

Estudios Básicos de Amenaza por Inundación, Movimiento en Masa y Avenida Torrencial para el municipio de Palmira y Estudios Detallados de Riesgo por Inundación y Socavación Lateral en el Barrio Azul, Corregimiento de Amaime



**ESTUDIO 4: AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA
ZONA RURAL
ESCALA 1:25.000**



Alcaldía de Palmira



Convenio Interadministrativo MP968 de 2021

**UNIVERSIDAD DEL VALLE; OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y
GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO**

**ALCALDÍA DE PALMIRA; DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL
RIESGO DE DESASTRES-DGRD**

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PALMIRA

ÓSCAR EDUARDO ESCOBAR GARCÍA
Alcalde

FERNANDO JAVIER LEAL LONDOÑO, Ing.
Ambiental
Director DGRD

CAMILO A. SAAVEDRA ESCOBAR, Adm.
Ambiental
Director 2021 – 2022 DGRD

ADRIANA TERREROS, Ing. Agrónoma
Profesional de Planta DGRD

OMAR A. CHAVES MONCAYO, Ing. Civil
Contratista DGRD

DIANA AREVALO, Ing. Civil
Contratista Oficina de Planeación

OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO UNIVERSIDAD DEL VALLE

ELKIN DE JESUS SALCEDO HURTADO, Ph.D.
Director de Proyecto Estudios de Amenaza de Palmira - Director OSSO

DIANA M. RIVERA JIMENEZ
Coordinadora Administrativa

JHONATTAN FERNANDEZ C., MSc.
Coordinador Técnico

EQUIPOS TEMÁTICOS

HISTORICIDAD

KAREN A. SÁNCHEZ E., Geógrafa
Líder Equipo

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

JUAN CARLOS FLORES, Geól.
Líder Equipo

JULIO C. GUERRA, Geól.
Profesional de Apoyo

MARIA ALEJANDRA VELEZ, Geól.
Profesional de Apoyo

ESTEBAN A. NOREÑA, Geól.
Profesional de Apoyo

SIG Y TOPOGRAFÍA

JHON JAIRO BARONA, Ph.D.
Líder Equipo

PAOLA T. GOMEZ, Geóg.
Profesional de SIG

FRANKLIN A. BEDOYA, Ing.
Profesional de Topografía

LINA V. LATORRE, Ing.
Profesional de SIG

ALEJANDRO FERNANDEZ, Téc.
Apoyo Topografía

JORGE A. DÍAZ, Geóg.
Profesional de SIG

AMENAZA INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL

CARLOS RAMÍREZ C., MSc.
Líder Equipo

CESAR A. VIVAS, Ing.
Profesional Hidrología e Inundación

RAFAEL CLEMENT, Ing.
Profesional Avenida Torrencial

AMENAZA MOVIMIENTO EN MASA Y SOCAVACIÓN LATERAL

JHONALBERTH PALACIOS SÁNCHEZ, Ing.
Líder Equipo

SEPTIEMBRE DE 2022

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	OBJETIVOS	8
2.1.	General	8
2.2.	Específicos	8
2.3.	Alcance	8
3.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	9
4.	CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOVIMIENTOS EN MASA	12
5.	METODOLOGÍA	14
5.1.	Susceptibilidad por movimientos en masa	16
5.1.1.	Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Deslizamiento	16
5.1.2.	Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Caída	43
5.1.3.	Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Flujo	44
5.1.4.	Susceptibilidad Final por movimientos en masa (consolidado)	46
5.1.5.	Leyenda del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa	47
5.2.	Amenaza por movimientos en masa	47
5.2.1.	Probabilidad Espacial	49
5.2.2.	Probabilidad Temporal	49
5.2.3.	Análisis de magnitud	57
5.2.4.	Zonificación de la amenaza por movimientos en masa	57
5.2.5.	Validación del modelo de amenaza por MM	57
5.2.6.	Leyenda del mapa de amenaza por movimientos en masa	58
6.	RESULTADOS	59
6.1.	Susceptibilidad por movimientos en masa	59
6.1.1.	Susceptibilidad Tipo Deslizamiento	59
6.1.2.	Susceptibilidad Tipo Caída	65
6.1.3.	Susceptibilidad Tipo Flujo	67
6.1.4.	Susceptibilidad final (consolidado)	69
6.2.	Amenaza por movimientos en masa	72
6.2.1.	Probabilidad espacial	72
6.2.2.	Probabilidad temporal	72
6.2.3.	Análisis de magnitud	82
6.2.4.	Zonificación de la amenaza por movimientos en masa	82
6.2.5.	Validación de la amenaza por movimientos en masa	84

7.	CONCLUSIONES	87
8.	REFERENCIAS	89
9.	ANEXOS.....	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comunas de la cabecera urbana de Palmira	10
Tabla 2. Comunas de la zona rural de Palmira	11
Tabla 3. Categorización de la variable pendiente verificar.....	21
Tabla 4. Categorización de la variable pendiente verificar.....	24
Tabla 5. Dirección de la ladera	26
Tabla 6. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio	28
Tabla 7. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio	36
Tabla 8. Categorización de la susceptibilidad por zonas de inicio de movimientos en masa tipo caída	44
Tabla 9. Categorización de la susceptibilidad por zonas de depósitos de movimientos en masa tipo caída	44
Tabla 10. Matriz para la categorización de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída	44
Tabla 11. Categorización de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo.....	45
Tabla 12. Unidades / subunidades indicativas de procesos de flujo.....	45
Tabla 13. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes movimientos en masa	46
Tabla 14. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes tipos de movimientos en masa.....	49
Tabla 15. Categorización del factor detonante sismo	57
Tabla 16. Esquema base para la elaboración de la leyenda del mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa	58
Tabla 17. Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos	59
Tabla 18. Rangos y porcentaje del área bajo la curva	63
Tabla 19. Probabilidad espacial	72
Tabla 20. Frecuencia de lluvias máximas.....	75
Tabla 21. Catalogo histórico de MM	76
Tabla 22. Distribución espacial de la precipitación critica	78
Tabla 23. Distribución espacial del detonante sismo	80
Tabla 24. Probabilidad temporal	82
Tabla 25. Análisis de magnitud	82
Tabla 26. Validación del modelo de la amenaza por MM	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general municipio de Palmira (INS-12)	9
Figura 2. Flujograma metodológico para el análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa	15
Figura 3. Flujograma metodológico para el análisis de la amenaza por movimientos en masa	16
Figura 4. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado	18
Figura 5. Ejemplo de una curva de éxito	22
Figura 6. Mapa Modelo Digital del Terreno (INS-1).....	23
Figura 7. Mapa Pendiente (INS-2)	25
Figura 8. Mapa Orientación de las laderas (INS-3)	27
Figura 9. Mapa Unidades geológicas superficiales (GEOL 1)	29
Figura 10. Mapa geológico y estructural (GEOL 2)	32
Figura 11. Mapa Coberturas de la tierra (COB 1).....	35
Figura 12. Mapa Subunidades geomorfológicas (GMF-1)	38
Figura 13. Mapa Curvatura (INS-4).....	40
Figura 14. Mapa Inventario de procesos morfodinámicos (MM-1).....	42
Figura 15. Umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa	51
Figura 16. Máxima distancia epicentral para movimientos en masa no coherentes	53
Figura 17. Áreas afectadas por movimientos en masa durante sismos	54
Figura 18. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable pendiente (MM-2).....	60
Figura 19. Mapa Susceptibilidad tipo deslizamiento, sin clasificar (MM-3).....	62
Figura 20. Curva de éxito susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento.....	63
Figura 21. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento (MM-4).....	64
Figura 22. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída (MM-5)	66
Figura 23. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo (MM-6)	68
Figura 24. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa (consolidado) (MM-7)	70
Figura 25. Porcentaje de susceptibilidad por movimientos en masa	71
Figura 26. Mapa Precipitación anual (INS-15).....	74
Figura 27. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Austria	75
Figura 28. Mapa detonante lluvia (MM-8)	79
Figura 29. Mapa detonante sismo (MM-9).....	81
Figura 30. Mapa Amenaza por movimientos en masa para el suelo rural del municipio de Palmira (MM-10).....	83
Figura 31. Porcentaje de amenaza por movimientos en masa	84
Figura 32. Mapa Validación del modelo de amenaza por movimientos en masa (MM-11)	85

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe gran evidencia sobre cómo en la dinámica de los municipios se presentan diversas alteraciones desatadas por la ocurrencia de fenómenos de carácter natural y no natural, los cuales, concentran fuertes daños y generan o agudizan crisis sociales que, en la mayoría de las ocasiones y en un corto y mediano plazo, suelen propiciar crisis institucionales. Se ha demostrado, que el constante aumento de la peligrosidad e impactos de los desastres sobre las poblaciones, se encuentran directamente relacionados con formas de organización impropias, modelos insostenibles, pobreza y problemáticas ambientales (García-Tornel, 2001; Lavell, 2005).

Si bien, los eventos físicos son un prerrequisito para que sucedan los desastres, no son suficientes en sí para que se materialicen; debe existir una sociedad que por su forma particular de organización resulte incapacitada para absorber o recuperarse autónomamente de los impactos de estos eventos (Maskrey, 1998; Blaikie et al., 1996). Los riesgos, por lo tanto, representan los problemas no resueltos de las dinámicas sociales que se llevan a cabo sobre un territorio, de su escasa capacidad auto-organizativa y de la poca comprensión de los condicionantes del medio. En este sentido, se entiende como Riesgo a la probabilidad de daños o pérdidas de tipo corporal, social, cultural, económico y ambiental, que pueden presentarse dentro de un territorio en un periodo determinado de tiempo, debido a la ocurrencia de fenómenos de carácter natural, socio-natural, tecnológicos o humanos no intencionales y bajo unas condiciones de vulnerabilidad ante dichos fenómenos. Las condiciones de Riesgo en un municipio son dinámicas, cambian con el tiempo, tanto en sus características como en su magnitud; siempre aumentando, a no ser que se tenga una estrategia consciente indicada tanto de las condiciones de riesgo actual como de las futuras.

Por lo tanto, el proceso de Gestión del Riesgo surge a partir de la necesidad de orientar la gestión de un desarrollo municipal en función de los riesgos. Podemos decir entonces, que la Gestión del Riesgo se puede entender como un conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a conocer e intervenir las Amenazas y/o las Vulnerabilidades con el fin de mitigar los Riesgos, a través de la prevención y la reducción de los elementos (estructurales, funcionales y corporales) y los niveles de exposición frente a eventos potencialmente destructivos (Carreño, 2006).

En este sentido, una de las herramientas fundamentales para los procesos de Gestión del Riesgo municipal en Colombia corresponde a los estudios de riesgo que se deben realizar en el marco de lo establecido en los artículos 39 y 40 de Ley 1523 de 2012 respecto a la integración de la gestión del riesgo en la planificación territorial; así como, a partir de las disposiciones establecidas en el Decreto 1807 de 2014 (compilado en el Decreto 1077 de 2015) en cuanto a escalas y tipos de estudio para dicha integración.

Los estudios de Riesgo corresponden a los procesos que permiten la delimitación y zonificación de los factores asociados al Riesgo de desastres (Amenazas y Vulnerabilidades)

a partir del análisis y evaluación técnica de los mismos. De esta manera y según lo establecido por el Decreto 1807 de 2014, se deben realizar estudios, a un nivel básico, para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo o en la expedición de nuevos Planes de Ordenamiento Territorial (POT); y a un nivel detallado, durante la ejecución de estos POT y a partir de las zonas priorizadas en los estudios de nivel básico. Por lo tanto, el Decreto 1807 de 2014 brinda las disposiciones mínimas en cuanto a las condiciones y escalas de trabajo para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en dichos planes, así como, las condiciones técnicas mínimas para la elaboración de los estudios en torno a fenómenos como Movimientos en Masa, Inundación y Avenida Torrencial dado la recurrencia de éstos.

El municipio de Palmira, con su contexto físico-geográfico, corresponde a uno de los municipios de Colombia con las condiciones propicias para la configuración de escenarios de riesgo asociados a fenómenos de recurrencia como Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas Torrenciales, entre otros; que, junto a los notorios cambios a nivel climático y la localización incorrecta de elementos estructurales y corporales, pueden agudizar el impacto de dichos fenómenos en el territorio.

A partir de lo anterior, el Departamento Nacional de Planeación, en el marco del programa de POT Modernos, llevó a cabo en el año 2018, por medio del consultor EZQUIAGA, los primeros estudios básicos para la incorporación de la gestión del riesgo en la propuesta de revisión y ajuste del POT del municipio de Palmira del año 2013. Sin embargo, el concepto generado por parte de Planeación Nacional para estos estudios, consideró que la consultoría desarrollada, no entregó a satisfacción los productos del objeto contractual y el municipio no logró, ni recibió el anunciado Plan de Ordenamiento Territorial (POT) moderno, igualmente, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, en su apoyo a la administración municipal en el año 2018, expuso y sustentó ante todos los actores del caso, las observaciones y objeciones que tenía frente al tema de las evaluaciones de amenazas realizado por el Consultor del Departamento de Planeación Nacional (DGRD de Palmira, 2021).

Con el pasivo dejado por el primer intento de estudios de evaluación y zonificación de amenazas y riesgos para la incorporación en la revisión y ajuste del POT, el municipio de Palmira, a través de la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres – DGRD, inicia en el año 2020 un gran esfuerzo de gestión con el objeto de satisfacer la necesidad de contar con estudios básicos de amenaza y riesgos como soporte para el nuevo POT. En este sentido, se logra alcanzar el Convenio Interadministrativo MP968 de 2021 entre la Administración Municipal de Palmira y La Universidad del Valle – Laboratorio Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO), con el cual se comenzaron a aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos de amenaza por Inundación, Movimiento en Masa y Avenida Torrencial en el municipio de Palmira y estudios a detalle de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inundaciones y Socavación Lateral en el Barrio Azul, corregimiento de Amaime.

En el marco de este Convenio Interadministrativo se realiza el estudio No. 4 correspondiente al estudio de amenaza por movimiento en masa a escala 1:25000 en zona de montaña del

municipio de Palmira. Este estudio se lleva a cabo con el propósito de obtener la zonificación de la amenaza a escala básica para el fenómeno mencionado a partir de lo exigido en el Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015. El presente documento técnico, muestra los insumos requeridos, los procesos metodológicos llevados a cabo; así como, los resultados obtenidos para alcanzar dicha zonificación.

2.OBJETIVOS

2.1. General

Evaluar y zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona de montaña del municipio de Palmira Valle del Cauca.

2.2. Específicos

1. Identificar la susceptibilidad por movimiento en masa (MM) a escala 1:25000 en zona de montaña del municipio de Palmira.
2. Estimar la amenaza por movimiento en masa (MM) a escala 1:25000 en zona de montaña del municipio de Palmira.
3. Identificar las áreas con condición de amenaza por movimiento en masa (MM) a escala 1:25000 en zona de montaña del municipio de Palmira.
4. Identificar las áreas con condición de riesgo por movimiento en masa (MM) a escala 1:25000 en zona de montaña del municipio de Palmira.
5. La determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas.

2.3. Alcance

El presente estudio pretende identificar, evaluar y zonificar los grados de amenaza por movimientos en masa que presenta en la zona de montaña del municipio de Palmira – Valle del Cauca, a través de métodos estadísticos, lo cual permite conocer la distribución de las áreas propensas a deslizarse. En cumplimiento del Decreto 1807 de 2015, el presente estudio se realiza a escala 1:25.000 con el fin que sea tomado como insumo para los futuros procesos de ordenación y planificación territorial en los límites del municipio de Palmira.

3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región suroriental del departamento del Valle del Cauca alrededor de los $03^{\circ}31'39''$ de latitud Norte y $76^{\circ}18'01''$ de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al norte con el municipio de El Cerrito, al sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al este con el departamento del Tolima y al oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes (ver Figura 1).

El municipio cuenta con un área aproximada de 100.000 ha y se divide en dos grandes zonas fisiográficas de Este a Oeste: la zona montañosa y de piedemonte y la zona plana asociada al valle geográfico del río Cauca, sobre la cual se encuentra ubicada la cabecera urbana del municipio.

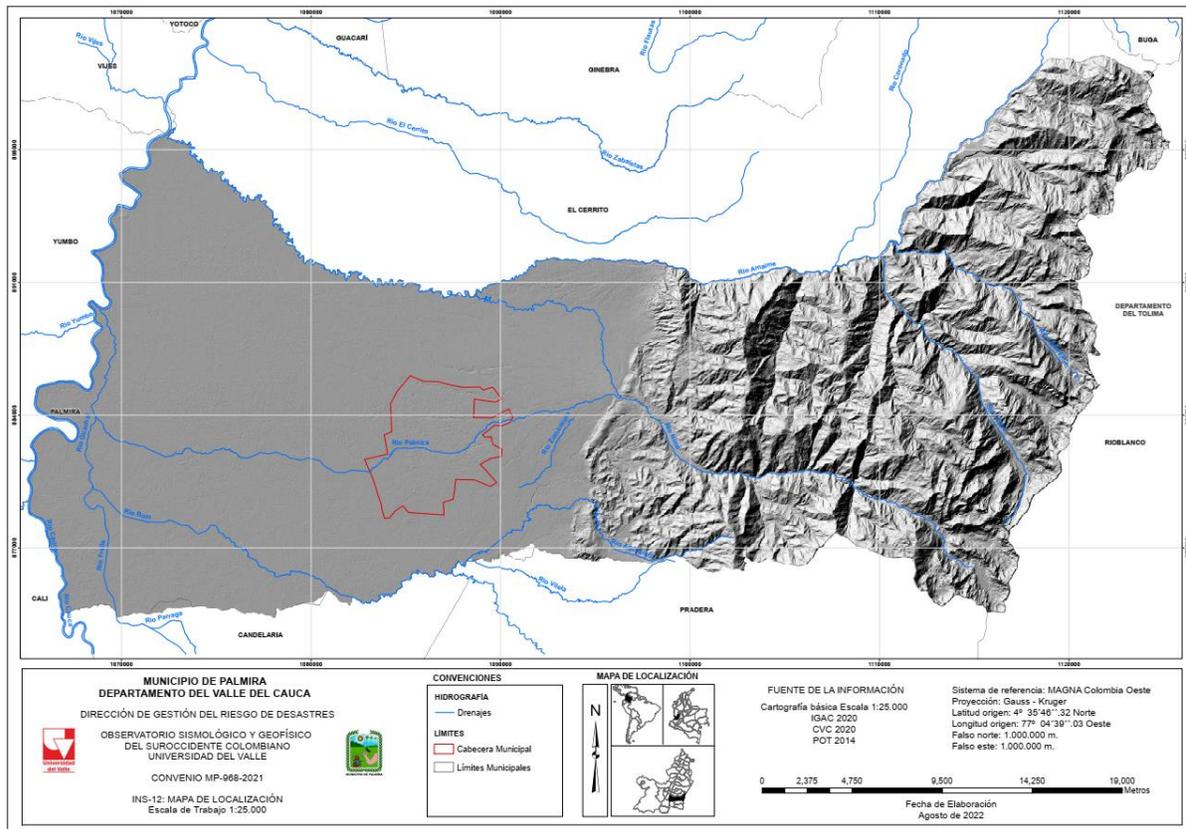


Figura 1. Localización general municipio de Palmira (INS-12)

Fuente: elaboración propia

Cuenta con una cantidad aproximada de población, según proyecciones DANE a 2021, de 356.000 habitantes; la gran mayoría concentrados en la cabecera urbana con un aproximado de 281.000 habitantes y unos 74.000 habitantes en los demás centros poblados y rural disperso.

De acuerdo con el POT de 2001, el modelo territorial de Palmira se fundamenta en 6 componentes principales (Art. 8, Acuerdo No. 109 de 2001):

1. Una Estructura Ecológica Principal compuesta por un sistema de áreas protegidas en las que se destacan el Parque Nacional Natural Las Herosas y la Reserva Forestal Central, los elementos del sistema hídrico: principalmente el Basin del río Cauca y las cuencas de los ríos Cauca, Amaime, Nima, Aguaclara, Palmira, Guachal, Bolo y Frayle; el sistema orográfico, las Reservas y los Parques municipales.
2. Una estructura urbana compuesta por una ciudad central y un sistema de asentamientos rurales jerarquizados y especializados agrupados en forma de corona en torno a la ciudad central.
3. Una aglomeración industrial y de servicios y un núcleo de equipamientos de escala regional en torno al aeropuerto internacional.
4. Una gran zona Agroindustrial plana que cubre los intersticios de las dos anteriores estructuras.
5. Unas zonas agropecuarias en torno a los centros poblados, en la franja del piedemonte y en los valles de la ladera.
6. Una red vial y férrea de equipamientos que integra los componentes anteriores.

Finalmente, estos componentes del modelo territorial se organizan político-administrativamente en un total de 16 comunas: la cabecera municipal abarca desde la comuna 1 hasta la comuna 7 con un total de 129 barrios y la zona rural abarca desde la comuna 8 hasta la comuna 16 con un total de 31 corregimientos (Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1. Comunas de la cabecera urbana de Palmira

Comuna	Barríos	No. Barríos
1	Zamorano, Urb. Los Mangos, La Vega, Camilo Torres, Urb. Brisas del Norte, Urb. Los Caimitos, Urb. Villa del Caimito, Coronado, Urb. 20 de Julio, Urb. Simón Bolívar, Urb. Villa Diana, Urb. La Esperanza, Urb. Monteclaro, Urb. Villa del Rosario, Urb. Harold Eder, Urb. Hugo Varela Mondragón, Santiago Eder, Ciudadela Comfaunión, Urb. Emmanuel, Poblado de Lourdes, Ciudad Belén, Palma Real, El Porvenir.	16
2	Bosques de Morelia, Urb. Villa Claudia, Industrial, Urb. Ignacio Torres Giraldo, Urb. Juan Pablo II, Urb. Santa Teresita, La Benedicta, Estonia, Berlín, Santa Isabel, Versalles, Mirriñao, Urb. Los Samanes, Las Mercedes, Urb. Samanes de la Merced, Urb. Almenares de la Merced, Santa María del Palmar, Urb. Campestre, Portal de las Palmas, Urb. Llanogrande, Urb. Departamental, Urb. Parque de la Merced, Urb. Plazuela de la Merced, Villas de Caña Miel, Poblado de Comfaunión, Altamira, La Orlidia, Betania de Comfandi.	28

Comuna	Barrios	No. Barrios
3	Fray Luis Amigó, El Prado, Urb. Santa Ana, Emilia, La Concordia, Llanogrande, Acacias, Pomona y Brisas del Bolo, Santa Bárbara, Rivera Escobar, Olímpico, Urb. Villa de las Palmas, Urb. Bosques de Santa Bárbara, Casas de Alicanto.	14
4	Jorge Eliécer Gaitán, Loreto, Alfonso López, Colombia, Santa Rita, Obrero, San Cayetano, Bizerta, Uribe Uribe.	9
5	Prados de Oriente, San Pedro, Primero de Mayo, Providencia, La Libertad, Campestre, San Carlos, Danubio, San Jorge, San José, José Antonio Galán, Palmeras, María Cano, Popular Modelo, Municipal, Los Sauces, Urb. Siete de Agosto, Urb. El Jardín, Urb. El Bosque, Urb. Palmeras del Oriente, Palmeras de Marsella, Urb. Buenos Aires, Urb. Mejor Vivir, La Alameda, Urb. La Estrella.	25
6	Central, Colombina, Libertadores, Fátima, El Triunfo, Caicelandia, Urb. Las Flores, Urb. El Paraíso, Ciudadela Palmira, La Trinidad.	10
7	Luis Carlos Galán, Barrio Nuevo, Las Delicias, El Recreo, Santa Clara, Urb. Petruc, Urb. Las Américas, La Independencia, Chapinero, Urb. Guayacán, Sesquicentenario, Parques de la Italia, Las Victorias, Urb. El Trébol, Urb. Portales del Recreo, Urb. Los Robles, Guayacanes del Ingenio, Urb. La Palmirana, El Sembrador, Los Coches.	20

Fuente: Alcaldía de Palmira, 2021.

Tabla 2. Comunas de la zona rural de Palmira

Comuna	Corregimiento	No. Corregimientos
8	Rozo, La Torre, La Acequia.	3
9	Matapalo, Obando, La Herradura, Palmaseca, Coronado (rural), Zamorano (rural).	6
10	La Dolores, Guanabanal, Caucaseco, Juanchito.	4
11	Bolo San Isidro, Bolo Italia, Bolo Alizal.	3
12	Amaime, Boyacá, La Pampa.	3
13	Tienda Nueva, Tablones, Guayabal, Barrancas.	4
14	La Zapata, Aguaclara, Ayacucho.	3
15	Combia, Toche.	2
16	Potrerrillo, Caluce, Tenjo.	3

Fuente: Alcaldía de Palmira, 2021.

4. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOVIMIENTOS EN MASA

Existen varias clasificaciones de movimientos en masa, las cuales se basan en el mecanismo de rotura y la naturaleza de los materiales involucrados. La clasificación presente en este documento, sigue la distribución hecha por Cruden y Varnes (1996), donde enfatiza en el material involucrado y el tipo de deslizamiento, basados en la clasificación propuesta por Varnes (1978), adicionalmente los autores introducen una terminología que considera factores como actividad (estado, distribución, estilo), tasa de movimiento y contenido de agua; además, proponen la combinación de nombres según el orden en que se presentan los movimientos (caída de rocas-flujo de detritos).

Caída: Separación o desprendimiento de suelo o roca. desde una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie en la que poco se produce desplazamiento de cizallamiento (desplazamiento). Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o rodando. El movimiento es muy rápido excepto cuando la masa desplazada ha sido socavada, la caída irá precedida de pequeños movimientos de deslizamiento o caída que separan el material desplazado de la masa no perturbada. (Cruden & Varnes 1996).

Volcamiento: 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, se divide en tres tipos (Cruden & Varnes 1996).

- Volcamiento de bloques de roca
- Volcamientos de bloques aislados
- Volcamiento de detritos

Deslizamiento: Movimiento ladera abajo 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 (ibíd.). Los autores plantean que la superficie de ruptura no se desarrolla de manera simultánea a lo largo de la masa que se desplazará, sino que se inicia por agrietamientos en el terreno en la parte superior de la ladera, donde más tarde se conforma la corona del deslizamiento. Este tipo de movimiento en masa se divide en tres tipos

- Rotacional,
- Traslacional
- Compuesto

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 es similar 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. En realidad, se da una transición de deslizamiento a flujo, dependiendo del contenido de agua, la movilidad y la evolución del movimiento.

Los flujos más rápidos corresponden a los flujos canalizados de detritos, en los cuales el material pierde bastante cohesión, admite bastante agua o encuentra laderas con alta pendientes (ibíd.).

Propagación lateral: Extensión o dilatación lateral de un suelo cohesivo o masa de roca blanda, combinada con subsidencia general del material fracturado suprayacente en ese material blando, sin que se forme una superficie de falla bien definida. La extensión se manifiesta como la extrusión de material propenso a licuación o flujo plástico. Se pueden presentar dos casos generales

- Propagación lateral en bloque
- Propagación lateral por licuación

Reptación: “Deformación del terreno a esfuerzo constante” que involucra el material inconsolidado de la parte superior de las laderas.

Estos materiales se pueden relacionar con saprolitos y suelos residuales, suelos volcánicos, laderas de rocas lodosas hídricamente degradadas y, con más frecuencia, coluviones arcillosos asociados a rocas lodosas.

Para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimiento en masa, se hace necesario conocer el tipo de deslizamiento que se presenta en una zona, pues estos determinan la velocidad y la fuerza con que pueden impactar a la población cercana, también se tener en cuenta el tipo de movimiento en masa para la implementación de obras de mitigación adecuadas a la hora de intervenir la zona, la respuesta de la población ante estos y los entes territoriales, pues un deslizamiento traslacional, afecta diferente que un deslizamiento tipo flujo.

5. METODOLOGÍA

La susceptibilidad por movimientos en masa se toma como el grado de propensión de un terreno a desarrollar un fenómeno natural potencialmente dañino, definido a partir de la interacción de las propiedades intrínsecas caracterizadas bajo unidades de parámetro y unidades de terreno (Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015). Es decir, la evaluación de la susceptibilidad expresa cuales son los sitios con mayor o menor ocurrencia de un evento en determinada área. La susceptibilidad posee gran importancia puesto que es el primer paso a tener en cuenta a la hora de realizar una evaluación de la amenaza, ya que ofrece la información necesaria para identificar las características que presenta la zona para luego ser analizadas.

Según González de Vallejo, et al. (2002), la susceptibilidad es la posibilidad de que una zona quede afectada por determinado proceso, expresada en términos cualitativos y relativos, que como se verá, es insuficiente y puede mejorarse. La probabilidad puede aplicarse tanto al problema de la desestabilización de un punto, al hecho posible de que resulte movido por un movimiento subyacente, en cuyo caso hablamos de susceptibilidad a la desestabilización, como a su posible alcance por una masa desestabilizada en un proceso de movimiento.

Para determinar la susceptibilidad por MM, se tienen en cuenta múltiples características del terreno; geomorfología, geología, coberturas de la tierra, pendientes, entre otros. La metodología empleada se basa en la generación de diferentes mapas temáticos que son el producto del cruce de dos o más capas de información base aunado a los deslizamientos previos en la zona, luego con métodos estadísticos estos mapas temáticos se superponen para obtener el mapa de susceptibilidad y por medio de los Sistema de Información Geográfica (SIG) se obtienen las salidas cartográficas. También se realizó trabajo de campo el cual es de gran utilidad para obtener resultados rápidos y confiables al igual que permite corroborar la información de fuentes secundarias.

Para caracterizar la amenaza por movimientos en masa en el área de estudio, se tomó como base la “Guía metodológica para AMENAZA POR MM SC 1_25.000”. adicional a ello, se realizó la evaluación de factores que inciden en la susceptibilidad del terreno ante este fenómeno natural estableciendo una serie de insumos cuya influencia aporta a la estabilidad o inestabilidad del suelo.

Para ello se realiza la evaluación de la susceptibilidad de 3 tipos de movimientos en masa los cuales son Deslizamiento, Caída y flujo.

La evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa de tipo deslizamiento se realizó mediante el modelamiento de pesos de las variables (resultado de la resta de los valores Wf^+ - Wf^-) que condicionan la ocurrencia de movimientos en masa, mediante un análisis estadístico bivariado.

Con respecto a los movimientos en masa tipo caída se realizará una superposición de capas donde se tendrá en cuenta las unidades geomorfológicas y las pendientes del área, por último, se evaluará la susceptibilidad de tipo flujo y reptación en la cual se contará con las subunidades geomorfológicas del área de estudio. A continuación (Figura 2), se presenta el esquema metodológico para determinar la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa.

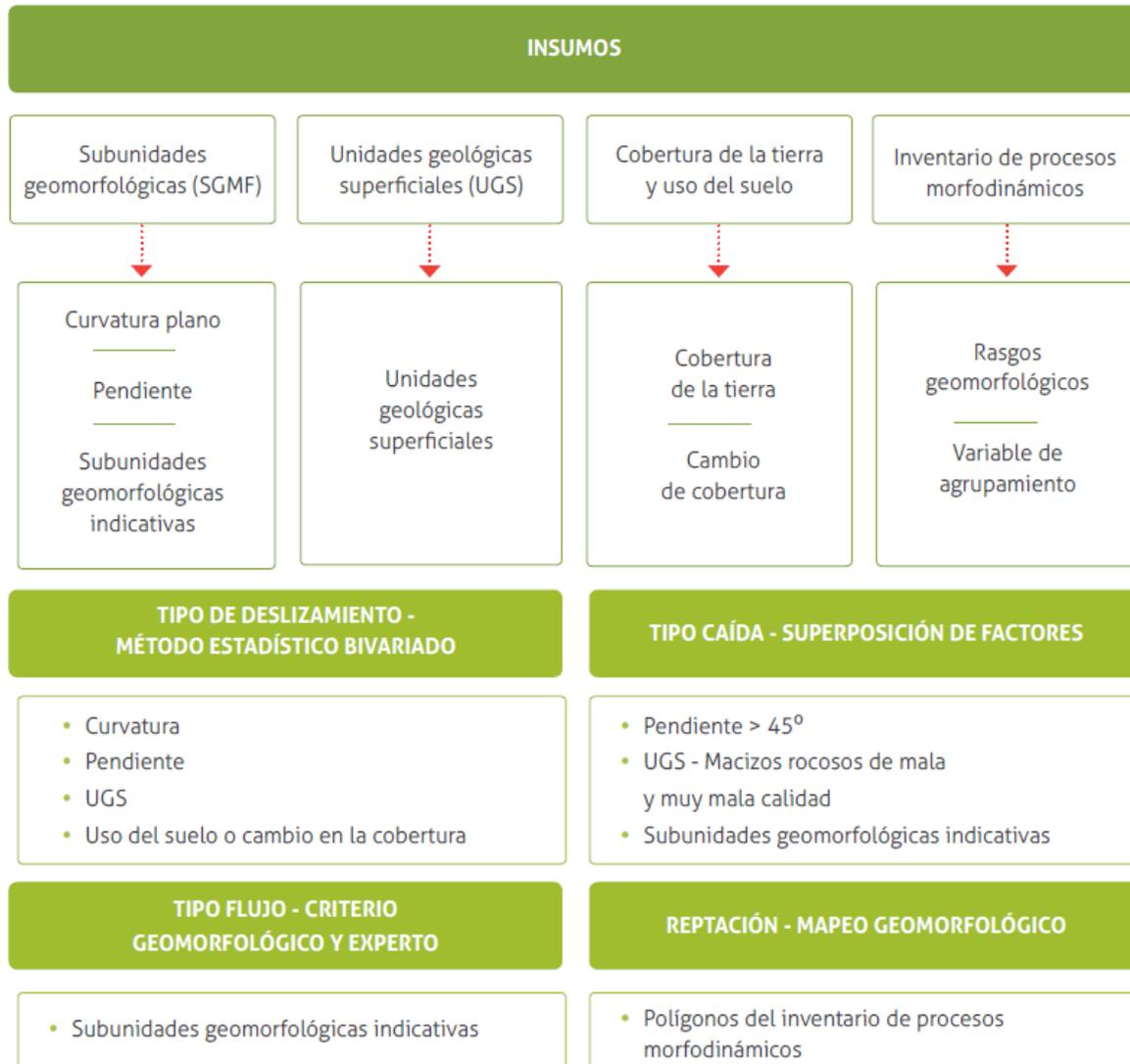


Figura 2. Flujograma metodológico para el análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa
Fuente: SGC 2017.

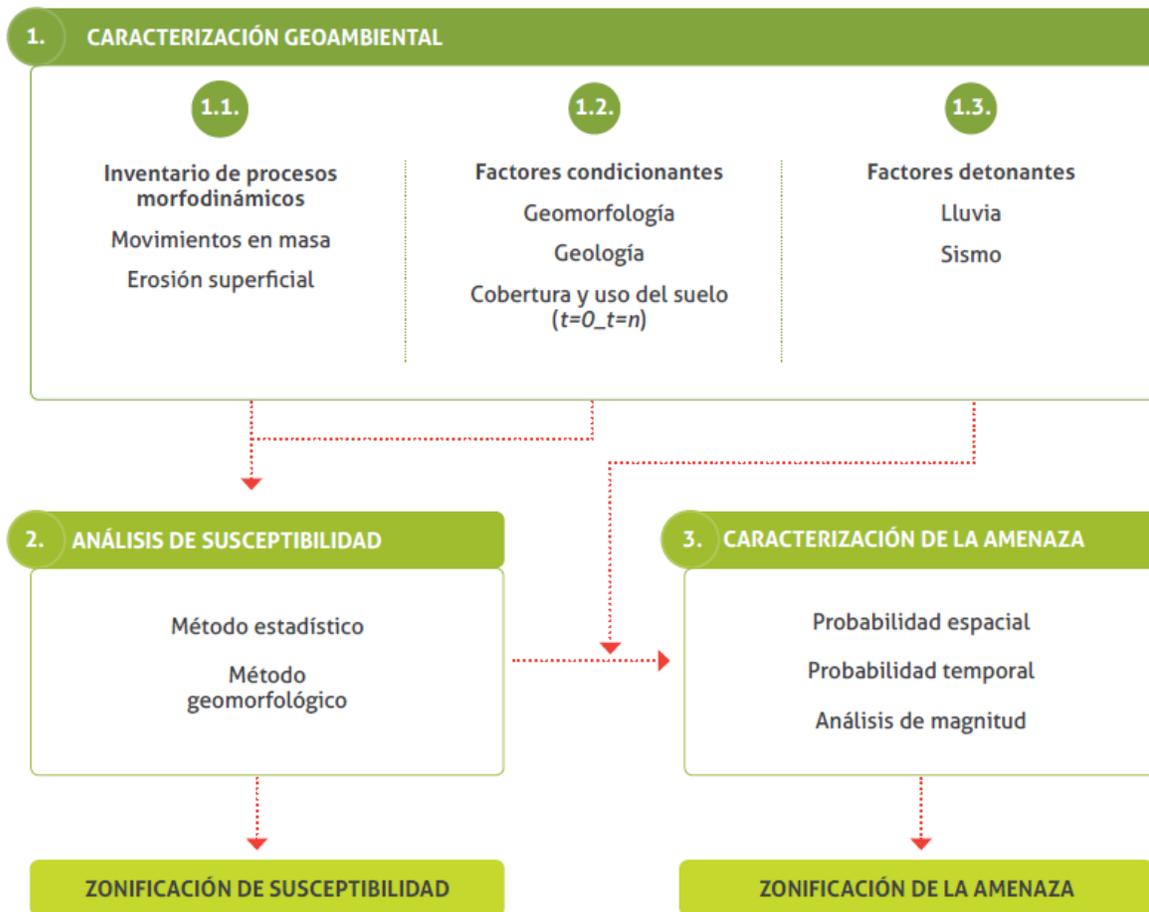


Figura 3. Flujograma metodológico para el análisis de la amenaza por movimientos en masa
Fuente: SGC, 2017.

5.1. Susceptibilidad por movimientos en masa

5.1.1. Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Deslizamiento

Para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa de tipo deslizamiento se tiene en cuenta las condiciones que intervienen en la generación de los movimientos en masa como los procesos morfodinámicos y características del suelo. La zonificación se obtiene a partir del procesamiento de las variables como lo son; la pendiente, orientación de la ladera, movimientos (deslizamientos ocurridos en el área de estudio), geomorfología, modelo digital del terreno (MDT), unidades geológicas superficiales, geología, curvatura del terreno y cobertura de la tierra por medio del método Bivariado.

Los análisis estadísticos bivariados definen múltiples variables temáticas, una variable dependiente (deslizamientos previos) y diferentes variables independientes (características intrínsecas del terreno), cuya importancia relativa se analiza de forma separada para cada

una. Para realizar la evaluación de la susceptibilidad se asignan tres rangos de intensidad (Alta, Media y Baja). Esta información es procesada mediante el SIG, arrojando varias capas temáticas correspondientes a cada variable, las cuales son sumadas dando como resultado un mapa que muestra cuales son los sectores susceptibles a sufrir movimientos en masa.

La ocurrencia de los movimientos en masa en relación con su magnitud, generan cierto atraso para la población, ya que se necesitan abundantes recursos económicos y humanos para la recuperación de las condiciones idóneas, el funcionamiento de las redes, instituciones, etc., recursos con los que en muchas ocasiones no se cuenta, superando la demanda local y nacional y por ende necesitando el apoyo externo.

5.1.1.1. Método estadístico Bivariado

El método usa el modelo probabilístico Bayesiano, el cual permite evaluar la susceptibilidad a los movimientos en masa mediante la sumatoria de pesos calculados de forma cuantitativa, para cada una de las variables del territorio relacionadas con la ocurrencia del fenómeno en cuestión, es decir, “en el modelamiento de la susceptibilidad, el método calcula los pesos de cada variable o factor causante de movimientos basado en la presencia o ausencia de los movimientos dentro del área de estudio” (Alvarado et al, 2012) (Figura 4), las variables fueron definidas según el análisis del grupo multidisciplinario (geólogos, ingenieros civiles, geógrafos, hidrólogos, geotecnista, entre otros).

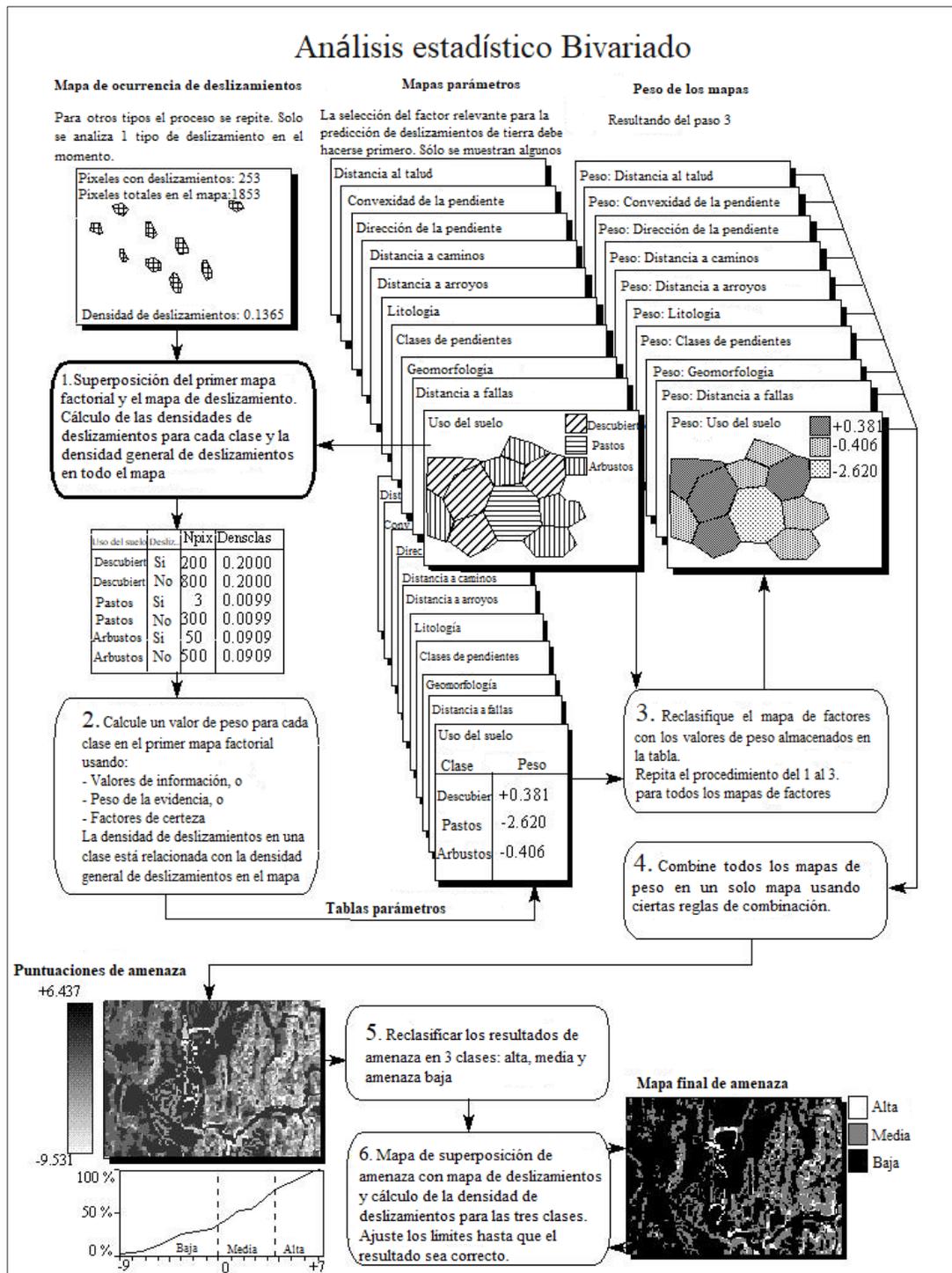


Figura 4. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado

Fuente: Van Western (1996)

En el método Bivariado, la probabilidad P se determina con el conocimiento de la ocurrencia de un evento D en el pasado bajo condiciones similares, y es definida como la probabilidad a priori P (D). Esta probabilidad puede ser alterada con valores B que influyen el resultado y

son obtenidos con estudios o análisis en campo, denominados factores causantes. Cuando se integran las causas a la evaluación, esta se define como una probabilidad condicional o posterior $P(D/B)$. La probabilidad posterior expresa la probabilidad de que un evento D ocurra bajo la presencia de un factor causante B. Ambas probabilidades son integradas en el Teorema de Bayes, expresado en la fórmula 1.

$$P\left(\frac{D}{B} = + \frac{P(D) * P\left(\frac{B}{D}\right)}{P(B)}\right) \quad (1)$$

El traslape de los movimientos en masa con cada factor causante, permite calcular la relación estadística entre ellos, y evaluar la importancia de cada variable en la ocurrencia de deslizamientos antiguos, los pesos W^+ y W^- son calculados para cada variable (ver fórmula 2 y 3). “Este cálculo se realiza mediante la aplicación de cocientes de probabilidad, que describen como probablemente un movimiento ocurrirá en caso de presencia y ausencia de factores causantes de éstos” (CVC y Universidad del Valle, 2010).

$$W_j^+ = Ln \frac{P\left(\frac{D}{B_j}\right)}{P\left(\frac{D}{B_i}\right)} \quad (2)$$

$$W_j^- = Ln \frac{P\left(\frac{\bar{D}}{B_j}\right)}{P\left(\frac{\bar{D}}{B_i}\right)} \quad (3)$$

Donde W^+ es el cociente de probabilidad que expresa la relación en caso de presentarse los factores causantes B (de un número j de factores causantes) un movimiento puede ocurrir. W^- expresa la misma relación en caso de ausencia de estos factores. Es decir, los pesos dan información de la correlación positiva o negativa entre los factores causante y los lugares donde se han presentado movimientos.

Un par de pesos es calculado para cada factor causante. Las ponderaciones dependen de las relaciones espaciales entre los movimientos y los factores causantes:

Dahal et al., (2008), plantea que, para evaluar la combinación de los factores en el fenómeno estudiado, las ecuaciones 2 y 3 se reescriben en función del número de celdas del modelo digital de elevación (DEM) que se utilice.

$$W_i^+ = Ln \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1+Npix_2}}{Npix_3 / Npix_3+Npix_4} \quad (4)$$

$$W_i^- = Ln \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1+Npix_2}}{Npix_4 / Npix_3+Npix_4} \quad (5)$$

Donde:

Npix1: Número de celdas que representan la presencia al mismo tiempo de las variables y de movimientos.

Npix2: Número de celdas que representan la presencia de movimientos y la ausencia de las variables.

Npix3: Número de celdas que representan la presencia de las variables y la ausencia de movimientos.

Npix4: Número de celdas que representan la ausencia al mismo tiempo de las variables y de movimientos.

La diferencia entre los dos pesos se conoce como el contraste de peso, $Wf = (Wi^+ - Wi^-)$, el resultado, refleja la asociación espacial entre el factor causal y los deslizamientos de tierra. En el modelo de ponderación, “la combinación de factores causales asume que los factores son condicionalmente independientes entre sí con respecto a los derrumbes (Bonham-Carter, 2002; Lee y Choi, 2004). En esta investigación, utilizando estadísticas bivariadas, se asume que todos los deslizamientos de tierra en un área de estudio dada ocurren bajo la misma combinación de parámetros, y que todos los conjuntos de parámetros son independientes” (Dahal et al., 2008).

Finalmente, los pesos son asignados a las variables consideradas, cuya sobre posición georreferenciada produce el Índice de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, LSI, así como un mapa de susceptibilidad que integra los aportes de cada uno de los parámetros de inestabilidad, el cual puede ser categorizado de acuerdo a la distribución estadística del LSI, expresada como:

$$LSI = \sum Wfi \quad (6)$$

Una vez se obtiene el resultado del LSI, se procede a realizar un análisis de frecuencia para determinar las categorías de susceptibilidad (alta, media y baja). A continuación, se presentan una breve descripción de las variables utilizadas en la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa (MM) en el área de estudio en el municipio de Palmira.

En la Tabla 3 se muestran los resultados del método WofE, tomando como factor condicionante la capa de pendiente del terreno. En estas tablas se relacionan los datos obtenidos de la superposición de los movimientos en masa con las clases del factor condicionante, se calculan las estadísticas, los pesos positivos y negativos, las densidades del método y los pesos finales o contraste.

Tabla 3. Categorización de la variable pendiente verificar

Convención	# Pixel es movimiento	% Movimiento	# Pixel es clase	% Clase	N pixel 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
Suavemente inclinado	50	21.37	11070	5.19	50	184	110658	2020156	1.41451	0.1870	1.6015
Inclinado	50	21.37	58865	27.62	50	184	588607	1542207	6871	5603	72899
			7						-	0.0829	-
									0.25679	04201	0.3397
									749		0169
Moderadamente abrupto	50	21.37	68114	31.96	50	184	681092	1449722	-	0.1447	-
			2						0.40273	46895	0.5474
									616		8305
Abrupto	50	21.37	35503	16.66	50	184	354980	1775834	0.24889	-	0.3070
			0						9786	0.0581	51249
										5146	
Muy abrupto	34	14.53	25643	12.03	34	200	256402	1874428	0.18855	-	0.2173
			6						9738	0.0287	55458
										9572	

Fuente: elaboración propia

Curva de éxito y validación

La curva de éxito mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados y para su construcción se deben ordenar los valores de la LSI en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías (Dahal et al., 2008). Cada grupo de 1% se deberá cruzar con la variable de agrupamiento para determinar con cuantos pixeles de la variable tiene relación.

Para la elaboración de la curva de éxito se trazan en el eje X los grupos percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, de forma que a la izquierda se ubique el percentil 1 (susceptible), a la derecha el percentil 100 (no susceptible) y en el eje Y se ubican los valores porcentuales cada 1% de los movimientos en masa correspondientes con el percentil del LSI (Blahut et al., 2010). En este caso se debe usar la muestra de entrenamiento del inventario de procesos. Esta curva se construye en términos del área total de la zona de estudio y el área total de los movimientos en masa considerados (Figura 5).

Una vez que la curva este construida se deberá evaluar el área bajo la curva (ABC), para establecer la calidad de ajuste de los datos. Cuanto más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el ABC, mejor será la capacidad de la función para describir la distribución de los movimientos en masa. Un porcentaje aceptable de ajuste debe ser mayor a 70%.

En caso de contar con muestra de validación, se puede construir una curva siguiendo los pasos descritos anteriormente y superponerla con la curva de éxito para analizar el comportamiento de la función, tanto para describir la ocurrencia de movimientos existentes como para el pronóstico de nuevos procesos.

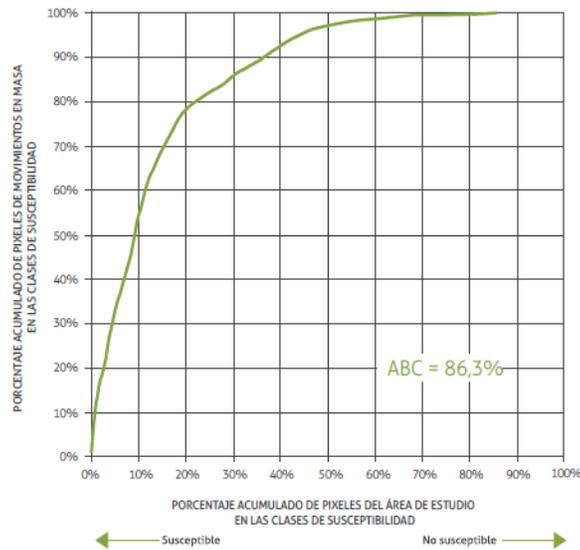


Figura 5. Ejemplo de una curva de éxito
Fuente: Tomado SGC 2017

5.1.1.2. Descripción de las variables

Para la evaluación de la susceptibilidad y su análisis se toman en cuenta factores críticos que afectan de manera directa el municipio de Palmira: pendiente, orientación de las laderas, geomorfología, modelo digital de elevaciones, movimientos (deslizamientos ocurridos en el área de estudio), cobertura de la tierra, unidades geológicas superficiales, geología, curvatura y orientación de la ladera, el análisis también se basa en el reconocimientos de campo y la caracterización de los riesgos derivados de terrenos inestables mediante el análisis geomorfológicos, a través del uso de fotografías aéreas, mapas y verificación en campo.

▪ Modelo Digital del Terreno (MDT)

Contiene información explícita acerca de la altitud y la distancia de un área específica, al igual que permite calcular diferentes variables. El MDT, se elaboró de con puntos tomados con LIDAR a resolución de 30cm. Esta variable se tomará como base para elaborar diferentes mapas o capas temáticas que posteriormente serán utilizadas para la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos en masa (Figura 6).

En el MDT de la zona de estudio se reconocen desniveles con elevaciones máximas y mínimas de 3500 a 1500 m.s.n.m., respectivamente. Las áreas más elevadas se observan hacia el oriente del área de estudio colindantes con el flanco occidental de la cordillera central, mientras que aquellas que presentan menor nivel corresponden a las que se localizan en el valle geográfico del Río Cauca.

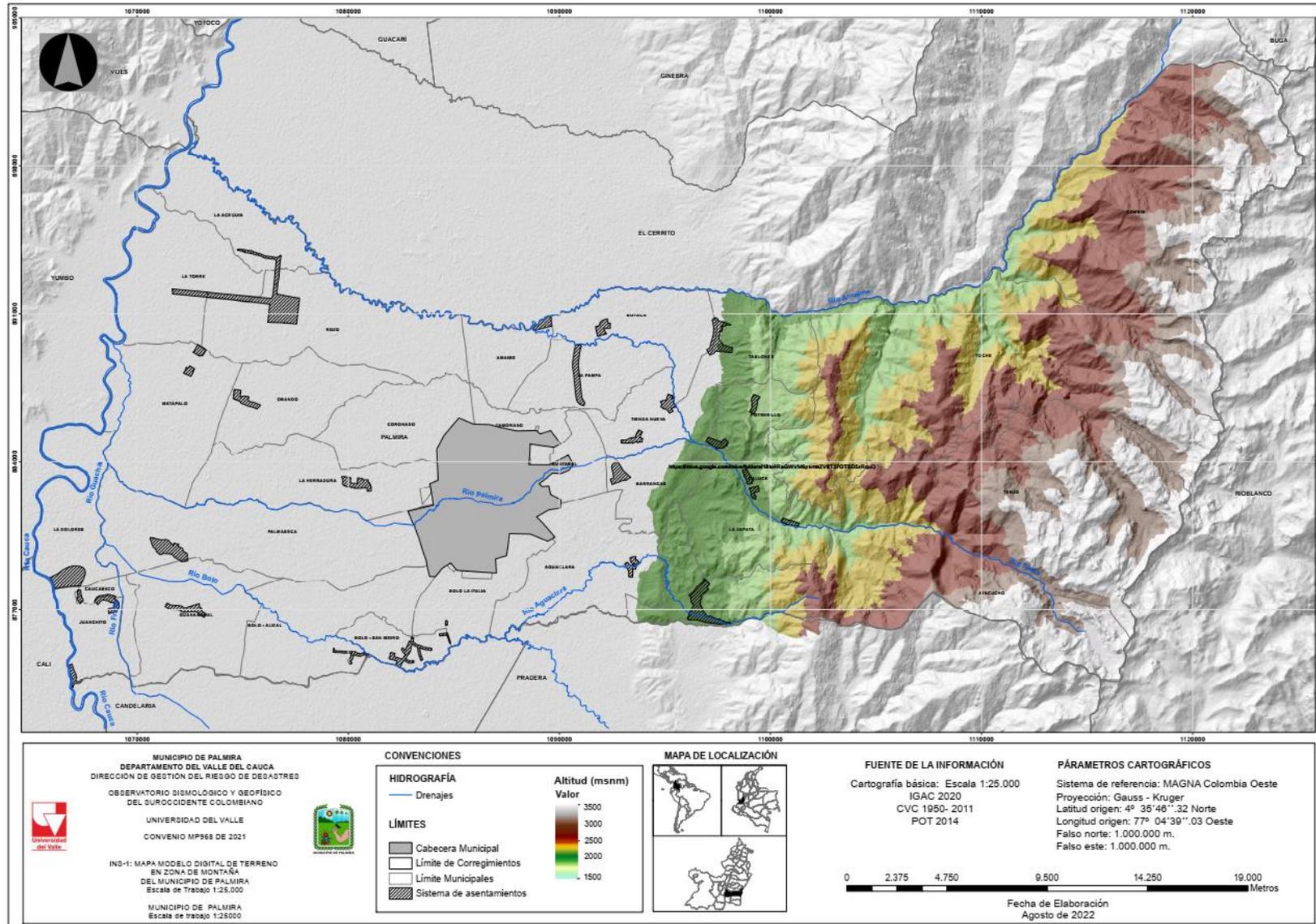


Figura 6. Mapa Modelo Digital del Terreno (INS-1)
Fuente: Elaboración propia

▪ Pendiente

El área de estudio corresponde a zonas montañosas con pendientes que van desde ligeramente suaves (planas) a fuertes (extremadamente abruptas), las cuales hacen parte del flanco occidental de la cordillera central. En la Tabla 4, se muestran los rangos de las pendientes utilizadas en el SGC, adaptado de Van Zuidam 1986.

El relieve de una determinada área juega un papel definitivo en la estabilidad de las laderas, puesto que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales de masas, en algunos casos aún con pendientes bajas se producen movimientos, de ahí que la cartografía y el análisis de este factor está dentro de las características fundamentales en un estudio que busque evaluar la susceptibilidad.

Tabla 4. Categorización de la variable pendiente verificar

CLASES	RANGOS DE PENDIENTES (Grados)	CLASIFICACIÓN
1	0-2	Plano
2	2-4	Suavemente inclinado
3	4-8	Inclinado
4	8-16	Moderadamente abrupto
5	16-35	Abrupto
6	35-55	Muy abrupto
7	>55	Extremadamente abrupto

Fuente: Tomado de Zuidam 1986

Las pendientes del terreno son determinantes en la estabilidad que tenga una determinada área, ya que en pendientes más suaves será menos probable que el terreno se deslice, mientras que en pendientes mayores la probabilidad de que se presenten procesos de movimientos en masa es más alta, cabe aclarar que el hecho de que la pendiente sea suave no lo exime de sufrir dichos procesos. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que el mapa de pendientes es un elemento imprescindible para la evaluación.

El mapa de pendientes de la zona fue construido a partir de los valores de altura obtenidos del MDT. El cálculo se hace utilizando la función gradiente en dirección X y Y donde se obtienen las alturas y las distancias, resultando una capa raster expresada en grados.

Las pendientes del área de estudio oscilan entre $5^\circ \geq 60^\circ$, el rango más representativo está entre los 17° y 55° , tal como puede observarse en el mapa de pendientes (Figura 7), también se denota que existen pocas áreas planas, con ello se puede intuir que la mayor parte del área presenta zonas propensas a sufrir movimientos en masa, dado que entre mayor sea el gradiente que presente una ladera mayor será la posibilidad de que ocurran este tipo de evento.

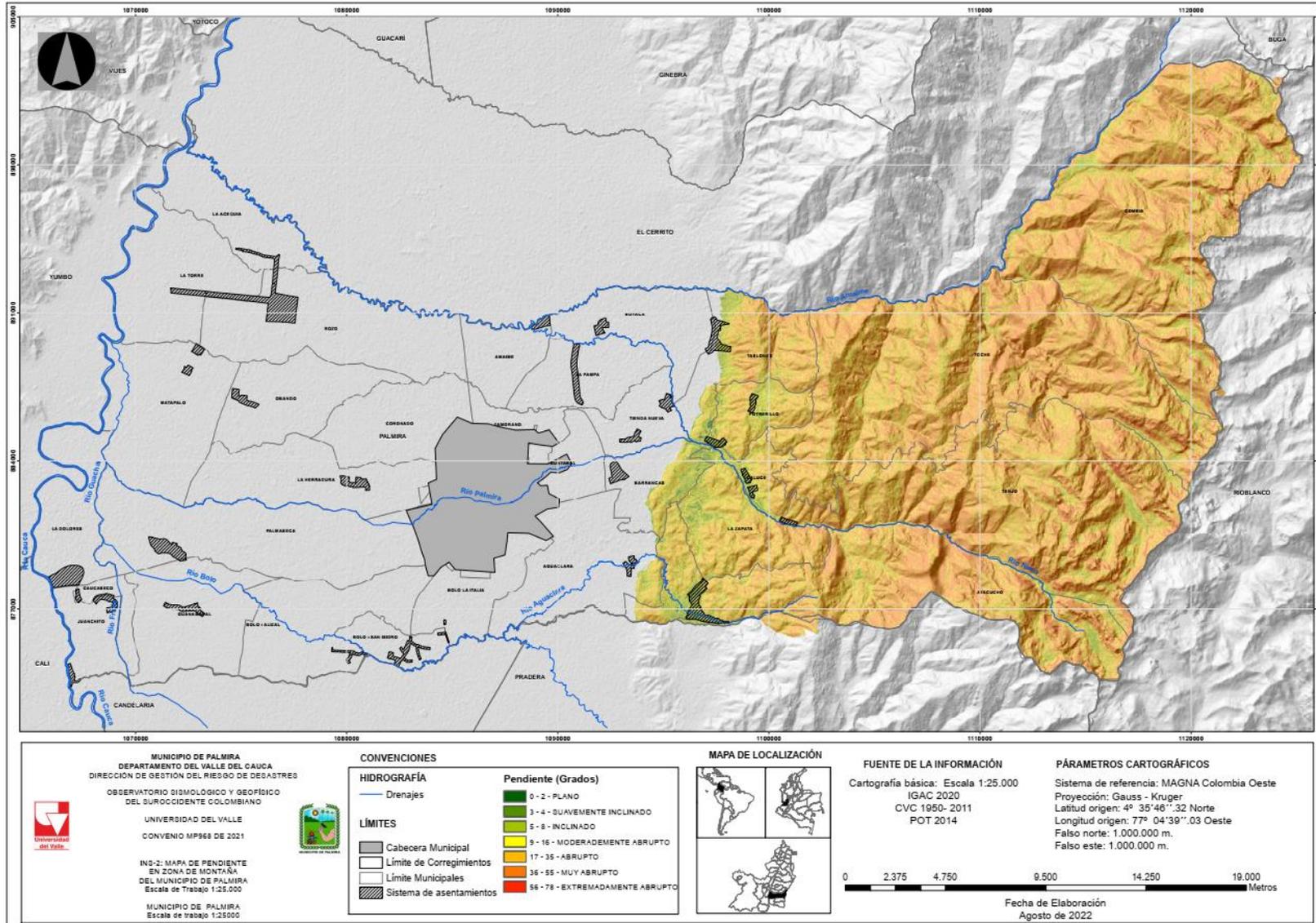


Figura 7. Mapa Pendiente (INS-2)
Fuente: Elaboración propia

▪ Orientación de las laderas

“Representa la dirección de máxima pendiente calculada para cada celda. Se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie de un punto dado” (Santacana, 2001). Esta variable posee valores que van de 1° a 360° y valores de -1 que indican zonas planas (Tabla 5).

Según el ángulo de orientación de las laderas, se da el ángulo de incidencia de los rayos del sol, es decir en horas del mediodía los rayos del sol pueden tener una inclinación de aproximadamente 55°, lo que indica que la ladera recibe una radiación vertical, mientras que en el sombreado el ángulo de la pendiente es equivalente a 20°, siendo de esta manera más débil y escasa la cantidad de energía por unidad de superficie recibida, ya que la reflexión tiende a aumentar cuando el ángulo de incidencia disminuye.

Tabla 5. Dirección de la ladera

Clase	Rango (grados)	Dirección
0	-1	Plano
1	0 – 22,5	Norte
2	22,5 – 67,5	Noreste
3	67,5 – 112,5	Este
4	112,5 – 157,5	Sureste
5	157,5 – 202,5	Sur
6	202,5 – 247,5	Suroccidente
7	247,5 – 292,5	Occidente
8	292,5 – 337,5	Noroccidente
1	337,5 - 360	Norte

Fuente: ArcGIs

El mapa que representa la orientación de las laderas (Figura 8), ha sido generado a partir de los datos contenidos en el Modelo Digital del Terreno MDT, mediante la utilización del Sistema de Información Geográfica (SIG), el cálculo utiliza los datos de elevación, definiendo la dirección mediante una capa raster, expresado en grados, con base a los puntos cardinales, presentando tendencias de orientación SE, N – S, NE - SW, SE – S y NW el programa realiza los cálculos, permitiendo conocer la ubicación de las superficies que tienen mayor tiempo de luz solar al día.

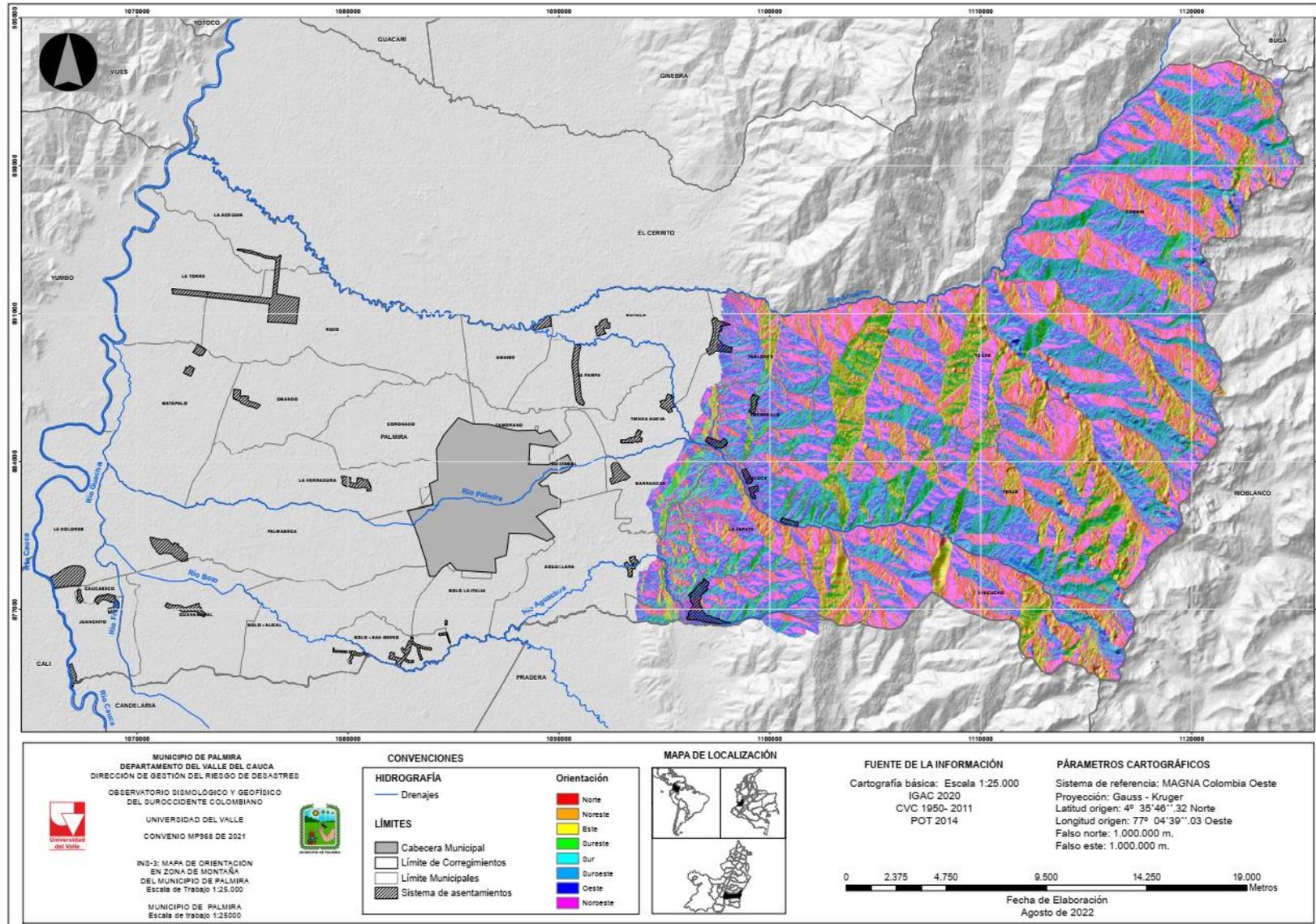


Figura 8. Mapa Orientación de las laderas (INS-3)

Fuente: Elaboración propia

■ Unidades Geológicas Superficiales

Para la geología local y geología para ingeniería se hicieron visitas a campo y se verificó la información recopilada en oficina, estableciendo un levantamiento de datos estratigráficos, de comportamiento mecánico de los materiales, caracterización litología y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos.

Unidades de roca (R): Las unidades de roca representan el 40.703 % del total del área de estudio, localizadas básicamente en la zona oriental del municipio desde el piedemonte occidental de la cordillera Central hasta los límites con el departamento del Tolima en la parte alta de la cordillera. De esta unidad hacen parte el conjunto de rocas metamórficas compuestas por esquistos, anfibolitas, gabros y metagabros que conforman el Grupo Cajamarca y el Grupo Arquía (Esquistos Básicos de Bugalagrande, Anfibolitas del Rosario y Metagabros de Bolo Azul) y las rocas ígneas de origen oceánico correspondientes a los basaltos de la Formación Amaime. La Tabla 6 exhibe las siglas con la cual se representa cada unidad.

Tabla 6. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio

Unidad geológica superficial	Significado
(Sa)	Suelo antrópico
(St)	Suelo transportado
(Sr)	Suelo residual
(Rmmc)	Roca muy mala calidad
(Rmc)	Roca mala calidad
(Rrc)	Roca regular calidad
(Rbc)	Roca buena calidad

Fuente: Elaboración propia

El mapa realizado en este estudio (Figura 9), presenta diferentes unidades geológicas donde se identifican suelos transportados por diferentes agentes y áreas de roca. En el mapa se visualiza que el área de estudio predomina las rocas seguido de los suelos transportados (abarcen mayor proporción al occidente del municipio sobre el flanco oriental de la Cordillera Central), en la zona plana dominan los suelos transportados de origen aluvial, (áreas de ladera).

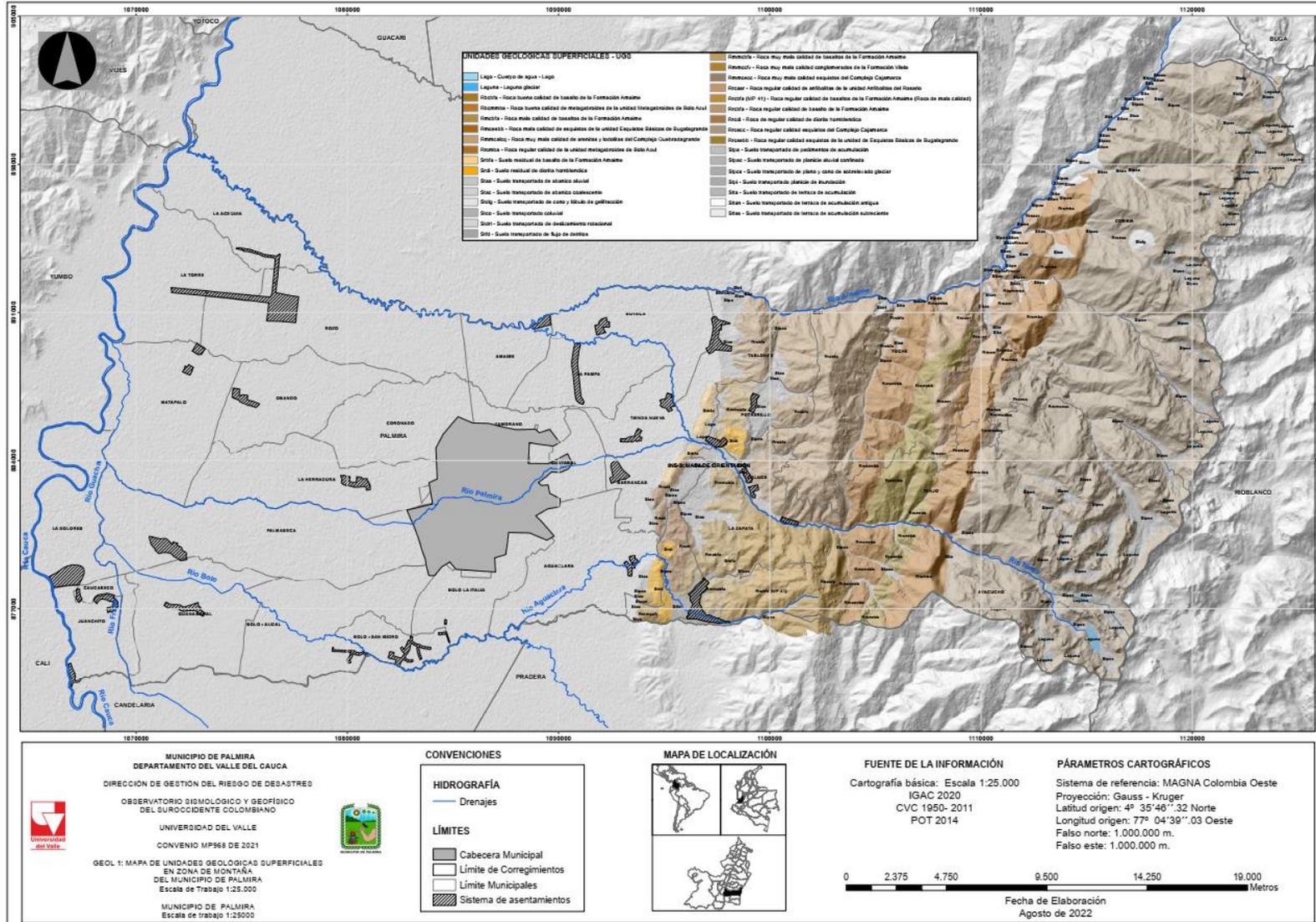


Figura 9. Mapa Unidades geológicas superficiales (GEOL 1)
 Fuente: Elaboración propia

▪ Geología

La geología es uno de los factores más importantes en una evaluación de la susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa, este factor es uno de los condicionantes principales en la aparición del ya mencionado fenómeno. A continuación, se describe las características geológicas del casco urbano del municipio el cual está localizado al suroriente del departamento del Valle del Cauca, donde afloran un conjunto de unidades geológicas, compuestas por rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y depósitos que abarcan edades desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

Rocas del Paleozoico: La mayor parte de la cordillera Central está conformada por rocas metamórficas de corresponden al Grupo Cajamarca (Pzc), localizado hacia las partes altas de la cordillera y el Complejo Arquía (Pzb y Pzr), localizado hacia la parte media del flanco occidental de la cordillera (Nivia, 2001).

Rocas del Mesozoico: Las rocas metamórficas del Oriente Colombiano se presentan intruidas por granitoides calco-alcinos triásicos y jurásicos. Por otra parte, asociado espacialmente a las rocas de los complejos Cajamarca y Arquía, aunque siempre con contactos fallados, se presenta una secuencia volcano-sedimentaria del Cretácico inferior, el Complejo Quebrada Grande, y varios cuerpos plutónicos de composición ultramáfica y máfica (Nivia, 2001).

Rocas del Terciario: Las rocas del Terciario que afloran en el municipio de Palmira hacen parte de un cuerpo ígneo y una secuencia sedimentaria conformada por conglomerados y tobas arenosas.

Depósitos del Cuaternario: Los depósitos del Cuaternario presentes en el área del municipio de Palmira están relacionados principalmente con la dinámica fluvial de los ríos que descienden de la cordillera Central y que se mezclan en el valle aluvial del río Cauca, con los depósitos de este. Entre los principales depósitos tenemos los aluviones (Qal), que dependiendo su de su posición espacial pueden presentar un predominio arcilloso (arc) o arenoso (ar) y los depósitos de cono aluvial (Qca) localizados en el piedemonte de la cordillera, donde los valles estrechos por donde bajan los ríos, se abren al valle aluvial depositando los materiales transportados y de los cuales se puede diferenciar hasta cuatro (4) clases diferentes. Estos conos normalmente son depósitos múltiples que tienen en general poca estratificación y están compuestos de canto, guijarro y grava con cantidades menores de arena, limo y arcillas. Son depósitos dinámicos y su composición refleja la geología regional de la cordillera. Junto a estos se encuentran los abanicos coalescentes (Qac), que corresponden a la depositación de diferentes eventos aluviales de los diversos cuerpos hídricos y que se encuentran mezclados y no se pueden separar o diferenciar.

Por encima de los 3200 m.s.n.m., parte alta de la cordillera Central; se localizan una serie de depósitos de origen glacial (Qg) y a medida que se desciende por los valles intramontanos, es posible encontrar diferentes niveles de terrazas aluviales (Qt) asociadas a la dinámica de los ríos y quebradas y a los movimientos recientes sobre las fallas principales de la cordillera y

una serie de depósitos aluviales estrechos y alargados sobre ambas márgenes de las diferentes corrientes hídricas (Qal). Adicionalmente se encuentra una serie de depósitos de vertiente (Qco) localizados a media ladera como consecuencia de la meteorización de la roca In-Situ y su posterior transporte y depositación como consecuencia de la acción de la gravedad, el agua y el viento (ver Figura 10).

- **Geología estructural**

Sistema de Fallamiento N 20° - 30° E: En el municipio de Palmira las fallas que hacen parte de este sistema corresponden al Sistema de Fallas de Romeral, que ponen en contacto las rocas metamórficas del Paleozoico con las rocas de la Formación Amaime (JKa), entre estas fallas podemos encontrar las fallas de Coronado y Toche y la Falla de Guabas – Pradera que pone en contacto las rocas del Complejo Ofiolítico de Ginebra (JKgo) con las rocas de la Formación Amaime (JKa), las fallas Poterillos y Pamira-Buga.

Sistema de Fallamiento N 40° - 50° W: Denominado “tipo Salento” (Lozano, 1986) ocurre en tramos segmentados dispuestos a manera de echelon a lo largo de los cuales se identifican movimientos sinestrales que desplazan la trayectoria de las Fallas N20° - 30° E. El inicio del movimiento de este sistema se desconoce, pero el hecho que flexione ejes de pliegues post – miocénicos y que presenten varios rasgos cuaternarios asociados indican que su actividad se extiende hasta el Reciente (McCourt et al., 2001).

Sistema de Fallamiento N 60° - 70° E: Este sistema de fallamiento al que algunos autores se refieren como “Cucuana” (Lozano, 1986) consiste en zonas de cizallamiento compuestas por numerosas fallas locales a lo largo de las cuales se presentan desplazamientos con sentido dextral característico, del orden de unas pocas decenas de metros. Los componentes individuales de estas fallas no parecen afectar el Sistema principal N 20° - 30° E. Este sistema no tiene relación temporal con el sistema N 20° - 30° E, mientras que se observan movimientos laterales derechos que desplazan cuñas de rocas limitados por fallas orientadas N 40° - 50° W (McCourt et al., 2001).

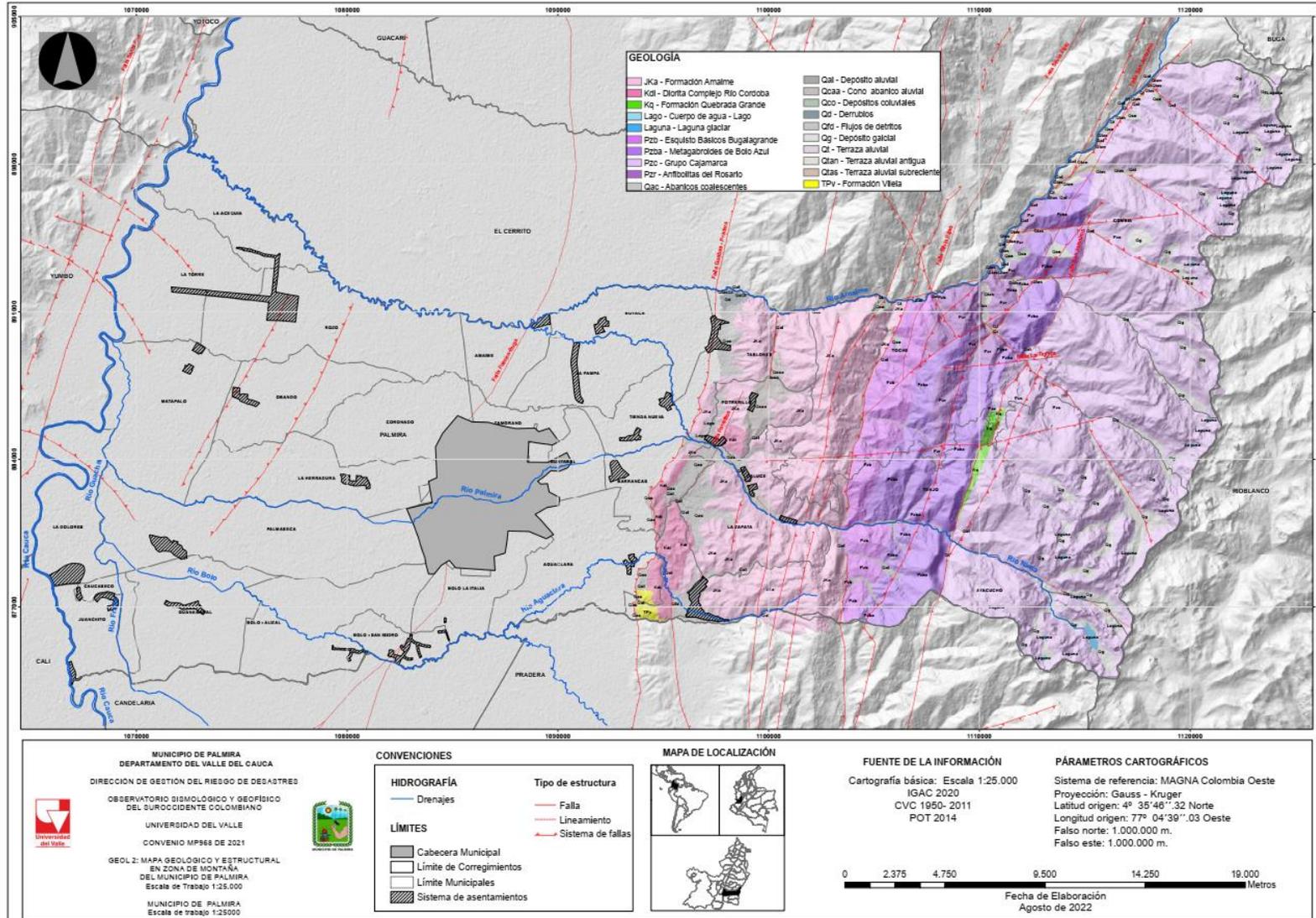


Figura 10. Mapa geológico y estructural (GEOL 2)
Fuente: Elaboración propia

▪ Cobertura y uso del suelo

Conceptualmente se ha logrado la separación entre cobertura y uso de la tierra, que anteriormente se empleaban indistintamente; el término "Uso" implica la utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano. El IDEAM (2018) describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima la Figura 11 exhibe la distribución espacial de las coberturas presentes en el área de estudio.

A continuación, se describen los tipos de cobertura de la tierra más característicos del municipio siendo el resultado de recopilación de cartografía e información existente, observaciones en campo y análisis de imágenes aéreas, en este se puede encontrar las siguientes unidades:

Superficies de agua: El área cubierta bajo superficies de agua es de 318,77 ha, las cuales se distribuyen desde los 1600 a 4300 m.s.n.m en coberturas como: Ríos, lagunas, canales y estanques para acuicultura. Los grupos hidrológicos de suelo (D) identificados para estos cuerpos permanentes y temporales de agua, permiten comprender como los suelos presentes en estas áreas, a pesar de caracterizarse por un amplio rango de profundidades efectivas (desde muy superficiales a moderadamente profundos), permiten porcentajes de infiltración muy mínimos, situación que respalda los valores de curva número encontrados.

Territorios artificializados: Para estas coberturas, distribuidas entre los 1600 y 3500 m.s.n.m, se encontraron uso residencial y la red vial que se relacionan, para el caso de área con presencia de suelos del grupo hidrológico C, son suelos caracterizados por un drenaje imperfecto, debido a la presencia de texturas finas que ralentizan el movimiento del agua hacia los flujos de recarga de acuíferos (Márquez, 2021).

Territorios agrícolas: Los territorios agrícolas entre los 1600 a 2500 m.s.n.m cubren un área total de 3634,34 ha y, se caracterizan por la presencia de café bajo árboles frutales de chirimoya, cítricos en general, mamei, zapote, mango, guamo, aguacate guayaba entre otros. En estas coberturas predominan los números de curva 83, asociados a grupos hidrológicos de suelo C, con profundidades efectivas que van desde superficiales a profundas.

Las coberturas entre los 2500 y 3000 m.s.n.m. ocupan un área de 4252,82 ha, y se caracterizan por la presencia pastos enmalezados y sistemas silvopastoriles, con un amplio rango de profundidades efectivas (< 25 a > 150 cm). Este comportamiento puede relacionarse con los tipos de grupos hidrológicos de suelos presentes en la zona (A, B) y a la actividad ganadera en la zona.

Las coberturas entre los 3000 y 3500 m.s.n.m. cubren un área de 3772,04 ha y se relacionan con actividad ganadera principalmente, ya que son caracterizadas por matrices de pastos cultivados monoestratos, enmalezados y en mosaico que no superan los dos estratos. En estas coberturas se encuentran asociados a suelos de los grupos hidrológicos B y C

principalmente; en estas coberturas las profundidades encontradas van desde muy superficiales a profundas. En cuanto a las coberturas entre los 3500 a 4300 m.s.n.m. estas cubren un área de 361,70 ha, profundidades efectivas superficiales y profundas, y están dominadas por pastos cultivados, enmalezados y arbolados con más de dos estratos de árboles.

Bosques y áreas seminaturales: Las coberturas asociadas a bosques y áreas seminaturales entre los 1600 y 2500 m.s.n.m. ocupan un área de 2959,66 ha, caracterizadas por bosques fragmentados con pastos y cultivos, bosques fragmentados con vegetación secundaria en proceso de sucesión natural y bosques de galerías y riparios.

Entre los 2500 y 3000 m.s.n.m. las coberturas de bosques y áreas seminaturales cubren un área de 7470,16 ha, en donde se encuentran principalmente coberturas de arbustales abiertos, los cuales presentan un dosel interrumpido que demuestra intervención, además, a estas alturas predominan las plantaciones forestales de coníferas, especialmente de eucalipto y diferentes tipos de bosques abiertos y fragmentados multiestratos, desde 1 m hasta más de 15m de altura en la vegetación.

Entre los 3000 a 3500 m.s.n.m, las coberturas boscosas y seminaturales ocupan un área de 5998,78 ha y, se caracterizan principalmente por la presencia de herbazales densos y bosques densos altos, en donde predominan árboles de gran porte, con alturas superiores a los 15 m y que expresan un dosel homogéneo, igualmente encontramos bosques abiertos, en donde la intervención es reducida y no se presenta alteración de la estructura y funcionalidad original. Las coberturas presentes por encima de los 3500 m.s.n.m se caracterizan especialmente por bosques densos altos y herbazales densos, sin embargo, predominan a suelos calificados hidrológicamente como tipo A y C.

En las áreas húmedas presentes entre los 1600 y 2500 m.s.n.m. predominan las zonas pantanosas artificiales y naturales, las cuales son el resultado de vegas de ríos y llanuras de inundación natural, así como zonas de inundación con fines agropecuarios, especialmente para riego de cultivos.

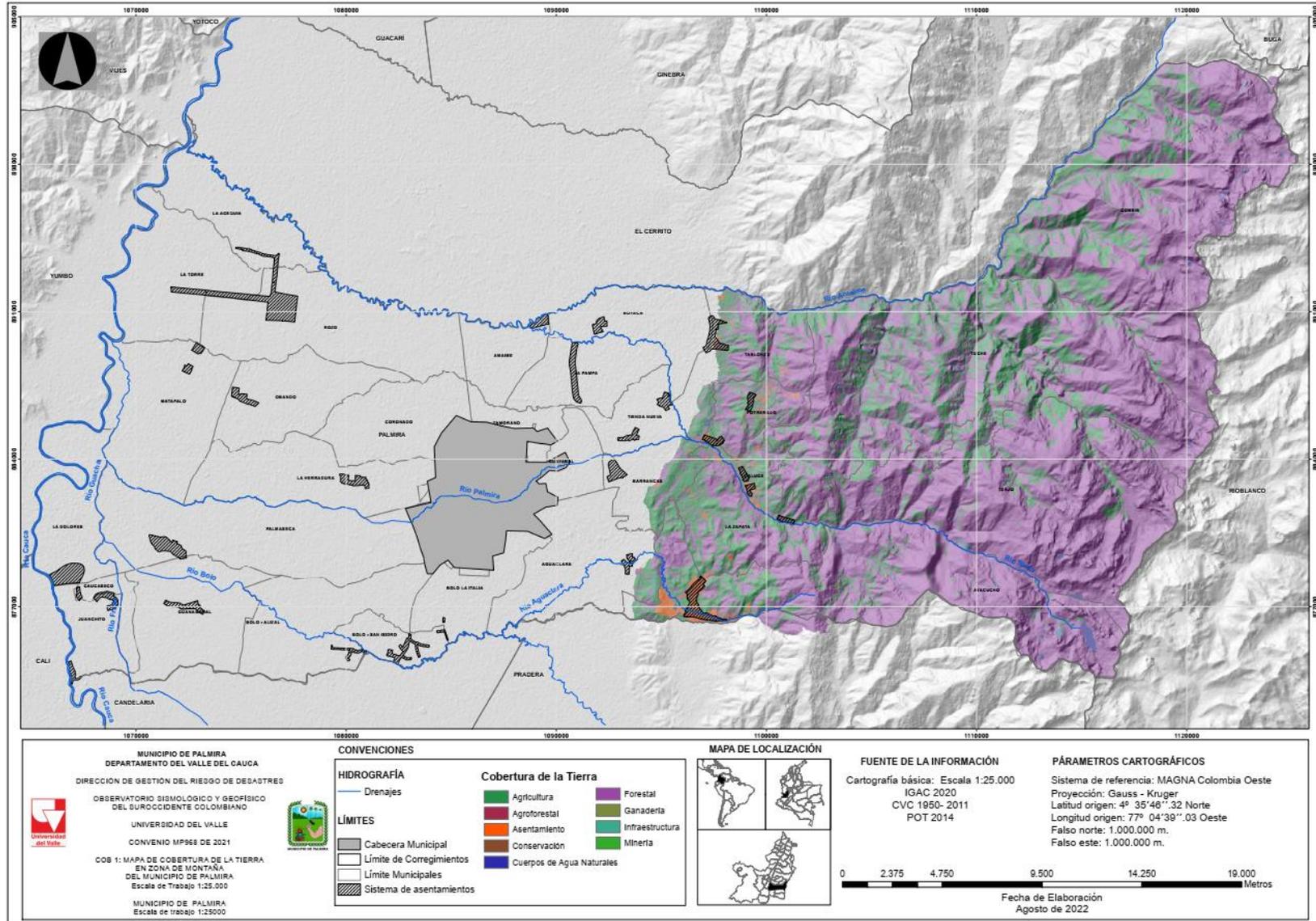


Figura 11..Mapa Coberturas de la tierra (COB 1)

Fuente: Elaboración propia

▪ Subunidades Geomorfológicas

Para la clasificación geomorfológica se tuvo en cuenta las características genéticas, el tipo de paisaje y relieve, la expresión morfológica, la posición topográfica, el grado de disección, el patrón de drenaje, el patrón textural y la densidad de fracturamiento. Para la descripción y clasificación de las unidades geomorfológicas en el municipio de Palmira, se utilizó la categorización geomorfogenética del Servicio Geológico Colombiano (Carvajal, 2012). También se tuvo en cuenta las unidades geológicas cartografiadas a la escala del proyecto, 1:25.000.

En el análisis geomorfológico se usaron los datos de teledetección y la cartografía regional o local. La caracterización geomorfológica comprendió el levantamiento de datos estratigráficos y datos que inciden en el comportamiento mecánico de los materiales, caracterización sobre litología y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos semejantes, así como la descripción de secuencias estratigráficas en afloramientos y definición de puntos de muestreo.

Los ambientes morfogenéticos hacen alusión a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se generaron las geoformas. Su determinación se realiza con base en la expresión e interpretación de los procesos morfológicos asentados en el terreno, los cuales impulsaron la formación, evolución y modificación de las geoformas. En la Tabla 7 se presentan las nueve (9) categorías de ambientes morfogenéticos.

Tabla 7. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio

Ambiente	Descripción
Estructural (S)	Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra; asociada a la plegamientos y fallamientos.
Vulcánico (V)	Todas aquellas geoformas generadas por la intrusión o extrusión de materiales fundidos procedentes del interior de la tierra.
Denudacional (D)	Determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales y principalmente producto de los procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas pre-existentes.
Fluvial y Launar (F)	Corresponde a las geoformas generadas por procesos de erosión y acumulación donde el agente principal son las corrientes de agua tales como ríos, quebradas, arroyos, lagos y lagunas.
Marino y Costero Glacial y Periglacial	Corresponde a todas aquellas geoformas construidas por las corrientes y procesos del mar; incluidos los deltas.
Eólico	Corresponden a las geoformas erosivas y de acumulación sedimentaria, formadas por la acción de los vientos especialmente en los climas áridos.
Kárstico	Formas del terreno producto de la meteorización y dilución de rocas y materiales propensos a la dilución

Ambiente	Descripción
Antropogénico	<p>en ambientes húmedos y cálidos; tales como la caliza y sal.</p> <p>Corresponde a todas aquellas geoformas producto de la actividad del hombre y que modifican la superficie del terreno.</p>

Fuente: Tomado y modificado (Carvajal, 2012)

Teniendo en cuenta los criterios descritos y los ambientes morfogenéticos de la Tabla 4-5, como resultado de la fase de fotointerpretación y el trabajo en la fase de campo para el municipio de Palmira se determinó la existencia de cinco (5) ambientes morfogenéticos; denudacional (D), estructural (S), fluvial (F), glacial (G), y antropogénico (A); lográndose determinar 17 subunidades para el ambiente denudacional (D), 15 para el estructural (S), 18 para el fluvial (F), 10 para el glacial (G) y 3 para el ambiente antropogénico; los cuales se encuentran distribuidos espacialmente como se ilustra en la Figura 12.

- **Curvatura**

Variable que muestra la relación concavidad/convexidad del terreno. Este factor puede controlar el comportamiento hídrico y sedimentológico de las laderas, y es generada a partir del DEM; los valores negativos indican que la superficie es cóncava hacia la celda, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores de 0 corresponde a una superficie plana. En la siguiente figura se presenta el mapa de curvatura.

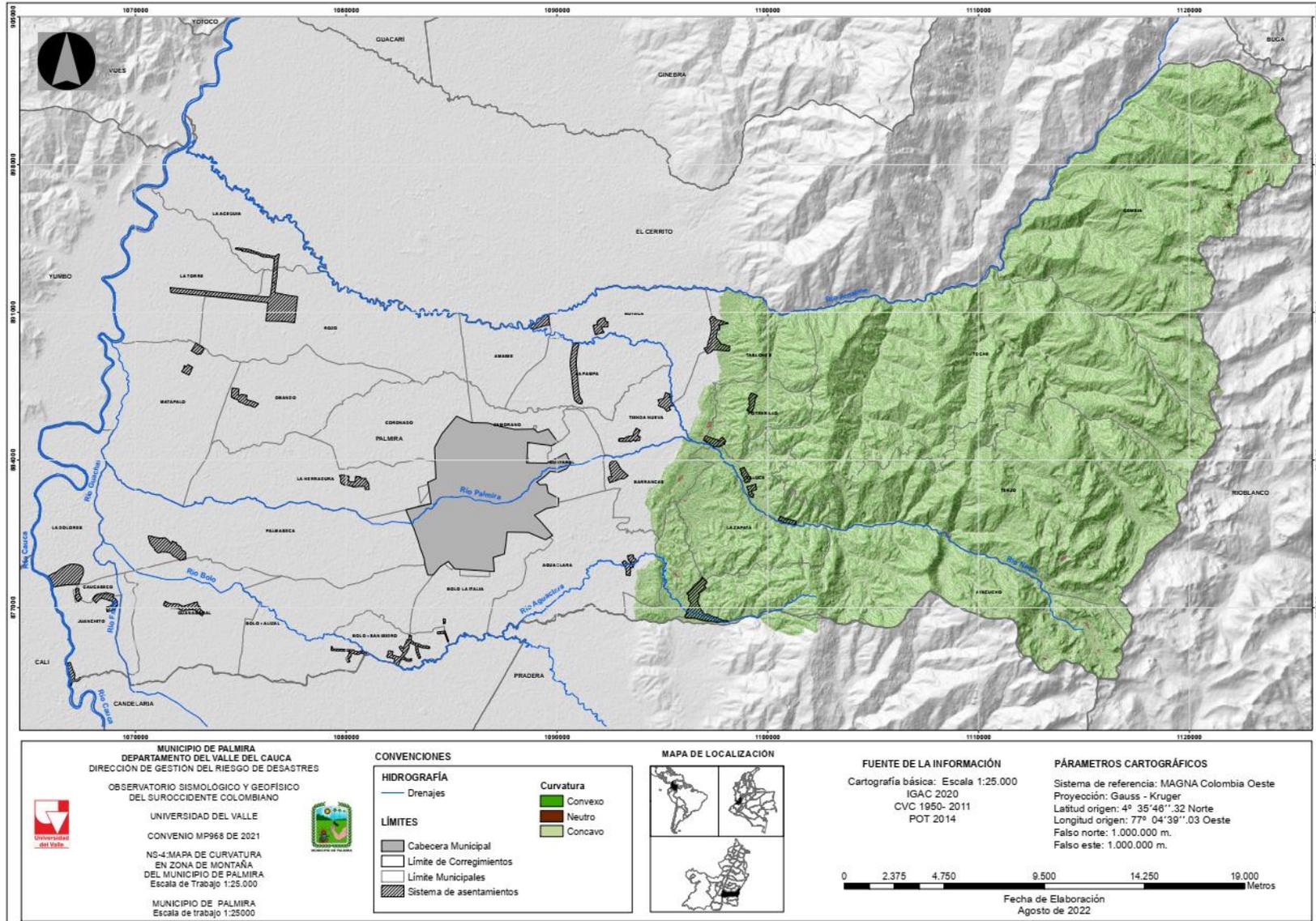


Figura 13. Mapa Curvatura (INS-4)
 Fuente: Elaboración propia.

▪ **Procesos morfodinámicos (Movimientos)**

Los procesos de movimientos en masa tienen múltiples causas, tales como las condiciones geológicas, geomorfológicas y factores externos como las precipitaciones y los terremotos, los últimos, se consideran el estímulo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar grandes volúmenes de material. Igualmente, la distribución de los deslizamientos permite analizar la propensión de la zona ante el fenómeno natural. Los movimientos serán la variable dependiente, la cual, se cruzará con las otras variables.

La urbanización modificó en algunos sectores la morfología del paisaje natural, generando nuevas formas y nuevos procesos que modifican el terreno y que se convierten en amenazas para sus habitantes generando procesos erosivos y movimientos en masa.

Según los procesos morfodinámicos, en la zona montañosa del municipio de Palmira se han presentado 751 deslizamientos, los cuales sirven de validación del modelo de amenaza por MM. A continuación, en la Figura 14 se muestra la distribución de cada uno de los movimientos.

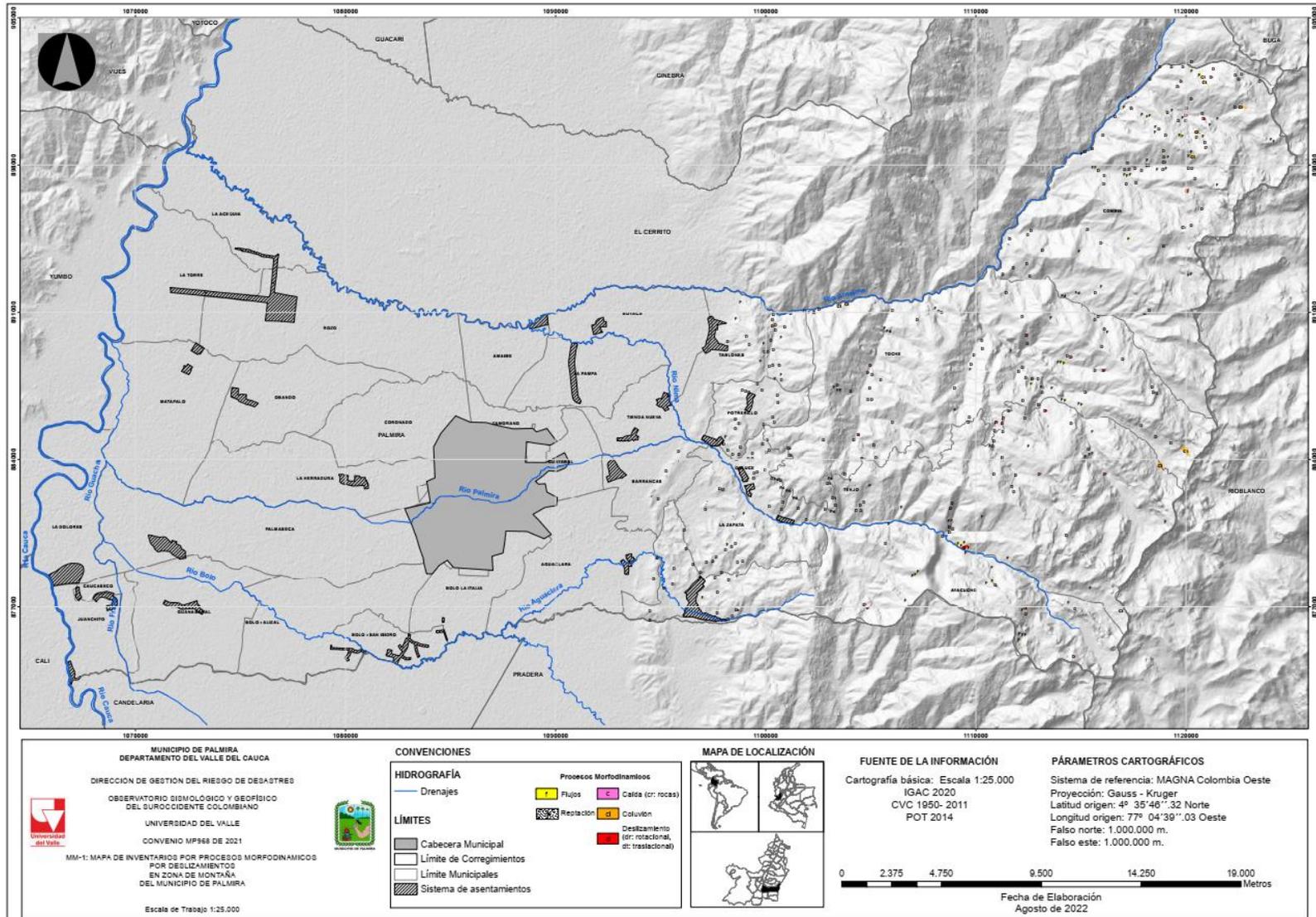


Figura 14. Mapa Inventario de procesos morfoodinámicos (MM-1)

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Caída

Para el análisis de movimientos en masa tipo caída a escala 1:25.000 se ha propuesto un método empírico basado en subunidades geomorfológicas indicativas de inestabilidad, definidas a partir de mapeo directo. Es importante tener en cuenta que esta primera aproximación puede ser complementada con caracterización geomecánica del macizo, análisis cinemáticos y análisis de estabilidad por equilibrio limite.

Como se han definido algunas subunidades geomorfológicas indicativas de inestabilidad por movimientos tipo caída, las cuales serán la base para el análisis de susceptibilidad (no se realizaron análisis de estabilidad ni la caracterización geomecánica del macizo rocoso). Con el fin de integrar características topográficas y el estado de los macizos rocosos, se deben tomar algunos de los datos generados tanto en la temática de UGS como del DEM para la aplicación de los criterios propuestos para el análisis de susceptibilidad. Estos criterios pueden ser ajustados o modificados de acuerdo con las particularidades del área de estudio y con base en la información obtenida del inventario de procesos.

El análisis de susceptibilidad se compone de:

- Identificación de posibles áreas fuente o zonas de inicio
- Identificación de posibles zonas de depósito

Para la identificación de las áreas fuente se propone superponer las siguientes capas de información:

- Laderas muy escarpadas (> 45° de inclinación)
- Subunidades geomorfológicas indicativas
- Unidades de roca (mapa de UGS)

Dado que los movimientos tipo caída se producen comúnmente en unidades morfológicas muy escarpadas (Michoud et al., 2012), se ha establecido como umbral mínimo para análisis de susceptibilidad la inclinación del terreno igual o superior a 45°. Sin embargo, si los datos del inventario indican umbrales mayores en algunos materiales y condiciones específicas, estos pueden ser considerados en el análisis. De igual forma con las subunidades geomorfológicas indicativas, las cuales se pueden complementar con otras que se consideren directamente relacionadas con este tipo de procesos en diferentes ambientes geológicos.

Una vez realizada la superposición de los datos se propone aplicar la siguiente tabla para la categorización de la susceptibilidad por zonas de inicio o áreas fuente (Tabla 8): Para la identificación de posibles zonas de depósito se deben extraer los polígonos de depósito de caídas del inventario de procesos y las zonas de inicio del mapa de subunidades geomorfológicas, y categorizar la zona de estudio como se presenta en la Tabla 9.

El mapa de susceptibilidad final por movimientos en masa tipo caída se elabora a partir de la combinación de los mapas de susceptibilidad por zonas de inicio y de depósito, de acuerdo con la Tabla 10.

Tabla 8. Categorización de la susceptibilidad por zonas de inicio de movimientos en masa tipo caída

Clase o categoría de susceptibilidad	Descripción de los criterios
Alta	Zonas con pendientes mayores a 45° Presencia de subunidades geomorfológicas indicativas Macizos rocosos de mala y muy mala calidad
Media	Zonas con pendientes mayores a 45° Presencia de subunidades geomorfológicas indicativas Macizos rocosos de regular calidad
Baja	Zonas con pendientes menores a 45° No se encuentran subunidades geomorfológicas indicativas Macizos rocosos de buena y muy buena calidad

Fuente: SGC 2017

Tabla 9. Categorización de la susceptibilidad por zonas de depósitos de movimientos en masa tipo caída

Clase o categoría de susceptibilidad	Descripción de los criterios
Alta	Evidencias de zonas de depósito de procesos recientes
Media	Evidencias geomorfológicas de zonas de depósitos antiguas
Baja	No hay evidencias geomorfológicas o registros de inventario de zonas de depósito de rocas por movimiento tipo caída.

Fuente: SGC 2017

Tabla 10. Matriz para la categorización de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída

Susceptibilidad por zona deposito	Susceptibilidad por zona de inicio o fuente		
	Baja	Media	Alta
Baja	Baja	Media	Alta
Media	Media	Media	Alta
Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: adaptada de Van Westen (2013)

5.1.3. Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Flujo

En Colombia, las propuestas metodológicas para la evaluación de susceptibilidad y amenaza por flujos clasificados como avenida torrencial a escala 1:25.000 son frecuentemente geomorfológicas y de criterio experto, debido a la necesidad de información y la complejidad para el uso de modelos numéricos o analíticos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL, 2013). De acuerdo con Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL (2013), los movimientos en masa tipo flujo (de lodos y detritos) que han sido clasificados como avenida torrencial, se presentan en cuencas con características morfométricas y climáticas particulares como las siguientes:

Tamaño de la cuenca: cuencas pequeñas entre 0,3 km² y 150 km², algunos autores refieren tamaños hasta de 300 km².

Forma de cuenca: cuencas con formas circulares. Para la definición de la forma de la cuenca se pueden usar índices como el de Gravellius, que relaciona el perímetro de la cuenca y su área; o el factor de forma que además utiliza la longitud axial de la cuenca. Estos índices permiten tener una idea de la probabilidad de crecientes (Monsalve, 1999).

Pendiente: cuencas con valores de pendiente media en sus laderas entre 27° y 38° (Chen & Yu, 2011), y pendientes longitudinales del cauce mayores a 12° (Horton, 2013).

Geomorfología: los flujos se presentan especialmente en cuencas con cañones en V, relieves abruptos y cambios bruscos de pendiente del cauce y en general, se evidencian depósitos de material fluviotorrencial.

Precipitación: cuencas localizadas en zonas con precipitaciones de alta intensidad.

Con el fin de considerar el escenario de movimientos en masa tipo flujo en el análisis de susceptibilidad, es necesario evaluar las anteriores características para validar los criterios usados y resultados obtenidos con la aplicación de esta u otra propuesta metodológica.

Una vez se cuente con las características morfométricas indicativas de ocurrencia de flujos en la cuenca, se propone para el análisis de susceptibilidad a escala 1:25.000 la identificación de zonas susceptibles a ser afectadas mediante el mapeo directo de subunidades geomorfológicas. El objetivo de los análisis a esta escala es identificar las zonas posiblemente afectadas por el depósito de estos procesos, en las cuales se deberán ejecutar estudios detallados para el análisis y evaluación de amenaza. Naturalmente, los criterios aquí presentados no sustituyen en ningún caso los resultados que se puedan obtener de la aplicación de metodologías o modelaciones analíticas o numéricas.

La susceptibilidad se obtiene a partir de la cartografía de subunidades indicativas. En este caso, se propone extraer estas zonas directamente del mapa geomorfológico y categorizar su susceptibilidad con base en las características que las definen (Tabla 11). Como se mencionó anteriormente, existen geoformas que pueden constituir posibles zonas de aporte de material durante el tránsito del flujo, las cuales a criterio del experto pueden también ser mapeadas como zonas de susceptibilidad.

Tabla 11. Categorización de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo

Clase o categoría de susceptibilidad	Unidad/Subunidad geomorfológica
Alta	Dlcad, Dlcar, Faaac, Fcdy
Media	Faas
Baja	Faaa, Faai

Fuente: SGC 2017

Tabla 12. Unidades / subunidades indicativas de procesos de flujo

Ambiente geomorfológico	Unidad/subunidad geomorfológica	Acrónimo
Denudacional	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	Dft
	Lóbulo y cono de avalancha de detritos	Dlcad
	Lóbulo y cono de avalancha de rocas	Dlcar
Fluvial	Abanico aluvial	Faa

Ambiente geomorfológico	Unidad/subunidad geomorfológica	Acrónimo
	Abanico aluvial antiguo	Faaa
	Abanico aluvial subcreciente	Faas
	Abanico aluvial actual	Faac
	Abanico aluvial incisado	Faai
	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (bajadas)	Fac
	Cono de deyección	Fcdy

Fuente: SGC 2017

5.1.4. Susceptibilidad Final por movimientos en masa (consolidado)

De acuerdo con la revisión de los resultados compilados en SGC (2017a), en los que se presentan los deslizamientos como los tipos de movimientos en masa más frecuentes en la mayoría del territorio colombiano, se propone tomar como base para la zonificación de susceptibilidad los resultados obtenidos en el análisis por movimientos tipo deslizamiento. Aunque los factores condicionantes y su combinación pueden diferir entre uno y otro tipo de movimiento, pueden existir áreas en que se superpongan zonas de susceptibilidad de diferentes tipos de movimiento, por lo que se propone el siguiente procedimiento en herramientas SIG:

1. Superponer las zonas de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamientos y caídas.
2. Aplicar la matriz presentada en la Tabla 13.
3. Reclasificar de acuerdo con las categorías de la matriz.
4. Superponer las zonas de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo.
5. Aplicar la matriz presentada en la Tabla 13, dejando en las columnas las zonas de susceptibilidad obtenidas en los pasos 1, 2 y 3, y en las filas, las zonas de susceptibilidad por flujos.
6. Reclasificar de acuerdo con las categorías de la matriz.
7. Superponer los polígonos de reptación.

En el mapa de susceptibilidad final se deben diferenciar las zonas de susceptibilidad por tipo de movimiento en masa y se deben superponer los movimientos en masa del inventario de procesos diferenciando tanto el tipo de movimiento como su identificador. Adicionalmente, deben incluirse los rasgos geomorfológicos presentados.

Tabla 13. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes movimientos en masa

Susceptibilidad por zona depósito	Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento		
	Baja	Media	Alta
Baja	Baja	Media	Alta
Media	Media	Media	Alta
Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: SGC 2017

5.1.5. Leyenda del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa

La leyenda del mapa de susceptibilidad debe incluir tanto información relacionada con los tipos y subtipos de movimiento en masa en la zona de estudio, como las características o factores condicionantes que determinan la mayor o menor posibilidad de ocurrencia de cada tipo de movimiento en las categorías de susceptibilidad.

Susceptibilidad Muy Alta: corresponde a los movimientos en masa obtenidos en el inventario de procesos morfodinámicos. En estas áreas se incluyen los movimientos tipo deslizamiento y caída. Los polígonos de flujos clasificados como avenida torrencial o reptación no hacen parte de esta categoría.

Susceptibilidad Alta y Media: en estas categorías debe incluirse la descripción de los tipos de movimiento que pueden ocurrir y una descripción breve de los factores geoambientales que condicionan esta posibilidad, haciendo énfasis en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados obtenidos en el análisis de cada tipo de movimiento. Cada tipo de movimiento está condicionado por un factor o una combinación de factores específica, que debe describirse de manera precisa en la leyenda.

Susceptibilidad Baja: descripción de las características geoambientales que condicionan la ausencia o muy baja posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa. Esta descripción también debe estar basada en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados de los análisis por tipo de movimiento que se hayan realizado.

5.2. Amenaza por movimientos en masa

El análisis de amenaza por movimientos en masa puede ser abordado desde diferentes enfoques y metodologías, que a su vez dependen de los objetivos, la escala de trabajo y la calidad de los datos disponibles.

En escalas medias la amenaza se caracteriza teniendo en cuenta el tipo de movimiento en masa (deslizamiento, flujo y caída), la probabilidad espacial relacionada con la susceptibilidad, la probabilidad temporal expresada normalmente en términos de frecuencia, periodo de retorno o probabilidad de excedencia (Corominas & Moya, 2008), y su intensidad o magnitud como una medida del daño que puede causar, propuesto por distintos autores como una función del volumen (o área) y la velocidad esperada (Cardinali et al., 2002; Portilla et al., 2010), estableciendo también relaciones magnitud - frecuencia (M-F) en las que se conoce la frecuencia esperada de ocurrencia de un movimiento en masa de una magnitud dada.

Un análisis de amenaza por movimientos en masa, que permita establecer características espaciales, temporales y de intensidad, depende fundamentalmente de la disponibilidad de inventarios de movimientos en masa basados en eventos o multitemporales, en los que se pueda establecer una relación directa entre la frecuencia de ocurrencia de un tipo de

movimiento en masa y un evento detonante, que además permitirá realizar análisis magnitud-frecuencia. Este tipo de inventarios se deben elaborar casi inmediatamente luego de la ocurrencia del evento detonante, por lo que en la mayoría de las áreas del país no se cuenta con este tipo de información.

Considerando la incertidumbre y las posibles limitaciones de información de precipitaciones y sismos que detonan movimientos en masa, se propone en conservar los límites espaciales de las categorías del mapa de susceptibilidad en el mapa de amenaza y caracterizarlas en términos de su probabilidad espacial, su probabilidad temporal y su magnitud (van Westen et al., 2014). Las características de intensidad se pueden incorporar en términos de evaluación de las distancias de viaje en movimientos en masa tipo caída y flujo, con metodologías empíricas a partir del mapeo geomorfológico o uso de modelos como Flow-R. En este caso se propone el análisis de magnitudes en términos de áreas o volúmenes para el caso de deslizamientos, tomando como base la información del inventario multitemporal o de eventos, de áreas o volúmenes y frecuencias para flujos y de tamaño de bloques o volúmenes para movimientos en masa tipo caída.

En cada categoría de amenaza se debe presentar la siguiente información:

- Probabilidad espacial: la probabilidad de que un pixel localizado dentro de una clase de susceptibilidad sea afectado por la ocurrencia de un movimiento en masa.
- Probabilidad temporal: definida en términos de la frecuencia de ocurrencia de movimientos en masa y descrita en términos de probabilidad empírica o por correlación con los valores críticos de los detonantes que pueden explicar la inestabilidad, denominados por Corominas et al., (2013) como enfoques indirectos.
- Magnitud: una medida aproximada de la intensidad del evento, en términos de áreas afectadas, volúmenes o tamaños de material.

Con el fin de elaborar mapas de amenaza cada vez más completos, se deben realizar esfuerzos por parte de las entidades del orden nacional y regional para recopilar información que permita mejorar en el futuro el conocimiento de las relaciones lluvias-deslizamiento y sismos- deslizamientos, y establecer funciones que consideren además escenarios de cambio climático y el incremento en la frecuencia de los movimientos en masa causados por la actividad humana (Remondo et al., 2005). Sin embargo, si los planes de acción para gestión del riesgo y ordenamiento territorial incluyen obras civiles para la mitigación de la amenaza, estas deberán tomar en cuenta los nuevos escenarios de cambio climático (IDEAM et al., 2015).

Para la caracterización de la amenaza es necesario integrar las categorías de susceptibilidad alta y muy alta, de tal manera que se cuente solo con tres categorías de amenaza de acuerdo

con la normatividad vigente (Decreto 1807 de 2014). De esta forma se tendrán tres categorías de amenaza como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes tipos de movimientos en masa

Clase o categoría de susceptibilidad	categoría de amenaza
Muy Alta	Alta
Alta	Alta
Media	Media
Baja	Baja

Fuente: SGC 2017

5.2.1. Probabilidad Espacial

La probabilidad espacial de ocurrencia de un tipo de movimiento en masa específico se define para las tres categorías de amenaza. Cada una de estas áreas tiene una probabilidad de que se genere un movimiento en masa definida por la relación entre el número de píxeles que representan movimientos en masa (zona de inicio o depósito) y el número de píxeles de la categoría de amenaza. Dado que para el análisis de susceptibilidad por deslizamientos se ha propuesto considerar la zona de inicio y de depósito en un solo polígono de agrupamiento, se considera el número de píxeles que representa el área total del movimiento en masa. La susceptibilidad por flujos y caídas, analizada solo para zonas de depósito a partir de evidencias geomorfológicas, no será evaluada en términos de probabilidad espacial, a menos que se complemente con algún modelo que permita establecer la potencialidad de alcance de procesos de este tipo como Flow-R o el método de la línea de energía desarrollado por Heim (1932, citado por Mavrouli et al., 2014), para caídas de roca.

5.2.2. Probabilidad Temporal

El cálculo de la probabilidad temporal en términos de periodos de retorno, frecuencias o probabilidades de excedencia, está enfocado en caracterizar cada categoría de susceptibilidad y en este documento se sugieren diferentes enfoques de acuerdo con el tipo de movimiento en masa, la información disponible y la calidad de la misma.

Dado que para las relaciones lluvia-deslizamiento se cuenta con información multitemporal en la que se pueden establecer, al menos de forma general, periodos de retorno o probabilidades de excedencia anual, es necesario presentar siempre análisis de información para establecer la relación de frecuencias con la detonante lluvia.

En relación con el detonante sismo, los inventarios de movimientos en masa basados en eventos de este tipo son escasos y solo se pueden plantear algunas estimaciones generales a partir de información disponible y curvas teóricas, para establecer una posible relación sismo-deslizamiento. En este caso es muy difícil establecer periodos de retorno o probabilidades anuales.

En los mapas de UGS, geomorfológico y cobertura del suelo, debido a la escala de trabajo, no se aprecian los procesos antrópicos (cortes, excavaciones, rellenos, etc) por lo cual no se tienen en cuenta como proceso detonante en este estudio.

5.2.2.1. Detonante Lluvia

En general, los movimientos en masa más frecuentes son los deslizamientos y se cuenta con un inventario multitemporal con fecha de ocurrencia y con estaciones pluviométricas con registros diarios de precipitación. Los eventos históricos (historicidad) serán la base para determinar la relación lluvias – deslizamientos y se obtendrán las precipitaciones antecedentes de los eventos. En el caso de los inventarios basados en eventos, se establece el periodo de retorno calculado a partir del número de excedencias en el periodo de registro disponible de la lluvia de 24 horas y de la lluvia antecedente representativa, aplicando la probabilidad de Poisson. Sin embargo, si se cuenta con registros de intensidad-duración se establece el periodo de retorno a partir de la respectiva curva de la estación pluviométrica.

Probabilidad de excedencia de un evento

En el caso de un evento de lluvia que detono múltiples movimientos en masa con los cuales se realizó la zonificación de la susceptibilidad, se define la probabilidad de excedencia o periodo de retorno del mismo, así:

- Establecer el número de días antecedentes al evento con lluvia de 24 horas constante.
- Acumular para toda la longitud del registro de lluvia de 24 horas, el número de días antecedentes con lluvia constante. Por tanto, en un año se tiene 365 datos de lluvia antecedente.
- Establecer la distribución de probabilidades de valores máximo aleatorios que mejor se ajusten a los valores máximos diarios anuales y máximos antecedentes anuales. Por tanto, si la longitud del registro es de 30 años, se cuenta con 30 valores máximos.
- Definir, de acuerdo con los resultados del ítem anterior, cual es el periodo de retorno asociado a la lluvia de 24 horas y a la lluvia antecedente definida.
- Calcular la probabilidad de excedencia anual y el periodo de retorno para el cual coinciden las dos variables aplicando la distribución de Poisson

Probabilidad de excedencia de umbrales de lluvia a partir de un inventario multitemporal

Un inventario multitemporal contiene movimientos en masa que fueron detonados en condiciones de lluvia disimiles, por tanto, se establece un umbral de lluvia que represente el conjunto de datos. Se propone establecer la lluvia antecedente de N días. Sin embargo, la lluvia antecedente puede variar de acuerdo con las condiciones del área de estudio, la disponibilidad de información y criterio experto; algunos autores han utilizado diferentes números de días de lluvia antecedente (3, 15, 50 días) (Guzzetti et al., 2007).

A continuación, se enumeran los pasos a seguir para el cálculo de la probabilidad de excedencia:

- Establecer los registros de inventario de procesos con fecha y localización conocida.
- Para cada fecha en la que se registró un movimiento en masa se calcula la lluvia antecedente de N días (sin incluir la precipitación del día en que ocurrió).
- Construir una gráfica en la cual el eje de las abscisas (x) representa la lluvia de los N días antecedentes (P_{Nant}) y en el eje de las ordenadas (y) la precipitación de las 24 horas (P_{24h}) (ver Figura 15).
- Si se cuenta con varias estaciones, para cada una se establece una función que represente el umbral de lluvia a partir de los cuales se detona un movimiento en masa. La representación de los umbrales de lluvia se realiza mediante la Ecuación 7 y se puede establecer a partir de las áreas específicas de análisis o para estaciones pluviométricas definidas (Jaiswal & van Westen, 2009).

$$P_T = b + m * P_{ant} \quad (7)$$

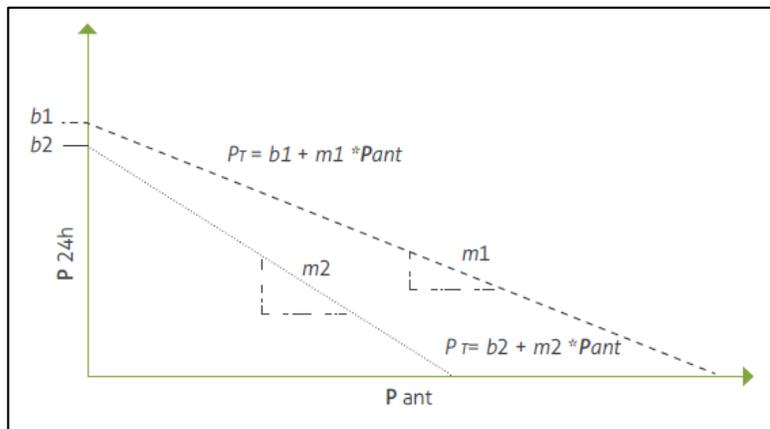


Figura 15. Umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa
 Fuente: SGC 2017

La probabilidad anual de excedencia se estima como la probabilidad de que un evento exceda una o más veces el umbral de lluvia en un periodo de retorno. Para simplificar el modelo se supone que si la cantidad de lluvia en un periodo dado $P(t)$, excede el umbral de lluvia P_T , entonces la probabilidad que se detone el deslizamiento $P[L]$ es igual a 1, siendo estos valores función de la lluvia diaria $P_{24h}(t)$ y de la lluvia antecedente $P_{ant}(t)$. Estas cantidades medidas en mm se obtienen de la (Ecuación 8 y 9):

$$P(t) = f [P_{24h} (t), P_{ant} (t)] \quad (8)$$

$$P[L|P(t) > P_T] = 1 \quad y \quad P[L|P(t) \leq P_T] = 0 \quad (9)$$

De lo anterior se deduce que (10):

$$P[L] = P[P(t) > P_T] \quad (10)$$

La probabilidad anual de excedencia se determina usando un modelo de probabilidad de Poisson, aplicando la Ecuación 11.

5.2.2.2. Detonante Sismo

El estudio de movimientos en masa detonados por sismos ha sido abordado desde diferentes perspectivas, en las que se ha buscado encontrar una línea base para su incorporación en los estudios de amenaza. Keefer (1984) y Rodríguez et al. (1999) compilaron reportes históricos de movimientos en masa detonados por sismos alrededor del mundo, en los que se propusieron algunas relaciones entre la distribución espacial de diferentes tipos de movimiento en masa y parámetros sísmicos como magnitudes mínimas, máxima distancia a la zona epicentral y los movimientos en masa y mínima intensidad para la ocurrencia de un movimiento en masa, las cuales se pueden tomar como base para una primera aproximación en el análisis del detonante sismo.

Es importante aclarar que estas relaciones tienen una alta incertidumbre y no siempre son válidas, debido a las particularidades geoambientales de cada zona de estudio y a la calidad de la información recopilada. Aunque se han realizado algunos esfuerzos recientes para cubrir un amplio espectro de escenarios de análisis, factores como número de movimientos en masa detonados, distribución magnitud-frecuencia de los movimientos en masa y área total afectada por la ocurrencia de movimientos en masa, requieren aun mayor investigación y levantamiento de inventarios de movimientos en masa detonados por sismo bajo diferentes ambientes (Tanyas et al., 2017).

La elaboración de mapas de amenaza considerando escenarios de movimientos en masa detonados por sismo se puede abordar desde dos tipos de análisis: a partir de análisis estadísticos o con el uso de modelos físicos. Cuando se consideran análisis estadísticos, la principal limitación está relacionada con la baja existencia de inventarios de eventos, y con disponibilidad de inventarios de procesos detonados por un único evento sísmico, con los cuales es difícil plantear análisis para futuros escenarios, ya que cada sismo tiene características específicas.

Los modelos físicos como el método de Newmark (Vega & Hidalgo, 2016) no presentan estas mismas limitaciones, pero son aproximaciones muy simplificadas que se enfocan principalmente en deslizamientos superficiales y requieren de información geotécnica detallada.

Los movimientos en masa detonados por sismo en Colombia son generados principalmente en suelos residuales de depósitos volcánicos, suelos transportados de origen aluvial, rocas sedimentarias y depósitos y rocas volcánicas. Los macizos rocosos más afectados estos procesos, son aquellos que están intensamente fracturados por efecto de la actividad tectónica. Los tipos más comunes de movimientos en masa son las caídas y deslizamientos

superficiales en suelo y roca, así como, deslizamientos rotacionales en suelos residuales y derivados de depósitos volcánicos. En todos los casos, los análisis demuestran que la ocurrencia de movimientos en masa incluso en las zonas más lejanas donde las intensidades son menores, dependen de la susceptibilidad del terreno y las condiciones climáticas antecedentes al evento sísmico, por lo que estos datos se deben utilizar con precaución.

Relaciones sismo movimientos en masa

De acuerdo con el trabajo de Keefer (1984), la magnitud mínima para la ocurrencia de un movimiento en masa es 4,0. En Colombia, Rodríguez (2007) encontró que la magnitud mínima histórica en la que se reporta la ocurrencia de movimientos en masa es de $M_s = 5,0$ e intensidades en los niveles VI y VII de la escala de modificada de Mercali. La máxima distancia entre epicentro y ocurrencia de movimientos en masa para Colombia es muy cercana a la encontrada por Keefer (1984), como se presenta en las Figura 16 y Figura 17. La clasificación de movimientos se presenta en dos tipos generales: movimientos en masa coherentes (incluye deslizamientos rotacionales profundos en suelo y roca, y flujos de tierra lentos) y movimientos en masa no coherentes (incluye caídas de roca y suelo, y deslizamientos traslacionales en suelo y planares en roca).

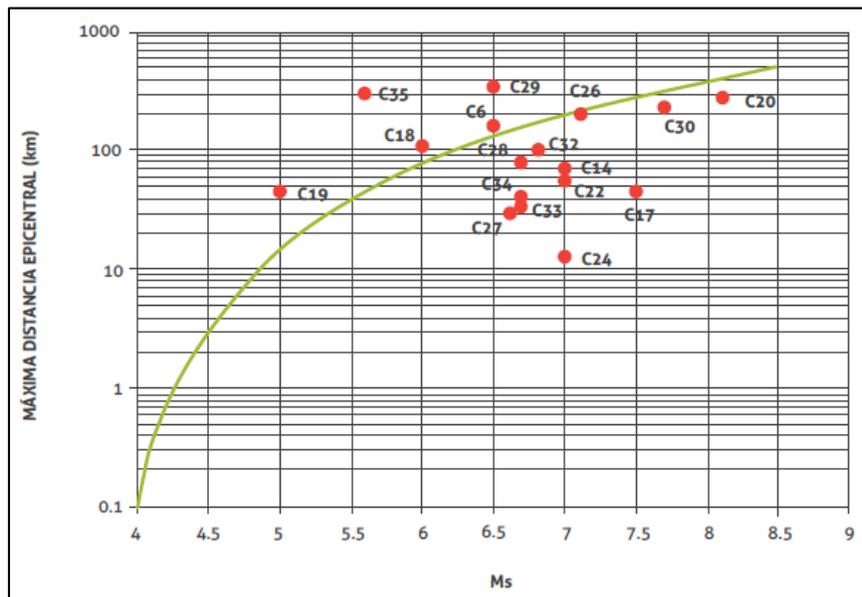


Figura 16. Máxima distancia epicentral para movimientos en masa no coherentes
Fuente: Tomado de Rodríguez (2017).

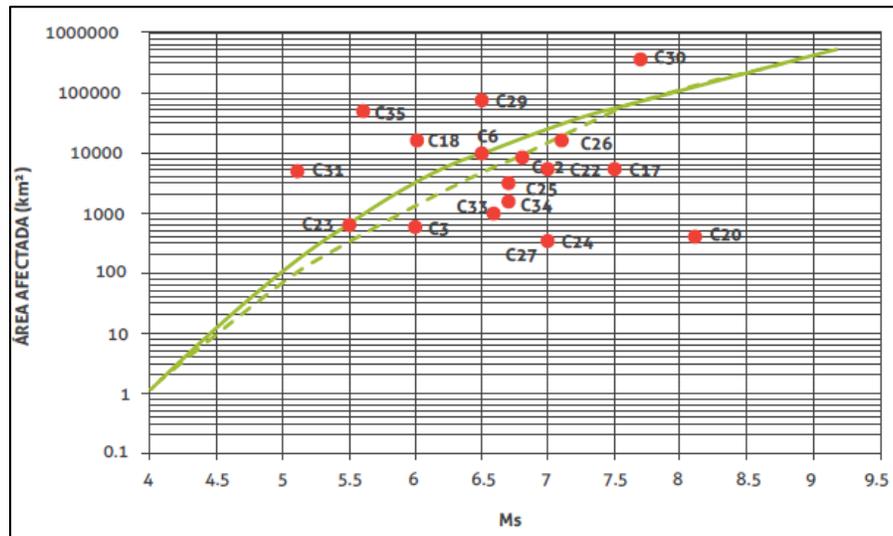


Figura 17. Áreas afectadas por movimientos en masa durante sismos
Fuente: Tomado de Rodríguez (2017).

Existen puntos que se localizan por encima de la envolvente propuesta, los cuales se relacionan con la influencia de lluvias antecedentes. La relación entre área afectada por movimientos en masa y magnitud del sismo se presenta en la Figura 17. Los puntos que se localizan por encima de la envolvente están relacionados con la susceptibilidad inherente de las laderas y las lluvias antecedentes al evento sísmico. Como se observa, en los resultados presentados existe una evidente dispersión en los datos, atribuible a la calidad de la información recopilada y la incertidumbre asociada con las condiciones antecedentes a la ocurrencia del evento. Además, existen otros parámetros sísmicos que podrían ser utilizados en este tipo de análisis como son la intensidad, tipo de falla, amplificación topográfica, profundidad focal, etc. (Havenith et al., 2016), los cuales tendrán que ser considerados en la medida en que avanza el conocimiento en el tema.

Amenaza sísmica

Colombia se localiza dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la Tierra, pues en la región convergen las placas tectónicas de Nazca y del Caribe contra la placa Suramericana. La interacción continua entre las placas Nazca y Suramericana que se mueven y chocan entre sí, ha producido la formación de montañas, cordilleras y fallas geológicas.

El territorio colombiano presenta diferentes niveles de amenaza sísmica (alta, intermedia y baja). Aproximadamente el 83% de la población nacional está ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta.

El municipio de Palmira está expuesta a la actividad sísmica generada por los diversos sistemas de fallas geológicas activas existentes en el país, en mayor o menor grado en función de la distancia de la zona urbana a éstos sistemas.

La amenaza sísmica dicta en gran medida la intensidad de movimiento esperada a nivel de roca para un sitio, sin embargo el movimiento que se puede llegar a sentir en diferentes puntos del municipio, también está influenciado por el tipo de suelo en cada uno de ellos debido a los efectos locales. El municipio de Palmira cuenta con estudios detallados de respuesta dinámica de los suelos por la actividad sísmica regional, conocidos como microzonificación sísmica, la cual no está adoptada y/o reglamentada.

Caracterización del detonante sismo

Para la caracterización del detonante sismo se proponen las siguientes etapas:

Recopilación de información: Se debe recopilar toda la información relacionada con eventos sísmicos presentados en la zona de estudio como el Catálogo sísmico histórico e instrumental de Colombia, Informes de eventos sísmicos importantes, Informes de emergencia y la Base de datos de fallas activas de Colombia (Montes & Sandoval, 2001).

Identificación de movimientos en masa: Durante la elaboración del inventario de procesos morfodinámicos se deben identificar, de forma espacial y temporal, los movimientos en masa detonados por sismos a partir del análisis de todas las fuentes de información disponibles, incluido el trabajo de campo y la comunicación con la comunidad. Es necesario contar con fechas de ocurrencia de movimientos en masa, que permitan hacer una relación con las fechas y características de los eventos sísmicos.

Análisis de parámetros sísmicos: en el caso en que sea posible establecer con certeza la ocurrencia de movimientos en masa detonados por sismo en la zona de estudio y su temporalidad, se deben analizar los parámetros sísmicos asociados como magnitud, distancia epicentral y áreas de afectación. Estos datos se comparan con las curvas de Rodríguez (2007) y se puede establecer a nivel teórico la posibilidad de que nuevos movimientos en masa sean detonados en la zona de estudio por sismos de igual o mayor magnitud que los registrados.

Estimación de temporalidad: Con el fin de definir la temporalidad del detonante se propone la consulta de la Base de datos de fallas activas de Colombia (Montes & Sandoval, 2001) como una aproximación general de la recurrencia de los eventos sísmicos que posiblemente han detonado o detonaran movimientos en masa. Es necesario resaltar que esta es una propuesta teórica cuyo objetivo es la caracterización generalizada de las zonas de estudio y puede diferir de los enfoques y avances en el conocimiento que actualmente se consideran en el estudio de la amenaza sísmica en Colombia. Los registros de eventos sísmicos importantes han sido asociados con fallas activas a escala nacional, las cuales han sido caracterizadas con datos de actividad entre los que se pueden encontrar las magnitudes de sismos e intervalos de recurrencia que dan cuenta de la temporalidad de los eventos. Con la información de localización de las fallas con respecto a la zona de estudio, las características de actividad (magnitudes esperadas e intervalos de recurrencia) y las curvas de parámetros sísmicos en

función de áreas afectadas por movimientos en masa o distancia epicentral máxima, es posible definir la posibilidad de incidencia del detonante sismo en la zona de estudio.

En los casos en que no se encuentre suficiente información que permita establecer la posible ocurrencia de movimientos en masa detonados por sismo, no será posible incluir la caracterización del detonante en los resultados del estudio.

Probabilidad empírica distribución de Poisson

Si no se cuenta con un inventario de procesos morfodinámicos representativo en que se tengan fechas conocidas de ocurrencia de los movimientos en masa, se propone calcular la probabilidad a partir del inventario multitemporal obtenido desde la identificación en sensores remotos de las ocurrencias o reactivaciones de movimientos en masa los cuales cuentan con fecha de toma.

El cálculo de la probabilidad de ocurrencia de futuros procesos tipo deslizamiento se puede ajustar a una distribución de probabilidad como la de Poisson, con base en las estadísticas de los eventos pasados según lo considerado en Crovelli (2000).

De acuerdo con el modelo de Poisson la probabilidad de que se detonen uno o más deslizamientos durante un tiempo t está dada por la Ecuación 11:

$$P(N \geq 1; t) = 1 - (e^{-\lambda t}) \quad (11)$$

Donde,

N es el número de deslizamientos que ocurren durante el tiempo t

λ es el promedio de ocurrencias de deslizamientos en el mismo intervalo de tiempo, el cual se puede obtener del análisis multitemporal de movimientos en masa.

t es el periodo de retorno del evento.

Sin embargo, esta probabilidad está estrechamente ligada a la magnitud de los movimientos en masa y a sus diferentes tipos.

El detonante sismo se obtiene a partir de la aceleración máxima horizontal a nivel de roca. En este caso, se propone la expresión de Donovan (1973), la cual tiene la siguiente forma.

$$a = 1320 e^{0.58 m} (r + 25)^{-1.520} \quad (12)$$

Donde,

a es la aceleración máxima horizontal a nivel de roca (cm/seg^2)

m es la magnitud de onda superficial (Ms)

r es la distancia a la falla (km)

En la Norma Sismo Resistente del año 2010 (NSR-10) y la Amenaza Sísmica de Colombia (AIS-2009) categorizan el sismo en función de la aceleración máxima, como se define en la Tabla 15.

Tabla 15. Categorización del factor detonante sismo

Clase o categoría	Rangos (g)
Muy alta	0.30 – 0.50
Alta	0.20 – 0.30
Media	0.10 – 0.20
Baja	0.00 – 0.10

Fuente: NSR-10 y AIS -2009

5.2.3. Análisis de magnitud

La magnitud de un movimiento en masa es entendida como una medida de su tamaño (Corominas et al., 2015) y puede ser descrita cuantitativamente por su volumen o indirectamente por su área (Portilla et al., 2010; Portilla, 2014). Al igual que para las demás características depende de la información disponible.

Para cada categoría de amenaza se deben analizar los tamaños de movimientos en masa y sus distribuciones de frecuencias (relativas y acumuladas) a partir del inventario de procesos morfodinámicos. Los movimientos en masa tipo caída se pueden analizar en términos de tamaño de bloques o volumen y los deslizamientos en términos de su área o volumen. Para los movimientos en masa tipo flujo clasificados como avenida torrencial se debe estimar la frecuencia de la magnitud de los eventos en términos de volúmenes depositados o al menos de áreas afectadas.

5.2.4. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

El mapa de zonificación de la amenaza debe presentar tres categorías de acuerdo con la Tabla 16. En el mapa producto se deben diferenciar las zonas según el tipo de movimiento analizado y sus características. Para realizar esta zonificación, se toma la susceptibilidad final (consolidado), factor detonante lluvia y sismo y se ejecuta una sumatoria y se reclasifica.

5.2.5. Validación del modelo de amenaza por MM

Para realizar la validación y ajuste de los resultados del modelo de amenaza por movimientos en masa, se debe contar con el inventario de los procesos morfodinámicos (figura 14), además de la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Estos resultados se deben analizar en función de las características geoambientales y la coherencia de los resultados obtenidos. Un porcentaje aceptable de ajuste debe ser igual o superior al 70 % para la amenaza alta y no más del 5% para la amenaza baja.

La validación se realiza al superponer los procesos morfodinámicos (polígonos) con la amenaza por movimientos en masa y poder obtener los porcentajes de amenaza alta, media y baja en cada uno de los procesos. Ejemplo:

Se tiene un deslizamiento rotacional con un área de 20 ha y al superponerlo con la amenaza por MM podemos obtener que de las 20 ha, 17 ha están en amenaza alta (85%), 2 ha en amenaza media (10%) y 1 ha en amenaza baja (5%).

5.2.6. Leyenda del mapa de amenaza por movimientos en masa

En la leyenda del mapa de amenaza se deben presentar las categorías de amenaza junto con las características definidas anteriormente. Además, se deben incluir descripciones estadísticas sobre las áreas de cada categoría en la zona de estudio y localización o cubrimiento geográfico de cada categoría de amenaza. En la Tabla 16 se presenta un esquema para la presentación de estos resultados.

Se ha incluido un campo para la descripción de recomendaciones relacionadas con los requerimientos del Decreto 1807 de 2014 en las zonas de amenaza alta y media, en el cual a criterio de los expertos y con base en los resultados de los análisis se pueden mencionar posibles usos del suelo, implementación de prácticas y medidas para control de erosión, manejo de cultivos, conservación e incluso priorización de zonas para la elaboración de estudios detallados, entre otros.

En las zonas de amenaza baja se pueden sugerir también acciones dirigidas a mantener esta categoría o evitar que cambie a amenaza media o alta. La probabilidad espacial y temporal se debe describir para cada tipo de movimiento analizado en las categorías de amenaza, especificando el método utilizado y las fuentes de información, especialmente las relacionadas con los detonantes considerados.

Tabla 16. Esquema base para la elaboración de la leyenda del mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa

categoría	Descripción de la categoría de amenaza	Tipos y subtipos de movimiento	Probabilidad espacial/porcentaje de movimientos en masa	Probabilidad temporal/frecuencia de ocurrencia	Magnitud	Recomendaciones
Alta		Deslizamientos Caídas Flujos				
Media		Deslizamientos Caídas Flujos				
Baja	Descripción de las características asociadas con la baja probabilidad espacial temporal a la ocurrencia de movimientos en masa					

Fuente: SGC 2017

6. RESULTADOS

En este capítulo vamos a abordar los resultados de las modelaciones de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa.

6.1. Susceptibilidad por movimientos en masa

6.1.1. Susceptibilidad Tipo Deslizamiento

A partir del método Bivariado, se establecen las áreas que podrían ser propensas a experimentar susceptibilidad frente a este fenómeno. La variable movimientos, se utiliza como variable de agrupamiento para el análisis estadístico e indica la presencia o ausencia de movimientos previos, permitiendo constituir las relaciones estadísticas con cada una de las variables condicionantes, es decir, muestra las evidencias de movimientos pasados a partir de los cuales es posible establecer la predicción de ocurrencia espacial del fenómeno. Los valores negativos indican poca o nula predisposición del factor a generar deslizamientos, y los valores positivos revelan la posibilidad que se dé este evento. Este proceso se hace para cada una de las ocho (8) variables que se tienen en cuenta como factor determinante para generar movimientos en masa. Tabla 17, enseña los rangos obtenidos al cruzar la variable movimientos con cada una de las variables condicionantes.

Tabla 17. Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos

Variables	Rango en pesos
Modelo digital de elevación (DEM)	-1,06 a 0,83
Pendiente	-0,96 a 2,60
Orientación de las laderas	-0,59 a 0,59
Unidades geológicas superficiales	-3,21 a 1,39
Geología	-2,08 a 2,24
Cobertura de la tierra	-1,45 a 4,00
Geomorfología	-3,77 a 1,93
Curvatura	-0,09 a 2,25

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la metodología usada, cada variable se cruzó por separado con los movimientos ocurridos en el área de estudio, estos cruces dan como resultado los mapas de pesos W_i . A cada conjunto de celdas que representa una variable determinada le corresponde el mismo número de celdas que representa el peso de esa categoría. En la Figura 18 se muestra el ejemplo del mapa w_f de la variable pendiente. En el anexo 2 se puede ver las otras variables reclasificadas.

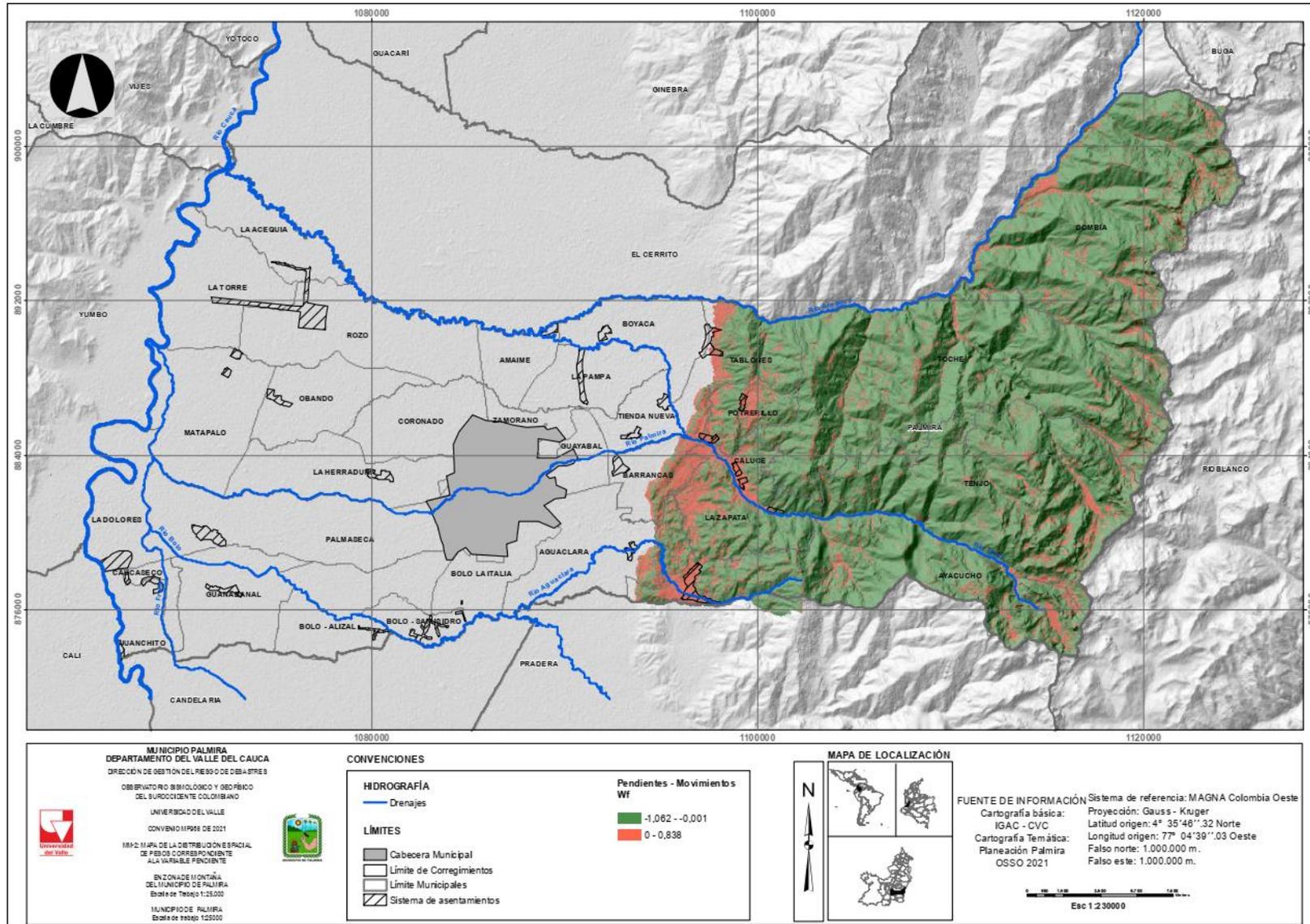


Figura 18. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable pendiente (MM-2)

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos todos los factores W_f (a partir de la resta entre los W_f^+ y los W_f^-), se suman las variables para obtener el grado o Índice de Susceptibilidad por movimientos en masa o de la tierra (LSI por sus siglas en inglés (Land Susceptibility Index)), obteniendo así el Mapa de Susceptibilidad, el cual se presenta sin clasificar en la Figura 19. A continuación, se presenta la sumatoria o ecuación que se aplicará según la siguiente expresión.

LSI= W_f DEM + W_f Pendiente + W_f Orientación de la ladera + W_f Unidades geológicas superficiales + W_f Geología + W_f Cobertura de la tierra + W_f Geomorfología + W_f Curvatura.

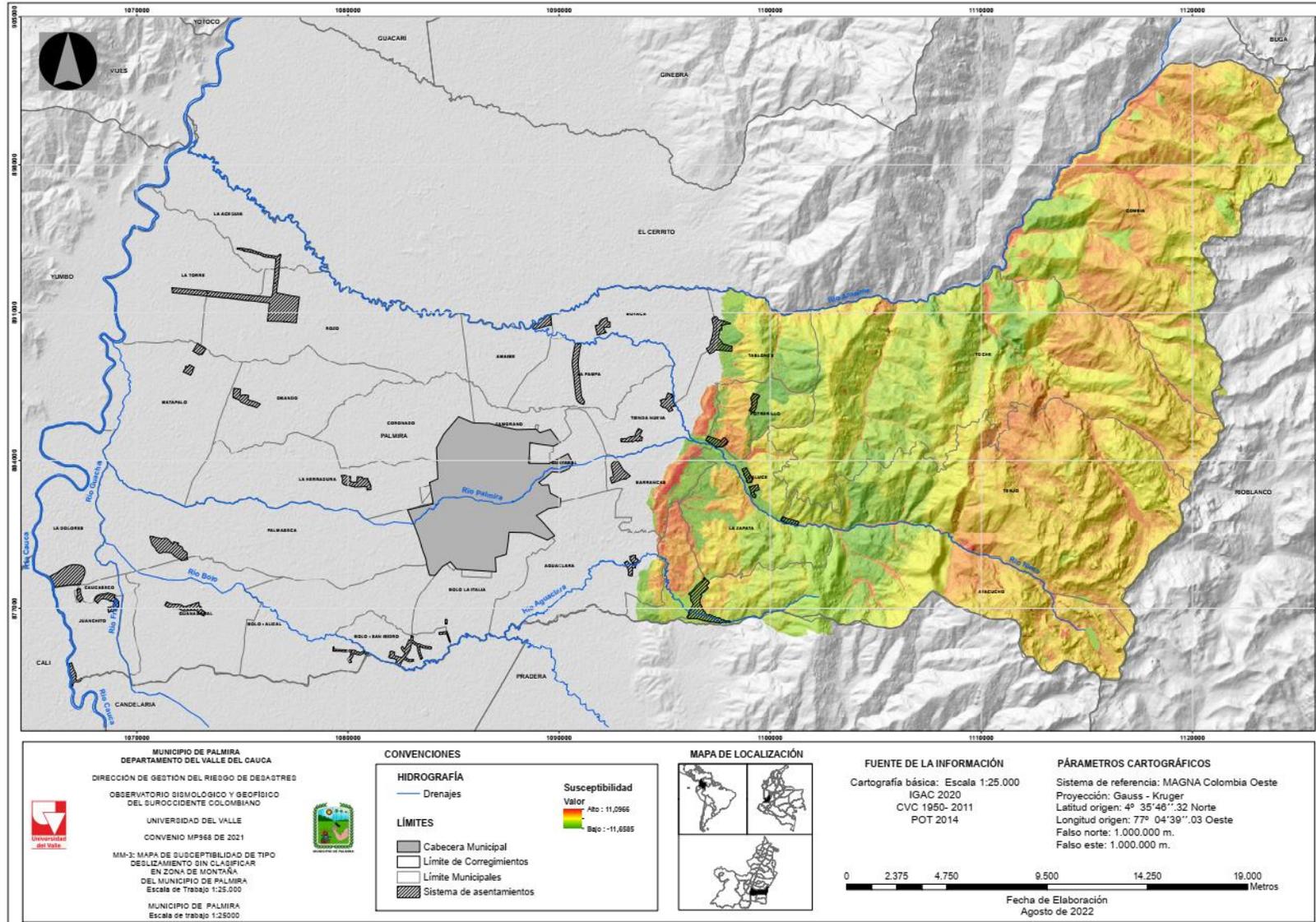


Figura 19. Mapa Susceptibilidad tipo deslizamiento, sin clasificar (MM-3)

Fuente: Elaboración propia.

De la anterior figura se establecieron diferentes rangos y se determinó la curva de éxito para poder validar el modelo. Se establecieron 4 rangos (ver Tabla 18) y se determinó un porcentaje de área bajo la curva de 76.8 (Figura 20), con la cual, se valida el modelo de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento, dado que es mayor al 70%.

Tabla 18. Rangos y porcentaje del área bajo la curva

Susceptibilidad											
Rangos	Categorías	# Píxeles Movimiento	% Movimiento	# Píxeles Rangos	% Rangos	% Acumulado de movimientos	% Acumulado de Rangos			% Área bajo la curva	
						0.00	0\$	0.00	0%	0.00	
11.096566	Muy Alta	865	2.62	693	0.03	2.62	3%	0.03	0%	0.00	
6.991729											
6.991729	Alta	23472	71.20	51047	25.19	78.83	74%	25.23	25%	9.63	
0.656003											
0.656003	Media	7755	23.52	10213	50.41	97.35	97%	75.63	76%	43.14	
2.645714											
2.645714	Baja	873	2.65	49373	24.37	100.00	100%	100.00	100%	24.04	
11.658507											
TOTAL		32965		20263	07	Y	X			76.8	

Fuente: Elaboración propia.

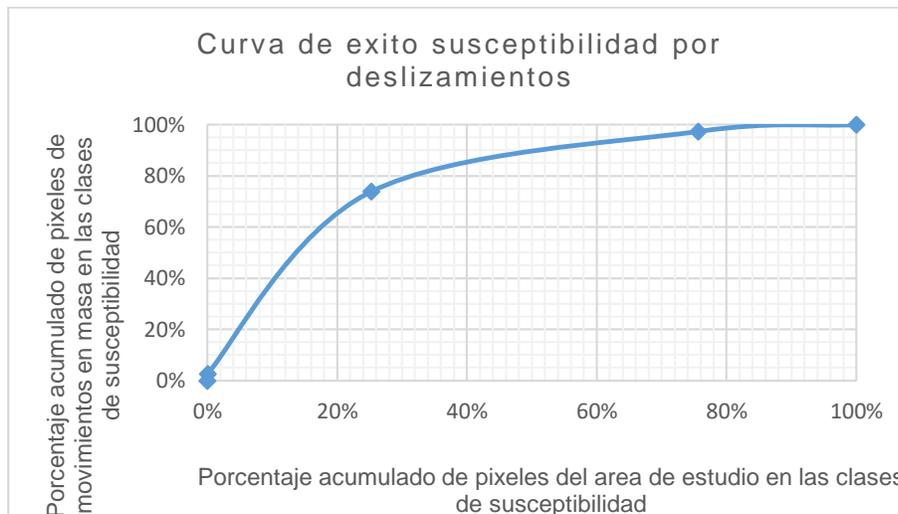


Figura 20. Curva de éxito susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento
 Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento.

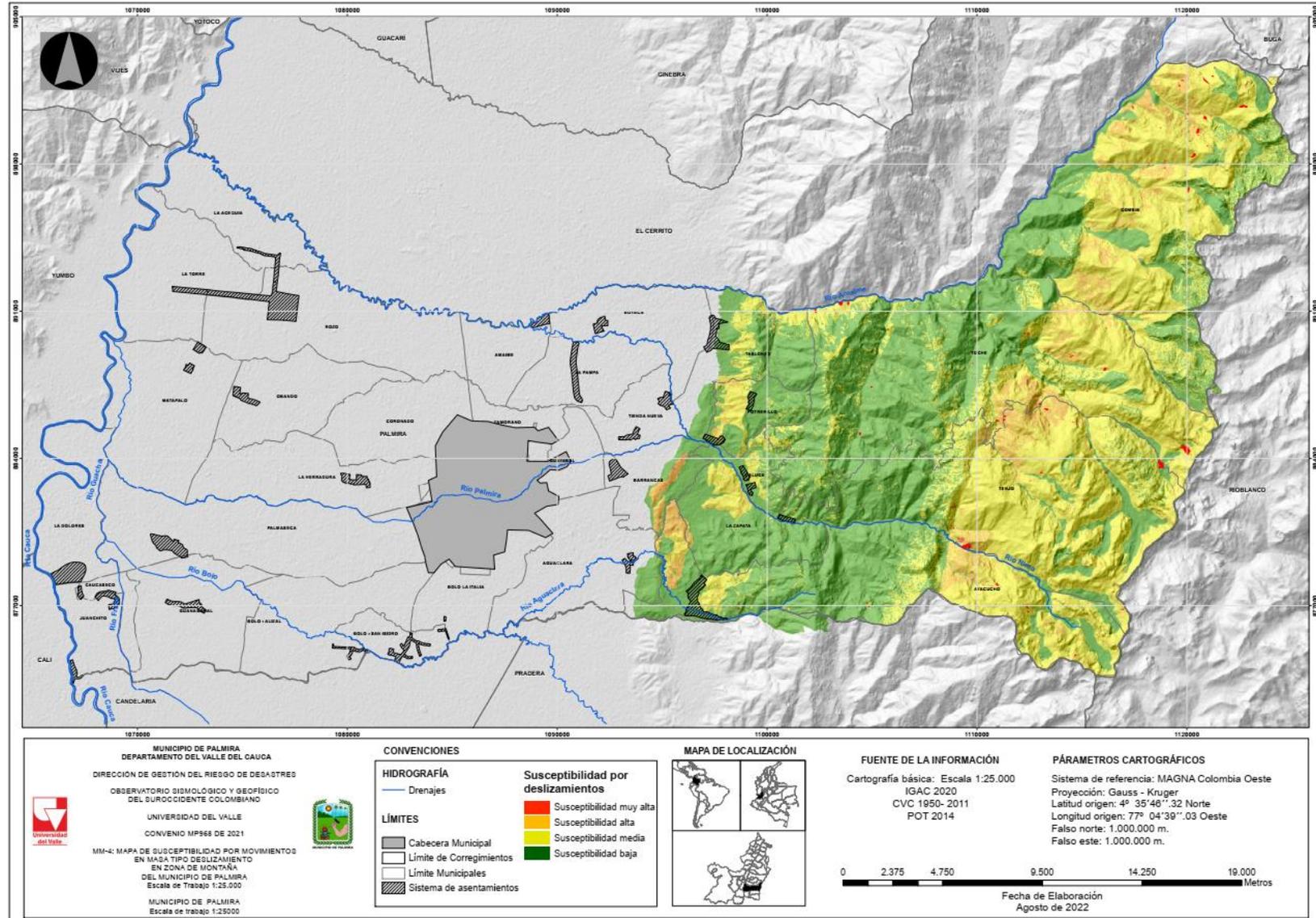


Figura 21. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento (MM-4)

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Susceptibilidad Tipo Caída

De acuerdo al método empírico basado en subunidades geomorfológicas y a partir del mapeo directo, se presenta en la Figura 22 los resultados de la susceptibilidad tipo caída.

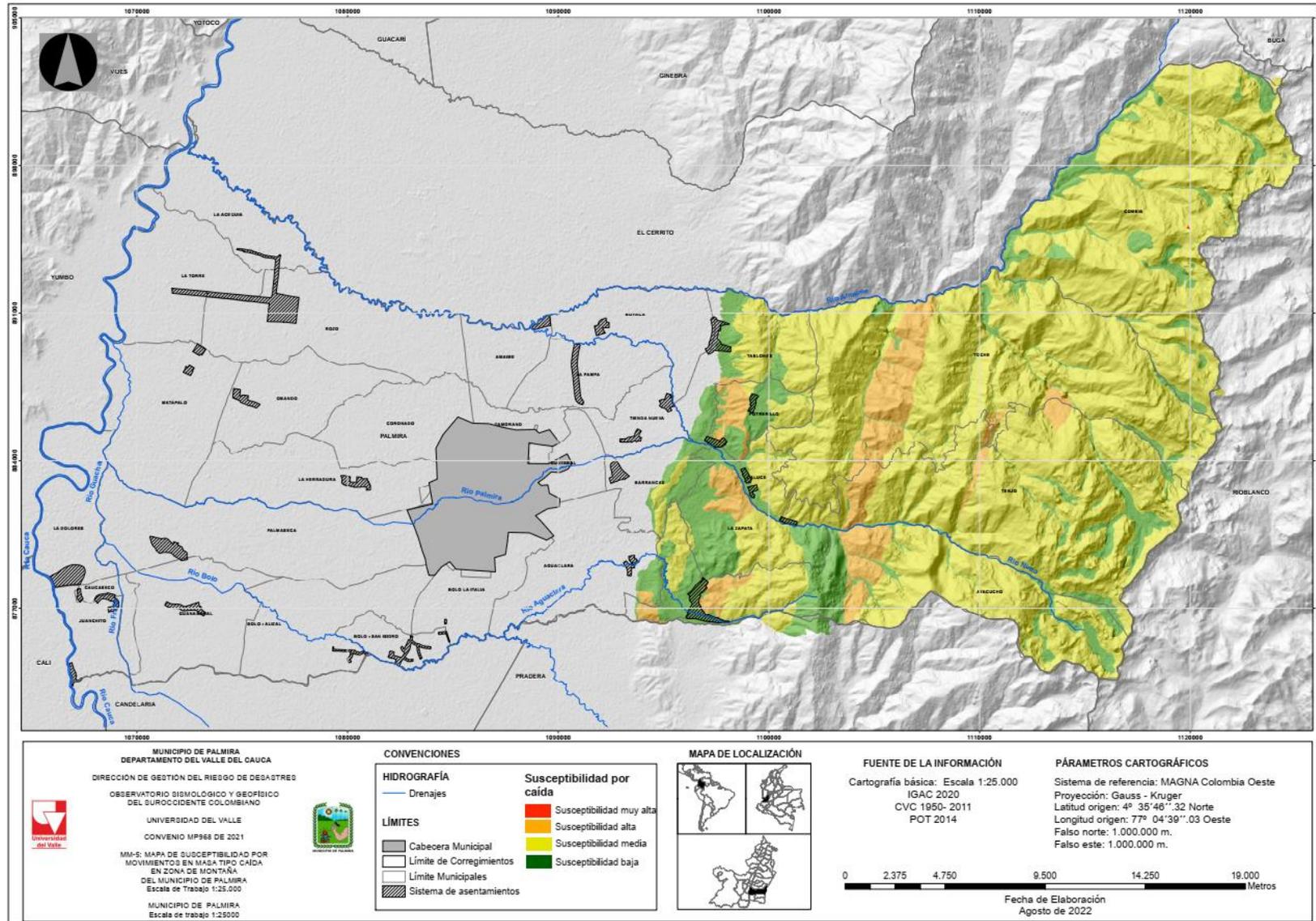


Figura 22. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída (MM-5)
Fuente: Elaboración propia

6.1.3. Susceptibilidad Tipo Flujo

Al analizar las diferentes variables (tamaño, forma, pendiente, geomorfología y la precipitación) de una cuenca y utilizando el criterio experto, la susceptibilidad se obtiene a partir de la cartografía de subunidades indicativas (ver Figura 23).

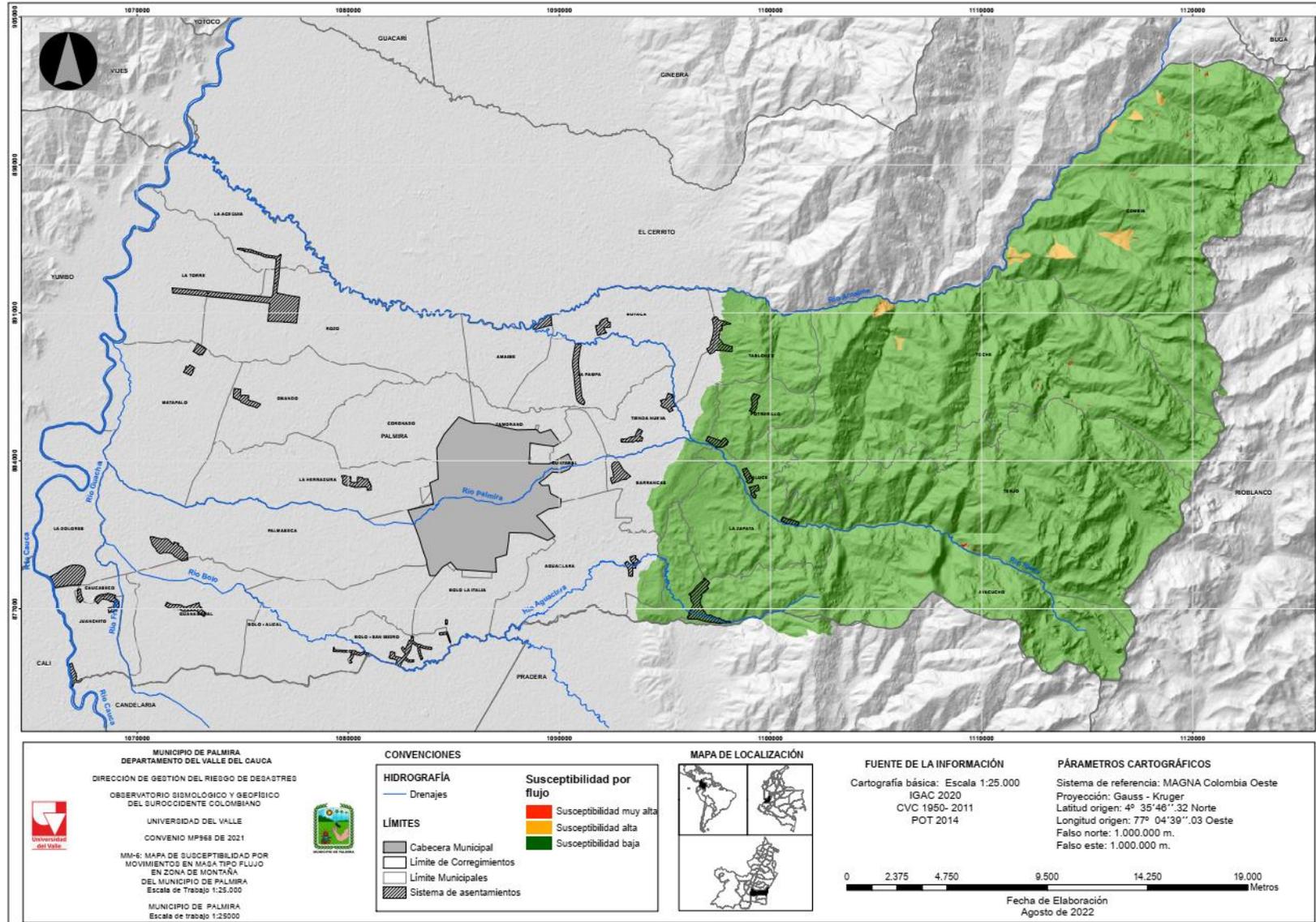


Figura 23. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo (MM-6)

Fuente: Elaboración propia

6.1.4. Susceptibilidad final (consolidado)

Para obtener la susceptibilidad final por movimientos en masa se emplea la matriz de comparación en la cual se relacionan todos los tipos de susceptibilidad (deslizamiento, caída y flujo) por movimientos en masa y se deja el pixel de mayor categoría. En la Figura 24 se presenta el resultado de la susceptibilidad final.

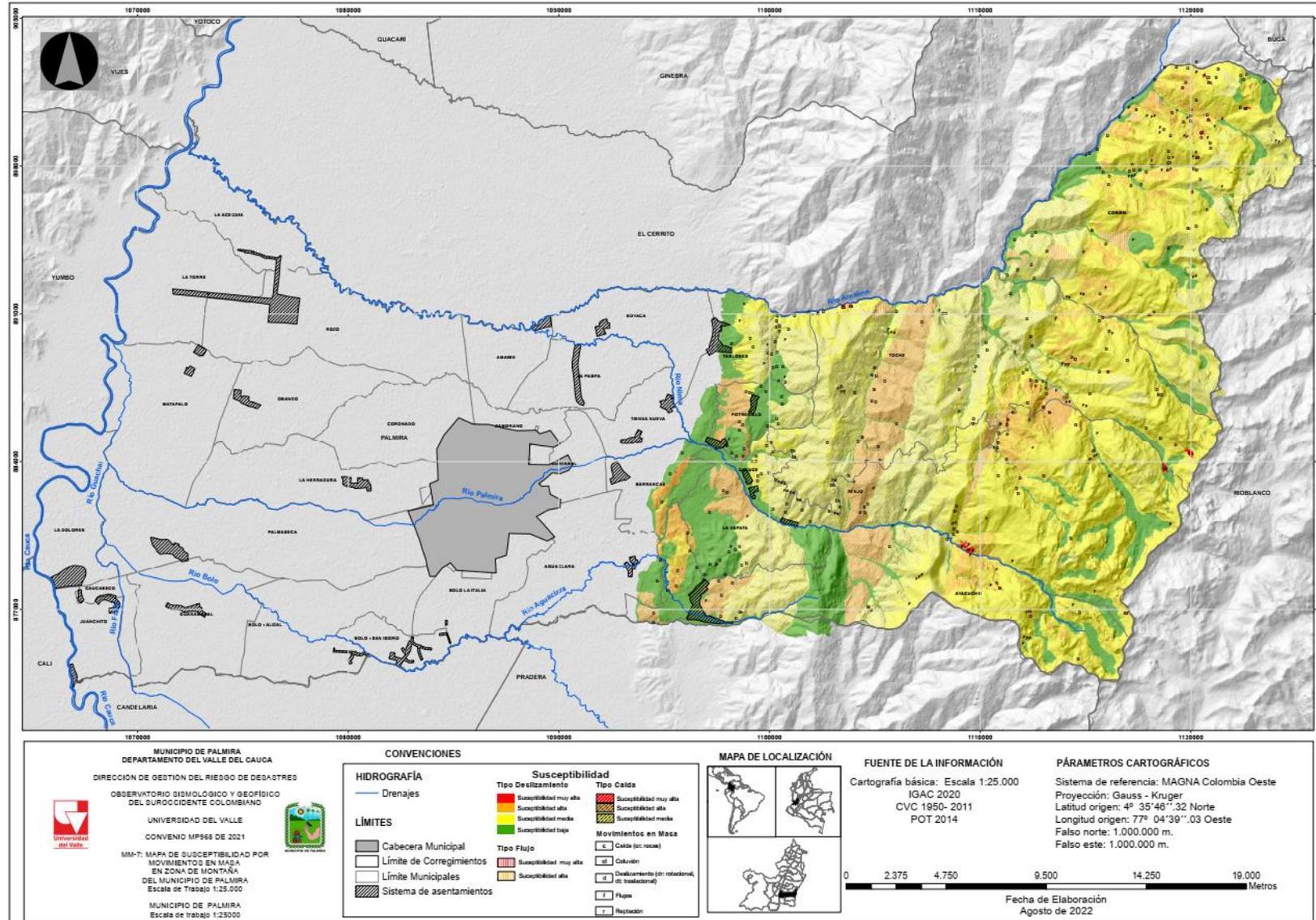


Figura 24. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa (consolidado) (MM-7)

Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

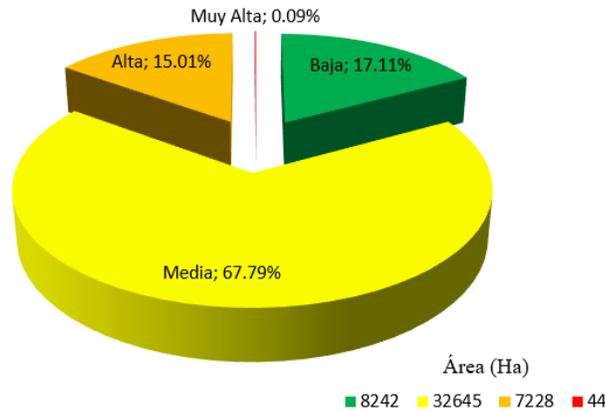


Figura 25. Porcentaje de susceptibilidad por movimientos en masa
Fuente: Elaboración propia.

En el mapa de susceptibilidad, se presentan las zonas propensas a movimientos en masa en las categorías muy alta, alta, media y baja para el municipio de Palmira (Figura 24), las cuales son descritas a continuación:

- **Susceptibilidad muy alta:**

Para Alvarado et al. (2012), las caídas de suelos o detritos, flujos de detritos y deslizamientos rotacionales y traslacionales de suelos y detritos, o la combinación de estos (movimientos complejos), en conjunto con la frecuencia de los eventos pueden generar movimientos en masa de gran magnitud. En general, los efectos que se esperan en estas zonas (susceptibilidad muy alta y alta) son los más catastróficos e implicarían una mayor intervención, control, mitigación y/o recuperación en caso que se presente el evento. La susceptibilidad muy alta hace referencia a los procesos morfodinámicos activos y se presentan mayormente en la zona Sur del área de estudio con un porcentaje de 0.09%.

- **Susceptibilidad alta:**

En susceptibilidad alta, se encuentran las zonas con condiciones favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad relacionados con movimientos y zonas afectadas, aunado a las características litológicas en el área, geomorfología y las fuertes pendientes que caracterizan el municipio. En general, las zonas enmarcadas dentro de susceptibilidad alta, la mayor parte se localiza en el centro del área de estudio.

Nótese que la susceptibilidad alta abarca una proporción de 15.01% dentro de la zona de estudio.

- **Susceptibilidad media:**

La susceptibilidad media se presenta en gran parte de la zona montañosa (Norte, sur y centro). En conclusión, esta categoría de susceptibilidad comprende aproximadamente el 67.79% del área de estudio.

- **Susceptibilidad baja:**

Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de un deslizamiento es bajo. Algunas de estas pueden ser susceptibles a procesos de inundación localizadas al sur del perímetro municipal. Como se muestra en la Figura 25, la susceptibilidad baja por movimientos en masa se presenta en el 17.11 % del área de estudio, localizadas al sur occidente de la zona montañosa.

6.2. Amenaza por movimientos en masa

Para la caracterización de la amenaza es necesario integrar las categorías de susceptibilidad alta y muy alta, de tal manera que se cuente solo con tres categorías de amenaza de acuerdo con la normatividad vigente (Decreto 1807 de 2014). Ver Figura 30.

6.2.1. Probabilidad espacial

Al tener la amenaza por movimientos en masa, se procede a calcular los porcentajes de movimientos en masa, en cada una de los tipos. En la Tabla 19 se presenta el resultado de la probabilidad espacial en la zona de estudio.

Tabla 19. Probabilidad espacial

Amenaza	Tipos y subtipos de movimientos	Probabilidad espacial / porcentaje de movimientos en masa
Alta	Deslizamientos	42%
	Caídas	57%
	Flujos	1%
Media	Deslizamientos	90%
	Caídas	10%

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que, en la amenaza alta por movimientos en masa, el mayor porcentaje (57%) equivale a caídas.

6.2.2. Probabilidad temporal

6.2.2.1. Detonante Lluvia

Para determinar la detonante lluvia es necesario identificar y analizar las estaciones que influyen en nuestra zona de estudio y obtener las precipitaciones anuales, mensuales y diarias.

En el informe de historicidad se encontraron 40 eventos en los cuales hubo movimientos en masa, los cuales nos servirán para determinar la relación lluvias – deslizamientos.

Las estaciones analizadas son Auji, Austria, Bella Vista, Chambu, La Sirena y San Nicolas, a continuación (Figura 26) se presenta la ubicación espacial de las estaciones con la precipitación anual.

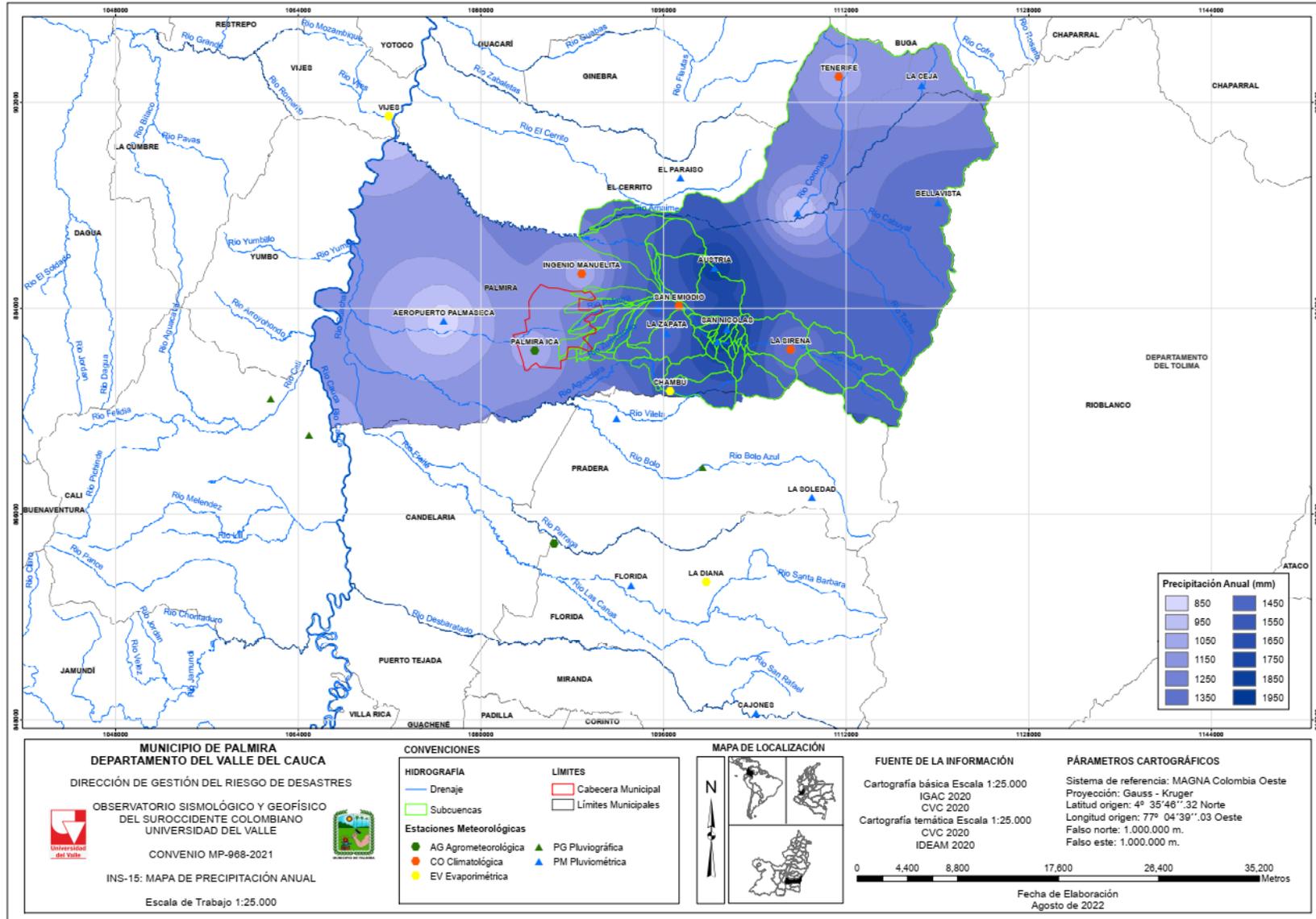


Figura 26. Mapa Precipitación anual (INS-15)
 Fuente: Elaboración propia.

La Figura 27 presenta las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) de precipitaciones para diferentes periodos de retorno de la estación Austria, donde se muestra la relación entre la cantidad de lluvia por minutos a partir de periodos de retorno y su duración, la figura denota que a mayor Tiempo de Recurrencia, mayor será la intensidad de la lluvia en los primeros 50 minutos, pero una vez las precipitaciones superan este valor la intensidad disminuye conforme crece la duración de las misma, adoptando valores constantes para cada año. Los registros de lluvias, IDF y periodos de retorna de cada una de las estaciones se presentan en el anexo 3.

TR	DURACION DE LAS LLUVIAS (MINUTOS)																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
2.33	164	105	80	67	58	51	46	43	39	37	35	33	31	30	28	27	26	25
5	190	121	93	77	67	59	54	49	46	43	40	38	36	34	33	31	30	29
10	217	138	106	88	76	68	61	56	52	49	46	43	41	39	37	36	34	33
25	258	164	126	105	91	80	73	67	62	58	54	51	49	46	44	43	41	39
50	294	187	144	119	103	92	83	76	71	66	62	58	56	53	51	49	47	45
75	318	202	156	129	112	99	90	82	76	71	67	63	60	57	55	52	50	49
100	336	214	164	136	118	105	95	87	80	75	71	67	63	60	58	55	53	51
200	383	244	187	155	134	119	108	99	92	86	81	76	72	69	66	63	61	58
300	413	263	202	168	145	129	117	107	99	93	87	82	78	74	71	68	66	63
400	437	278	214	177	153	136	123	113	105	98	92	87	82	79	75	72	69	67
500	456	290	223	185	160	142	129	118	109	102	96	91	86	82	78	75	72	70

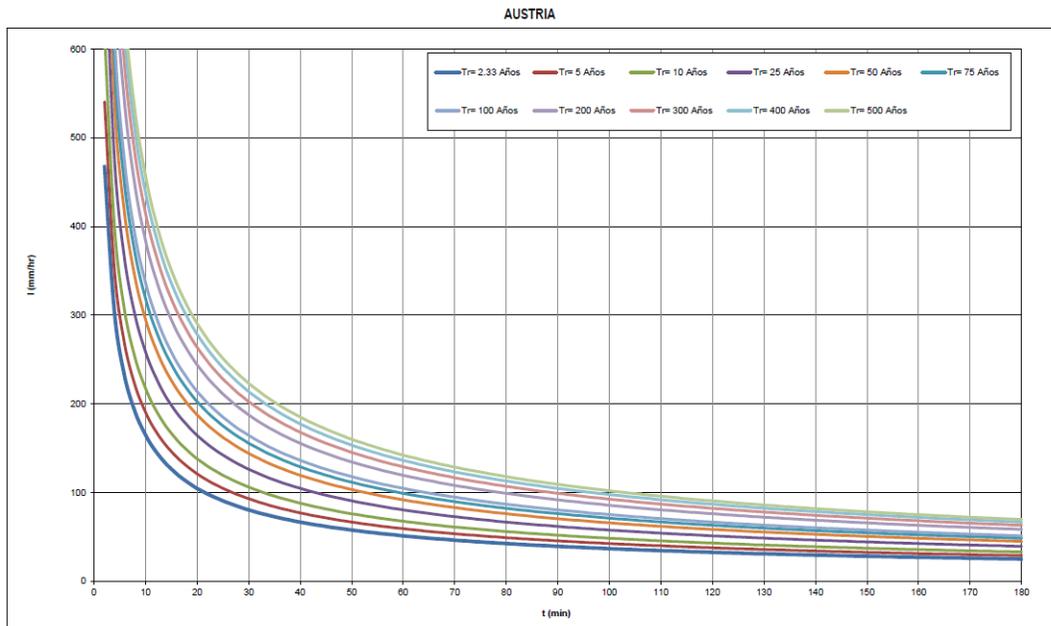


Figura 27. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Austria
Fuente: Elaboración propia

Mediante un análisis de probabilidad de las lluvias máximas acumuladas con el uso de las curvas de diferentes distribuciones, se determina estadísticamente en periodo de retorno de la lluvia para diferentes duraciones (Tabla 20).

Tabla 20. Frecuencia de lluvias máximas

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR
2.33	108.7	103.7	94.9	100.8	103.7
5	130.1	129.3	117.5	122.4	127.1
10	144.4	150.2	140.8	141.5	145.5

Tr	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR
25	159.5	176.5	174.3	167.6	168.0
50	169.3	196.1	201.5	188.7	184.4
100	178.1	215.5	229.9	211.0	200.5
300	190.6	246.1	277.4	249.9	225.7
500	196.0	260.3	300.4	269.6	237.4
chi 2	102.58	57.50	58.94	43.28	55.87

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 21 se presenta parte del catálogo por movimiento en masa utilizado para correlacionar las lluvias – movimientos. En el anexo 2 se presenta el inventario completo.

Tabla 21. Catalogo histórico de MM

ID	Fecha	Fenómeno	Tipo	Causa	Urbano / Rural	Barrio / Corregimiento	Dirección / Vereda
1	15/03/1975	Movimiento en masa	Deslizamiento	ND	Rural	Potreriillo	Vía Palmira - Ataco (km 34)
2	14/04/1982	Movimiento en masa	Deslizamiento	Lluvias	Rural	Combia	Albania
2	14/04/1982	Movimiento en masa	Deslizamiento	Lluvias	Rural	Toche	
3	1/11/1984	Movimiento en masa	Deslizamiento	Lluvias	Rural	Potreriillo	Vía Palmira - Ataco
4	28/10/1985	Movimiento en masa	Deslizamiento	Lluvias	Rural	Potreriillo	la Quisquina, Aguas Bonitas, Los Cuchos Los Robles

ID	Latitud	Longitud	Observaciones	Fuente
1	Vía Palmira - Ataco (km 34) 3.536426	-76.294426	Interrupción vía 3 semanas	SIMMA SGC (2021)
2	Albania 3.536006	-76.300468	En los corregimientos de Augui, Regadero, Corozal, Tenerife, Los Andes, Santa Luisa, Toche, La Albania y Combia la situación es igualmente dramática: las comunicaciones terrestres están interrumpidas es estos lugares por derrumbes.	SIMMA SGC (2021)

ID	Fecha	Fenómeno	Tipo	Causa	Urbano / Rural	Barrio / Corregimiento	Dirección / Vereda
2		3.536006	-76.300468	En los corregimientos de Augui, Regadero, Corozal, Tenerife, Los Andes, Santa Luisa, Toche, La Albania y Combia la situación es igualmente dramática: las comunicaciones terrestres están interrumpidas en estos lugares por derrumbes.			SIMMA SGC (2021)
3	Vía Palmira - Ataco	3.538445	-76.297653	Interrumpido el tráfico por deslizamientos de la banca en los Km 22, 25 y 31. Los municipios de Cartago, Roldanillo, Bolívar, Zarzal, La Victoria, Sevilla, Caicedonia, Tuluá, Bugalagrande, Andalucía, Palmira, Cerrito, Candelaria y Pradera, son los más afectados.			SIMMA SGC (2021)
4	La Quisquina	ND	ND	EL TIEMPO: Ayer continuaban las inundaciones en Palmira debido a la creciente de los ríos Anaime Nima y Cerritos. 60 niños y 24 adultos miembros de 10 familias han sido evacuados de los corregimientos cercanos a Palmira afectados por un fuerte invierno que deja hasta el momento elevado número de víctimas deslizamientos de tierra y pérdidas incalculables en siembras y ganados. Más de 30 derrumbes se han registrado en el noreste de la cordillera Central que han afectado las poblaciones de la Quisquina Aguas Bonitas Los Cuchos Los Robles Caluse Boyacá Potrerito y Combia. Los organismos de socorro informaron que las evacuaciones se llevaron a cabo en la ladera de la cordillera donde varias familias han construido sus viviendas sin ningún (ext.)			Desinventar

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 22 se presenta la distribución de la precipitación crítica, sobre áreas consideradas susceptibles.

Tabla 22. Distribución espacial de la precipitación crítica

categoria	Precipitación Crítica (mm)	Duración (días)	Periodo de retorno	Estación representativa
Alta	150	1	10	AUSTRIA
	143	3	100	BELLAVISTA
Media	135	3	50	AUJI
Baja	105	1	25	CHAMBU
	94	3	25	LA SIRENA

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados, junto con la información de las isoyetas y la intensidad de las lluvias, se delimitan en un mapa como zonas de precipitación crítica para una duración y periodo de retorno establecido, donde las lluvias de duración corta pueden alcanzar el promedio de los máximos y detonar los movimientos en masa. En la Figura 28 se presenta el resultado del detonante lluvia.

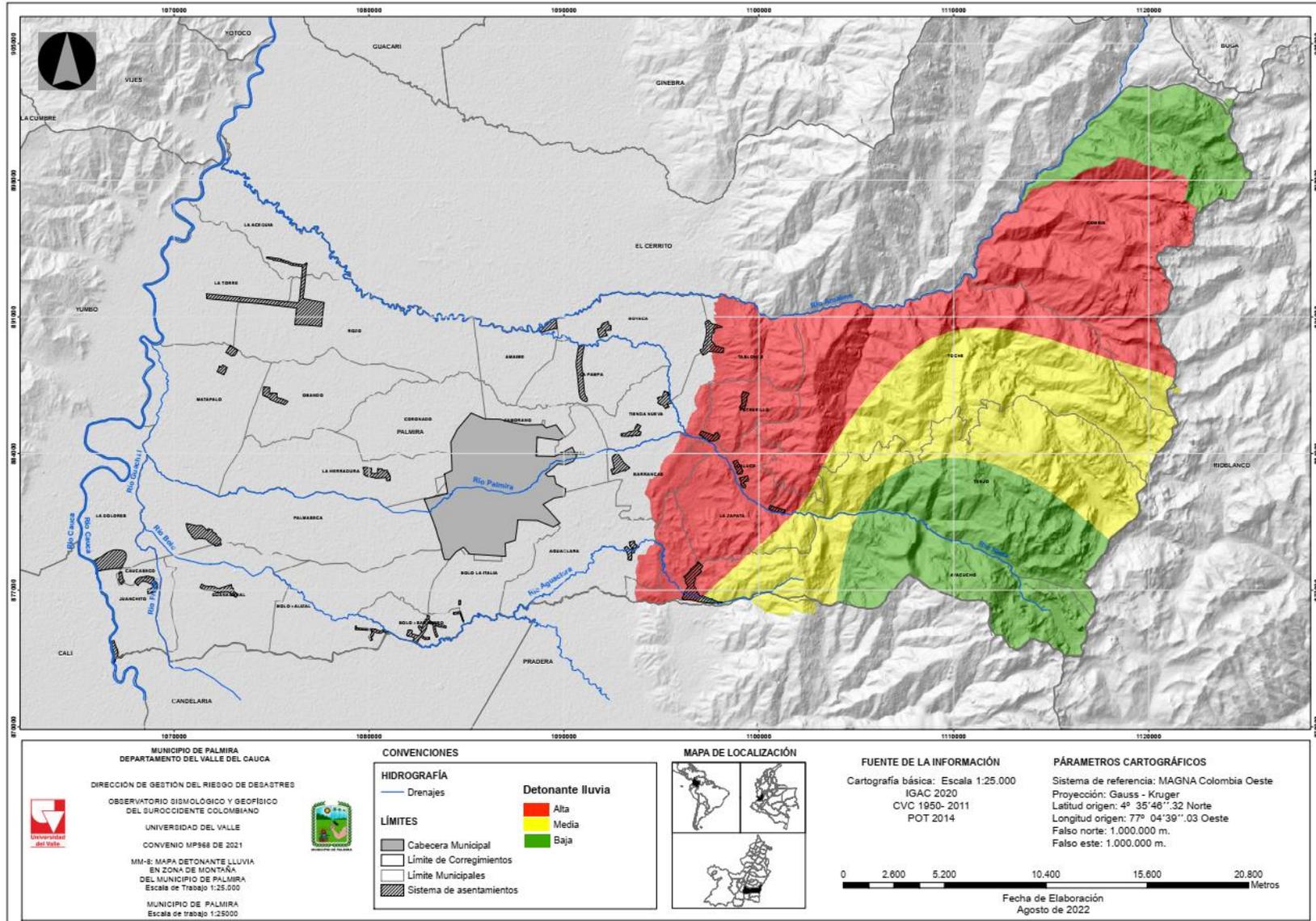


Figura 28. Mapa detonante lluvia (MM-8)

Fuente: Elaboración propia

6.2.2.1. Detonante Sismo

Después de aplicar la metodología, se obtuvieron las aceleraciones máximas horizontales para tres zonas homogéneas (Tabla 23). En la Figura 29 se presenta el resultado del detonante sismo.

Tabla 23. Distribución espacial del detonante sismo

Zona	A_{max} (g)	Categoría
Occidente	0.246	Alta
Centro	0.325	Muy Alta
Oriente	0.250	Alta

Fuente: Elaboración propia

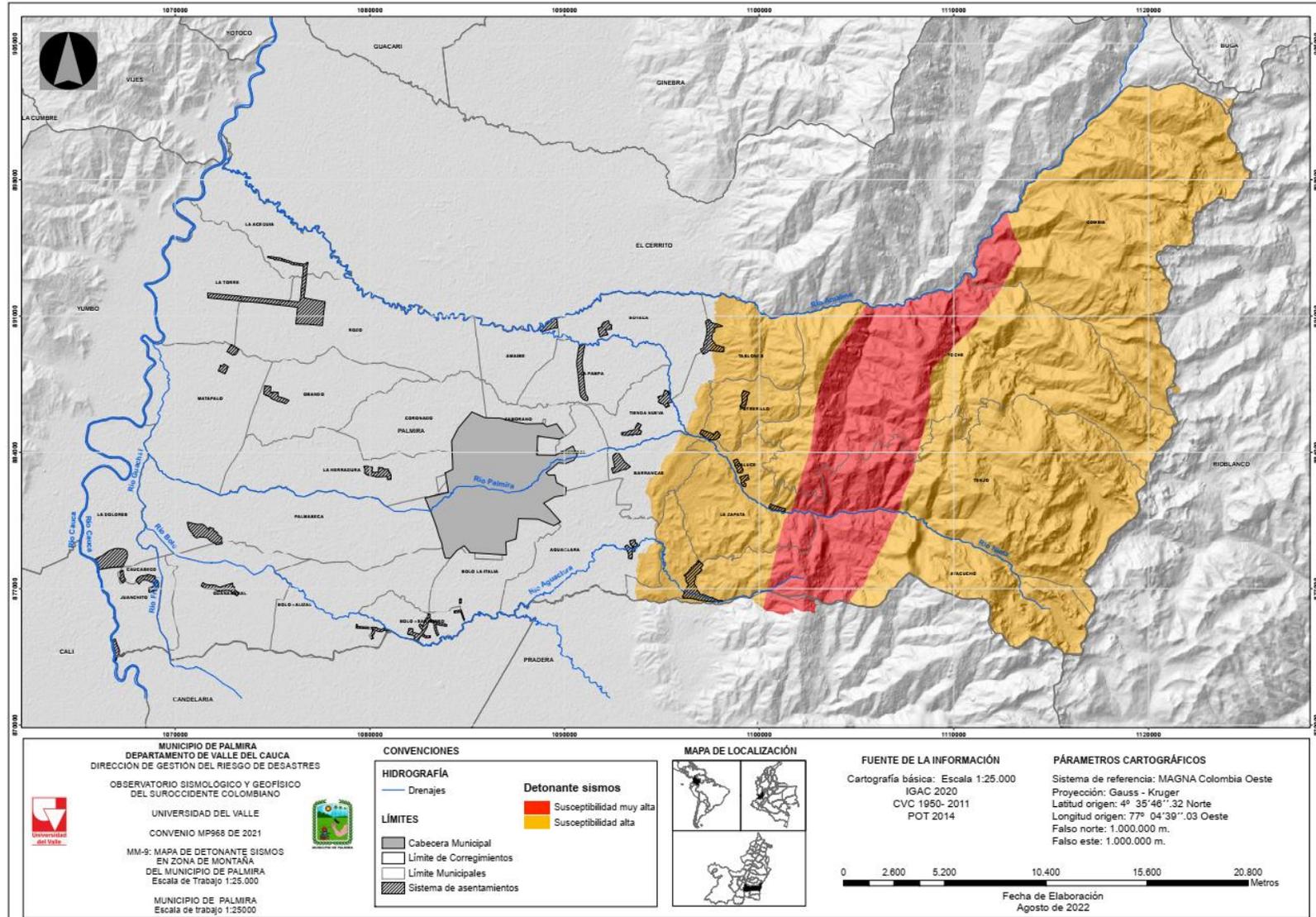


Figura 29. Mapa detonante sismo (MM-9)
Fuente: Elaboración propia

Al aplicar la ecuación 11, se obtuvo la probabilidad de excedencia para cada tipo de movimiento (Tabla 24).

Tabla 24. Probabilidad temporal

Amenaza	Tipos y subtipos de movimientos	Probabilidad temporal / frecuencia de ocurrencia
Alta	Deslizamientos	2.96 / 33.8
	Caídas	9.52 / 10.5
	Flujos	4.88 / 20.5
Media	Deslizamientos	18.1 / 5.5
	Caídas	13.9 / 7.2

Fuente: Elaboración propia

6.2.3. Análisis de magnitud

La magnitud en las categorías de amenaza por movimientos en masa, se analizará en términos de áreas. En la Tabla 25 se relaciona los resultados de las áreas afectadas por cada tipo de movimiento.

Tabla 25. Análisis de magnitud

Amenaza	Tipos y subtipos de movimientos	Magnitud / Área (ha)
Alta	Deslizamientos	11120
	Caídas	15226
	Flujos	316
Media	Deslizamientos	14005
	Caídas	1558

Fuente: Elaboración propia

6.2.4. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

Después de realizar la sumatoria (susceptibilidad, lluvia y sismo) y reclasificación, se procede a realizar el mapa de amenaza por movimientos en masa (Figura 30).

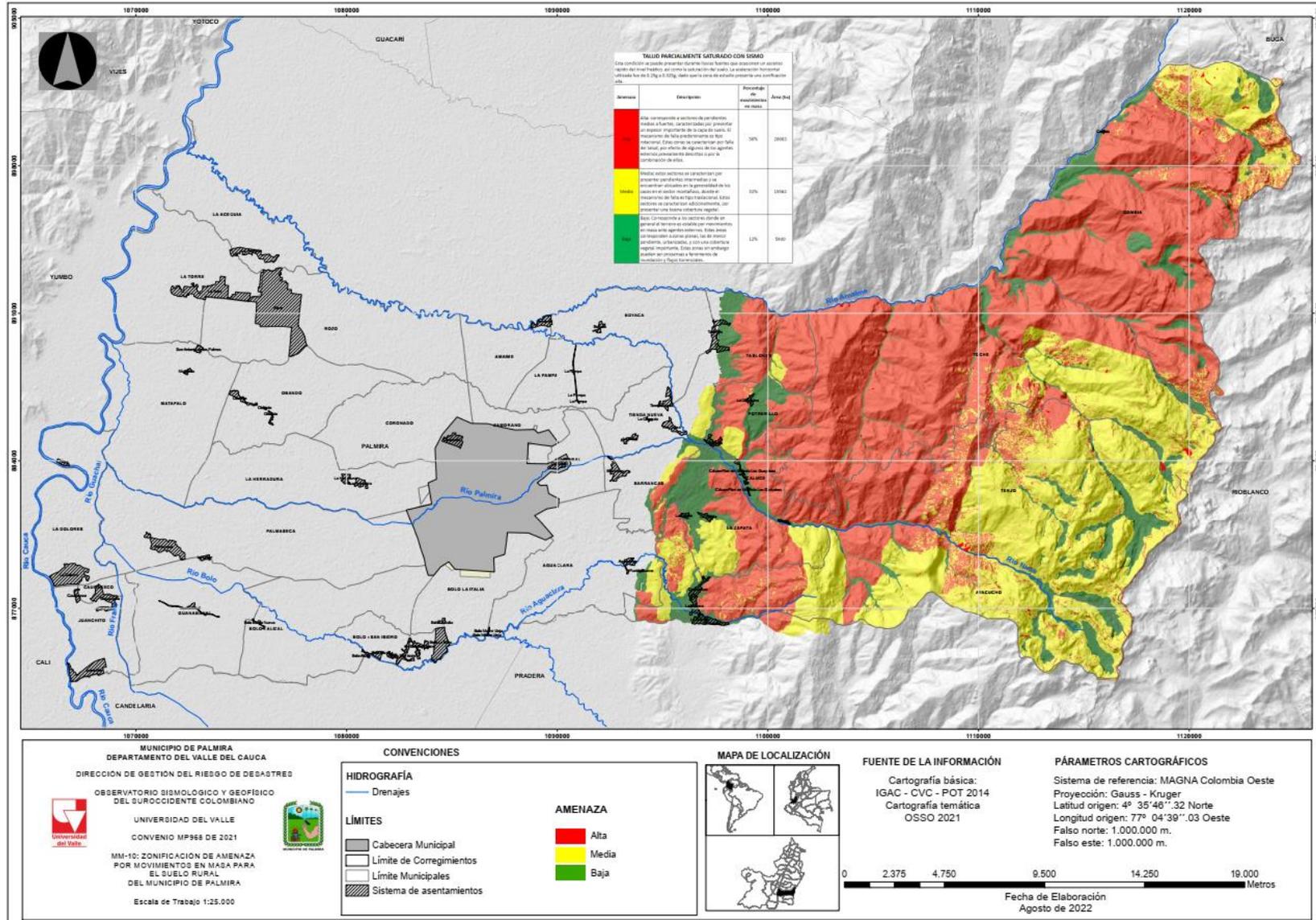


Figura 30. Mapa Amenaza por movimientos en masa para el suelo rural del municipio de Palmira (MM-10)

Fuente: Elaboración propia.

6.2.5. Validación de la amenaza por movimientos en masa

En la Tabla 26, se presentan los resultados de los cruces de procesos morfodinámicos (751) y la amenaza por movimientos en masa, concluyendo que se aprueba el modelo en la zona de estudio, debido a que el porcentaje de amenaza alta es de 86% y 2% de amenaza baja. En la Figura 32 se aprecian los niveles de amenaza en los procesos morfodinámicos.

Tabla 26. Validación del modelo de la amenaza por MM

Procesos Morfodinámicos	Nivel De Amenaza Area (Ha)			Total
	Baja	Media	Alta	
Caída	0	0	9029	9029
Coluvión	6223	39933	232338	278493
Deslizamiento	5298	30934	314059	350290
Deslizamientos Rotacional	0	0	6565	6565
Deslizamientos Traslacionales	0	0	2862	2862
Flujo de Detritos	0	0	6801	6801
Flujos	949	10014	17817	28780
Total general	12469	80881	589471	682820
Porcentaje	2%	12%	86%	

Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

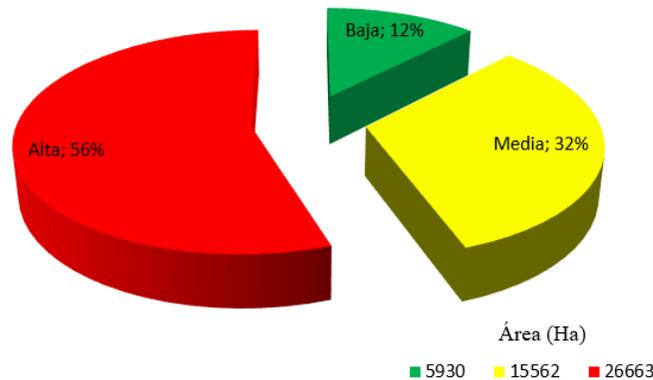


Figura 31. Porcentaje de amenaza por movimientos en masa
 Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los mapas con la validación de los resultados.

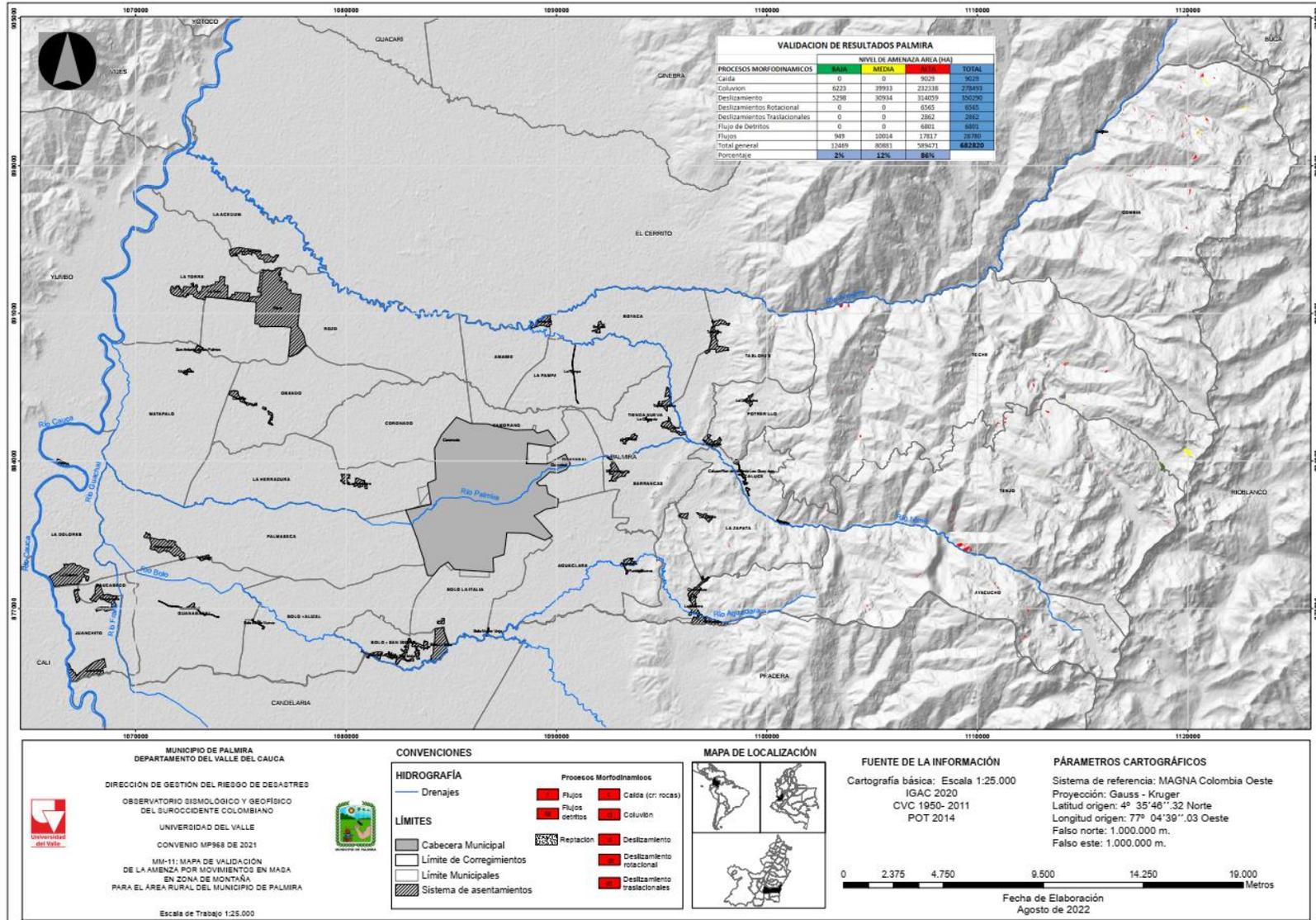


Figura 32. Mapa Validación del modelo de amenaza por movimientos en masa (MM-11)

Fuente: Elaboración propia

- **Amenaza alta:**

Corresponde a zonas en las que se detonan de deslizamientos y flujos de tierra, debido a la condición débil de los materiales presentes, con pendientes mayores a 20°.

Para condiciones de lluvia similar a mayo de 2011, es decir precipitaciones intensas precedidas de altas precipitaciones que saturan los materiales, cuya coincidencia corresponde a un período de retorno que oscila entre 10 y 100 años, se estima que se pueden presentar densidades hasta de 40 deslizamientos por km². Esta categoría ocupa el 56% del área de estudio, cubriendo un área de 26663 ha, principalmente en el centro, norte, nororiente y sur occidente.

- **Amenaza media:**

En esta categoría se presenta en la zona montañosa (Norte, sur y centro). Las pendientes presentadas están entre el 8° y 20°, con un área 15562 ha. En conclusión, esta categoría de amenaza comprende aproximadamente el 32% del área de estudio.

- **Amenaza baja:**

Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de un deslizamiento es bajo. La amenaza baja por movimientos en masa que se presenta es del 12% con un área de 5930 ha, localizadas al sur occidente de la zona montañosa.

7. CONCLUSIONES

El área de estudio correspondiente a la zona montañosa del municipio de Palmira posee un ambiente morfogenético diverso, en donde las principales formaciones que coadyuvan a la generación de ambientes condicionantes ante movimiento en masa, se encuentran principalmente en las zonas Sur y Occidente, así lo denotan los resultados de las diferentes variables analizadas (geomorfología, geología y formaciones geológicas superficiales, etc).

Durante el levantamiento de información (Historicidad y geomorfología) se realizó el inventario de cuarenta (40) eventos por historicidad y setecientos cincuenta y uno (751) por procesos morfodinámicos, para un total de 791 eventos distribuidos en todo el municipio. Para determinar la susceptibilidad por deslizamientos se tuvo en cuenta los procesos morfodinámicos (751) que fue la variable dependiente y se cruzó con las otras variables (DTM, Geología, etc) obteniendo pesos y posteriormente la susceptibilidad. Adicional a ello, los procesos morfodinámicos se utilizaron para validar la zonificación de la amenaza por MM. El detonante lluvia se obtuvo al relacionar los eventos históricos (40) con los registros de lluvias antecedentes a los deslizamientos.

Las lluvias más altas coinciden con las temperaturas más bajas en la zona y se presentan en los meses de abril a junio y octubre a noviembre, Así mismo, las temperaturas más altas coinciden con los meses de bajas precipitaciones a mediados del año. Hay gran relación entre las lluvias y los deslizamientos, para precipitaciones de 100mm o mayores en periodos de 5 días, se pueden generar movimientos en masa.

Considerando los sismos cercanos (menor a 200km), los resultados del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y la AIS, la aceleración horizontal a se estima entre 0,25g y 0.325g, para un periodo de retorno de 475 años (diseño) que corresponde a condiciones extremas. Adicional a ello, cuando tenemos sismos de magnitudes mayores a 5, hay una alta probabilidad que se presenten movimientos en masa.

Es importante proteger las zonas delimitadas con amenaza alta por movimientos en masa, con lo cual se busque disminuir el proceso erosivo, se debe realizar un control en la zona de ladera ya que factores como las coberturas de la tierra inadecuadas a las condiciones del terreno, las aguas de escorrentía se convierten en un factor desestabilizador del suelo, y las obras que se realicen deben ser acorde con el tipo de suelo, pues estas deben fortalecer y evitar la pérdida del mismo, en otras palabras, no aportar peso al suelo que ayude disminuir su resistencia.

La amenaza alta Corresponde a zonas en las que se detonan de deslizamientos y flujos de tierra, debido a la condición débil de los materiales presentes, con pendientes mayores a 20°. Las áreas de los movimientos pueden ser predominantemente menores a 12000 ha y algunos pueden alcanzar hasta los 316 ha. Para condiciones de lluvia similar a mayo de 2011, es decir precipitaciones intensas precedidas de altas precipitaciones que saturan los materiales, cuya

coincidencia corresponde a un período de retorno que oscila entre 10 y 100 años, se estima que se pueden presentar densidades hasta de 40 deslizamientos por km². Esta categoría ocupa el 56% del área de estudio, cubriendo un área de 26663 ha, principalmente en el centro, norte, nororiente y sur occidente.

En esta categoría (amenaza media) se presenta en la zona montañosa (Norte, sur y centro). Las pendientes presentadas están entre el 8° y 20°, con un área 15562 ha. En conclusión, esta categoría de amenaza comprende aproximadamente el 32% del área de estudio.

En la amenaza baja hay zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de un deslizamiento es bajo. La amenaza baja por movimientos en masa que se presenta es del 12% con un área de 5930 ha, localizadas al sur occidente de la zona montañosa.

El mapa de validación concluye, que se aprueba el modelo en la zona de estudio, debido a que el porcentaje de amenaza alta es de 86% y 2% de amenaza baja.

- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Yamanaka, M., Nonomura, A., Dhakal S., Paudyal P., (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology* 102, 496 -150. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X08002419>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) (2014). Claves para la taxonomía de los suelos. Recuperado de: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Domaas, U. 1994. Geometrical methods of calculating rockfall range Oslo. NGI, 585910-1. 21 pp
- Duque, G y Escobar, C. E. (2002). 1. MECÁNICA DE LOS SUELOS I. Notas del curso Suelos I. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Finlay, P.J., Mostyn, G.R. y Fell, R. 1999. Landslide risk assessment: prediction of travel distance. *Canadian Geotechnical. Journal* 36: 556-562.
- González, A. J., y Millan, J. A. (2005). Landslide hazard evaluation for Bogotá, Colombia. In *Proc. of the International Conference on Landslide Risk Management*. Balkema Publisher (Hungar, Fell, Couture y Eberhardt Editors). Vancouver, Canada. pp. 475-485.
- González, A. J. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson, 744p.
- Guzzetti, F (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy
- Heuvelink, G. (1996). Error propagation in quantitative spatial modelling: applications in geographical information systems. *Nederlandse Geografische Studies*. 163.
- Hsu, K. J. (1975). Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86 (1), 129-140.
- Hubp J. (2011). *Diccionario Geomorfológico*. Geografía para el siglo XXI. Serie: textos universitarios, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. México D.F.
- Hungr, O., Corominas, J. y Eberhardt, E. (2005). State of the Art Paper # 4. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. *Landslides Risk Management. Proceedings*. Vancouver, Canadá.
- Ibañez, D., Castro, E., Arturo J., Perez, R. y Cuellar M. (2012) *Geología y Geomorfología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Soacha, Cundinamarca, Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.

- Intituto Geografico Agustín Codazzi -IGAC. (2012). Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Movimientos en Masa. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- INGEOMINAS (2002). Clasificación Regional de Amenaza Relativa de Movimientos en Masa en Colombia. Bogotá D.C., mayo de 2002.
- INGEOMINAS (2005). Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Convenio INGEOMINAS-DAGMA, Bogotá.
- INGEOMINAS (2006), Mapa Geológico de Colombia, Escala 1:2.800.000, Bogotá
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2018). Documento en línea. Consultado el 1 agosto de 2018. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2016). Información pluviométrica.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM (2012). Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. Consultado el 16 de junio de 2018. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745
- Jimeno, C. L. (Ed.). (2013). Ingeniería del terreno. UD Proyectos, ETSI Minas, UPM.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land degradation & development*, 12(6), 519-539. Disponible en, consulta 10 de dic de 2018 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.472>
- Lee, S., Choi, J., (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS and the weights-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science* 18, 789–814.
- Lozano, H. (1986). Oro y plata en Colombia, Áreas promisorias. I Taller Latinoamericano sobre Exploración y Explotación de Oro Aluvial, Memorias, I, 56p
- McCourt, W. J., (1984). The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima: British Geological Survey Report, v. Series 84, p. 8 - 49.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente: NRS 10. Título H- Estudios geotécnicos. Bogotá DC.
- Ministerio de Vivienda, Salud y Territorio de Colombia (2014). Decreto 1807 del 19 septiembre 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". Recuperado de: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/SEPTIEMBRE/19/DECRETO%201807%20DEL%2019%20DE%20SEPTIEMBRE%20DE%202014.pdf>

- Nivia, A., Galvis, N., y Maya, M. (1995). Mapa geológico de Colombia, plancha 242-Zarzal, Scale: 1: 100,000. INGEOMINAS, Cali.
- Nivia, A., Galvis, N., y Maya, M. (1997). Geología de la Plancha 242, Zarzal. INGEOMINAS. (1997). Mapa geológico de Colombia. Geología de la plancha 242-Zarzal. Escala 1:100.000. Memoria explicativa, Bucaramanga, INGEOMINAS. Bogotá.
- Parra, E., Caballero, H., Muñoz, R. Zapata, G. y Zuluaga, J. (1984). Pág. 24. Mapa Geológico de Colombia - Escala 1:100000, Plancha 223 - El Cairo. INGEOMINAS. Bogotá.
- Peña M, C. y Mosquera A, C. (2010). Reevaluación de la amenaza sísmica en la ciudad de Cali por medio de un método de análisis integral de la información sismológica. geofísica y geológica. Memoria de Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle. Santiago de Cali. Colombia,122p.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), (2018). Taxonomía de suelos USDA. Consulta 14 de junio de 2018 Recuperad en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/taxonomia-de-suelos-de-usda/es/>
- Romana, M. (1995). "The geomechanical classification SMR for slope correction". En: FUJII (ed.) Proc. 8th Int. ISRM Congress.
- Santacana. (2001). Analisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de Deslizamientos Mediante el Uso de Sistemas de Información Geografica. Aplicación a la Cuenca Alta del Río Llobregar. Barcelona, Catalunya, España: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C (13 de julio de 2006). Resolución 227 de 2006. "Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C. Recuperado de: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=20845>
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (2017). Guía Metodológica Para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1: 25.000. Bogotá, D. C, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (2016). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Bogotá, D. C, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia
- Servicio Geológico Colombiano -SGC y Universidad Nacional (2010). Mapa Nacional de Amenaza Sísmica Periodo de Retorno 475 años. Escala 1:1.500.000.
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (s.f). Glosario de términos Documento en línea. Consultado el 20 de junio de 2018. Recuperado de: <https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx#InplviewHash5aa0669c-85e8-44a8-a289-25b056edb64e=>

- Suárez J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Disponible en: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). (s.f). Degradación de suelos. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/erosion>
- Suriol Castellví, J., Josa García-Tornel, A., y Lloret Morancho, A. (2007). Reconocimiento geotécnico del terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster & Krizek, Landslides: Analysis and Control. Special report 176. Transportation Comisión on Sociotechnical Systems, National Research Council. Washington. D.C: National Academy of Sciences.
- Van Westen, C.J. (1996). Análisis estadístico de riesgo de deslizamiento, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), The Netherlands.
- Villalta A y González M (2011). Zonificación de Amenazas Geológicas por Movimientos en Masa que permita el Ordenamiento Territorial en la Urbanización Ciudad Victoria de Loja (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. Recuperado de:
<http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16301/1/Gonz%C3%A1lez%20Capa%20Mar%C3%ADa%20Paola%20Villalta%20Castillo%20Azucena%20Ondina.pdf>
- Yue, Z. Q. (2014). Dynamics of large and rapid landslides with long travel distance underdense gas expanding power. Landslide Science for a Safer Geoenvironment, 3. Springer, pp. 233-240.

9. ANEXOS

Anexo 1. Variables clasificadas

Anexo 2. Catalogo histórico de MM

Anexo 3. Hidrología