



**ESTUDIO BÁSICO PARA LA
ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR
MOVIMIENTOS EN MASA EN LA
VEREDA EL HATILLO MUNICIPIO
DE CONSACÁ – NARIÑO. ESCALA
1:5.000**





**ESTUDIO BÁSICO PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR
MOVIMIENTOS EN MASA EN LA VEREDA EL HATILLO MUNICIPIO DE
CONSACÁ– NARIÑO. ESCALA 1:5.000**

Elaborado por:

Mahra Guisell Pismag Salazar
Geóloga contratista

Diany Vanessa Suárez Ahumada
Ing. Agroforestal contratista

Deici Maricela Puenayan
Geógrafa contratista

Nicolas Santiago Jurado Mora
Ingeniero Ambiental contratista

Yeli Mariel Figueroa Diaz
Practicante Geografía contratista

Supervisor del estudio:

Luis Carlos Rosero López
Profesional Universitario
Geólogo, Esp. Geotecnia

CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO

Pasto, Nariño

2023



TABLA DE CONTENIDO.

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. Objetivo General.....	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1. CONCEPTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO.....	12
3.2. MOVIMIENTOS EN MASA.....	13
3.3. CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS CORINE LAND COVER	15
3.4. GEOMORFOLOGÍA.....	15
3.5. MORFODINÁMICA	16
3.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	17
3.7. SENSORES REMOTOS Y TELEDETECCIÓN.....	20
3.8. MODELO DIGITAL DEL TERRENO Y DE SUPERFICIE.....	21
4. METODOLOGÍA	22
4.1. FASE APRESTAMIENTO.....	23
4.1.1. Delimitación área de estudio.....	23
4.1.2. Información secundaria.....	24
4.1.2.1. Información cartográfica actual de la zona de estudio.....	24
4.1.2.2. Informes técnicos y estudios locales.....	24
4.1.3. Información primaria.....	24
4.1.3.1. Información recolectada en visitas de campo.....	24
4.1.3.2. Levantamiento cartográfico (Drone).....	24
4.1.4. Área de estudio definitiva.....	24
4.2. FASE DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	25
4.2.1. Estimación de susceptibilidad por movimientos en masa.....	25
4.2.1.1. Unidades de Geología para Ingeniería.....	25
4.2.1.2. Elementos geomorfológicos.....	26
4.2.1.3. Geología estructural.....	26
4.2.1.4. Cobertura de la tierra CLC.....	27
4.2.2. Inventario de Movimientos en Masa.....	27
4.2.2.1. Imágenes satelitales.....	27
4.2.2.2. Visitas de campo para identificación de MM.....	28



4.2.2.3.	Catálogo e inventario de Movimientos en Masa (MM) del SIMMA – SGC	28
4.2.2.4.	Levantamiento con drone y ortofoto	28
4.2.3.	Detonante por precipitación	28
4.2.4.	Detonante por sismos	29
4.3.	FASE ZONIFICACIÓN.....	29
4.3.1.	Zonificación de susceptibilidad.....	29
4.3.2.	Propuestas de ponderación de factores basadas en revisión de literatura.....	29
4.3.3.	Generación de escenarios de susceptibilidad	30
4.3.4.	Zonificación de Susceptibilidad general	30
4.3.5.	Zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa.....	30
5.	RESULTADOS.....	30
5.1.	FASE APRESTAMIENTO.....	30
5.1.1.	Delimitación área de estudio	30
5.1.2.	Información secundaria.....	31
5.1.3.	Información primaria.....	32
5.1.3.1.	Información recolectada en visitas de campo y levantamiento con drone	32
5.1.4.	Ajuste y definición de área de estudio.....	35
5.2.	FASE DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	35
5.2.1.	Estimación de susceptibilidad por movimientos en masa	35
5.2.1.1.	Geología regional	35
5.2.1.2.	Unidades de geología para ingeniería (UGI).....	38
5.2.1.3.	Elementos geomorfológicos	46
5.2.1.4.	Geología estructural	53
5.2.1.5.	Cobertura de la tierra y clasificación Corine Land Cover	55
5.2.2.	Inventario de Movimientos en Masa.....	68
5.2.2.1.	Imágenes satelitales y ortofotos	69
5.2.2.2.	Visitas de campo	69
5.2.2.3.	Registro en SIMMA	75
5.2.3.	Detonante por precipitación	77
5.2.3.1.	Información pluviométrica	79
5.2.3.2.	Registro temporal y espacial de movimientos en masa.....	80
5.2.3.3.	Análisis régimen hidrológico	81
5.2.3.4.	Precipitación máxima en 24 horas.....	82



5.2.3.5.	Cálculo y análisis de lluvia antecedente.....	84
5.2.3.6.	Análisis estadístico de la muestra.....	88
5.2.3.7.	Umbrales de lluvia	91
5.2.3.8.	Probabilidad anual de excedencia de umbrales de lluvia	96
5.3.	ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA	99
5.3.1.	Zonificación de susceptibilidad.....	99
5.3.1.1	Clasificación de susceptibilidad de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI)...	100
5.3.1.2	Clasificación de susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos.....	101
5.3.1.3	Clasificación de susceptibilidad por cobertura de la tierra.....	103
5.3.1.4	Clasificación de susceptibilidad por pendiente del terreno	105
5.3.2.	Propuestas de ponderación de factores basadas en revisión de literatura.....	106
5.3.3.	Generación de escenarios de susceptibilidad	106
5.3.4.	Zonificación de susceptibilidad general.....	109
5.3.5	Delimitación y zonificación de amenaza por movimientos en masa escala básica.....	110
5.3.5.1	Zona de amenaza alta	110
5.3.5.2	Zona de amenaza media	111
5.3.5.2	Zona de amenaza baja	112
5.3.6	Áreas en condición de riesgo y estructuras expuestas.....	112
5.3.6.1	Viviendas.....	114
5.3.6.1	Cancha para deporte	116
5.3.6.1	Cámara de agua, tubería y vía veredal	116
6.	LIMITACIONES DEL ESTUDIO	118
7.	CONCLUSIONES.....	119
8.	RECOMENDACIONES.....	122
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	125



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos y subtipos de procesos y sus características más importantes.....	14
Tabla 2 Insumos cartográficos	31
Tabla 3 Ocupación de cobertura de la tierra.....	66
Tabla 4 Inventario de movimientos en masa registrados en SIMMA para el municipio de Consacá	76
Tabla 5 Estaciones pluviométricas en el municipio de Consacá.....	79
Tabla 6 Inventario de MM obtenidos en el SIMMA del SGC	80
Tabla 7 Inventario de MM levantados en el presente estudio	81
Tabla 8 P24h desde el año 2000 al año 2021	83
Tabla 9 Cálculo del puntaje estándar Z.....	89
Tabla 10 Cálculo de RIC para la serie de datos de P24h	90
Tabla 11 Umbrales de lluvia para los MM objeto de análisis	92
Tabla 12 Umbrales definitivos para los MM objeto de análisis.....	94
Tabla 13 Número de excedencias de umbral multianual	97
Tabla 14 Clasificación de susceptibilidad de las Unidades Geológicas para Ingeniería.....	100
Tabla 15 Clasificación de susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos	102
Tabla 16 Clasificación de susceptibilidad por cobertura de la tierra.....	104
Tabla 17 Clasificación de susceptibilidad de acuerdo con la pendiente del terreno	105
Tabla 18 Escenarios de ponderación en la estimación de susceptibilidad a movimientos en masa	106
Tabla 19 Valoración de los diferentes escenarios de susceptibilidad a movimientos en masa	108



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Escala de la fotografía aérea	19
Figura 2 Altura absoluta de vuelo (Zafra, 2018).....	20
Figura 3 Representación de un MDS (DSM) y un MDT (DTM).....	21
Figura 4 Diagrama metodología zonificación por movimientos en masa.....	22
Figura 5 Localización área de estudio.....	23
Figura 6 Microcuencas dentro del área de estudio.....	31
Figura 7 Modelo de Elevación Digital	32
Figura 8 Levantamiento cartográfico con drone	33
Figura 9 Levantamiento Ortomosaico (Drone)	33
Figura 10 Segunda visita de campo al área de estudio.....	34
Figura 11 Puntos de recorrido en el área de estudio.....	34
Figura 12 Área de estudio definitiva.....	35
Figura 13 Geología regional en el área de estudio.....	38
Figura 14 Afloramiento de roca intermedia volcanoclastica.....	39
Figura 15 Afloramiento de roca intermedia volcanoclástica.....	39
Figura 16 Afloramiento de roca intermedia volcanoclástica.....	39
Figura 17 Afloramiento de suelo residual volcanoclástico	40
Figura 18 Afloramiento de suelo transportado volcanoclástico.....	41
Figura 19 Suelo transportado coluvial antiguo.....	41
Figura 20 Suelo transportado coluvial	43
Figura 21 Suelo transportado aluvial	44
Figura 22 Suelo antrópico.....	45
Figura 23 Mapa de unidades de geología para ingeniería identificadas en el área de estudio.....	45
Figura 24 Depósitos coluviales.....	46
Figura 25 Deslizamiento rotacional.....	47
Figura 26 Deslizamiento rotacional complejo.....	48
Figura 27 Deslizamiento traslacional.....	49
Figura 28 Cauce fluvial activo.....	49
Figura 29 Plano o llanura de inundación.....	50
Figura 30 Ladera erosiva.....	51
Figura 31 Ladera ondulada.....	51
Figura 32 Ladera escarpada.....	52



Figura 33 Cima explanada.....	52
Figura 34 Mapa de elementos geomorfológicos identificados en el área de estudio.....	53
Figura 35 Mapa de geología estructural.....	55
Figura 36 Cobertura cultivos permanentes herbáceos (Caña).....	56
Figura 37 Cobertura cultivos permanentes herbáceos (plátano), para sombrío en asocio con cultivo de café y especies frutales y maderables.....	56
Figura 38 Cobertura cultivos permanentes arbustivos (café), establecido en arreglos agroforestales.....	57
Figura 39 Cobertura Mosaico de cultivos (caña, café, frutales y transitorios).....	58
Figura 40 Cobertura de bosque denso abierto.....	58
Figura 41 Cobertura de cultivos Transitorios.....	59
Figura 42 Cobertura de bosque fragmentado con pastos y cultivos.....	60
Figura 43 Cobertura de pastos enmalezados.....	60
Figura 44 Cobertura de pastos limpios.....	61
Figura 45 Cobertura Red vial, ferroviaria y terrenos asociados. (vía secundaria).....	61
Figura 46 Cobertura de bosque secundario alto y bajo.....	63
Figura 47 Cobertura de deslizamiento identificado en la vía que comunica la vereda El Hatillo con La Planeta.....	63
Figura 48 Viviendas de concreto e infraestructura, sector rural.....	64
Figura 49 Cobertura ocupada por arreglos agroforestales.....	65
Figura 50 Mapa de coberturas de la tierra identificadas en la vereda El Hatillo, municipio de Consacá.....	65
Figura 51 Imagen satelital y ortofoto levantada con drone.....	69
Figura 52 Deslizamiento rotacional complejo.....	72
Figura 53 Deslizamientos traslacionales en ladera escarpada.....	73
Figura 54 Deslizamiento rotacional.....	74
Figura 55 Localización de movimientos en masa identificados en el área de estudio.....	75
Figura 56 Localización Movimientos en Masa - SIMMA.....	77
Figura 57 Metodología para determinación de probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia.....	78
Figura 58 Localización estaciones pluviométricas IDEAM.....	79
Figura 59 Precipitación mensual multianual.....	82
Figura 60 Precipitación máxima 24 horas multianual.....	83



Figura 61 Cálculo de lluvia para antecedente MM 1.	84
Figura 62 Cálculo de lluvia para antecedente MM 2.	85
Figura 63 Cálculo de lluvia para antecedente MM 3.	85
Figura 64 Cálculo de lluvia para antecedente MM 5.	86
Figura 65 Cálculo de lluvia para antecedente MM 6.	86
Figura 66 Cálculo de lluvia para antecedente MM 7.	86
Figura 67 Cálculo de lluvia para antecedente MM 8.	87
Figura 68 Cálculo de lluvia para antecedente MM 9.	87
Figura 69 Cálculo de lluvia para antecedente MM 10.	87
Figura 70 Cálculo de lluvia para antecedente MM 11.	88
Figura 71 P24h para diferentes registros de movimientos en masa	90
Figura 72 Funciones que representan los umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa	92
Figura 73 Umbrales de lluvia para los MM objeto de análisis.....	93
Figura 74 Umbrales de lluvia definitivos.....	94
Figura 75 Mapa de Susceptibilidad de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI)	101
Figura 76 Mapa de Susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos	103
Figura 77 Mapa de Susceptibilidad por cobertura de la tierra.....	104
Figura 78 Mapa de Susceptibilidad por pendiente del terreno	105
Figura 79 Mapas de resultados de escenarios de Susceptibilidad	107
Figura 80 Mapa Zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa.	110
Figura 81 Zonificación de amenaza por movimientos en masa	112
Figura 82 Mapa de estructuras expuestas identificadas en la zona de estudio.....	113
Figura 83 Mapa de áreas en condición de riesgo identificadas en la zona de estudio.....	114
Figura 84 Registro fotográfico que evidencia las afectaciones en las viviendas de la vereda La Planeta	116
Figura 85 Hundimiento y separación de baldosas en la cancha para deporte.	116
Figura 86 Cámara de agua en inadecuadas condiciones.	117
Figura 87 Deslizamiento rotacional complejo, donde se encontraba la vía que comunica a la vereda La Planeta con la vereda El Hatillo, se evidencia saturación del suelo y vertimientos directos a la ladera.	117
Figura 88 Vertimientos sobre la ladera y saturación del suelo.....	118



1. INTRODUCCIÓN

En el municipio de Consacá del departamento de Nariño, se han ocurrido frecuentes eventos de movimientos en masa, principalmente de tipo caída de rocas, rotacional y traslacional debido muy seguramente a sus condiciones geológicas y geomorfológicas influenciadas por agentes detonantes como las lluvias principalmente, afectando significativamente a los habitantes de la región.

Por lo anterior, CORPONARIÑO, priorizó dentro del marco de sus funciones legales y en cumplimiento a la visión y misión de la entidad, un estudio a escala 1:5000 en el cual se realice la zonificación de amenazas por los movimientos en masa presentados en la vereda El Hatillo del municipio de Consacá, con el objetivo principal de aportar conocimiento y herramientas para que el municipio tome las medidas preventivas necesarias partiendo de la integración en su ordenamiento territorial y ambiental en el marco de la gestión de riesgo de desastres. La zona de estudio se encuentra significativamente afectada en cuanto a fallas estructurales en las viviendas y múltiples procesos de remoción en masa que han afectado vías de circulación de gran importancia para la localidad.

De acuerdo a lo anterior, el presente documento presenta un análisis y zonificación del área de estudio tomando como referencia algunos aspectos metodológicos de las guías de zonificación de amenaza por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y teniendo en cuenta la normatividad vigente y aplicable, específicamente el decreto 1077 de 2015, permitiendo establecer los escenarios de susceptibilidad y las características de la zona de interés, con la finalidad de tener como resultado la zonificación de amenaza por movimientos en masa.



2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Realizar la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:5.000 en la vereda El Hatillo ubicada en el municipio de Consacá – Nariño.

2.2. Objetivos específicos

Efectuar el proceso de aprestamiento para el estudio de zonificación de amenaza por movimientos en masa en la zona de estudio.

Realizar el procesamiento y análisis de la información levantada en la etapa de aprestamiento.

Elaborar la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:5000 en la vereda El Hatillo del municipio de Consacá.



3. MARCO TEÓRICO

3.1. CONCEPTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO

Para el desarrollo de esta investigación es importante indagar sobre algunos conceptos fundamentales y aportes de autores, que permitan explicar y construir los temas de interés para este estudio. Se presentan algunas definiciones de riesgo y sus componentes, extraídas del libro guía metodológica para zonificación de avenidas torrenciales, guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala detallada, guía para zonificación de movimientos en masa a escala 1:25000 del Servicio Geológico Colombiano, y definiciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (por sus siglas en inglés IPCC) publicadas en el 2007 y 2014.

Riesgo de desastres. Daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un periodo de tiempo específico (SGC 2021).

Amenaza. Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para ocasionar 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 (SGC 2021).

Vulnerabilidad. Se comprende la vulnerabilidad como la relación con la sensibilidad, frente a un daño de un sistema (infraestructura, personas etc.) y la falta de capacidad de respuesta y adaptación. (IPCC, 2014).

Exposición. De acuerdo con el IPCC (2014) la exposición se refiere a *“la presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente”*.



Susceptibilidad. Posibilidad que tiene un área a presentar un evento peligroso (SGC 2021).

3.2. MOVIMIENTOS EN MASA

Los movimientos en masa son desplazamientos del terreno a favor de la pendiente que se generan por acción de la fuerza de gravedad, bajo la influencia de ciertos factores como son el agua, los eventos sísmicos, la aplicación de carga excesiva, las excavaciones para la adecuación de viviendas o la apertura de senderos y vías, entre otros (Alcaldía, 2017). El SGC clasifica los movimientos en masa conforme a la Guía para la Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA), adoptada por Colombia (PMA: GCA, 2007), en la que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (SGC 2017).

Según el SGC, los factores y causas de los movimientos en masa se pueden considerar como factores inherentes (estado original) y factores modificadores. Los Factores inherentes se relacionan con la naturaleza de los materiales, con el complemento de la cobertura natural y la presencia de agua: Tipo de materiales (rocas, suelos) y su origen, condición de los materiales (ejemplos, estado de fracturamiento, grado de descomposición, consistencia), actitud estructural (discontinuidades estructurales con influencia regional o local), presencia de agua (patrón de flujo y distribución), presencia de coberturas vegetales. La interacción de estos factores constituye la causa real de la inestabilidad, es decir, el conjunto de factores que definen la posibilidad de falla. Se expresan como unidades de relieve más o menos susceptibles a la falla. En cuanto a los factores modificadores del estado inicial, naturales o antrópicos, se dan debido a los cambios en el entorno por acciones completamente naturales o por actividades humanas, estas últimas susceptibles de cambio por el hombre (SGC & MINMINAS, 2017).

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano, se consideran cinco tipos de movimientos en masa de más frecuencia de ocurrencia: caídas, volcamientos, deslizamientos,



flujo y reptación. Se tienen en cuenta, además, los movimientos complejos, que son resultado de la combinación cinemática de los movimientos básicos. (SGC & MINMINAS, 2017).

Tabla 1 Tipos y subtipos de procesos y sus características más importantes

Tipo	Mecanismo	Material desplazado	Subtipo
Caídas,	Desprendimiento de material que se desplaza por el aire, brinca o rueda.	Rocas, Suelos	<ul style="list-style-type: none"> • Caída de rocas y suelos • Rodamiento de bloques • Torrentes de bloques
Volcamientos	Masas que rotan en un punto sin desprenderse.	Rocas, detritos	<ul style="list-style-type: none"> • Único o múltiple de conjunto de bloques de roca. • De bloques individuales liberados por tensión. • De detritos.
Deslizamientos	La masa se desplaza sobre una superficie de falla por cortante sin desintegrarse apreciablemente	Rocas, Suelos	<ul style="list-style-type: none"> • Rotacional (hundimiento) • Rotacional retrogresivo • múltiple Traslacional • planar Traslacional en cuna • Compuesto
Flujos, avalanchas y deslizamientos por flujo	La masa se mueve grandes distancias la mayor parte del trayecto en forma viscosa	Rocas, detritos, tierras, Lodos, turba	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos de detritos (lahares y avenidas • torrenciales) Flujos de tierras, Flujos de lodo, Avalanchas de detritos, Deslizamiento por flujos de material



Tipo	Mecanismo	Material desplazado	Subtipo
			<ul style="list-style-type: none"> granular-licuación (Flow slide) Deslizamiento por flujo de arcilla sensitiva (Clay-flow slide)
Creep (Reptación)	La masa se deforma muy lentamente sin fallar.	Rocas, suelos, talud	<ul style="list-style-type: none"> Creep superficial Creep profundo Solifluxión y Gelifluxión (flujo)

3.3. CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS CORINE LAND COVER

Dentro del programa CORINE (Coordination of information on the environment) promovido por la Comisión de la Comunidad Europea fue desarrollado el proyecto de cobertura de la tierra “CORINE Land Cover” 1990 (CLC 1990), el cual definió una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra, apoyando su papel como estándar 18 para la generación de información sobre dinámicas de coberturas y cambios en el uso del suelo. En el caso colombiano, desde 2005, el país ha consolidado una adaptación metodológica de este estándar europeo para fortalecer la capacidad nacional de identificar las dinámicas de las coberturas de la tierra como aporte a la planificación del territorio (IDEAM, 2010). La base de datos de CORINE Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite, para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas.

3.4. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es la ciencia que trata de la descripción y el estudio de la génesis, clasificación, procesos y evolución de las formas antiguas y actuales del terreno (tanto terrestres como submarinas) y su relación con las estructuras infrayacentes. Esta ciencia está enfocada al análisis de la superficie de la tierra en donde interactúan la litósfera, la hidrósfera,



la atmósfera y la biosfera. Igualmente, las geoformas por definición son la expresión superficial del terreno, de la interacción dependiente de los materiales constituyentes de las mismas y su disposición estructural, de los procesos geomórficos que interactúan según el ambiente morfogenético específico donde se desarrollan, y el tiempo de duración de la acción de los mencionados procesos (Carvajal, 2012).

Los procesos geomorfológicos son dinámicos y corresponden a todos los cambios que ha sufrido la tierra desde sus comienzos, tanto aquellos originados en su interior (geodinámica interna, o procesos endogenéticos), como los generados en su superficie por la interacción con la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera (geodinámica externa, o procesos exógenos). Los procesos exógenos determinan los cambios de la superficie terrestre que contribuyen al remodelado y reducción de los relieves primarios por la acción aislada o combinada de la meteorización física o química de las rocas, la erosión y transporte de los materiales resultantes y de los fenómenos de remoción en masa. Estos procesos que destruyen o modifican las geoformas iniciales, son a la vez constructores de rocas, la erosión y transporte de los materiales resultantes y de los fenómenos de remoción en masa. Estos procesos que destruyen o modifican las geoformas iniciales, son a la vez constructores de nuevas formas del terreno mediante la sedimentación o depositación de los materiales transportados, estableciendo un equilibrio entre denudación - acumulación, cuya estabilidad depende de la resistencia, tipo de roca o sedimento, la acción y tiempo de duración de los agentes meteóricos propios de las condiciones climáticas prevalecientes (Carvajal, 2012).

3.5. MORFODINÁMICA

Según la guía para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala detallada (SGC, 2016), se debe establecer aquellos movimientos en masa que afectan o afectaron a la zona de estudio. De esta manera, se consolida el catálogo histórico municipal de procesos de inestabilidad o se hace un registro de los movimientos en masa actuales a partir de la información levantada en campo y con el uso de imágenes de sensores remotos de resolución adecuada.



De acuerdo con lo anterior, se debe determinar los procesos morfodinámicos, que corresponden a una serie de acciones sucesivas y/o simultáneas y sinérgicas a través de las cuales los agentes morfogenéticos, principalmente los externos, son capaces de modelar las formas de la superficie terrestre. Los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la erosión de las rocas, el transporte de los materiales removidos y la sedimentación de dichos detritos. En consecuencia, los procesos morfodinámicos dependen de una serie de factores externos relacionados con la energía del agente morfogenético, la posición geomorfológica, así mismo, la incidencia de factores internos tales como la composición mineralógica de las rocas, su textura y grado de cohesión.

Para identificar dichos procesos morfodinámicos se lo debe hacer en términos de sus factores causales (condicionantes y detonantes), distribución espacial y frecuencia de ocurrencia, esto con base a lo establecido en la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimiento en masa a escala 1:25.000 (SGC, 2017).

3.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Debido a la necesidad de integrar el conocimiento técnico de manera interdisciplinaria, los Sistemas de Información Geográfica – SIG, son una herramienta idónea que permite utilizar información variada de distintas fuentes, y que, a su vez, facilita el análisis simultáneo de un mismo problema, en este sentido, los SIG suelen aplicarse a sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales, constituyéndose en una herramienta para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales (Díaz & Mercado, 2017).

Para Olaya (2014), *“un SIG es un elemento que permite analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre”*, teniendo en cuenta lo anterior, es importante entender que los SIG han sido una herramientas que tiene como objetivo la visualización de la superficie terrestre a diferentes escalas permitiendo de esta manera la identificación de las problemáticas socio-espaciales, es la conjunción de representación del espacio geográfico, la unión de componentes de base de datos alfanuméricos y base de datos gráficas Buzai G. (2013).



Según Sarría (2006), quien menciona que los Sistemas de Información Geográfica se definen como: “*sistemas que permiten almacenar datos espaciales para su consulta, manipulación y representación de datos espaciales en el campo de estudio*”. De esta manera, se puede dar un acercamiento frente a los SIG como: la unión de información digital y herramientas informáticas que ayudan y facilitan el análisis de datos georreferenciados (incluyen ubicación y una proyección), algunas características importantes de los SIG son: Capacidad de gran almacenamiento, agilización en consultas, selecciones y la interrelación que se maneja entre diferentes disciplinas y profesionales.

Un Drone o RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) corresponde a una aeronave no tripulada la cual ejerce su función de forma remota. Los Drones son utilizados en diferentes áreas del conocimiento como la geología, hidrología, topografía, cartografía etc. Gracias a la facilidad de recolección de información óptica y otras funciones similares a las de un radar, los drones proporcionan de una forma rápida y económica información georreferenciada como Ortofotos y Modelos de Elevación Digital.

Entre los drones comerciales más reconocidos en Colombia se encuentra el Phantom 4 pro, el cual presenta características técnicas que lo hacen un equipo fácil de adquirir y manejar. La información recolectada por este tipo de drones permite capturar imágenes ópticas y de esta manera la elaboración de Modelos de Elevación digital de superficie y posteriores Modelos de Elevación digital del terreno.

De acuerdo con la escala del estudio espacial de la información que se quiere levantar con un dron, es necesario determinar la altura de vuelo sobre el terreno (Z) y la altura absoluta de vuelo (Z_0). La altura de vuelo hace relación a la distancia entre un punto del terreno y un plano horizontal que atraviesa por el eje central de proyección, este se mide de dicho plano hacia abajo, en este orden de ideas podemos definir la fórmula con la que se precisó el vuelo (Figura 1):

Por definición es preciso conocer la fórmula de escala, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{1}{E} = \frac{df}{DT} \quad Ec. 1$$

En donde:

E = Escala del producto esperado (fotografía)

Df = distancia medida en la fotografía

Dt = la misma distancia medida en el terreno

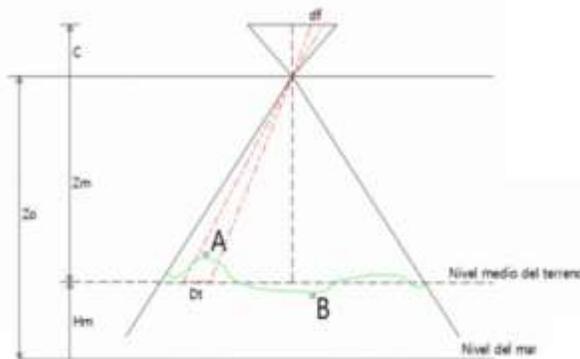


Figura 1 Escala de la fotografía aérea

Con referencia en la anterior figura, se tiene lo siguiente ecuación:

$$\frac{df}{DT} = \frac{c}{z} \quad Ec. 2$$

Igualando las anteriores ecuaciones:

$$\frac{1}{E} = \frac{c}{z} \quad Ec. 3$$

Por lo tanto:

$$Zm = c * Em \quad Ec. 4$$

En donde:

Z_m = Altura media de vuelo

E_m = Escala de la imagen

En cuanto a la altura absoluta de vuelo, consiste en la altura de vuelo teniendo en cuenta la elevación del terreno a levantar (Figura 2).

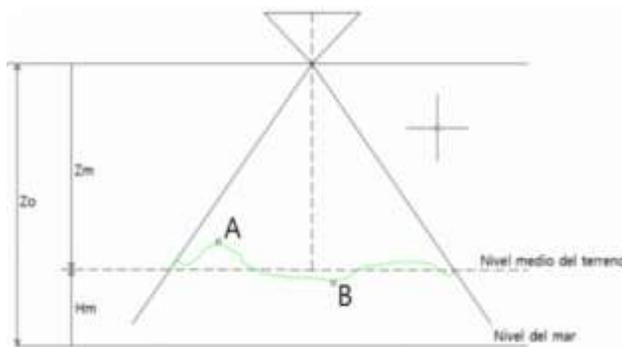


Figura 2 Altura absoluta de vuelo (Zafra, 2018)

3.7. SENSORES REMOTOS Y TELEDETECCIÓN

Según López (2020), en su libro Fundamentos para la teledetección, menciona que: *“La teledetección o percepción remota (‘Remote Sensing’) es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y atmosféricos”*, es así como sus bases para la adquisición de información se remiten directamente a imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales. Por lo cual, es importante resaltar que la teledetección adquiere la información a una determinada distancia, sin que se tenga contacto directo con el objeto estudiado.

Los sensores remotos para la teledetección, particularmente aquellos ubicados sobre satélites, otorgan una percepción importante de la Tierra en un espacio y lugar determinado, capturando datos relevantes para identificar diferentes variables y componentes de ciencias

como: geología y geomorfología, hidrología, coberturas de la tierra, la respectiva morfodinámica que se presenta en el transcurso del tiempo, Siendo así, para el estudio permitir la monitorización y análisis del efecto de las actividades humanas sobre la misma como puede ser crecimiento urbano, deforestación, adquisición y demanda de recursos naturales, mapeado, topografía, entre otros.

3.8. MODELO DIGITAL DEL TERRENO Y DE SUPERFICIE

El Modelo Digital de Superficie (MDS) es una representación numérica de la elevación de la superficie de la tierra en la que se incluyen otros cuerpos como coberturas, casas entre otro tipo de objetos. Por otro lado, el Modelo Digital del Terreno (MDT) se refiere a la representación numérica de una superficie topográfica medida en unidades de metros sobre el nivel del mar (SGC, 2013) (Figura 3).

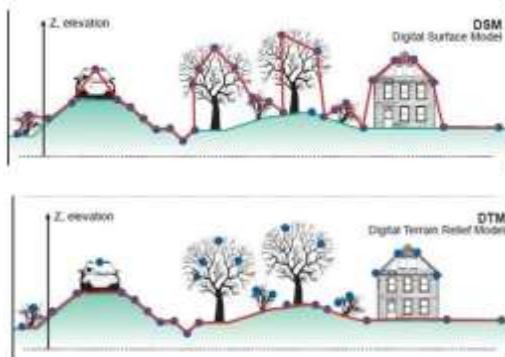


Figura 3 Representación de un MDS (DSM) y un MDT (DTM)

Los métodos para la generación de los modelos digitales de elevación se dividen en: métodos directos (levantamiento topográfico con estación total o con GPS, altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o láser) y métodos indirectos (curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión automática, restructuración fotogramétrica, analítica y digital) (SGC, 2013).

4. METODOLOGÍA

La metodología que se describe a continuación se basó en las guías de zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala detallada y escala básica del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Se presenta el diagrama metodológico, en el cual se describen los procesos desarrollados para la zonificación de amenaza por movimientos en masa en el área objeto de estudio.

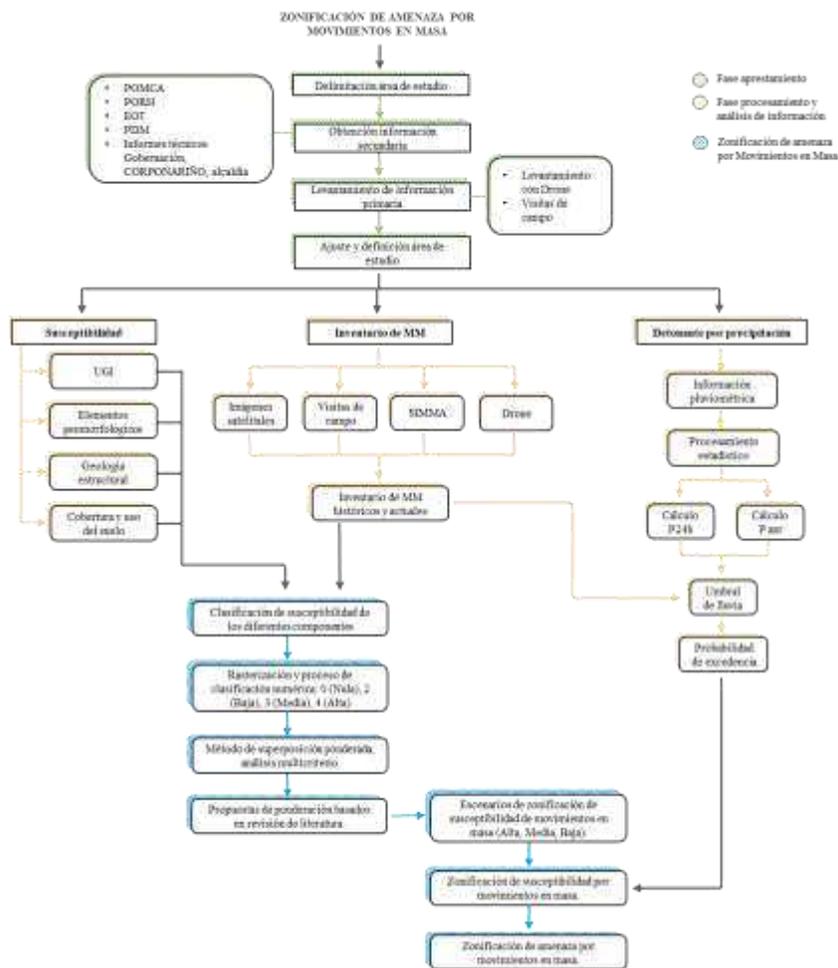


Figura 4 Diagrama metodología zonificación por movimientos en masa

4.1.FASE APRESTAMIENTO

4.1.1. Delimitación área de estudio

El Municipio de Consacá se encuentra Ubicado en la parte central del Departamento de Nariño, entre las coordenadas: 1° 12' 15" de latitud norte y a 3° 24' 18" de longitud oeste del meridiano de Greenwich; extendiéndose por el norte hasta la quebrada Honda, al sur hasta la quebrada Zaragoza, al oriente hasta el Volcán Galeras y al occidente hasta el Río Guáitara, para una extensión aproximada de 132,19 Km² que representa el 0,4% del total de la extensión del Departamento de Nariño. La cabecera municipal se encuentra a 52 km de la capital del Departamento de Nariño. El estudio de zonificación de amenaza por deslizamientos se realizó en el municipio de Consacá – Nariño, específicamente en el sector de la vereda El Hatillo.

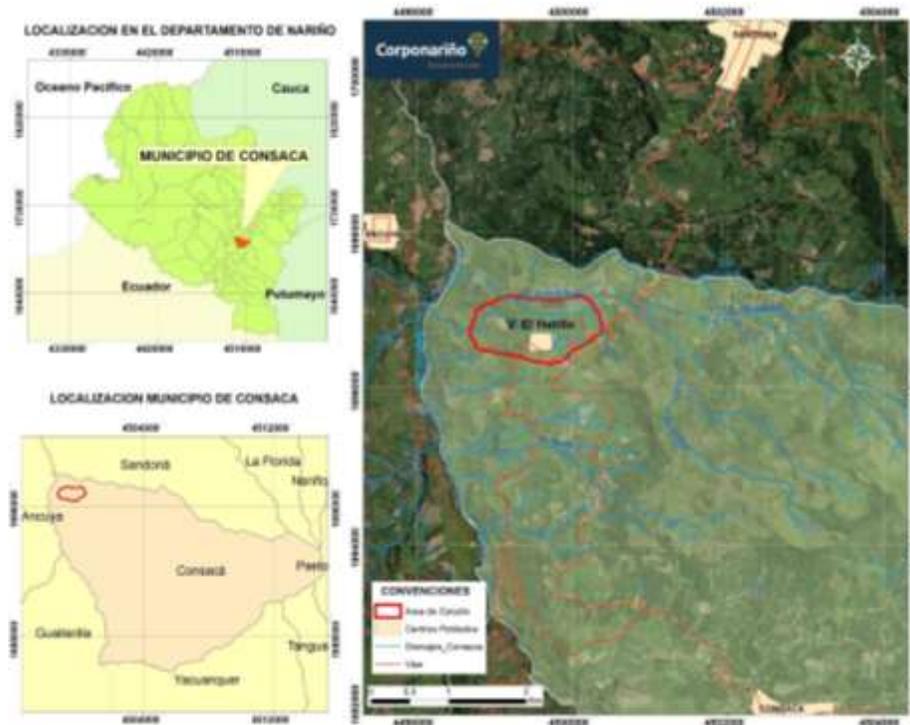


Figura 5 Localización área de estudio



4.1.2. Información secundaria

4.1.2.1. Información cartográfica actual de la zona de estudio

La información del Modelo de Elevación Digital (DEM) con resolución de 5 metros y la cartografía base se obtuvo del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca del río Guáitara y el IGAC.

4.1.2.2. Informes técnicos y estudios locales

Se adquirió información de estudios como el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Guáitara llevado a cabo por CORPONARIÑO e informes técnicos elaborados por la Dirección Administrativa de Gestión de Riesgo de Desastres DAGRD, CORPONARIÑO y la Alcaldía de Consacá.

4.1.3. Información primaria

4.1.3.1. Información recolectada en visitas de campo

Se realizó una visita inicial a la vereda El Hatillo del municipio de Consacá donde se realizó un recorrido de inspección ocular para la identificación de movimientos en masa, además, caracterizar aspectos geológicos, geomorfológicos, morfométricos e hidrológicos de la zona. Los movimientos en masa identificados se georreferenciaron y se describieron acorde al criterio profesional.

Durante el recorrido realizado al área de estudio, se logró observar varias viviendas del sector en inadecuado estado estructural, con fisuras significativas a nivel del techo, paredes y piso.

4.1.3.2. Levantamiento cartográfico (Drone)

Se realizó un sobrevuelo con equipo Drone en gran parte del área de interés con el fin de levantar información de altimetría y foto mosaico.

4.1.4. Área de estudio definitiva



Una vez obtenida y analizada la información de levantamiento con dron en cuanto a modelo de elevación digital, y, por otra parte, la información recolectada en campo, se definió el área objeto de este estudio para la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

4.2.FASE DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

4.2.1. Estimación de susceptibilidad por movimientos en masa

En cuanto a la estimación de susceptibilidad por movimientos en masa, se tiene lo siguiente:

4.2.1.1. Unidades de Geología para Ingeniería

De acuerdo con la guía metodológica para elaboración de mapas de geología para ingeniería del Servicio Geológico Colombiano “(...)un mapa de geología para ingeniería es un tipo de mapa geológico que muestra información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y los suelos, el agua subterránea, las características del relieve y los procesos geodinámicos actuales, que son considerados los componentes básicos del ambiente geológico, de suma importancia en estudios de geología aplicada a la ingeniería(...)”.

A partir de las UGI se podrán realizar los mapas de geología para ingeniería, que son el insumo más importante desde el punto de vista de homogeneización de las características ingenieriles de los materiales del área de estudio. Las UGI permiten diferenciar tres aspectos fundamentales para obtener los modelos que permitan realizar los análisis de estabilidad: 1) diferenciar los materiales aflorantes entre suelos y rocas, 2) definir los espesores de suelo o las características estructurales del macizo rocoso, y 3) caracterizar los materiales de acuerdo con sus propiedades mecánicas (SGC 2016).

Las etapas básicas para la generación de esta cartografía en el presente estudio son la recopilación de información secundaria relacionada, la definición del marco geológico y estructural regional, la delimitación y caracterización de las unidades, así como la elaboración del mapa a partir de las unidades identificadas en campo y el modelo digital de elevación.



4.2.1.2.Elementos geomorfológicos

Teniendo en cuenta el objetivo del presente estudio, se requiere un mapa geomorfológico detallado en lo referente a elementos geomorfológicos del área de interés, los cuales se consideran un insumo primordial para la homogeneización de las unidades con características de comportamiento geomecánico similar, junto con el mapa de geología para ingeniería.

El elemento geomorfológico corresponde al máximo nivel de detalle de una unidad geomorfológica, definida por los rasgos de relieve, por la morfometría detallada del terreno y por los microrelieves asociados con una característica litológica, con base en análisis detallados (Carvajal, 2012). Para la construcción del mapa de elementos geomorfológicos de la zona de estudio a escala 1:5.000, se toma como referencia la Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica de Colombia (Carvajal, 2011) y la Guía metodológica del SGC 2016, cuyos aspectos más relevantes se describirán brevemente en este documento.

Las etapas básicas generales que se plantean para la generación de esta cartografía temática se centran en identificar y caracterizar las geoformas desde los siguientes puntos de vista: morfogénesis, morfología, morfometría y morfodinámica, de igual forma, se realizan actividades preliminares como recopilación, análisis de la información secundaria y el reconocimiento preliminar en campo, con lo cual, se busca familiarizarse con las geoformas y el ambiente geomorfológico presentes en el área de estudio. Posteriormente, se procede a realizar el procesamiento e interpretación de la información obtenida en campo, utilizando como insumos básicos, imágenes satelitales, DEM de resolución 5m, curvas de nivel, mapa de sombras, mapa de pendientes y geomorfología escala 1:25.000. Como resultado de esta interpretación, se obtiene el mapa de elementos geomorfológicos de la zona de estudio a escala 1:5.000.

4.2.1.3.Geología estructural



Una estructura geológica es una configuración geométrica de rocas, y la geología estructural se ocupa de la geometría, distribución y formación de estructuras (Foseen, 2010). Teniendo en cuenta lo anterior, y que en el área de interés se encuentran fallas que han influido significativamente en la geología y geomorfología de los municipios de Ancuyá, Sandoná y Consacá, pero que a pesar de ello las zonas de falla en mención se encuentran distantes de la zona de estudio, se considera que, para el presente informe, no representan una influencia directa o significativa para que se generen movimientos en masa producto de eventos sísmicos. Es por ello por lo que, la geología estructural no será tomada en cuenta para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa, sin embargo, se realiza la cartografía y descripción de las fallas más cercanas.

4.2.1.4. Cobertura de la tierra CLC

A partir de la “*Leyenda Nacional de Coberturas de la tierra, Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia escala 1: 100.000*” se establecieron los criterios para levantar la capa de coberturas de la tierra a escala 1:25.000. Se utilizó información secundaria como imágenes satelitales Esri, Bing Satélite y Google Satélite. Se realizaron diferentes vuelos de Drone para generar una ortofoto georreferenciada del sector aferente, junto con un recorrido de campo de toda el área de estudio con el fin de ajustar la capa de coberturas. Se utilizó la aplicación Avenza maps para recolectar y georreferenciar las diferentes estructuras y coberturas que sirvieron para ajustar la capa vectorial.

Posteriormente en oficina, se trabajó con un software SIG para el procesamiento y ajuste de la capa de cobertura de la tierra utilizando la clasificación Corine Land Cover.

4.2.2. Inventario de Movimientos en Masa

A continuación, se expone las metodologías a seguir de acuerdo con la temática:

4.2.2.1. Imágenes satelitales

Se tomó como referencia imágenes satelitales obtenidas de Google Satélite, Esri Satélite y Bing Satélite, lo cual permitió realizar un análisis del área de interés y definir de forma



preliminar la zona de estudio, posteriormente dicha información se complementa con un vuelo con drone, una ortofoto y reconocimiento en campo.

4.2.2.2. Visitas de campo para identificación de MM

Se realizaron 2 visitas de campo a la vereda El Hatillo del municipio de Consacá por parte del equipo técnico de CORPONARIÑO, con el fin de identificar movimientos en masa activos e inactivos. Para ello se tuvo en cuenta la información obtenida a partir de imágenes satelitales, el levantamiento con drone y del SIMMA. De cada movimiento identificado, se tomaron las respectivas coordenadas, se realizó una descripción del evento y se complementa con registro fotográfico.

4.2.2.3. Catálogo e inventario de Movimientos en Masa (MM) del SIMMA – SGC

Para el desarrollo de este apartado se tomó como referencia la información reportada en la plataforma SIMMA del Servicio Geológico Colombiano, en la cual se registran los datos y características más relevantes de los movimientos en masa ocurridos en el municipio de Consacá y los más cercanos al área de estudio.

4.2.2.4. Levantamiento con drone y ortofoto

A partir de un vuelo realizado con Drone, se obtuvo una ortofoto de un sector de la microcuenca donde se definió la zona de estudio, dicha información fue fundamental para la identificación de movimientos en masa presentes en el área de interés, lo cual se complementa con reconocimiento en campo.

4.2.3. Detonante por precipitación

El detonante por precipitación se analizó acorde a la guía técnica de zonificación por movimientos en masa a escala 1:25000, para lo cual se utilizó la información del día de



detonación de los movimientos en masa y datos hidrometeorológicos para establecer la precipitación antecedente.

4.2.4. Detonante por sismos

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 (SGC, 2017). Teniendo en cuenta lo anterior y a pesar de los esfuerzos recientes de entidades como el Servicio Geológico Colombiano para cubrir un amplio espectro de escenarios de análisis que incluyan la distribución, magnitud-frecuencia y área total afectada por la ocurrencia de movimientos en masa a nivel nacional, para el presente estudio aún se requieren de mayor investigación y análisis para dar una respuesta certera acerca de la influencia del detonante por sismo en la ocurrencia de movimientos en masa en la zona de estudio.

4.3. FASE ZONIFICACIÓN

4.3.1. Zonificación de susceptibilidad

En base a revisión literaria se han establecido tres (3) clasificaciones de susceptibilidad de la siguiente manera: susceptibilidad alta, media y baja para cada componente objeto de análisis.

4.3.2. Propuestas de ponderación de factores basadas en revisión de literatura

Posterior a la clasificación de susceptibilidad de forma específica, es necesario realizar una clasificación general, para lo cual a cada componente se le dieron diferentes pesos de importancia. Para reducir la incertidumbre y seleccionar la distribución porcentual más acertada fue necesario establecer diferentes escenarios de ponderación basados en la revisión de literatura.



4.3.3. Generación de escenarios de susceptibilidad

Las operaciones ráster se realizaron en un software SIG, variando los diferentes ponderados y generando las salidas gráficas para su facilidad de comparación.

4.3.4. Zonificación de Susceptibilidad general

Los diferentes escenarios de susceptibilidad resultantes fueron contrastados con el inventario de movimientos en masa, de tal forma que se logró establecer el escenario que representaba mejor la distribución de los movimientos en masa, utilizando un porcentaje de acierto.

4.3.5. Zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa

Finalmente, la amenaza relativa consiste en el mapa final de susceptibilidad con los atributos del umbral de lluvia de detonación y con el contraste del mapa de morfodinámica.

5. RESULTADOS

5.1.FASE APRESTAMIENTO

De la fase de aprestamiento se obtuvieron los siguientes resultados:

5.1.1. Delimitación área de estudio

A partir de un modelo de elevación digital de resolución 5 metros de la zona se procedió a determinar la hidrografía, en donde se delimitaron las cuencas aferentes que cubren parte del área de estudio en general de El Hatillo. Se lograron identificar dos microcuencas que hacen parte del área de estudio tal como se observa en la Figura 6, la microcuenca en color verde corresponde a la quebrada Guandimbas y la segunda de una quebrada sin nombre identificado.

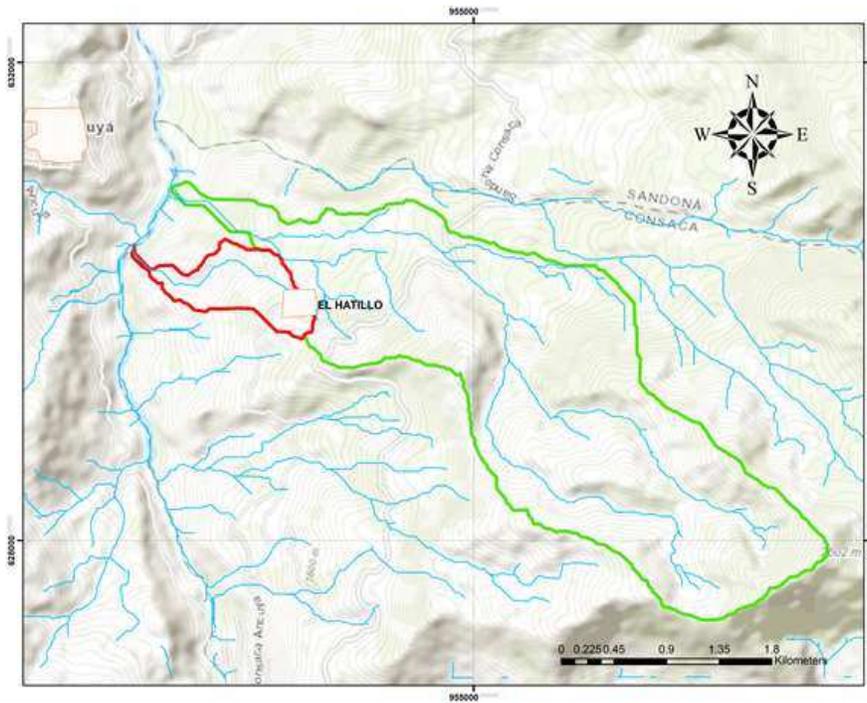


Figura 6 Microcuencas dentro del área de estudio

5.1.2. Información secundaria

A partir de la revisión de los diferentes portales geográficos se recolectó y utilizó la siguiente información cartográfica (Tabla 2). En la Figura 7 se muestra el modelo de elevación digital de 5 metros utilizado en la zona de estudio.

Tabla 2 Insumos cartográficos

No.	Insumos	Descripción	Origen
1	Información base	POMCA Río Guáitara	CORPONARIÑO
2	Geología regional	Geología regional plancha 429 Pasto	INGEOMINAS

3	DEM 5m	Modelo de Elevación Digital de 5 metros	IGAC
4	Imágenes satelitales	Google Satélite, Esri Satélite y Bing Satélite	QGIS

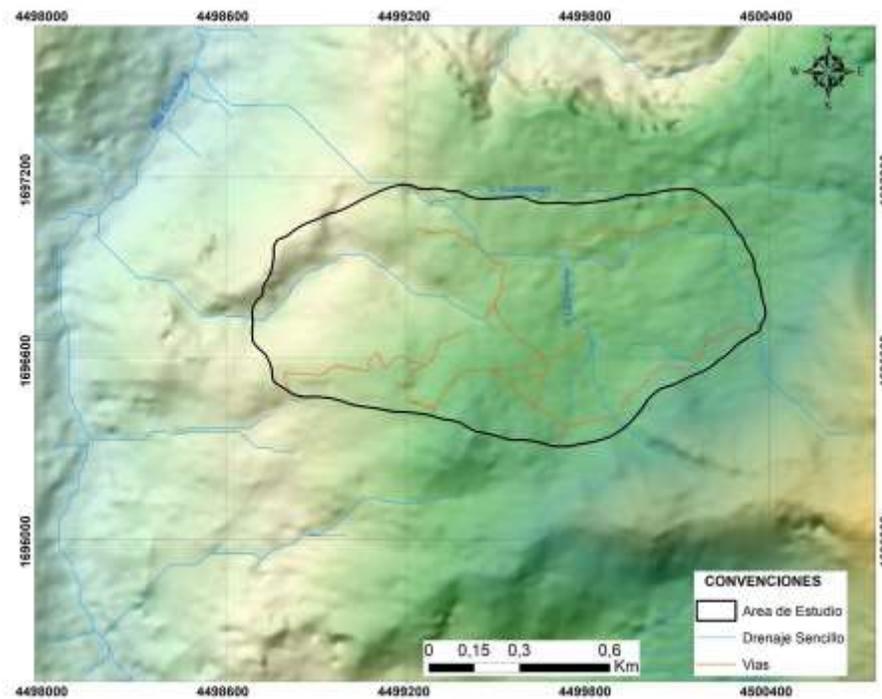


Figura 7 Modelo de Elevación Digital

5.1.3. Información primaria

5.1.3.1. Información recolectada en visitas de campo y levantamiento con drone

En una primera visita se recorrió gran parte del área objeto de estudio en el municipio de Consacá vereda El Hatillo, con el fin de evidenciar y registrar todos los eventos posibles de movimientos en masa al igual que diferentes agentes potenciales de origen antrópico que pudieron incidir en la detonación de dichos eventos.

Con el apoyo de la alcaldía de Consacá se realizó el levantamiento de cartografía con drone en un área priorizada acorde a las capacidades de la máquina para cubrir en lo posible todas las zonas requeridas para el análisis. Se obtuvo los resultados una imagen de ortomosaico del área de estudio además de información de altimetría o modelo de elevación digital con una resolución de 3 metros y curvas de nivel.



Figura 8 Levantamiento cartográfico con drone



Figura 9 Levantamiento Ortomosaico (Drone)

La segunda visita de campo se realizó con la finalidad de recorrer toda el área de estudio, complementar la información obtenida anteriormente, capturar información fotogramétrica de coberturas de la tierra y de deslizamientos identificados en la ortofoto.



Figura 10 Segunda visita de campo al área de estudio

En la figura 11, se exponen algunos puntos de interés, los cuales muestran el recorrido general que se realizó por el área de estudio usando la aplicación Avenza Maps. En los recorridos también se trató de captar información de la comunidad referente a los diferentes eventos amenazantes que se presentaron en la zona de interés, con el fin de complementar y entender mejor el contexto de lo acontecido en lugar de estudio.

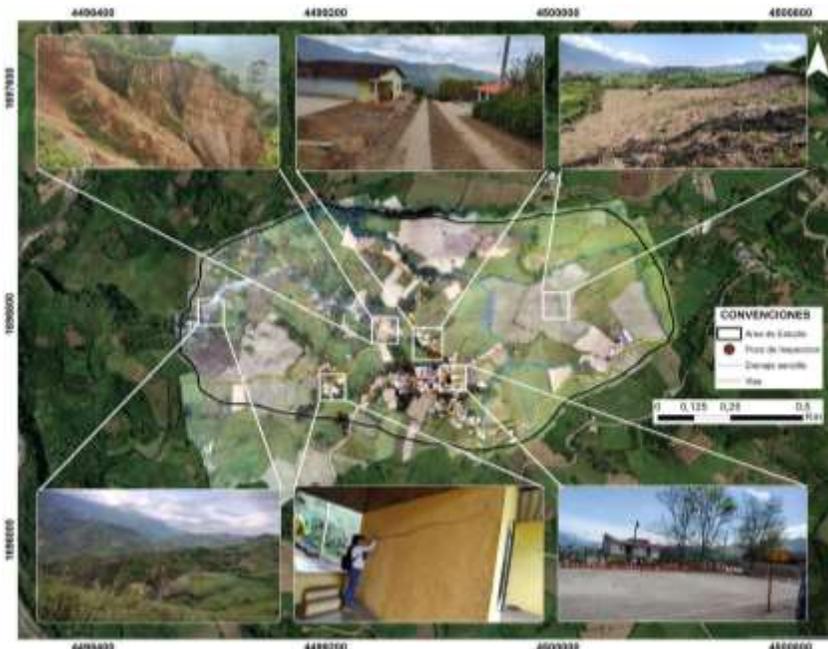


Figura 11 Puntos de recorrido en el área de estudio

5.1.4. Ajuste y definición de área de estudio

Teniendo en cuenta la disponibilidad de información levantada en campo con drone y lo observado en imágenes satelitales de Google Earth, se procede a la delimitación del área definitiva de estudio.

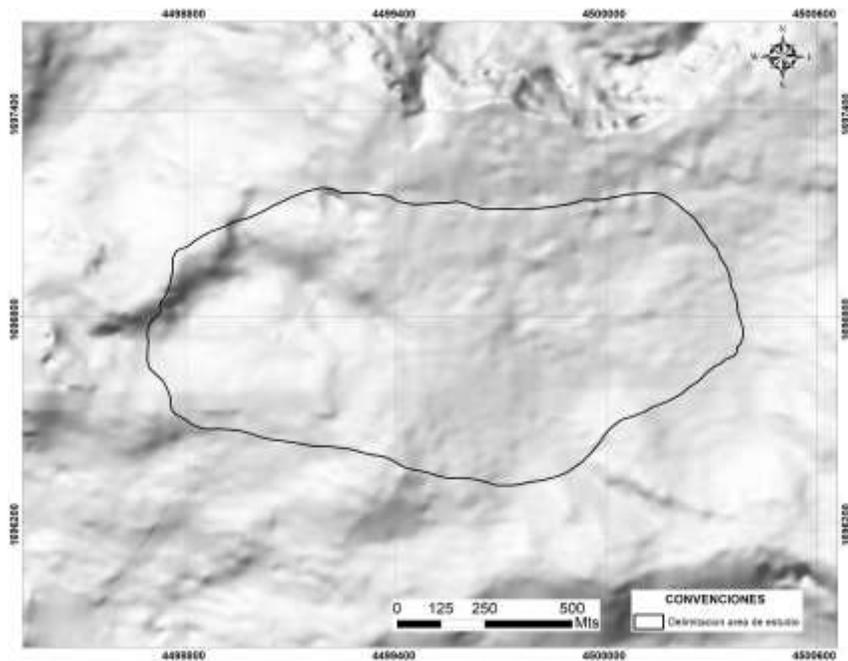


Figura 12 Área de estudio definitiva

5.2.FASE DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

5.2.1. Estimación de susceptibilidad por movimientos en masa

5.2.1.1. Geología regional

Para describir la geología de la zona de estudio en el municipio de Consacá, se tomó como referencia la información de la plancha y memoria explicativa 429 Pasto a escala 1:100.000



de Ingeominas, 1991. A continuación, se relacionan las unidades geológicas presentes en el área de interés:

- **Lahares y piroclastos (TQvp):** Estos depósitos aparecen en el área de Sandoná y Olaya Herrera, asociados a la actividad del volcán Galeras. La unidad está conformada por varios depósitos de lahares intercalados y separados por caídas de ceniza, no diferenciables a la escala trabajada, predominando los lahares.
- **Lavas (TQvl):** Afloran especialmente en el área del Complejo Volcánico del Galeras; se trata principalmente de flujos masivos de forma tabular y algunos escoriáceos, lavas aa' y lavas en bloques; generalmente se hallan intercalados con otros materiales volcánicos; son rocas porfíricas, con fenocristales que rara vez sobrepasan los 2 mm en su mayor diámetro y que presentan evidentes texturas de flujo. Son principalmente andesitas de dos piroxenos y plagioclasa cálcica y dacitas con anfíbol y plagioclasa sódica; además pueden presentar cuarzo microcristalino, olivino y biotita como accesorio o xenocristales; el vidrio se presenta en la matriz y/o rellenando vesículas en proporciones variables. Se ubican de preferencia en los campos 9*, 10* y 4* del Doble – Triángulo y Streckeisen (1972), correspondiendo a cuarzo – latandesitas, cuarzo-andesitas y dacitas.
- **Lavas y Cenizas (TQvlc):** Se presentan algunos eventos de deslizamientos rotacionales, traslacionales planares y reptación de suelos asociados a esta unidad geológica. Se observaron varios factores que incrementan la susceptibilidad a presentar eventos de movimientos en masa, los cuales están asociados principalmente a abundantes precipitaciones, así como a la baja compactación de la unidad, la orientación desfavorable de las discontinuidades en el saprolito, y la elevada pendiente de las laderas en esta zona.
- **Rocas ígneas hipoabisales (Th):** Pequeños stocks, los cuales raras veces sobrepasan los 5 km² de área. El emplazamiento de las rocas hipoabisales presenta un claro control tectónico relacionado con fallas pertenecientes al Sistema Romeral y Cauca: Los stocks



aprovecharon las líneas de debilidad para ascender a la superficie, posteriores reactivaciones han fallado algunas de las rocas hipoabisales.

- **Formación Esmita (TMe):** Pertenece a lo que Grosse (1935) denominó Medioterciario del Patía; la parte aflorante entre El Limonal y Ancuyá fue denominada por Hubach (1954) como Formación Limonal. La Formación Esmita, en el sentido de León *et al.* (1973), está representada en el área, principalmente por la alternancia de limolitas violáceas, areniscas conglomeráticas que gradan a conglomerados polimícticos, grawacas, y en menor proporción por areniscas cuarzo-feldespáticas y limolitas grises. Son comunes la gradación normal, la estratificación cruzada, la estratificación lenticular y los calcos de carga que indican que la secuencia se halla en posición normal. Las limolitas tienen mala selección y se componen de fragmentos líticos, calcita, cuarzo y calcedonia. Las areniscas conglomeráticas son de grano medio a grueso, los clastos son subredondeados y subelongados y se componen de diabasas, basaltos, chert, limolitas, pórfidos, cuarzo, micas y plagioclasa como principales; calcita, óxidos de hierro, magnetita, ilmenita y circón, como accesorios.
- **Depósitos aluviales (Qal):** Consisten en pequeñas barras aluviales, compuestas por guijarros, clastos y bloques organizados e imbricados, lo que indica condiciones aluviales sin crecientes excepcionales. Algunas de ellas están colonizadas por vegetación y se localizan a menos de un metro por encima del nivel del agua. Se componen principalmente de gravas, arenas, limos y arcillas, asociadas a canales fluviales y áreas de inundación. La composición de los cantos depende de la litología de las diferentes unidades por donde drena la corriente.

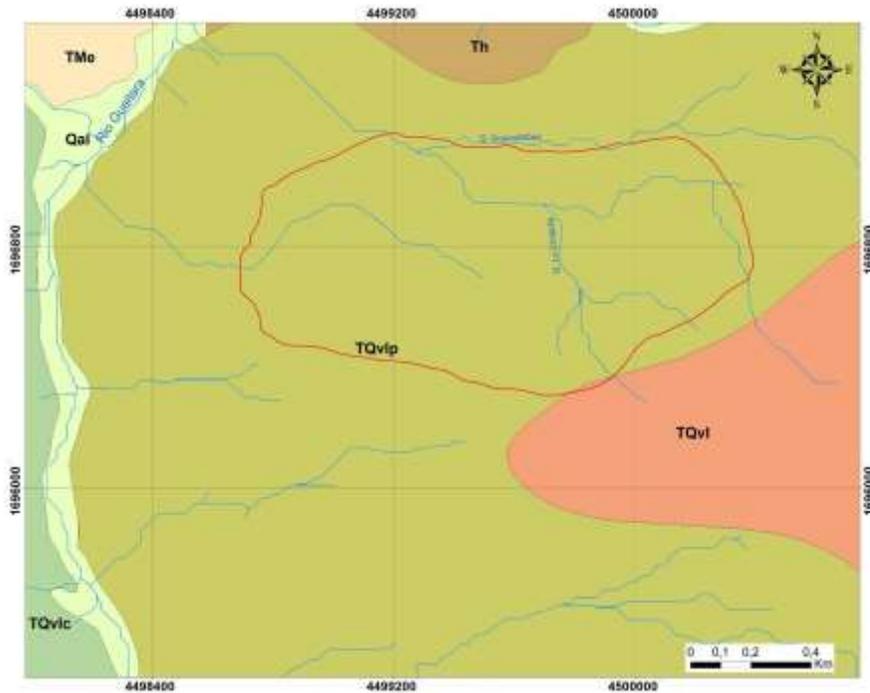


Figura 13 Geología regional escala 1:25.000 del área de estudio

5.2.1.2. Unidades de geología para ingeniería (UGI)

Las unidades de geología para ingeniería identificadas en el área de estudio se describen a continuación y su representación espacial se muestran en la figura 23.

Rocas

- Roca intermedia volcanoclastica (Riv):

Afloramiento natural conformado por roca masiva, fresca, de grano fino, intermedia, de color amarillo y gris, con espesor aproximado de 20m, permeabilidad baja, grado de meteorización medio, dureza moderada, compuesto por intercalaciones de lahares y piroclastos producto de la actividad volcánica del Galeras. Rugosidad de las superficies media con formas onduladas y escalonadas, discontinuidades húmedas por evidencia de flujo de agua, espaciamiento de discontinuidades cerrado (menor a 1cm), con tipo de relleno limpio y materia orgánica.



Figura 14 Afloramiento de roca intermedia volcanoclastica.



Figura 15 Afloramiento de roca intermedia volcanoclástica.



Figura 16 Afloramiento de roca intermedia volcanoclástica.

Suelos residuales

Las unidades de suelos residuales contienen materiales que se generan como resultado de procesos de meteorización y descomposición de las rocas in situ. A continuación, se relaciona las unidades identificadas para el área de estudio:

- Suelo residual volcanoclástico (Srv):

Esta unidad se presenta como resultado de los procesos de meteorización física y química de depósitos volcánicos asociados al volcán Galeras, entre los que se encuentran depósitos de caída, pómez, ceniza y bloques.



Figura 17 Afloramiento de suelo residual volcanoclástico

Suelos transportados

Son los materiales resultantes de la acción dinámica de los procesos geomorfológicos y de los agentes naturales como la gravedad, los sismos y los medios de transporte, que fueron depositados o llevados a los sitios que ocupan actualmente (SGC. 2004). Se relaciona a continuación las unidades identificadas en el área de estudio:

- Suelo transportado volcanoclastico (Stv):

Corresponde a los materiales que han sido transportados y depositados producto de la actividad volcánica del volcán Galeras. Conformado por depósitos de materiales no consolidados, de estructura matriz-soportada (matriz = 60%; clastos = 40%), con espesor de hasta 2.0 m. Están compuestos por clastos con tamaños que varían entre bloques, grava, arena y finos, con meteorización moderada, de formas esféricas, redondeados a subredondeados, pobremente seleccionados, de composiciones heterogéneas, orientación isotrópica, alta

saturación y permeabilidad baja, los clastos están embebidos en una matriz de color marrón claro a oscuro, de textura arenosa a arcillosa, plasticidad media y permeabilidad baja.



Figura 18 Afloramiento de suelo transportado volcanoclástico.

- Suelo transportado coluvial antiguo (Stca):

Estos depósitos se generaron a partir de antiguos procesos erosivos, el espesor de estos depósitos fluctúa en promedio entre 2 y 3 m y se caracteriza por estar cubiertos por vegetación en proceso de regeneración natural y cultivos suavizando el relieve, la zona pasa de una pendiente moderada a baja.



Figura 19 Suelo transportado coluvial antiguo

- **Suelo transportado coluvial (Stco):**

Depósitos de materiales producto de la ocurrencia de movimientos en masa. Corresponden a materiales poco consolidados, con estructura matriz soportada (matriz = 60%; clastos = 40%), espesor variable entre los 0,5 m y 10 m, sin arreglo preferencial de las partículas. La matriz es de textura que varía entre arenolimosa y limoarcillosa (0,002 mm - 2 mm), de color blanco, marrón claro a oscuro y gris oscuro, no plástica, humedad y permeabilidad media, con presencia de algunas grietas, compacidad débil y densidad suelta. Los clastos se presentan en tamaños que varían desde gravas finas (4,75 mm) hasta bloques de 1 m de diámetro, de formas irregulares, baja esfericidad, subangulares a angulares, pobremente seleccionados, con estados de meteorización entre moderado y descompuestos, con composiciones heterogéneas. Esta unidad no presenta condiciones de estabilidad, siendo muy susceptible a desarrollar nuevos movimientos en masa y también procesos erosivos, en presencia de agua pueden generar deslizamientos tipo flujo.





Figura 20 Suelo transportado coluvial

- Suelo transportado aluvial (Sta):

Corresponde a sedimentos recientes que han sido transportados y depositados por la dinámica fluvial de los cauces activos e intermitentes que conforman la zona de estudio, con espesor promedio de 0.5 y 1.0 m. Están conformados por fragmentos de tamaño bloques, grava, arena y finos, con forma subredondeada a redondeada, orientación isotrópica, por lo general clastosoportados, con tamaños, composición mineral y granulometría heterogénea, presentan alta saturación, permeabilidad baja, meteorización de los clastos moderada. La matriz se caracteriza por presentar granulometría heterogénea, localmente embebidos en matriz areno – limosa, no plástico.



Figura 21 Suelo transportado aluvial

Suelos antrópicos

- Suelo antrópico (Sa):

Corresponde a las áreas que han sido intervenidas por actividades antropogénicas como suelos urbanos, centros poblados, apertura de vías y demás infraestructura, constituidos dentro de la zona de estudio (Figura 22)





Figura 22 Suelo antrópico.

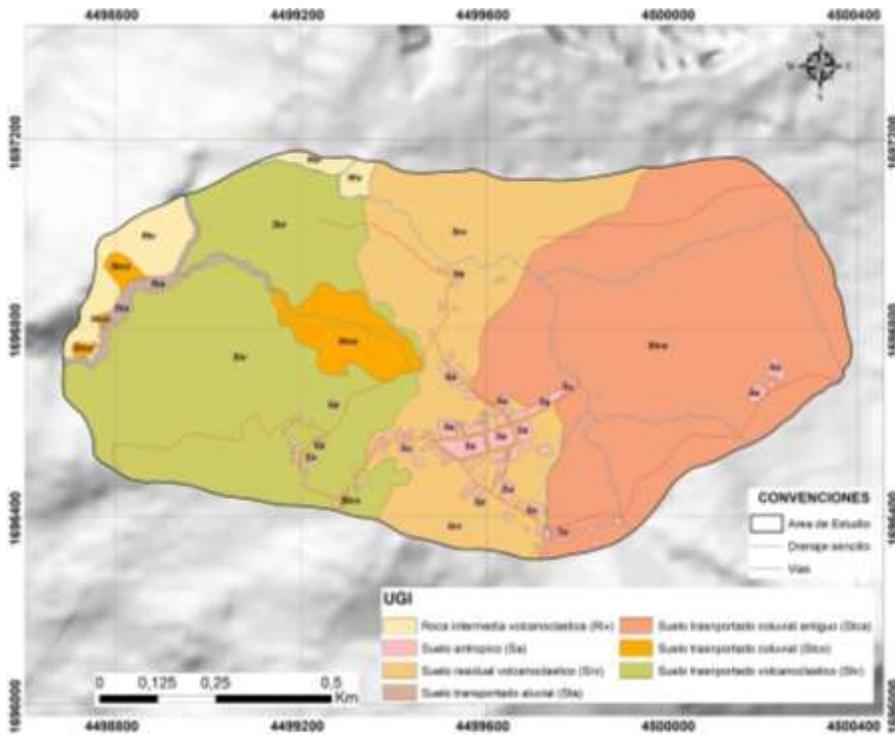


Figura 23 Mapa de unidades de geología para ingeniería identificadas en el área de estudio.

5.2.1.3. Elementos geomorfológicos

Los elementos geomorfológicos identificados en el área de estudio se describen a continuación y su representación espacial se muestra en la figura 34.

Elementos de origen denudacional

Geoformas relacionadas con procesos denudacionales que se presentan en zonas de clima tropical, las cuales se caracterizan por procesos erosivos, cuyo resultado son morfologías denudadas de expresión redondeada a relativamente suave y depósitos variables.

- Depósitos coluviales (Dco):

Este elemento geomorfológico es producto de la acumulación de materiales (suelo residual y/o fragmentos de roca) sobre las laderas de la zona, cuya acumulación y depositación se da en un tiempo relativamente corto. Estos depósitos se han generado por procesos erosivos recientes, no tienen grandes espesores y se acumulan en zonas de pendiente moderadas.



Figura 24 Depósitos coluviales.

- Deslizamiento rotacional (Ddr)

Se observan deslizamientos de tipo rotacional, caracterizados por presentar una superficie de falla con forma curva, cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Los deslizamientos que se presentan en la zona se generan en taludes conformados por materiales poco consolidados y estructura matriz soportada en pendientes que varían entre altas y escarpadas. Las superficies de falla se relacionan

directamente con el manto de meteorización y no tienen una relación directa con estructuras profundas de roca.



Figura 25 Deslizamiento rotacional.

- Deslizamiento rotacional complejo (Ddrc):

En esta unidad se evidencia un proceso de erosión remontante o carcavamiento, que consiste en la formación de un canal natural o una incisión causada por uno o varios flujos de agua (DAGR, 2022), que se combina cinemáticamente con deslizamientos traslacionales activos en la parte media y baja de la ladera, de igual manera, se observan agrietamientos en la parte superior del escarpe principal y en la dirección del movimiento de los materiales, lo cual permite identificar que el movimiento tiene un comportamiento retrogresivo, en la parte inferior del talud se evidencia una zona de acumulación que junto al aporte de agua por una tubería dañada genera flujos de materiales, conformando de esta manera un deslizamiento de tipo rotacional retrogresivo complejo. Así mismo, no se evidencian condiciones de estabilidad, siendo muy susceptible a desarrollar nuevos movimientos en masa y también procesos erosivos, debido al aporte de agua se pueden generar deslizamientos tipo flujo.



Figura 26 Deslizamiento rotacional complejo.

- Deslizamiento traslacional (Ddt)

Este tipo de deslizamientos se presenta en zonas de alta pendiente, se generan sobre una superficie de falla casi planar en sentido de la ladera, sobre materiales con grado de meteorización moderada, donde los suelos transportados son poco consolidados y con estructura matriz soportada.



Figura 27 Deslizamiento traslacional.

Elementos de origen fluvial

- **Cauce fluvial activo (Fca):** Canal de forma irregular con incisión generada por la erosión de las corrientes de agua de las quebradas que atraviesan la zona, dentro de sedimentos aluviales, de morfología ligeramente inclinada. En temporadas de lluvia estas geoformas pueden presentar una pequeña variación a la escala cartografiada.



Figura 28 Cauce fluvial activo.

- **Plano o llanura de inundación (Fpi)**

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable, localizada en el borde fluvial de cauces activos e intermitentes que conforman la zona de estudio, limitados por escarpes de terraza, escarpes de erosión. Se asocia con valles amplios, zonas de acumulación y depósito de materiales fluviales.



Figura 29 Plano o llanura de inundación.

Elementos de origen volcánico denudacional

- **Ladera erosiva (Vle):** Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, drenaje característico a un patrón dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas y surcos, sobre materiales de suelo o roca. Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o una estructura.



Figura 30 Ladera erosiva

- **Ladera ondulada (Vlo):** Superficie en declive de morfología alomada o colinada, ladera con longitud desde corta a muy larga (50m-2500m) con pendiente inclinada a escarpada (6° - 45°). El patrón de drenaje es subdendrítico a subparalelo. Esta ladera se puede formar en suelos residuales y depósitos coluviales.



Figura 31 Ladera ondulada.

- **Ladera escarpada (Vles):** Superficie de terreno de morfología ondulada, de longitud variable entre corta a larga (50m-1000m) caracterizada por presentar pendiente escarpada a muy escarpada ($>31^{\circ}$), drenaje de patrón subdendrítico a subparalelo. Está compuesta por materiales remodelados por procesos denudativos, erosivos e incisión superficial.



Figura 32 Ladera escarpada.

Elementos de origen antrópico

- **Cima explanada (Ace):** Superficies resultantes de explanaciones realizadas mecánicamente con fines urbanísticos o de infraestructura en áreas con pendientes altas a moderadas.



Figura 33 Cima explanada.

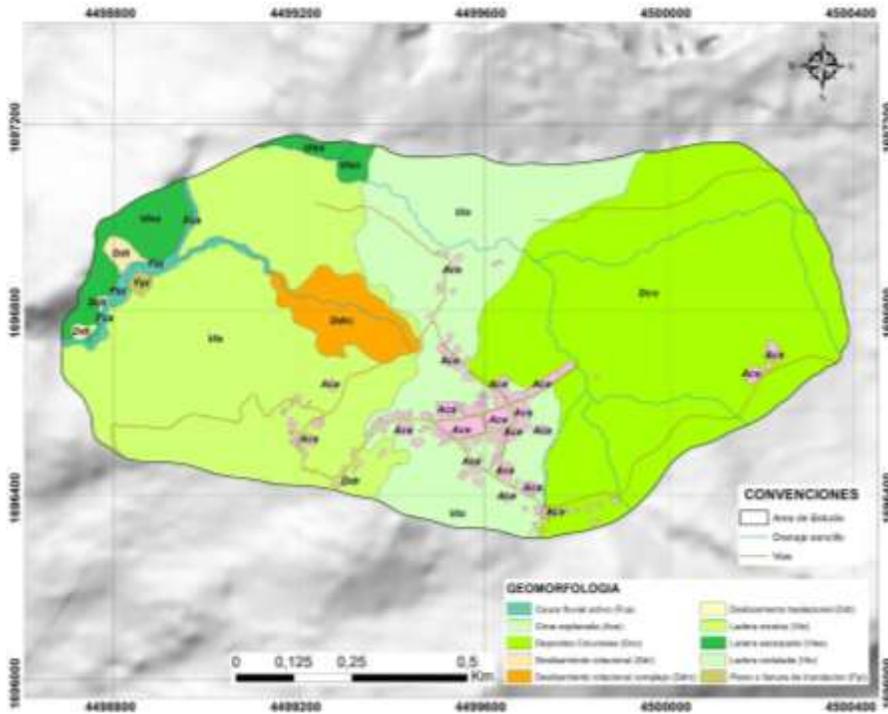


Figura 34 Mapa de elementos geomorfológicos identificados en el área de estudio.

5.2.1.4. Geología estructural

Para describir la geología estructural del área de interés en la vereda el Hatillo del municipio de Consacá, se tomó como referencia la información de la plancha y memoria explicativa 429 Pasto a escala 1:100.000 de Ingeominas, 1991. En la figura 35, se relacionan las fallas geológicas con respecto a la zona de estudio, las cuales presentan una orientación predominante NE – SW, entre las que se destacan la falla Manchabajoy asociada al sistema de fallas de Romeral a una distancia aproximada de 1.2 km y la falla Ancuya asociada al sistema de fallas del Río Cauca a una distancia aproximada de 2 km, de igual manera en la plancha 429 Pasto (Ingeominas, 1991) se menciona una falla inferida que pasa por el río



Guáitara a una distancia de 0.5 km y un lineamiento que se encuentra entre la Formación Esmita y las Rocas Ígneas Hipoabisales a aproximadamente 0.45 km de la zona de interés.

Teniendo en cuenta lo anterior y que a pesar de que estas fallas han influido significativamente en la geología y geomorfología de los municipios de Ancuyá, Sandoná y Consacá, se considera que, para el presente estudio, las zonas de falla en mención al encontrarse distantes del área de interés no representan influencia directa o significativa para que se generen movimientos en masa producto de eventos sísmicos. Es por ello por lo que, la geología estructural no será tomada en cuenta para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa, sin embargo, no se puede desconocer que un sismo podría generar dichos eventos y acelerar los existentes.

A continuación, se relacionan las fallas geológicas regionales identificadas en el área de influencia de la zona de estudio:

- **Falla Manchabajoy:** Representa el límite del terreno sedimentario plegado y el terreno vulcano-sedimentario igneometamórfico de la Cordillera Central. Está asociada al sistema de fallas de Romeral y se cataloga como activa y respecto a la neotectónica, esta genera escarpes que se evidencian cerca al municipio de Sandoná (SGC, 2015).
- **Sistema de Fallas Río Cauca (Falla Ancuya):** Conformado por una serie de fallas inversas orientadas en dirección N10°E a N35°E, las cuales ponen en contacto a la Cordillera Occidental con la Depresión Cauca – Patía. A este sistema pertenecen las Fallas Cauca – Patía, Aguada – San Francisco y Ancuyá (Ingeominas, 1991).

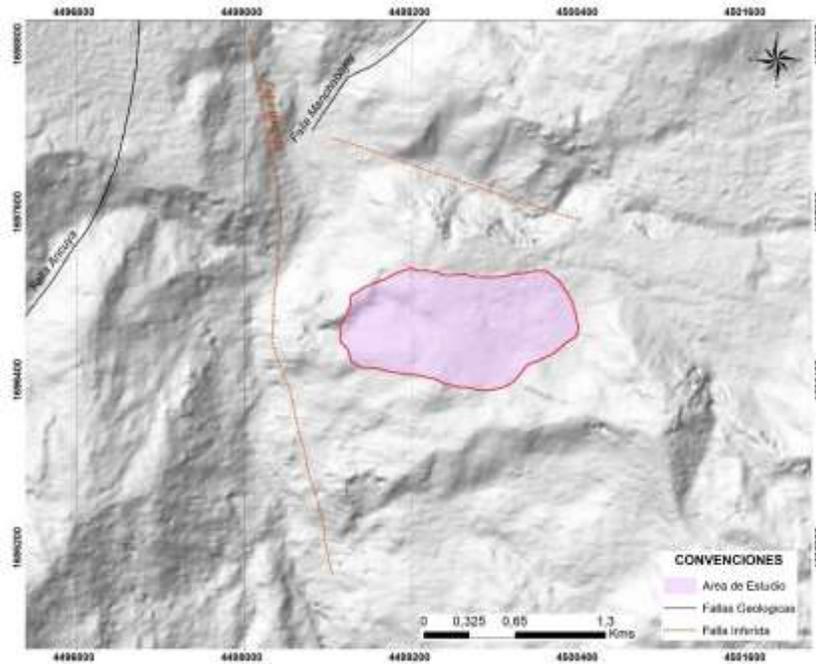


Figura 35 Mapa de geología estructural.

5.2.1.5. Cobertura de la tierra y clasificación Corine Land Cover

Las coberturas de la tierra identificadas en el área de estudio y clasificadas en el nivel tres de Corine Land Cover, se describen a continuación y su representación espacial se muestra en la figura 50.

Cultivos permanentes herbáceos. (Caña y Plátano)

Este tipo de cobertura comprende áreas ocupadas por cultivos permanentes de hábito herbáceo como caña de azúcar y panelera, plátano, banano y tabaco. Las herbáceas son plantas que no presentan órganos leñosos, son verdes y con ciclo de vida vegetativo anual.

Iniciando con el recorrido en la zona de influencia de la zona de estudio, se identificó la cobertura que corresponde a territorios agrícolas, compuesta en este caso por cultivo de caña de azúcar la cual tiene una extensión que abarca un área de 62,78 has, equivalente al 54,86 % del total. Este cultivo se caracteriza por su ciclo vegetativo anual, pertenece a la familia

poaceae y crece hasta los 2,5 m, y se desarrolla entre los 500 y 2000 m.s.n.m; representa el cultivo más importante del sector productivo del municipio, utilizado para la producción de panela en trapiches rudimentarios de la región (Figura 36).

De igual manera se identificó el cultivo de plátano, el cual está asociado con el cultivo de café para sombrío, especies frutales y maderables, establecido en pequeñas parcelas para consumo familiar. Esta especie se caracteriza por ser una planta herbácea perenne de gran tamaño de la familia musaceae y orden Zingiberales, su ciclo vegetativo es anual, de hasta 6 m de altura aproximadamente, establecido de forma aleatoria a intervalos regulares y es característico en estas áreas de minifundio donde basan su actividad en la agricultura de subsistencia, al ser un producto fundamental en la dieta básica y seguridad alimentaria. (Figura 37).



Figura 36 Cobertura cultivos permanentes herbáceos (Caña)



Figura 37 Cobertura cultivos permanentes herbáceos (plátano), para sombrío en asocio con cultivo de café y especies frutales y maderables

Cultivos permanentes arbustivos (café).



Coberturas permanentes ocupadas principalmente por cultivos de hábito arbustivo como café, cacao, coca y viñedos. (FAO, 2001).

En el área de estudio se observaron pequeñas parcelas con cultivo de café, siendo este una de las principales actividades económicas del municipio, donde el proceso productivo es asociado con especies frutales y maderables, en arreglos agroforestales, o tecnificado especialmente como monocultivo más que en asocio con especies para sombrío. Estos cultivos se caracterizan por su ciclo vegetativo anual, pertenece a la familia rubiaceae y crece como arbusto hasta los 4 m y hasta 10 m como árbol, de clima templado húmedo, se desarrolla entre los 800 y 2000 m.s.n.m. Se evidencio que este cultivo ocupa un área de 1,18 has, que equivale al 1,038 % del total del área en estudio. (Figura 38).



Figura 38 Cobertura cultivos permanentes arbustivos (café), establecido en arreglos agroforestales

Mosaico de cultivos.

Esta cobertura constituye tierras ocupadas con cultivos anuales, transitorios o permanentes, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño (inferior a 25 ha)

Este nivel de cobertura en el área de estudio está conformado por cultivos anuales permanentes arbustivos como café, herbáceos como caña y plátano, arbóreos como cítricos (mango, limón y guayaba), y algunos tubérculos transitorios como yuca, maíz y frijol. Representa un área de 2,178 Has, que equivale al 1,9 % del total de la zona de influencia. (Figura 39).



Figura 39 Cobertura Mosaico de cultivos (caña, café, frutales y transitorios)

Bosque denso (abierto)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IGAC, 1999).

En el área de estudio, teniendo en cuenta el avance permanente de la frontera agrícola, se evidencia cobertura vegetal de bosques primarios y vegetación secundaria en proceso de sucesión natural, constituida por pequeños relictos de bosque arbóreo y arbustivo, aledaños a las áreas con territorios agrícolas. Esta cobertura abarca un área de 0,82 has, equivalente al 0,72% del total. (Figura 40).



Figura 40 Cobertura de bosque denso abierto

Cultivos transitorios.

Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de sólo unos pocos meses, como por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada y arroz), los tubérculos (papa y yuca), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayor parte de las hortalizas y algunas especies de flores a cielo abierto.

En el presente estudio se identificó esta cobertura en un área de 0,92 has, correspondiente al 0,81 %, la cual está ocupada por cultivos de maíz y frijol. (Figura 41)



Figura 41 Cobertura de cultivos Transitorios

Bosque Fragmentado (Pastos y cultivos)

Dicha cobertura comprende los territorios cubiertos por bosques naturales donde se ha presentado intervención humana de tal manera que el bosque mantiene su estructura original. Las áreas de intervención están representadas en zonas de pastos y cultivos, las cuales se observan como parches de variadas formas y distribución irregular dentro de la matriz del bosque.

En este caso se evidencia cobertura vegetal de bosques naturales abiertos, que han sido intervenidos por pastos y cultivos permanentes herbáceos, arbustivos y arbóreos como maderables y cítricos. Este tipo de vegetación abarca un área de 1,13 has, equivalente al 1 % del total de la zona en estudio. (Figura 42).



Figura 42 Cobertura de bosque fragmentado con pastos y cultivos

Pastos enmalezados

Este tipo de cobertura está conformada por tierras con pastos y malezas conformando asociaciones de vegetación secundaria, debido principalmente a la realización de escasas prácticas de manejo o la ocurrencia de procesos de abandono.

Se evidencia este tipo de cobertura, que conforman asociaciones de vegetación secundaria, malezas del orden graminales como carrizo y vegetación arbustiva de hasta 1m de altura, e individuos de helecho (Polypodiophyta). La presencia de esta cobertura es producto de una marcada intervención antrópica. Esta vegetación representa un total de 1,33 has y equivale al 1,17 % del área de estudio. (Figura 43).



Figura 43 Cobertura de pastos enmalezados

Pastos limpios

La cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor a 70%; la realización de prácticas de manejo (limpieza, enclamiento y/o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.

En el área de influencia del estudio se identificaron pastos limpios en un área de 1,5 has, correspondiente al 1,3%, la cual está ocupada por pastos mejorados para pastoreo o ganadería, donde cabe resaltar que las prácticas de manejo realizadas y el nivel tecnológico para establecer este cultivo limitan el desarrollo o establecimiento de otras especies arbóreas o arbustivas para recuperación de suelos en la zona de estudio. (Figura 44).



Figura 44 Cobertura de pastos limpios

Red vial, ferroviaria y terrenos asociados

La cobertura constituye espacios artificializados con infraestructuras de comunicaciones como carreteras, autopistas y vías férreas; se incluye la infraestructura conexa y las instalaciones asociadas tales como: estaciones de servicios, andenes, terraplenes y áreas verdes.

Durante el recorrido en la zona rural de estudio, se evidencian áreas de infraestructura como vías alternas y secundarias, y redes eléctricas en regulares condiciones. Esta cobertura tiene una extensión de 1,83 has equivalente al 1,6 % del área total (Figura 45).



Figura 45 Cobertura Red vial, ferroviaria y terrenos asociados. (vía secundaria)



Bosque de Galería y Ripario

Se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicada en las márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y los drenajes naturales. Cuando la presencia de estas franjas de bosques ocurre en regiones de sabanas se conoce como bosque de galería o cañadas, las otras franjas de bosque en cursos de agua de zonas andinas son conocidas como bosque ripario.

Se evidencia esta clase de cobertura de bosque de galería y ripario, de tipo boscoso y arbustivo, que ocupa en diferentes afluentes hídricos, en un área de 3,13 has equivalente al 2,75 % de la totalidad del área de estudio, donde predominan gran variedad de especies forestales destacadas como guadua, cedro y arrayan, arbustivas como mayo pequeño y chilca, graminales como el carrizo, y herbáceas como helecho.

Vegetación secundaria o en transición.

Comprende aquella cobertura vegetal originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria, que puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original. Se desarrolla en zonas desmontadas para diferentes usos, en áreas agrícolas abandonadas y en zonas donde por la ocurrencia de eventos naturales la vegetación natural fue destruida.

Se evidencia en la zona de influencia áreas de bosque secundario y espacios naturales abiertos, distribuidas de manera irregular y en espacios de variadas formas con vegetación secundaria alta y baja, e individuos con alturas de hasta de 20 m, donde se resaltan especies forestales representativas como guadua, cedro y nacedero, nativas y de sucesión natural, arbustos, herbazales y enredaderas. Dicha área de estudio tiene una extensión de 4,9 has que equivale al 4.3 % del total. (Figura 46).



Figura 46 Cobertura de bosque secundario alto y bajo

Tierras desnudas y degradadas

Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas.

En el recorrido de la zona de estudio, se identificó este tipo de cobertura específicamente en el área del deslizamiento, donde se evidencian áreas con cobertura de tierras desnudas y degradadas, ocasionado por el movimiento en masa ocurridos en la zona, con pendiente mayor al 50%. Dicha área se encuentra desprovista de vegetación, con características edafológicas propias de este tipo de cobertura. Abarca 5,46 has y 4,86,5% del total del área. (Figura 47).



Figura 47 Cobertura de deslizamiento identificado en la vía que comunica la vereda El Hatillo con La Planeta.

Tejido urbano y discontinuo.

Esta cobertura constituye espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación.

En la zona del área de influencia del estudio se destaca en esta cobertura, infraestructura y vivienda rural de manera dispersa y discontinua, que abarca este sector y que se caracteriza por sus construcciones de concreto en menor proporción, otras de material de madera y tejas de zinc, las cuales en su mayoría se encuentran en regular estado). Este nivel de cobertura abarca 3,4 has en un porcentaje del 3 % del área total de la zona. (Figura 48).



Figura 48 Viviendas de concreto e infraestructura, sector rural

Sistemas Agroforestales.

Zonas ocupadas por arreglos o combinaciones de cultivos de diferentes especies, con otros de hábitos herbáceos, arbustivos y arbóreos, donde la característica principal de la cobertura es que el aumento en el detalle no implica la subdivisión en unidades puras, porque éstas se encuentran combinadas en la misma área, alternadas por surcos o hileras de árboles con cultivos o de árboles con pastos.

Durante el recorrido se observaron áreas establecidas con arreglos agroforestales compuestos por especies de cultivos como caña, café, plátano, frutales y maderables, los cuales se encuentran distribuidos en arreglos espaciales, en zonas aledañas a las viviendas rurales. Esta cobertura comprende un área de 9,5 has, equivalente al 8,37 % del total del área de influencia de la cobertura (Figura 49).



Figura 49 Cobertura ocupada por arreglos agroforestales

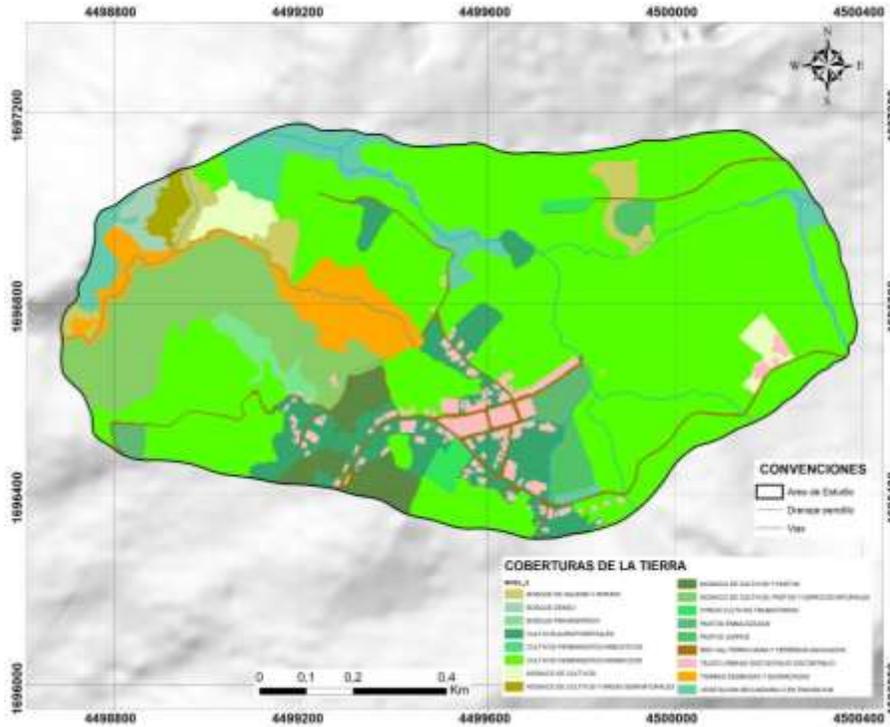


Figura 50 Mapa de coberturas de la tierra identificadas en la vereda El Hatillo, municipio de Consacá.

Análisis de coberturas de la tierra Municipio de Consacá

Posterior al trabajo realizado en campo, una vez realizada la caracterización de las coberturas vegetales de la zona de estudio, vereda El Hatillo, municipio de Consacá y con base en la Metodología de Corine Land Cover, se realizó el análisis correspondiente de la situación encontrada, con el fin de conocer el estado actual de las diferentes categorías presentes en dicho territorio. (Tabla 3)



Tabla 3 Ocupación de cobertura de la tierra

FID	NIVEL 3	AREA/H A	%
1	MOSAICO DE CULTIVOS Y AREAS SEMINATURALES	0,78	0,69
2	BOSQUE DENSO	0,82	0,72
3	OTROS CULTIVOS TRANSITORIOS	0,92	0,81
4	BOSQUE FRAGMENTADO	1,13	0,99
5	CULTIVOS PERMANENTES ARBUSTIVOS	1,18	1,03
6	PASTOS ENMALEZADOS	1,33	1,17
7	PASTOS LIMPIOS	1,58	1,39
8	RED VIAL FERROVIARIA Y TERRENOS ASOCIADOS	1,83	1,61
9	MOSAICO DE CULTIVOS	2,17	1,91
10	MOSAICO DE CULTIVOS Y PASTOS	2,81	2,47
11	BOSQUE DE GALERIA Y RIPARIO	3,13	2,75
12	TEJIDO URBANO DISCONTINUO	3,41	3
13	VEGETACION SECUNDARIA O EN TRANSICION	4,94	4,34
14	TIERRAS DESNUDAS Y DEGRADADAS	5,46	4,8
15	CULTIVOS AGROFORESTALES	9,52	8,37
16	MOSAICO DE CULTIVOS, PASTOS Y ESPACIOS NATURALES	1,02	8,99
17	CULTIVOS PERMANENTES HERBACEOS	62,36	54,86
	TOTAL	104,39	99,9

Se identificaron un total de diecisiete (17) coberturas de la tierra, que ocupan un área aproximada de 104,39 has, identificadas hasta nivel 3, donde en primer lugar se destaca la



caña de azúcar por su elevada extensión e importancia económica y social, representa una con extensión de 62,36 has, y representa el 54,86% del total del área de estudio. En segundo lugar, se identifica la cobertura de sistemas agroforestales en un área extensa de 9,52 has y el 8,37% del total.

En tercer orden en un área de 5,46 has, se identificó la zona de deslizamiento, conformada por cobertura de tierras desnudas o degradadas, debido a procesos de erosión natural o antrópica, donde el suelo se encuentra desprovisto de vegetación.

Seguidamente ocupa el cuarto lugar, la cobertura de vegetación secundaria o en transición con un área 4,9 has que equivale al 4.3 % del total.

En cuanto a la cobertura de territorios artificializados, es ocupado por el tejido urbano discontinuo, con el 3% del territorio en estudio, conformada por viviendas dispersas en la parte rural de la zona.

Se evidencio esta clase de cobertura de bosque de galería y ripario, de tipo boscoso y arbustivo, que ocupa zonas aledañas de afluentes hídricos, en un área de 3,13 has equivalente al 2,75 % de la totalidad del área de estudio.

Ocupa el séptimo lugar la cobertura mosaico de cultivos, en un área de 2,178 Has, conformada por diversidad de cultivos anuales de tipo herbáceo y arbustivo. En la categoría de cobertura de territorios artificializados, se destaca en nivel 3 la red vial, ferroviaria y terrenos asociados, con el 1,61% del total del área, donde se observaron vías veredales en regular estado.

Posteriormente en su nivel de importancia se evidencia en 1,58 has, la presencia de pastos limpios, establecidos con un tipo de manejo adecuado para ganadería.

Posteriormente se evidenció la cobertura de bosque fragmentado que presentó un área 1,13 has, con un porcentaje de 0,99%.

Se localiza dentro del nivel de bosques y áreas seminaturales, la cobertura de bosque denso que ocupa un área de 0,82 has, con un porcentaje de 0,72 % del total del área de estudio, donde dicha vegetación está conformada por especies arbóreas, arbustivas y herbáceas.

Se recomienda implementar sistemas productivos como son los silvopastoriles con especies arbóreas y para sombrío de cultivo de café, Igualmente se recomienda la rotación de cultivos



como alternativa para recuperación de suelos degradados causados por ganadería extensiva, lo cual aumenta la pérdida de bosques y ecosistemas estratégicos

Seguido en su orden de importancia en la categoría de áreas seminaturales con un porcentaje de ocupación del 14,9 %, se encuentra localizada la cobertura de pastos arbolados en un área de 6,74 has, donde cabe resaltar que las especies arbóreas contribuyen a la conectividad biológica y procesos de sucesión natural, siempre y cuando no sean intervenidas por actividades agrícolas y de ganadería.

En el séptimo lugar de importancia se ubica la cobertura de pastos enmalezados en un área de 1,33 has, con un porcentaje de 1,17 % de ocupación, donde sobresalen especies diversas de malezas, y vegetación proceso de sucesión natural. Se recomienda implementar sistemas productivos como son los silvopastoriles y boscosos con especies arbóreas para sombrío de cultivos de café.

Seguidamente encontramos con un porcentaje del 3,44 %, la cobertura de cultivos permanentes y herbáceos de caña y plátano que ocupan un área de 7,61 has, los cuales están establecidos como monocultivos en el caso de la caña y el plátano como sombrío permanente para cultivo de café. En la misma categoría de cobertura se identifica el cultivo permanente arbustivo de café, en un área de 6,22 has, y con el 2,81% de ocupación del total de área de estudio. Se recomienda fortalecer este sistema productivo, estableciendo cercas vivas al contorno de las parcelas, que sirven como cortinas rompevientos con especies arbóreas de alto crecimiento para alimento y protección de los cultivos y animales.

Durante el recorrido en la zona de estudio, se evidencio que, por movimientos en masa, se ha visto afectada la vivienda del sector rural y susceptible a sucesos de deslizamiento, lo cual requiere que se tomen medidas de contingencia orientados a mitigar el riesgo enfocados a la conservación y fortalecimiento de las coberturas de bosque primario y secundario identificadas en la zona.

5.2.2. Inventario de Movimientos en Masa

El inventario de movimientos en masa se elaboró conforme a la metodología propuesta en el numeral 4, a partir de imágenes satelitales y ortofotos, visitas de campo realizadas por parte

Comentado [LR1]: Colocar tabla con coordenadas

del equipo técnico de CORPONARIÑO al área de estudio en el municipio de Consacá y de los movimientos en masa registrados en la plataforma SIMMA.

5.2.2.1. Imágenes satelitales y ortofotos

En la figura 51 se muestra el área que cubre la ortofoto generada con dron, superpuesta con la imagen satelital de Add Basemap. El vuelo realizado con el apoyo del dron del municipio de Consacá, se realizó sobre el área de estudio en la vereda El Hatillo. Con la información recolectada y trabajo de campo se pudo identificar los movimientos en masa que se presentan en la zona.



Figura 51 Imagen satelital y ortofoto levantada con dron.

5.2.2.2. Visitas de campo

A partir de visitas de campo se identificaron 5 movimientos en masa presentes en el área de estudio, los cuales se describen a continuación:



- Deslizamiento 1.

En este punto se presenta un proceso de erosión remontante o carcavamiento, que consiste en la formación de un canal natural o una incisión causada por uno o varios flujos de agua (DAGR, 2022), que forma deslizamientos traslacionales activos en la parte alta y media del movimiento en masa, de igual manera, se observan agrietamientos en la parte superior del escarpe principal y en la dirección del movimiento de los materiales, lo cual permite identificar que el movimiento tiene un comportamiento retrogresivo. La parte media y baja de la ladera presenta una zona con morfología encañonada, por donde se transportan los materiales de los deslizamientos como un flujo torrencial. Se resalta que en la zona se encuentra una tubería que vierte continuamente agua hacia el escarpe principal del deslizamiento, la cual proviene de la recolección de aguas del alcantarillado del centro poblado de la vereda El Hatillo.

La morfología principal consiste en laderas largas de formas cóncavas y convexas con pendientes que varían de altas a abruptas, que se han modelado principalmente en ambientes volcánicos por la influencia de la actividad del volcán Galeras y que a la vez se han visto afectados por procesos denudacionales. En el deslizamiento se identifica materiales poco consolidados, con estructura matrizsoportada (matriz = 60%; clastos = 40%), espesor variable entre los 0,5 m y 10 m, sin arreglo preferencial de las partículas. La matriz es de textura que varía entre arenolimsa y limoarcillosa (0,002 mm - 2 mm), de color blanco, marrón claro a oscuro y gris oscuro, no plástica, humedad y permeabilidad media, compacidad débil y densidad suelta. Los clastos se presentan en tamaños que varían desde gravas finas (4,75 mm) hasta bloques de 1 m de diámetro, de formas irregulares, baja esfericidad, subangulares a angulares, pobremente seleccionados, con estados de meteorización entre moderado y descompuestos, con composiciones heterogéneas.

Teniendo en cuenta las características mencionadas anteriormente, se denomina un deslizamiento de tipo rotacional retrogresivo complejo. Se evidencia que este movimiento en masa se encuentra activo, siendo muy susceptible continuar el desarrollo de los procesos

erosivos, teniendo las características de los materiales que lo conforma, la morfología y la constante agua que discurre por la zona.





Figura 52 Deslizamiento rotacional retrogresivo complejo.

- Deslizamientos 2, 3 y 4.

En este punto se identifican 3 deslizamientos de tipo traslacional de los cuales el número 2, presenta un estado inactivo y revegetalización, y los números 3 y 4 corresponden a deslizamientos activos con poca vegetación, los tres deslizamientos realizaron en su momento aporte de sedimentos y material vegetal a la quebrada que desemboca en el río Guáitara. Geomorfológicamente los deslizamientos están ubicados en una ladera escarpada ($>31^\circ$), de morfología ondulada, longitud variable entre corta a larga (50 m – 1000 m).

Los deslizamientos se generaron sobre una superficie de falla casi planar en sentido de la ladera, sobre materiales con grado de meteorización moderada, donde los suelos

transportados son poco consolidados y con estructura matrizsoportada, sin embargo, el material base corresponde a roca intermedia volcanoclastica, fresca, de grano fino, intermedia, de color amarillo y gris, con espesor aproximado de 20m, permeabilidad baja, grado de meteorización medio, dureza moderada, compuesto por intercalaciones de lahares y piroclastos producto de la actividad volcánica del Galeras.



Figura 53 Deslizamientos traslacionales en ladera escarpada

- Deslizamiento 5

Se identifica un deslizamiento de tipo rotacional en la vía de la vereda El Hatillo, se evidencia material poco consolidado, de fácil remoción, altamente meteorizado correspondiente a suelos transportados volcanoclásticos que han sido transportados y depositados producto de la actividad volcánica del Galeras. Correspondiente a depósitos de materiales no consolidados, de estructura matrizsoportada (matriz = 60%; clastos = 40%), con espesor de hasta 2.0 m, con clastos de tamaños variables, meteorización moderada, de composiciones heterogéneas, orientación isotrópica, alta saturación y permeabilidad baja, los clastos están embebidos en una matriz de color marrón oscuro, de textura areno- arcillosa, plasticidad media y permeabilidad baja.

Geomorfológicamente se ubica en una ladera erosiva con superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, presentando procesos erosivos intensos.



Figura 54 Deslizamiento rotacional.

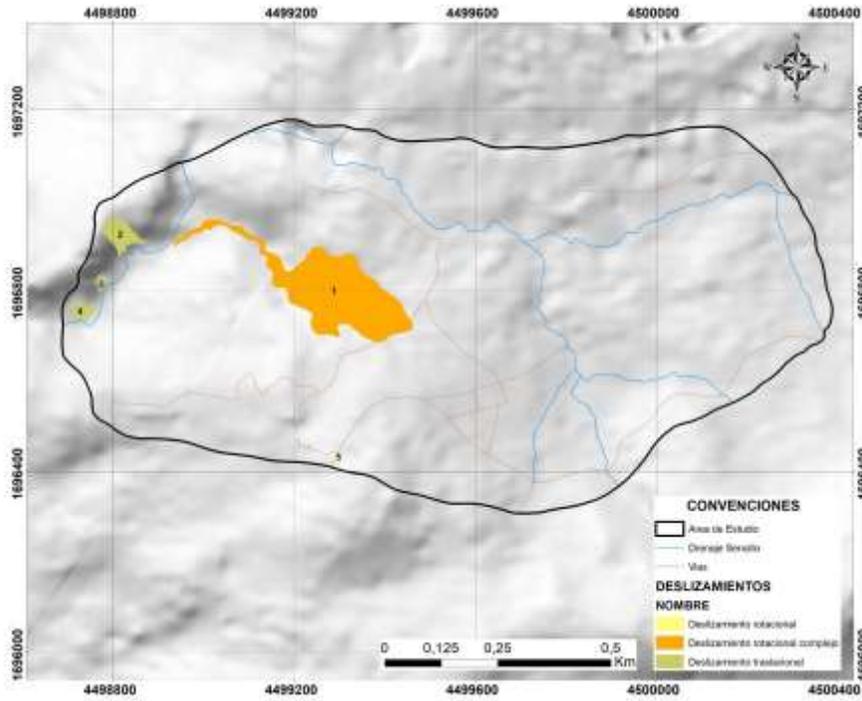


Figura 55 Localización de movimientos en masa identificados en el área de estudio.

5.2.2.3.Registro en SIMMA

De acuerdo con la información disponible en el SIMMA del Servicio Geológico Colombiano (SGC) se obtuvieron los registros históricos de movimientos en masa que se han presentado en el municipio de Consacá.



Tabla 4 Inventario de movimientos en masa registrados en SIMMA para el municipio de Consacá

FUENTE	REFERENCIA	H	X	Y	FECHA (DD/MM/AAAA)
SIMMA	Deslizamiento	1723.00	955822.49	624367.92	20-Feb-02
SIMMA	Deslizamiento	1674.00	957832.11	624920.52	11-Dec-10
SIMMA	Deslizamiento		957584.67	624121.94	29-Feb-12
SIMMA	Deslizamiento		953349.85	628607.10	19-Jul-12
SIMMA	Deslizamiento		954203.31	629768.03	4-Jan-20
SIMMA	Deslizamiento	1571.00	954425.78	628993.95	5-Mar-21
SIMMA	Deslizamiento	1754.00	954314.35	628109.35	28-Apr-21
SIMMA	Deslizamiento	1590.00	954425.80	629107.60	20-Apr-22
SIMMA	Deslizamiento	1689.00	955636.94	624030.07	26-Apr-22
SIMMA	Deslizamiento	1566.00	954203.33	629878.61	2-Jun-22

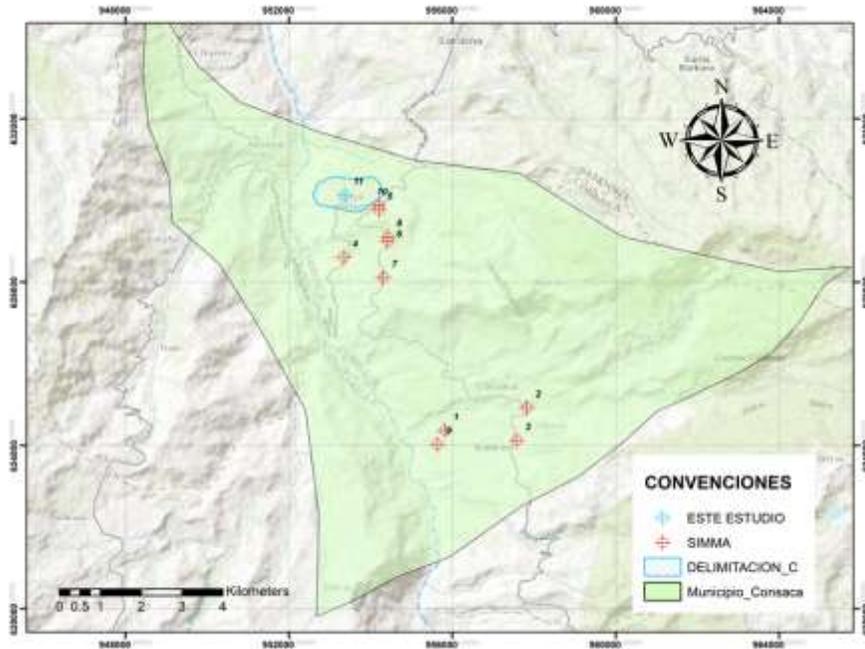


Figura 56 Localización Movimientos en Masa - SIMMA

5.2.3. Detonante por precipitación

Teniendo en cuenta que se dispone de información de inventario multitemporal de movimientos en masa en el área de estudio y el municipio, se estableció el periodo de retorno calculado a partir del número de excedencias en el periodo de registro disponible de la lluvia de 24 horas y el cálculo de lluvia antecedente aplicando la probabilidad de Poisson.

De acuerdo a la guía de zonificación de amenaza por movimientos en masa del SGC, el análisis de periodos de retorno o probabilidad de excedencia anual debe realizarse a partir de un inventario de mínimo tres (3) eventos registrados con fecha de la detonación. A partir del levantamiento de inventario de MM en el presente estudio, se cuenta con diez (10) eventos

registrados con fecha obtenidos de la plataforma SIMMA del SGC, y por otro lado cinco (5) eventos levantados en las visitas de campo y la correlación con imágenes de drone y satélite. Sin embargo, para los últimos levantamientos se tiene registro de fecha de detonación de un solo movimiento en masa el cual corresponde al evento de mayor magnitud registrado en la zona.

La metodología establecida para el presente estudio se basa en la guía de zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) la cual se presenta a continuación.

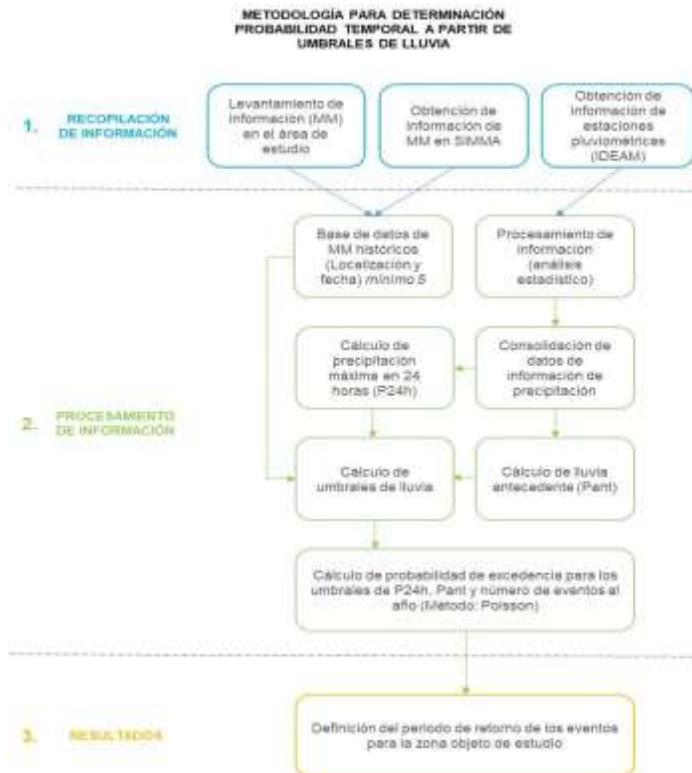


Figura 57 Metodología para determinación de probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia

5.2.3.1. Información pluviométrica

Se obtuvo información del registro histórico de precipitaciones diarias y mensuales de la estación pluviométrica más cercana al área objeto de estudio. Se encontraron dos (2) estaciones en el municipio las cuales se describen a continuación:

Tabla 5 Estaciones pluviométricas en el municipio de Consacá

ESTACIÓN	CÓDIGO	X	Y
Ospina Pérez	52055501	954469.89	629670.06
Bombona	52055030	956316.45	622248.13

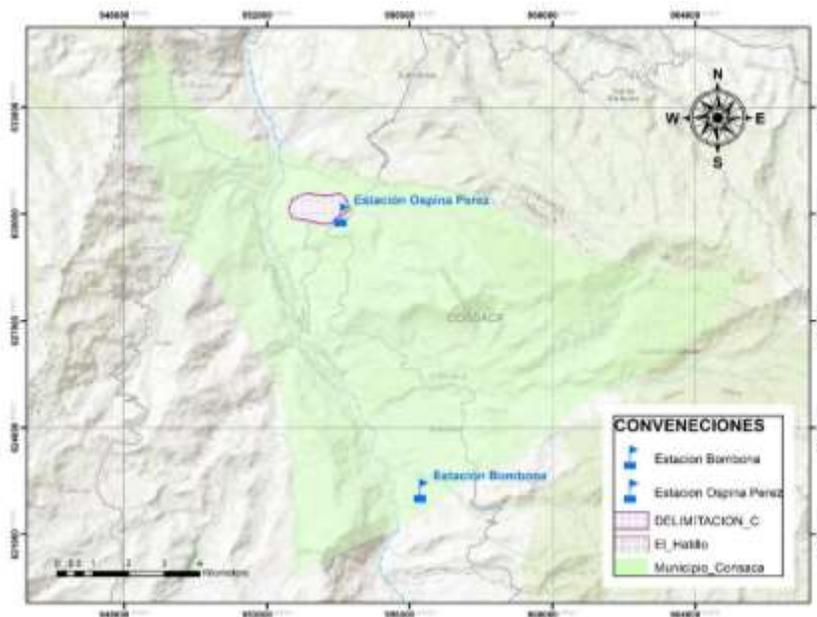


Figura 58 Localización estaciones pluviométricas IDEAM

Como se observa en la figura anterior, la estación más cercana al área objeto de estudio corresponde a la estación Ospina Pérez, sin embargo, la información no se encuentra



disponible. Por lo tanto, la única estación con información disponible para el análisis corresponde a la estación Bombona.

De acuerdo con la guía del SGC, la distancia de la estación a utilizar para el análisis hidrológico no debe superar los 11 km desde el área de interés. La estación Bombona se encuentra a 7.9 Km de la zona de estudio por lo cual cumple con el requerimiento.

5.2.3.2.Registro temporal y espacial de movimientos en masa

Como se ha mencionado anteriormente, se dispone de información de movimientos en masa registrados en el SIMMA y el deslizamiento más representativo dentro del área de estudio. A continuación, se relacionan todos los registros de MM obtenidos.

Tabla 6 Inventario de MM obtenidos en el SIMMA del SGC

No	FUENTE	REFERENCIA	H	X	Y	FECHA (DD/MM/AA AA)
1	SIMMA	Deslizamiento	1723.00	955822.49	624367.92	20-Feb-02
2	SIMMA	Deslizamiento	1674.00	957832.11	624920.52	11-Dec-10
3	SIMMA	Deslizamiento		957584.67	624121.94	29-Feb-12
4	SIMMA	Deslizamiento		953349.85	628607.10	19-Jul-12
5	SIMMA	Deslizamiento		954203.31	629768.03	4-Jan-20
6	SIMMA	Deslizamiento	1571.00	954425.78	628993.95	5-Mar-21



7	SIMMA	Deslizamiento	1754.00	954314.35	628109.35	28-Apr-21
8	SIMMA	Deslizamiento	1590.00	954425.80	629107.60	20-Apr-22
9	SIMMA	Deslizamiento	1689.00	955636.94	624030.07	26-Apr-22
10	SIMMA	Deslizamiento	1566.00	954203.33	629878.61	2-Jun-22

Tabla 7 Inventario de MM levantados en el presente estudio

Nº	FUENTE	REFERENCIA	H	X	Y	FECHA (DD/MM/AAAA)
11	ESTE ESTUDIO	Deslizamiento Rotacional complejo	1527.00	953368.65	630135.22	15-Mar-22

De acuerdo con su ubicación geográfica, los MM registrados en el SIMMA no se encuentran dentro del área definida para el análisis, sin embargo, se encuentran dentro del municipio y en áreas aledañas por lo cual se los tendrá en cuenta para la aplicación de la metodología propuesta.

5.2.3.3. Análisis régimen hidrológico

El comportamiento de las precipitaciones en la zona de estudio es de tipo bimodal, presentando las precipitaciones promedio mensuales multianuales más altas en los meses Marzo (193.5 mm/mes) y Noviembre (211.9 mm/mes); los picos más bajos se dan en los meses de Febrero (68.6 mm/mes) y en Julio (8.9 mm/mes). El análisis se realizó con información de precipitaciones del año 2021 teniendo en cuenta que corresponde al último año con información completa desde el mes de enero al mes de diciembre.



Figura 59 Precipitación mensual multianual

5.2.3.4. Precipitación máxima en 24 horas

Se obtuvo un registro de precipitación diaria y mensual desde el 1 de enero del año 2000 hasta el 31 de octubre de 2022.

Se verificó que los datos de precipitación diaria se encuentren completos por lo cual no se hizo necesario realizar el procedimiento estadístico para complementar datos faltantes.

A partir de la información obtenida de IDEAM de precipitación diaria, se determinó la precipitación máxima en 24 horas multianual. Se determinó P24h hasta el año 2021 teniendo en cuenta que corresponde al último año con información completa desde enero a diciembre.



Figura 60 Precipitación máxima 24 horas multianual

Tabla 8 P24h desde el año 2000 al año 2021

AÑO	P Max 24 h
2000	34.8
2001	45
2002	41
2003	48.5
2004	52.5
2005	51
2006	57.7
2007	41.8
2008	46.2
2009	43.6
2010	33



AÑO	P Max 24 h
2011	40.5
2012	31.1
2013	38
2014	45.6
2015	33.3
2016	31.6
2017	38.4
2018	57.5
2019	55.7
2020	69.4
2021	45.5

5.2.3.5. Cálculo y análisis de lluvia antecedente

Una vez inventariados los eventos o movimientos en masa con la fecha de detonación y obtenido el registro de precipitaciones diarias, se realizó el cálculo de lluvia antecedente. Se ha determinado un total de 15 días antecedentes a la fecha de detonación.

- MM 1: Evento del 20 de febrero de 2002

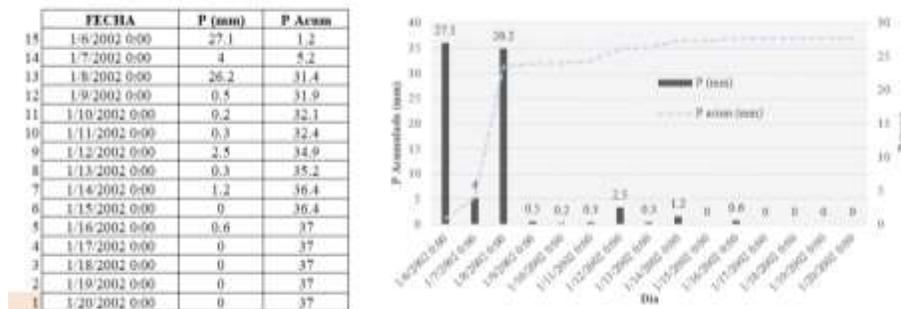


Figura 61 Cálculo de lluvia para antecedente MM 1.



- MM2: Evento del 11 de diciembre de 2010

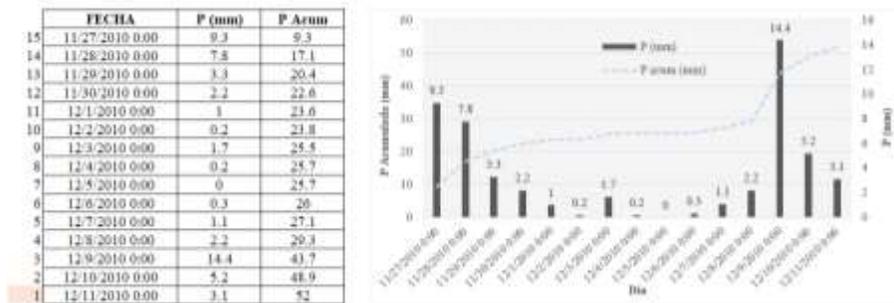


Figura 62 Cálculo de lluvia para antecedente MM 2.

- MM3: Evento del 29 de febrero de 2012

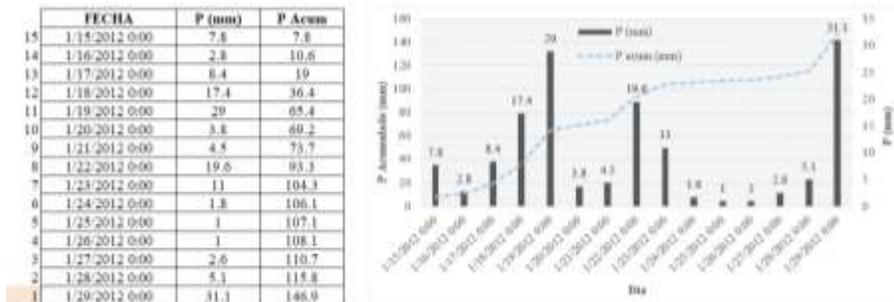


Figura 63 Cálculo de lluvia para antecedente MM 3.

- MM4: Evento del 19 de julio de 2012

Para este evento no se calculó la lluvia acumulada teniendo en cuenta que no se reportan lluvias en estos días. Por lo tanto, se descarta el registro.

- MM5: Evento del 4 de junio de 2020



	FECHA	P (mm)	P Acum
15	5/21/2020 0:00	0	0
14	5/22/2020 0:00	0	0
13	5/23/2020 0:00	0	0
12	5/24/2020 0:00	0	0
11	5/25/2020 0:00	0	0
10	5/26/2020 0:00	0	0
9	5/27/2020 0:00	0	0
8	5/28/2020 0:00	15.2	15.2
7	5/29/2020 0:00	10.4	25.6
6	5/30/2020 0:00	32.8	58.4
5	5/31/2020 0:00	0	58.4
4	6/1/2020 0:00	2.9	61.3
3	6/2/2020 0:00	8.4	69.8
2	6/3/2020 0:00	0	69.8
1	6/4/2020 0:00	5.8	75.6

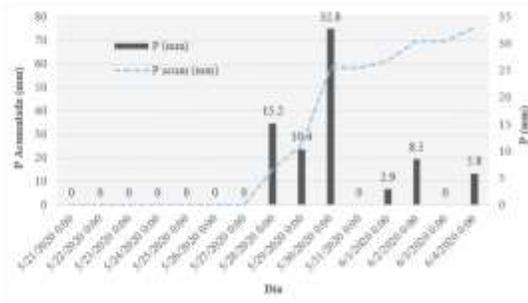


Figura 64 Cálculo de lluvia para antecedente MM 5.

- MM6: Evento del 5 de marzo de 2021

	FECHA	P (mm)	P Acum
15	2/19/2021 0:00	22.6	22.6
14	2/20/2021 0:00	0.4	23
13	2/21/2021 0:00	0	23
12	2/22/2021 0:00	2.4	25.4
11	2/23/2021 0:00	0	25.4
10	2/24/2021 0:00	0	25.4
9	2/25/2021 0:00	0	25.4
8	2/26/2021 0:00	0.3	25.7
7	2/27/2021 0:00	3.6	29.3
6	2/28/2021 0:00	4.6	33.9
5	3/1/2021 0:00	23.1	57
4	3/2/2021 0:00	4.7	61.7
3	3/3/2021 0:00	10	71.7
2	3/4/2021 0:00	8.3	80
1	3/5/2021 0:00	4.5	84.5

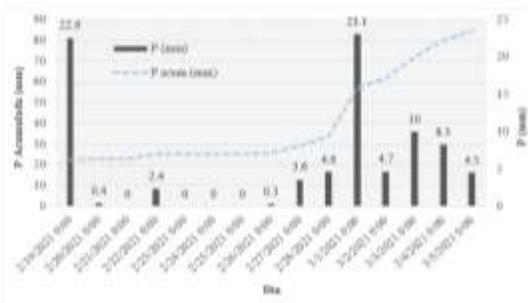


Figura 65 Cálculo de lluvia para antecedente MM 6.

- MM7: Evento del 28 de abril de 2021

	FECHA	P (mm)	P Acum
15	4/14/2021 0:00	0	0
14	4/15/2021 0:00	0	0
13	4/16/2021 0:00	2	2
12	4/17/2021 0:00	0	2
11	4/18/2021 0:00	23.1	25.1
10	4/19/2021 0:00	1.7	26.8
9	4/20/2021 0:00	7.6	34.4
8	4/21/2021 0:00	0.8	35.2
7	4/22/2021 0:00	0	35.2
6	4/23/2021 0:00	3	38.2
5	4/24/2021 0:00	0	38.2
4	4/25/2021 0:00	0	38.2
3	4/26/2021 0:00	0	38.2
2	4/27/2021 0:00	30.6	68.8
1	4/28/2021 0:00	15.6	84.4

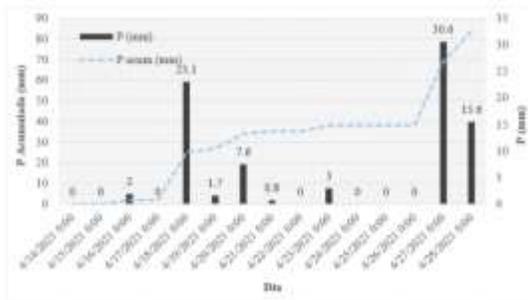


Figura 66 Cálculo de lluvia para antecedente MM 7.



- MM8: Evento del 20 de abril de 2022

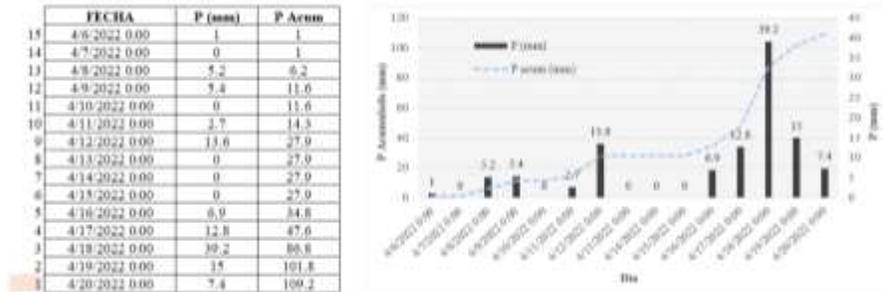


Figura 67 Cálculo de lluvia para antecedente MM 8.

- MM9: Evento del 26 de abril de 2022

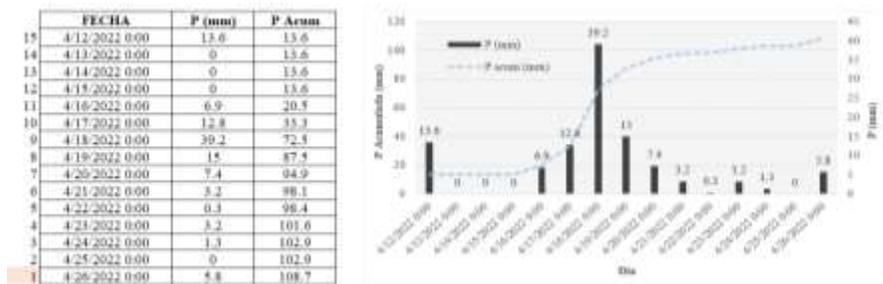


Figura 68 Cálculo de lluvia para antecedente MM 9.

- MM10: Evento del 2 de junio de 2022

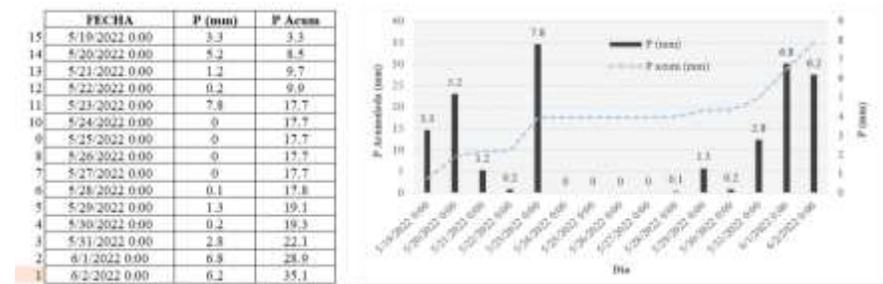


Figura 69 Cálculo de lluvia para antecedente MM 10.



- MM11: Evento del 15 de marzo de 2022

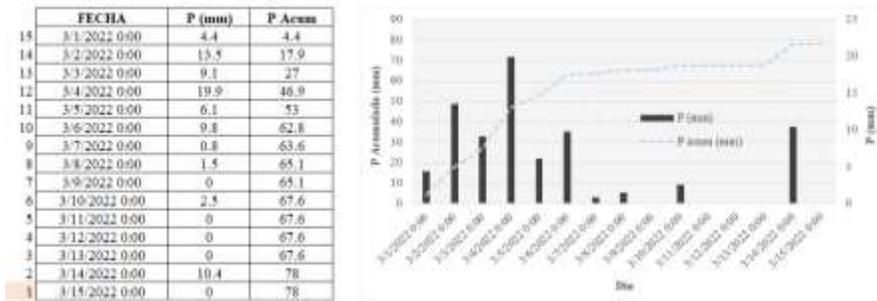


Figura 70 Cálculo de lluvia para antecedente MM 11.

5.2.3.6. Análisis estadístico de la muestra

En la gráfica de lluvia antecedente del evento del 19 de julio de 2012, no se observan datos de precipitación en los 15 días, por lo tanto, se descarta el registro.

En algunos de los eventos analizados se observan claramente precipitaciones máximas diarias (P24h) que se encuentran alejados del valor promedio como es el caso de los eventos del 11 de diciembre de 2010 y el 2 de junio de 2022.

Se realizaron análisis estadísticos para descartar cuantitativamente los valores que se encuentran muy por debajo del promedio de P24h. Para ello se han utilizado algunas de las siguientes metodologías.

- Medida de posición relativa (z)

La medida de posición relativa (z) o puntaje estándar es la medida estadística de “que” tan lejos está una observación particular de la desviación estándar y se calcula mediante la siguiente ecuación:



$$Z = \frac{i - X}{\sigma}$$

Donde:

i = Dato de la muestra

X = Media

σ = Desviación estándar

Tabla 9 Cálculo del puntaje estándar Z

No.	P24h	z
1	27.1	0.0563992
2	14.4	-1.1785483
3	31.1	0.445359
4	32.8	0.6106669
5	23.1	-0.3325606
6	30.6	0.396739
7	39.2	1.2330026
8	39.2	1.2330026
9	7.8	-1.820332
10	19.9	-0.6437285
Media =	26.52	
Desviación estándar =	10.28	

Un valor (x) se considera atípico cuando Z supera un valor de +3 o -3. De acuerdo con los resultados obtenidos ningún valor supera el rango estadístico establecido, sin embargo, se observa que los valores de los registros del 2 de junio de 2002 se encuentran significativamente desfasados del promedio de Z.

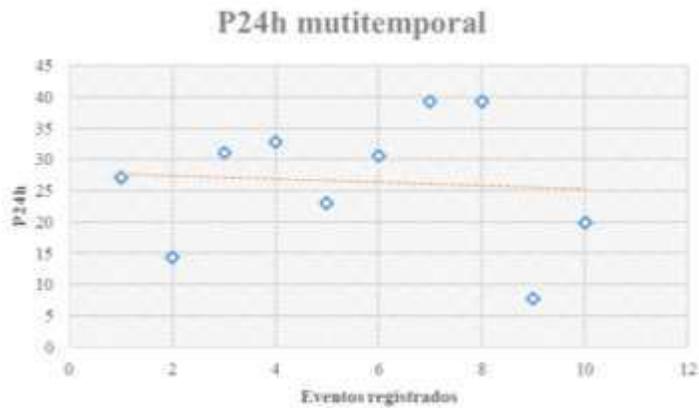


Figura 71 P24h para diferentes registros de movimientos en masa

El rango o amplitud intercuartil (RIC) se obtiene como diferencia entre los cuartiles 3° y 1°.

$$RIC = Q_3 - Q_1$$

Cualquier valor por fuera del RIC se considerará atípico.

Tabla 10 Cálculo de RIC para la serie de datos de P24h

No.	P24h
1	27.1
2	14.4
3	31.1
4	32.8
5	23.1
6	30.6
7	39.2
8	39.2
9	7.8
10	19.9



No.	P24h
Cuartil 1 (Q1) =	18.525
Mediana (Q2) =	28.85
Cuartil 3 (Q3) =	34.4
Rango intercuantil (RIC) =	15.88

Valores atípicos (VA):

$$VA < Q1 - 1.5 * RIC = -5.2875$$

$$VA > Q3 + 1.5 * RIC = 58.2125$$

De acuerdo con lo anterior, el rango intercuartil será desde -5.2875 hasta 58.2125. Por lo tanto, no se tienen datos de la muestra que se encuentren fuera del RIC determinado.

Estadísticamente, no se encontraron valores atípicos en la muestra, sin embargo, se tuvieron en cuenta otros aspectos como la ubicación de los movimientos en masa, dispersión entre umbrales de lluvia tal como se presenta a continuación y criterios de ingeniería.

5.2.3.7. Umbrales de lluvia

A partir del inventario de movimientos en masa y el cálculo de P24h y P15ant, se determinaron los umbrales de lluvia correspondientes. El umbral se construye a partir de una función de tipo lineal ($PT=b+m*P15ant$) entre la P24h y P15ant de cada evento, en el eje de abscisas se representa la lluvia de los 15 días antecedentes y en el eje de las ordenadas la precipitación máxima en 24 horas.

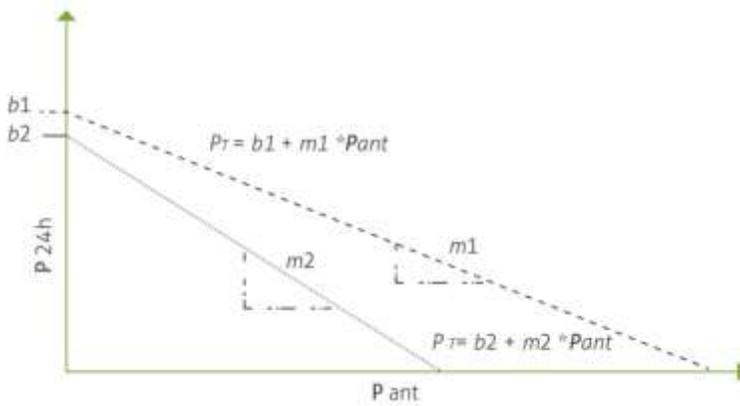


Figura 72 Funciones que representan los umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa

Fuente. Guía de zonificación de amenaza por movimientos en masa SGC - 2017

Se determinaron inicialmente todos los umbrales para los eventos registrados objeto de análisis.

Tabla 11 Umbrales de lluvia para los MM objeto de análisis

UMBRAL	FECHA MM	P(15ant)	P24h	FUENTE
1	20-Feb-02	37	27.1	SIMMA
2	11-Dec-10	52	14.4	
3	29-Feb-12	146.9	31.10	
5	4-Jan-20	75.6	32.8	
6	5-Mar-21	84.5	23.1	
7	28-Apr-21	84.4	30.6	
8	20-Apr-22	109.2	39.2	
9	26-Apr-22	108.7	39.2	
10	2-Jun-22	35.1	7.8	
11	15-Mar-22	78	19.9	

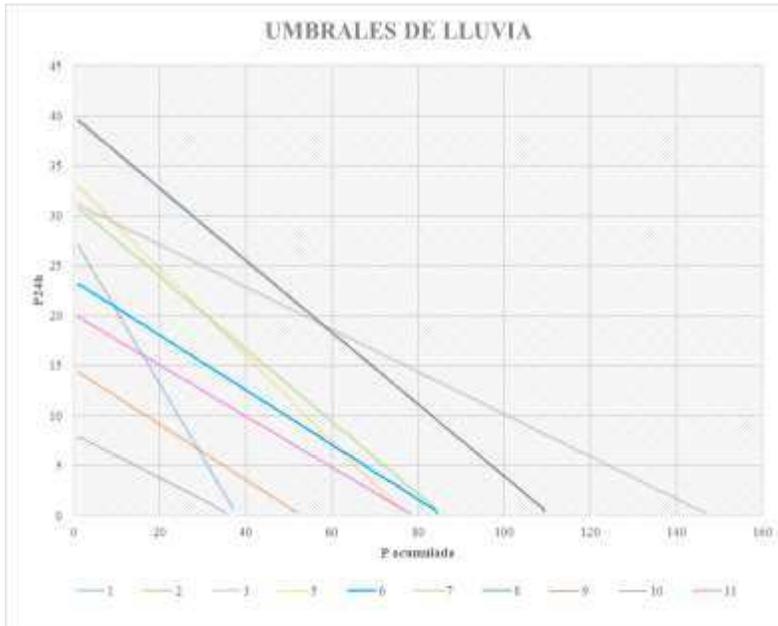


Figura 73 Umbrales de lluvia para los MM objeto de análisis

Como se observa en la gráfica anterior, se tienen umbrales muy dispersos entre sí con una diferencia máxima de P24h de 31.4 mm y P15ant de 111.8 mm por lo cual se genera bastante incertidumbre. Para efectos de lograr definir umbrales se eliminaron de la serie los registros del 20 de febrero de 2002, 11 de diciembre de 2010 y 6 de febrero de 2022. Los umbrales 1 y 2 se eliminan teniendo en cuenta que se encuentran significativamente alejados del área definida para el presente estudio. En cuanto al umbral 10 se elimina ya que se consideran valores muy bajos con respecto a los valores promedio y máximo de P24h y P15ant.

Por lo anterior, se han definido los umbrales de la siguiente manera:

Tabla 12 Umbrales definitivos para los MM objeto de análisis

UMBRAL	FECHA MM	P(15ant)	P24h	FUENTE
1	29-Jan-12	146.9	31.10	SIMMA
5	4-Jan-20	75.6	32.8	
6	5-Mar-21	84.5	23.1	
7	28-Apr-21	84.4	30.6	
8	20-Apr-22	109.2	39.2	
9	26-Apr-22	108.7	39.2	
11	15-Mar-22	78	19.9	CAMPO
P	98.19	30.84		



Figura 74 Umbrales de lluvia definitivos



Se han definido tres umbrales a los cuales se les ha asignado un grado de probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa tal como se describe a continuación.

- Umbral 1

El umbral No.1 corresponderá al umbral más bajo en la gráfica el cual hace referencia a los eventos del 15 de marzo de 2022. Se considera que por encima del umbral 1 es probable que la lluvia detone algún movimiento en masa de tipo deslizamiento en el área de estudio.

Por ende, el umbral en P24h y P15ant será:

$$P24h = 19.9 \text{ mm}$$

$$P15ant = 78 \text{ mm}$$

Representado por la siguiente ecuación:

$$P24h = -0.2551 * Pant + 20.155$$

- Umbral 2

El umbral No.2 corresponderá al umbral promedio de los determinados anteriormente. Se considera que por encima del umbral 2 es muy probable que se presenten movimientos en masa en el área de estudio.

Por ende, el umbral en P24h y P15ant será:

$$P24h = 30.84 \text{ mm}$$

$$P15ant = 98.19 \text{ mm}$$

Representado por la siguiente ecuación:



$$P_{24h} = -0.3141 * P_{ant} + 31.407$$

- Umbral 3

El umbral No.3 corresponderá al umbral más alto en la gráfica. Se considera que por encima del umbral 3 es inminente que la lluvia detone algún movimiento en masa de tipo deslizamiento en el área de estudio.

Por ende, el umbral en P24h y P15ant será:

$$P_{24h} = 39.20 \text{ mm}$$

$$P_{15ant} = 109.20 \text{ mm}$$

Representado por la siguiente ecuación:

$$P_{24h} = -0.3605 * P_{ant} + 40.018$$

Se resalta que, para los umbrales definidos, los eventos registrados corresponden a fechas en las cuales se asocian picos de lluvias dentro del comportamiento bimodal de precipitaciones en el país.

5.2.3.8. Probabilidad anual de excedencia de umbrales de lluvia

La probabilidad anual de excedencia se estima como la probabilidad de que un evento exceda una o más veces el umbral de lluvia en un periodo de retorno (SGC 2017).

La probabilidad anual de excedencia se determina usando un modelo de probabilidad de Poisson (SGC 2017).



- Probabilidad empírica – Distribución de Poisson

La probabilidad de excedencia del umbral de lluvias se puede calcular con base en la distribución de probabilidad de Poisson a partir de registros históricos y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$P(N \geq 1; t) = 1 - \exp(-t/\mu)$$

Donde:

N = Número de excedencias que ocurren en el tiempo t

μ = Promedio de excedencia del umbral en el tiempo t

t = tiempo

Se calculará la probabilidad de excedencia anual del umbral No.1 correspondiente al umbral característico en el área de estudio de El Hatillo.

En primer lugar, se determinaron el número de excedencias de umbral de lluvias en base a la precipitación máxima diaria desde el año 2012 a 2022. Para ello, se utilizó la serie de registros diarios de precipitación diaria en la cual se identificaron los valores que superan el umbral de lluvias No.1. Posteriormente se determinó la precipitación acumulada antecedente de 15 días y se verificó si se excede o no el umbral para las dos variables. Del ejercicio descrito se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13 Número de excedencias de umbral multianual

AÑO	# DE EXCEDENCIAS DE UMBRAL 1 POR AÑO
2012	3
2013	3



2014	4
2015	2
2016	2
2017	4
2018	5
2019	3
2020	3
2021	7
2022	6
PROMEDIO (μ) =	3.82

Por lo anterior las variables de entrada al modelo de Poisson serán:

$$\mu = 3.82$$

$$t = 1 \text{ año}$$

De acuerdo con lo anterior, la probabilidad de que se exceda anualmente el umbral de lluvias es:

$$P(R > RT) = 1 - \exp(-1/3.82)$$

$$P(R > RT) = 0.23 \rightarrow 23.04 \%$$

Posteriormente se deberá calcular la probabilidad de que se produzca un deslizamiento por excedencia del umbral ($P(L R > RT)$), sin embargo, para el presente estudio no será posible ya que no se cuenta con suficiente información de registros de deslizamientos con los cuales se pueda asociar a excedencias de umbral y por lo tanto se obtengan resultados de probabilidad confiables.



5.3.ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

La zonificación de amenazas por movimientos en masa se llevó a cabo aplicando la metodología propuesta en el capítulo 4, junto con revisión de literatura, información levantada en campo y gestión de conocimiento de los profesionales encargados de ejecutar este estudio, de tal manera que, se involucró la probabilidad espacial en el análisis de la amenaza y se elaboró diferentes tablas y mapas de ponderación de susceptibilidad específicas para el área de interés y los diferentes componentes trabajados.

En el presente estudio se asumió la probabilidad espacial como la susceptibilidad a movimientos en masa a partir de los factores condicionantes como unidades geológicas para ingeniería, elementos geomorfológicos, coberturas de la tierra y pendientes, y se tomó la precipitación como principal detonante de un movimiento en masa.

5.3.1. Zonificación de susceptibilidad

La susceptibilidad a los movimientos en masa que se asumió en el presente documento como la probabilidad espacial de la amenaza, se evaluó a partir de la aplicación de la herramienta Weighted Overlay de ArcGIS. Para el modelamiento de la susceptibilidad, el programa calcula los pesos de cada clase de las variables y factores condicionantes basado en la presencia o ausencia de los movimientos en masa dentro del área de interés.

Los factores condicionantes fueron definidos a partir del criterio de los profesionales encargados de su ejecución, trabajo interdisciplinario y la información obtenida en campo. Por tanto, para cada una de estas variables correspondientes a unidades geológicas para ingeniería, elementos geomorfológicos, coberturas de la tierra y pendientes, se elaboró diferentes tablas de ponderación de susceptibilidad y se realizó la respectiva representación espacial en un mapa.



5.3.1.1 Clasificación de susceptibilidad de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI)

El mapa de unidades geológicas para ingeniería obtenido tal como se describió en el numeral 5.2.1.2, contiene 7 unidades, lo cual permite realizar un análisis inicial de cálculo de los pesos de cada una de las unidades con base en la presencia y ausencia de deslizamientos. Teniendo en cuenta lo anterior, las unidades geológicas para ingeniería más susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa corresponden a los suelos transportados volcanoclasticos y suelos transportados coluviales, tal como se describe en la tabla 14 y la figura 74, donde se muestra la clasificación de susceptibilidad para las unidades geológicas para ingeniería y su respectiva justificación.

Tabla 14 Clasificación de susceptibilidad de las Unidades Geológicas para Ingeniería

Suelo	Nombre	Acronimo	Susceptibilidad	Justificación
Roca	Roca intermedia volcanoclastica	Riv	Baja	Roca masiva, resistente a la disgregación, procesos erosivos de baja intensidad.
Residual	Suelo residual volcanoclastico	Srv	Media	Materiales con intensos procesos de meteorización física y química.
Transportado	Suelo transportado volcanoclastico	Stv	Alta	Materiales no consolidados, con tamaños variables y meteorización moderada.
	Suelo transportado coluvial antiguo	Stca	Baja	Depositos generados a partir de antiguos procesos erosivos, cubiertos por vegetación.
	Suelo transportado coluvial	Stco	Alta	Materiales producto de la ocurrencia de movimientos en masa.
	Suelo transportado aluvial	Sta	Baja	Sedimentos transportados y depositados por la dinámica fluvial de los cauces activos e intermitentes.
Antropico	Suelo Antropico	Sa	Baja	Áreas intervenidas por actividades antropogénicas como suelos urbanos, centros poblados.

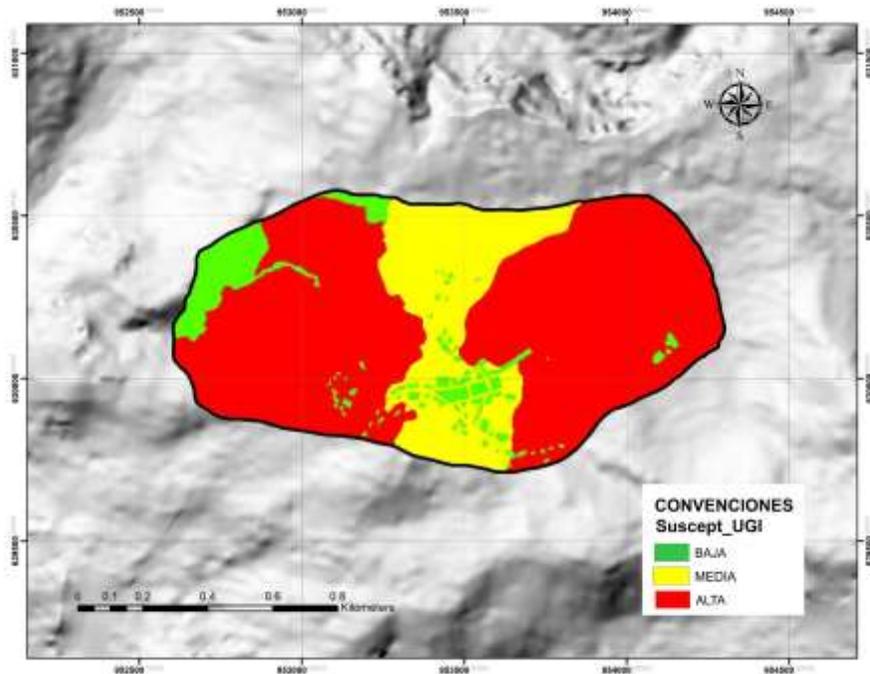


Figura 75 Mapa de Susceptibilidad de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI)

5.3.1.2 Clasificación de susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos

En el mapa de elementos geomorfológicos que se evidencia en el numeral 5.2.1.3, tiene un total de 10 unidades, de cada una se realizó el análisis inicial del cálculo de los pesos con base en la presencia y ausencia de deslizamientos, donde se identificó que los elementos geomorfológicos más susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos son las volcánico-denudacional que corresponden a geoformas generadas por volcanismo que han sufrido efectos de la denudación, para este caso ladera erosiva y ladera escarpada. A continuación, se presenta la tabla 15 y el mapa resultante de la estimación de la susceptibilidad a movimientos en masa por elementos geomorfológicos (figura 75).

Tabla 15 Clasificación de susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos

ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS				
Origen	Nombre	Acronimo	Susceptibilidad	Justificación
Denudacional	Depósitos coluviales	Dco	Baja	Topografía con pendientes moderadas, ocurrencia de procesos erosivos recientes.
	Deslizamiento Rotacional	Ddr	Alta	Topografía con pendientes altas a escarpadas, se generan en taludes conformados por materiales poco consolidados y estructura matrizsoportada
	Deslizamiento Rotacional Complejo	Ddrc	Alta	Topografía con pendientes altas a escarpadas, se generan en taludes conformados por materiales poco consolidados y estructura matrizsoportada
	Deslizamiento traslacional	Ddt	Alta	Se presentan en zonas de alta pendiente, sobre materiales con grado de meteorización moderada.
Fluvial	Cauce fluvial activo	Fca	Baja	Topografía plana asociada con procesos acumulativos.
	Plano o llanura de inundación	Fpi	Baja	Topografía plana asociada con procesos acumulativos e inundaciones.
Volcánico - Denudacional	Ladera Erosiva	Vle	Alta	Topografía con pendientes inclinadas a abruptas y con procesos erosivos intensos
	Ladera Ondulada	Vlo	Medía	Topografía con pendientes variables y longitudes de laderas largas
	Ladera Escarpada	Vles	Alta	Topografía con pendientes abruptas y con procesos erosivos intensos
Antrópico	Cima Explanada	Ace	Baja	Topografía con pendientes variables asociados a procesos de origen antrópico como asentamientos y cultivos

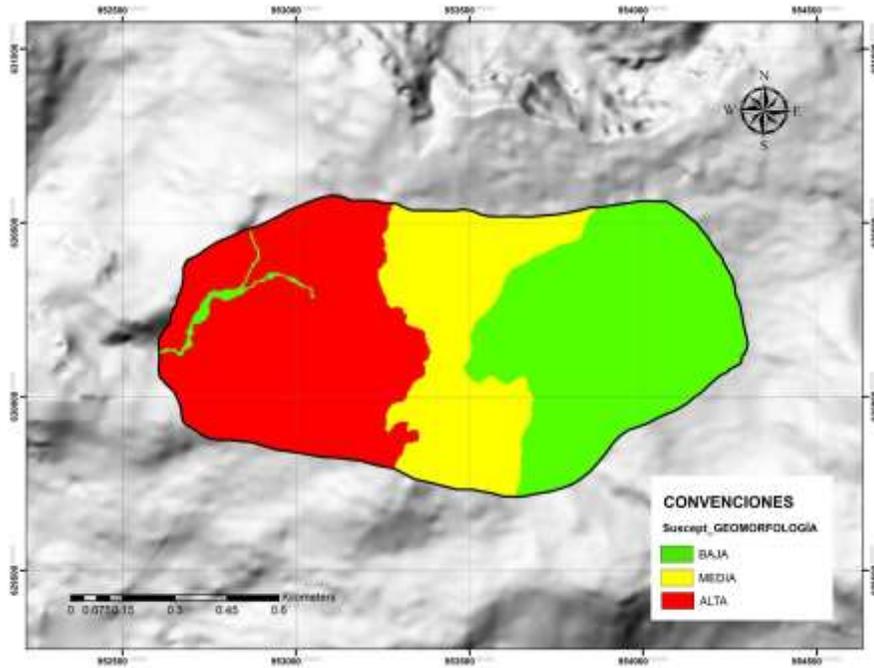


Figura 76 Mapa de Susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos

5.3.1.3 Clasificación de susceptibilidad por cobertura de la tierra

Uno de los factores condicionantes relevantes en la ocurrencia de movimientos en masa es la cobertura de la tierra. El factor de cobertura determina significativamente la estabilidad del suelo ya sea por efectos mecánicos o hidrológicos. En cuanto a factores mecánicos se puede asociar a estabilidad por procesos de enraizamiento, control de erosión, resistencia del sistema suelo edáfico-raíces y protección del suelo (Charman & Murphy 2000 - SGC 2017). Para el presente estudio se calcularon los pesos con base en la presencia y ausencia de deslizamientos, teniendo en cuenta el mapa de unidades de cobertura de la tierra el cual se describe en el numeral 5.2.1.5 y contiene un total de 17 unidades. En la tabla 16 y la figura 76 se muestran las unidades de cobertura de la tierra más susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa.

Tabla 16 Clasificación de susceptibilidad por cobertura de la tierra

NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD MOVIMIENTO EN MASA EL HATILLO-CONSACA		
ALTA	MEDIA	BAJA
MOSAICO DE CULTIVOS Y AREAS SEMINATURALES	PASTOS ENMALEZADOS	BOSQUE DENSO
MOSAICO DE CULTIVOS Y ESPACIOS NATURALES	TEJIDO URBANO DISCONTINUO	BOSQUE FRAGMENTADO
CULTIVOS PERMANENTES ARBUSTIVOS	CULTIVOS AGROFORESTALES	RED VIAL FERROVIARIA Y TERRENOS ASOCIADOS
BOSQUE FRAGMENTADO		
MOSAICO DE PASTOS Y CULTIVOS		
TIERRAS DESNUDAS DEGRADADAS		
MOSAICO DE CULTIVOS, PASTOS Y ESPACIOS NATURALES		
PASTOS LIMPIOS		
OTROS CULTIVOS TRANSITORIOS		
CULTIVOS PERMANENTES HERBACEOS		
MOSAICO DE CULTIVOS Y PASTOS		

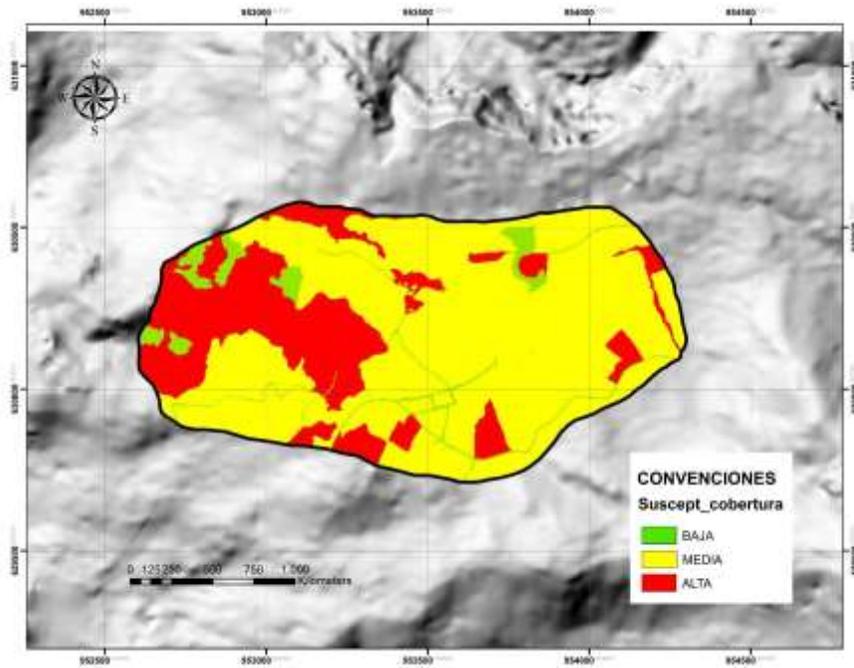


Figura 77 Mapa de Susceptibilidad por cobertura de la tierra

5.3.1.4 Clasificación de susceptibilidad por pendiente del terreno

La pendiente del terreno considerada como una variable geométrica derivada del Dem de 5 metros obtenido del IGAC y como un factor condicionante para el proceso de zonificación de movimientos en masa, teniendo en cuenta su relación directa con las tensiones de corte tangenciales y normales en los materiales superficiales y su influencia en la distribución del agua de escorrentía en la superficie del suelo.

De acuerdo con la guía del SGC 2017, se han agrupado tres grados de susceptibilidad acorde al grado de inclinación del talud o ladera de terreno (alta, media, baja), como se muestra en la tabla 17 dando como resultado el mapa de la figura 77.

Tabla 17 Clasificación de susceptibilidad de acuerdo con la pendiente del terreno

INCLINACIÓN	DESCRIPCIÓN	SUSCEPTIBILIDAD
0° - 2°	No hay denudación apreciable. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares. Susceptible a desarrollar procesos erosivos.	BAJA
2° - 4°		
4° - 8°	Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente soliflucción periglaciares, reptación y ocasionalmente deslizamientos. Susceptible a erosión y deslizamientos.	MEDIA
8° - 16°		
16° - 35°	Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.	ALTA
35° - 55°		
> 55°		

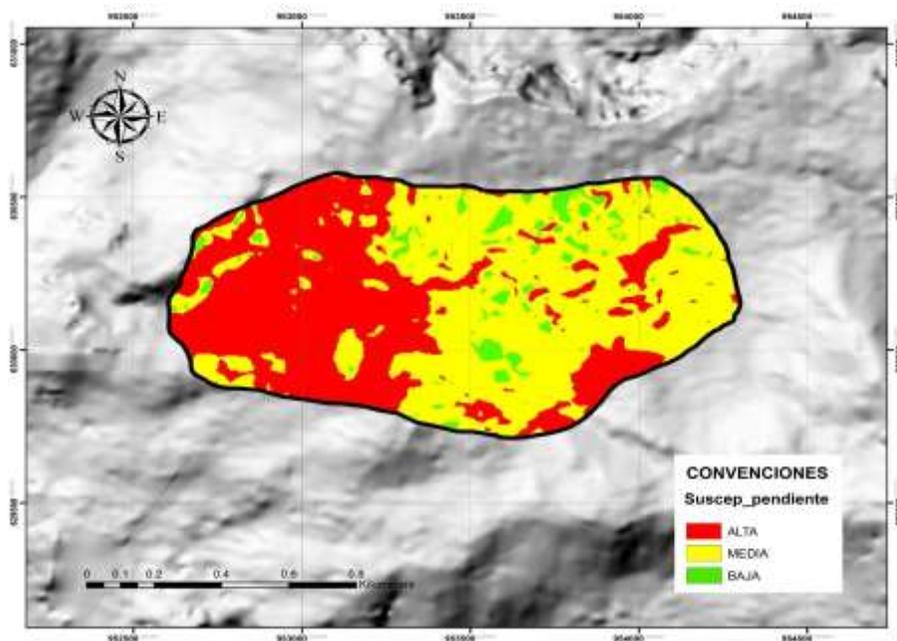


Figura 78 Mapa de Susceptibilidad por pendiente del terreno



5.3.2. Propuestas de ponderación de factores basadas en revisión de literatura

La zonificación de la susceptibilidad se obtuvo a partir del cálculo de los factores condicionantes como son unidades geológicas para ingeniería, elementos geomorfológicos, coberturas de la tierra y pendientes, a partir de dichos resultados se generaron seis escenarios en los cuales se ponderaron los factores condicionantes con un cierto grado de importancia en concordancia con revisión literaria y el criterio profesional. Los escenarios generados se presentan a continuación:

Tabla 18 Escenarios de ponderación en la estimación de susceptibilidad a movimientos en masa

ESCENARIO	PENDIENTE PESO (%)	GEOMORFOLOGÍA PESO (%)	UGI PESO (%)	COBERTURA PESO (%)	TOTAL %
Escenario 1	35	30	15	20	100
Escenario 2	30	35	20	15	100
Escenario 3	35	25	20	20	100
Escenario 4	25	20	25	30	100
Escenario 5	30	20	20	30	100
Escenario 6	40	15	30	15	100

5.3.3. Generación de escenarios de susceptibilidad

A partir de los escenarios planteados anteriormente se procedió a generar los mapas resultado del procesamiento en software de SIG. Cada escenario se contrastó con el mapa de inventario de movimientos en masa con el fin de realizar un análisis de porcentaje de acierto específicamente en las zonas de susceptibilidad media y alta.

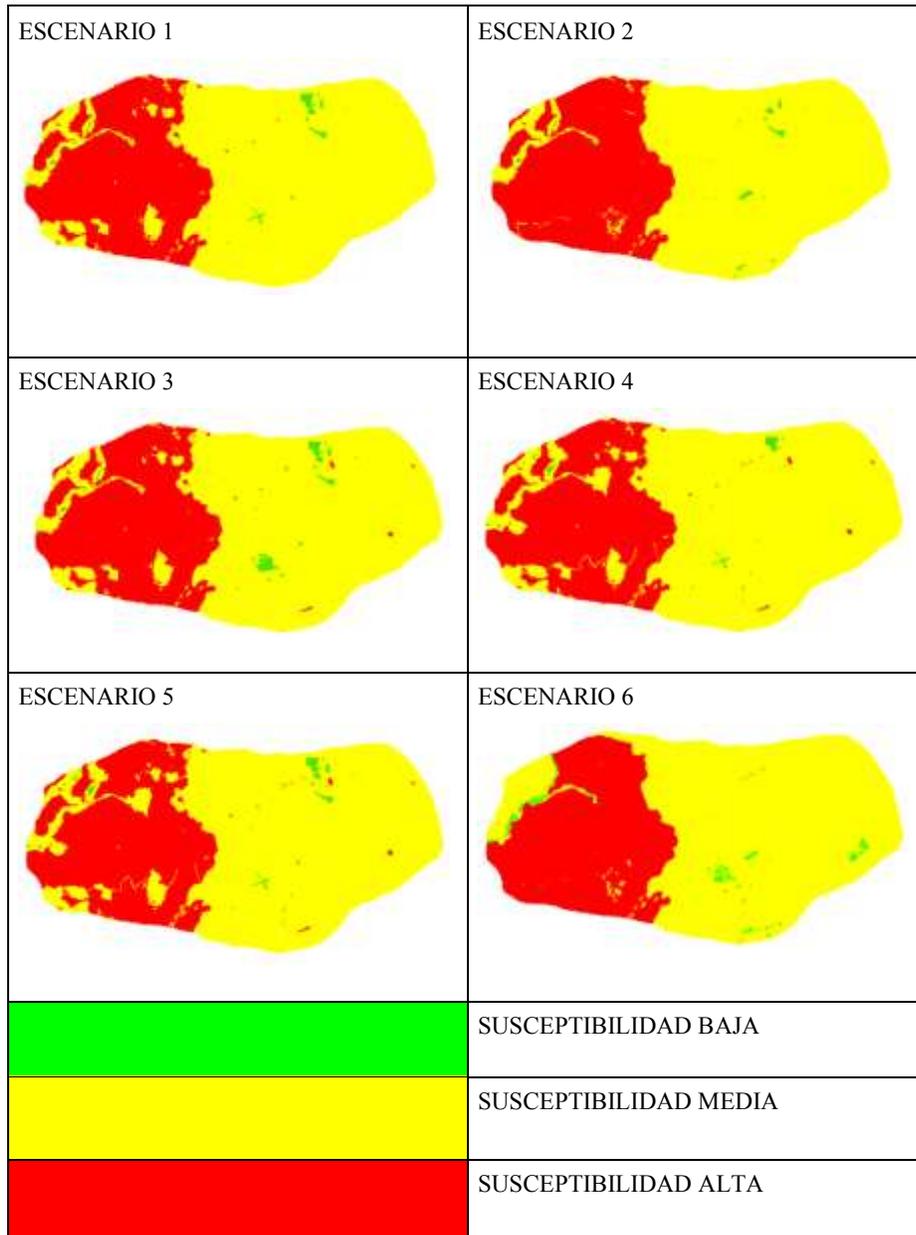


Figura 79 Mapas de resultados de escenarios de Susceptibilidad



Posteriormente se realizó un análisis de porcentaje de acierto contrastando el mapa de inventario de movimientos en masa localizados específicamente en zonas de susceptibilidad media y alta.

Tabla 19 Valoración de los diferentes escenarios de susceptibilidad a movimientos en masa

MM	ESCENARIOS					
	1	2	3	4	5	6
1	A	A	A	A	A	A
2	A	A	A	A	A	M
3	A	A	A	A	A	M
4	M	M	M	M	M	M
5	A	A	A	A	A	A
Acierto MM Media	1	1	1	1	1	3
Acierto MM Alta	4	4	4	4	4	2
Total MM	5	5	5	5	5	5
% Acierto susceptibilidad media	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	60,00%
% Acierto susceptibilidad alta	80,00%	80,00%	80,00%	80,00%	80,00%	40,00%

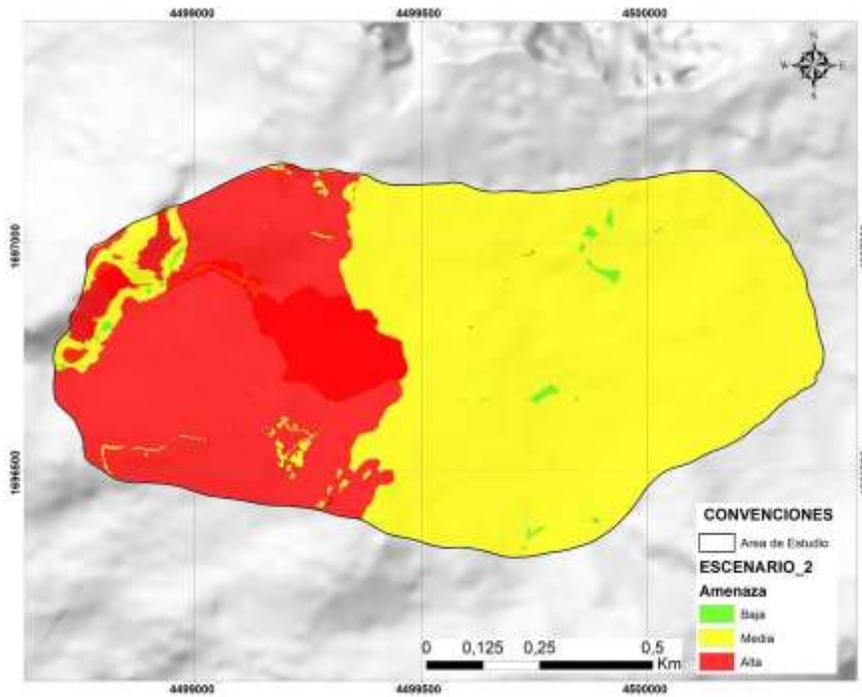


Tal como se muestra en la tabla anterior, los escenarios de ponderación en la estimación de susceptibilidad a movimientos en masa planteados no variaron significativamente, sin embargo, los escenarios que mejor se ajustan a los eventos presentados en la vereda El Hatillo del municipio de Consacá son los escenarios 1, 2, 3 y 6 donde el condicionante más relevante es la pendiente y la geomorfología del terreno.

Teniendo en cuenta que cada variable dentro de la función de la susceptibilidad representa una incertidumbre y que los porcentajes de acierto o ajuste son similares, se escogió el escenario dos debido a que representa el escenario con mayor porcentaje de acierto y con mejor distribución espacial respecto a los deslizamientos identificados en la zona de estudio, obteniendo de esta forma la zonificación de la susceptibilidad a los movimientos en masa.

5.3.4. Zonificación de susceptibilidad general

A continuación, se muestra el mapa resultante de la selección del escenario de susceptibilidad con mayor porcentaje de acierto y que mejor representa la distribución de los movimientos en masa existentes en la zona de estudio. La distribución de susceptibilidad comparada con los movimientos en masa corresponde a un 80% de acierto con susceptibilidad alta y un 20% con susceptibilidad media.



Comentado [LR2]: Ajustar con infraestructura

Figura 80 Mapa Zonificación de susceptibilidad relativa por movimientos en masa.

5.3.5 Delimitación y zonificación de amenaza por movimientos en masa escala básica

A partir de los análisis y resultados obtenidos de la zonificación de susceptibilidad a los movimientos en masa con base en los factores condicionantes correspondientes a unidades geológicas para ingeniería, elementos geomorfológicos, coberturas de la tierra y pendientes, y tomando la precipitación como principal detonante, se procedió con la elaboración de la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:5000.

5.3.5.1 Zona de amenaza alta

Esta zona se caracteriza por su alta susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa, por lo cual existe una alta probabilidad de que dichos eventos se generen en el área de



estudio detonados por lluvias críticas iguales o superiores al umbral No 3, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio anual.

La zona de amenaza alta cubre un área aproximada de 39.4 ha, que corresponde al 35.6% del área total de la zona de estudio, dicho sector se caracteriza por presentar laderas de longitudes moderadas a extremadamente largas, con pendientes muy inclinadas a escarpadas. Los materiales presentes en estas zonas corresponden principalmente a suelos transportados volcanoclasticos y en menor proporción a suelos transportados coluviales y suelos antrópicos.

De igual manera, algunos de los factores que han contribuido a que este sector sea caracterizado como amenaza alta, son el desarrollo de actividades antrópicas inadecuadas como la deforestación y emplazamiento de cultivos intensivos de caña, café, cítricos, etc.; apertura de vías sin diseños técnicos y sin obras de estabilidad y de drenaje; saturación del suelo asociada con la falta de estructuras hidráulicas de drenaje y vertimientos directos sobre las laderas; todos estos factores se identifican en la zona y aportan significativamente en el incremento de los procesos erosivos que se presentan.

5.3.5.2 Zona de amenaza media

Esta zona se caracteriza por una moderada susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa, por lo cual es probable que se generen dichos eventos dentro del área de estudio detonados por lluvias críticas iguales o superiores al umbral No 2, al menos una vez, en un periodo de recurrencia promedio anual.

La zona de amenaza media cubre un área aproximada de 70.6 ha, que corresponde al 63.9% del área total de la zona de estudio, dicho sector se caracteriza por presentar laderas de longitudes cortas a muy largas, con pendientes moderadas a inclinadas. Los materiales presentes en estas zonas corresponden principalmente a suelos residuales volcanoclasticos, suelos transportados de coluvial antiguo y en menor proporción a suelos antrópicos.

Teniendo en cuenta la geomorfología de este sector, no se descarta la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa superficiales, debido a que en esta área se desarrollan cortes sub-verticales en taludes de altura mayor a 3 metros para apertura de vías y emplazamiento de viviendas; vertimientos directos sobre las laderas e incremento de la frontera agropecuaria con cultivos de caña, café, etc.

5.3.5.2 Zona de amenaza baja

Esta zona se caracteriza por una baja susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa, cubre un área aproximada de 0.55 ha, que corresponde al 0.50% del total del área de estudio, está asociada principalmente con zonas planas y de pendiente baja a moderada donde no se esperaría que se detonen procesos de movimientos en masa.

A continuación, se presenta el mapa resultante de la delimitación y zonificación de amenaza por movimientos en masa en la vereda El Hatillo, municipio de Consacá a escala 1:5000.

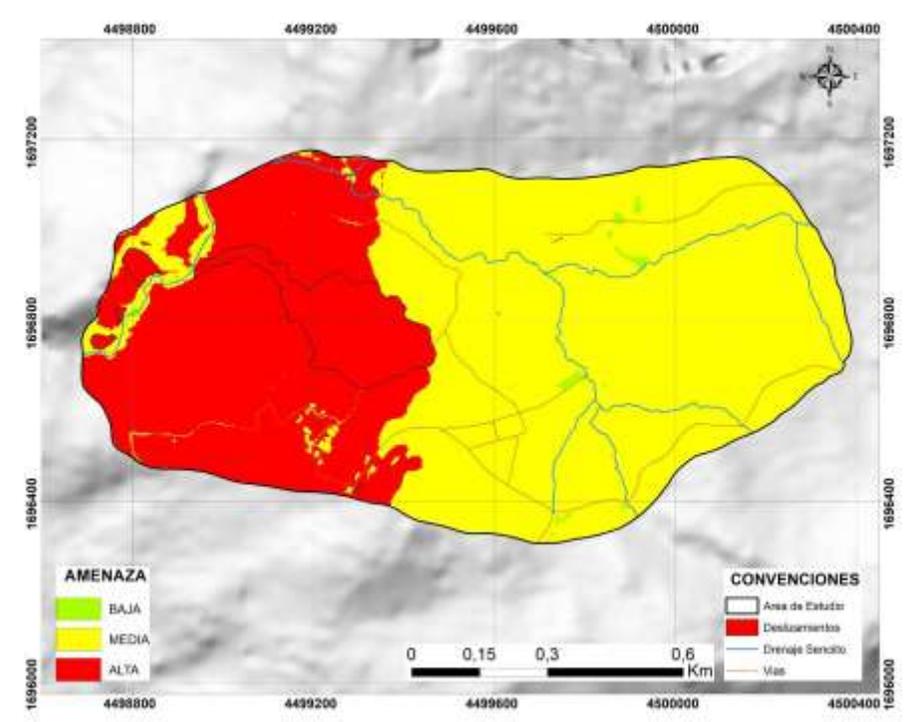


Figura 81 Delimitación y zonificación de amenaza por movimientos en masa.

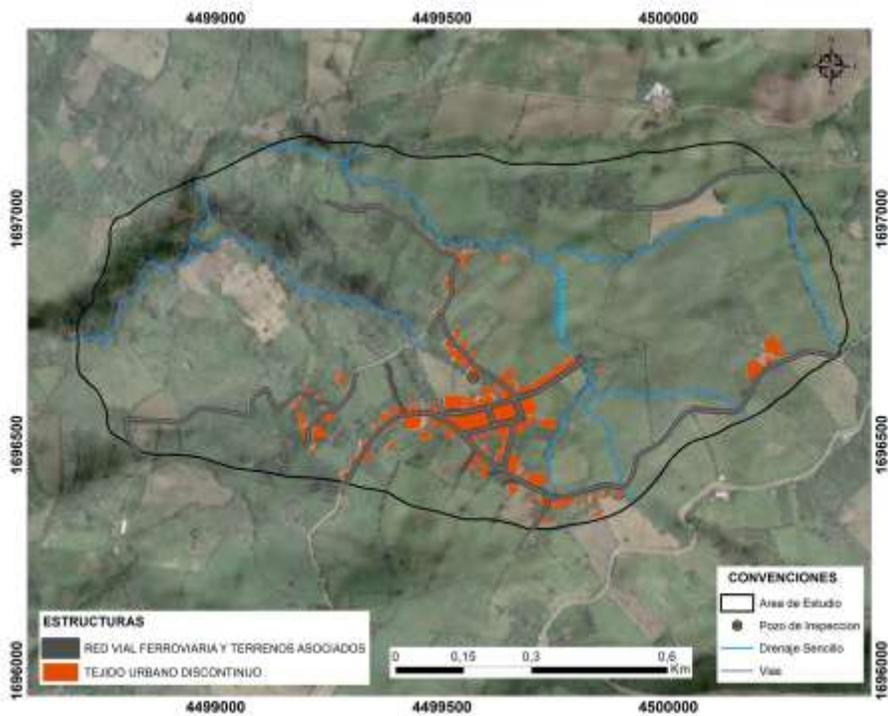
5.3.6 Áreas en condición de riesgo y estructuras expuestas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la zonificación de amenaza por movimientos en masa (figura 81) y de manera complementaria al presente estudio, se identificó la infraestructura expuesta a la amenaza alta para identificar las áreas en condición de riesgo en

Comentado [LR3]: Ajustar incluyendo infraestructura

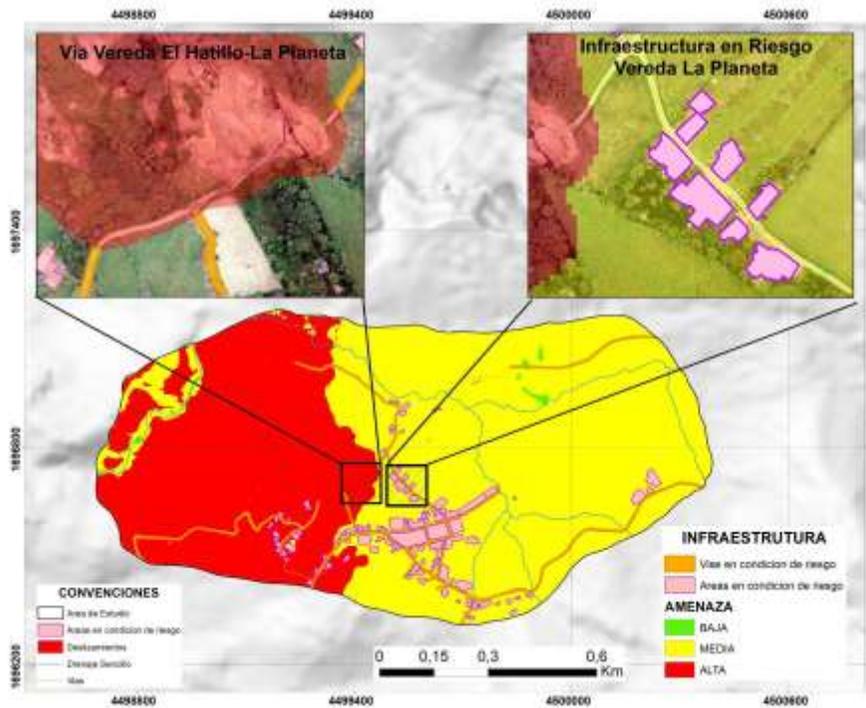
la zona de estudio, entre los que se encuentran viviendas, una cancha para deporte, una cámara de agua y la vía que comunica la vereda El Hatillo con la vereda La Planeta, lo cual se complementa con registro fotográfico para evidenciar el estado de estos.

A continuación, se presenta en las figura 82 la localización de la infraestructura expuesta en la zona de estudio y en la figura 83 los elementos expuestos en la zonas identificadas como amenaza alta.



Comentado [LR4]: Colocar el ortofotomosaico

Figura 82 Mapa de estructuras expuestas identificadas en la zona de estudio



Comentado [LR5]: Indicar las viviendas de la vereda La Planeta
 Revisar puntos amarillos en La Planeta, deben quedar rojos o con infraestructura superpuesta

Figura 83 Mapa de áreas en condición de riesgo identificadas en la zona de estudio

5.3.6.1 Viviendas

En campo se evidenciaron grietas en techos, paredes y pisos de la mayoría de las viviendas que se encuentran en la vereda La Planeta, las cuales están construidas en estructuras simples con materiales como ladrillo y concreto, sin tener en cuenta las normas mínimas de construcción (por ejemplo, la norma sismo resistente NSR10), por lo anterior y teniendo en cuenta que la zona se categoriza en amenaza alta, se considera que sus habitantes se encuentran en condición de riesgo, por lo cual resulta necesario tomar medidas de reducción del riesgo.

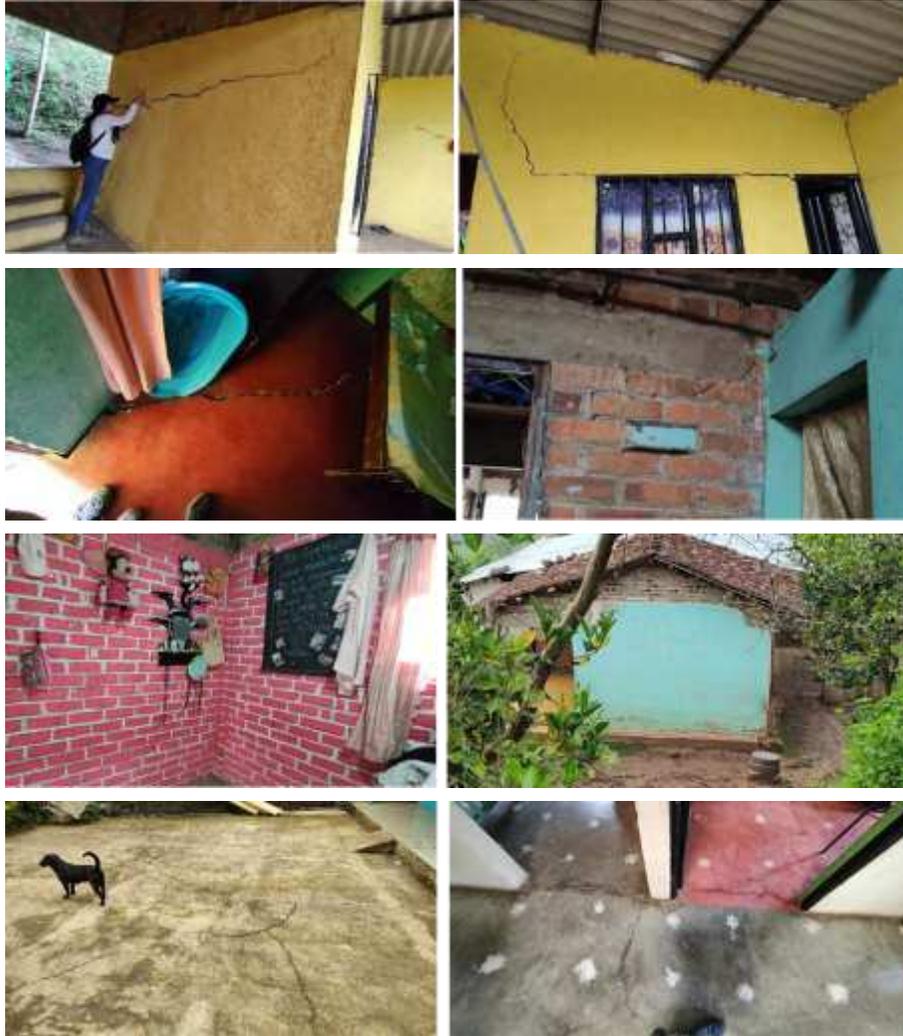




Figura 84 Registro fotográfico que evidencia las afectaciones en las viviendas de la vereda La Planeta.

5.3.6.1 Cancha para deporte

Se evidencia hundimiento y separación de las baldosas en una de las esquinas de la cancha para deporte, lo cual indica movimientos diferenciales en la zona.



Figura 85 Hundimiento y separación de baldosas en la cancha para deporte.

5.3.6.1 Cámara de agua, tubería y vía veredal

Se identifica tubería y una cámara de agua en inadecuadas condiciones, las cuales han estado haciendo vertimientos directos sobre la ladera, aportando significativamente en la saturación del suelo y el aumento de procesos erosivos, estos vertimientos se unen aguas abajo con una quebrada sin nombre la cual desemboca en el río Guáitara.

En este mismo punto hubo pérdida total de banca a causa del deslizamiento rotacional complejo con comportamiento retrogresivo que se presentó el 15 de marzo de 2022, dicha vía comunicaba a la vereda La Planeta con la vereda El Hatillo y consecuentemente con el

casco urbano del municipio de Consacá, inhabilitando completamente el paso de vehículos y motocicletas, dejando prácticamente incomunicados a los habitantes del sector.



Figura 86 Cámara de agua en inadecuadas condiciones.



Figura 87 Deslizamiento rotacional complejo, donde se encontraba la vía que comunica a la vereda La Planeta con la vereda El Hatillo, se evidencia saturación del suelo y vertimientos directos a la ladera.

Comentado [LR6]: Es la misma tubería que llega al mm ppa?



Figura 88 Vertimientos sobre la ladera y saturación del suelo.

6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Las consideraciones geológico-geomorfológicas con énfasis en el comportamiento geotécnico del material en la zona de estudio se realizaron a partir de inspecciones visuales de campo, por lo cual no reemplaza los estudios de investigación del subsuelo y los ensayos de laboratorio complementarios recomendados para este tipo de estudios, los cuales no se realizaron por limitaciones de tiempo y presupuesto.

No se realizaron modelaciones fluido-dinámicas que permitan conocer las alturas y velocidades de un posible flujo que se genere por efecto de precipitaciones máximas y volúmenes acumulados de agua en la masa movilizada desde la parte alta y media de la zona de estudio y que pueda transitar hacia la parte baja, teniendo en cuenta que en la zona encañonada no se evidencio infraestructura expuesta que pudiera estar en condición de riesgo. Sin embargo, se observó en campo una masa con menor cantidad de agua que avanza de manera intermitente aguas abajo del valle encañado donde se transportan los materiales solidos producto de los deslizamientos.

Si bien esta información puede servir para tomar decisiones, se debe tener en cuenta que la información presentada presenta limitaciones y por lo tanto se recomienda complementar con análisis geotécnicos insitu, sin embargo, por parte del equipo técnico de gestión de riesgo de Corponariño, se realizó la identificación y descripción de los factores condicionantes y detonantes establecidos en las metodologías para este tipo de estudios.



7. CONCLUSIONES

Se identificó que en el área de interés se presentan 7 unidades de geología para ingeniería, de las cuales, los suelos transportados volcanoclásticos y suelos transportados coluviales, son más susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa, teniendo en cuenta que son conformados por materiales poco consolidados que varían en su tamaño que entre bloques, grava, arena y finos, la matriz tiene textura areno-arcillosa, con plasticidad media, permeabilidad baja y saturación alta.

En cuanto a los elementos geomorfológicos se identificaron un total de 10 unidades, siendo las más propensas a la generación de movimientos en masa las geoformas generadas por volcanismo y que han sufrido efectos de denudación correspondientes a laderas erosivas y laderas escarpadas, con pendientes que varían de inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas y presentan procesos erosivos intensos asociado con el desarrollo de actividades antrópicas como cultivos de caña y café.

La zonificación de amenaza contempla áreas con susceptibilidad alta ante la ocurrencia de movimientos en masa de tipo deslizamientos traslacionales y rotacionales, son detonados principalmente por lluvias críticas que superan los umbrales de lluvia.

El movimiento en masa más representativo del área de estudio se define como un deslizamiento rotacional complejo, el cual se encuentra altamente afectado por los vertimientos directos en el escarpe del deslizamiento principal que aporta significativamente en la saturación del suelo y en el avance de los procesos erosivos, afectando significativamente la vía que comunica a la vereda La Planeta con la vereda El Hatillo y consecuentemente con el casco urbano del municipio de Consacá, impidiendo de esta forma el tránsito de vehículos y motocicletas.

Las afectaciones en la infraestructura de las viviendas de la vereda La Planeta, representadas en agrietamientos a nivel del piso, paredes y techo, se encuentran relacionados con la alta susceptibilidad que presenta la zona en cuanto a unidades geológicas superficiales, elementos geomorfológicos, cobertura y uso del suelo y altas pendientes, no obstante, el área donde se ubican las viviendas de vereda La Planeta, no tienen una relación directa con el movimiento en masa retrogresivo compuesto.

Comentado [LR7]: Revisar junto con las recomendaciones, si estan de acuerdo o tienen alguna observación.



En cuanto a las coberturas de la tierra se identificó que, los cultivos permanentes herbáceos como la caña de azúcar ocupan la mayor parte del área de estudio. En la zona donde está localizado este monocultivo hay sobreuso del suelo, así mismo, por sus características morfológicas y edáficas es frecuente la baja fertilidad y poca profundidad, estos suelos son susceptibles a soportar intervenciones para establecimiento de cultivos, ocasionando a futuro posibles deslizamientos.

En cuanto a las condiciones de la zona de estudio, específicamente en la zona de amenaza alta donde se presentan procesos erosivos intensos, se determina que, la ocurrencia de dichos eventos se debe en gran parte a la ausencia de cobertura vegetal boscosa, la cual deberá reorientarse al establecimiento de cultivos agrícolas y técnicas de manejo de la ganadería, así mismo, actividades antrópicas inadecuadas como la deforestación y ampliación de la frontera agrícola y ganadera, han generado condiciones edáficas o de suelo que favorecen el riesgo de nuevos movimientos en masa, por esta razón es importante tener en cuenta que la vocación del suelo en la zona de estudio es de tipo forestal, para la conservación de bosques primarios y secundarios.

En relación al análisis hidrológico, se obtuvieron tres categorías de umbrales de lluvia asociados a eventos de movimientos en masa que ocurrieron en el municipio de Consacá y específicamente en el área de estudio definida. El umbral No.1 está asociado al movimiento en masa del día 15 de marzo de 2022 en la vía que comunica a la vereda La Planeta con la vereda El Hatillo, dicho evento afectó significativamente a la comunidad al impedir el paso de vehículos y motocicletas. Posteriormente, los umbrales 2 y 3 representan el grado de probabilidad de que se presente un movimiento en masa, siendo el umbral No.3 el límite más crítico en un evento de lluvia. Cabe resaltar que, cualquier lluvia que supere el umbral No.1 se considerará como un potencial detonante para la ocurrencia de un movimiento en masa. La probabilidad evidentemente se aumenta a medida que las características de la lluvia superen los umbrales definidos.

Por otra parte, no fue posible establecer un periodo de retorno de ocurrencia de movimientos en masa por detonante lluvia, debido a que no se cuenta con la información suficiente (registro histórico de movimientos en masa en el área de estudio) con la cual se logre correlacionar el número de veces en el año que se superan los umbrales de lluvia. Sin



embargo, se tuvo el alcance para determinar el periodo de retorno de umbral de lluvia con base en el registro histórico de precipitación. Teniendo en cuenta lo anterior, el umbral se excede en promedio, cuatro veces al año en fechas asociadas a periodos lluviosos con una probabilidad de ocurrencia del 23.04%, por lo tanto, se concluye que, es posible que la ocurrencia de movimientos en masa se presente por lo general en dichos periodos en los cuales las precipitaciones se intensifican.

Teniendo en cuenta el principio de gradualidad mencionado en el Decreto del 2015, la zonificación de amenaza por movimientos en masa resultante del presente estudio sirve de insumo para la priorización de los estudios detallados a escala 1:2000 y/o 1:5.000, lo cual permitirá tomar medidas estructurales de mitigación.



8. RECOMENDACIONES

Con base en el resultado del presente estudio se pueden tomar medidas de mitigación no estructurales, orientadas a regular el uso, la ocupación y el aprovechamiento del suelo mediante la determinación de normas urbanísticas, proyectos para la implementación de sistemas de alertas tempranas, así como la socialización y apropiación cultural de los principios de responsabilidad y precaución de la gestión del riesgo de desastres. En este sentido se detallan las siguientes recomendaciones:

- Es necesario que la Alcaldía Municipal de Consacá tome medidas de restricción del uso del suelo en las zonas consideradas como amenaza alta, para el establecimiento de infraestructura y actividades agropecuarias intensivas. De igual manera es necesario que el municipio haga cumplir lo establecido en su esquema de ordenamiento territorial, así como las obligaciones relacionadas con la protección del ambiente y la gestión del riesgo de desastres en el municipio de Consacá.
- Teniendo en cuenta la magnitud del deslizamiento rotacional complejo identificado en la vía que comunica la vereda La Planeta con la vereda El Hatillo, se recomienda tomar medidas de reducción del riesgo prioritarias sobre la corona del deslizamiento y la ladera, las cuales deberán estar enfocadas en el manejo de aguas de escorrentía y sobre el manejo adecuado de los vertimientos que actualmente se realizan directamente en la ladera, con el fin de reducir los efectos generados por los procesos erosivos, la saturación del suelo, la formación de surcos y cárcavamiento. En relación a lo anterior, se recomienda complementar la conducción del descole de los vertimientos de la vereda El Hatillo a una distancia mayor a 50m del sitio actual; el diseño y materiales de la infraestructura que se requiera deberá ser analizada y viabilizada por parte de ingenieros civiles, así mismo deberá corresponder a lo que se tenga definido en el PSMV o ajustarlo si es necesario. Así mismo, se recomienda realizar zanjas de coronación o cunetas de coronación en la parte alta de este deslizamiento, que permitan conducir las aguas hacia la parte externa de la superficie actual de deslizamiento junto con la implementación de plástico de polietileno. Las medidas mencionadas son provisionales y temporales, se recomiendan porque podrían reducir el avance del



proceso erosivo mientras se realizan estudios a mayor detalle que permitan determinar si el riesgo es mitigable o no.

- Se recomienda implementar sistemas de monitoreo de alertas tempranas para conocer el avance del deslizamiento rotacional complejo teniendo en cuenta su carácter retrogresivo y considerando que las grietas pueden significar la continuación de este. Si se tienen dificultades técnicas y/o presupuestales, se puede realizar el monitoreo mediante métodos artesanales que pueden aplicar para monitorear el avance de las grietas, con base en literatura relacionada y lo establecido en la guía para el Desarrollo de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) de la UNGRD, con el fin de reducir el riesgo de desastre y tomar las medidas que se consideren pertinentes. Así mismo, se pueden realizar sobrevuelos periódicos con Drone que permitan identificar y hacer seguimiento al avance de los procesos erosivos.
- Considerando la cantidad de viviendas en condición de riesgo identificadas en el presente estudio, es necesario realizar un seguimiento a grietas en infraestructura y establecer un inventario de familias afectadas. Teniendo en cuenta el principio de precaución, se podría considerar un proceso de reubicación de las familias que habitan en condición de riesgo, hasta que se realicen estudios con mayor detalle que permitan identificar si el riesgo que presentan es mitigable o no.
- Se debe implementar señalización preventiva, restrictiva e informativa, indicando la amenaza que se presenta en el deslizamiento ocurrido en la vía que comunica a la vereda La Planeta con la Vereda El Hatillo y restringir totalmente la disposición de residuos sólidos, plásticos y escombros sobre la ladera.
- Teniendo en cuenta que la ausencia de coberturas de la tierra provoca una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa, se recomienda incrementar los procesos de restauración ecológica en la zona, a través del establecimiento de coberturas vegetales con especies forestales y arbustivas en áreas alledañas a las coberturas identificadas como tierras desnudas y degradadas, con el fin de aumentar relictos de bosque natural, lo cual contribuyen a la estabilidad y sostenibilidad del suelo.



- En la zona de parcelas agrícolas identificadas en el área de estudio, se recomienda fortalecer los arreglos agroforestales existentes con asocio de cultivos como el café con sembrío de plátano, frutales y maderables establecidos como cerca viva o internos y árboles silvestres. De igual manera es favorable el establecimiento de sistemas de manejo de la tierra como son los arreglos silvopastoriles, donde se obtienen productos del componente arbóreo o forestal para la obtención de madera, alimento y forraje para los animales.
- En cuanto a la cobertura relacionada con el sistema productivo, se recomienda el establecimiento de sistemas agroforestales, conformado por cultivos de café con sembrío de plátano, frutales y maderable establecidos como cerca viva o internos. De igual manera es favorable el establecimiento de sistemas de manejo de la tierra como son los sistemas silvopastoriles, donde se obtienen productos del componente arbóreo o forestal para la obtención de madera, alimento y forraje para el ganado.
- Se recomienda realizar el constante mantenimiento de las alcantarillas, cunetas y estructuras hidráulicas en las veredas y a lo largo de las vías, con el fin de garantizar un adecuado descole de aguas lluvia, evitando la sobresaturación del suelo, inundaciones y vertimientos directos sobre los taludes inestables.
- Es necesario que por parte de la alcaldía municipal de Consacá se realice campañas educativas para concientizar a la comunidad sobre el manejo y aprovechamiento racional de los recursos naturales y el ambiente, indicando en forma técnica el uso adecuado y manejo de suelos, aguas y bosques, los tipos de cultivos favorables para el control y mitigación de procesos erosivos, entre otros aspectos; así mismo, es necesario que la comunidad conozca sobre las amenazas presentes en su territorio, para que puedan tomar acciones preventivas y correctivas que les permitan reducir el riesgo de desastres.
- Con base en lo establecido en el Decreto 1077 de 2015, para las zonas identificadas como amenaza media y alta sin ocupar que se proponga su desarrollo por parte del municipio, deberán realizarse previamente los estudios detallados que trata el decreto en mención, al catalogarse como áreas en condición de amenaza.



- Con base en la zonificación de amenaza por movimientos en masa resultante del presente estudio, se deberán realizar los estudios detallados a escala 1:2000, lo cual permitirá tomar medidas estructurales de mitigación, a partir del análisis de estabilidad de taludes, que podrán determinar si con la construcción de obras civiles convencionales o de bioingeniería, el evento es mitigable o no mitigable.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía. (2017). Movimientos En Masa. In *Alcaldía de Medellín* (Vol. 1). Medellín: Alcaldía de Medellín.
- Böhner, J., & Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *SAGA - Analyses and Modelling Applications*, 115(January 2002), 13–28.
- Carvajal, J. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- CVC, CRQ, MINAMBIENTE, & MINHACIENDA. (2016). Geología De La Cuenca Del Río La Vieja. *Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Del Río La Vieja*, pp. 1–100. Cali, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
- Díaz, Á., & Mercado, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG Determination of curve number in Betancí subwatershed (Córdoba , Colombia) through remote sensing and GIS. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452–470. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/852/85252030011.pdf>
- Geler, T., Penteadó, A., & Perez, A. (2017). LS-Factor analysis in different prediction models of water soil erosion. *Observatorio Geográfico America Latina*, 5, 226–233. Retrieved from <http://observatoriongeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevastecnologias/Sig/18.pdf>
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Retrieved from http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561fc16b8037522&groupId=762
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad- Resumen para responsables de politicas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de*



- Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* (C. . Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L. L. White, Eds.). Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- Lince, L., Castro, A., Castaño, W., & Torres, F. (2017). *Zonificación de la susceptibilidad por Movimientos en Masa de suelo en la Región Cafetera de Caldas*. 68(1), 73–82.
- López, C. (2020). Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental. *Universidad Católica Del Norte*, p. 49. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20684.44161>
- MADS. (2014). *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de cuencas Hidrográficas POMCAS. Aneo B. Gestión del Riesgo* (Vol. 1, p. 54). Vol. 1, p. 54. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Marchi, L., & Dalla Fontana, G. (2005). GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 48(2), 218–228. <https://doi.org/10.1007/s00254-0051292-4>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Rengifo, O., & Jennifer, S. N. (2012). Modelling potential debris flows from SRTM data in the upper Chama river watershed, northwestern Venezuela. *Revista Geográfica venezolana*, 53(1), 93–108.
- Sarria, F. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. Universidad de Murcia, departamento de Geografía. *Sistemas de Información Geográfica*, p. 239. Retrieved from <https://bit.ly/3sPPZ11>
- SGC. (2013). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por Movimientos en Masa. Escala detallada. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). Bogotá, D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2015a). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*. (p. 41). p. 41. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2015b). *Zonificación Geomecánica y de Amenaza por Movimientos en masa del Municipio de Popayán- Cauca* (p. 801). p. 801. Popayán, Cauca: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2017). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000* (p. 218). p. 218. <https://doi.org/10.1002/chem.201301917>
- SGC, & MINMINAS. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. In *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. <https://doi.org/10.32685/9789585978218>



- Zafra, Y. (2018). Manual Para El Postproceso De Imágenes Obtenidas a Partir De Una Aeronave Tripulada Remotamente (Drone) En Los Software Agisoft Photoscan Y Pix4D. *Invias – Universidad Distrital Francisco José De Caldas*, p. 96. Retrieved from <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14055>
- INGEOMINAS (1991). Geología de la Plancha 429 Pasto, escala 1:100.000
- INGEOMINAS (1991). Memoria Explicativa Geología de la Plancha 429 Pasto, escala 1:100.000
- CORPONARIÑO (2022). Estudio básico para la zonificación de amenaza por movimientos en masa en la microcuenca de la quebrada Santa Rosa ubicada en el municipio de Colón Génova – Nariño, escala 1:25.000.
- SGC (2019). Zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo físico por movimientos en masa escala 1:2000. Zona 11-12- Tejares – Loma El Pastel – Túnel (Oriental y Occidental) municipio de Popayán.
- SGC (2020). Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de Rosas – Cauca escala 1:25.000
- Jaiswal, P., & Westen, C. J. (2009). Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. *GEOMORPHOLOGY 112*, 96 - 105.