

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

OCTUBRE DE 2022

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVOS	10
2.1.	General	10
2.2.	Específicos.....	10
2.3.	Alcance	10
3.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	11
4.	DEFINICIONES	14
5.	METODOLOGÍA	16
5.1.	Susceptibilidad por movimientos en masa.....	19
5.1.1.	Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Deslizamiento	19
5.1.2.	Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Caída.....	24
5.1.3.	Susceptibilidad por movimientos en masa Tipo Flujo.....	25
5.1.4.	Susceptibilidad Final por movimientos en masa (consolidado)	27
5.1.5.	Leyenda del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa.....	28
5.2.	Catálogo e inventario de movimientos en masa	28
5.2.1.	Catálogo de movimientos en masa.....	29
5.2.2.	Inventario de movimientos en masa	29
5.2.3.	Movimientos en masa no definidos.....	30
5.3.	Amenaza por movimientos en masa	30
5.3.1.	Probabilidad Espacial	32
5.3.2.	Probabilidad Temporal.....	32
5.3.3.	Análisis de magnitud.....	41
5.3.4.	Zonificación de la amenaza por movimientos en masa.....	41
5.3.5.	Validación del modelo de amenaza por MM	42
5.3.6.	Leyenda del mapa de amenaza por movimientos en masa	42
6.	RESULTADOS	44
6.1.	Susceptibilidad por movimientos en masa.....	44
6.1.1.	Susceptibilidad Tipo Deslizamiento	44
6.1.2.	Susceptibilidad Tipo Caída	84
6.1.3.	Susceptibilidad Tipo Flujo	86
6.1.4.	Susceptibilidad final (consolidado).....	88
6.2.	Amenaza por movimientos en masa	91
6.2.1.	Probabilidad espacial.....	91

6.2.2.	Probabilidad temporal.....	91
6.2.3.	Análisis de magnitud.....	104
6.2.4.	Zonificación de la amenaza por movimientos en masa.....	104
6.2.5.	Validación de la amenaza por movimientos en masa	106
7.	CONCLUSIONES	109
8.	REFERENCIAS	112
9.	ANEXOS.....	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comunas de la cabecera urbana de Palmira.....	12
Tabla 2. Comunas de la zona rural de Palmira	13
Tabla 3. Ejemplo de rangos (LSI) para construir la curva de éxito	23
Tabla 4. Categorización de la susceptibilidad por zonas de inicio de movimientos en masa tipo caída.....	25
Tabla 5. Categorización de la susceptibilidad por zonas de depósitos de movimientos en masa tipo caída	25
Tabla 6. Matriz para la categorización de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída	25
Tabla 7. Categorización de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo.....	26
Tabla 8. Unidades / subunidades indicativas de procesos de flujo.....	27
Tabla 9. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes movimientos en masa.....	28
Tabla 10. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes tipos de movimientos en masa	32
Tabla 11. Categorización del factor detonante sismo.....	41
Tabla 12. Esquema base para la elaboración de la leyenda del mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa	43
Tabla 13. Categorización de la variable pendiente verificar	45
Tabla 14. Dirección de la ladera	47
Tabla 15. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio	50
Tabla 16. Siglas de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio	56
Tabla 17. Procesos morfodinámicos	61
Tabla 18. Deslizamientos en las UGS.....	64
Tabla 19. Deslizamientos en las Subunidades geomorfológicas.....	66
Tabla 20. Deslizamientos en las coberturas y usos del suelo	68
Tabla 21. Categorización de la variable pendiente.....	69
Tabla 22. Categorización de la variable orientación de laderas	70
Tabla 23. Categorización de la variable unidades geológicas superficiales	70
Tabla 24. Categorización de la variable cobertura y uso del suelo.....	71
Tabla 25. Categorización de la variable subunidades geomorfológicas	71

Tabla 26. Categorización de la variable curvatura	73
Tabla 27. Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos	80
Tabla 28. Rangos y porcentaje del área bajo la curva.....	82
Tabla 29. Probabilidad espacial	91
Tabla 30. Catalogo histórico de MM.....	92
Tabla 31. Relación de estaciones y precipitación media anual (mm)	94
Tabla 32. Precipitaciones diarias	96
Tabla 33. Precipitación crítica	97
Tabla 34. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno.	99
Tabla 35. Distribución espacial de la precipitación crítica.....	100
Tabla 36. Rangos detonante lluvia.....	102
Tabla 37. Distribución espacial del detonante sismo.....	102
Tabla 38. Probabilidad temporal	104
Tabla 39. Análisis de magnitud	104
Tabla 40. Validación del modelo de la amenaza por MM	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general municipio de Palmira (INS-12)	11
Figura 2. Flujograma metodológico para el análisis de amenaza por movimientos en masa. 18	
Figura 3. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado.....	20
Figura 4. Ejemplo de una curva de éxito	23
Figura 5. Metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia	34
Figura 6. Umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa	35
Figura 7. Máxima distancia epicentral para movimientos en masa no coherentes	38
Figura 8. Áreas afectadas por movimientos en masa durante sismos.....	38
Figura 9. Mapa Pendiente (INS 2).....	46
Figura 10. Mapa Orientación de las laderas (INS 3)	49
Figura 11. Mapa Unidades geológicas superficiales (GEOL 1)	52
Figura 12..Mapa Cobertura y uso del suelo (COB 1)	55
Figura 13. Mapa Subunidades geomorfológicas (GMF 1)	58
Figura 14. Mapa Curvatura (INS 4)	60
Figura 15. Mapa Inventario de procesos morfodinámicos (MM 1)	62
Figura 16. Número de deslizamientos en cada tipo	63
Figura 17. Numero de deslizamientos por sector	64
Figura 18. Deslizamientos en las UGS	65
Figura 19. Deslizamientos en las Subunidades geomorfológicas.....	67
Figura 20. Deslizamientos en las coberturas y usos del suelo	68
Figura 21. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable pendiente (MM 2).....	74

Figura 22. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable orientación de laderas.....	75
Figura 23. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable UGS	76
Figura 24. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable cobertura y uso del suelo	77
Figura 25. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable subunidades geomorfológicas	78
Figura 26. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable curvatura ...	79
Figura 27. Mapa Susceptibilidad tipo deslizamiento, sin clasificar (MM 3)	81
Figura 28. Curva de éxito susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento	82
Figura 29. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento (MM 4)	83
Figura 30. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída (MM 5)	85
Figura 31. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo (MM 6)	87
Figura 32. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa (consolidado) (MM 7)	89
Figura 33. Porcentaje de susceptibilidad por movimientos en masa	90
Figura 34. Mapa Precipitación anual (INS 15).....	95
Figura 35. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Auji.....	98
Figura 36..Mapa probabilidad de excedencia del detonante lluvia (MM 8)	101
Figura 37. Mapa detonante sismo (MM 9.).....	103
Figura 38. Mapa Amenaza por movimientos en masa para el suelo rural del municipio de Palmira (MM 10)	105
Figura 39. Porcentaje de amenaza por movimientos en masa.....	106
Figura 40. Mapa Validación del modelo de amenaza por movimientos en masa (MM 11) ..	107

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.

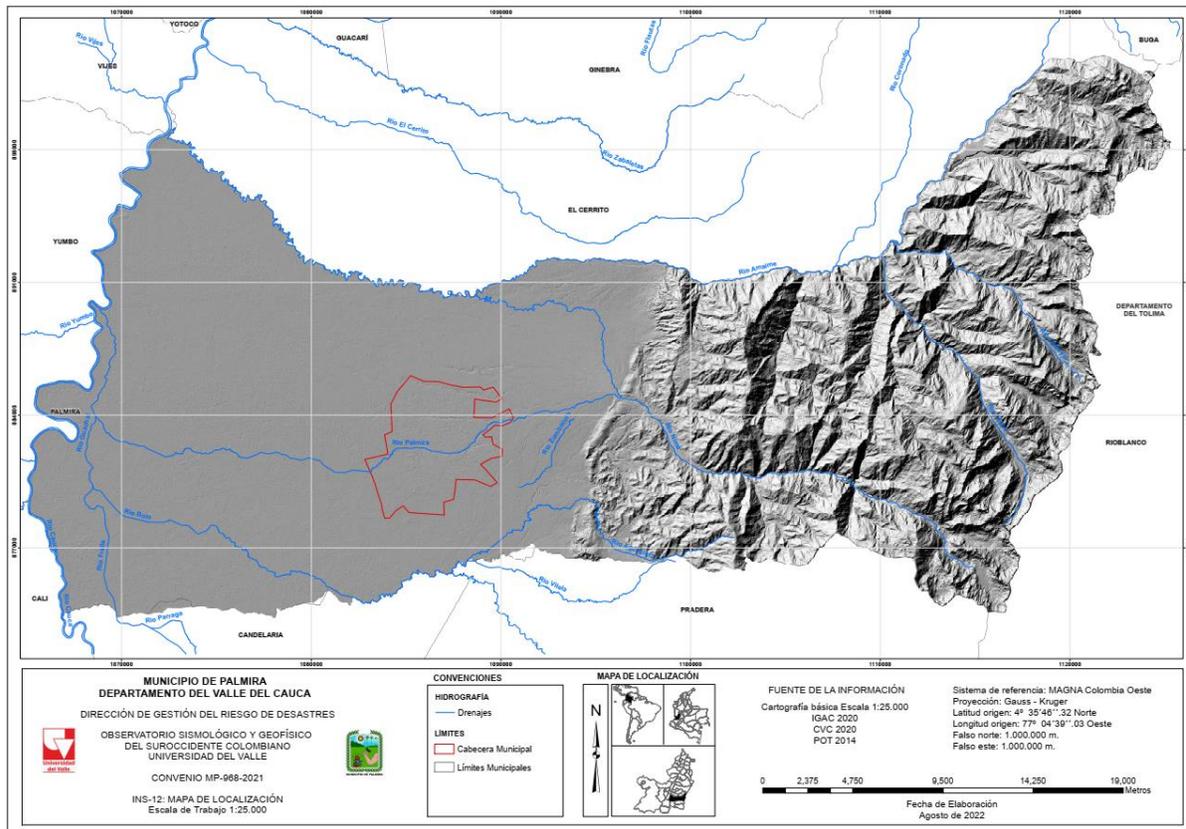


Figura 1. Localización general municipio de Palmira (INS-12)

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 Hermosas y la Reserva Forestal Central, los elementos del sistema hídrico: principalmente el Basín 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	Barrios	No. Barrios
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. DEFINICIONES

Se transcriben algunas definiciones contenidas en el glosario del proyecto “Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas”, ya que se consideran útiles para efectos del desarrollo del informe.

Actividad histórica: Evidencia geológica o histórica de la ocurrencia de un movimiento en masa.

Amenaza: Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. La caracterización de la amenaza debe incluir su ubicación, clasificación, magnitud o intensidad, y se evalúa en función de probabilidad de ocurrencia espacial y temporal. La magnitud o intensidad de la amenaza se pueden expresar en términos de volumen, área, velocidad, intensidad o energía, (SGC, 2015).

Caída: Tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de la superficie de un talud, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire, pero con algunos golpes, rebotes y rodamiento. Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo.

Cárcava: Tipo de erosión concentrada en surcos que se forma por el escurrimiento de las aguas sobre la superficie de las laderas.

Coluvial: Forma de terreno o material originado por la acción de la gravedad.

Coluvión: Depósito de material coluvial.

Complejo: Tipo de movimiento en masa que involucra una combinación de uno o más de los tipos principales de movimientos, ya sea dentro de las diferentes partes que componen la masa en movimiento, o en los diferentes estados de desarrollo del movimiento.

Compuesto: Estilo de movimiento en masa en el cual diferentes tipos de movimiento ocurren en diferentes áreas de la masa desplazada, en ocasiones simultáneamente.

Corona: Zona adyacente arriba del escarpe principal de un deslizamiento que prácticamente no ha sufrido desplazamiento ladera abajo. Sobre ella suelen presentarse algunas grietas paralelas o semiparalelas conocidas como grietas de tensión o de tracción.

Deslizamiento: Movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o zonas relativamente delgadas con gran deformación cortante (Cruden y Varnes, 1996).

Deslizamiento rotacional: Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. La cabeza del movimiento puede moverse hacia abajo dejando un escarpe casi vertical, mientras que la superficie superior se inclina hacia atrás en dirección al escarpe. Ocurre frecuentemente en masas de material relativamente homogéneo, pero también pueden estar controlados parcialmente por superficies de discontinuidad pre-existentes (Cruden y Varnes, 1996).

Deslizamiento traslacional: sin.: deslizamiento planar. Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se desplaza a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o plano de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella (Cruden y Varnes, 1996).

Detonante: Acción, o evento natural o antrópico, que es la causa directa e inmediata de un movimiento en masa. Entre ellos pueden estar, por ejemplo, los terremotos, la lluvia, la excavación del pie de una ladera y la sobrecarga de una ladera.

Flujo: Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido, pero que en principio se origina en otro movimiento como un deslizamiento o caída.

Flujo de tierra: Es un movimiento intermitente, rápido o lento, de tierra arcillosa plástica.

Reptación: La reptación se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla y es de tipo estacional, cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo.

Movimiento en masa: Son todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efecto de la gravedad.

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, unidades geológicas superficiales, coberturas de la tierra, 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 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.

Las evaluaciones de amenaza por movimientos en masa estiman la probabilidad de ocurrencia para un periodo de tiempo definido (Varnes, 1984). Esta información puede deducirse de la distribución espacial de la susceptibilidad a los movimientos en masa obtenida a partir de la correlación entre los factores condicionantes del terreno y la distribución de los movimientos en masa observados en el territorio (Brabb, 1984; Eeckhaut et al., 2011)

La dimensión temporal de la amenaza de los movimientos en masa depende de los factores detonantes (lluvia y sismo), sin embargo, en la mayoría de los casos, la dimensión de tiempo es difícil de evaluar debido a la ausencia de registros históricos (Jaiswal et al., 2010).

En este estudio, la zonificación de amenaza por movimientos en masa se obtuvo a partir de un modelo probabilístico de amenaza por movimientos en masa, asumiendo que la probabilidad espacial está dada por la susceptibilidad, la probabilidad temporal por los detonantes lluvia y sismo, de acuerdo con los niveles críticos que pueden detonar un evento y considerando la probabilidad que un deslizamiento con determinada magnitud se presente (Jaiswal, 2010). Se supone la independencia de las probabilidades.

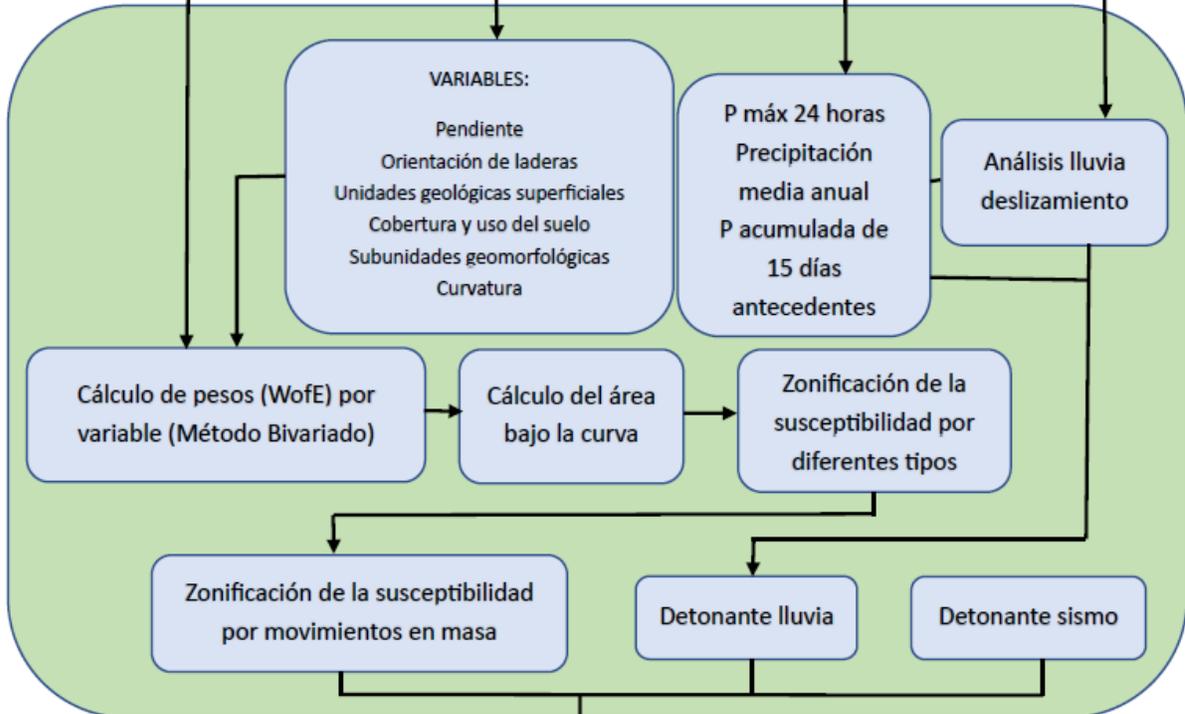
Para caracterizar la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa en el área de estudio, se tomó como base la “Guía metodológica para AMENAZA POR MM SC 1_25.000”. adicional a ello, se realizó la evaluación de factores que inciden en la susceptibilidad del terreno ante este fenómeno natural estableciendo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

A continuación (Figura 2), se presenta el esquema metodológico para determinar la amenaza por movimientos en masa.

INSUMOS



DESARROLLO



PRODUCTO

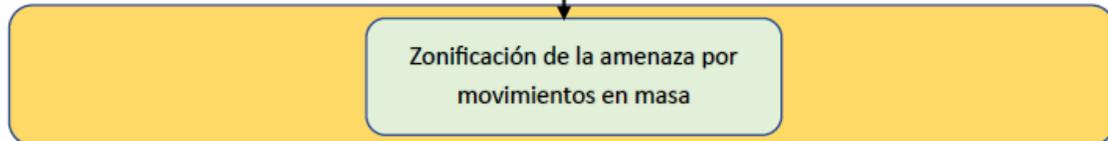


Figura 2. Flujograma metodológico para el análisis de amenaza por movimientos en masa
Fuente: Elaboración propia

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; inventario de los procesos morfodinámicos (deslizamientos ocurridos en el área de estudio), pendiente, orientación de laderas, unidades geológicas superficiales, cobertura y uso del suelo, subunidades geomorfológicas y curvatura por medio del método Bivariado.

Los análisis estadísticos bivariados definen múltiples variables temáticas, una variable dependiente (inventario de los procesos morfodinámicos) 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 cuatro rangos de intensidad (Muy Alta, 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 3), las variables fueron definidas según el análisis del grupo multidisciplinario (geólogos, ingenieros civiles, geógrafos, hidrólogos, geotecnista, entre otros).

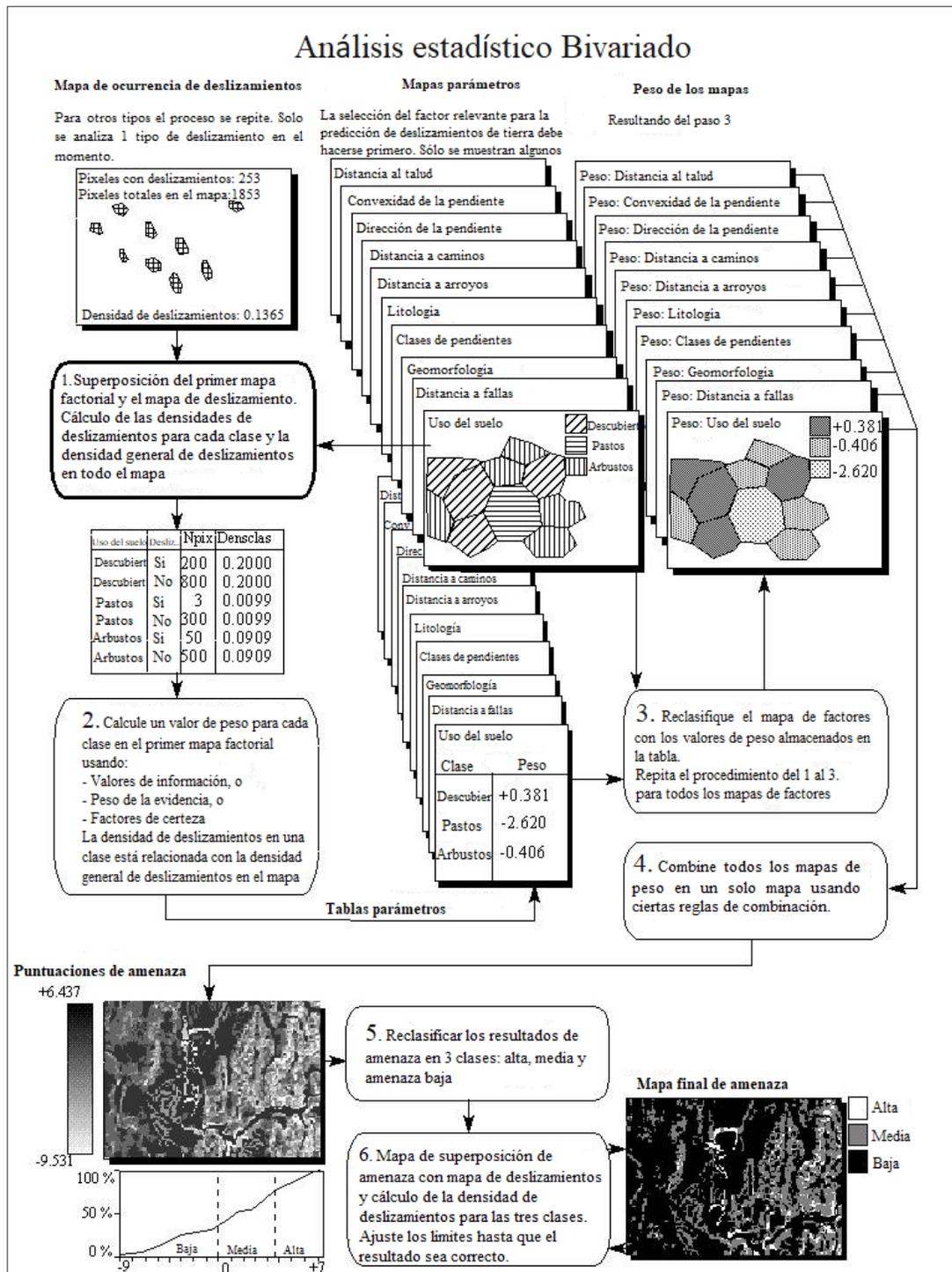


Figura 3. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado

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).

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

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

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 (sumatoria de capas), se procede a realizar un análisis de frecuencia para determinar las categorías de susceptibilidad (muy alta, alta, media y baja).

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 4).

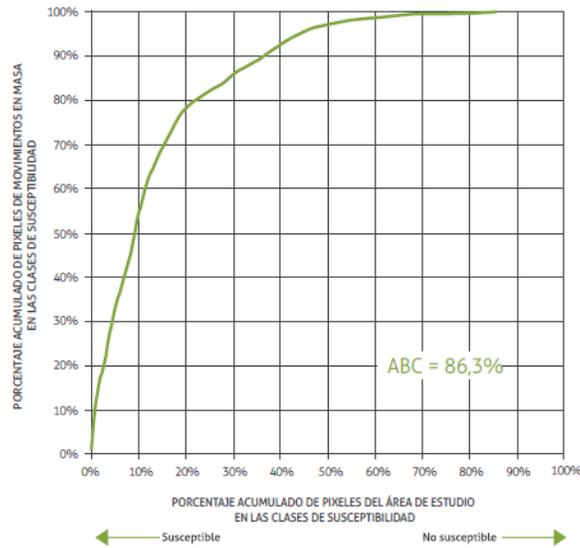


Figura 4. Ejemplo de una curva de éxito
Fuente: Tomado SGC 2017

Se genera la primera muestra de cuatro rangos (muy alta, alta, media y baja) y se determina para cada rango los píxeles de movimiento en masa y los píxeles del área. Ejemplo

Tabla 3. Ejemplo de rangos (LSI) para construir la curva de éxito

Rangos	Categorías	# Píxeles Movimiento en masa	% Movimiento	# Píxeles del área de estudio	% Área	% Acumulado de Movimientos en masa	% Acumulado del área de estudio	% Área bajo la curva
						0.00	0.00	0.00
-11.0966_ -1.0394	Baja	7323	32.18	1566276	77.30	32.18	0.91	0.15
-1.0394_ 0.0313	Media	4795	21.07	237294	11.71	53.25	10.99	4.31
0.0313_ 2.3514	Alta	8004	35.17	204333	10.08	88.42	22.70	8.29
2.3514_ 11.6585	Muy Alta	2636	11.58	18404	0.91	100.00	100.00	72.82
						Eje Y	Eje X	85.6

Fuente: Elaboración propia

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% y los rangos establecidos serán aprobados y se reclasificara el mapa de susceptibilidad por deslizamiento. En caso que el ajuste sea menor al 70% se debe establecer nuevos rangos y repetir el proceso.

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 4): 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 5.

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 6.

Tabla 4. 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 5. 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 6. 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 fluvio-torrencial.

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 7). 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 7. Categorización de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo

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

Fuente: SGC 2017

Tabla 8. 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
	Abanico aluvial	Faa
Fluvial	Abanico aluvial antiguo	Faaa
	Abanico aluvial subcreciente	Faas
	Abanico aluvial actual	Faaac
	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 9.
3. Reclasificar de acuerdo con las categorías de la matriz.
4. Al Resultado del cruce de susceptibilidad tipo deslizamiento y tipo caída, se le superpone la susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo.
5. Aplicar la matriz presentada en la Tabla 9, entre el resultado del cruce de susceptibilidad tipo deslizamiento y tipo caída y la susceptibilidad tipo flujo.
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 9. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes movimientos en masa

Susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída	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. Catalogo e inventario de movimientos en masa

En una zonificación de amenazas por movimientos en masa la recopilación de los eventos históricos relacionados con la inestabilidad de laderas, es esencial para la aplicación de cualquiera de las metodologías para la zonificación de amenaza, tanto con enfoque cualitativo como cuantitativo. La consolidación y clasificación de la información se realiza de acuerdo con el nivel de información que se tenga de un movimiento en masa determinado, generándose tres niveles de información:

- Catálogo de movimientos en masa

- Inventario de movimientos en masa
- Movimientos en masa obtenidos de sensores remotos

5.2.1. Catálogo de movimientos en masa

El catálogo de movimientos en masa, según se encuentra estructurado en el Sistema de Información de Movimientos en Masa – SIMMA del SGC, se ha consolidado a partir de información secundaria que se obtiene de la revisión bibliográfica de documentos de entidades como la Gobernación, la Corporación Autónoma Regional, los Bomberos, la Defensa Civil, las diferentes Secretarías de las Alcaldías Municipales, las empresas prestadoras de servicios públicos y especialmente de los medios de comunicación escrito.

La base de datos debe contener la fecha de recopilación de la información, la fecha del evento, la fuente de la información, la localización, los daños o afectaciones, el tipo de movimiento en masa, las dimensiones y sus causas.

La utilidad del catálogo de movimientos en masa está dada según el nivel de calidad de la información obtenida. En general debe tenerse certeza de la fecha de ocurrencia del evento, con el fin de realizar los análisis de las relaciones lluvia – deslizamiento y sismo – deslizamiento, que permitiría evaluar la probabilidad temporal necesaria para la evaluación de la amenaza a escala regional (1:25.000).

5.2.2. Inventario de movimientos en masa

La variable más importante en la evaluación de la función de la susceptibilidad a los movimientos en masa corresponde a la construida a partir de la identificación, localización y caracterización de los movimientos en masa dentro del área de estudio.

El inventario de movimientos en masa, se realiza con base en la metodología propuesta por PMA (2007).

El trabajo de campo consiste en la localización geográfica y caracterización de los movimientos en masa en el área de estudio con datos como tipo y actividad del movimiento, litología y estructuras asociadas, tipo de material, humedad, velocidad, morfometría y posibles detonantes, entre otros.

Adicionalmente, de acuerdo con el planteamiento metodológico para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, la escala de trabajo y el trabajo de campo, los movimientos en masa son registrados en un formato de inventario según la dimensión del deslizamiento, la accesibilidad al sitio y los elementos expuestos, como cercanía a vías o viviendas que puedan ser o hayan sido afectados por un movimiento en masa. Los movimientos en masa que no sean considerados relevantes, según las definiciones anteriores, se relacionan en una base de datos con un contenido mínimo de atributos, que permitirá que

la información sea de utilidad en la zonificación de amenaza. Sin excepción todos los movimientos en masa deben considerarse dentro del análisis.

El llenado de campos básicos, contiene la siguiente información:

- Código
- Nombre de quien levantó el formato o el levantamiento de información básica
- Fecha del levantamiento de la información
- Fecha del evento (si aplica)
- Coordenadas de localización
- Altura
- Tipo de deslizamiento
- Actividad (Activo o inactivo)
- Longitud del deslizamiento
- Ancho del deslizamiento
- Espesor de la masa desplazada

5.2.3. Movimientos en masa no definidos

Dentro del trabajo de campo para el inventario de movimientos en masa hubo algunos movimientos que por condiciones de accesibilidad fueron levantados mediante visuales sobre la cartografía a escala 1:25.000, razón por la cual pueden localizarse geográficamente y, considerando la escala del mapa, se establecieron las dimensiones aproximadas, sin embargo, la identificación del tipo de movimiento y las demás características contenidas en el formato, no fue posible obtenerlas.

A partir los sensores remotos como fotografías aéreas e imágenes satelitales, que son de utilidad para complementar la identificación de movimientos en masa, se puede obtener su localización geográfica y establecer sus dimensiones, pero igual que en los anteriores no se puede definir el tipo de movimiento en masa.

En los dos casos descritos, debido a la limitación en la obtención de la información, la base de datos que contiene el inventario de movimientos en masa, contiene el campo del tipo de movimiento como “No Definido”.

5.3. 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 10.

Tabla 10. 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

5.3.1. 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.

5.3.2. 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.

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

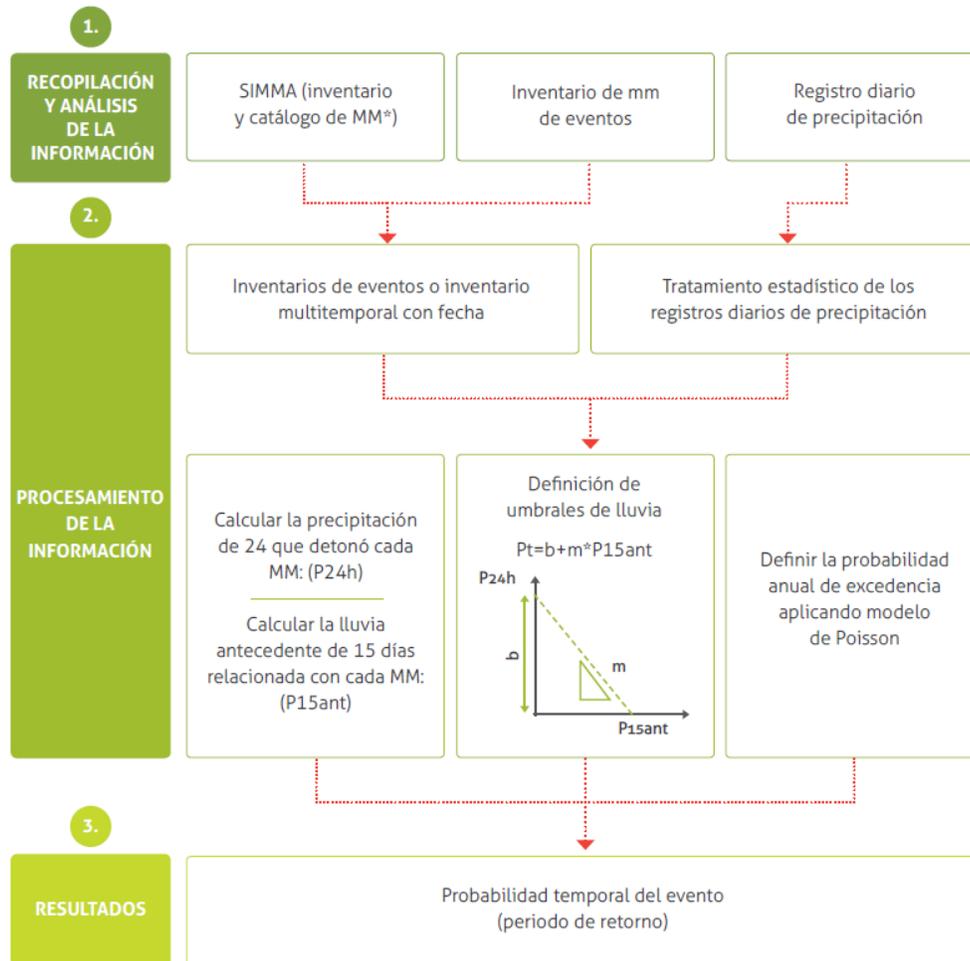


Figura 5. Metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia
Fuente: SGC 2017

A partir de la recopilación de información y análisis de la información se definió el inventario de eventos o inventario multitemporal con la fecha que la que ocurrieron los deslizamientos. Otro punto importante es definir cuáles son las estaciones que influyen en nuestra zona de estudio.

Al tener el inventario de eventos y las estaciones meteorológicas, se precisa cuáles son las estaciones que influyen en los deslizamientos (más cercanas a los eventos), se realiza el respectivo cruce cartográfico entre la historicidad y los polígonos de Thiessen para determinar las estaciones con influencia en cada una de las áreas con eventos de movimiento en masa registrados y se realiza el tratamiento estadístico de los registros diarios de precipitación.

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).

En el caso de palmira, se tenían registros de precipitación diaria y un catálogo histórico de movimientos en masa, a partir de los cuales se obtuvo una regionalización de la precipitación acumulada de 15 días antecedentes. 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 (15 días) 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 (15 días) días antecedentes (P_{Nant}) y en el eje de las ordenadas (y) la precipitación de las 24 horas (precipitación máx. de 24 horas en el periodo de tiempo de 15 días) (P_{24h}) (ver Figura 6).
- 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 (Precipitación crítica) y se puede establecer a partir de las áreas específicas de análisis o para estaciones pluviométricas definidas (Jaiswal & van Westen, 2009).

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

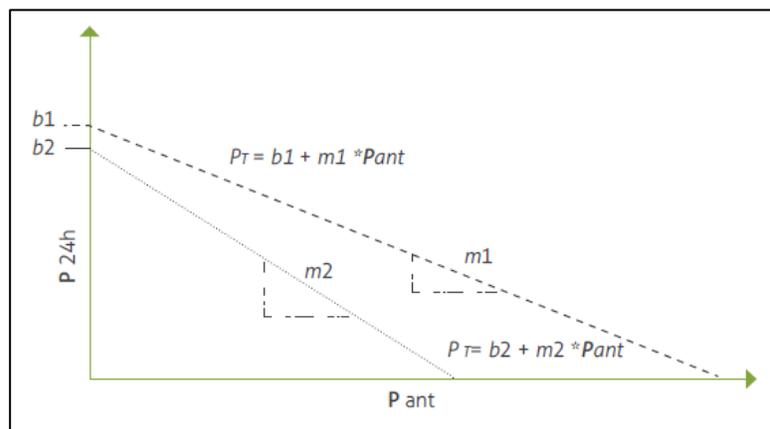


Figura 6. Umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa
Fuente: SGC 2017

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

Para determinar el periodo de retorno (T), se utilizarán los registros de intensidad-duración-frecuencia de cada una de las estaciones pluviométricas.

Se realiza un análisis estadístico de la probabilidad de excedencia de la ocurrencia de los movimientos en masa y se clasifica en tres categorías (Alta, media y baja).

5.3.2.2. 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 7 y Figura 8. 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).

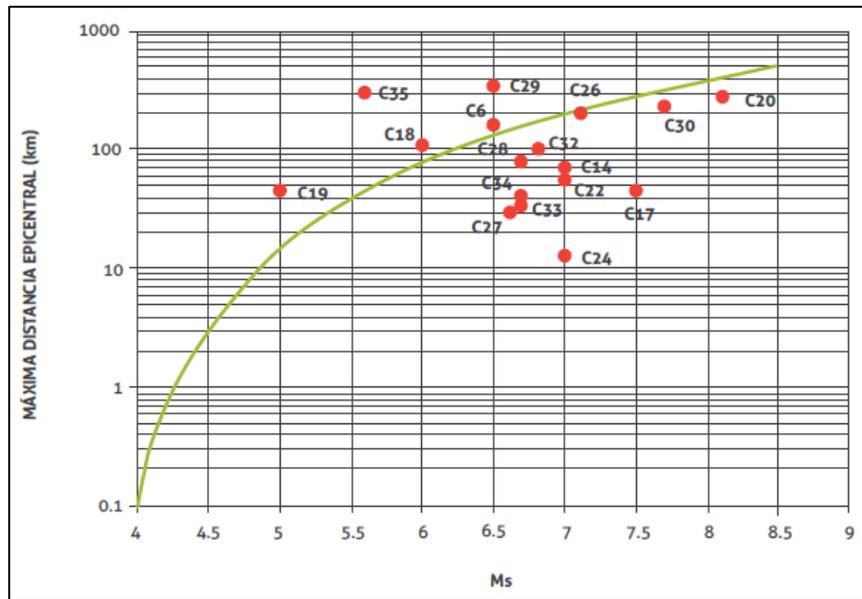


Figura 7. Máxima distancia epicentral para movimientos en masa no coherentes
Fuente: Tomado de Rodríguez (2017).

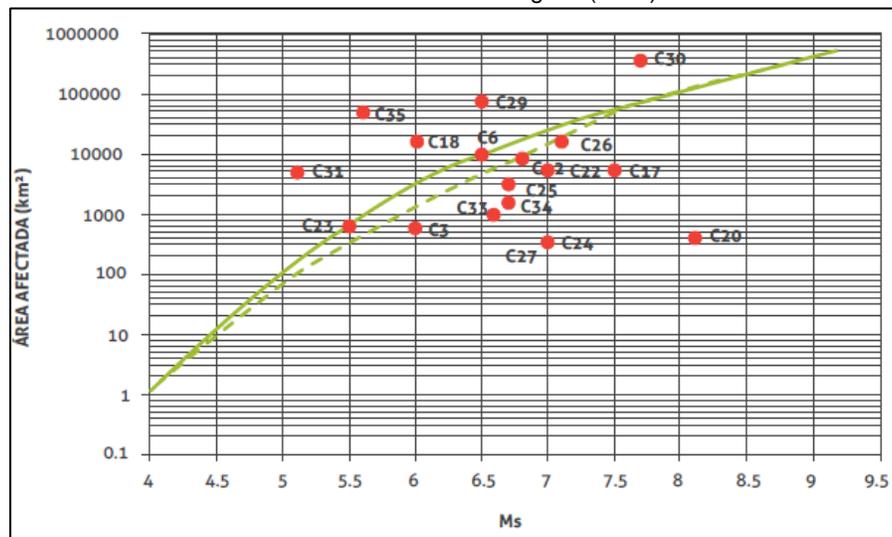


Figura 8. Áreas afectadas por movimientos en masa durante sismos
Fuente: Tomado de Rodríguez (2017).

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 8. 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:

$$P(N \geq 1; t) = 1 - (e^{-\lambda t}) \quad (12)$$

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.

$$a = 1320 e^{0.58m} (r + 25)^{-1.520} \quad (13)$$

Donde,

a es la aceleración máxima horizontal a nivel de roca (cm/seg²)

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 13.

Tabla 11. 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

5.3.3. 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.

5.3.4. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

El mapa de zonificación de la amenaza debe presentar tres categorías de acuerdo con la Tabla 12. 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) y se cruzan con los factores detonantes (lluvia y sismo) y se reclasifica en tres

categorías (Alta, media y baja). Estos resultados se expresan en áreas y porcentajes de cada categoría.

5.3.5. 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%). Este procedimiento se realiza para los 751 deslizamientos encontrados en la zona de estudio.

5.3.6. 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 12 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 12. Esquema base para la elaboración de la leyenda del mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa

categoria	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 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.

6.1.1.1. 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, unidades geológicas superficiales, cobertura y uso del suelo, subunidades geomorfológicas, curvatura y movimientos (deslizamientos ocurridos en el área de estudio), el análisis también se basa en el reconocimiento 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.

▪ 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 13, 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 13. 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 9), 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.

- **Interés**

La pendiente está relacionada con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad. La variable se relaciona directamente con las tensiones de corte tangenciales y normales en la formación superficial, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Santacana, 2001).

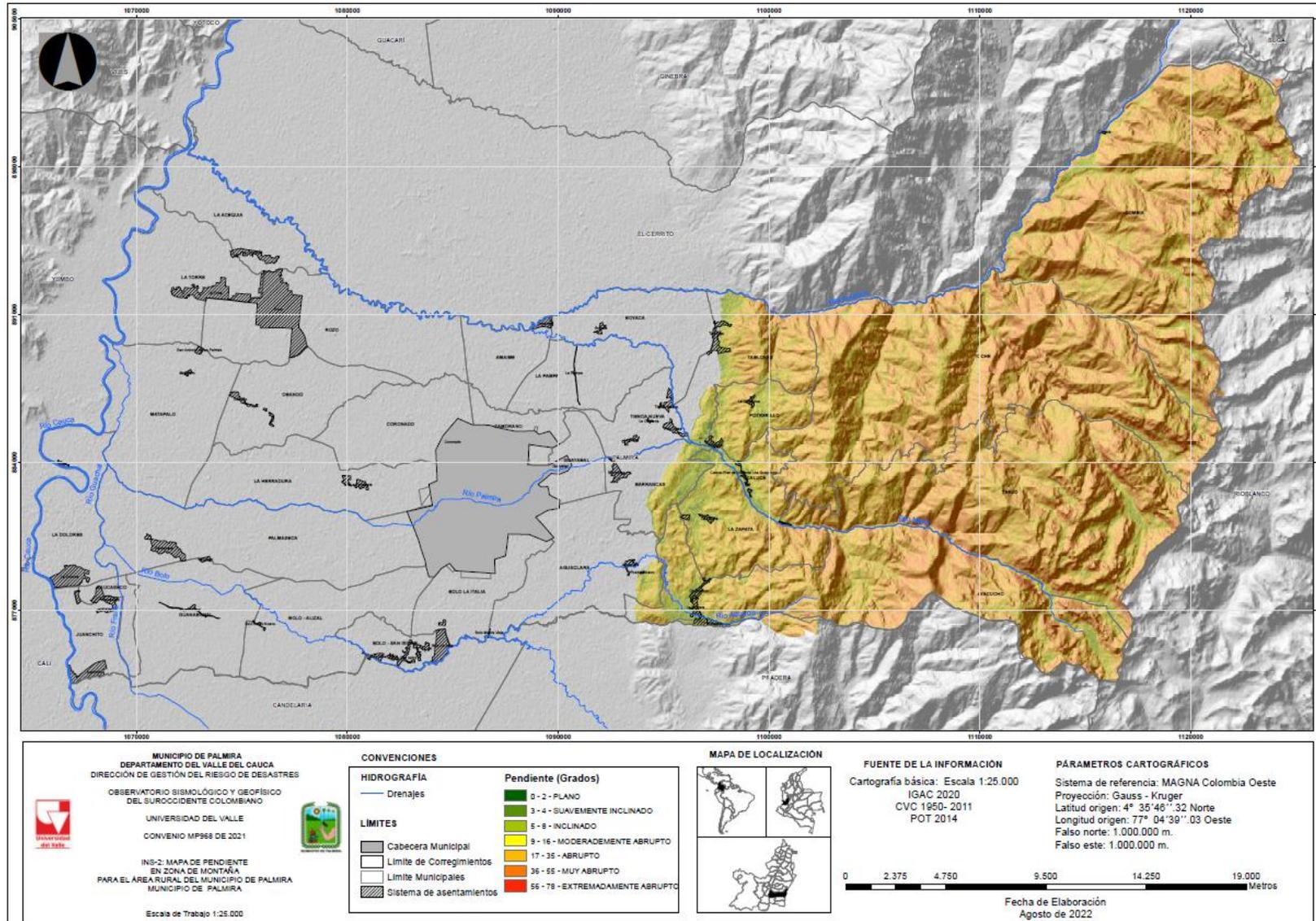


Figura 9. Mapa Pendiente (INS 2)
Fuente: Elaboración propia

▪ Orientación de las laderas

Es importante determinar la orientación que presenta el relieve ya que su determinación se convierte en información útil para diferentes investigaciones, la orientación de las laderas ayuda por un lado a determinar el tiempo de exposición de la ladera a la radiación solar y, por otro lado, a establecer las corrientes fluviales, es decir, la orientación de la pendiente tiene una influencia indirecta en el contenido de humedad del suelo, que está relacionado a la reducción de las tensiones efectivas en la superficie de falla potencial (Neuland, 1976; Carrara, 1983).

“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 14).

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 14. 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 10), 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.

- **Interés**

El cálculo de la orientación de las laderas brinda información acerca de la cantidad de lluvia que recibe, las áreas de donde hay mayor o menor insolación, indicando de esta manera zonas húmedas o secas y áreas con mayor presencia de vegetación.

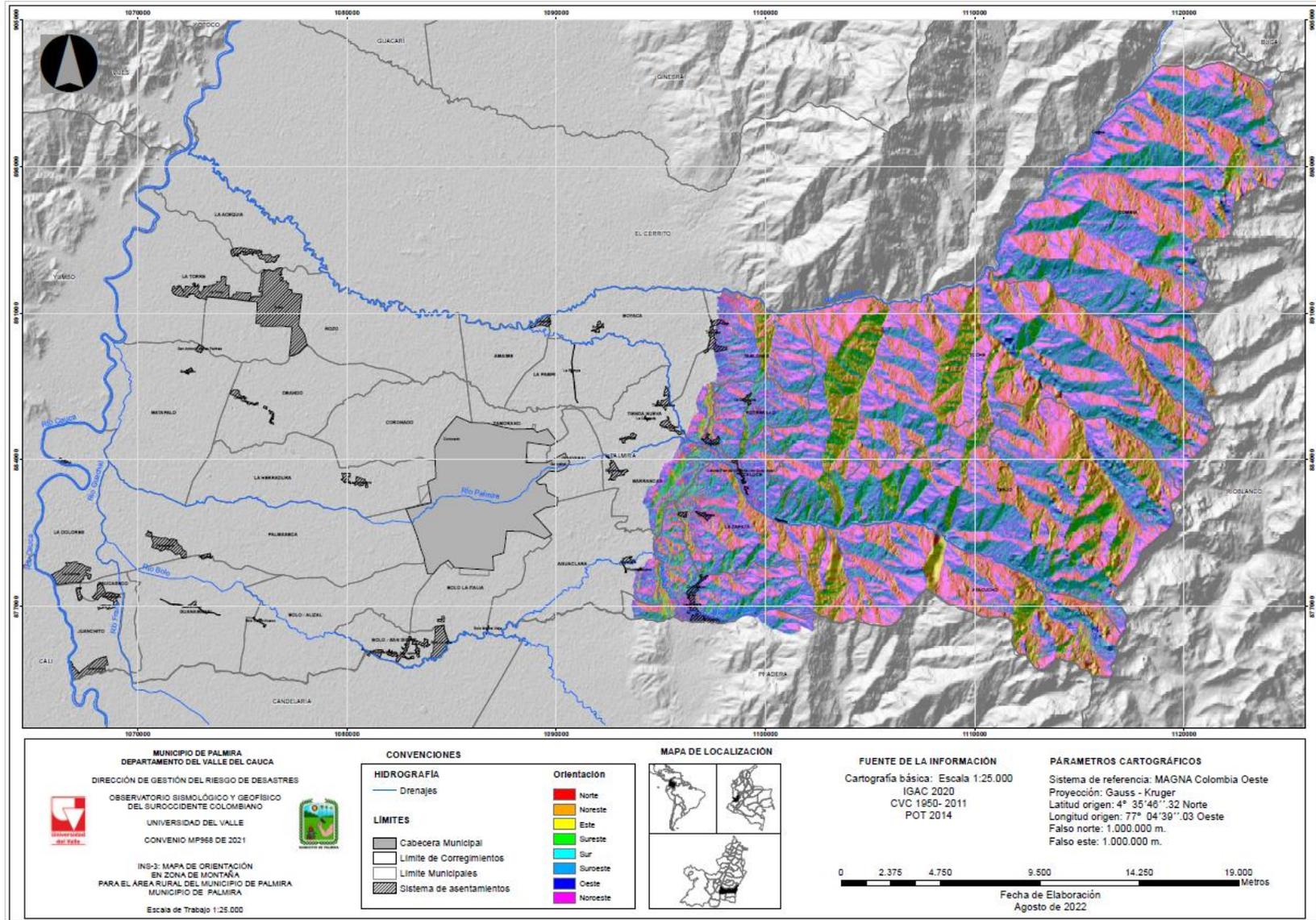


Figura 10. Mapa Orientación de las laderas (INS 3)

Fuente: Elaboración propia

■ Unidades Geológicas Superficiales

Se definieron las Unidades geológicas superficiales, identificándolas inicialmente de acuerdo a su origen: Rocas (R) o Suelos (S), y posteriormente por sus características litoestratigráficas (composición y estructura) y relieve. La mayoría de unidades geológicas superficiales corresponden a suelos transportados (St) y antrópicos (Sa), también se encontraron áreas con afloramiento de roca (R).

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 15 exhibe las siglas con la cual se representa cada unidad.

Tabla 15. 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 11), 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 (abarcan 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).

- **Interés**

Esta variable refleja las características de los diferentes tipos de rocas (ígneas, metamórficas y sedimentaria) y depósitos que se agrupan teniendo en cuenta su origen, así como sus características texturales y propiedades geomecánicas (IDEAM, 2012).

Los depósitos en general son los que presentan menos resistencia y mayor susceptibilidad a los movimientos en masa. Para la ponderación de los depósitos se tiene en cuenta la resistencia y su comportamiento en taludes y laderas del país, a partir de la información existente en la “Clasificación regional de amenaza relativa de movimientos en masa en Colombia” (INGEOMINAS, 2002).

Suelos transportados (por aire o agua): Los aluviones son depósitos conformados por materiales gruesos y matriz de finos en los tramos de ambiente montañosos y por materiales finos en los valles amplios. La gradación está ligada a la velocidad de la corriente, por lo general baja en los valles amplios (Duque y Escobar, 2002).

Suelo antrópicos y relleno de escombros: Como su nombre lo indica son producidos por el hombre, estos presentan una mayor inestabilidad, dado que son suelos sueltos, en los cuales no presentan un nivel de cohesión.

Roca: Materiales sólidos de la corteza terrestre que afloran en la superficie de la tierra. Según su origen se distinguen: rocas ígneas (intrusivas o plutónicas y efusivas o volcánicas), rocas sedimentarias y metamórficas que resultan de las variaciones por temperatura o presión de los primeros tipos de rocas mencionados. (SGC, s.f)

▪ 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 12 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.

- **Interés**

El tipo de cobertura y su densidad influyen en la capacidad de infiltración, en la evapotranspiración, entre otras características que presente el suelo y su relación con lo hidrológico. En relación a lo mecánico, las raíces de los árboles ejercen una acción de amarre que brinda estabilidad a las laderas

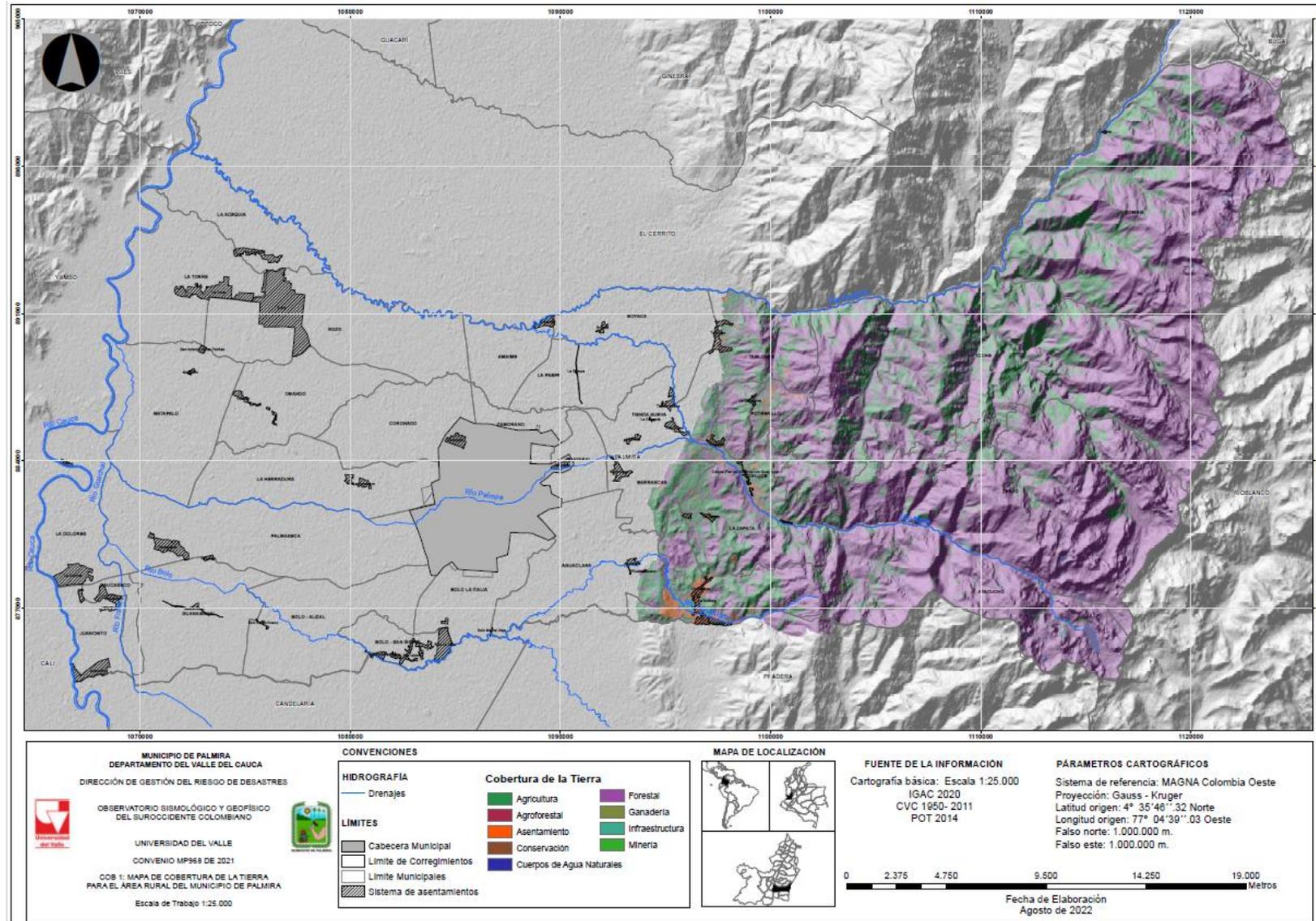


Figura 12..Mapa Cobertura y uso del suelo (COB 1)

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 geomorfo-genética 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 16 se presentan las nueve (9) categorías de ambientes morfogenéticos.

Tabla 16. 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	en ambientes húmedos y cálidos; tales como la caliza y sal. Corresponde a todas aquellas geoformas producto de la actividad del hombre y que modifican la superficie del terreno.

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 13.

- **Interés**

La variable indica cómo se forma el paisaje y los agentes internos y externos que ayudan a su formación, lo cual permite inferir la posible reacción o respuesta frente a las tensiones de corte y la resistencia, estas fuerzas no dependen únicamente de la geoforma, aquí actúan otros factores tales como el tipo de suelo, la geología del sitio y la actividad que se desarrolle en él (actividad antrópica), ejemplo de ellos es un paisaje denudativo, el cual dependiendo el agente que intervenga (agua o aire) presentará una mayor o menor propensión a deslizarse.

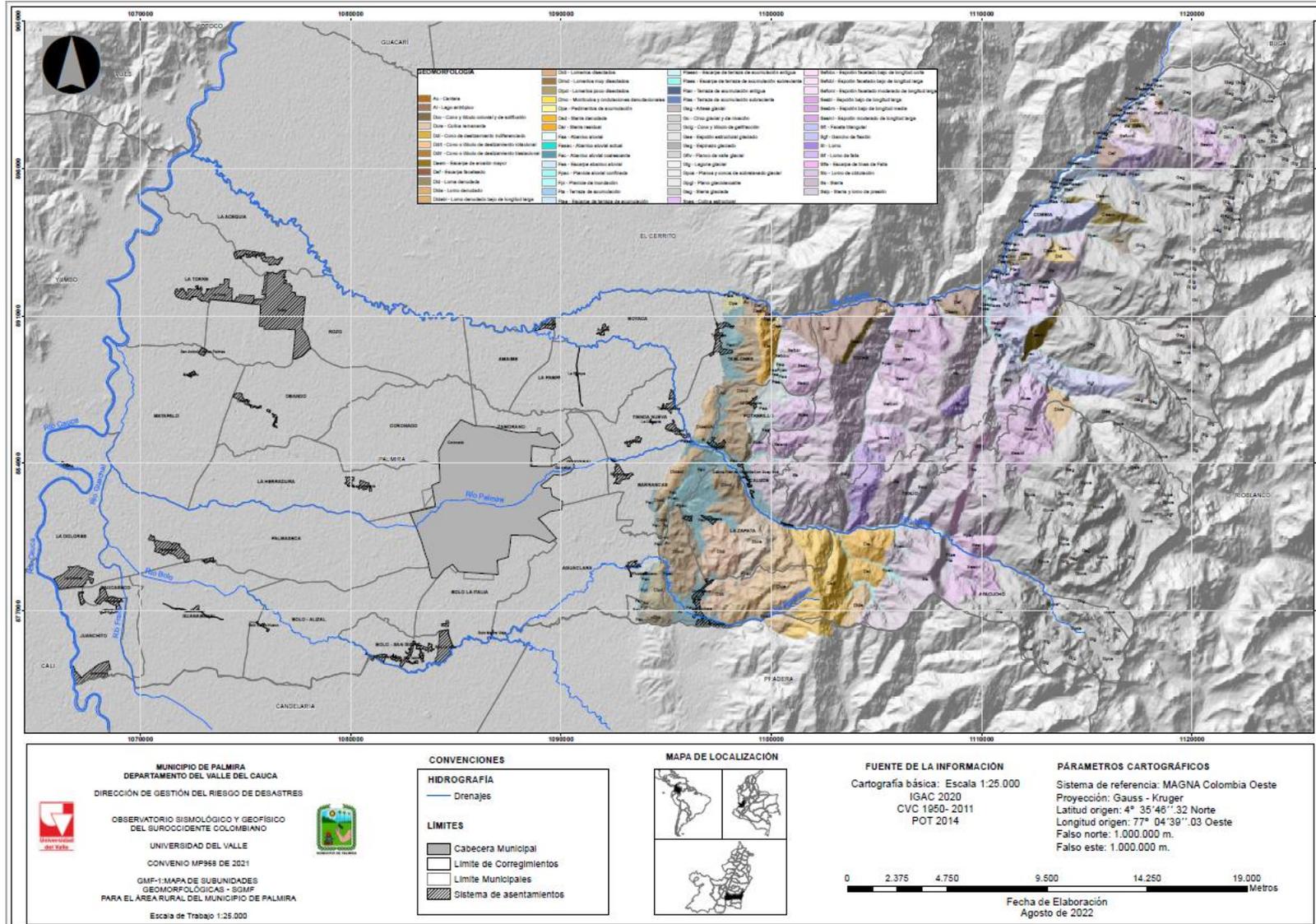


Figura 13. Mapa Subunidades geomorfológicas (GMF 1)

Fuente: Elaboración propia

▪ **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.

• **Interés**

La variable curvatura longitudinal, indica la efectividad de la topografía para concentrar o escurrir la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa la forma de la pendiente o el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la infiltración y la escorrentía y la aceleración y deceleración del flujo, y por tanto influye en la erosión y depositación.

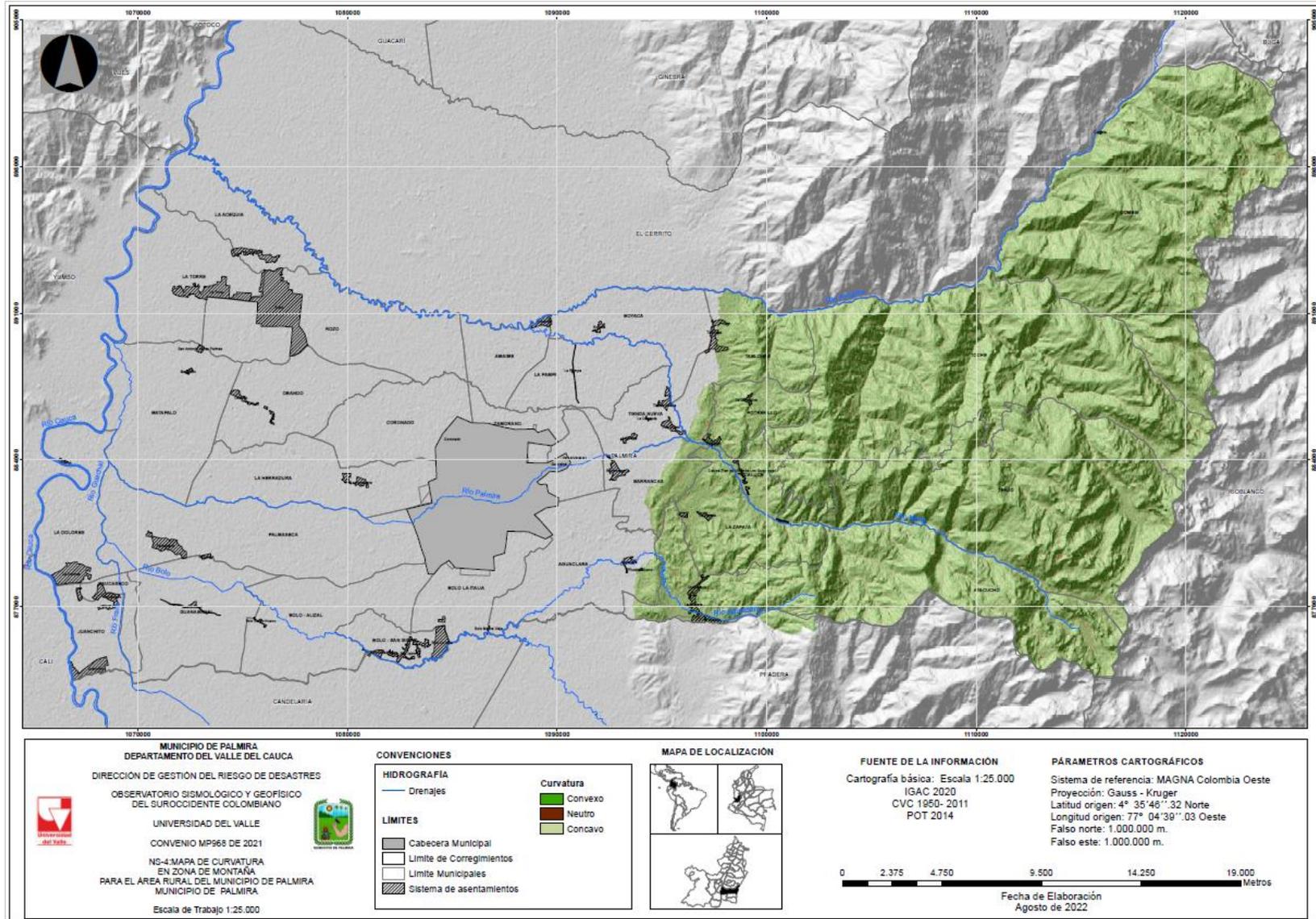


Figura 14. Mapa Curvatura (INS 4)
 Fuente: Elaboración propia.

▪ 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. El mapa de Inventario de Movimientos en Masa a escala 1:25K contiene estos movimientos en masa y algunas características del terreno que fueron considerados importantes por su susceptibilidad (751 deslizamientos) a generar movimientos en masa y que se identificaron durante el trabajo de campo y a partir de sensores remotos. A continuación, en la tabla 17 se presenta el tipo y número de los procesos morfodinámicos encontrados en la zona de estudio y en la Figura 15 se muestra la distribución de cada uno de los movimientos.

Tabla 17. Procesos morfodinámicos

Tipo	Número (un)	Área (m ²)
Caída (cr: rocas)	1	9029.03
Coluvión	14	278494.00
Deslizamiento (dr: rotacional dt: traslacional)	478	425398.10
Flujos	222	247467.00
Reptación	36	97125.00

Fuente: elaboración propia

• Interés

Indica la existencia o ausencia de deslizamientos previos, permitiendo establecer las relaciones estadísticas con las variables condicionantes. Muestra las evidencias de deslizamientos pasados, a partir de los cuales es posible establecer la predicción (Santacana, 2001).

Los procesos morfodinámicos sirven además para la validación del modelo de amenaza por MM

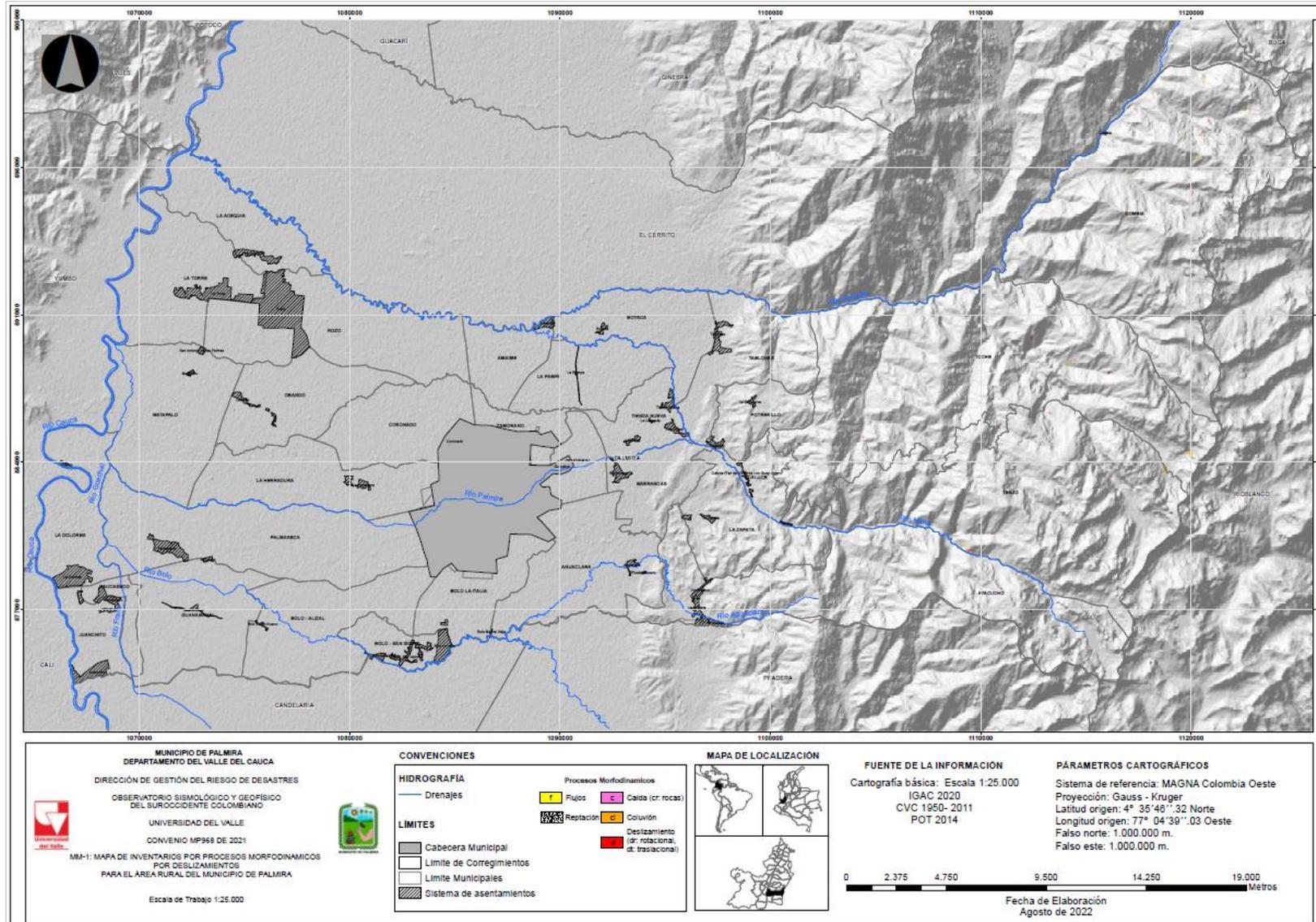


Figura 15. Mapa Inventario de procesos morfolodinámicos (MM 1)

Fuente: Elaboración propia.

▪ Distribución de los movimientos en masa en el municipio

El número total de deslizamientos es de 751 entre caída de rocas, coluvión, deslizamiento (Rotacional y traslacional), flujos y reptación de los cuales el 0.13% (1) corresponden a caída de rocas, el 1.86% a coluvión (14), el 63.65% a deslizamiento (Rotacional y traslacional) (478), el 29.56% a flujos (222) y el 4.79% a reptación (36), ver Figura 15.

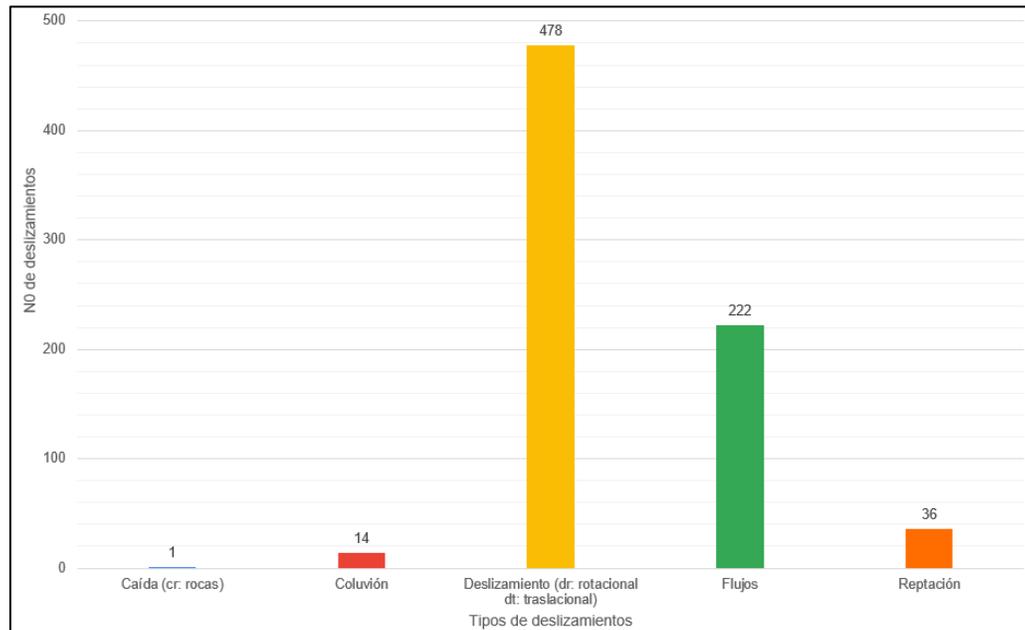


Figura 16. Número de deslizamientos en cada tipo

El municipio de Palmira puede diferenciarse espacialmente de acuerdo con sus características socio-económicas en cuatro regiones como son noroccidente, suroccidente, nororiental y suroriental, para las cuales se realizó el análisis estadístico de los movimientos en masa reportados en la base de datos y la distribución de éstos en las regiones mencionadas se muestra en la Figura 16.

En la zona noroccidental se identificaron 322 deslizamientos, con un área de 403571.13 m² y un porcentaje del 43% de los deslizamientos, es decir, casi la mitad del total de los movimientos identificados en toda el área de estudio, en el sector nororiental con 104 deslizamientos, con un área de 85227.25 m² y un porcentaje 14%, 107 deslizamientos, con un área de 260541.65 m² y un porcentaje del 14% de los movimientos en masa se encuentran en la zona suroccidental y el restante 218 deslizamientos, con un área de 308173.10 m² y un porcentaje del 29% se encuentra en la zona suroriental. La distribución de los deslizamientos (Rotacional y traslacional) se mantiene en cada uno de los sectores, es decir, los deslizamientos tienen mayor presencia en cada uno de ellos.

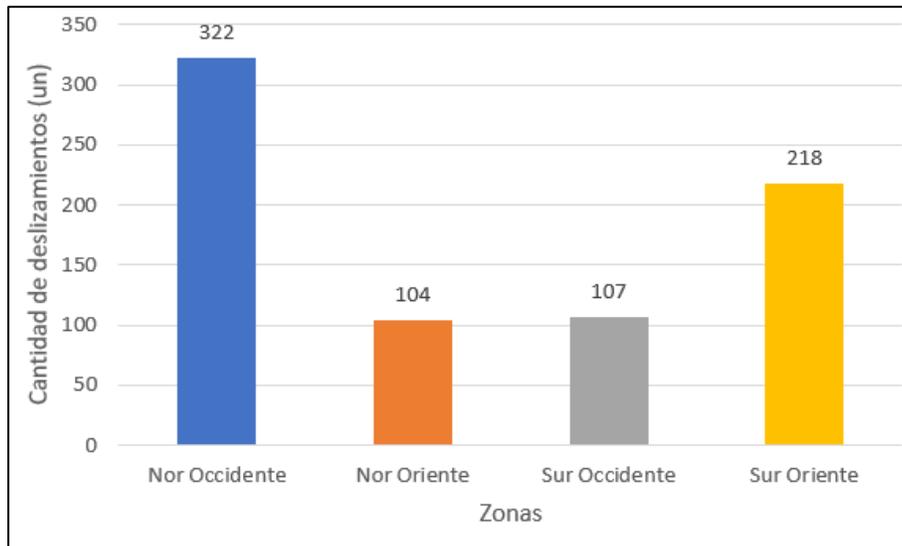


Figura 17. Numero de deslizamientos por sector
 Fuente: Elaboración propia.

▪ **Incidencia de las UGS en la ocurrencia de los movimientos en masa**

En Palmira el 84% de las UGS (27), se identificaron deslizamientos. En la tabla 18 y Figura 17 se muestra la estadística de número de deslizamientos ocurridos y su relación con las UGS. En esta gráfica se representaron las unidades que registran algún tipo de deslizamiento

Tabla 18. Deslizamientos en las UGS

UGS	No DESLIZAMIENTOS	AREA (m ²)	UGS	No DESLIZAMIENTOS	AREA (m ²)
Rbcmmba	1	307.22	Srbfa	13	23364.53
Rmcbfa	12	10681.19	Srdi	9	3109.93
Rmceebb	22	15412.87	Staa	10	1551.11
Rmmcalcq	2	2997.07	Stac	5	1166.70
Rmmcbfa	30	16763.01	Stclg	1	6969.39
Rmmccfv	2	457.75	Stco	1	7.70
Rmmcecc	13	19858.39	Stdrt	1	11050.55
Rrcaar	21	8724.19	Stpa	1	154.05
Rrcbfa	102	81930.79	Stpac	51	32516.94
Rrcbfa (MP 41)	14	11884.88	Stpcs	28	77645.40
Rrcdi	22	70631.53	Stta	3	279.58
Rrcecc	296	575845.64	Sttan	32	25829.35
Rrceebb	5	10410.82	Sttas	16	7536.40
Rrcmba	38	40428.40			

Fuente: elaboración propia

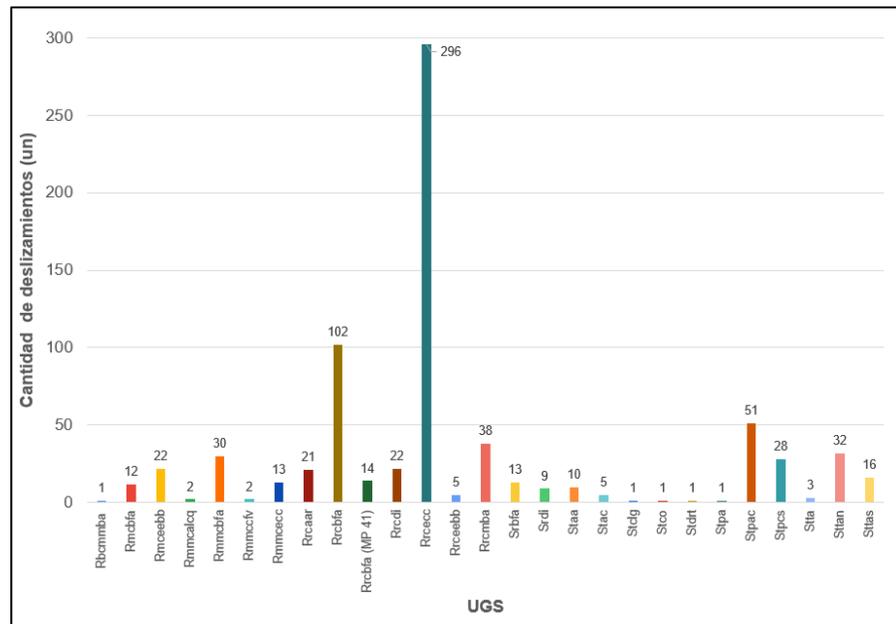


Figura 18. Deslizamientos en las UGS

Fuente: Elaboración propia.

La unidad que más deslizamientos presenta (296) es roca regular calidad esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc), posee un área de 575845.64 m² y un porcentaje de 54.45%, siendo más de la mitad del área de los deslizamientos registrados. Esto es posible debido a que esta unidad es la que posee mayor área en la zona de estudio.

La siguiente unidad con más deslizamientos (102) es roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa) con un área de 81930.79 m² y un porcentaje de 7.74%

En las unidades de suelo, la que registra más deslizamiento (51) es -suelo transportado de planicie aluvial confinada (Stpac), con un área de 32516.94 m² y un porcentaje 3.07%.

▪ **Incidencia de las Subunidades Geomorfológicas en la ocurrencia de los movimientos en masa**

En la Figura 19 se muestra la cantidad de deslizamientos que se encuentran en las diferentes geoformas identificadas en el municipio de Palmira y la relación con el área que ocupan tales geoformas. Se identificó por lo menos un deslizamiento en 44 geoformas diferentes en nuestra zona de estudio. Se observa la mayor cantidad de movimientos en masa en la subunidad de Sierra glaciada (Gsg) y un porcentaje 30.71%, seguidos de manera descendente, de Sierra (Ss) con un porcentaje 12.63%, y de lomeríos muy disecados (Dlmd) con un porcentaje de 9.10%..

La ocurrencia de deslizamientos se atribuye a las pendientes considerables que tienen las laderas de las geoformas, debido a que los agentes denudativos buscan degradar el relieve y obtener un paisaje más suavizado.

En la tabla 19 se muestra la estadística de número de deslizamientos ocurridos y su relación con las UGS

Tabla 19. Deslizamientos en las Subunidades geomorfológicas

Subunidades geomorfológicas	No. Deslizamientos	Área (m ²)	Subunidades geomorfológicas	No. Deslizamientos	Área (m ²)
Ac	1	112.82	Gag	1	1629.10
Dco	1	7.70	Gc	6	2363.92
Dcre	7	1835.00	Gclg	1	6969.39
Ddrt	1	11050.55	Gee	9	7942.19
Deem	7	9414.43	Gflv	2	166.61
Def	9	14191.53	Gpcs	23	69507.91
Dld	2	457.75	Gpgl	1	307.22
Dlde	16	18111.07	Gsg	175	324796.50
Dldebl	17	33222.90	Sces	20	44995.33
Dldi	12	8958.88	Sefcbc	1	154.05
Dlmd	57	96275.12	Sefcbl	1	132.49
Dlpd	3	1751.69	Sefcml	14	8615.99
Dsr	11	2420.08	Sesbl	4	476.38
Faa	6	863.68	Sesbm	5	1122.75
Fac	4	1141.12	Sesml	48	147158.52
Fea	1	154.05	Sft	1	154.05
Fpac	49	52843.42	Sgf	8	1369.38
Fta	3	279.58	Sl	10	4892.39
Ftaean	16	9877.30	Slf	12	3267.72
Ftaes	5	494.84	Slfe	12	15036.71
Ftan	20	9886.31	Ss	135	133607.39
Ftas	11	6661.84	Sslp	3	2835.50

Fuente: elaboración propia

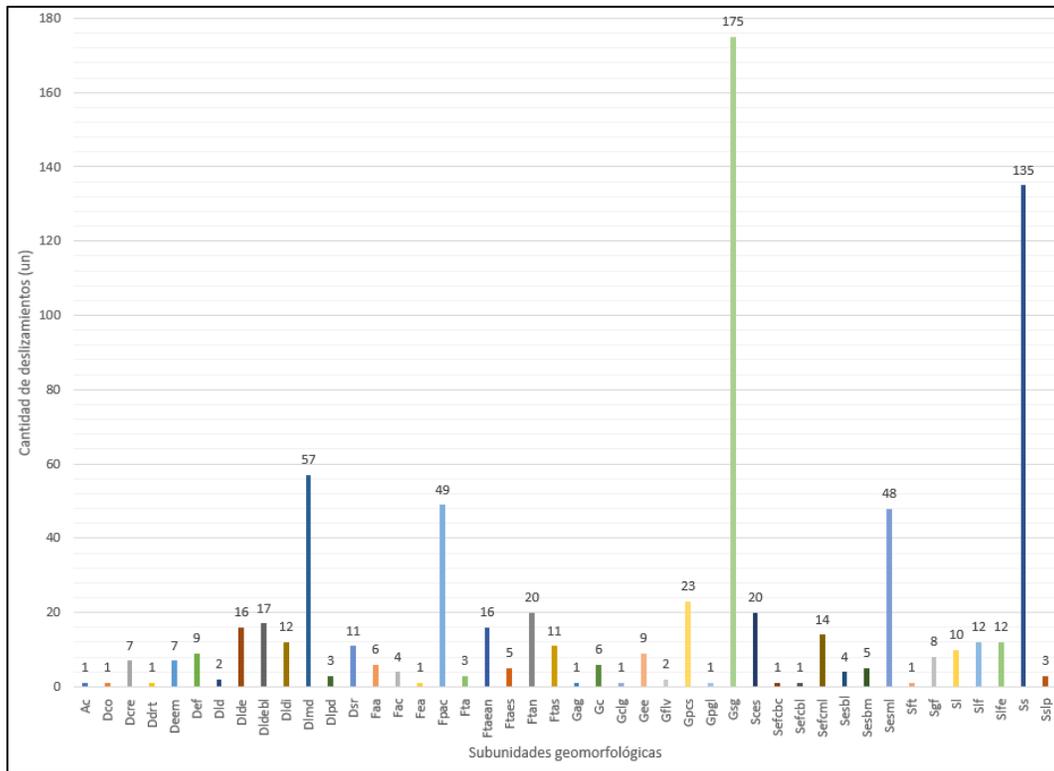


Figura 19. Deslizamientos en las Subunidades geomorfológicas

Fuente: Elaboración propia.

- **Incidencia de la cobertura y uso del suelo en la ocurrencia de los movimientos en masa**

Según Pineda (2012) la intervención de la cobertura afecta los procesos de infiltración del suelo y la evapotranspiración, así como la fuerza de la raíz, disminuyendo con esto la estabilidad de taludes e incrementando el riesgo de deslizamientos. Los deslizamientos ocurren con mayor frecuencia en zonas deforestadas o cultivadas y sobre tierras en barbecho o bajo pasto, por lo que se deduce que estas áreas son más propensas a los deslizamientos.

Los cambios en el uso de la tierra conducen a modificaciones profundas y rápidas del paisaje, lo que se expresa con la destrucción de la vegetación, cambios en la topografía e incremento de la erosión, (Abreu, 2005). Debido justamente a estas modificaciones, la propensión a la ocurrencia de deslizamientos aumenta, sobre todo si se combinan estas condiciones de deforestación, con otras variables del paisaje tales como el gradiente de la pendiente y la estabilidad estructural de las laderas (Rowbotham y Dudycha, 1998; Pidwirny, 2006). Otro efecto de la intervención humana es la generación de áreas quemadas, las cuales tienen relación con la ocurrencia de flujos de escombros (Gabet y Sternberg, 2008).

Se realizó un análisis estadístico de la presencia de deslizamientos en 17 tipos de cobertura, según se muestra en la Tabla 20 y la Figura 20.

Del total de 751 deslizamientos, en la cobertura con áreas forestales se registraron el 52.86% de éstos (397); le siguen en su orden la agricultura con el 31.29% (235), Sitios de disposición de materiales de desecho el 14.11% (106), infraestructura el 0.67% (5), minería el 0.40% (3), cuerpos de agua el 0.40% (3) y asentamiento el 0.27% (2). La cobertura en la cual no se registraron deslizamientos corresponde a la ganadería, agroforestal y conservación.

Tabla 20. Deslizamientos en las coberturas y usos del suelo

Tipo	No. Deslizamientos	Área (m ²)
Agricultura	235	174582.96
Asentamiento	2	308.10
Cuerpos de Agua Naturales	3	462.15
Forestal	397	596335.43
Infraestructura	5	1073.09
Minería	3	1818.83
Sitios de disposición de materiales de desecho	106	282937.76

Fuente: elaboración propia

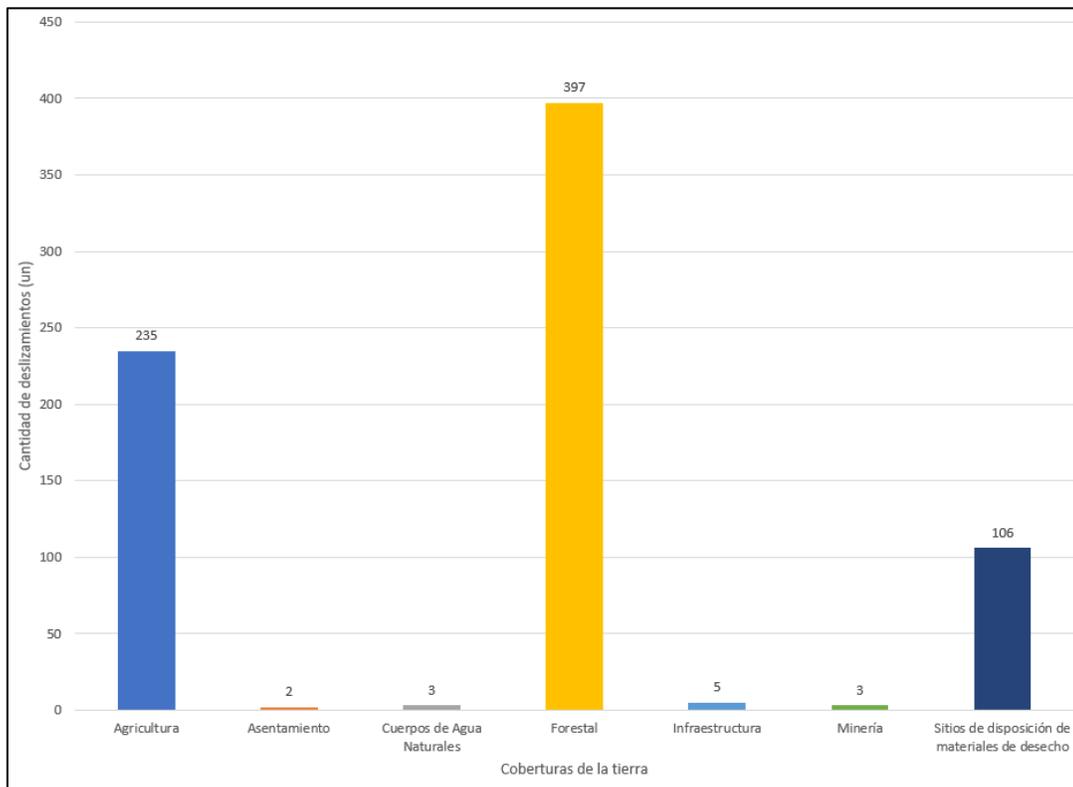


Figura 20. Deslizamientos en las coberturas y usos del suelo

Fuente: Elaboración propia.

6.1.1.2. Método Bivariado

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 lo 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 seis (6) variables que se tienen en cuenta como factor determinante para generar movimientos en masa. A continuación, se presentan los resultados del método WofE para cada una de las variables. En estas tablas se relacionan los datos obtenidos de la superposición de los movimientos en masa (inventario de procesos morfodinámicos) con las clases del factor condicionante (variables).

Tabla 21. Categorización de la variable pendiente

Convención	# Píxeles movimiento	% Movimiento	# Píxeles clase	% Clase	Npix 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
Plano	1410	5.5	328501	0.43	1410	24247	327091	76364748	2.5560854	-	2.6083348
Suavemente inclinado	2160	8.42	877139	1.14	2160	23497	874979	75816110	1.9986327	-0.076469	2.0751017
Inclinado	2951	11.5	2917922	3.8	2951	22706	3E+06	73775327	1.107243	-	1.1906794
Moderadamente abrupto	4576	17.84	8368443	10.91	4576	21081	8E+06	68324806	0.491842	-	0.5728051
Abrupto	6734	26.25	37111390	48.37	6734	18923	4E+07	39581859	0.6116637	0.3569166	-0.9685803
Muy Abrupto	5879	22.91	26238702	34.2	5879	19778	3E+07	50454547	0.4007041	0.1584179	-0.5591221
Extremadamente Abrupto	1947	7.59	876809	1.14	1947	23710	874862	75816440	1.8949507	-	1.9623971

Fuente: elaboración propia

Tabla 22. Categorización de la variable orientación de laderas

Convención	# Píxeles Movimiento	% Movimiento	# Píxeles Clase	% Clase	Npix 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
North	5172	13.07	127424	6.47	5172	34407	122252	1803576	0.721987582	-	0.796441581
Northeast	4681	11.83	186632	9.47	4681	34898	181951	1744368	0.224841875	-	0.251492413
East	4235	10.7	275322	13.97	4235	35344	271087	1655678	0.273757439	0.03846181	-0.31221925
Southeast	4728	11.95	319569	16.22	4728	34851	314841	1611431	0.313522336	0.051247081	-
South	4857	12.27	265571	13.48	4857	34722	260714	1665429	0.098026896	0.014511627	0.112538523
Southwest	4774	12.06	186269	9.45	4774	34805	181495	1744731	0.246975675	0.029575361	0.276551036
West	5445	13.76	281365	14.28	5445	34134	275920	1649635	-0.04074237	0.006655467	0.047397837
Northwest	5687	14.37	328427	16.67	5687	33892	322740	1602573	0.154119021	0.028358413	0.182477434

Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Categorización de la variable unidades geológicas superficiales

Convención	# Píxeles Movimiento	% Movimiento	# Píxeles Clase	% Clase	Npix 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
Roca blanda de arenitas y lodolitas del Complejo Quebrada grande	30	0.36	8634	0.31	30	8246	8604	2798073	0.16761163	-	0.1681729
Roca blanda de basaltos de la Formación Amaime	810	9.79	110301	3.92	810	7466	109491	2696406	0.91955541	0.06319688	0.98275229
Roca blanda de conglomerados de la Formación Vilela	4	0.05	10547	0.37	4	8272	10543	2796160	2.05051705	0.00328	2.05379704
Roca blanda de esquistos de la unidad Esquistos Básicos de Buga lagrande	80	0.97	107670	3.82	80	8196	107590	2699037	1.37767743	0.02937483	1.40705226
Roca blanda de esquistos del Complejo Cajamarca	104	1.26	8941	0.32	104	8172	8837	2797766	1.38405854	0.00949247	1.39355101
Roca dura de anfíbolitas de la unidad Anfíbolitas del Rosario	147	1.78	81342	2.89	147	8129	81195	2725365	0.48782131	0.01143532	0.49925663
Roca dura de basaltos de la Formación Amaime	513	6.2	235380	8.36	513	7763	234867	2571327	0.30027419	0.02341611	-0.3236903
Roca dura de diorita del Complejo Río Córdoba	10	0.12	4340	0.15	10	8266	4330	2802367	0.24433386	0.00033489	0.24466875
Roca dura de metagabroides de la unidad Metagabroides de Bolo Azul	417	5.04	167625	5.95	417	7859	167208	2639082	0.16764876	0.00973181	0.17738057
Roca intermedia de basaltos de la Formación Amaime	130	1.57	114335	4.06	130	8146	114205	2692372	-0.9518548	0.02571025	0.97756505
Roca intermedia de esquistos de la unidad Esquistos Básicos de Bugalagrande	60	0.72	88426	3.14	60	8216	88366	2718281	1.46851195	0.02471455	-1.4932265
Roca intermedia de esquistos del Complejo Cajamarca	4300	51.96	942751	33.49	4300	3976	938451	1863956	0.43925859	-	0.76456448
Suelo transportado aluvial	762	9.21	264047	9.38	762	7514	263285	2542660	0.01890992	0.00193779	0.02084771

Suelo transportado coluvial	63	0.76	8971	0.32	63	8213	8908	2797736	0.87481468	-	0.00446255	0.87927723
Suelo transportado de abanico aluvial	11	0.13	89743	3.19	11	8265	89732	2716964	3.18028395	-	0.03116288	3.21144683
Suelo transportado de abanicos coalescentes	24	0.29	162623	5.78	24	8252	162599	2644084	2.99458962	-	0.0567745	3.05136412
Suelo transportado de terraza aluvial	196	2.37	311066	11.05	196	8080	310870	2495641	1.54267784	-	0.09342858	1.63610642
Suelo transportado fluvio-glaciario	527	6.37	88128	3.13	527	7749	87601	2718579	0.7128725	-	0.03408115	0.74695365
Suelo transportado glaciario	31	0.37	5765	0.2	31	8245	5734	2800942	0.60621494	-	0.00170773	0.60792267

Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Categorización de la variable cobertura y uso del suelo

Convención	# Píxeles Movimiento	% Movimiento	# Píxeles Clase	% Clase	Npix 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
Agricultura	3448	31.37	524653	24.72	3448	7542	521205	1587020	0.238266786	-	0.330776838
Forestal	5411	49.24	1558950	73.44	5411	5579	1553539	552723	-0.40417259	0.6598369	1.064009491
Asentamiento	29	0.26	23810	1.12	29	10961	23781	2087863	-1.45111009	0.008683486	1.459793576
Infraestructura	113	1.03	4475	0.21	113	10877	4362	2107198	1.604898393	-	1.613165786
Minería	22	0.2	397	0.02	22	10968	375	2111276	2.422356044	-	2.424182268
Sitios de disposición de materiales de desecho	1967	17.9	10287	0.48	1967	9023	8320	2101386	3.815165396	-	4.008422818
Cuerpos de Agua Naturales	173	1.57	14178	0.67	173	10817	14005	2097495	0.864290013	-	0.873501991

Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Categorización de la variable subunidades geomorfológicas

Convención	# Píxeles Movimiento	% Movimiento	# Píxeles Clase	% Clase	Npix 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
Dcre - Colina remanente	18	0.21	16800	0.79	18	8641	16782	2107327	-1.33518195	0.005851	-1.341033
Ddrt - Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	57	0.66	3012	0.14	57	8602	2955	2121115	1.554287434	-0.005212	1.5595
Deem - Escarpe de erosión mayor	69	0.8	22687	1.06	69	8590	22618	2101440	-0.28991038	0.002705	-0.292615
Def - Escarpe facetado	243	2.81	44720	2.1	243	8416	44477	2079407	0.292736487	-0.007301	0.300037
Dld - Loma denudada	3	0.03	5330	0.25	3	8656	5327	2118797	-1.9794157	0.002164	-1.98158
Dlde - Lomo denudado	183	2.11	65254	3.06	183	8476	65071	2058873	-0.37131733	0.009755	-0.381073
Dldebl - Lomo denudado bajo de longitud larga	330	3.81	14417	0.68	330	8329	14087	2109710	1.74844655	-0.032201	1.780647
Dldi - Lomeríos disectados	61	0.7	30552	1.43	61	8598	30491	2093575	-0.71182476	0.007389	-0.719214

Dlmd - Lomerios muy disectados	445	5.14	80153	3.76	445	8214	79708	2043974	0.314256457	-0.014504	0.32876
Dlpd - Lomerios poco disectados	11	0.13	9700	0.45	11	8648	9689	2114427	-1.27833948	0.003301	-1.28164
Dsr - Sierra residual	35	0.4	32965	1.55	35	8624	32930	2091162	-1.34429086	0.011574	-1.355865
Faa - Abanico aluvial	9	0.1	15686	0.74	9	8650	15677	2108441	-1.96021268	0.006368	-1.966581
Fac - Abanico aluvial coalescente	24	0.28	73249	3.43	24	8635	73225	2050878	-2.52073271	0.032306	-2.553039
Fea - Escarpe abanico aluvial	3	0.03	1913	0.09	3	8656	1910	2122214	-0.95373071	0.000553	-0.954284
Fpac - Planicie aluvial confinada	729	8.42	43857	2.06	729	7930	43128	2080270	1.421919687	-0.067426	1.489346
Fta - Terraza de acumulación	9	0.1	2065	0.1	9	8650	2056	2122062	0.071219645	-0.000072	0.071291
Ftaean - Escarpe de terraza de acumulación antigua	116	1.34	4446	0.21	116	8543	4330	2119681	1.882729689	-0.011446	1.894176
Ftaes - Escarpe de terraza de acumulación subreciente	25	0.29	1081	0.05	25	8634	1056	2123046	1.759137522	-0.002394	1.761532
Ftan - Terraza de acumulación antigua	203	2.34	7523	0.35	203	8456	7320	2116604	1.91726173	-0.020271	1.937532
Ftas - Terraza de acumulación subreciente	172	1.99	8673	0.41	172	8487	8501	2115454	1.601991347	-0.016053	1.618045
Gag - Artesa glacial	8	0.09	18227	0.85	8	8651	18219	2105900	-2.22826558	0.00769	-2.235955
Gc - Circo glacial y de nivación	54	0.62	59660	2.8	54	8605	59606	2064467	-1.50403596	0.022208	-1.526244
Gclg - Cono y lóbulo de gelifración	31	0.36	5602	0.26	31	8628	5571	2118525	0.311159691	-0.00096	0.31212
Gee - Espolón estructural glaciado	97	1.12	71102	3.33	97	8562	71005	2053025	-1.09332333	0.022735	-1.116059
Gflv - Flanco de valle glaciar	14	0.16	22869	1.07	14	8645	22855	2101258	-1.89535752	0.0092	-1.904557
Gpcs - Planos y conos de sobrelavado glaciar	527	6.09	83920	3.93	527	8132	83393	2040207	0.438149695	-0.022731	0.460881
Gppl - Plano glaciolacustre	2	0.02	3807	0.18	2	8657	3805	2120320	-2.0484081	0.001562	-2.04997
Gsg - Sierra glaciada	2175	25.12	552294	25.9	2175	6484	550119	1571833	-0.0316135	0.010832	-0.042446
Sces - Colina estructural	326	3.76	46134	2.16	326	8333	45808	2077993	0.557046798	-0.016571	0.573618
Sefcbc - Espolón facetado bajo de longitud corta	1	0.01	379	0.02	1	8658	378	2123748	-0.43237774	0.000062	-0.43244

Sefcbl - Espolón facetado bajo de longitud larga	1	0.01	4284	0.2	1	8658	4283	2119843	-2.85989252	0.001903	-2.861795
Sefcml - Espolón facetado moderado de longitud larga	172	1.99	29101	1.36	172	8487	28929	2095026	0.377330599	-0.00635	0.38368
Sesbl - Espolón bajo de longitud larga	7	0.08	20740	0.97	7	8652	20733	2103387	-2.49105813	0.009	-2.500058
Sesbm - Espolón bajo de longitud media	35	0.4	2733	0.13	35	8624	2698	2121394	1.157582478	-0.002779	1.160362
Sesml - Espolón moderado de longitud larga	1129	13.04	113383	5.32	1129	7530	112254	2010744	0.902553402	-0.08538	0.987933
Sft - Faceta triangular	1	0.01	10648	0.5	1	8658	10647	2113479	-3.77051698	0.00491	-3.775427
Sgf - Gancho de flexión	23	0.27	57328	2.69	23	8636	57305	2066799	-2.31814284	0.024689	-2.342832
Sl - Lomo	37	0.43	26054	1.22	37	8622	26017	2098073	-1.05308803	0.008042	-1.06113
Slf - Lomo de falla	35	0.4	12956	0.61	35	8624	12921	2111171	-0.40876066	0.002051	-0.410812
Slfe - Escarpe de línea de Falla	142	1.64	9214	0.43	142	8517	9072	2114913	1.345329109	-0.012255	1.357584
Ss - Sierra	1072	12.38	395394	18.54	1072	7587	394322	1728733	-0.40562965	0.073304	-0.478934
Sslp - Sierra y lomo de presión	25	0.29	22445	1.05	25	8634	22420	2101682	-1.29632771	0.00772	-1.304048

Fuente: elaboración propia

Tabla 26. Categorización de la variable curvatura

Convención	# Píxeles Movimiento	% Movimiento	# Píxeles Clase	% Clase	Npix 1	Npix 2	Npix 3	Npix 4	Wi +	Wi -	Wf
Convaco	6965	50.26	1069804	50.17	6965	6894	1062839	1048558	-0.00163105	0.001650554	-0.003281604
Convexo	6575	47.44	1056872	49.57	6575	7284	1050297	1061490	0.047198736	0.044606248	-0.091804984
Neutro	319	2.3	5545	0.26	319	13540	5226	2112817	2.233102644	0.020816153	2.253918796

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_f . 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 las siguientes figuras **Figura 21** se presentan los resultados w_f de todas las variables. En el anexo 1 se puede ver las variables reclasificadas.

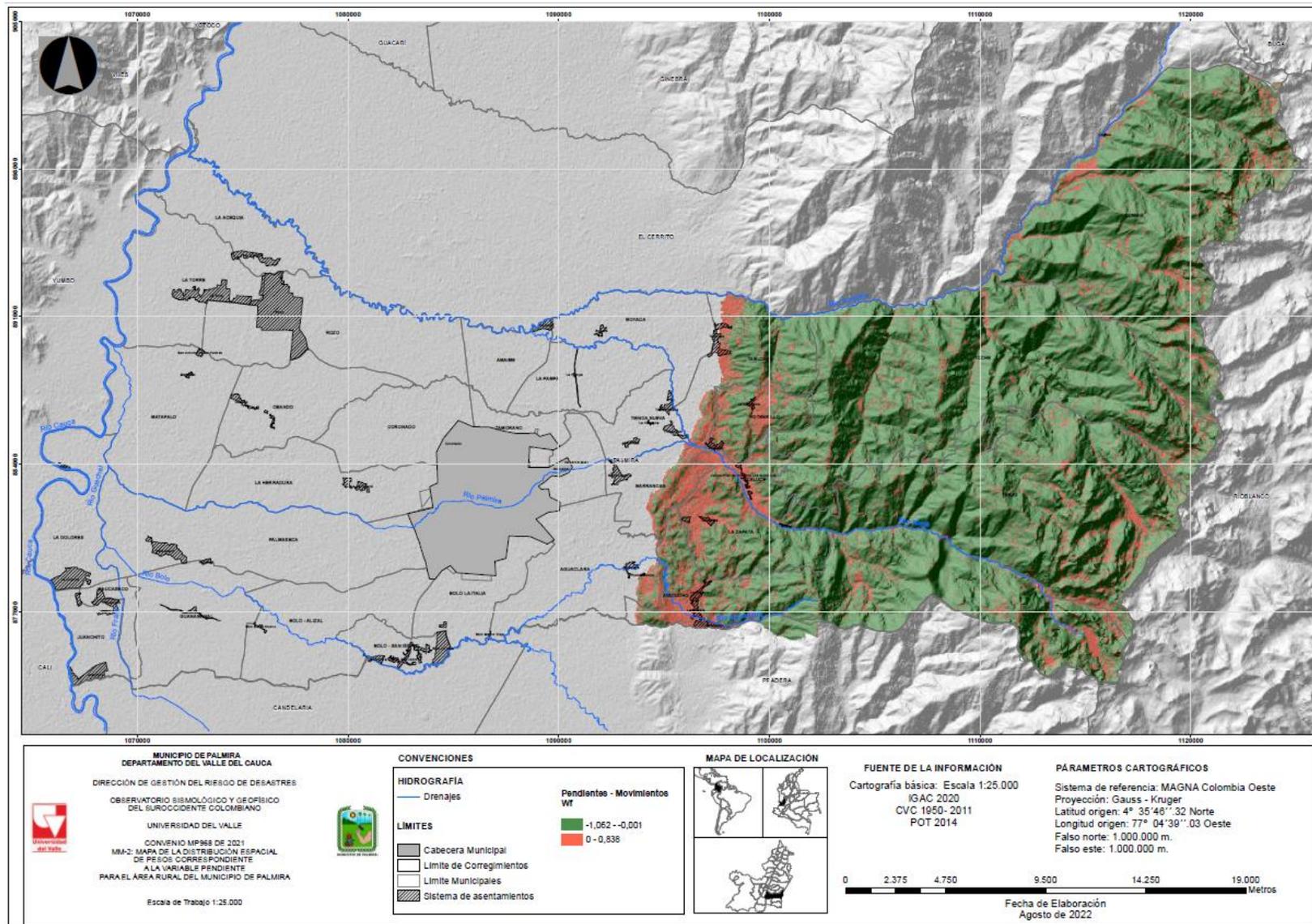


Figura 21. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable pendiente (MM 2)

Fuente: Elaboración propia.

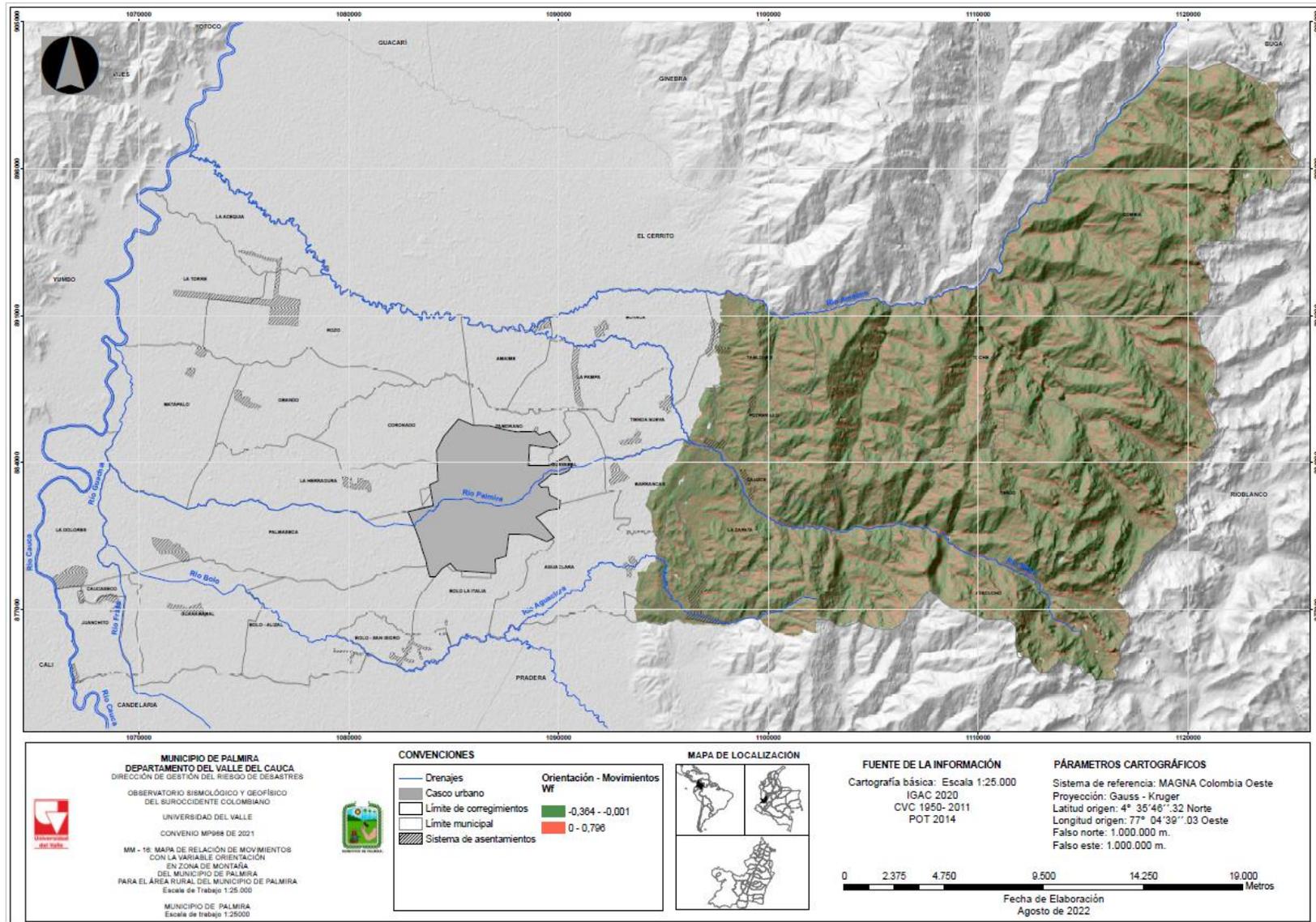


Figura 22. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable orientación de laderas
Fuente: Elaboración propia.

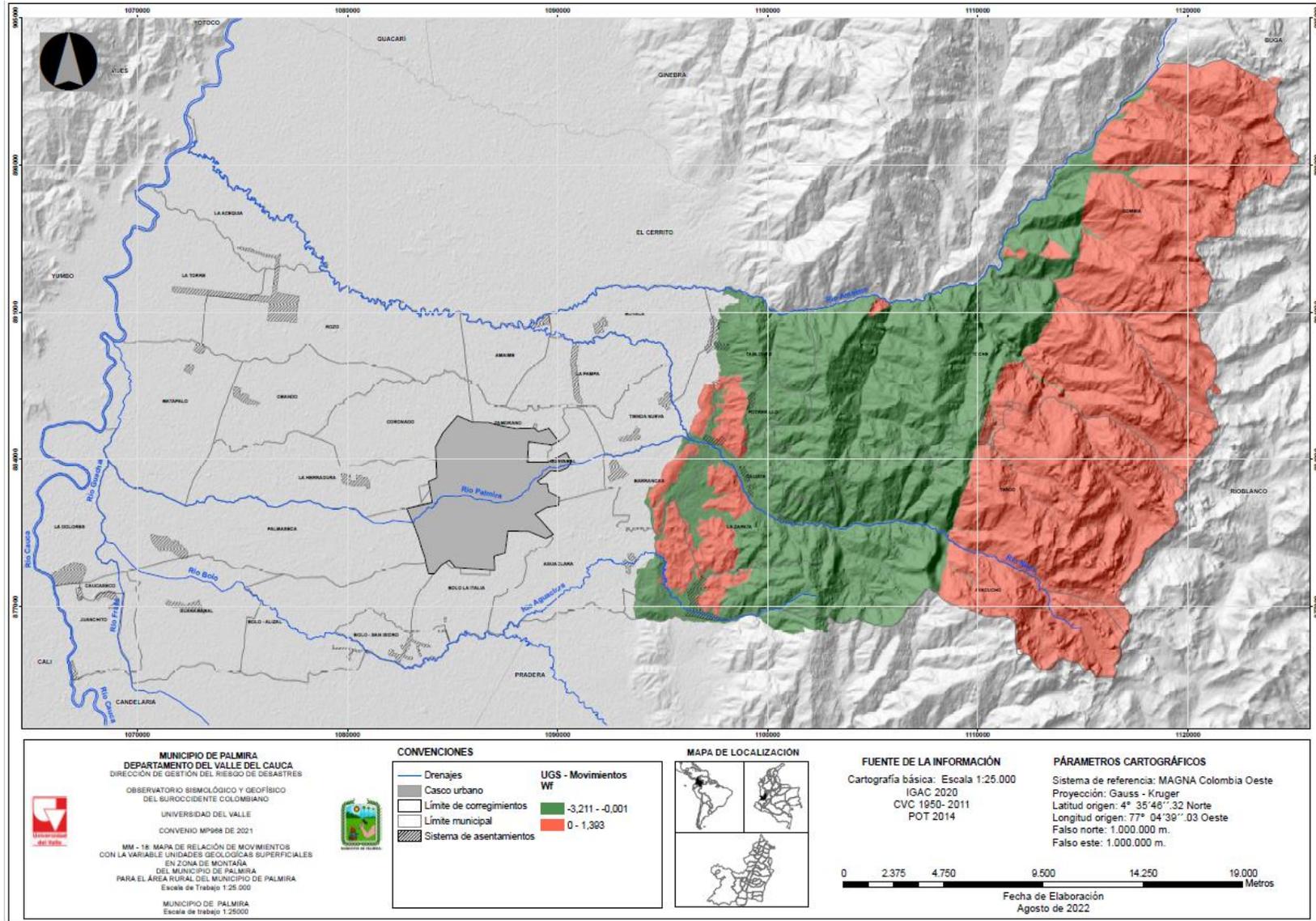


Figura 23. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable UGS
Fuente: Elaboración propia.

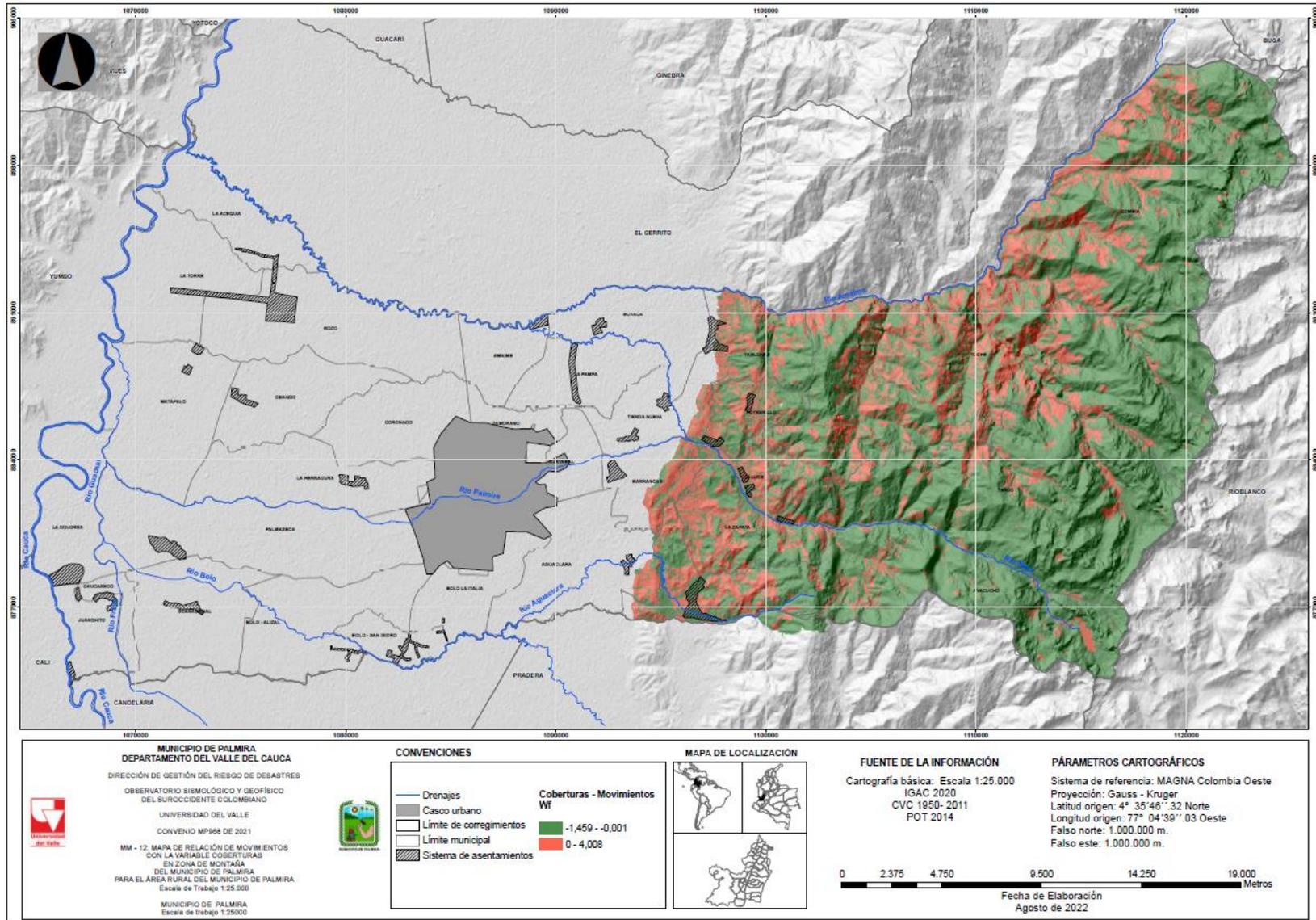


Figura 24. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable cobertura y uso del suelo
Fuente: Elaboración propia.

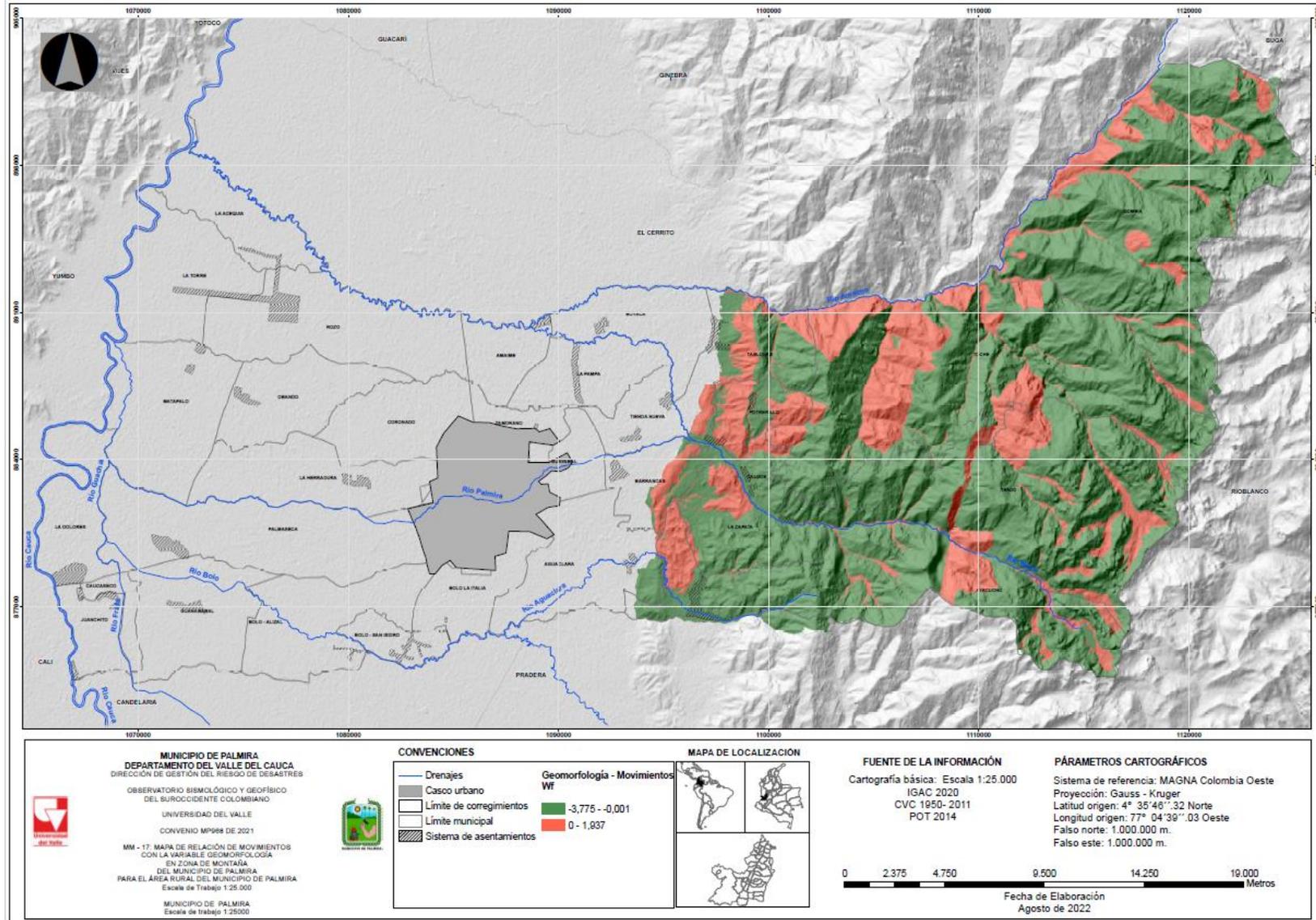


Figura 25. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable subunidades geomorfológicas
Fuente: Elaboración propia.

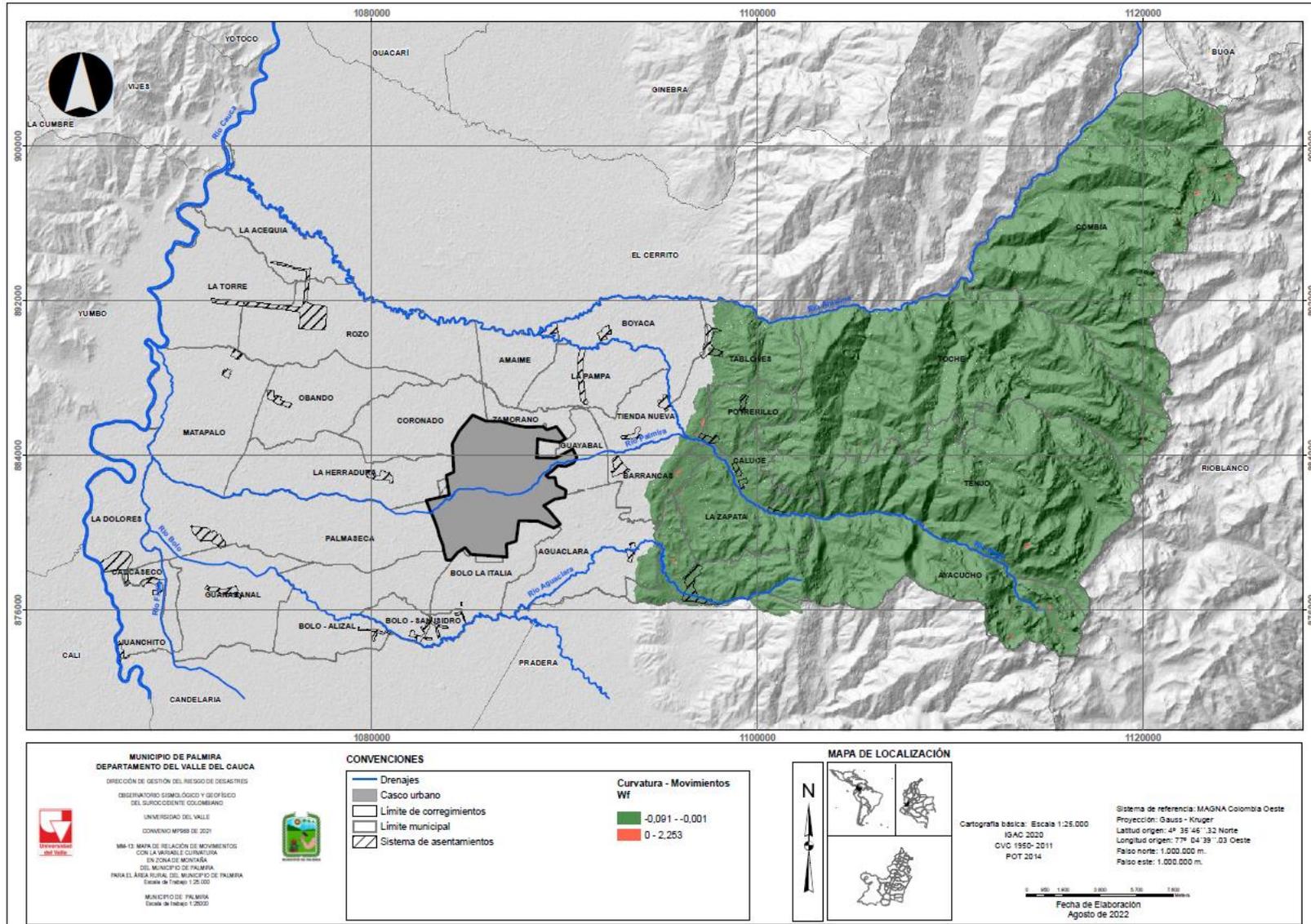


Figura 26. Mapa Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable curvatura
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27, enseña los rangos obtenidos al cruzar la variable movimientos con cada una de las variables condicionantes.

Tabla 27. Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos

Variables	Rango en pesos
Pendiente	-0,96 a 2,60
Orientación de las laderas	-0,36 a 0,79
Unidades geológicas superficiales	-3,21 a 1,39
Cobertura de la tierra	-1,45 a 4,00
Subunidades geomorfológicas	-3,77 a 1,93
Curvatura	-0,09 a 2,25

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 27. A continuación, se presenta la sumatoria o ecuación que se aplicará según la siguiente expresión.

$LSI = W_f \text{Pendiente} + W_f \text{Orientación de la ladera} + W_f \text{Unidades geológicas superficiales} + W_f \text{Cobertura y uso del suelo} + W_f \text{Subunidades geomorfológicas} + W_f \text{Curvatura}$.

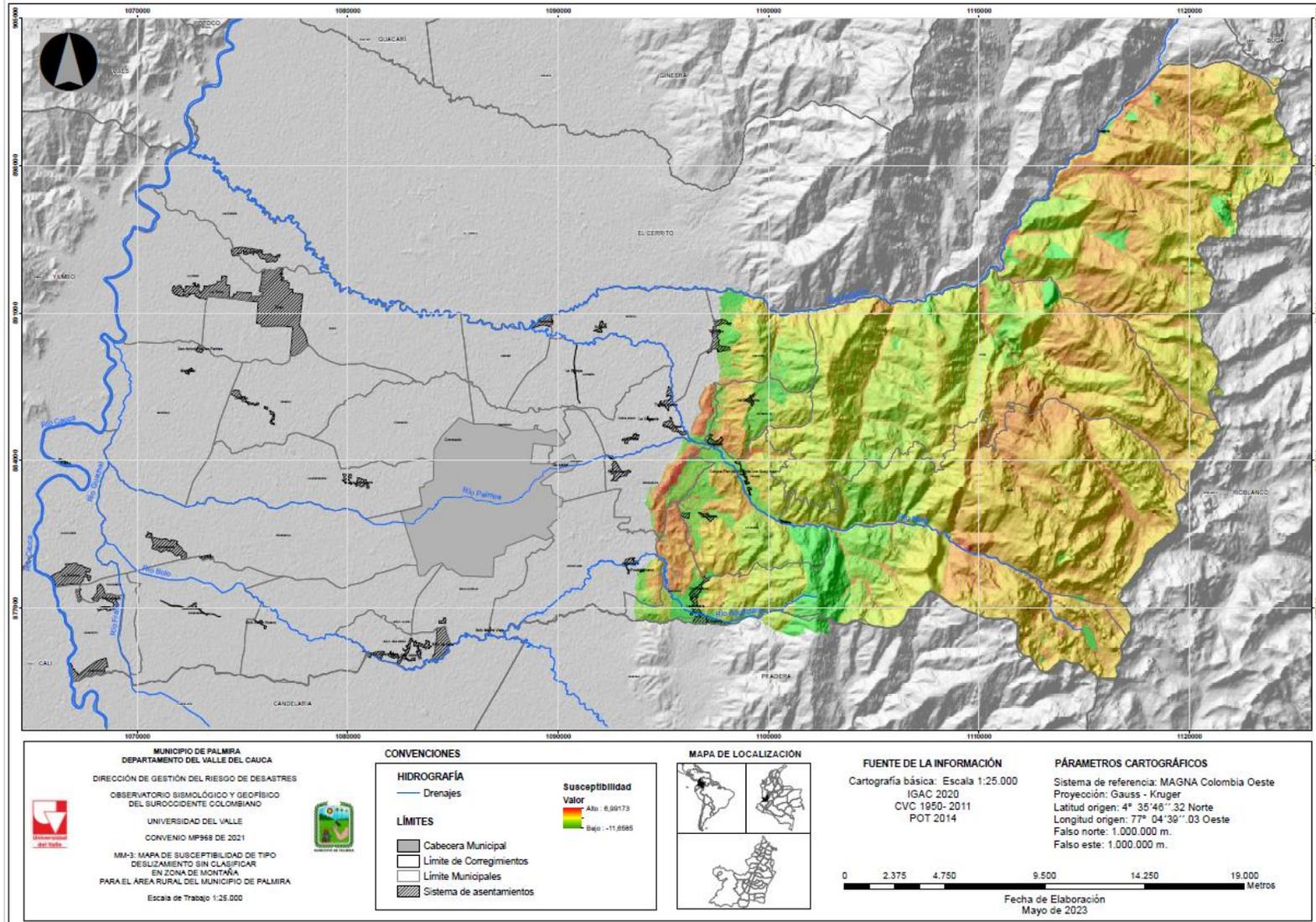


Figura 27. Mapa Susceptibilidad tipo deslizamiento, sin clasificar (MM 3)
Fuente: Elaboración propia.

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 28) y se determinó un porcentaje de área bajo la curva de 85.4 (Figura 28), con la cual, se valida el modelo de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento, dado que es mayor al 70%.

Tabla 28. Rangos y porcentaje del área bajo la curva

SUSCEPTIBILIDAD								
Rangos	Categorías	# Pixeles Movimiento	% Movimiento	# Pixeles Rangos	% Rangos	% Acumulado de Movimientos	% Acumulado de Rangos	% Área bajo la curva
6.99173_5.99173	Muy Alta	10458	31.72	1060	0.05	31.72	0.05	0.01
5.99173_0.8000	Alta	8756	26.56	151652	7.48	58.29	7.54	3.37
0.8000_-2.000	Media	12546	38.06	847606	41.83	96.34	49.37	32.34
-2.000_-11.6585	Baja	1205	3.66	1025989	50.63	100.00	100.00	49.71
TOTAL		32965		2026307		Y	X	85.4

Fuente: Elaboración propia.

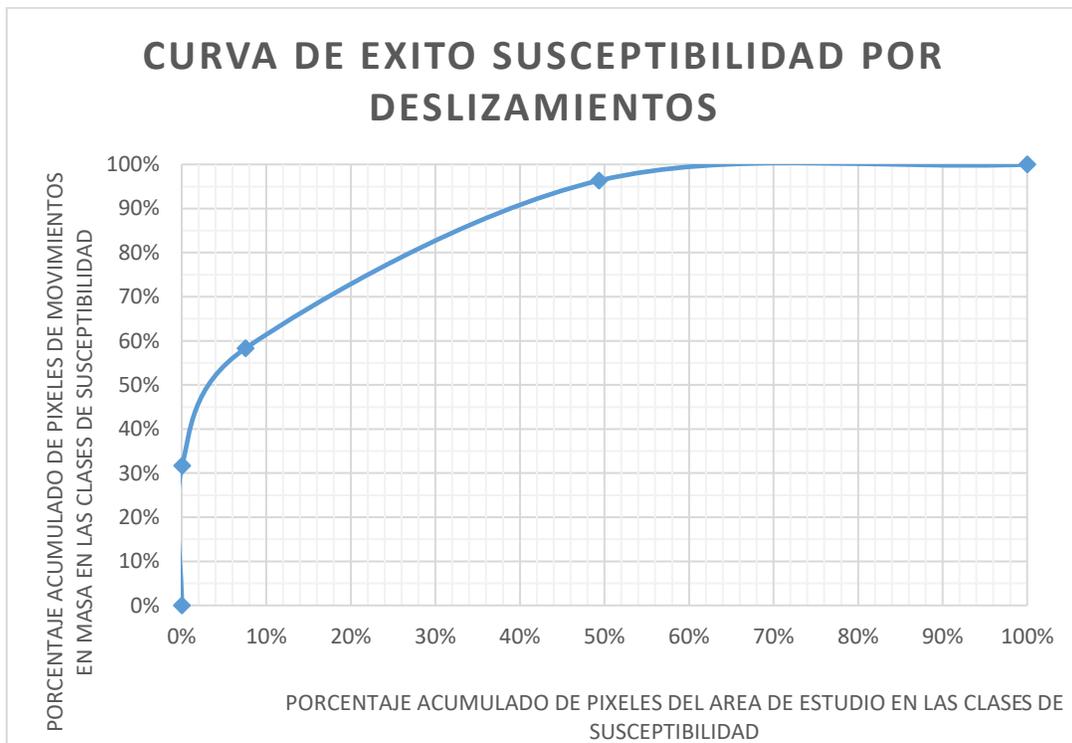


Figura 28. Curva de éxito susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento

Fuente: Elaboración propia.

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

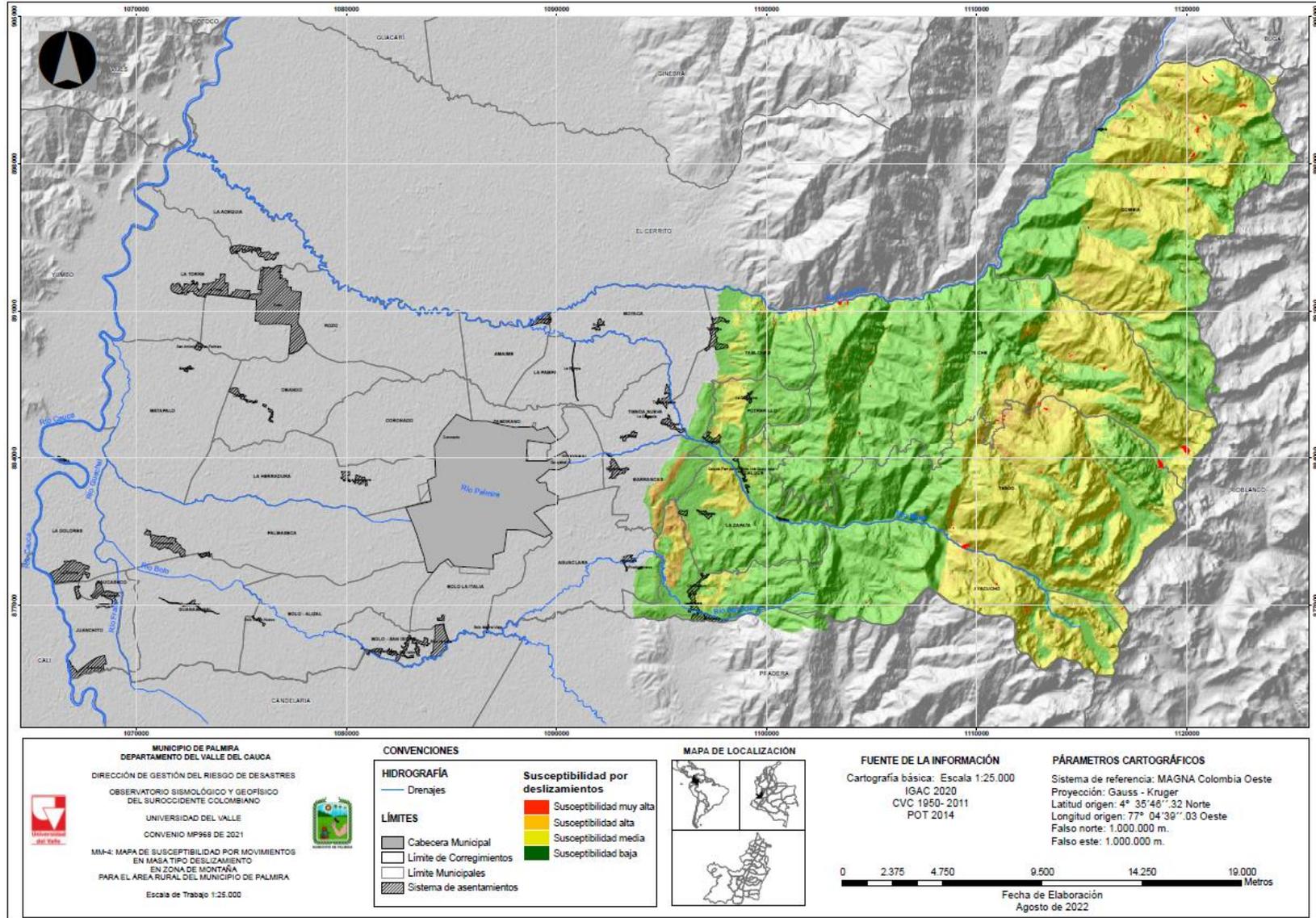


Figura 29. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento (MM 4)

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 30 los resultados de la susceptibilidad tipo caída.

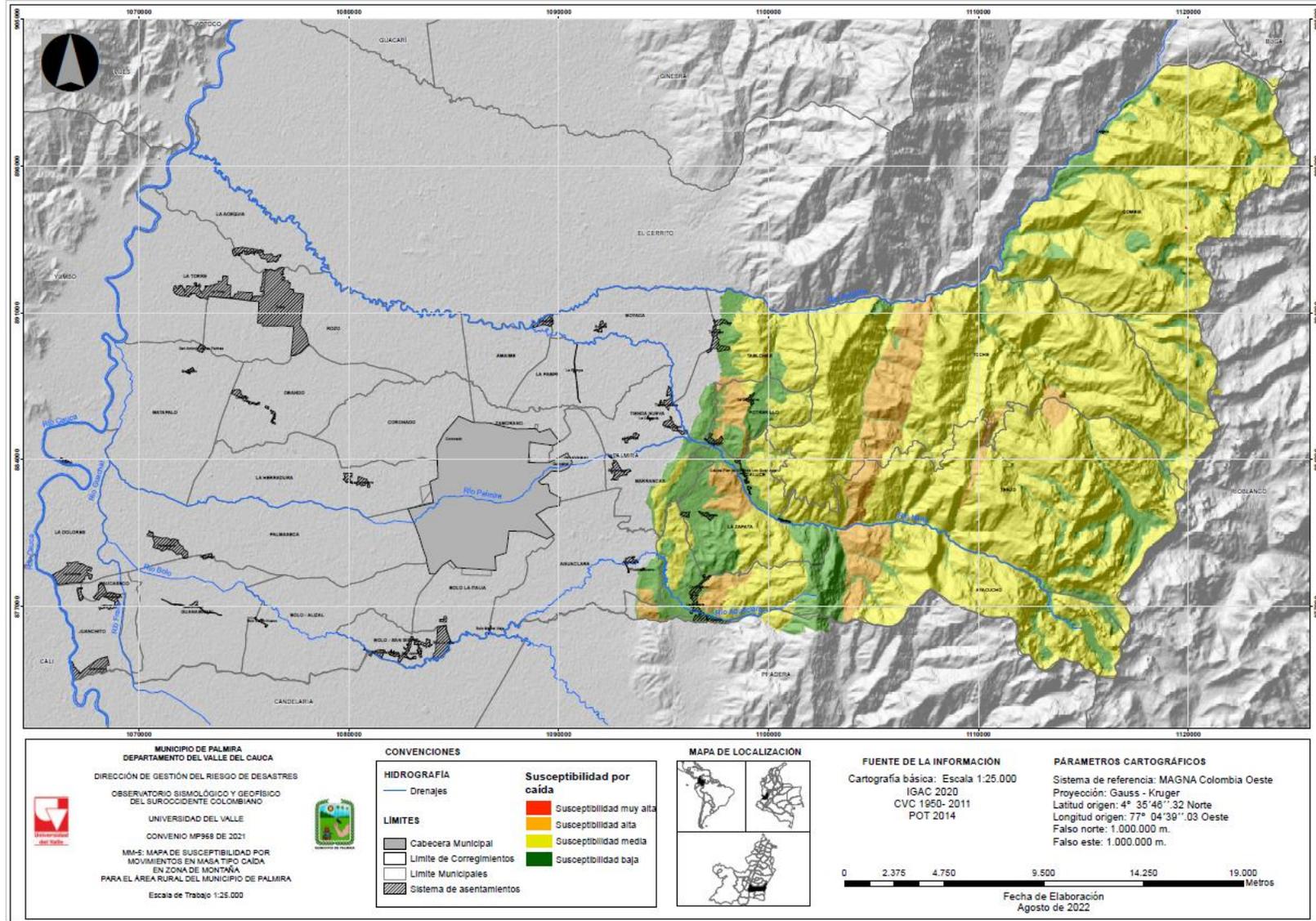


Figura 30. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída (MM 5)
Fuente: Elaboración propia

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 31).

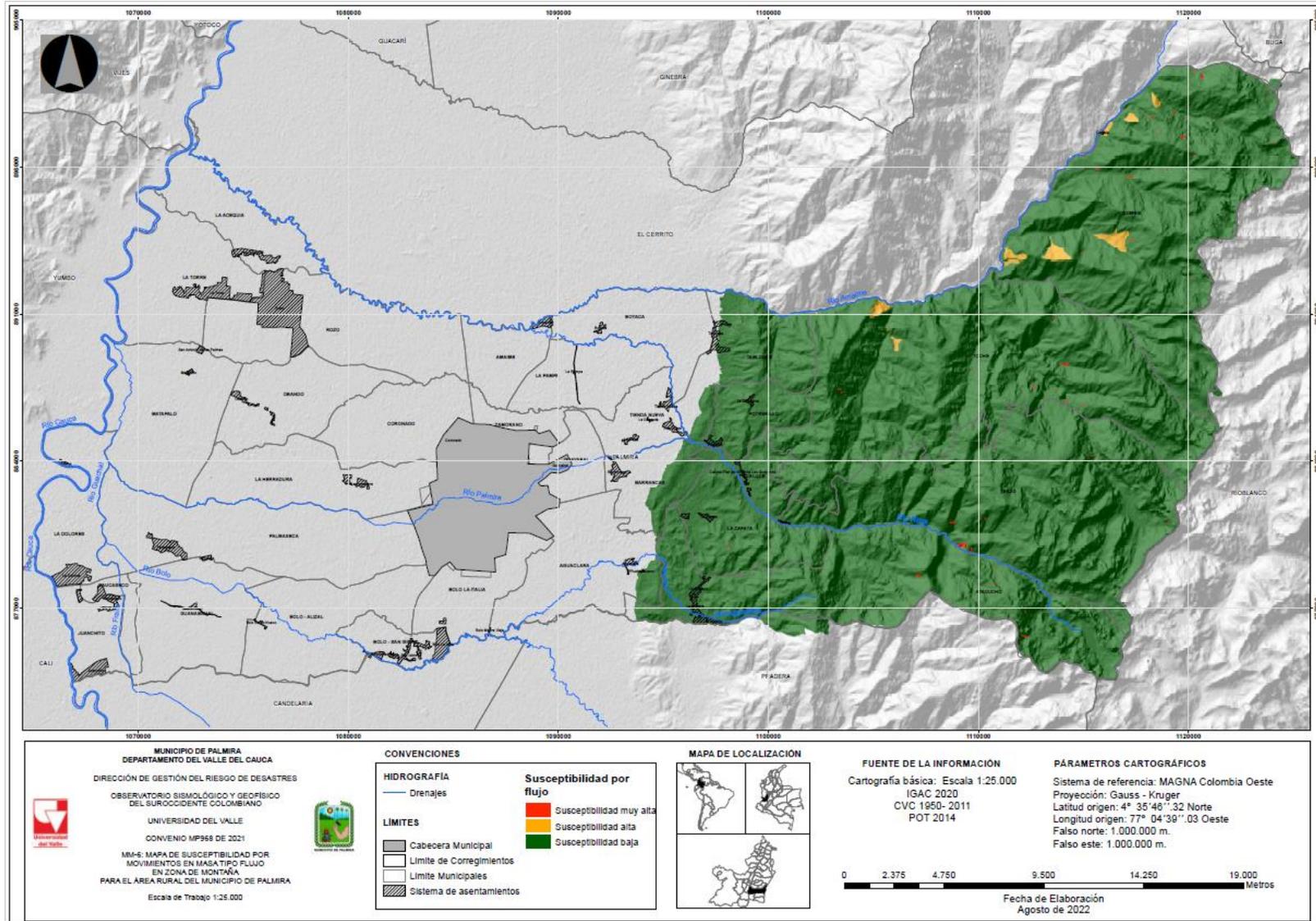


Figura 31. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo (MM 6)
Fuente: Elaboración propia

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 32 se presenta el resultado de la susceptibilidad final.

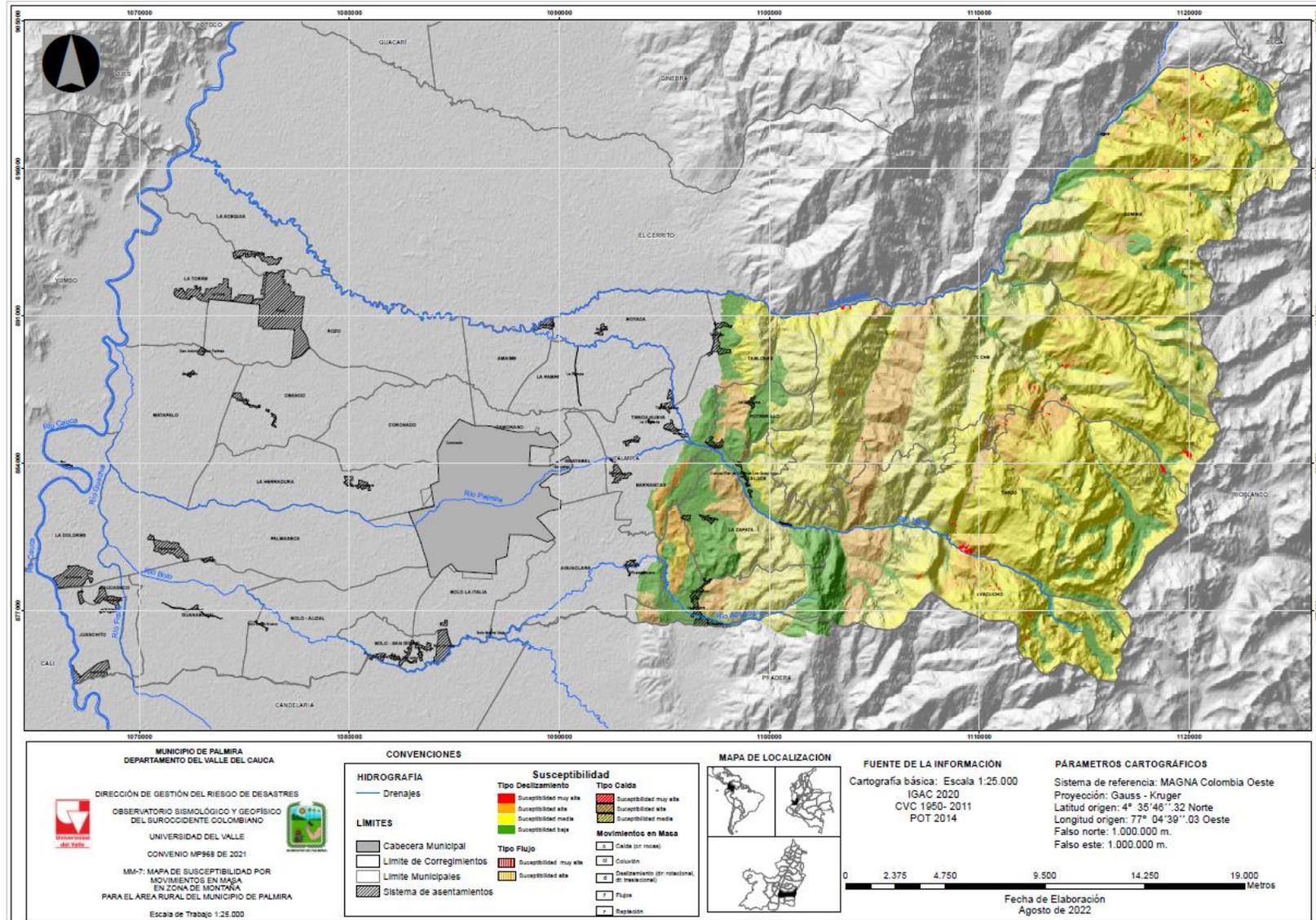


Figura 32. Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa (consolidado) (MM 7)

Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

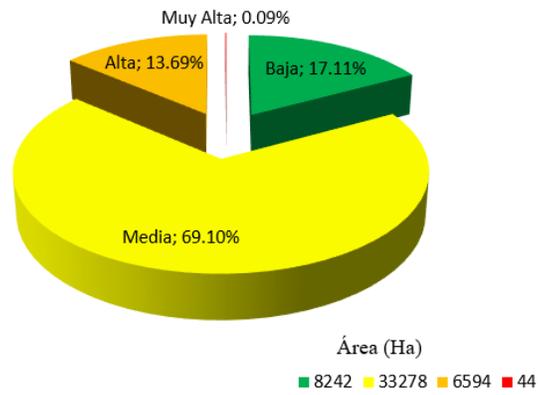


Figura 33. Porcentaje de susceptibilidad por movimientos en masa
Fuente: Elaboración propia.

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 32), 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 de 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 13.69% 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 69.10% 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 33, 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 38.

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 29 se presenta el resultado de la probabilidad espacial en la zona de estudio.

Tabla 29. Probabilidad espacial

Amenaza	Tipos y subtipos de movimientos	Probabilidad espacial / porcentaje de movimientos en masa
Alta	Deslizamientos	40%
	Caidas	58%
	Flujos	2%
Media	Deslizamientos	92%
	Caidas	8%

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

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.

En la Tabla 30 se presenta el catálogo por movimiento en masa utilizado para correlacionar las lluvias – movimientos.

Tabla 30. Catalogo histórico de MM

ID	ESTACION	FECHA	FENÓMENO	CAUSA	URBANO / RURAL	BARRIO / CORREGIMIENTO	DIRECCIÓN / VEREDA	LATITUD	LONGITUD
1	Austria	15/03/1975	Movimiento en masa	ND	Rural	Potreriillo	Vía Palmira - Ataco (km 34)	3.536426	-76.294426
2	Auji	14/04/1982	Movimiento en masa	ND	Rural	Tienda Nueva		3.535597	-76.302086
3	Bella Vista	14/04/1982	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Combia	Albania	3.536006	-76.300468
4	Austria	1/11/1984	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Potreriillo	Vía Palmira - Ataco	3.538445	-76.297653
5	Auji	28/10/1985	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Potreriillo	la Quisquina, Aguas Bonitas, Los Cuchos Los Robles	3.526006	-76.310468
6	Bella Vista	28/10/1985	Movimiento en masa	ND	Rural	Calucé		3.542888	-76.303719
7	Austria	28/10/1985	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	Vía Aguaclara-Buitrera	3.545597	-76.312086
8	Bella Vista	25/02/1999	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Combia		3.583803	-76.312286
9	La Sirena	25/02/1999	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Buitrera	3.5285	-75,153,543
10	Chambu	20/03/1999	Movimiento en masa	ND	Rural	Coronado		3.552156	-76.32592
11	Austria	21/11/2006	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Potreriillo		3.530744	-76.297638
12	Austria	28/11/2006	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Calucé	ND	3.553257	-76.31025
13	La Sirena	28/11/2006	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Potreriillo	La Nevera, El Vegón, Agua Bonita, La Variante y La Quisquina	3.53316	-76.304092
14	Austria	3/12/2006	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Potreriillo	La Quisquina, curva de la Variante	3.542504	-76.294838

15	Chambu	12/04/2011	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Buitrera, Los Iracales	3.554582	-76.33648
16	La Sirena	12/04/2011	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	Vía Buitera -El Arenillo	3.5385	-74,153,543
17	Austria	11/09/2011	Movimiento en masa	Falla Geologica	Rural	Tablones	Los Ceibos	X: 1098792.82	Y: 891842.13
18	Bella Vista	1/12/2011	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Combia	Hacienda La Perla y Hacienda La Mesa	X: 1115637.58	Y: 899367.57
19	La Sirena	19/10/2011	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Buitrera	3.5123	-77,153,543
20	Auji	13/11/2011	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Toche	La Esperanza	3.531006	-76.310778
21	Chambu	1/12/2011	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Combia	Entre la Q. Los Olivos y Q. San Antonio	X: 1116516.10	Y: 900348.75
22	Austria	13/03/2014	Movimiento en masa	ND	Rural	Tablones	La Esperanza	3.54316	-76.314092
23	Auji	22/11/2016	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	La Zapata	El Meson	3.543257	-76.34365
24	Austria	22/11/2016	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	La Zapata	El Meson	3.5145	-78,153,543
25	Chambu	22/11/2016	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Potreriillo	La Buiterea, Los Cuchos, vías Tenerife, y La Quisquina	3.53825	-76.294092
26	La Sirena	22/11/2016	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Toche	Los Cuchos, y La Quisquina	3.527006	-76.299185
27	Chambu	31/03/2017	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Buitrera	3.549157	-76.33381
28	La Sirena	31/03/2017	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	Vía Aguaclara-Buitrera	3.5012	-76,933,543
29	Austria	24/05/2017	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Potreriillo	La Quisquina	3.53058	-76.309782
30	Chambu	4/04/2018	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Buitrera-Sector Iracales	3.511	-76,483,543
31	Chambu	18/04/2018	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Tenjo	Escuela La María	3.5381	-76,783,543
32	Chambu	15/04/2019	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	Sector Iracales	3.5109	-75,213,543

33	Chambu	21/04/2019	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Aguaclara	Aguaclara	3.5085	-75,663,543
34	Chambu	8/11/2019	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Tenjo	ND	3.5185	-76,153,543
35	Chambu	28/01/2020	Movimiento en masa	ND	Rural	Aguaclara	Vía Aguaclara - La Buitrera, km 1,6	3°30'13.8"N	76°13'31" W
36	Chambu	30/01/2020	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Buitrera-Sector Iracales	3.5067	-77,963,543
37	Chambu	1/03/2021	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Buitrera	3.5032	-77,293,543
38	Bella Vista	1/03/2021	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	El Arenillo	3.555597	-76.308081
39	Austria	20/03/2021	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	La Zapata	Vereda El Mesón	3.5111	-76,073,543
40	Chambu	44275	Movimiento en masa	Lluvias	Rural	Ayacucho	La Maria	3.517191	-76,150,284

Fuente: Elaboración propia

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

Para el análisis de la distribución de la precipitación en el área de estudio se contó con la información de 8 estaciones, las cuales se relacionan en la Tabla 31 con la respectiva localización, periodo de registro y precipitación media anual obtenida del análisis estadístico de los datos.

Tabla 31. Relación de estaciones y precipitación media anual (mm)

ESTACION	ALTURA (m.s.n.m.)	PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm)
Auji	1555	902.8
Austria	1750	1908.3
Bella Vista	2875	1398.5
Chambu	1350	1579.7
La Ceja	3052	1102.0
La Sirena	2605	1293.4
San Emigdio	1272	1586.8
San Nicolas	2100	1865.7

Fuente: Elaboración propia

A continuación (Figura 34) se presenta la ubicación espacial de las estaciones con la precipitación anual.

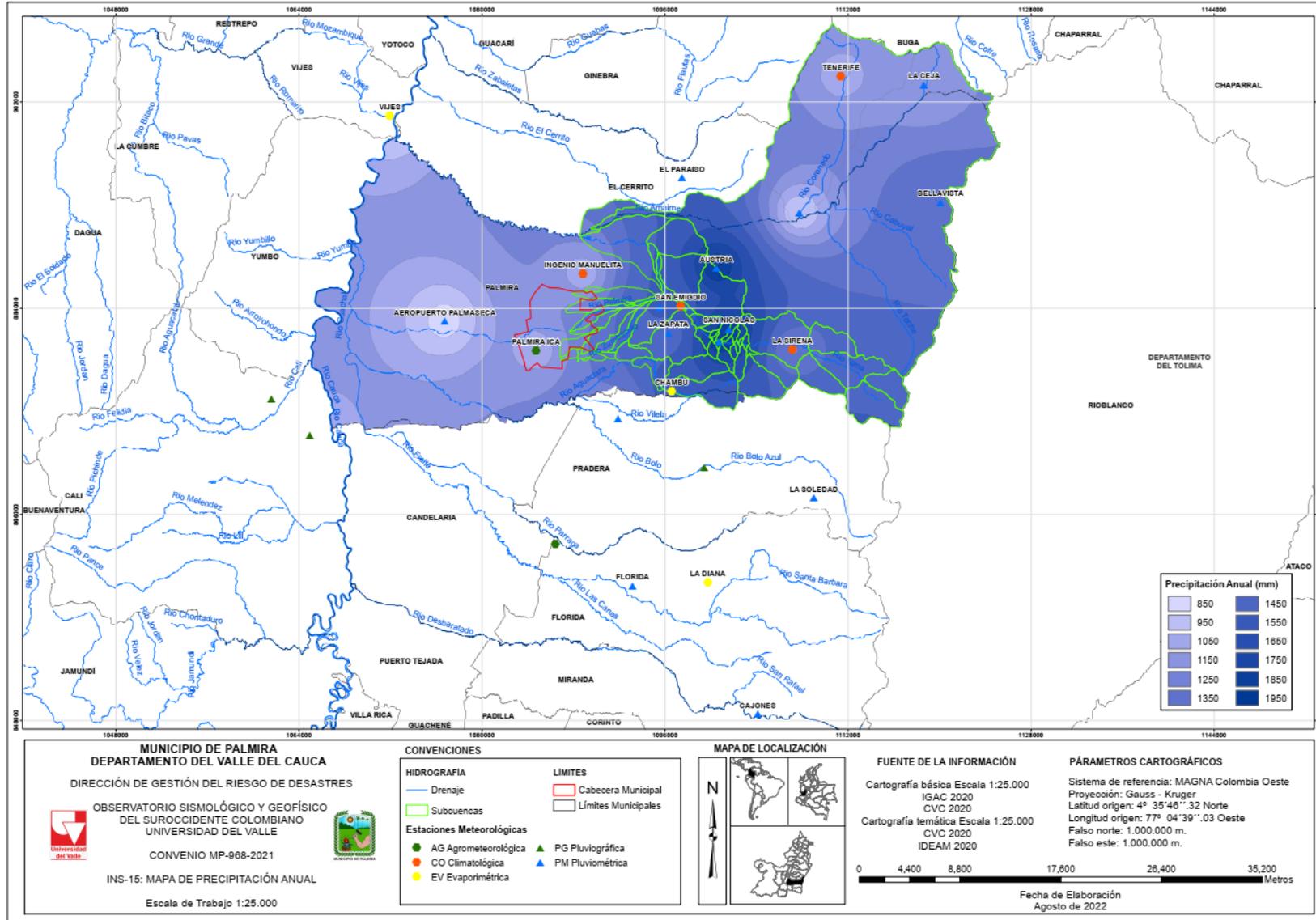


Figura 34. Mapa Precipitación anual (INS 15)
 Fuente: Elaboración propia

Se realizó el respectivo cruce cartográfico entre la historicidad y los polígonos de Thiessen para determinar las estaciones meteorológicas con influencia en cada una de las áreas con eventos de movimiento en masa registrados. Las estaciones con influencia en dichas áreas y que serán analizadas son Auji, Austria, Bella Vista, Chambu y La Sirena. Los 40 deslizamientos encontrados en historicidad están distribuidos de la siguiente manera:

- La estación Auji tiene influencia en 4 deslizamientos
- La estación Austria tiene influencia en 11 deslizamientos
- La estación Bella Vista tiene influencia en 5 deslizamientos
- La estación Chambu tiene influencia en 14 deslizamientos
- La estación La Sirena tiene influencia en 6 deslizamientos

Para cada una de las fechas en que se presentaron los movimientos en masa, se establecieron las precipitaciones que detonaron el evento (precipitación máx. en 24 horas en el rango de 15 días) (P24h) y se calcularon las precipitaciones acumuladas de los 15 días antecedentes al día del evento, sin contar el día que este ocurrió. (P15ant).

En los registros diarios de precipitación se realiza la respectiva búsqueda de la fecha en la que ocurrió el deslizamiento, analizando la precipitación de las 24 horas (P24h) y el acumulado de los 15 días antecedentes, sin contar el día que ocurrió el evento. En la tabla 32 se relaciona la estación más cercana al deslizamiento, fecha del deslizamiento y las precipitaciones máximas diarias.

En el anexo 2 se presentan las precipitaciones diarias de cada una de las estaciones analizadas.

Tabla 32. Precipitaciones diarias

ESTACION	CODIGO	PARAMETRO	FECHA	MES	DIA	AÑO	MAXI	UNIDADES
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	30/03/1982	3	30	1982	0	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	31/03/1982	3	31	1982	0	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	1/04/1982	4	1	1982	0	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	2/04/1982	4	2	1982	8	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	3/04/1982	4	3	1982	5	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	4/04/1982	4	4	1982	7	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	5/04/1982	4	5	1982	4	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	6/04/1982	4	6	1982	8	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	7/04/1982	4	7	1982	0	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	8/04/1982	4	8	1982	10	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	9/04/1982	4	9	1982	0	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	10/04/1982	4	10	1982	0	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	11/04/1982	4	11	1982	62	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	12/04/1982	4	12	1982	73	mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	13/04/1982	4	13	1982	0	mm

AUJI	2612800104	PRECIPITACION DIARIA	14/04/1982	4	14	1982	0	mm
------	------------	----------------------	------------	---	----	------	---	----

Fuente: Elaboración propia

Resaltado en amarillo se presenta el día que ocurrió el deslizamiento y a partir de ahí se determina la lluvia P_{24h} y P_{15ant} ; este procedimiento se realiza con cada uno de los 40 deslizamientos presentados por historicidad.

En la tabla 33 se presentan los (4) cuatro deslizamientos que tiene influencia la estación Auji y se realiza un promedio ponderado para determinar el valor de precipitación crítica que se le asignara a la estación mencionada. En el anexo 2 se presentan las precipitaciones críticas de las otras estaciones analizadas.

Tabla 33. Precipitación crítica

ESTACION AUJI					
Fecha	P_{15ant} (mm)	P_{24h} (mm)	Pendiente	P_T (mm)	$P_{critica\ prom}$ (mm)
14/04/1982	177	73	0.4124	146	
28/10/1985	131	37	0.2824	74	
13/11/2011	162	50	0.3086	100	106
22/11/2016	84	27	0.3086	53	

Fuente: Elaboración propia

La Figura 35 presenta las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) de precipitaciones para diferentes periodos de retorno de la estación Auji, 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 2.

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	104	66	51	42	36	32	29	27	25	23	22	21	20	19	18	17	16	16
5	120	76	59	49	42	37	34	31	29	27	25	24	23	22	21	20	19	18
10	137	87	67	56	48	43	39	35	33	31	29	27	26	25	24	23	22	21
25	153	104	83	69	57	51	46	42	39	36	34	32	31	29	28	27	26	25
50	166	118	91	75	65	59	52	48	44	42	40	39	37	35	33	32	31	29
75	200	128	98	81	70	63	57	52	48	45	42	40	38	36	34	33	32	31
100	212	135	104	86	74	66	60	55	51	47	45	42	40	38	36	35	34	32
200	241	154	118	98	85	75	68	62	58	54	51	48	46	43	42	40	38	37
300	261	166	128	106	92	81	74	67	63	58	55	52	49	47	45	43	41	40
400	275	178	135	112	97	86	78	71	66	62	58	55	52	50	47	45	44	42
500	287	183	141	117	101	90	81	74	69	64	60	57	54	52	49	47	46	44

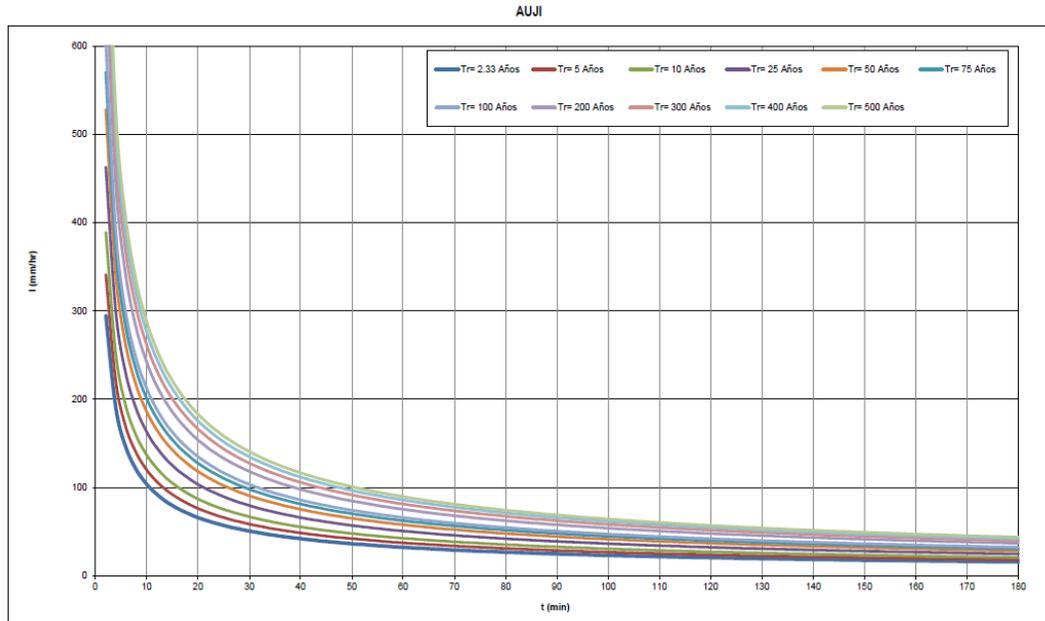


Figura 35. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Auji
Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de las precipitaciones máximas con su frecuencia de ocurrencia, mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de precipitaciones máximas anuales se calcularon las precipitaciones máximas para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años, aplicando un análisis de frecuencia, empleando como factor las distribuciones Normal, Gumbel, Pearson, Log Pearson y Log Normal para cada una de las estaciones (Tabla 34). Para este estudio se utilizó la distribución normal de Pearson.

Tabla 34. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno.

ESTACIÓN AUJI		ESTACIÓN AUSTRIA		ESTACIÓN BELLA VISTA	
Tr (años)	Lluvias max PEARSON	Tr (años)	Lluvias max PEARSON	Tr (años)	Lluvias max PEARSON
2.33	52.71	2.33	94.92	2.33	64.45
5	71.18	5	117.52	5	82.24
10	88.48	10	140.76	10	95.96
25	112.12	25	174.32	25	112.41
50	130.55	50	201.48	50	124.08
100	149.43	100	229.94	100	135.31
300	180.2	300	277.44	300	152.47
500	194.86	500	300.44	500	160.25

ESTACIÓN CHAMBU		ESTACIÓN LA SIRENA	
Tr (años)	Lluvias max PEARSON	Tr (años)	Lluvias max PEARSON
2.33	82.48	2.33	60.11
5	93	5	72.34
10	100.06	10	80.22
25	107.65	25	88.44
50	112.6	50	93.63
100	117.07	100	98.24
300	123.46	300	104.66
500	126.2	500	107.35

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta lo anterior, que corresponde a la historicidad de los eventos de movimientos en masa (deslizamientos), los registros diarios de precipitación máxima en 24 horas (Precipitación crítica), periodos de retorno, se realizó un análisis estadístico de la probabilidad de excedencia (Tabla 35).

Tabla 35. Distribución espacial de la precipitación crítica

Estación representativa	No. De deslizamientos	P _{crítica} (mm)	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno
AUJI	4	106	3.77%	16.9
AUSTRIA	11	133	8.27%	8.4
BELLAVISTA	5	120	4.17%	40.5
CHAMBU	14	142	9.86%	500.0
LA SIRENA	6	89	6.74%	25.3

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la probabilidad de excedencia, se realiza la interpolación o isoyetas por el método IDW. A continuación, se presenta la probabilidad de excedencia del detonante lluvia para la zona de estudio.

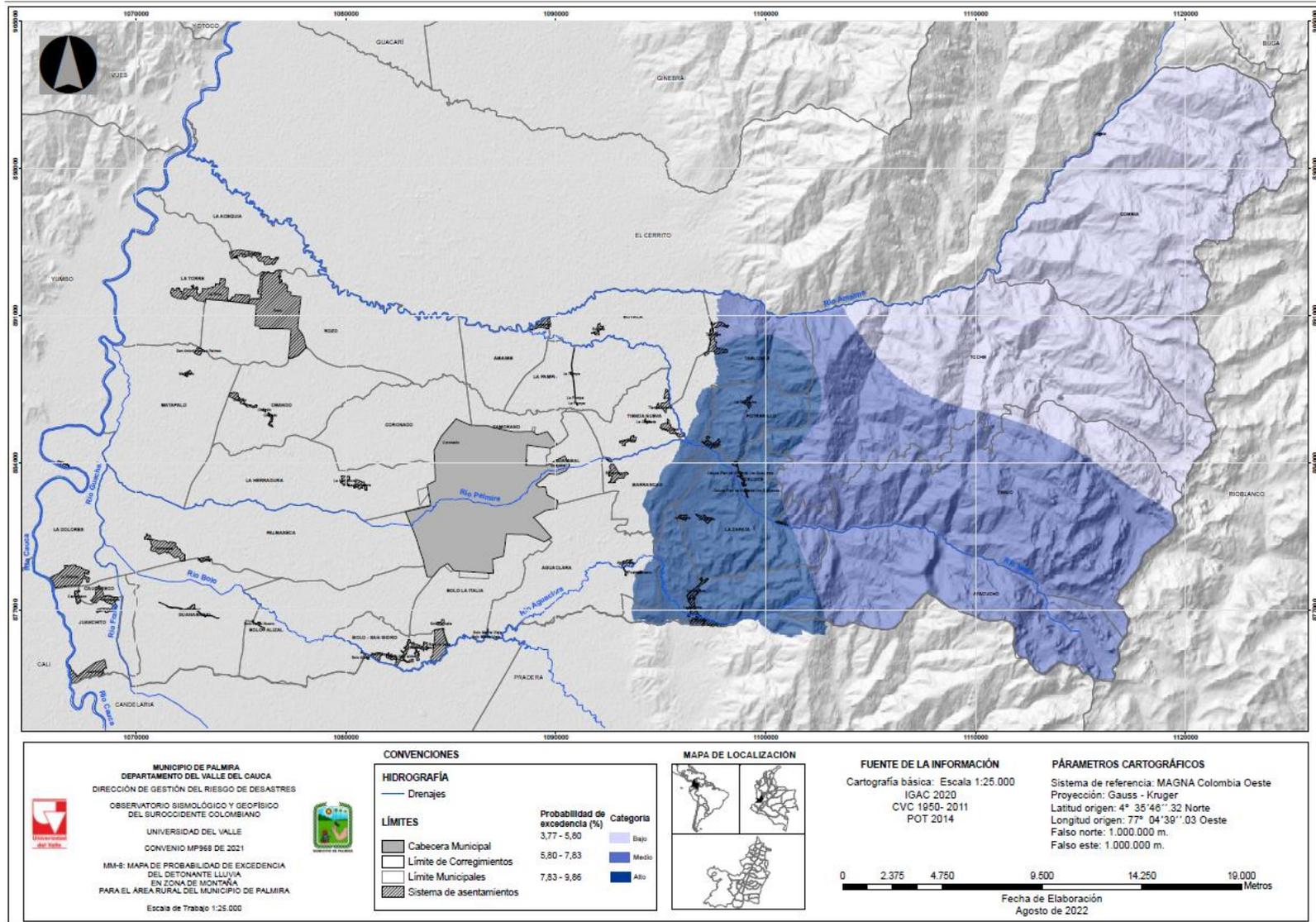


Figura 36. Mapa probabilidad de excedencia del detonante lluvia (MM 8)
Fuente: Elaboración propia

Los rangos del detonante lluvia fueron analizados teniendo en cuenta la media y la desviación estándar, los análisis se dividieron en tres categorías (Tabla 36).

Tabla 36. Rangos detonante lluvia

Probabilidad de excedencia %	Categoría
3.77 - 5.80	Baja
5.80 - 7.83	Media
7.83 - 9.86	Alta

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 37). En la Figura 37 se presenta el resultado del detonante sismo.

Tabla 37. 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

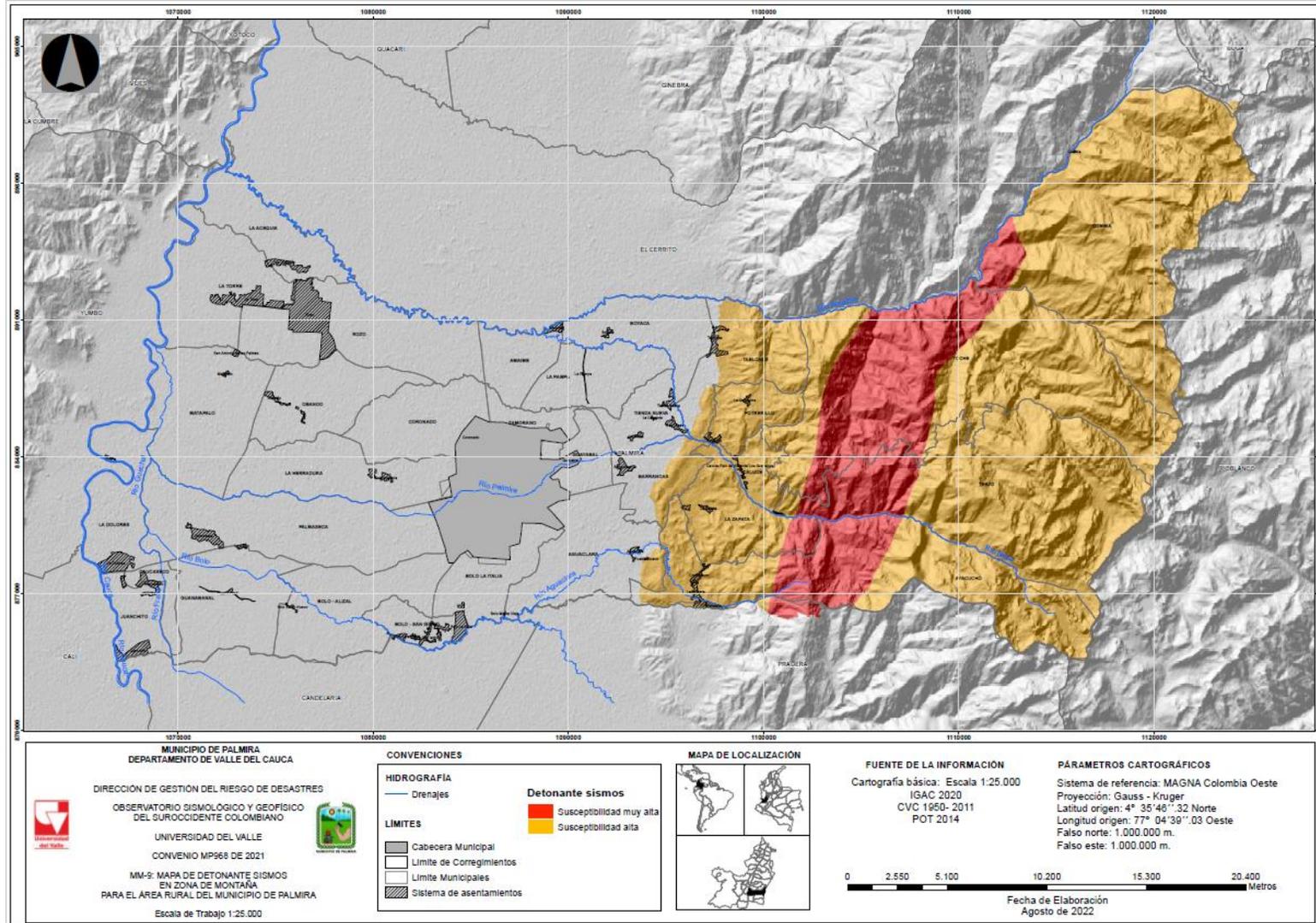


Figura 37. Mapa detonante sismo (MM 9.)

Fuente: Elaboración propia

Al aplicar la ecuación 11, se obtuvo la probabilidad de excedencia para cada tipo de movimiento (Tabla 38).

Tabla 38. Probabilidad temporal

Amenaza	Tipos y subtipos de movimientos	Probabilidad temporal
Alta	Deslizamientos	2.85
	Caídas	9.77
	Flujos	4.63
Media	Deslizamientos	20.1
	Caídas	11.2

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 39 se relaciona los resultados de las áreas afectadas por cada tipo de movimiento.

Tabla 39. Análisis de magnitud

Amenaza	Tipos y subtipos de movimientos	Magnitud / Área (ha)
Alta	Deslizamientos	4470
	Caídas	6067
	Flujos	106
Media	Deslizamientos	26694
	Caídas	2966

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 38).

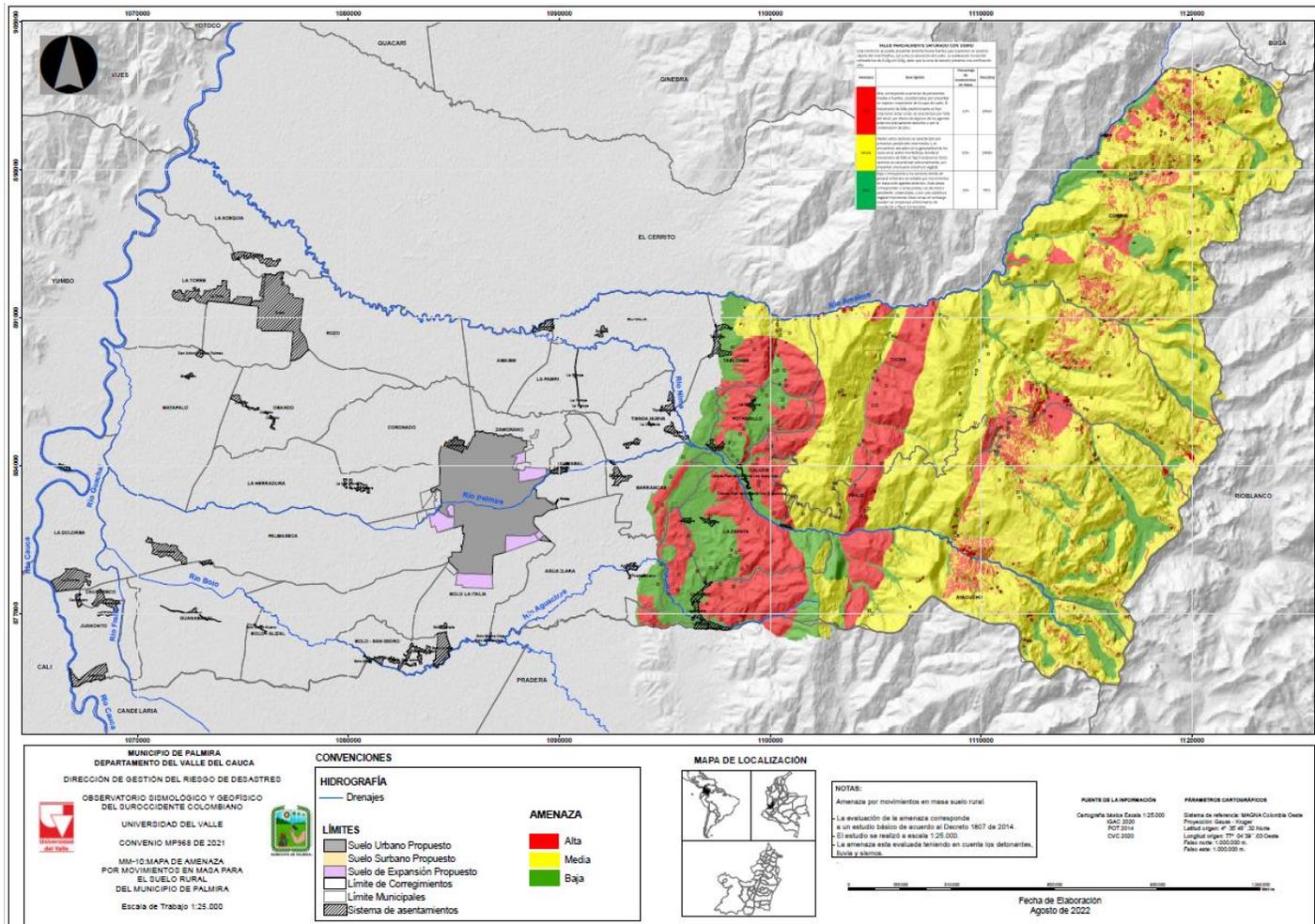


Figura 38. Mapa Amenaza por movimientos en masa para el suelo rural del municipio de Palmira (MM 10)

Fuente: Elaboración propia

6.2.5. Validación de la amenaza por movimientos en masa

En la Tabla 40, se presentan los resultados de los cruces de procesos morfodinámicos (751 deslizamientos) 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 84% y 1% de amenaza baja.

En la figura 32 se aprecian los niveles de amenaza en los procesos morfodinámicos.

Tabla 40. Validación del modelo de la amenaza por MM

Procesos Morfodinámicos	Nivel De Amenaza Área (Ha)			Total
	Baja	Media	Alta	
Caída (cr: rocas)	0	1005	8024	9029
Coluvión	6222.5	80932.5	191339	278494
Deslizamiento (dr: rotacional dt: traslacional)	5297.5	45439.5	374661	425398
Flujos	949	13058	233460	247467
Reptación	541	13058	83526	97125
Total general	13010	153493	891010	1057513
Porcentaje	1%	15%	84%	

Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

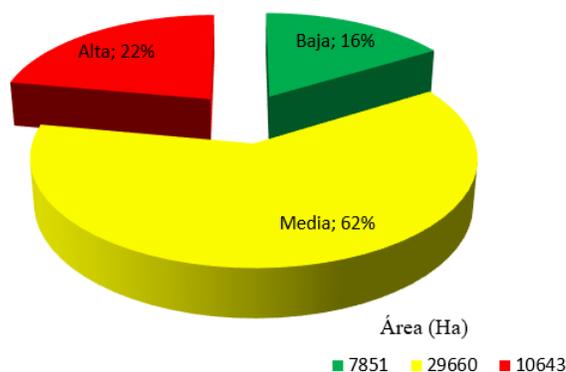


Figura 39. Porcentaje de amenaza por movimientos en masa
Fuente: Elaboración propia.

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

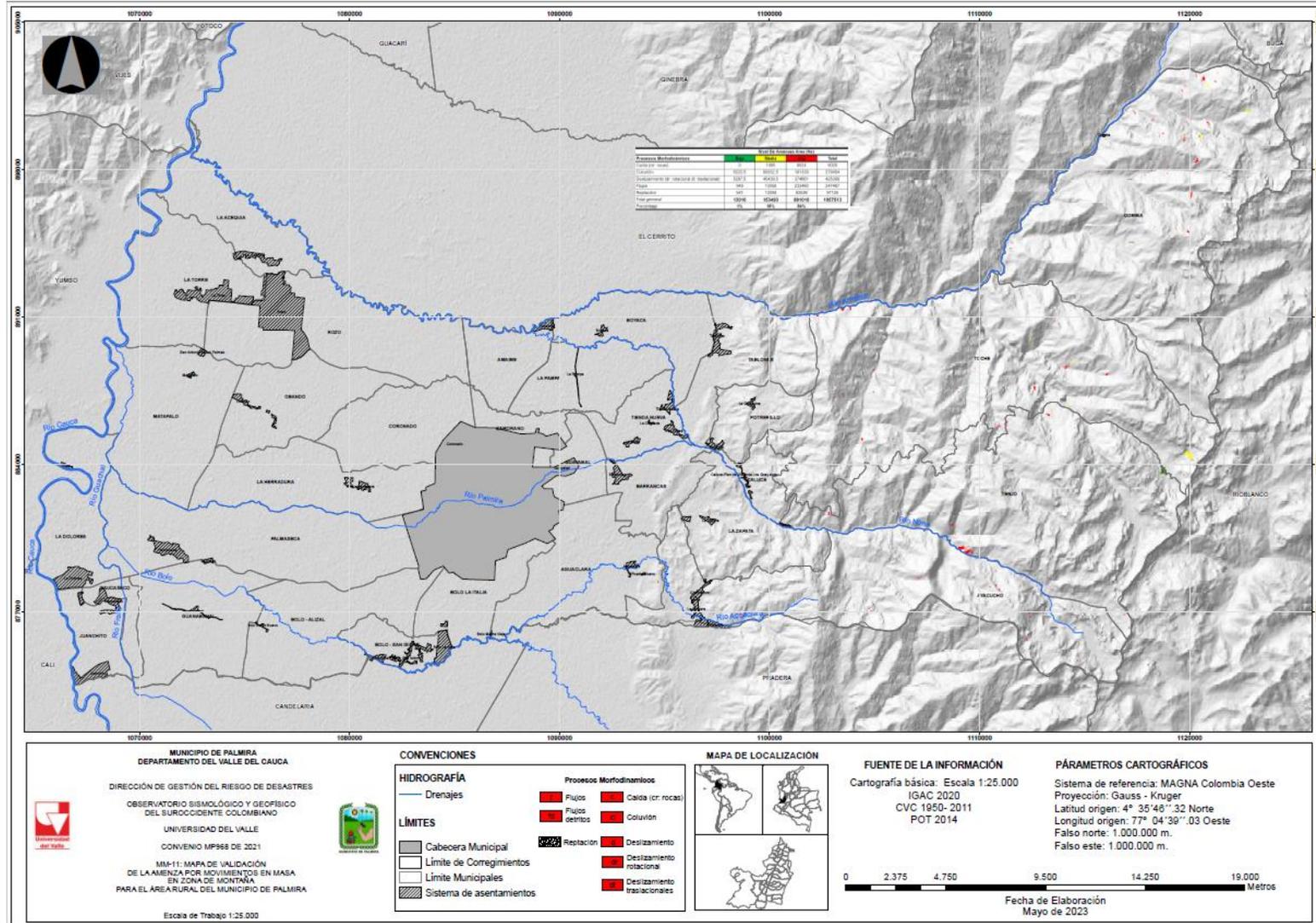


Figura 40. Mapa Validación del modelo de amenaza por movimientos en masa (MM 11)

Fuente: Elaboración propia

- **Amenaza alta:**

Se caracteriza por su alta susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa. En estas áreas existe una alta probabilidad de que se generen movimientos en masa con magnitudes iguales o mayores a 2.500 m², detonados por eventos de lluvias críticas, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio de 10 años, y por sismos, al menos una vez, en un periodo promedio de 50 años. Lluvias o sismos recurrentes pueden detonar movimientos en masa de magnitud menor a 2500 m².

Esta categoría ocupa el 22% del área de estudio, cubriendo un área de 10643 ha, principalmente en la zona suroriental (5556 ha).

- **Amenaza media:**

La zona de amenaza MEDIA, se caracteriza por una moderada susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa. En estas áreas es probable que se generen movimientos en masa con magnitudes iguales o mayores a 2.500 m², detonados por eventos de lluvias críticas, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio de 10 años, y por sismos, al menos una vez, en un periodo promedio de 50 años. Esporádicamente lluvias o sismos recurrentes pueden detonar movimientos en masa de magnitud menor a 2500 m².

Esta categoría ocupa el 62% del área de estudio, cubriendo un área de 29660 ha, principalmente en la zona noroccidental (12513 ha).

- **Amenaza baja:**

La zona de amenaza BAJA, se caracteriza por una baja susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa. En estas áreas es probable que se generen movimientos en masa con magnitudes iguales o mayores a 2.500 m², detonados por eventos de lluvias críticas, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio de 10 años, y por sismos, al menos una vez, en un periodo promedio de 50 años. Rara vez lluvias o sismos recurrentes pueden detonar movimientos en masa de magnitud menor a 2500 m².

Esta categoría ocupa el 16% del área de estudio, cubriendo un área de 7851 ha, principalmente en la zona suroriental (3846 ha).

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 y formaciones geológicas superficiales, etc).

La zona rural del municipio de Palmira está fuertemente afectada por acción tectónica, evidenciada en los diferentes lineamientos fotogeológicos y fallas identificadas. Dicha actividad puede también incidir en la susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa, debido al alto fracturamiento que genera en las rocas y depósitos.

En el sector noroccidental se identificaron los mayores deslizamientos en el municipio con un total de 332 deslizamientos, corresponde al 43% del área de estudio, sector nororiental con 104 deslizamientos corresponde al 14% área de estudio, sector suroccidental con 107 deslizamientos corresponde al 14% y por último el sector suroriental con 218 deslizamientos corresponde al 29% del área de estudio.

La mayor parte de los movimientos en masa se presentan sobre roca regular calidad esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc) y son de tipo rotacional y traslacional.

La zona forestal es el área más afectada por movimientos en masa.

Otras coberturas, en donde se registraron movimientos en masa se ubican en la agricultura (31.29% del total de deslizamientos), sitios de disposición de materiales de desecho (14.11%), infraestructura (0.67%), minería (0.40%), cuerpos de agua (0.40%) y asentamiento (0.27%), permitiendo asociar la inestabilidad del terreno a las prácticas culturales de uso del suelo.

Durante el levantamiento de información (Historicidad y geomorfología) se realizó el inventario de cuarenta (40) eventos por historicidad y setecientos cincuenta y uno (751 deslizamientos) 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 (UGS, cobertura y uso del suelo, 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 zonificación de la amenaza por movimientos en masa fue calculada a partir de la zonificación de la susceptibilidad (factores condicionantes), con un método estadístico bivariado, dado en términos de probabilidad espacial y teniendo en cuenta la probabilidad de los factores detonantes (lluvia y sismo) y de la magnitud de los movimientos en masa que fueron cartografiados y caracterizados tanto en campo como a partir de sensores remotos.

El mapa es una herramienta de planificación regional (escala 1:25.000) y puede ser usado para evaluaciones preliminares de intervenciones o desarrollos de infraestructura a gran escala, así como, para la planificación de procesos de gestión de riesgo a escalas más detalladas (1:10.000, 1:5.000, etc.). Es el punto de partida para la ejecución de estudios y análisis de escenarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escalas detalladas, y en ningún caso los reemplaza. El alcance de este mapa es de información y descripción, de condicionamiento del uso del suelo y de ordenamiento a escala regional.

La amenaza fue categorizada en alta, media y baja. Las características propias de cada zona se describen a continuación:

La zona de amenaza ALTA, se caracteriza por su alta susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa. En estas áreas existe una alta probabilidad de que se generen movimientos en masa con magnitudes iguales o mayores a 2.500 m², detonados por eventos de lluvias críticas, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio de 10 años, y por sismos, al menos una vez, en un periodo promedio de 50 años. Lluvias o sismos recurrentes pueden detonar movimientos en masa de magnitud menor a 2500 m².

Esta categoría ocupa el 22% del área de estudio, cubriendo un área de 10643 ha, principalmente en la zona suroriental (5556 ha).

La zona de amenaza MEDIA, se caracteriza por una moderada susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa. En estas áreas es probable que se generen movimientos en masa con magnitudes iguales o mayores a 2.500 m², detonados por eventos de lluvias críticas, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio de 10 años, y por sismos, al menos una vez, en un periodo promedio de 50 años. Esporádicamente lluvias o sismos recurrentes pueden detonar movimientos en masa de magnitud menor a 2500 m².

Esta categoría ocupa el 62% del área de estudio, cubriendo un área de 29660 ha, principalmente en la zona noroccidental (12513 ha).

La zona de amenaza BAJA, se caracteriza por una baja susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa. En estas áreas es probable que se generen movimientos en masa con magnitudes iguales o mayores a 2.500 m², detonados por eventos de lluvias críticas, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio de 10 años, y por sismos, al menos una vez, en un periodo promedio de 50 años. Rara vez lluvias o sismos recurrentes pueden detonar movimientos en masa de magnitud menor a 2500 m².

Esta categoría ocupa el 16% del área de estudio, cubriendo un área de 7851 ha, principalmente en la zona suroriental (3846 ha).

En las áreas planas que corresponden a las terrazas, abanicos y valles de los ríos y quebradas en los cuales no se esperaría se detone un movimiento en masa, pero sí son zonas que pueden verse afectadas por inundaciones lentas o súbitas de agua o de flujos de tierra o lodos provenientes de movimientos en masa que se generen aguas arriba del drenaje. Por tanto, en las áreas en amenaza baja, relacionadas con drenajes, deben tenerse en cuenta los posibles eventos de inundación que puedan afectar personas, viviendas y demás elementos expuestos.

- 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.

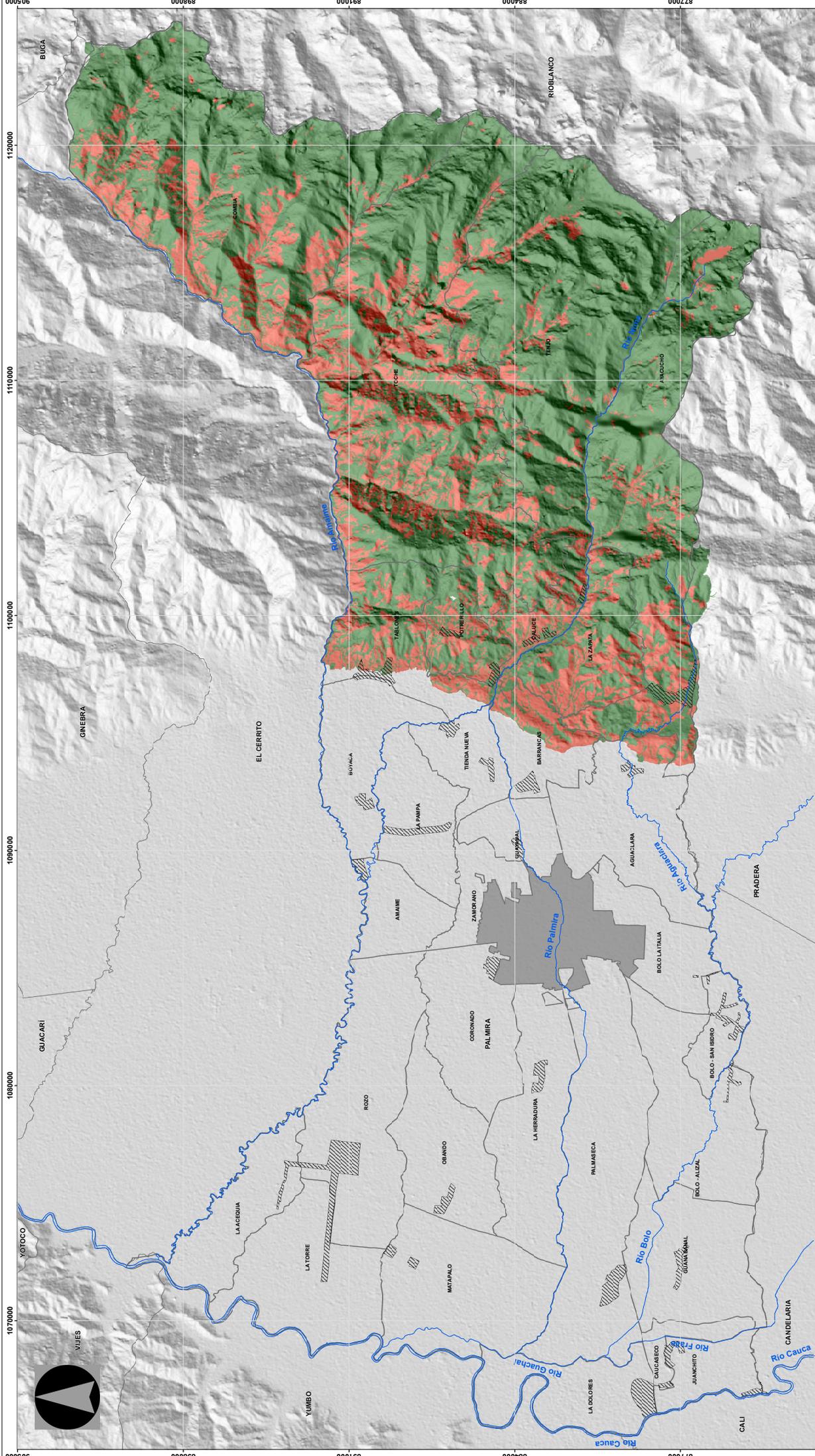
9. ANEXOS

Anexo 1. Variables clasificadas

Anexo 2. Hidrología

Anexo 1

Variables clasificadas



MUNICIPIO DE PALMIRA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES
OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO
DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
CONVENIO MP968 DE 2021
MAPA DE RELACIÓN DE MOVIMIENTOS
CON LA VARIABLE COBERTURAS
EN ZONA DE MONTAÑA
DEL MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de Trabajo 1:25,000

MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de trabajo 1:250,000

CONVENCIONES

- Drenajes
- Casco urbano
- Límite de corregimientos
- Límite municipal
- Sistema de asentamientos

Mapa de sombras

Valor

- Alto: 254
- Bajo: 0

CoBERTuras - Movimientos

WI

- 1,459 - -0,001
- 0 - 4,008

MAPA DE LOCALIZACIÓN

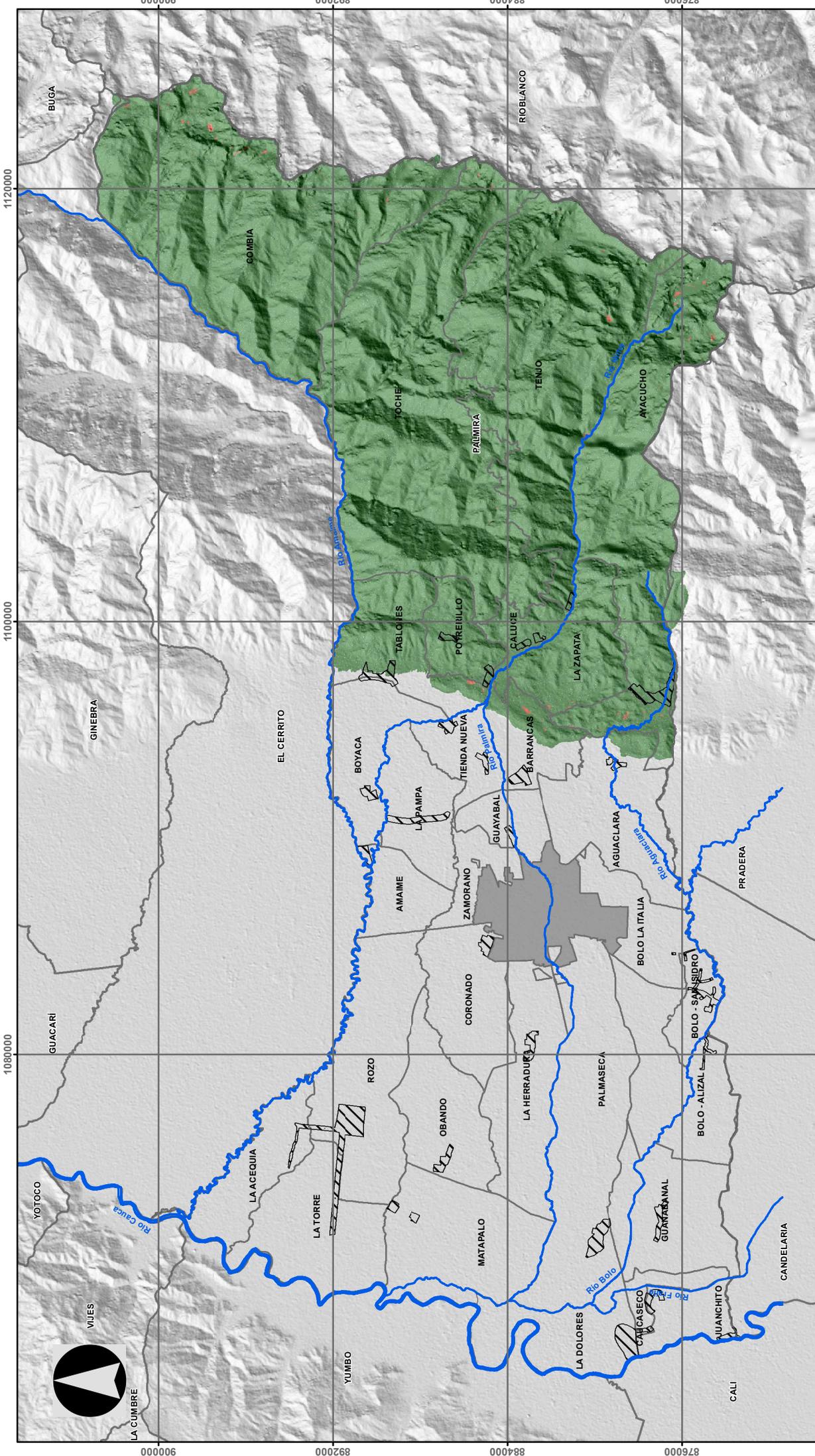
FUENTE DE LA INFORMACIÓN

Cartografía básica:
IGAC - CVC - POT 2014
Cartografía temática
OSSO 2021

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Sistema de referencia: MAGNA Colombia Oeste
Proyección: Gauss - Kruger
Latitud origen: 4° 35'46" .32 Norte
Longitud origen: 77° 04'39" .03 Oeste
Falso norte: 1.000.000 m.
Falso este: 1.000.000 m.

Escala 1:63.000



MUNICIPIO PALMIRA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES
OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO
DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
CONVENIO MP968 DE 2021
MAPA DE RELACIÓN DE MOVIMIENTOS
CON LA VARIABLE CURVATURA
EN ZONA DE MONTAÑA
DEL MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de Trabajo 1:25.000

MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de trabajo 1:25000

FUENTE DE INFORMACIÓN Sistema de referencia: MAGNA Colombia Oeste
Proyección: Gauss - Kruger
Cartografía básica: IGAC - CVC
Cartografía Temática: Planeación Palmira OSSO 2021

MAPA DE LOCALIZACIÓN

CONVENCIONES

- Drenajes
- Casco urbano
- Limite de corregimientos
- Limite municipal
- Sistema de asentamientos

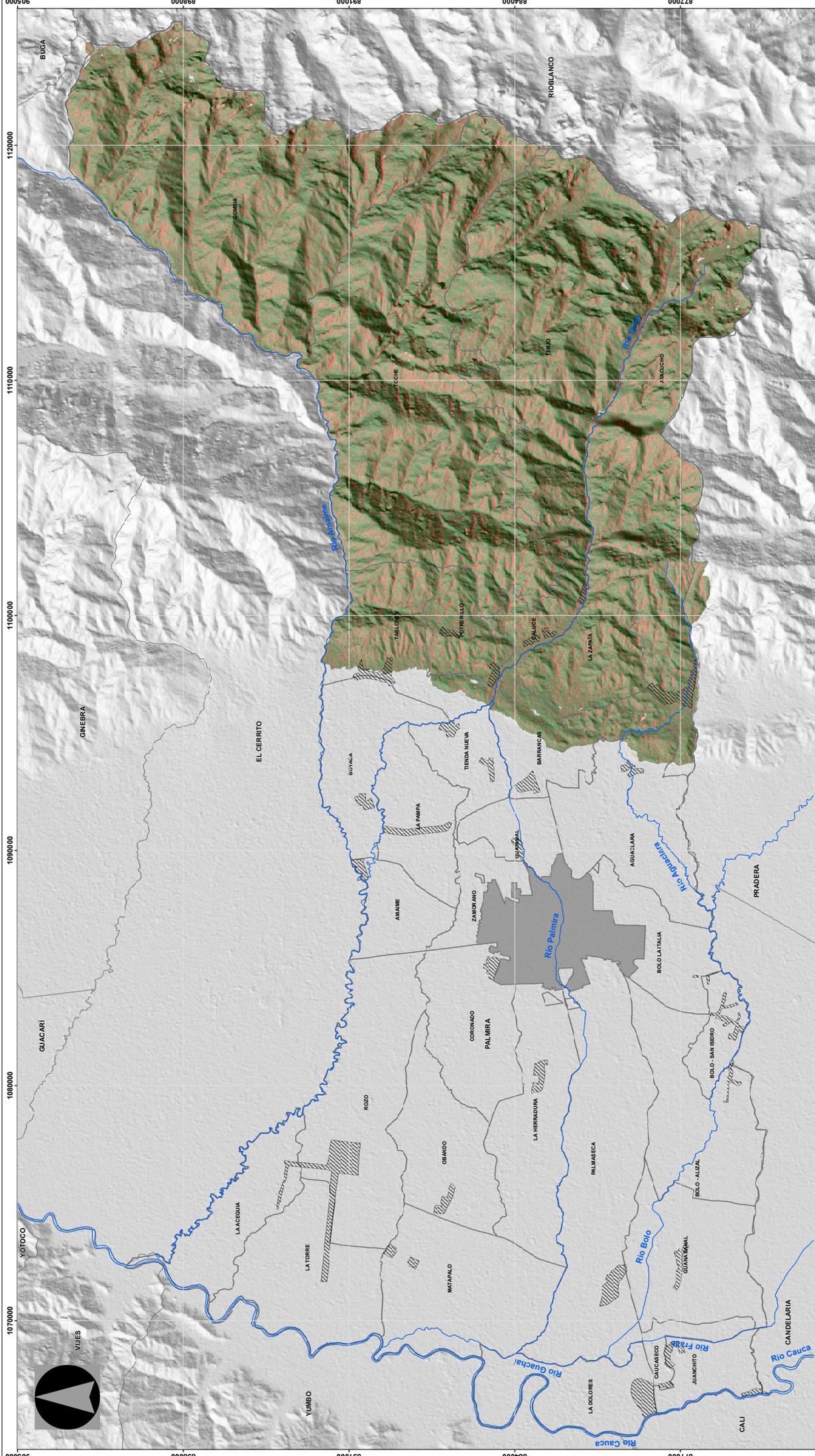
Mapa de sombras
Valor
Alto : 254
Bajo : 0

Curvatura - Movimientos
Wf
-0,091 - -0,001
0 - 2,253

FUENTE DE INFORMACIÓN Sistema de referencia: MAGNA Colombia Oeste
Proyección: Gauss - Kruger
Cartografía básica: IGAC - CVC
Cartografía Temática: Planeación Palmira OSSO 2021

MAPA DE LOCALIZACIÓN

0 900 1.800 3.600 5.700 7.800 Metros
Esc 1:230000



MUNICIPIO DE PALMIRA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES
OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO
DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
CONVENIO MP968 DE 2021
MAPA DE RELACIÓN DE MOVIMIENTOS
CON LA VARIABLE ORIENTACIÓN
EN ZONA DE MONTAÑA
DEL MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de Trabajo 1:25,000

MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de trabajo 1:250,000

CONVENCIONES

- Drenajes
- Casco urbano
- Límite de corregimientos
- Límite municipal
- Sistema de asentamientos

Mapa de sombras

Valor

- Alto: 254
- Bajo: 0

MAPA DE LOCALIZACIÓN

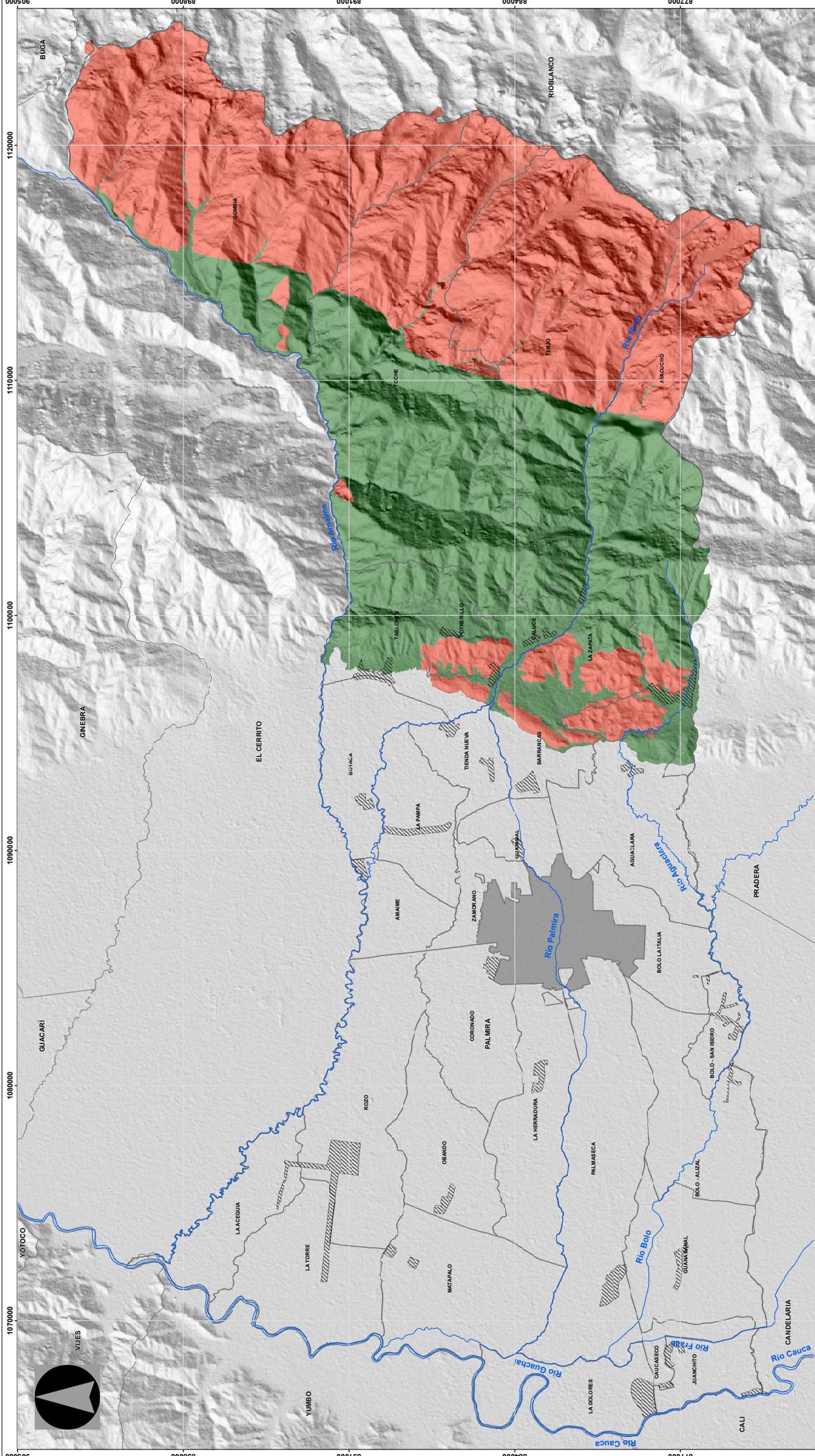
FUENTE DE LA INFORMACIÓN

Cartografía básica:
IGAC - CVC - POT 2014
Cartografía temática
OSSO 2021

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Sistema de referencia: MAGNA Colombia Oeste
Proyección: Gauss - Kruger
Latitud origen: 4° 35'46" .32 Norte
Longitud origen: 77° 04'39" .03 Oeste
Falso norte: 1.000.000 m.
Falso este: 1.000.000 m.

Escala 1:63.000



MUNICIPIO DE PALMIRA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES
OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO
DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
CONVENIO MP968 DE 2021

MAPA DE RELACIÓN DE MOVIMIENTOS
EN ZONA DE MONTAÑA
DEL MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de Trabajo 1:25,000

MUNICIPIO DE PALMIRA
Escala de trabajo 1:250,000

CONVENCIONES

- Drenajes
- Casco urbano
- Límite de corregimientos
- Límite municipal
- Sistema de asentamientos

Mapa de sombras

Valor

- Alto: 254
- Bajo: 0

MAPA DE LOCALIZACIÓN

FUENTE DE LA INFORMACIÓN

Cartografía básica:
IGAC - CVC - POT 2014
Cartografía temática
OSSO 2021

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Sistema de referencia: MAGNA Colombia Oeste
Proyección: Gauss - Kruger
Latitud origen: 4° 35'46" .32 Norte
Longitud origen: 77° 04'39" .03 Oeste
Falso norte: 1.000.000 m.
Falso este: 1.000.000 m.

0 2.375 4.750 9.500 14.250 19.000 Metros

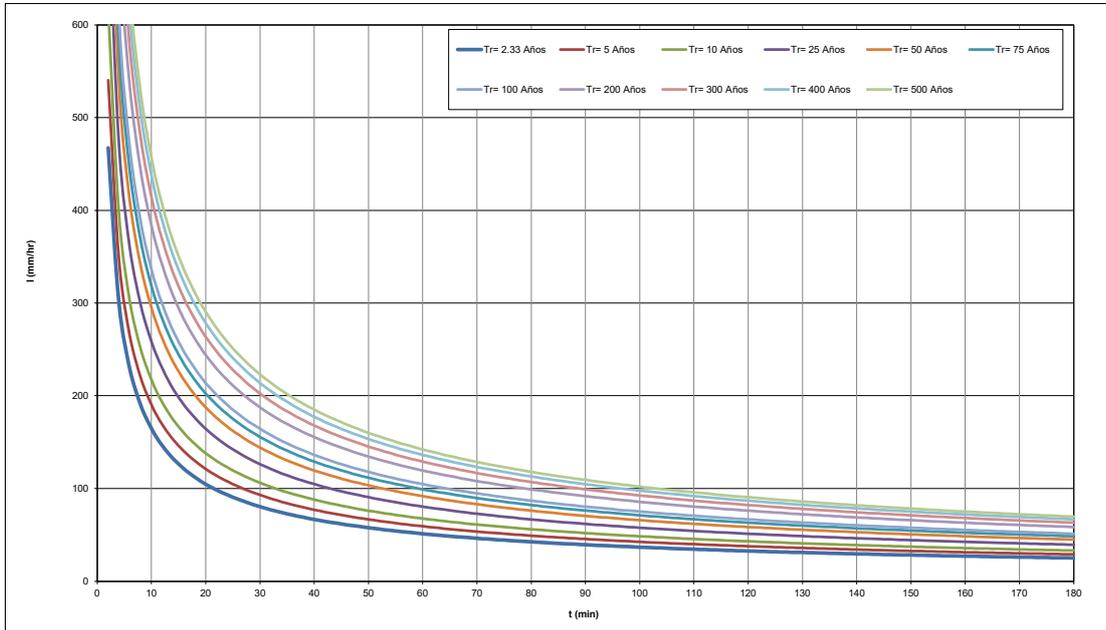
Esc 1:63.000

Anexo 2

Hidrología

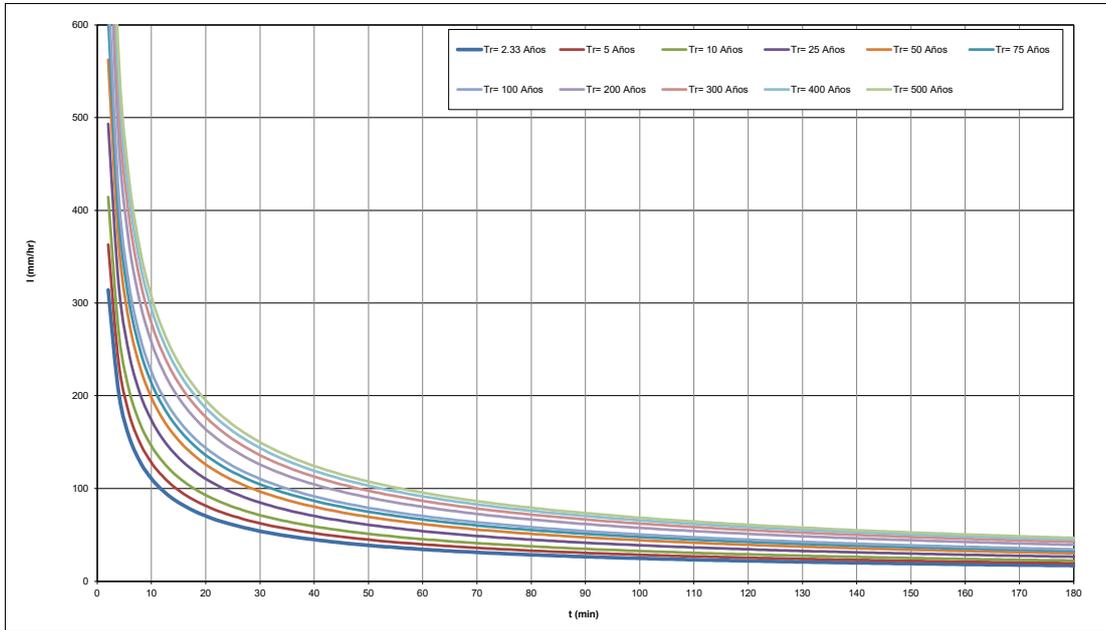
TR	DURACION DE LAS LLUVIAS (MINUTOS)																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
2.33	164	105	80	67	58	51	46	43	39	37	35	33	31	30	28	27	26	25
5	190	121	93	77	67	59	54	49	46	43	40	38	36	34	33	31	30	29
10	217	138	106	88	76	68	61	56	52	49	46	43	41	39	37	36	34	33
25	258	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	59
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

AUSTRIA



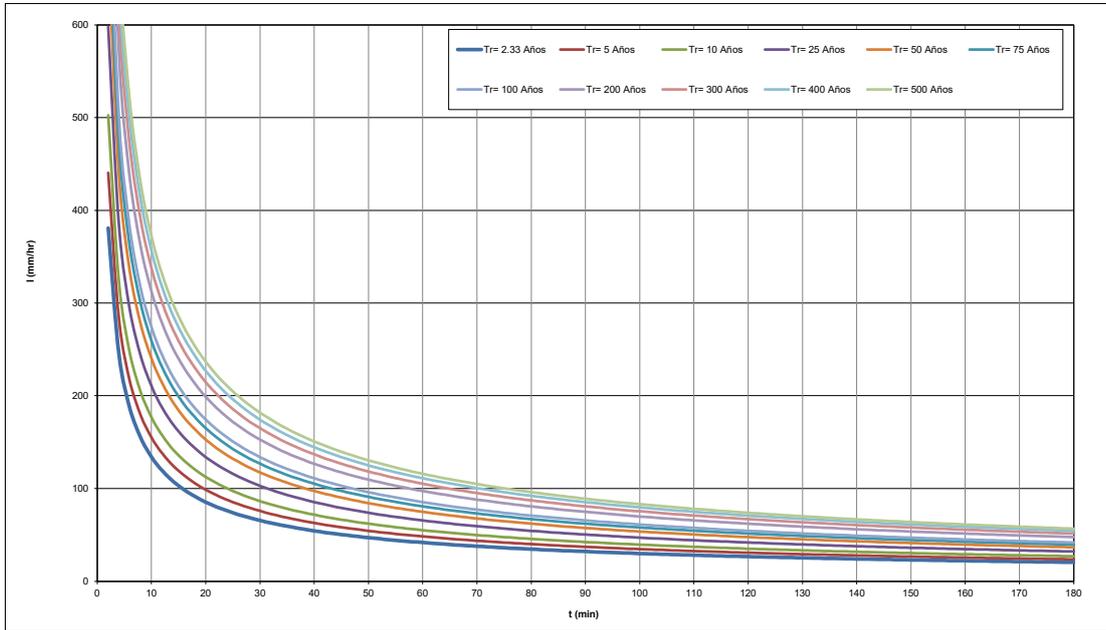
TR	DURACION DE LAS LLUVIAS (MINUTOS)																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
2.33	110	70	54	45	39	34	31	29	26	25	23	22	21	20	19	18	18	17
5	128	81	62	52	45	40	36	33	31	29	27	25	24	23	22	21	20	19
10	146	93	71	59	51	45	41	38	35	33	31	29	27	26	25	24	23	22
25	173	110	85	70	61	54	49	45	42	39	36	34	33	31	30	29	27	26
50	198	126	97	80	69	62	56	51	47	44	42	39	37	36	34	33	31	30
75	213	136	105	87	75	67	60	55	51	48	45	42	40	38	37	35	34	33
100	225	144	110	92	79	70	64	58	54	50	47	45	43	41	39	37	36	34
200	257	164	126	104	90	80	73	67	62	58	54	51	49	46	44	42	41	39
300	276	177	136	113	98	87	78	72	67	62	58	55	52	50	48	46	44	42
400	293	187	144	119	103	92	83	76	70	66	62	58	55	53	50	48	47	45
500	306	195	150	124	108	96	86	79	73	69	64	61	58	55	53	50	49	47

BELLAVISTA



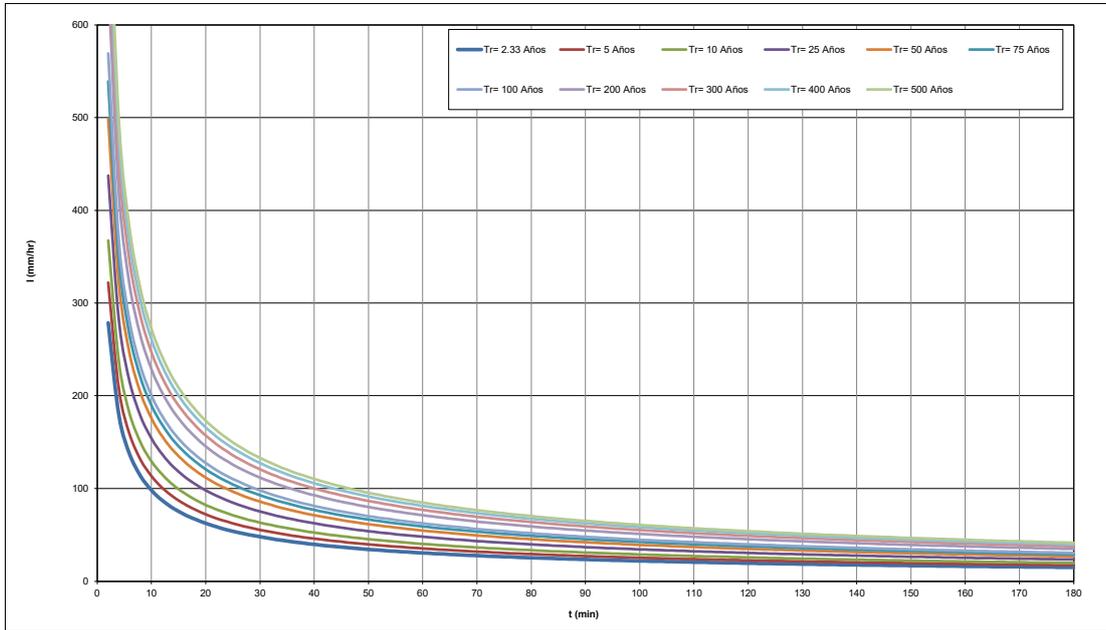
TR	DURACION DE LAS LLUVIAS (MINUTOS)																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
2.33	134	85	66	54	47	42	38	35	32	30	28	27	25	24	23	22	21	20
5	155	99	76	63	54	48	44	40	37	35	33	31	29	28	27	26	25	24
10	177	113	86	72	62	55	50	46	42	40	37	35	33	32	30	29	28	27
25	210	134	103	85	74	66	59	54	50	47	44	42	40	38	36	35	33	32
50	240	153	117	97	84	75	68	62	57	54	50	48	45	43	41	40	38	37
75	259	165	127	105	91	81	73	67	62	58	54	51	49	47	45	43	41	40
100	273	174	134	111	96	85	77	71	66	61	58	54	52	49	47	45	43	42
200	312	199	153	127	110	97	88	81	75	70	66	62	59	56	54	51	49	48
300	337	215	165	137	118	105	95	87	81	75	71	67	64	61	58	56	53	51
400	356	227	174	145	125	111	100	92	85	80	75	71	67	64	61	59	56	54
500	371	237	182	151	130	116	105	96	89	83	78	74	70	67	64	61	59	57

CHAMBU



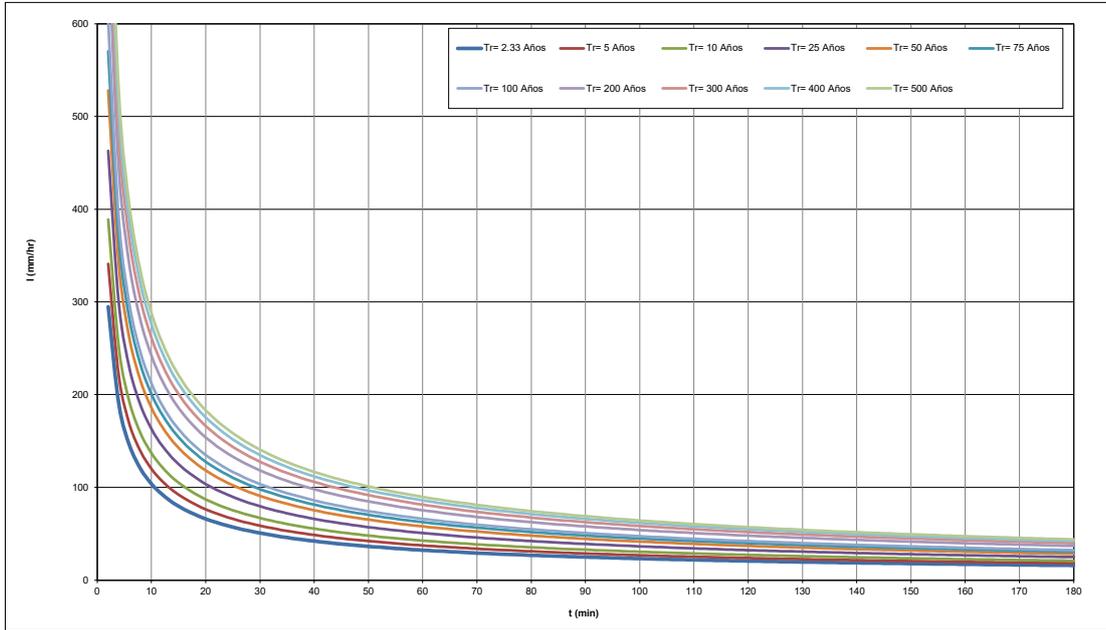
TR	DURACION DE LAS LLUVIAS (MINUTOS)																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
2.33	98	62	48	40	34	31	28	25	23	22	21	19	18	18	17	16	16	15
5	113	72	55	46	40	35	32	29	27	25	24	23	21	20	19	19	18	17
10	129	82	63	52	45	40	36	33	31	29	27	26	24	23	22	21	20	20
25	154	98	75	62	54	48	43	40	37	34	32	31	29	28	26	25	24	23
50	175	112	86	71	62	55	49	45	42	39	37	35	33	32	30	29	28	27
75	189	121	93	77	67	59	53	49	45	42	40	38	36	34	33	31	30	29
100	200	127	98	81	70	62	56	52	48	45	42	40	38	36	34	33	32	31
200	228	145	112	93	80	71	64	59	55	51	48	45	43	41	39	38	36	35
300	246	157	121	100	87	77	70	64	59	55	52	49	47	44	42	41	39	38
400	260	166	127	106	91	81	73	67	62	58	55	52	49	47	45	43	41	40
500	272	173	133	110	95	85	77	70	65	61	57	54	51	49	47	45	43	41

LA SIRENA



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	104	66	51	42	36	32	29	27	25	23	22	21	20	19	18	17	16	16
5	120	76	59	49	42	37	34	31	29	27	25	24	23	22	21	20	19	18
10	137	87	67	56	48	43	39	35	33	31	29	27	26	25	24	23	22	21
25	163	104	80	66	57	51	46	42	39	36	34	32	31	29	28	27	26	25
50	186	119	91	75	65	58	52	48	44	42	39	37	35	33	32	31	29	28
75	200	128	98	81	70	63	57	52	48	45	42	40	38	36	34	33	32	31
100	212	135	104	86	74	66	60	55	51	47	45	42	40	38	36	35	34	32
200	241	154	118	98	85	75	68	62	58	54	51	48	46	43	42	40	38	37
300	261	166	129	106	92	81	74	67	63	58	55	52	49	47	45	43	41	40
400	275	176	135	112	97	86	78	71	66	62	58	55	52	50	47	45	44	42
500	287	183	141	117	101	90	81	74	69	64	60	57	54	52	49	47	46	44

AUJI



**RESULTADOS FRECUENCIA DE LLUVIAS MÁXIMAS -
ESTACIÓN CHAMBU**

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR
2.33	82.6	80.2	82.5	81.8	81.1
5	93.0	92.7	93.0	92.9	92.3
10	100.0	102.9	100.1	100.8	100.5
25	107.3	115.7	107.7	109.5	110.2
50	112.1	125.3	112.6	115.4	116.9
100	116.4	134.7	117.1	120.8	123.2
300	122.4	149.7	123.5	128.6	132.9
500	125.0	156.6	126.2	132.0	137.2
chi 2	2.90	6.86	2.81	2.76	4.08

**RESULTADOS FRECUENCIA DE LLUVIAS MÁXIMAS -
ESTACIÓN LA SIRENA**

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR
2.33	59.6	56.9	60.1	63.3	56.5
5	72.2	72.4	72.3	73.8	70.3
10	80.6	85.1	80.2	78.0	81.2
25	89.4	101.0	88.4	80.4	94.7
50	95.2	112.9	93.6	81.1	104.5
100	100.4	124.6	98.2	81.3	114.3
300	107.7	143.2	104.7	81.3	129.8
500	110.8	151.8	107.4	81.4	137.0
chi 2	16.93	27.47	15.89	22.02	28.83

**RESULTADOS FRECUENCIA DE LLUVIAS MÁXIMAS -
ESTACIÓN AUSTRIA**

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
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

**RESULTADOS FRECUENCIA DE LLUVIAS MÁXIMAS -
ESTACIÓN BELLA VISTA**

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR
2.33	68.1	64.4	64.5	63.7	63.7
5	84.1	83.5	82.2	81.5	81.1
10	94.7	99.0	96.0	96.0	95.3
25	106.0	118.7	112.4	114.2	113.1
50	113.3	133.3	124.1	127.8	126.4
100	119.9	147.7	135.3	141.4	139.7
300	129.2	170.6	152.5	163.1	160.9
500	133.2	181.2	160.2	173.3	170.9
chi 2	32.88	3.18	4.76	4.06	5.00

ESTACION AUJI

Fecha	Precipitacion critica (mm)	Duracion (días)	Periodo de retorno (Años)
14/04/1982	135	3	50
28/10/1985	95	5	25
13/11/2011	103	6	25
22/11/2016	45	7	2
Promedio ponderado	106		

ESTACION AUSTRIA

Fecha	Precipitacion critica (mm)	Duracion (días)	Periodo de retorno (Años)
15/03/1975	35	11	2
1/11/1984	101	5	2
28/10/1985	150	1	10
21/11/2006	106	10	5
28/11/2006	82	10	2
3/12/2006	37	6	2
11/09/2011	51	4	2
13/03/2014	97	6	2
22/11/2016	119	4	5
24/05/2017	51	10	2
20/03/2021	52	28	2
Promedio ponderado	96		

ESTACION BELLA VISTA

Fecha	Precipitacion critica (mm)	Duracion (días)	Periodo de retorno (Años)
14/04/1982	143	3	100
28/10/1985	89	5	10
25/02/1999	109	6	10
1/12/2011	69	5	5
1/03/2021	40	10	2
Promedio ponderado	104		

ESTACION CHAMBU

Fecha	Precipitacion critica (mm)	Duracion (días)	Periodo de retorno (Años)
25/02/1999	131	4	100
12/04/2011	75	3	2
19/10/2011	81.3	7	2
22/11/2016	78	5	2
31/03/2017	83	3	5
4/04/2018	107	5	25
18/04/2018	56	9	2
15/04/2019	105	1	25
21/04/2019	123	7	100
8/11/2019	43	12	2
28/01/2020	56	1	2
30/01/2020	56	3	2
1/03/2021	37	3	2
20/03/2021	39	8	2
Promedio ponderado	88		

ESTACION LA SIRENA

Fecha	Precipitacion critica (mm)	Duracion (días)	Periodo de retorno (Años)
25/02/1999	93	4	25
28/11/2006	91	20	25
12/04/2011	60	7	5
19/10/2011	94	3	25
22/11/2016	62	12	5
31/03/2017	63	7	5
Promedio ponderado	80		

ESTACION	CODIGO	PARAMETRO	FECHA	MES	DIA	AÑO	TOTAL	MAXI	UNIDADES
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	4/03/1975		3	4	1975	10	10 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	5/03/1975		3	5	1975	11	11 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	6/03/1975		3	6	1975	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	7/03/1975		3	7	1975	3	3 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	8/03/1975		3	8	1975	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	9/03/1975		3	9	1975	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	10/03/1975		3	10	1975	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	11/03/1975		3	11	1975	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	12/03/1975		3	12	1975	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	13/03/1975		3	13	1975	5	5 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	14/03/1975		3	14	1975	6	6 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	15/03/1975		3	15	1975	11	11 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	27/10/1984		10	27	1984	27	27 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	28/10/1984		10	28	1984	17	17 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	29/10/1984		10	29	1984	26	26 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	30/10/1984		10	30	1984	16	16 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	31/10/1984		10	31	1984	15	15 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	1/11/1984		11	1	1984	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	27/10/1985		10	27	1985	150	150 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	28/10/1985		10	28	1985	20	20 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	11/11/2006		11	11	2006	22	22 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	12/11/2006		11	12	2006	23	23 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	13/11/2006		11	13	2006	25	25 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	14/11/2006		11	14	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	15/11/2006		11	15	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	16/11/2006		11	16	2006	3	3 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	17/11/2006		11	17	2006	3	3 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	18/11/2006		11	18	2006	10	10 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	19/11/2006		11	19	2006	20	20 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	20/11/2006		11	20	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	21/11/2006		11	21	2006	42	42 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	18/11/2006		11	18	2006	10	10 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	19/11/2006		11	19	2006	20	20 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	20/11/2006		11	20	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	21/11/2006		11	21	2006	42	42 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	22/11/2006		11	22	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	23/11/2006		11	23	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	24/11/2006		11	24	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	25/11/2006		11	25	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	26/11/2006		11	26	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	27/11/2006		11	27	2006	10	10 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	28/11/2006		11	28	2006	7	7 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	27/11/2006		11	27	2006	10	10 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	28/11/2006		11	28	2006	7	7 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	29/11/2006		11	29	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	30/11/2006		11	30	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	1/12/2006		12	1	2006	20	20 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	2/12/2006		12	2	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	3/12/2006		12	3	2006	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	7/09/2011		9	7	2011	4	4 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	8/09/2011		9	8	2011	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	9/09/2011		9	9	2011	0	0 mm

AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	10/09/2011	9	10	2011	47	47 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	11/09/2011	9	11	2011	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	7/03/2014	3	7	2014	62	62 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	8/03/2014	3	8	2014	2	2 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	9/03/2014	3	9	2014	28	28 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	10/03/2014	3	10	2014	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	11/03/2014	3	11	2014	1	1 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	12/03/2014	3	12	2014	4	4 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	13/03/2014	3	13	2014	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	18/11/2016	11	18	2016	104	104 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	19/11/2016	11	19	2016	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	20/11/2016	11	20	2016	12	12 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	21/11/2016	11	21	2016	3	3 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	22/11/2016	11	22	2016	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	14/05/2017	5	14	2017	5	5 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	15/05/2017	5	15	2017	6	6 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	16/05/2017	5	16	2017	20	20 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	17/05/2017	5	17	2017	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	18/05/2017	5	18	2017	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	19/05/2017	5	19	2017	0	0 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	20/05/2017	5	20	2017	2	2 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	21/05/2017	5	21	2017	3	3 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	22/05/2017	5	22	2017	5	5 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	23/05/2017	5	23	2017	10	10 mm
AUSTRIA	2612810112	PRECIPITACIO	24/05/2017	5	24	2017	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	20/02/2021	2	20	2021	16	16 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	21/02/2021	2	21	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	22/02/2021	2	22	2021	1	1 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	23/02/2021	2	23	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	24/02/2021	2	24	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	25/02/2021	2	25	2021	4	4 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	26/02/2021	2	26	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	27/02/2021	2	27	2021	3	3 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	28/02/2021	2	28	2021	3	3 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	1/03/2021	3	1	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	2/03/2021	3	2	2021	1	1 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	3/03/2021	3	3	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	4/03/2021	3	4	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	5/03/2021	3	5	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	6/03/2021	3	6	2021	1	1 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	7/03/2021	3	7	2021	2	2 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	8/03/2021	3	8	2021	3	3 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	9/03/2021	3	9	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	10/03/2021	3	10	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	11/03/2021	3	11	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	12/03/2021	3	12	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	13/03/2021	3	13	2021	1	1 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	14/03/2021	3	14	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	15/03/2021	3	15	2021	0	0 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	16/03/2021	3	16	2021	1	1 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	17/03/2021	3	17	2021	1	1 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	18/03/2021	3	18	2021	5	5 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	19/03/2021	3	19	2021	10	10 mm
AUSTRIA	2612810203	PRECIPITACIO	20/03/2021	3	20	2021	5	5 mm

ESTACION	CODIGO	PARAMETRO	FECHA	MES	DIA	AÑO	TOTAL	MAXI	UNIDADES
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	11/04/1982		4	11	1982	92	92 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	12/04/1982		4	12	1982	42	42 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	13/04/1982		4	13	1982	9	9 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	14/04/1982		4	14	1982	0	0 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	23/10/1985		10	23	1985	50	50 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	24/10/1985		10	24	1985	11	11 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	25/10/1985		10	25	1985	3	3 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	26/10/1985		10	26	1985	10	10 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	27/10/1985		10	27	1985	15	15 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	28/10/1985		10	28	1985	35	35 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	19/02/1999		2	19	1999	20	20 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	20/02/1999		2	20	1999	20	20 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	21/02/1999		2	21	1999	18	18 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	22/02/1999		2	22	1999	18	18 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	23/02/1999		2	23	1999	12	12 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	24/02/1999		2	24	1999	21	21 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	25/02/1999		2	25	1999	0	0 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	26/11/2011		11	26	2011	3	3 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	27/11/2011		11	27	2011	35	35 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	28/11/2011		11	28	2011	25	25 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	29/11/2011		11	29	2011	6	6 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	30/11/2011		11	30	2011	0	0 mm
BELLA VISTA	2612800103	PRECIPITACIO	1/12/2011		12	1	2011	1	1 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	19/02/2021		2	19	2021	13	13 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	20/02/2021		2	20	2021	16	16 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	21/02/2021		2	21	2021	0	0 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	22/02/2021		2	22	2021	1	1 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	23/02/2021		2	23	2021	0	0 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	24/02/2021		2	24	2021	0	0 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	25/02/2021		2	25	2021	4	4 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	26/02/2021		2	26	2021	0	0 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	27/02/2021		2	27	2021	3	3 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	28/02/2021		2	28	2021	3	3 mm
BELLA VISTA	2612810203	PRECIPITACIO	1/03/2021		3	1	2021	0	0 mm

ESTACION	CODIGO	PARAMETRO	FECHA	MES	DIA	AÑO	TOTAL	MAXI	UNIDADES
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	21/02/1999		2	21	1999	11	11 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	22/02/1999		2	22	1999	45	45 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	23/02/1999		2	23	1999	35	35 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	24/02/1999		2	24	1999	40	40 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	25/02/1999		2	25	1999	5	5 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	9/04/2011		4	9	2011	75	75 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	10/04/2011		4	10	2011	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	11/04/2011		4	11	2011	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	12/04/2011		4	12	2011	30	30 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	12/10/2011		10	12	2011	30	30 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	13/10/2011		10	13	2011	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	14/10/2011		10	14	2011	10	10 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	15/10/2011		10	15	2011	11	11 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	16/10/2011		10	16	2011	10	10 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	17/10/2011		10	17	2011	0.3	0.3 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	18/10/2011		10	18	2011	20	20 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	19/10/2011		10	19	2011	32	32 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	17/11/2016		11	17	2016	70	70 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	18/11/2016		11	18	2016	8	8 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	19/11/2016		11	19	2016	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	20/11/2016		11	20	2016	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	21/11/2016		11	21	2016	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	22/11/2016		11	22	2016	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	28/03/2017		3	28	2017	30	30 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	29/03/2017		3	29	2017	6	6 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	30/03/2017		3	30	2017	47	47 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	31/03/2017		3	31	2017	12	12 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	30/03/2018		3	30	2018	48	48 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	31/03/2018		3	31	2018	9	9 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	1/04/2018		4	1	2018	45	45 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	2/04/2018		4	2	2018	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	3/04/2018		4	3	2018	5	5 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	4/04/2018		4	4	2018	4	4 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	9/04/2018		4	9	2018	9	9 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	10/04/2018		4	10	2018	12	12 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	11/04/2018		4	11	2018	10	10 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	12/04/2018		4	12	2018	12	12 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	13/04/2018		4	13	2018	13	13 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	14/04/2018		4	14	2018	0	0 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	15/04/2018		4	15	2018	0	0 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	16/04/2018		4	16	2018	0	0 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	17/04/2018		4	17	2018	0	0 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	18/04/2018		4	18	2018	1	1 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	14/04/2019		4	14	2019	105	105 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	15/04/2019		4	15	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	14/04/2019		4	14	2019	105	105 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	15/04/2019		4	15	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	16/04/2019		4	16	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	17/04/2019		4	17	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	18/04/2019		4	18	2019	6	6 mm

CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	19/04/2019	4	19	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	20/04/2019	4	20	2019	12	12 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	21/04/2019	4	21	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	27/10/2019	10	27	2019	9	9 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	28/10/2019	10	28	2019	7	7 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	29/10/2019	10	29	2019	5	5 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	30/10/2019	10	30	2019	4	4 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	31/10/2019	10	31	2019	1	1 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	1/11/2019	11	1	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	2/11/2019	11	2	2019	3	3 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	3/11/2019	11	3	2019	3	3 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	4/11/2019	11	4	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	5/11/2019	11	5	2019	5	5 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	6/11/2019	11	6	2019	5	5 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	7/11/2019	11	7	2019	1	1 mm
CHAMBU	2612810203	PRECIPITACIO	8/11/2019	11	8	2019	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	27/01/2020	1	27	2020	56	56 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	28/01/2020	1	28	2020	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	27/01/2020	1	27	2020	56	56 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	28/01/2020	1	28	2020	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	29/01/2020	1	29	2020	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	30/01/2020	1	30	2020	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	26/02/2021	2	26	2021	15	15 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	27/02/2021	2	27	2021	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	28/02/2021	2	28	2021	22	22 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	1/03/2021	3	1	2021	20	20 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	12/03/2021	3	12	2021	7	7 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	13/03/2021	3	13	2021	4	4 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	14/03/2021	3	14	2021	16	16 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	15/03/2021	3	15	2021	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	16/03/2021	3	16	2021	2	2 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	17/03/2021	3	17	2021	0	0 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	18/03/2021	3	18	2021	4	4 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	19/03/2021	3	19	2021	6	6 mm
CHAMBU	2612720301	PRECIPITACIO	20/03/2021	3	20	2021	15	15 mm

ESTACION	CODIGO	PARAMETRO	FECHA	MES	DIA	AÑO	TOTAL	MAXI	UNIDADES
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	21/02/1999		2	21	1999	20	20 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	22/02/1999		2	22	1999	31	31 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	23/02/1999		2	23	1999	23	23 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	24/02/1999		2	24	1999	19	19 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	25/02/1999		2	25	1999	2	2 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	8/11/2006		11	8	2006	17	17 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	9/11/2006		11	9	2006	11	11 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	10/11/2006		11	10	2006	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	11/11/2006		11	11	2006	2	2 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	12/11/2006		11	12	2006	11	11 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	13/11/2006		11	13	2006	8	8 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	14/11/2006		11	14	2006	10	10 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	15/11/2006		11	15	2006	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	16/11/2006		11	16	2006	4	4 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	17/11/2006		11	17	2006	3	3 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	18/11/2006		11	18	2006	4	4 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	19/11/2006		11	19	2006	1	1 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	20/11/2006		11	20	2006	7	7 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	21/11/2006		11	21	2006	7	7 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	22/11/2006		11	22	2006	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	23/11/2006		11	23	2006	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	24/11/2006		11	24	2006	2	2 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	25/11/2006		11	25	2006	4	4 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	26/11/2006		11	26	2006	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	27/11/2006		11	27	2006	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	28/11/2006		11	28	2006	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	5/04/2011		4	5	2011	24	24 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	6/04/2011		4	6	2011	1	1 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	7/04/2011		4	7	2011	5	5 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	8/04/2011		4	8	2011	3	3 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	9/04/2011		4	9	2011	6	6 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	10/04/2011		4	10	2011	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	11/04/2011		4	11	2011	21	21 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	12/04/2011		4	12	2011	20	20 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	16/10/2011		10	16	2011	40	40 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	17/10/2011		10	17	2011	53	53 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	18/10/2011		10	18	2011	1	1 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	19/10/2011		10	19	2011	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	10/11/2016		11	10	2016	12	12 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	11/11/2016		11	11	2016	2	2 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	12/11/2016		11	12	2016	3	3 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	13/11/2016		11	13	2016	4	4 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	14/11/2016		11	14	2016	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	15/11/2016		11	15	2016	5	5 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	16/11/2016		11	16	2016	6	6 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	17/11/2016		11	17	2016	3	3 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	18/11/2016		11	18	2016	17	17 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	19/11/2016		11	19	2016	10	10 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	20/11/2016		11	20	2016	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	21/11/2016		11	21	2016	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	22/11/2016		11	22	2016	0	0 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	24/03/2017		3	24	2017	8	8 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	25/03/2017		3	25	2017	8	8 mm

LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	26/03/2017	3	26	2017	7	7 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	27/03/2017	3	27	2017	3	3 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	28/03/2017	3	28	2017	4	4 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	29/03/2017	3	29	2017	12	12 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	30/03/2017	3	30	2017	21	21 mm
LA SIRENA	2612810203	PRECIPITACIO	31/03/2017	3	31	2017	20	20 mm

ESTACION	CODIGO	PARAMETRO	FECHA	MES	DIA	AÑO	TOTAL	MAXI	UNIDADES
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	11/04/1982		4	11	1982	62	62 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	12/04/1982		4	12	1982	73	73 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	13/04/1982		4	13	1982	0	0 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	14/04/1982		4	14	1982	0	0 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	23/10/1985		10	23	1985	35	35 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	24/10/1985		10	24	1985	37	37 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	25/10/1985		10	25	1985	0	0 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	26/10/1985		10	26	1985	4	4 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	27/10/1985		10	27	1985	19	19 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	28/10/1985		10	28	1985	30	30 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	7/11/2011		11	7	2011	40	40 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	8/11/2011		11	8	2011	5	5 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	9/11/2011		11	9	2011	16	16 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	10/11/2011		11	10	2011	12	12 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	11/11/2011		11	11	2011	20	20 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	12/11/2011		11	12	2011	10	10 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	13/11/2011		11	13	2011	0	0 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	15/11/2016		11	15	2016	4	4 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	16/11/2016		11	16	2016	27	27 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	17/11/2016		11	17	2016	4	4 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	18/11/2016		11	18	2016	0	0 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	19/11/2016		11	19	2016	8	8 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	20/11/2016		11	20	2016	2	2 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	21/11/2016		11	21	2016	0	0 mm
AUJI	2612800104	PRECIPITACIO	22/11/2016		11	22	2016	0	0 mm