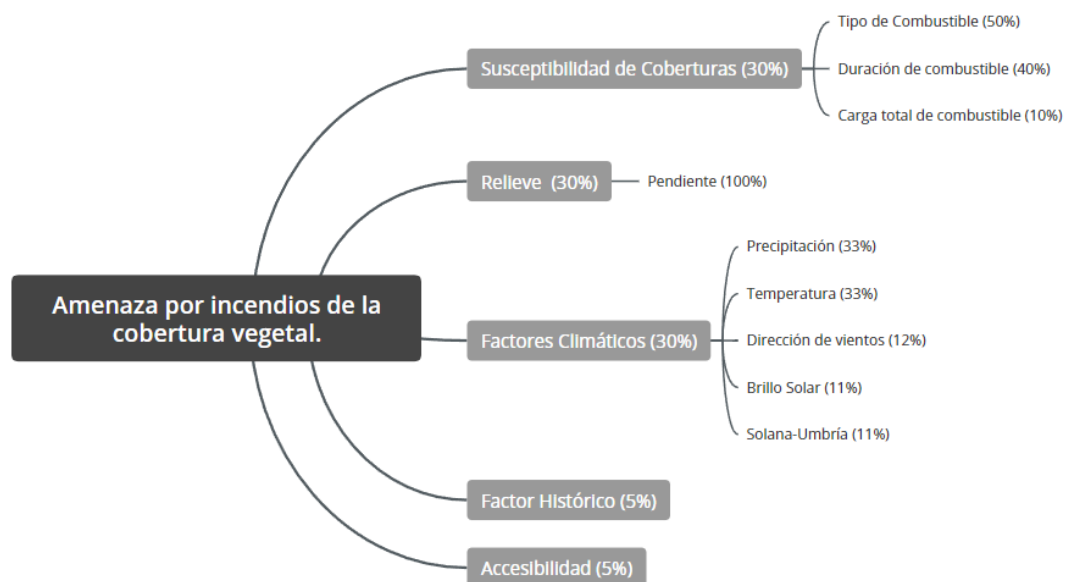
Factores de evaluación para la amenaza.

Los criterios para el análisis de susceptibilidad se establecen en base a la metodología establecida por el IDEAM “Protocolo para la realización de zonificación de riesgos a incendios de

la cobertura vegetal a escala 1:100.000 (2011)” (Figura 13), el objetivo del trabajo es zonificar las amenazas a escala una escala menor, por tanto, se procesarán las imágenes raster a escala 1:25.000.

Figura 13

Modelo conceptual de los factores considerados para la evaluación de la amenaza por incendios de la cobertura vegetal con sus respectivos pesos en porcentaje



Nota. Adaptado de Linares, 2017.

3.4.3.1 Susceptibilidad de Coberturas. Para la susceptibilidad de coberturas se tendrán en cuenta las siguientes características: Tipo de combustible, Duración de combustible, y carga total de combustible. En la Figura 13 se encuentran los pesos de cada característica.

a. Tipo de combustible.

El insumo principal son las coberturas, donde se toman en cuenta las características de la vegetación que actúa como material inflamable durante un incendio. Este factor es clave para

determinar la facilidad de ignición, la velocidad de propagación del fuego y su intensidad. Se califican según la Tabla 22.

Tabla 22

Calificación de la cobertura por tipo de combustible

TIPO DE COBERTURA	TIPO DE COMBUSTIBLE	CALIFICACIÓN	CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD
Suelos desnudos, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles		0 Sin riesgo
Bosques densos y abiertos, altos y bajos	Árboles		1 Muy Baja
Bosques fragmentados	Árboles/arbustos		2 Baja
Arbustales	Arbustos		3 Moderada
Arbustal abierto y herbazal con arbustos y/o arbolado	Arbustos/Hierbas – pastos/hierbas – árboles/hierbas/pastos/hierbas/ar bustos/árboles		3 Moderada
Herbazales y cultivos herbáceos	Hierbas/ cultivos herbáceos		4 Alta
Pastos enmalezados	Hierbas – Pastos		5 Muy alta
Pastos limpios y zonas verdes urbanas	Pastos – zonas verdes urbanas		5 Muy alta
Zonas con presencia de nubes o sombras	Sin información		6 Sin información

Nota. Adaptado de IDEAM, 2011.

b. Duración de combustible.

La duración del combustible hace referencia al tiempo durante el cual el material inflamable puede seguir ardiendo. Se debe tener en cuenta ya que tiene influencia en el desarrollo y propagación del incendio. Se califican según la Tabla 23.

Tabla 23*Calificación de la cobertura por duración de combustible*

TIPO COBERTURA	DURACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES	CALIFICACIÓN	CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles		0 Sin riesgo
Zonas verdes urbanas / pastos limpios	1 hora		1 Baja
Herbazales / cultivos herbáceos / pastos enmalezados	1 hora		1 Baja
Arbustal abierto / herbazal con arbustos y/o arbolado	10 horas		2 Moderada
Arbustales / mosaicos con espacios naturales	10 horas		2 Moderada
Bosques fragmentados	100 horas		3 Alta
Bosques densos y abiertos, altos y bajos	100 horas		3 Alta
Zonas en las que no se tiene información por presencia de nubes o sombras	Sin información		6 Sin información

Nota. Adaptado de IDEAM, 2011.

c. Carga total de combustible.

Este factor tiene en cuenta la carga del combustible vegetal, es decir su biomasa. Se califican según la Tabla 24.

Tabla 24*Calificación de la cobertura por tipo de combustible*

TIPO COBERTURA	CARGA TOTAL DE COMBUSTIBLES	CALIFICACIÓN	CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD
-----------------------	------------------------------------	---------------------	-------------------------------------

Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	0 Sin riesgo
Zonas verdes urbanas	<1 ton/ha	1 Baja
Herbazales / cultivos herbáceos / pastos enmalezados / pastos limpios	1-50 ton/Ha	2 Moderada
Arbustal abierto y herbazal con arbustos y/o arbolado	50 a 100 ton/Ha	3 Alta
Arbustos	50 a 100 ton/ha	3 Alta
Bosques fragmentados	>100 ton/ha	4 Muy alta
Bosques densos y abiertos, altos y bajos	>100 ton/Ha	4 Muy alta
Sin información (zonas en las que no se tiene información por presencia de nubes o sombras)	Sin información	6 Sin información

Nota. Adaptado de IDEAM, 2011.

Finalmente, para calcular la susceptibilidad de la vegetación se hará la suma de los raster teniendo en cuenta su respectivo peso. Así:

Susceptibilidad de la vegetación = Tipo de Combustible (0.50) + Duración del combustible (0.40) + Carga del combustible (0.10)

3.4.3.2 Relieve. Este factor es sumamente importante puesto que la velocidad de propagación del incendio se ve influenciada por la inclinación de la pendiente. Una pendiente muy inclinada producirá una velocidad de propagación mayor. Esta capa se produce mediante el modelo de elevación digital y la herramienta “slope” en ArcGIS. Se califican según la Tabla 25.

Tabla 25*Calificación de la cobertura clasificación de la pendiente*

Calificación	Clasificación Pendiente (%)	Grados de pendiente	Categoría amenaza
1	0 - 7	0 - 3,15	Muy baja
2	7 - 12	3,16 - 5,40	Baja
3	12 - 25	5,41 - 11,25	Moderada
4	25 - 75	11,26 - 33,75	Alta
5	> 75	> 33,76	Muy alta

Nota. Adaptado de IDEAM, 2011.

3.4.3.3 Factores Climáticos. El factor climático se calcula teniendo en cuenta los valores obtenidos de la base de datos abiertos del IDEAM para precipitación, temperatura, dirección de vientos y brillo solar. También se tomó en cuenta el factor solana/umbría.

a. Precipitación

Los valores asignados a cada intervalo para la reclasificación están indicados en la Tabla 26.

Tabla 26*Calificación de la precipitación*

Precipitación Media Anual (mm)	Categoría de Amenaza	Calificación
Árido (0-500)	Muy Baja	1
Pluvial (>7000)	Muy Baja	1
Muy húmedo (3000-7000)	Moderada	2
Húmedo (2000-3000)	Moderada	3
Seco (1000-2000)	Alta	4
Muy seco (500-1000)	Muy Alta	5

Nota. Adaptado de IDEAM, 2011.

b. Temperatura

La temperatura tiene efectos en la vegetación, una exposición a valores muy elevados de temperatura provoca que esta se seque lo que la hace más susceptible a entrar en ignición. Los datos para esta variable se obtuvieron desde la base de datos del IDEAM, para todas las estaciones disponibles con datos de temperatura media anual en un intervalo de 14 años (2010 – 2024). En ArcGIS se usó un “JOIN” para incluir los valores de temperatura media anual en cada estación y posteriormente con la herramienta “IDW” se generó el mapa de temperatura media anual. Se califican según la Tabla 27.

Tabla 27

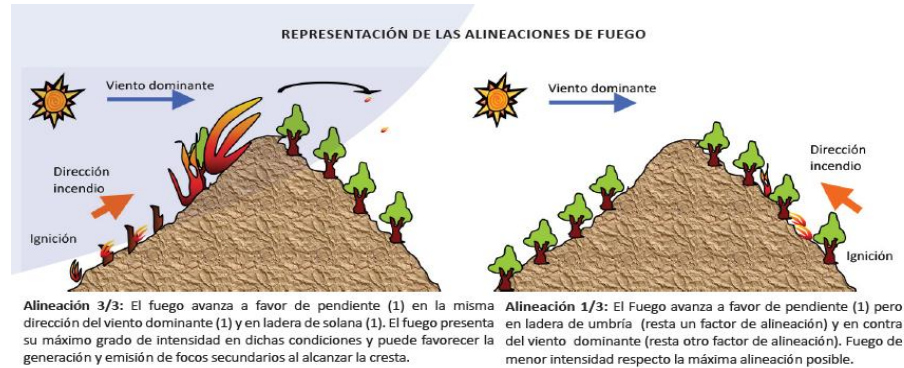
Calificación de la cobertura clasificación de la pendiente

Temperatura media anual (°C)	Calificación	Categoría de amenaza
<6°		1 Muy baja
6° - 12°		2 Baja
12° - 18°		3 Moderada
18° - 24°		4 Alta
>24°		5 Muy alta

Nota. Adaptado de IDEAM, 2011.

c. Dirección de vientos

La dirección de los vientos determina la dirección en la que se propaga un incendio. Esta, en conjunto con la orientación y la pendiente definen la alineación del fuego tal y como se observa en la Figura 14. Cuando estas se encuentran a favor una de la otra se prevé el peor comportamiento posible.

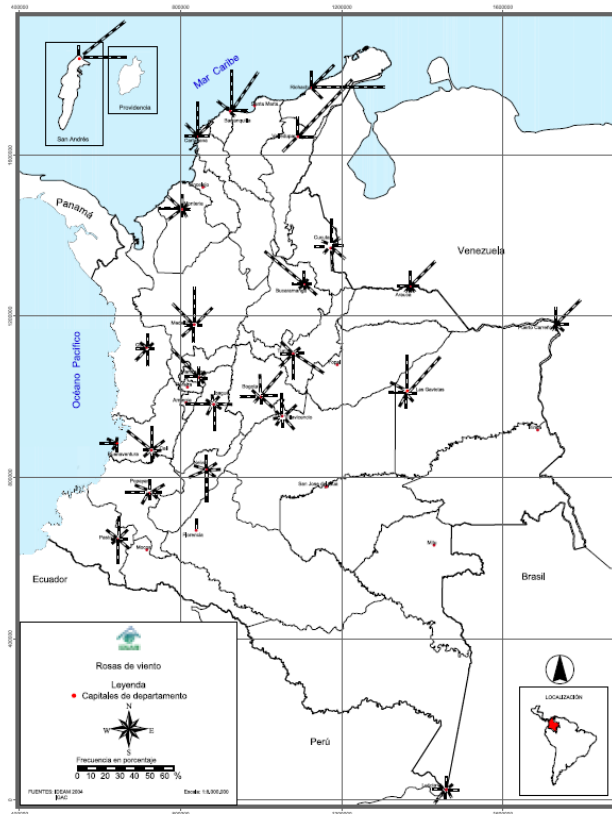
Figura 14*Representación de las alineaciones del fuego*

Nota. Tomado de Plana., et al, 2019.

Por tanto, para la evaluación de esta variable se tomará como referencia el mapa de rosas de vientos multianuales de Colombia, obtenido desde la base de datos del IDEAM. Según la Figura 15 la procedencia de vientos predominante para el departamento de Santander es NW-SE.

Figura 15

Rosa de Vientos Multianuales de Colombia



Nota. Tomado de IDEAM, 2006.

Teniendo esto en cuenta se graficarán las orientaciones de pendiente tomando como peor escenario y amenaza alta las pendientes alineadas con la dirección del viento. Para obtener la orientación de la pendiente respecto al norte se usa la herramienta “Aspect” en ArcGIS. Los intervalos son definidos mediante la Figura 16 y clasificados según la Tabla 28.

Tabla 28

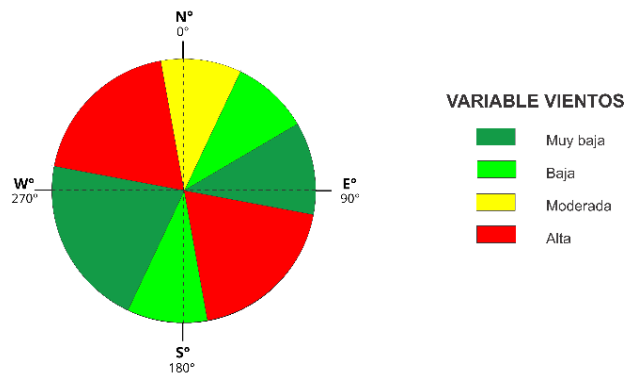
Calificación de la dirección de vientos

Dirección	Intervalo	Valor
Sin pendiente	-1	1

	60 - 100	1
Semiperpendicular a la pendiente	205 - 280	1
	25 - 60	2
	170 - 205	2
Pendiente arriba	0 - 25	3
A favor del viento	100 - 170	5
	280 - 350	5

Figura 16

Gráfico de la variable dirección de vientos



d. Brillo Solar

Este factor se tomará del mapa de distribución de brillo solar medio diario anual de Colombia, obtenido desde la base de datos del IDEAM, para el departamento de Santander, en la mayoría de su extensión del brillo solar medio anual tiene un valor de entre 5 – 6 horas. Se califican según la Tabla 29.

Tabla 29

Calificación del brillo solar medio anual

Rangos brillo solar por hora	Categoría	Clasificación
0 - 3	Muy Baja	1
3 - 5	Baja	2

5 - 6	Moderada	3
6 - 9	Alta	4
> 9	Muy Alta	5

Nota. Adaptado de Linares, 2017.

e. Solana/Umbría

La solana es el área de exposición directa al sol, es decir aquella en que la pendiente está orientada al sur. La umbría es la zona de sombra orográfica, su pendiente está orientada al norte. El hecho de recibir sol directo provoca que la vegetación y los suelos se sequen haciéndolos más susceptibles a incendios. Para este factor se utilizará el modelo de elevación digital y la herramienta “aspect” en ArcGIS esta herramienta proporciona valores de orientación de la pendiente respecto al norte por lo que es perfecta para evaluar esta característica. Se califican según la Tabla 30.

Tabla 30

Calificación Solana / Umbría

Terreno en Hemisferio Norte	Dirección de la pendiente (Grados)	Calificación
Sin pendiente	-1	1
Umbría	0-80	1
	280-360	1
Solana - Umbría	80-105	2
	255-280	2
	105-130	3
	230-255	3
	130-155	4
	205-230	4
Solana	155-205	5

Nota. Adaptado de Linares, 2017.

3.4.3.4 Factor Histórico. Los registros históricos de incendios facilitados en la sala de crisis de los últimos 10 años no tenían registro de sistema de coordenadas, por lo que se optará por hacer un recuento por municipios y realizar la reclasificación a partir del mismo. Se califican según la Tabla 31.

Tabla 31

Calificación Registro histórico de incendios.

Registro de Incendios	Calificación
0 - 5	1
5 - 10	2
10 - 20	3
20 - 49	4
> 49	5

3.4.3.5 Accesibilidad. Puesto que el ser humano es uno de los principales responsables de los incendios, las zonas más accesibles son más susceptibles a incendiarse, por tanto, se usará el “shape” de vías del departamento, ejecutando varios “buffer” en ArcGIS con el fin de calificar la amenaza respecto a la distancia perpendicular a la vía. Se califican según la Tabla 32.

Tabla 32

Calificación de la distancia a la vía

Distancia a la vía (ancho del buffer en m)	Calificación
0–500	5
500–1000	4
1000–1500	3
1500–2000	2
>2000	1

Nota. Adaptado de IDEAM, 2011.

4. Resultados

Al finalizar la aplicación de la metodología propuesta, se generaron los mapas preliminares de susceptibilidad y amenazas. Dado el tamaño del área de estudio y la escala requerida, los mapas fueron exportados en dos versiones: una versión optimizada para impresión y otra en formato digital. A continuación, se presentan las versiones digitales.

4.1 Mapas preliminares de susceptibilidad a movimientos en masa.

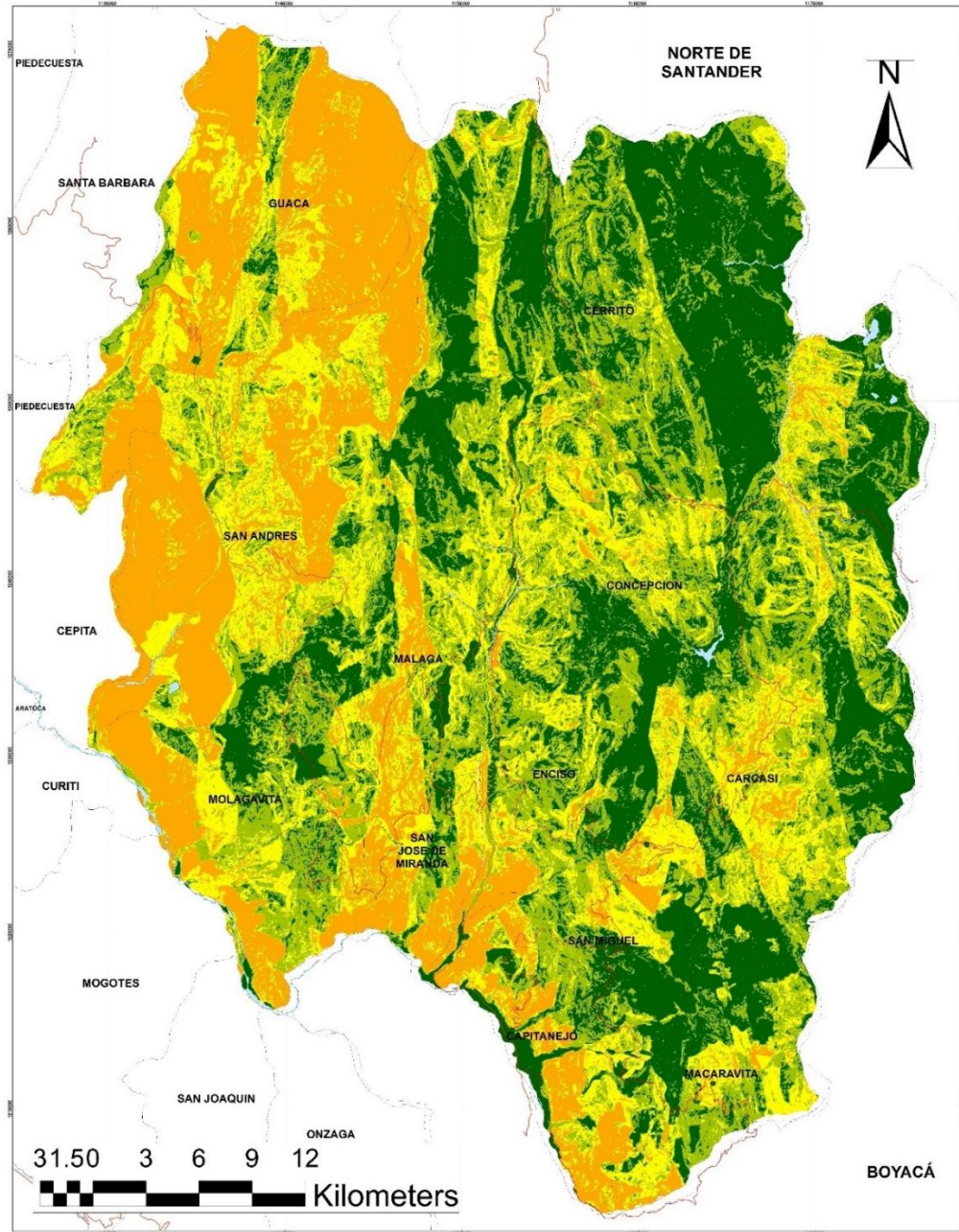
En la generación de estos mapas (Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20) se consideraron todos los factores establecidos en la metodología, tales como uso del suelo y coberturas, geología, geomorfología, registros históricos y suelos edáficos. A cada uno se le asignaron pesos relativos mediante una matriz de comparación por pares, destacando la geomorfología y los suelos edáficos como los más influyentes, ya que reflejan características esenciales del terreno—como pendientes inestables y propiedades mecánicas—que inciden directamente en la susceptibilidad a movimientos en masa.

Es notable que municipios como Guaca y San Andrés (Figura 17), Bucaramanga, Piedecuesta y Santa Bárbara (Figura 19), y Onzaga (Figura 18) presentan amplias áreas clasificadas con susceptibilidad media a alta para movimientos en masa, lo que concuerda con la alta incidencia de estos fenómenos reportada por la sala de crisis de la Oficina de Gestión del Riesgo de Desastres. Asimismo, en la provincia Metropolitana se evidencia un cambio significativo en la susceptibilidad, marcado por la falla de Bucaramanga, lo que resalta la

influencia de las características estructurales. A pesar de los esfuerzos por obtener insumos a escala 1:25.000, estos no estuvieron disponibles en los canales de datos abiertos, y el trabajo de campo no fue autorizado, ya que el tiempo disponible resultaba insuficiente para cartografiar la extensión requerida. Por ello, se optó por trabajar con el material que se tenía a disposición.

Figura 17

Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia García Rovira



SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA - PROVINCIA GARCÍA ROVIRA, SANTANDER

Legenda

- 1 - Muy Baja
- 4 - Alta
- 5 - Muy Alta
- 2 - Baja
- 3 - Moderada
- Vías
- Cuerpos de agua

Información de referencia.

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1.000.000.0000
 False Northing: 1.000.000.0000
 Central Meridian: -74 0775
 Scale Factor: 1.0000
 Latitude Of Origin: 4 5962
 Units: Meter

1 : 25.000



Figura 18

Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia Guanentá

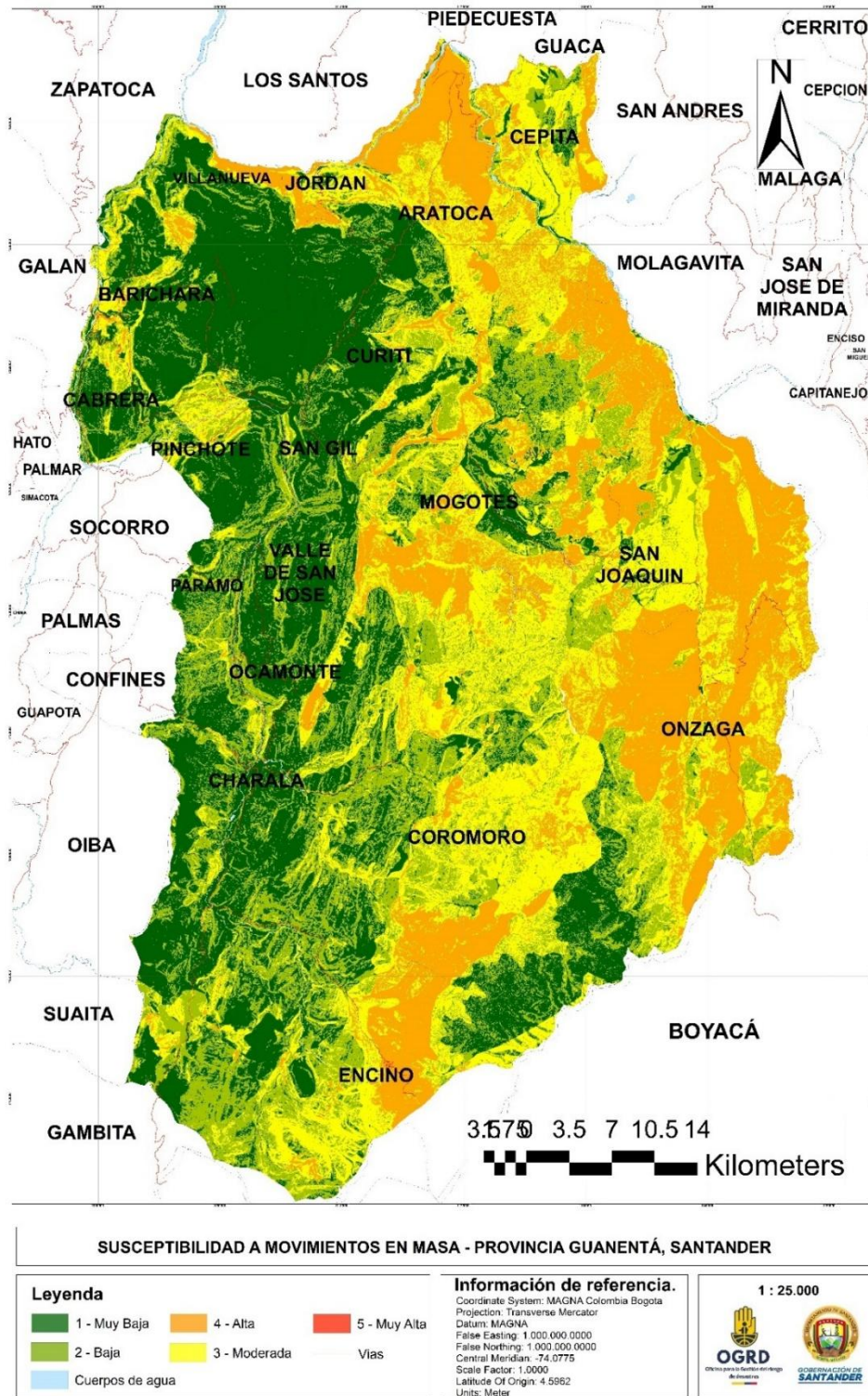


Figura 19

Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia Metropolitana

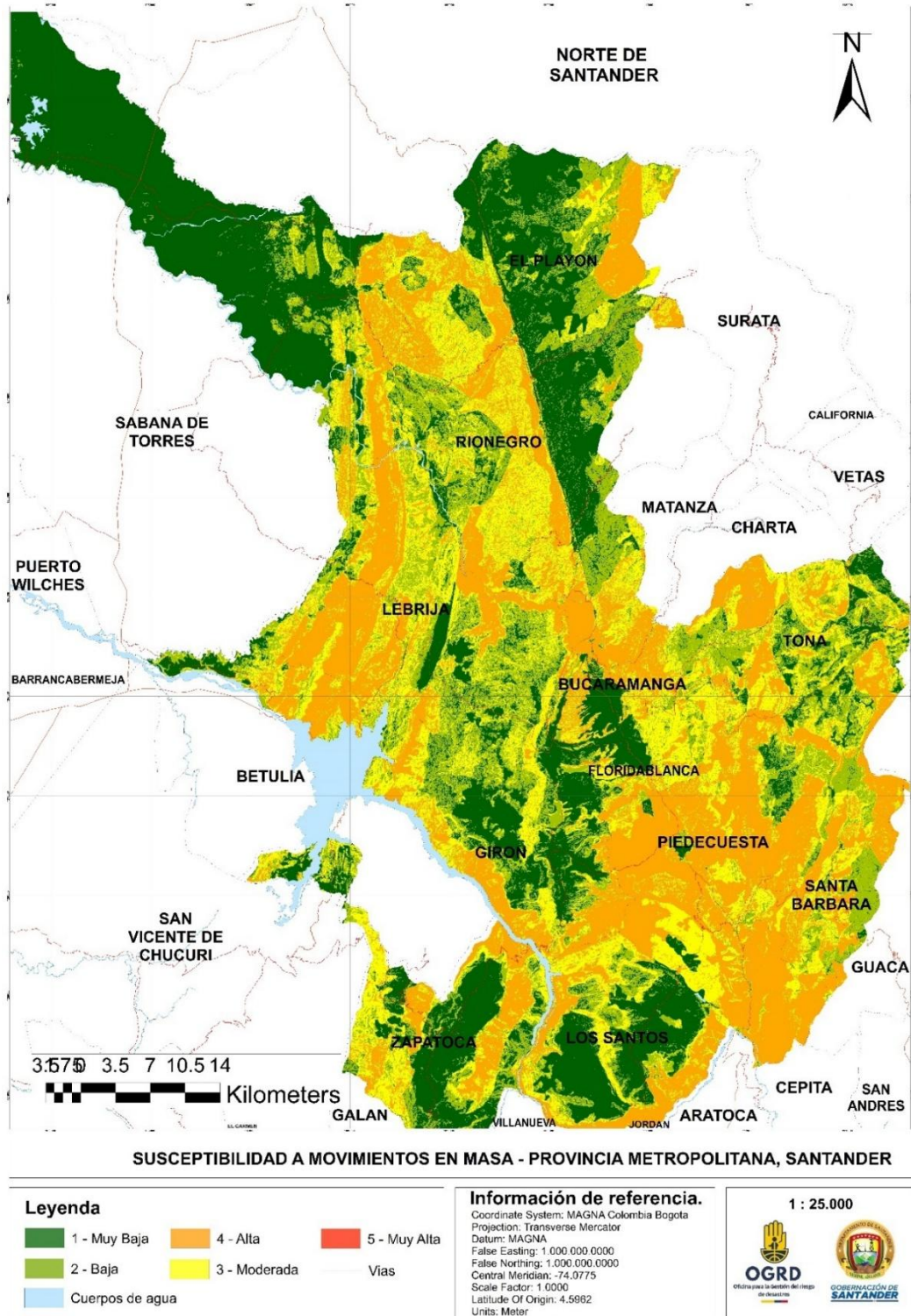
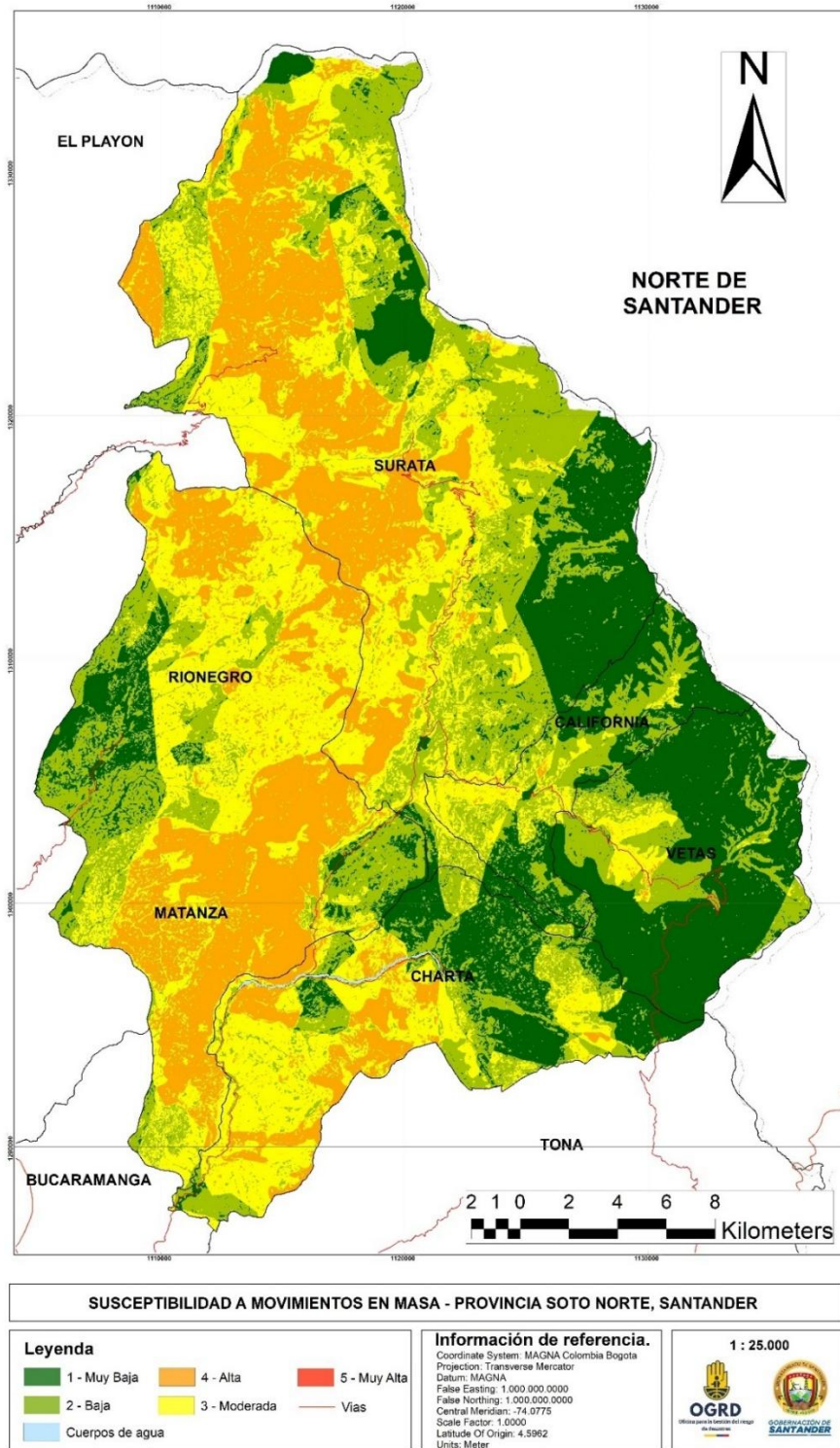


Figura 20

Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa – Provincia Soto norte



Al usar el factor geológico, hay que tener en cuenta que las unidades geológicas se separan por sus características litológicas lo cual no aporta información concreta del comportamiento geomecánico de las rocas, pasando por alto el hecho de que rocas con diferentes características litológicas puedan tener comportamientos geomecánicos similares (Linares, 2017). Esta problemática sería solucionada sustituyendo el factor geológico con una evaluación de las Unidades Geológicas Superficiales, ya que estas si toman en cuenta el comportamiento geomecánico de las rocas.

4.2 Mapas preliminares de amenaza por movimientos en masa.

Al generar estos mapas además de tener en cuenta la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, se tomó como factor detonante el factor climático correspondiente a las precipitaciones máximas en un periodo de 24 horas con periodos de retorno de 14 años. Para realizar esta zonificación se clasificaron los valores de precipitación en 5 clases mediante el método “Natural breaks” de Jenks; generando así una distribución de datos equitativa. Finalmente se realiza una “Weighted sum” en ArcGIS dándole un peso del 50% tanto a la susceptibilidad como al factor detonante.

Los mapas resultantes se encuentran incluidos en los anexos del proyecto. En la Página 87 el Apéndice B presenta el mapa preliminar de amenaza por movimientos en masa para la provincia de García Rovira, en la Página 88 el Apéndice C el correspondiente a la provincia Guantánamo, en la Página 89 en el Apéndice D para la provincia de Metropolitana, y en la Página en el Apéndice E para la provincia Soto Norte.

La característica más notable es la influencia del factor detonante sobre la zonificación de la amenaza, esto se pone en evidencia en zonas de amenaza alta donde antes se presentaba un bajo

nivel de susceptibilidad, así como en zonas de amenaza baja-media donde antes se presentaba una susceptibilidad alta.

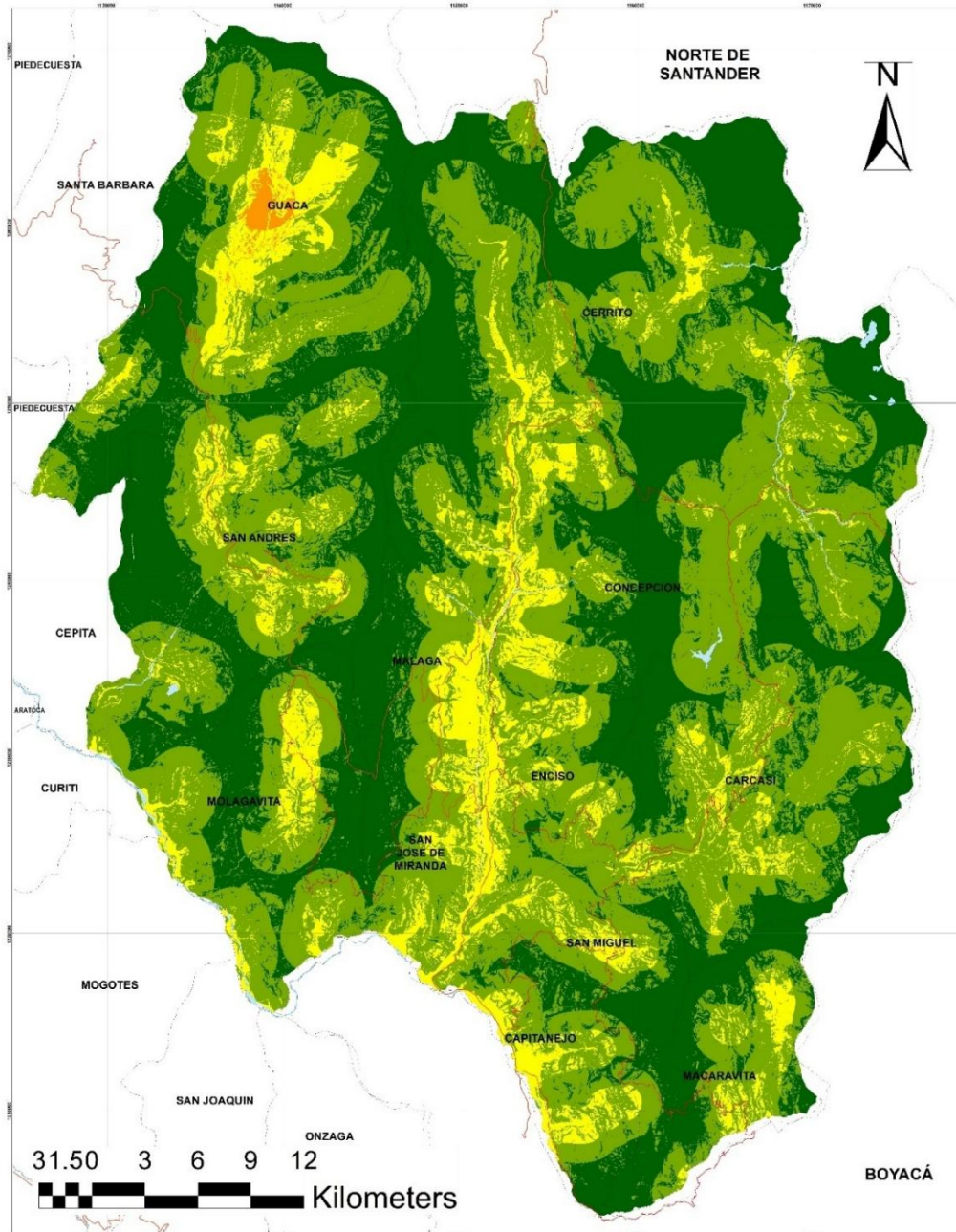
4.3 Mapas preliminares de amenaza por inundaciones.

Al generar estos mapas (Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27) se tuvieron en cuenta todos los factores mencionados en la metodología. Incluyendo uso del suelo/coberturas, elevación, pendiente, registros históricos, precipitación y proximidad a corrientes de agua. Para cada factor, se asignaron pesos relativos mediante una matriz de comparación por pares, tomando como los más influyentes la precipitación y la distancia a corrientes con un peso del 30% cada uno. Estas variables capturan tanto la causa primaria del fenómeno (precipitación) como su manifestación espacial (proximidad a corrientes).

A continuación, se presentan los mapas preliminares para amenaza por inundaciones.

Figura 21

Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia García Rovira



AMENAZA POR INUNDACIONES - PROVINCIA GARCÍA ROVIRA, SANTANDER

<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 - Muy Baja 2 - Baja 3 - Moderada 4 - Alta 5 - Muy Alta Vias Cuerpos de agua 	<p>Información de referencia.</p> <p>Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota Projection: Transverse Mercator Datum: MAGNA False Easting: 1.000.000.0000 False Northing: 1.000.000.0000 Central Meridian: -74.0775 Scale Factor: 1.0000 Latitude Of Origin: 4.5962 Units: Meter</p>	<p>1 : 25.000</p>
--	--	-------------------

Figura 22

Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Guanentá.

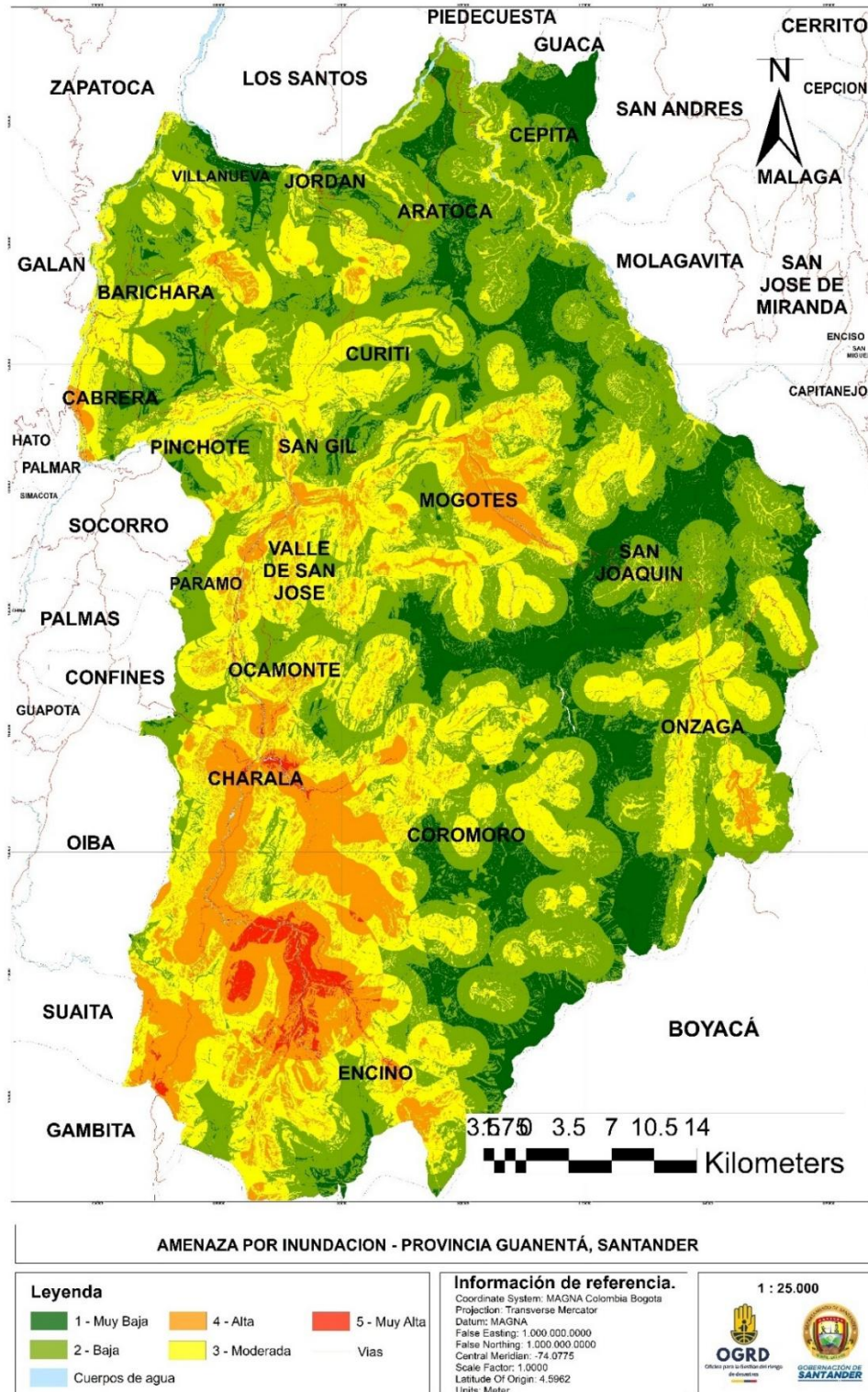
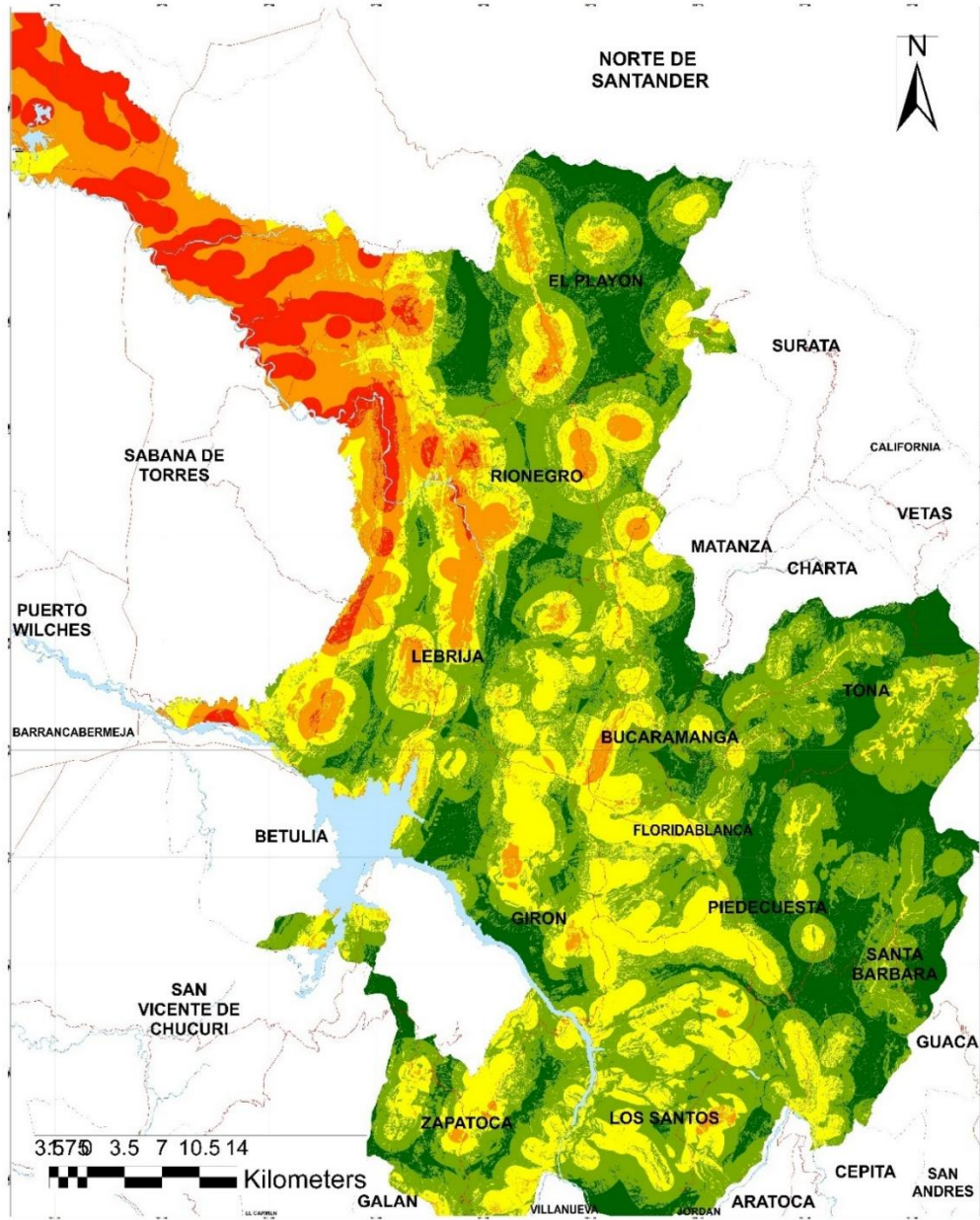


Figura 23

Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Metropolitana.



AMENAZA POR INUNDACIONES - PROVINCIA METROPOLITANA, SANTANDER

Leyenda

- 1 - Muy Baja
- 4 - Alta
- 5 - Muy Alta
- 2 - Baja
- 3 - Moderada
- Vias
- Cuerpos de agua

Información de referencia.

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
 Projection: Transverse Marcator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1.000.000.0000
 False Northing: 1.000.000.0000
 Central Meridian: -74.0775
 Scale Factor: 1.0000
 Latitude Of Origin: 4.5882
 Units: Meter

1 : 25.000



Figura 24

Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Soto norte

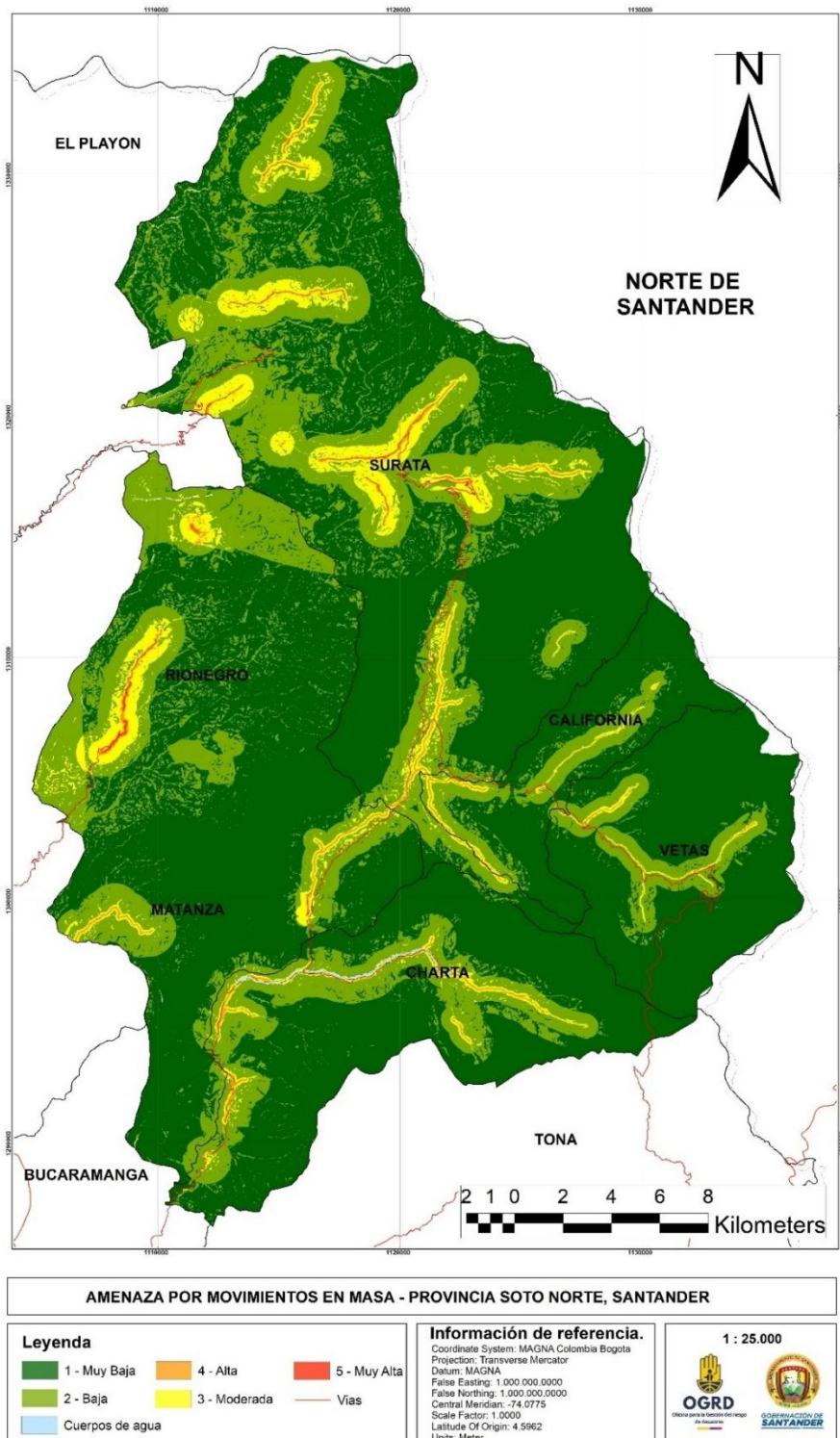


Figura 25

Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Yariguies

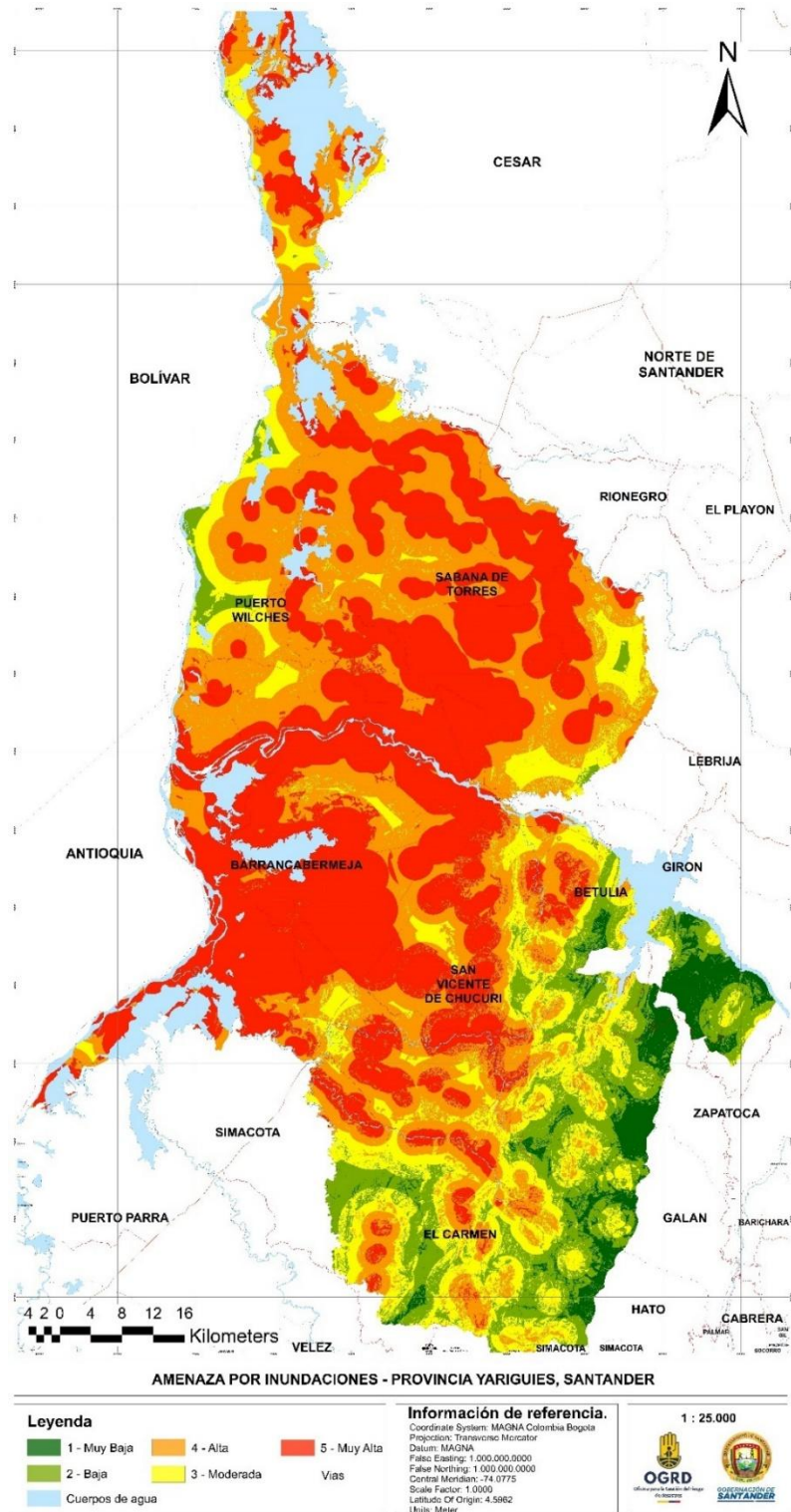
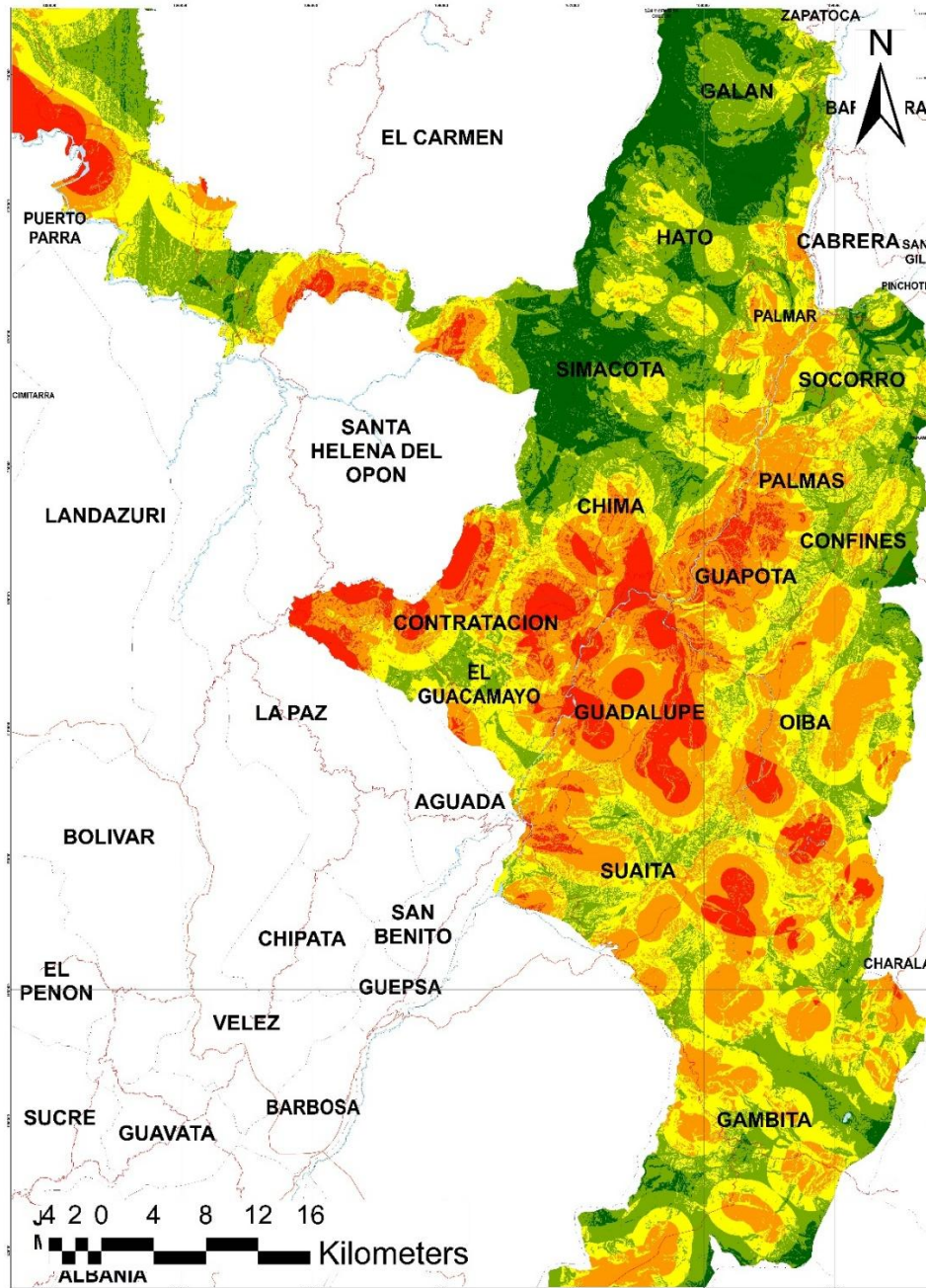


Figura 26

Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Comunera

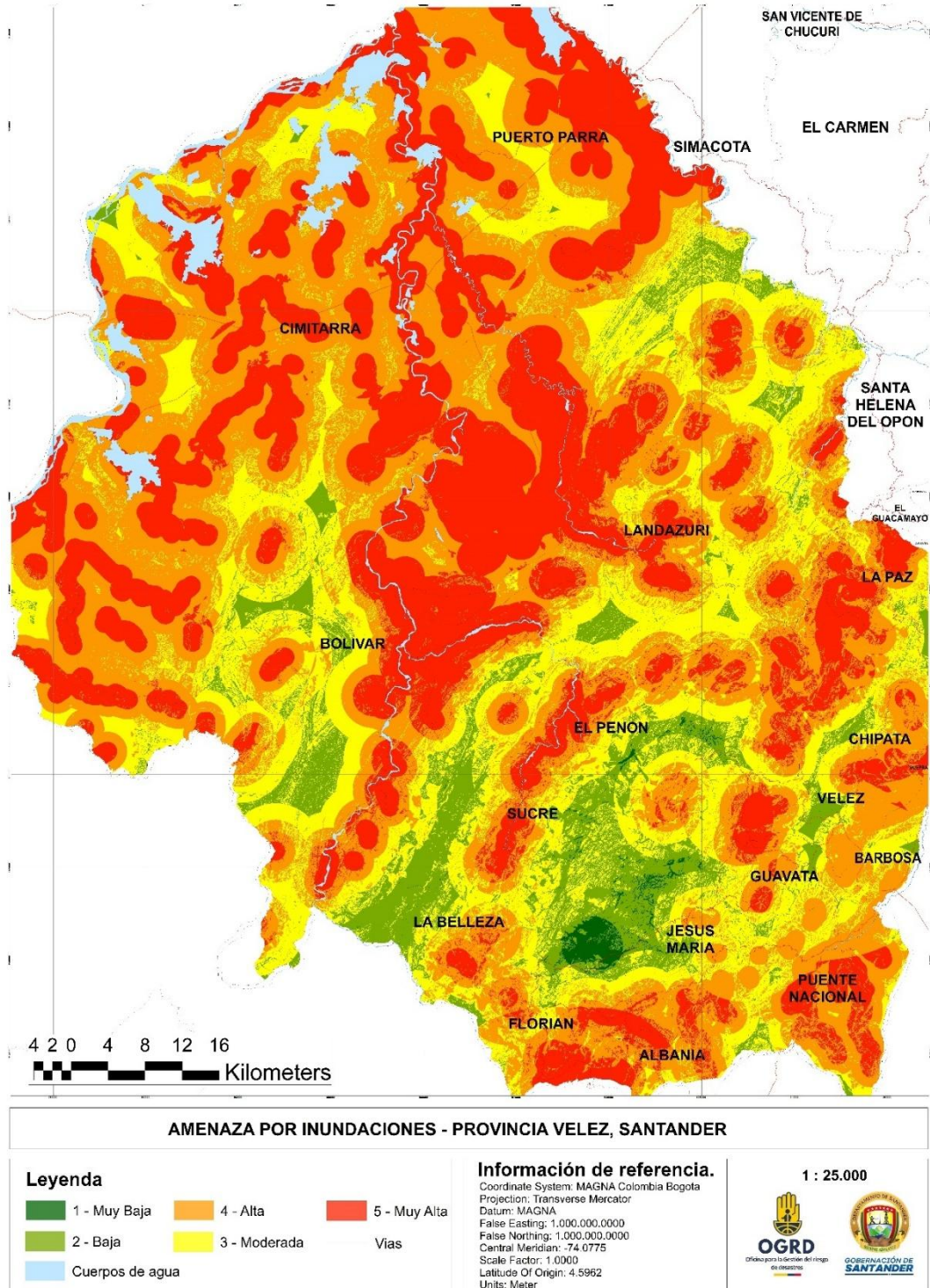


AMENAZA POR INUNDACIONES - PROVINCIA COMUNERA, SANTANDER

Legenda			Información de referencia.		1 : 25.000 OGRD Oficina para la Gestión del Riesgo en Santander GOBIERNO DE SANTANDER
<ul style="list-style-type: none"> 1 - Muy Baja 2 - Baja Cuerpos de agua 	<ul style="list-style-type: none"> 3 - Moderada 4 - Alta 	<ul style="list-style-type: none"> 5 - Muy Alta Vias 	Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota Projection: Transverse Mercator Datum: MAGNA False Easting: 1.000.000.0000 False Northing: 1.000.000.0000 Central Meridian: -74.0775 Scale Factor: 1.0000 Latitude Of Origin: 4.5962 Units: Meter		

Figura 27

Mapa de amenaza por inundaciones – Provincia Vélez.



Estos mapas evidencian una alta amenaza en zonas bajas y de baja pendiente cercanas a corrientes principales y áreas con alta impermeabilidad del suelo, como en las provincias de Yariguies (Figura 25) y Vélez (Figura 27). Al revisar la zonificación de inundaciones en Jamaica elaborada por Nandi, et. Al, 2016, el autor afirma que “Las zonas de baja elevación y con ángulos de pendiente menores a 15° fueron identificadas como las áreas más susceptibles a inundaciones. El segundo factor más importante fue la distancia del arroyo; el 83% de los eventos de inundación ocurrieron dentro de un estrecho tramo de 500 metros en las llanuras aluviales”

El método de clasificación "Natural Breaks" de Jenks permitió capturar patrones significativos en los datos de altitud y precipitación. Por otra parte, las zonas con amenaza baja a moderada se localizan principalmente en áreas montañosas, donde las condiciones geomorfológicas y de cobertura vegetal favorecen la infiltración y reducen el impacto del fenómeno.

Los resultados obtenidos tendrían una mejora significativa mediante la aplicación de metodologías híbridas como la combinación de regresión logística y análisis de componentes principales (PCA), tal como lo plantea Nandi et al. (2016). Esto permitiría reducir la multicolinealidad entre las variables, priorizar aquellas que explican la mayor variación en los datos, y calcular probabilidades precisas de ocurrencia de inundaciones.

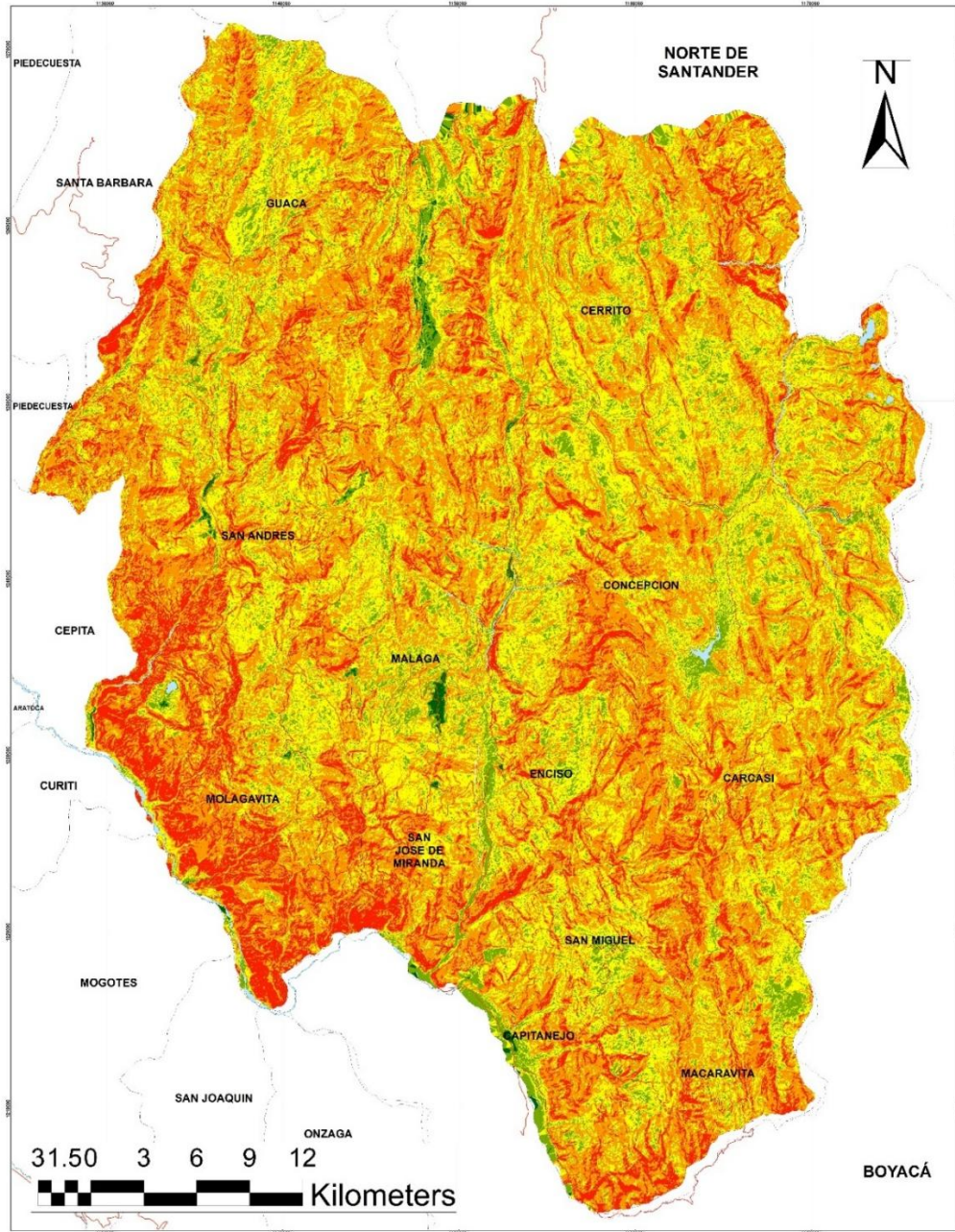
4.5 Mapas preliminares de amenaza por incendios de la cobertura vegetal.

Al generar estos mapas (Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34) se consideraron todos los factores definidos en la metodología, incluyendo combustible, pendientes, accesibilidad, registros históricos y variables climáticas. Se priorizaron la susceptibilidad de coberturas, el factor climático y la topografía, conforme al triángulo de

comportamiento del fuego, que refleja la interacción entre combustible, ambiente y relieve en la ignición y propagación de incendios. A continuación, se presentan los mapas preliminares de amenaza por incendios de la cobertura vegetal.

Figura 28

Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia García Rovira.

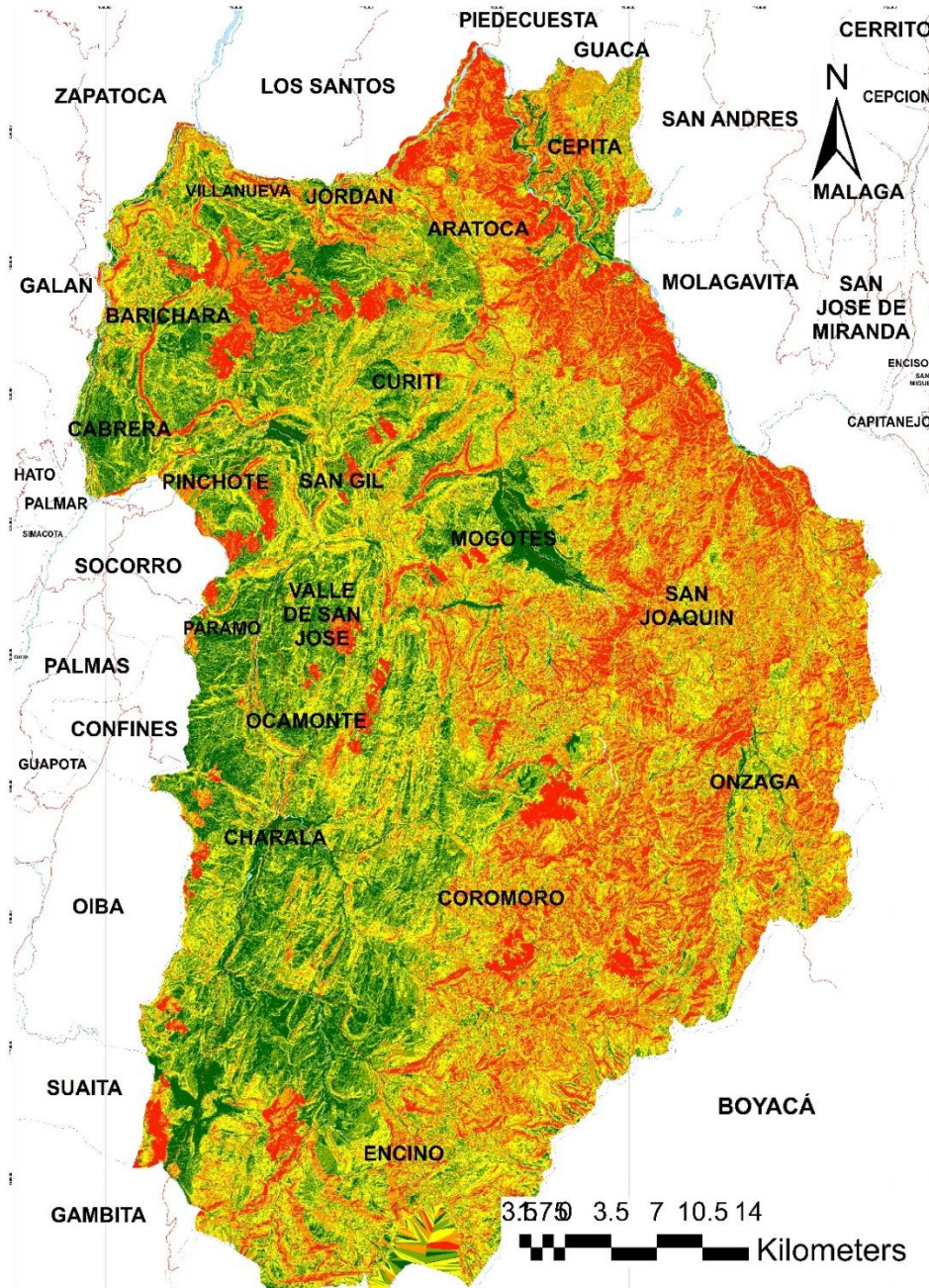


AMENAZA POR INCENDIOS DE LA COBERTURA VEGETAL - PROVINCIA GARCÍA ROVIRA, SANTANDER

<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 - Muy Baja 4 - Alta 5 - Muy Alta 2 - Baja 3 - Moderada Vías Cuerpos de agua 	<p>Información de referencia.</p> <p>Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota Projection: Transverse Mercator Datum: MAGNA False Easting: 1.000.000.0000 False Northing: 1.000.000.0000 Central Meridian: -74.0775 Scale Factor: 1.0000 Latitude Of Origin: 4.5962 Units: Meter</p>	<p>1 : 25.000</p>
--	--	--------------------------

Figura 29

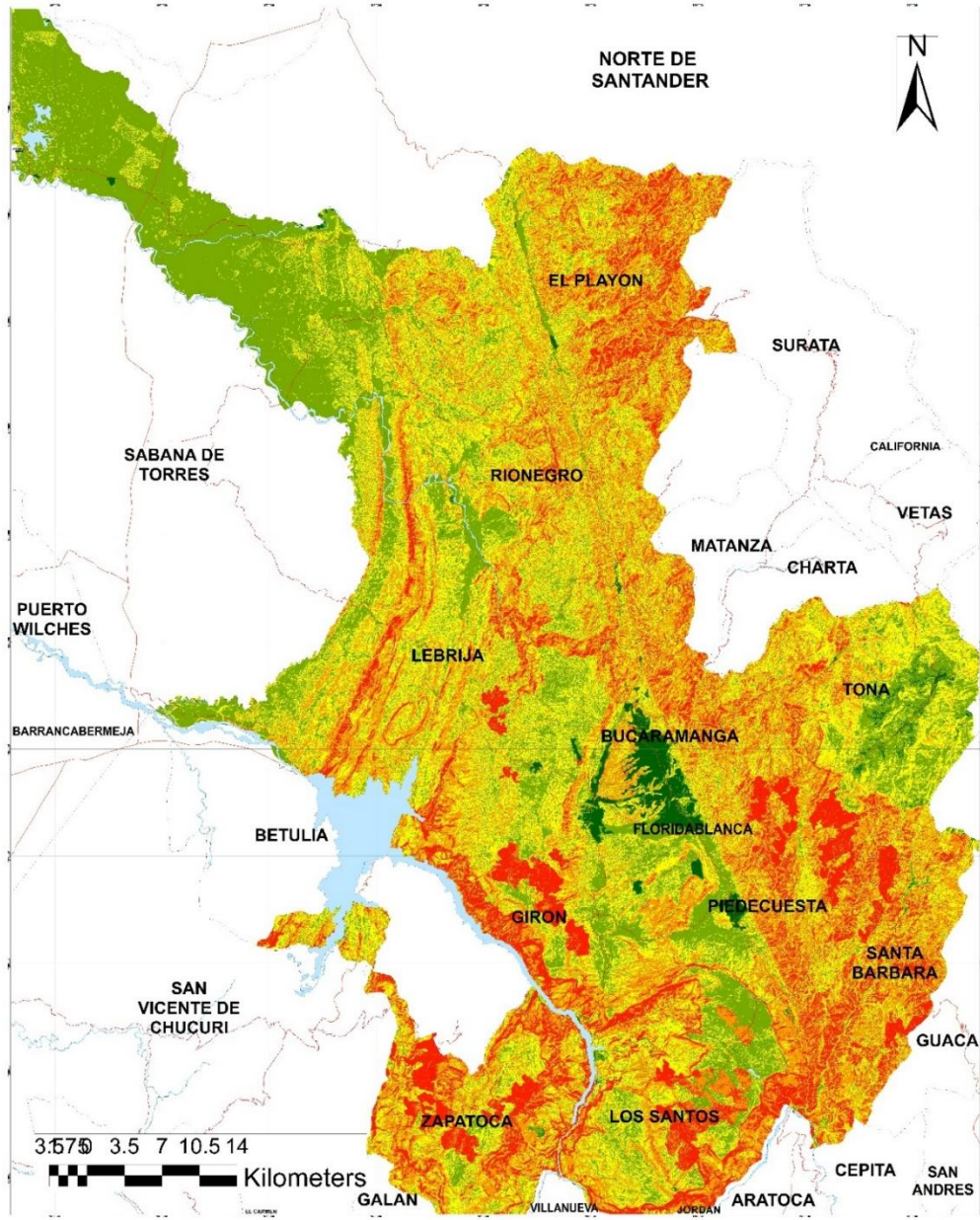
Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Guanentá



AMENAZA POR INCENDIOS DE LA COBERTURA VEGETAL - PROVINCIA GUANENTÁ, SANTANDER		
Leyenda		
■ 1 - Muy Baja	■ 4 - Alta	■ 5 - Muy Alta
■ 2 - Baja	■ 3 - Moderada	— Vías
■ Cuerpos de agua		
Información de referencia.		
Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota		
Projection: Transverse Mercator		
Datum: MAGNA		
False Easting: 1.000.000.0000		
False Northing: 1.000.000.0000		
Central Meridian: -74.0775		
Scale Factor: 1.0000		
Latitude Of Origin: 4.5962		
Units: Meter		
		1 : 25.000

Figura 30

Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Metropolitana.



AMENAZA POR INCENDIOS DE LA COBERTURA VEGETAL - PROVINCIA METROPOLITANA, SANTANDER

Leyenda			Información de referencia. Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota Projection: Transverse Mercator Datum: MAGNA False Easting: 1.000.000.0000 False Northing: 1.000.000.0000 Central Meridian: -74.0775 Scale Factor: 1.0000 Latitude Of Origin: 4.5882 Units: Meter	1 : 25.000
<ul style="list-style-type: none"> 1 - Muy Baja 2 - Baja Cuerpos de agua 	<ul style="list-style-type: none"> 4 - Alta 3 - Moderada 	<ul style="list-style-type: none"> 5 - Muy Alta Vias 		

Figura 31

Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Soto Norte

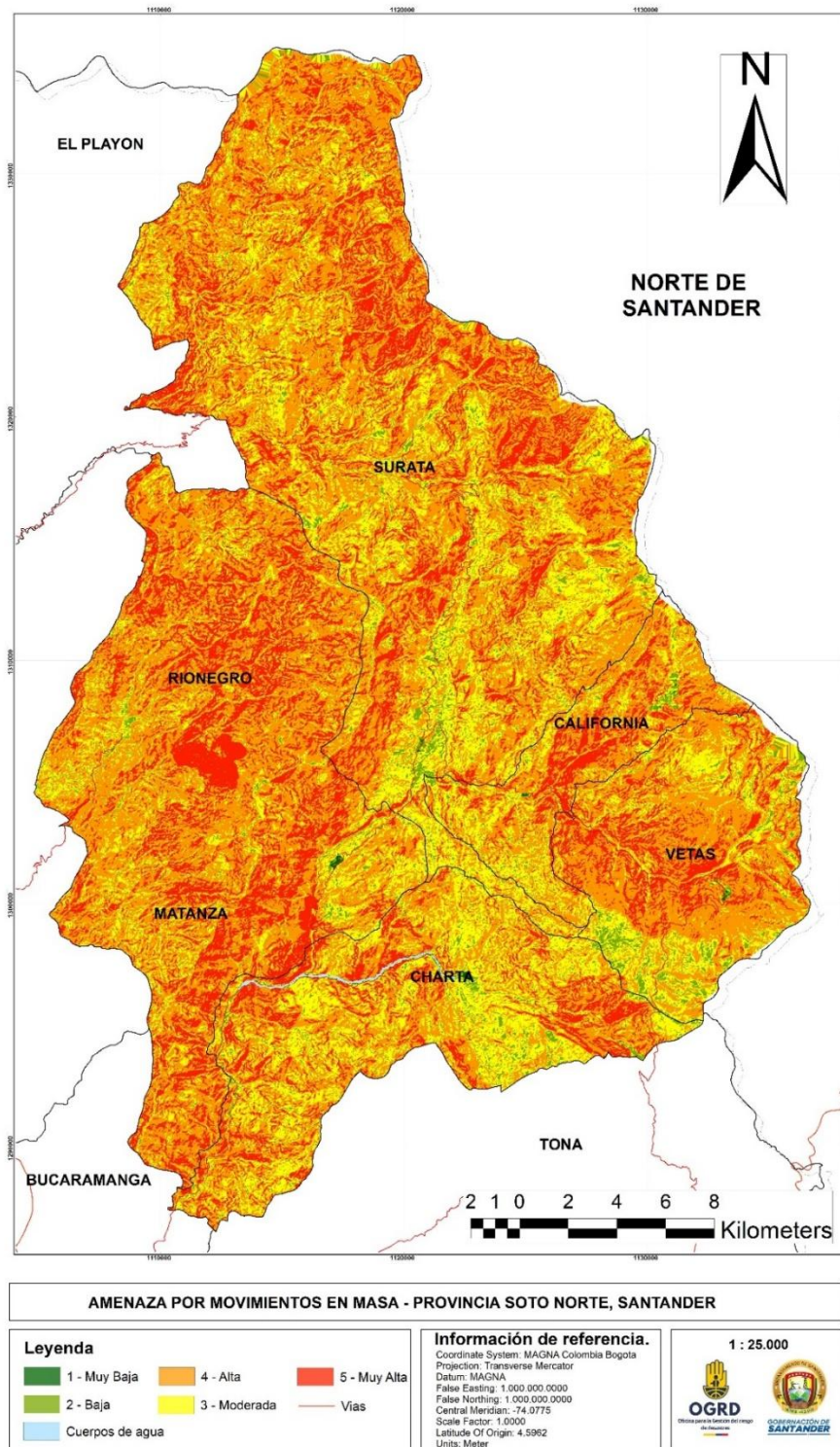


Figura 32

Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Yariguies.

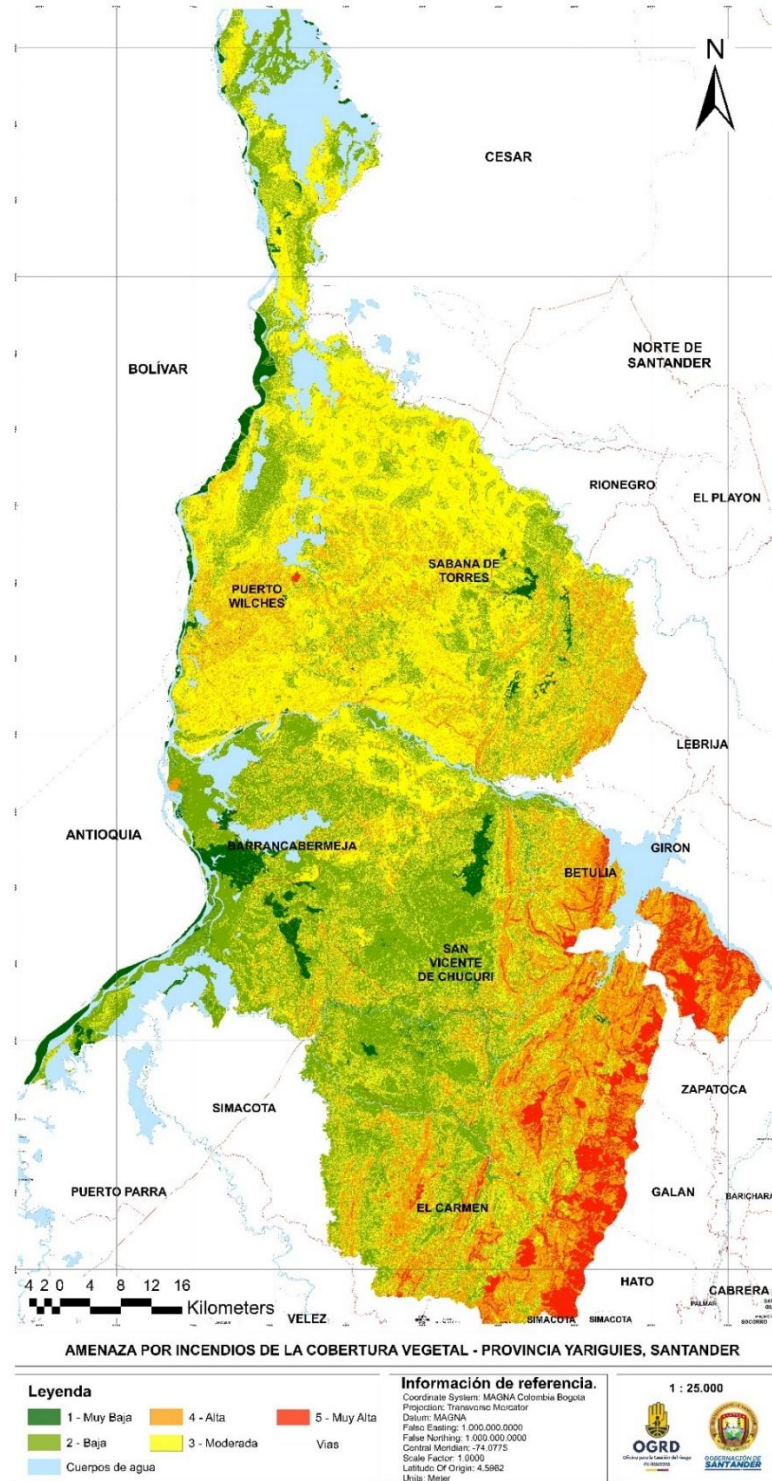
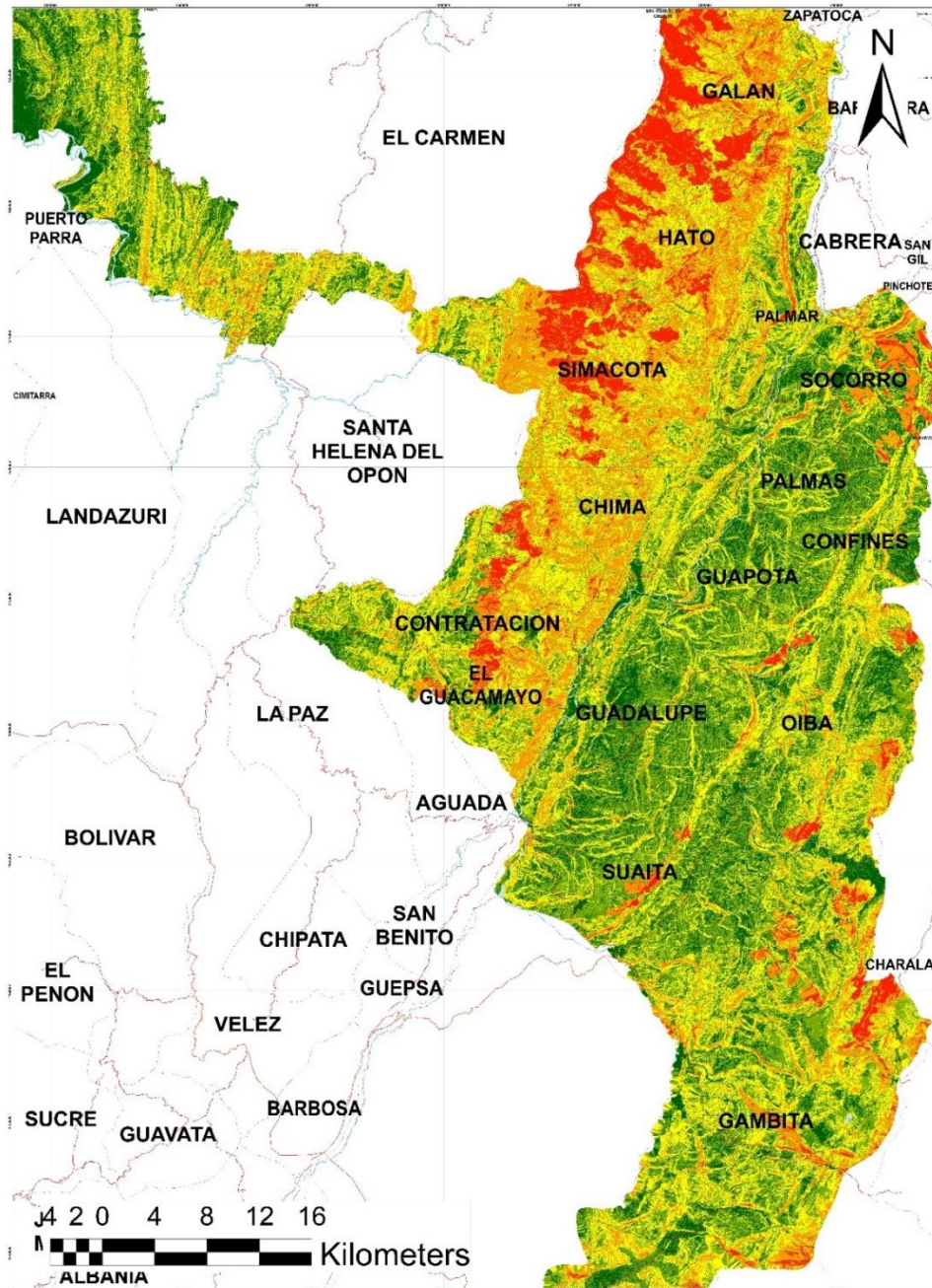


Figura 33

Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Comunera

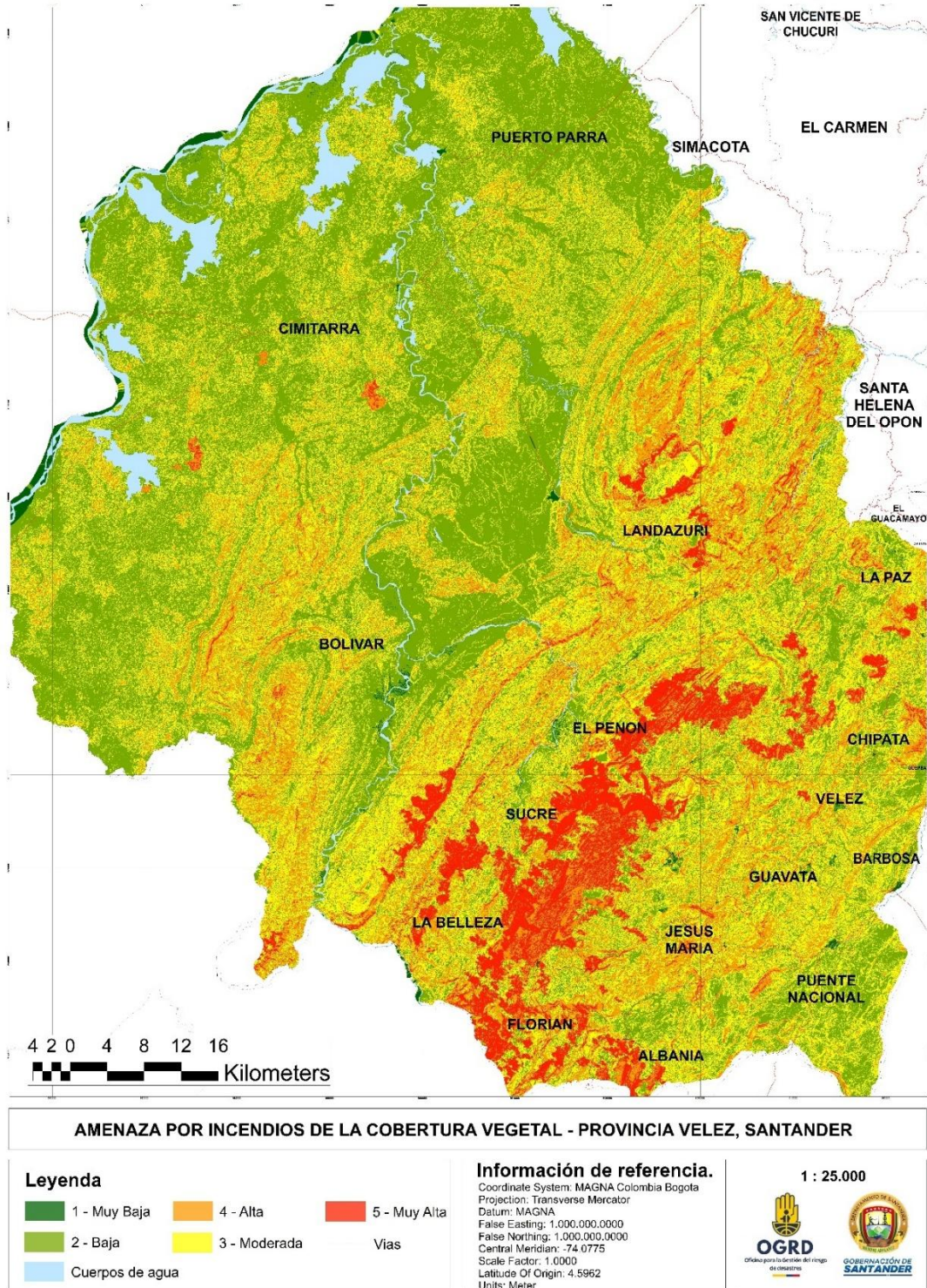


AMENAZA POR INCENDIOS DE LA COBERTURA VEGETAL - PROVINCIA COMUNERA, SANTANDER

<p>Leyenda</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 33%;">1 - Muy Baja</td> <td style="width: 33%;">4 - Alta</td> <td style="width: 33%;">5 - Muy Alta</td> </tr> <tr> <td>2 - Baja</td> <td>3 - Moderada</td> <td>Vías</td> </tr> <tr> <td>Cuerpos de agua</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	1 - Muy Baja	4 - Alta	5 - Muy Alta	2 - Baja	3 - Moderada	Vías	Cuerpos de agua			<p>Información de referencia.</p> <p>Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota Projection: Transverse Mercator Datum: MAGNA False Easting: 1.000.000.0000 False Northing: 1.000.000.0000 Central Meridian: -74.0775 Scale Factor: 1.0000 Latitude Of Origin: 4.5962 Units: Meter</p>	<p>1 : 25.000</p>
1 - Muy Baja	4 - Alta	5 - Muy Alta									
2 - Baja	3 - Moderada	Vías									
Cuerpos de agua											

Figura 34

Mapa de amenaza por incendios de la cobertura vegetal – Provincia Vélez



El departamento de Santander exhibe valores similares de susceptibilidad respecto a coberturas naturales sobre gran parte de su extensión, exceptuando municipios como La Belleza y Sucre, donde las características de la vegetación obtuvieron valores de susceptibilidad muy alta. Teniendo esto en cuenta, de los 3 factores principales; El relieve, y el factor climático fueron determinantes al momento de evaluar la amenaza. Por esta razón la tendencia más notable en estos mapas es que en las zonas de poco relieve tienden a tener una susceptibilidad baja. Adicionalmente, las áreas cercanas a vías de acceso presentan mayor susceptibilidad debido a su asociación con actividades humanas que incrementan el riesgo de ignición.

Al comparar estos mapas con los elaborados a escala 1:100.000 por la DGRD (Dirección de Gestión de Riesgo de Desastres, 2019), se evidencian diferencias significativas. Una de las principales es que los mapas de la DGRD clasificaron las amenazas en solo tres categorías: baja, media y alta, mientras que las guías metodológicas de entidades científicas colombianas recomiendan una clasificación en cinco niveles.

En el caso del “Mapa de susceptibilidad a fenómenos de movimientos en masa en el departamento de Santander. Cartografía Amenaza Departamental para los Principales Escenarios de Riesgo (2019)”, parece que el factor principal considerado fue la pendiente. Sin embargo, no se describe claramente la metodología empleada, lo que genera incertidumbre sobre los criterios utilizados. Es destacable que las áreas cercanas a la falla de Bucaramanga se calificaron como de amenaza alta.

En el “Mapa de susceptibilidad a fenómenos de inundaciones en el departamento de Santander. Cartografía Amenaza Departamental para los Principales Escenarios de Riesgo

(2019)”, la DGRD combinó diversas capas de información: mancha de inundación de 2001, datos del Fenómeno de La Niña 2010-2011, humedales definidos por el Instituto Humboldt en 2017 y la susceptibilidad a inundación del PDGRD 2018. Esto resultó en áreas de amenaza alta concentradas alrededor del río Magdalena, en el límite occidental del departamento.

Por su parte, el “Mapa de susceptibilidad a fenómenos de incendios forestales en el departamento de Santander. Cartografía Amenaza Departamental para los Principales Escenarios de Riesgo (2019)” se centró exclusivamente en la susceptibilidad de las coberturas vegetales, calificando cerca del 75% del departamento con amenaza alta. En contraste, el presente trabajo incorpora también factores climáticos y topográficos, logrando una evaluación más integral de la amenaza por incendios forestales.

5. Conclusiones

Resulta crucial evaluar las amenazas naturales a una escala más detallada, como la 1:25.000, permitiendo identificar con mayor precisión las áreas críticas y optimizar las estrategias de mitigación. Este nivel de detalle no solo mejora la planificación territorial, sino que también promueve una toma de decisiones más efectiva, reduciendo el impacto de desastres naturales sobre la población y la infraestructura del departamento. Desafortunadamente este resultado no se pudo alcanzar debido a que no existen insumos cartográficos que permitan producir una cartografía de este detalle.

La presente practica empresarial ha logrado contribuir de manera significativa a la base de datos del Sistema de Información Geográfico (SIG) de la Oficina para la Gestión de Riesgo de Desastres en el departamento de Santander, dando cumplimiento al objetivo de la práctica mediante la zonificación de las amenazas por movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales en mapas. Utilizando herramientas SIG, y metodologías como el análisis jerárquico acorde a las condiciones del departamento y la información disponible, esta información es de libre consulta por lo que promueve el conocimiento del riesgo a todo aquel interesado.

La implementación de un registro histórico de los eventos ocurridos, con un sistema de coordenadas bien estructurado, representa un avance significativo en la gestión del riesgo de desastres en el departamento de Santander. Este registro, al incorporar una georreferenciación precisa de los eventos, facilitaría la adopción de metodologías híbridas en futuros estudios, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos. Al integrar estas metodologías en el análisis, se lograría una mayor precisión y exactitud en la zonificación de amenazas, proporcionando una base

más sólida para la toma de decisiones en la gestión del riesgo. La mejora en la calidad de los datos históricos permitirá una evaluación más detallada de las áreas susceptibles, optimizando las estrategias de mitigación y respuesta ante posibles desastres.

Es fundamental considerar de manera detallada los diversos factores que influyen en la amenaza de incendios forestales, ya que estos determinan de manera precisa las zonas de mayor riesgo. Al revisar el mapa de susceptibilidad presentado por la Dirección General de Riesgo de Desastres (DGRD), se observa que gran parte del departamento de Santander se clasifica bajo la categoría de amenaza alta. Sin embargo, este enfoque generalizado no refleja adecuadamente las zonas con mayor potencial de ser incendiadas, ya que no toma en cuenta factores clave como las condiciones meteorológicas y el relieve, que influyen directamente en la propagación de los incendios. Por lo tanto, es necesario ajustar los métodos de zonificación para incorporar estos factores y generar mapas de mayor precisión, los cuales permitirán identificar con mayor claridad las áreas con mayor riesgo de incendios, mejorando así la efectividad de las estrategias preventivas y de respuesta ante emergencias.

En esta fase inicial de actualización de mapas de amenazas para cada una de las provincias del departamento de Santander por parte del equipo de la OGRD, en la dependencia donde se ejecutó la práctica empresarial se identificaron potenciales zonas de alto riesgo, las cuales se tendrán en cuenta para proyectos futuros en implementación de sistemas de alertas tempranas para cada una de las amenazas.

6. Recomendaciones

Para mejorar la precisión y utilidad de la información geoespacial presentada, se recomienda realizar cartografía a escalas más detalladas, especialmente en lo referente al uso del suelo, coberturas vegetales, suelos edáficos (considerando contenido de humedad y tipo de arcillas), y unidades geológicas superficiales (UGS), lo que permitiría caracterizar mejor las propiedades mecánicas del terreno. Además, es fundamental incluir un mapa geomorfológico actualizado que complemente la interpretación de los factores de susceptibilidad. La metodología adoptada podría enriquecerse mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución y un inventario más detallado de movimientos en masa, indicando las zonas de transporte y depósito. Para lograrlo, sería esencial contar con un equipo multidisciplinario y realizar una toma sistemática de coordenadas para eventos recientes, con el objetivo de construir un factor histórico más preciso. También se sugiere realizar salidas de campo dirigidas a verificar las áreas clasificadas con alta o muy alta susceptibilidad o amenaza, con el fin de validar los resultados y ajustar las variables en función de las condiciones reales del terreno. Por último, una discusión detallada con profesionales especialistas en cada área podría contribuir significativamente a optimizar las metodologías para cada tipo de amenaza.

Se recomienda integrar metodologías híbridas, como la combinación de regresión logística y análisis de componentes principales (PCA). Estas técnicas permiten reducir la multicolinealidad entre variables, identificar los factores más influyentes y calcular probabilidades precisas, lo que mejora la representatividad y la precisión de los mapas generados. Por ejemplo, la regresión logística es particularmente útil para analizar variables categóricas y continuas de forma simultánea, mientras que el PCA ayuda a simplificar conjuntos de datos complejos, destacando las relaciones más relevantes entre las variables.

Para evaluar la precisión y el rendimiento de un modelo en la zonificación de amenazas, es fundamental utilizar una curva ROC (Receiver Operating Characteristic). Esta herramienta mide la capacidad del modelo para diferenciar entre áreas afectadas y no afectadas por un fenómeno. La curva ROC se construye comparando los valores predichos por el modelo (probabilidades de ocurrencia) con datos observados de eventos reales, categorizándolos como positivos (ocurrencia) o negativos (no ocurrencia). Para ello, es indispensable contar con un registro detallado que incluya las coordenadas geográficas precisas de los eventos.

Incrementar el número de estaciones climáticas del IDEAM permitiría una mejor representación de las variaciones locales en factores como temperatura, precipitación y dirección de vientos, lo que a su vez mejoraría la calidad de los insumos para los modelos de evaluación de amenazas. Este enfoque más detallado y robusto fortalecería la capacidad predictiva y ayudaría a diseñar estrategias de mitigación más efectivas.

Finalmente, se recomienda el uso de las guías metodológicas para la zonificación de amenazas ya establecidas para escala 1:25.000 en áreas cartografiadas a esta escala (Municipios).

Referencias Bibliográficas

- Aburas, M. M., Abullah, S. H., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2015). A review of land suitability analysis for urban growth by using the GIS-based analytic hierarchy process. *Asian Journal of Applied Sciences*, 3(6).
- Arias Murcia, K. Y. (2016). Zonificación de amenazas por incendios forestales en el sector rural del municipio de Tota Boyacá con el empleo de SIG.
- Camilloni, I., Barros, V., Moreiras, S., Poveda, G., Tomasella, J., Moreno, J. M., ... & Marengo, J. A. (2020). Inundaciones y sequías. Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos—Informe RIOCCADAPT, 391-417.
- Chandio, I. A., Matori, A. N. B., WanYusof, K. B., Talpur, M. A. H., Balogun, A. L., & Lawal, D. U. (2013). GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3059-3066.
- Chowdary, V. M., Chakraborty, D., Jeyaram, A., Murthy, Y. K., Sharma, J. R., & Dadhwal, V. K. (2013). Multi-criteria decision making approach for watershed prioritization using analytic hierarchy process technique and GIS. *Water resources management*, 27, 3555-3571.
- Carvajal Perico, J. H. (2012). Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia
- Colombiano, S. G. (2013). Documento metodológico para la zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por movimientos en masa. Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas.
- Colombiano, S. G. (2017). Guía Metodológica para la zonificación de Amenaza por movimientos en masa. Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas.

- Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98.
- Forero Luque, L. S. Zonificación de Amenazas por Incendios Forestales en el Municipio de San Juan de Rioseco Cundinamarca Según Metodología IDEAM.
- Herrero, A. D., Huerta, L. L., & Isidro, M. L. (2009). A handbook on flood hazard mapping methodologies (Vol. 2). IGME.
- Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter, 2008, The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- IDEAM. (2011) Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000 / ajustado Bogotá, D. C. 140 pag.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático [IDIGER]. (2017). Mapa de susceptibilidad por incendios forestales escala 1:25.000. Bogotá D.C., Colombia.
- Johnson, F., White, C. J., van Dijk, A., Ekstrom, M., Evans, J. P., Jakob, D., ... & Westra, S. (2016). Natural hazards in Australia: floods. *Climatic Change*, 139, 21-35.
- Mejía Quesada, C. E. (2017). La zonificación de riesgos a incendios forestales en la cuenca del río Coello en el departamento del Tolima.
- Moscovich, F. A., Ivandic, F., & Besold, L. (2014). Manual de combate de incendios forestales y manejo de fuego. Nivel Inicial. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. Buenos Aires, Argentina.
- Nandi, A., Mandal, A., Wilson, M., & Smith, D. (2016). Flood hazard mapping in Jamaica using principal component analysis and logistic regression. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-16.

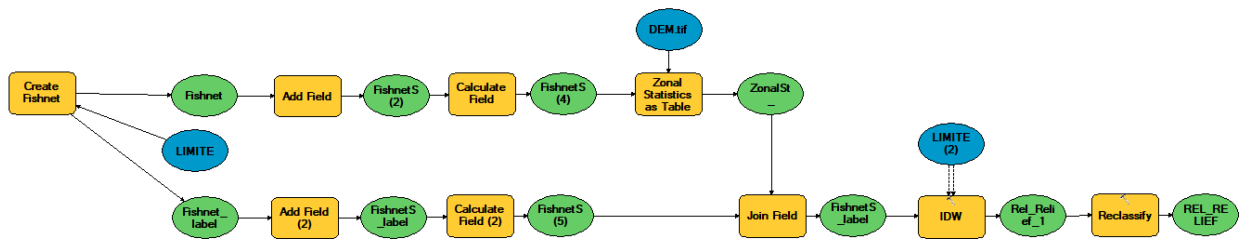
- Patricio, F. C. E., & Cristina, P. S. J. (2017). LA RESISTIVIDAD DE ROCAS Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN MINA. UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA, 21(82), 4-15.
- Plana, E., Bernet, M. F., & Davos, M. S. (2016). Los incendios forestales: guía para comunicadores y periodistas:[proyecto eFIRECOM]. Centro Tecnológico Forestal de Cataluña.
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomat Nat Hazards Risk* 7 (3): 1000–1017.
- Rodriguez, M. E. S. (2020). Zonificación de la amenaza ante inundaciones a partir de un método de evaluación multicriterio en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (25), 47-76.
- Sarmiento Linares, P. A. Desarrollo y análisis de zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa: Uso del método heurístico del proceso de análisis jerárquico y comparación de criterios adecuados.
- Singha, C., Swain, K. C., Meliho, M., Abdo, H. G., Almohamad, H., & Al-Mutiry, M. (2022). Spatial analysis of flood hazard zoning map using novel hybrid machine learning technique in Assam, India. *Remote Sensing*, 14(24), 6229.
- Talero Rodriguez, Y. A. (2021). Empleo de SIG en la zonificación de amenaza por Incendios de la cobertura vegetal en Cuítiva-Boyacá escala 1: 25000.
- Valencia Ortiz, J. A., Martínez-Graña, A. M., & Méndez, L. M. (2023). Evaluation of Susceptibility by Mass Movements through Stochastic and Statistical Methods for a Region of Bucaramanga, Colombia. *Remote Sensing*, 15(18), 4567.
- Vargas Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. *Boletín de geología*, 22(37), 39-67.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.

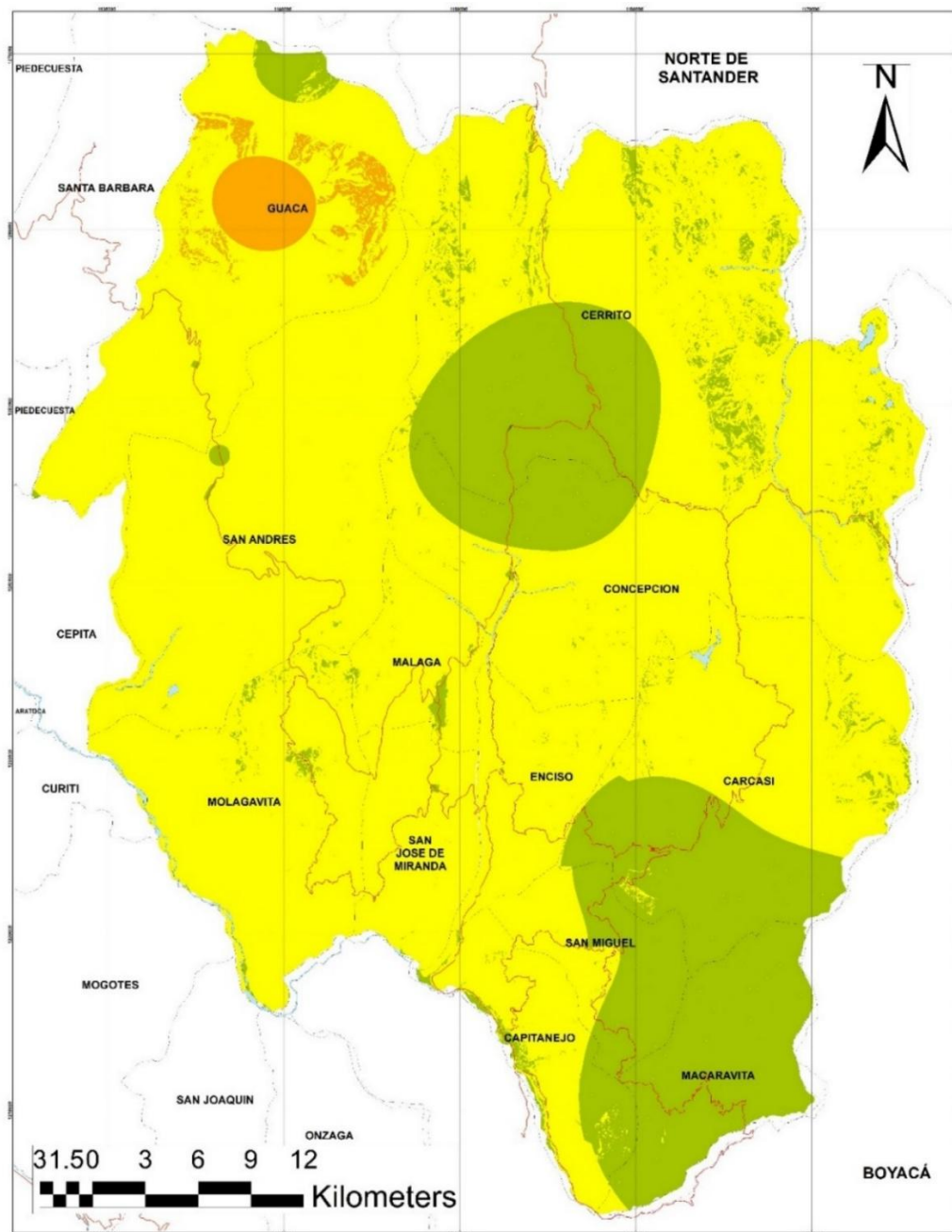
Xu, K., Zhao, Z., Chen, W., Ma, J., Liu, F., Zhang, Y., & Ren, Z. (2024). Comparative study on landslide susceptibility mapping based on different ratios of training samples and testing samples by using RF and FR-RF models. *Natural Hazards Research*, 4(1), 62-74.

Apéndices

Apéndice A. Modelo para producir el raster de relieve relativo clasificado.



Apéndice B. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia García Rovira



AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA - PROVINCIA GARCÍA ROVIRA, SANTANDER

Leyenda

- 1 - Muy Baja
- 4 - Alta
- 5 - Muy Alta
- 2 - Baja
- 3 - Moderada
- Vías
- Cuerpos de agua

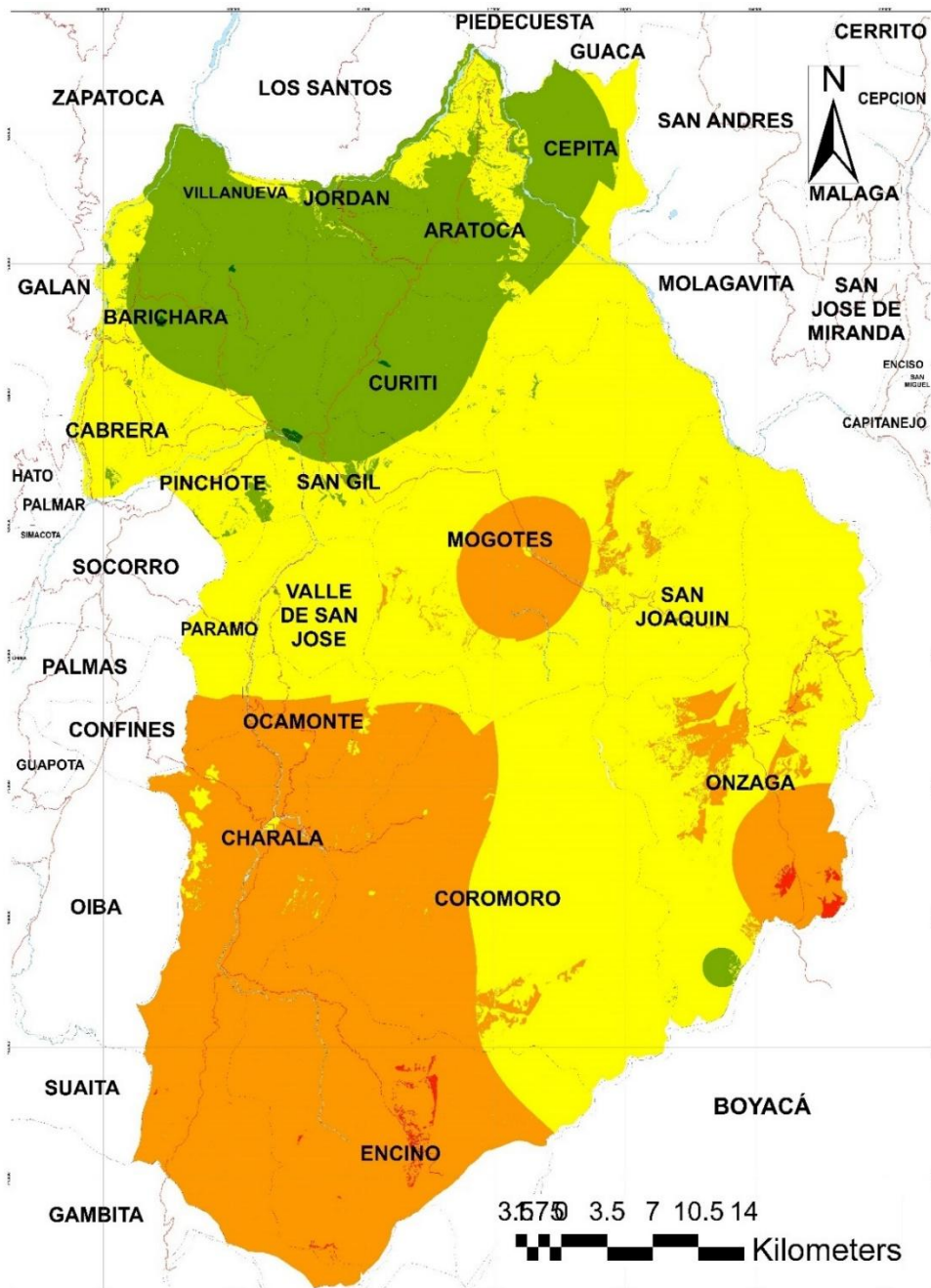
Información de referencia.

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1.000.000.0000
 False Northing: 1.000.000.0000
 Central Meridian: -74,0775
 Scale Factor: 1,0000
 Latitude Of Origin: 4,5962
 Units: Meter

1 : 25.000



Apéndice C. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia Guanentá.

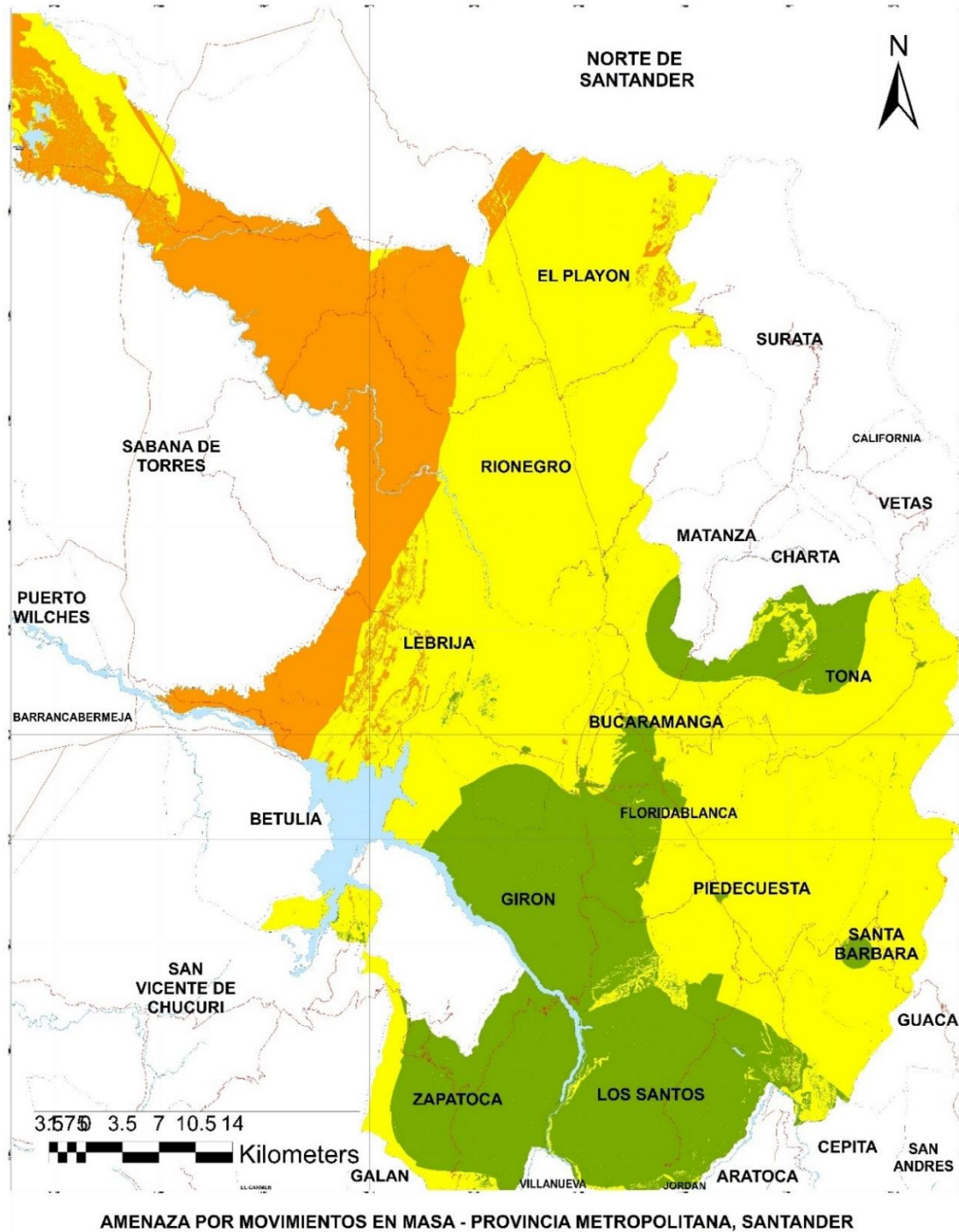


AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA - PROVINCIA GUANENTÁ, SANTANDER

Leyenda		
 1 - Muy Baja	 4 - Alta	 5 - Muy Alta
 2 - Baja	 3 - Moderada	 Vías
 Cuerpos de agua		

<p>Información de referencia. Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota Projection: Transverse Mercator Datum: MAGNA False Easting: 1.000.000.0000 False Northing: 1.000.000.0000 Central Meridian: -74.0775 Scale Factor: 1,0000 Latitude Of Origin: 4.5962 Units: Meter</p>	<p>1 : 25.000</p>  <p>OGRD Oficina para la Gestión del Riesgo de Desastres</p> <p>GOBERNACIÓN DE SANTANDER</p>
--	--

Apéndice D. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia Metropolitana.



Leyenda

- | | | |
|---|--|--|
| 1 - Muy Baja | 4 - Alta | 5 - Muy Alta |
| 2 - Baja | 3 - Moderada | Vías |
| Cuerpos de agua | | |

Información de referencia.

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1.000.000.0000
 False Northing: 1.000.000.0000
 Central Meridian: -74.0775
 Scale Factor: 1.0000
 Latitude Of Origin: 4.5982
 Units: Meter

1 : 25.000



Apéndice E. Mapa de amenaza por movimientos en masa – Provincia Soto Norte.

