

**Modelo de zonificación en tiempo real de amenazas por deslizamientos detonados por
lluvia para el municipio de Manizales-Caldas**

Andrés Felipe Osorio Bastidas

Propuesta de trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en sistemas de Información Geográfica

Director (a):

Ing MsC. Omar Castrillón Osorio

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2023

RESUMEN

Este estudio se enfoca en demostrar la utilidad de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la zonificación de amenazas geológicas, específicamente deslizamientos causados por lluvias, con la capacidad de actualizar de forma continua y en tiempo real la zonificación de las amenazas, que también es replicable a otro tipo de amenazas.

La metodología empleada se basa en la "Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25.000" proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano. El proceso implica la creación de un mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, fundamental para cuantificar la amenaza. Para obtener la Amenaza resultante en tiempo real, se logra con la automatización y obtención de datos meteorológicos en tiempo real desde el geoportal SIMAC-IDEAM, almacenando estos datos en una base de datos.

Posteriormente, mediante el uso de librerías de PyQGIS, se automatiza el proceso de zonificación y caracterización de movimientos en masa. Este procedimiento incluye la interpolación inversa ponderada (IDW) de los datos de precipitación actuales de los últimos 25 días, conocido como A25 según la propuesta del IDEAM. Además, se aplican operaciones de álgebra de mapas ponderado, entre el mapa de susceptibilidad (condicionantes) y la interpolación (detonante) IDW, resultando en la creación del mapa de amenazas.

III Zonificación en tiempo real de amenazas por deslizamientos detonados por lluvia

El sistema completo se encuentra incorporado en un código de programación que permite iterar el proceso según sea necesario, con un tiempo de ejecución mínimo de 10-15 minutos, dependiendo de la capacidad de cómputo disponible.

Esta metodología tiene como objetivo adaptarse a las cambiantes condiciones climáticas y ofrece una solución altamente precisa y eficaz en comparación con la cartografía tradicional, que para el municipio de Manizales, se actualiza cada 4 o 5 años. Se espera que esta metodología proporcione un sólido soporte para la gestión de riesgos en Manizales, con el potencial de proteger de manera más efectiva tanto vidas humanas como propiedades.

Palabras clave: Movimientos en Masa, Susceptibilidad, Amenazas, Automatización, Python, Bases de Datos.

Abstract

This study aims to demonstrate the utility of Geographic Information Systems (GIS) in the zoning of geological hazards, specifically rainfall-triggered landslides, with the capability to continuously and in real-time update threat zoning, which is also replicable for other types of hazards.

The methodology employed is based on the "Methodological Guide for Mass Movement Hazard Zoning at 1:25,000 Scale" provided by the Colombian Geological Service. The process involves the creation of a susceptibility map for mass movements, which is essential for quantifying the threat. To obtain real-time threat assessments, automation and real-time meteorological data retrieval from the SIMAC-IDEAM geoportal are employed, storing this data in a database.

Subsequently, using PyQGIS libraries, the zoning and characterization of mass movements are automated. This procedure includes the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation of current precipitation data for the last 25 days, known as A25 according to IDEAM's proposal. Weighted map algebra operations are applied between the susceptibility map (conditioning factors) and IDW interpolation (triggering factors), resulting in the creation of the threat map.

The entire system is embedded in a programming code that allows the process to be iterated as needed, with a minimum execution time of 10-15 minutes, depending on available computing power.

This methodology aims to adapt to changing climatic conditions and offers a highly precise and effective solution compared to traditional cartography, which, for the municipality of Manizales, is updated every 4 or 5 years. It is expected that this methodology will provide robust support for risk management in Manizales, with the potential to more effectively protect both human lives and properties.

Keywords: (Mass Movements, Susceptibility, Threats, Automation, Python, Databases).

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	13
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	13
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.3 JUSTIFICACIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. ANTECEDENTES.....	19
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	25
5. REFERENTE TEÓRICO.....	29
6. METODOLOGÍA.....	68
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	68
7. RESULTADOS	123
8. CONCLUSIONES.....	160
9. RECOMENDACIONES.....	163
10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	166
11. ANEXOS.....	176

Lista de figuras

FIGURA 1	32
Descripción conceptual de la morfología de un deslizamiento rotacional.	32
FIGURA 2.....	33
Reducción de las condiciones de estabilidad	33
FIGURA 3.....	34
Evolución de los movimientos en masa.....	34
FIGURA 4.....	36
Clasificación de movimientos en masa.....	36
FIGURA 5.....	38
Movimiento en masa de tipo rotacional.....	38
FIGURA 6.....	40
Categorización del estado de actividad de desplazamientos en grupo	40
FIGURA 7	43
Escala de velocidad de movimientos en masa	43
FIGURA 8.....	49
Contenido de agua en el suelo por diferentes tipos de flujos preferenciales	49
FIGURA 9.....	51
Lluvia antecedente	51
FIGURA 10.....	62
Representación de estructura SQL.....	62
FIGURA 11	73
Representación de vectorial a ráster	73
FIGURA 12.....	75
Herramienta Rasterizar	75
FIGURA 13.....	76
Raster Calculator.....	76
FIGURA 14.....	77
Inventario de movimientos en masa en formato raster	77
FIGURA 15.....	78

Herramienta de reporte raster.....	78
FIGURA 16.....	80
Resultado de Reporte raster para mapa de Alturas.	80
FIGURA 17.....	81
Resultado de Reporte raster para mapa de Rugosidad.....	81
FIGURA 18.....	83
Resultado del informe ráster del inventario por movimientos en masa.....	83
FIGURA 19.....	85
Resultado del informe ráster del inventario por movimientos en masa.....	85
FIGURA 20.....	89
Descripcion Grafica de la evaluación de pixeles por tipo de mapa	89
FIGURA 21.....	92
Herramienta de Vectorización en QGIS	92
FIGURA 22.....	93
Configuracion herramienta Vectorizacion.....	93
FIGURA 23.....	94
Adición de un nuevo campo en la tabla de atributos	94
FIGURA 24.....	94
Visualizacion del nuevo campo de atributos creado.....	94
FIGURA 25.....	95
Hojas de calculo de los resultados estadísticos WofE.	95
FIGURA 26.....	96
Configuración de la Unión por atributos.	96
FIGURA 27.....	97
Resultado de unión por atributos.	97
FIGURA 28.....	99
Raster Calculator -Algebra de Mapas.....	99
FIGURA 29.....	100
Resultado Algebra de mapas – Mapa de Suceptibilidad.....	100
FIGURA 30.....	102
Modelo Relacional	102

FIGURA 31	102
Tabla de las Estaciones meteorológicas.....	102
FIGURA 32.....	103
Instalacion de extencion Postgis a la base de datos.	103
FIGURA 33.....	104
Modelo Relacional de la base de datos Completa.	104
FIGURA 34.....	105
Grafico, x Carga de capas vectoriales a Postigs mediante QGIS.	105
FIGURA 35.....	106
Funcion Trigger	106
FIGURA 36.....	109
Obtencion de un XPath de un elemento web.....	109
FIGURA 37.....	110
Lista por nombre de estaciones y su Xpath	110
FIGURA 38.....	112
Visualizacion del A25 del SIMAC	112
FIGURA 39.....	113
Script para la generación de isoyetas o interpolación IDW	113
FIGURA 40.....	114
Resultado del script No.1	114
FIGURA 41	116
Normalización del ráster Interpolado.....	116
FIGURA 42.....	117
Recorte del ráster clip Mask.	117
FIGURA 43.....	119
Script del cálculo de la Amenaza.....	119
FIGURA 44.....	120
Script Normalización de la Amenaza.	120
FIGURA 45.....	121
Script de raster a poligono y carga a la base de datos con Postgis	121
FIGURA 46.....	122

Script de ejecución de los procedimientos Almacenados	122
FIGURA 47	124
Mapa de procesos morfodinámicos	124
FIGURA 48	125
Mapa de Alturas	125
FIGURA 49	126
Mapa de Aspecto.....	126
FIGURA 50	127
Mapa de Curvatura de Perfil	127
FIGURA 51	128
Mapa de Curvatura Tangencial	128
FIGURA 52	129
Mapa Dirección de Flujo	129
FIGURA 53	130
Mapa Irregularidad del Terreno	130
FIGURA 54	131
Mapa Distancia a Fallas	131
FIGURA 55	132
Mapa Distancia a Vías	132
FIGURA 56	133
Mapa Distancia a Drenajes	133
FIGURA 57	134
Mapa de Unidades Geomorfológicas.....	134
FIGURA 58	135
Mapa de Unidades Geológicas Superficiales.....	135
FIGURA 59	136
Mapa de Suelos	136
FIGURA 60	141
Mosaico de imágenes ráster	141
FIGURA 61	143
Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa.....	143

FIGURA 62.....	145
Estadísticas de la Susceptibilidad por movimientos en masa en Manizales Caldas	145
FIGURA 63.....	146
Tabla de estaciones Meteorológicas	146
FIGURA 64.....	147
Representación geo espacial de las estaciones Meteorológicas en PostgreSQL	147
FIGURA 65.....	148
Tabla Auxiliar de Información Meteorológica	148
FIGURA 66.....	149
Geovisor SIMAC -IDEAM.....	149
FIGURA 67	151
Scripts de PyQGIS para la automatización de proceso.....	151
FIGURA 68.....	152
Generacion de la interpolación IDW de la precipitación.....	152
FIGURA 69.....	153
Mapa de isoyetas reclasificado	153
FIGURA 70.....	154
Imágenes raster recortadas	154
FIGURA 71	156
Mapa de Amenazas Obtenido desde de los scripts de PyQGIS.....	156
FIGURA 72.....	157
Mapa de Amenazas Obtenido desde de los scripts de PyQGIS.....	157
FIGURA 73.....	158
Mapa de Amenazas definitivo (normalizado) para el 19 de abril del 2017.....	158

Lista de tablas

TABLA 1	46
VARIABLES PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	46
TABLA 2	60
MÉTODO DE PESO DE LA EVIDENCIA.....	60
TABLA 3	69
ADQUISICIÓN DE DATOS RÁSTER	69
TABLA 4	70
ADQUISICIÓN DE DATOS VECTORIALES.....	70
TABLA 5	82
INFORME RÁSTER DEL MAPA DE RUGOSIDAD	82
TABLA 6	86
RESUMEN Y RESULTADOS ESTADÍSTICOS DEL INFORME ASOCIADO AL MAPA DE RUGOSIDAD.....	86
TABLA 7	86
PIXELES TOTALES, AFECTADOS Y NO AFECTADOS POR MENM	86
TABLA 8	138
RESULTADO DE PIXELES MAPA DE ALTURAS	138
TABLA 9	139
RESUMEN DE ÁREAS DEL MAPA DE ALTURAS.	139
TABLA 10	144
INFORME DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	144

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

1.1 Descripción del área problemática

El municipio de Manizales, ubicado en el departamento de Caldas, Colombia, enfrenta una serie de desafíos relacionados con problemas geológicos, geomorfológicos, climáticos, topográficos y ambientales. Estos factores propician una elevada susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa, especialmente durante períodos de retorno climático caracterizados por lluvias prolongadas e intensas. En tales condiciones climáticas, se ha observado un aumento significativo en el número de deslizamientos causados por la lluvia en comparación con periodos climáticos más secos.

En un esfuerzo por mitigar los riesgos asociados a estos eventos, el municipio ha implementado la elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial (POT), que se actualizan cada cuatro años con el cambio de gobierno. Estos POT incluyen evaluaciones de la susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo relacionados con movimientos en masa en el territorio. Sin embargo, estos análisis se basan en datos recopilados en condiciones climáticas y temporales específicas al momento de su elaboración, lo que significa que la variabilidad de la amenaza debido a los cambios climáticos a lo largo del tiempo no se tiene en cuenta adecuadamente. Esta falta de adaptación a las condiciones climáticas cambiantes podría llevar a una subestimación o sobreestimación de la amenaza en diferentes áreas del municipio, tanto

rurales como urbanas. Este desafío no es único de Manizales y se repite en muchos otros municipios de Colombia.

1.2 Formulación del problema

El problema central que se plantea en esta investigación es la falta de un método que permita calcular la amenaza de movimientos en masa de manera oportuna, específicamente deslizamientos detonados por lluvia, de manera continua y en tiempo real. Los métodos actuales utilizados para la gestión del riesgo de desastres se basan en modelos que dependen de datos meteorológicos históricos como factores desencadenantes o utilizan enfoques heurísticos que pueden introducir sesgos en la estimación de la amenaza. Estos modelos no se adaptan adecuadamente a las condiciones meteorológicas del momento, lo que resulta en un sistema de alerta que carece de precisión y oportunidad.

Por lo tanto, se plantea la necesidad urgente de desarrollar un método que utilice tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en combinación de Algoritmos de programación idóneos para calcular la amenaza de movimientos en masa, en particular deslizamientos causados por lluvia, de manera continua y en tiempo real. Este método deberá basarse en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano y aprovechar los insumos cartográficos proporcionados por diversas instituciones, como Corpocaldas, el Servicio Geológico, la Alcaldía Municipal de Manizales, el IDEAM, IGAC, el DANE y UNGRD, entre otros.

1.3 Justificación

Los movimientos en masa, especialmente los deslizamientos detonados por lluvia, representan una amenaza latente en el municipio de Manizales/ Caldas, y en muchas otras regiones del país. A pesar de los incansables esfuerzos y las medidas implementadas para prevenir pérdidas humanas y materiales en estas áreas, se siguen registrando tragedias que cobran vidas humanas y destruyen viviendas y otros bienes de valor incalculable.

La necesidad urgente de una solución más eficaz se hace evidente en la constante repetición de estas tragedias a lo largo del tiempo. Las metodologías tradicionales de gestión del riesgo, que dependen en gran medida de modelos de amenaza y vulnerabilidad basados en datos históricos y suposiciones heurísticas, no logran proporcionar las alertas tempranas precisas y de manera oportuna que son cruciales para la protección de vidas y bienes.

En este contexto, el desarrollo de un modelo de amenaza por movimientos en masa, basado en tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y que opere en tiempo real, se convierte en una prioridad imperante. Este modelo tiene como objetivo principal adaptarse a las condiciones climáticas actuales y reflejar la variabilidad temporal de la amenaza, tomando en cuenta los factores detonantes del lugar y basándose en datos actualizados proporcionados por diversas instituciones.

La triste realidad de que personas continúen perdiendo sus vidas y hogares debido a los movimientos en masa, a pesar de los esfuerzos previos, subraya la necesidad urgente de este enfoque innovador. Un sistema de alerta temprana más preciso y oportuno, respaldado por una metodología sólida, podría marcar la diferencia en la mitigación del riesgo de desastres y la protección de las comunidades vulnerables. Este proyecto de investigación busca no solo abordar el problema en el municipio de Manizales sino también servir como un modelo potencialmente replicable en otras áreas del país que enfrentan desafíos similares, con el objetivo de salvar vidas y preservar el patrimonio en riesgo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología innovadora para la zonificación en tiempo real de la amenaza por deslizamientos detonados por lluvia en el municipio de Manizales, Caldas, utilizando tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y análisis de datos meteorológicos en tiempo real.

2.2 Objetivos específicos

Identificar, analizar y determinar los factores condicionantes y detonantes por precipitación que inciden en la generación de movimientos en masa en el municipio de Manizales, considerando su variabilidad temporal y climática.

Zonificar la susceptibilidad por Movimientos en masa empleando el método estadístico Bayesiano – (WoF) propuesto por el SGC 2017. “PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1: 25.000” Para el municipio de Manizales.

Desarrollar un script en Python que permita la obtención automatizada de datos meteorológicos del portal SIAC-IDEAM del municipio de Manizales caldas en tiempo real,

además de elaborar el mapas de isoyetas utilizando el método de interpolación IDW (Inverso de la Distancia Ponderada) en diferentes temporalidades y la creación de mapas de amenazas mediante la integración de los mapas de susceptibilidad e Isoyetas previamente desarrollados, apoyados en las librerías de python y qgis tales como Selenium, pandas, PyQGIS..

3. ANTECEDENTES

En Manizales los movimientos en masa clasificados como deslizamientos son muy comunes para el municipio, están condicionados principalmente por factores ambientales comunes de climas tropicales, ambientes tectónicamente activos, presentan condiciones geomorfológicas de alto relieve donde los suelos pueden ser poco consolidados y fuertemente meteorizados. Siendo así, una zona característica de laderas muy inestables, El clima juega un papel importante en la identificación de riesgos y amenazas para Manizales y municipios cercanos.

En la literatura especializada, se ha investigado el impacto de las precipitaciones como desencadenantes de deslizamientos. Varios autores han destacado la relevancia de aspectos hidrológicos en la evaluación de zonas de riesgo de deslizamientos (Okimura y Kawatani, 1987; Anderson y Kemp, 1991; Van Asch, 1992). Del mismo modo, se ha abordado estadísticamente la relación entre las lluvias y los deslizamientos en numerosos estudios (Lumb, 1975; Campbell, 1975; Guidicini e Imasa, 1977; Caine, 1980; Ceccarini, Focardi y Zauchi, 1981; Canuti, Focardi y Garzonico, 1985; Crozier, 1986; Capecchi y Focardi, 1988). Todos estos trabajos evidencian una clara conexión entre las precipitaciones y los eventos de remoción de tierra. En este contexto, se ha establecido una correlación entre los deslizamientos y varios parámetros relacionados con las precipitaciones, desde la intensidad y duración de una lluvia única hasta las lluvias acumulativas de meses enteros.

En Colombia, también se han realizado múltiples investigaciones sobre este tema (Paz y Torres, 1989; Gómez y Vélez, 1990; Hoyos, 1990; Hoyos et al, 1992). Estos estudios confirman las relaciones entre las lluvias y los deslizamientos, haciendo énfasis en la importancia de considerar el tiempo de respuesta del sistema hidrogeológico y clasificar los tipos de deslizamientos. Es crucial realizar análisis estadísticos en muestras homogéneas, distinguiendo claramente entre los deslizamientos causados por infiltraciones locales, como deslizamientos someros tipo "desgarre," deslizamientos traslacionales, deslizamientos en cuña y deslizamientos rotacionales pequeños, y aquellos relacionados con infiltraciones distantes, como deslizamientos rotacionales, teniendo en cuenta el lugar de recarga.

Terlien (1996) Estableció relaciones entre las lluvias previas y las lluvias diarias en una ubicación específica al noreste de Manizales. Además, propuso un modelo hidrológico basado en los mecanismos de falla predominantes en la zona, el uso del suelo, mediciones de campo y las propiedades de los materiales en las secuencias estratigráficas típicas del área. El modelo HYSWASOR, basado en elementos finitos, permite prever las fluctuaciones de las presiones hidrostáticas tanto a corto plazo (durante lluvias intensas) como a largo plazo (durante períodos de varios meses de lluvia). El modelo se calibró utilizando datos reales de piezómetros y tensiómetros en el campo.

Van Westen (1992) desarrolló un modelo hidrológico bidimensional en la cuenca del Río Chinchiná, que utiliza datos básicos hidrometeorológicos (temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial) y propiedades hidráulicas del suelo para determinar la posición y

las fluctuaciones estacionales del nivel freático. Este modelo, denominado SLOHYD, se aplicó directamente para calcular los factores de seguridad de laderas potencialmente inestables.

Gostelow (1991) e Iiritano et al. (1998) sostienen que la lluvia puede influir en la estabilidad de las laderas de dos maneras distintas: (1) mediante eventos de lluvia de alta intensidad que disminuyen la resistencia al corte debido a la reducción de la cohesión aparente, lo que provoca movimientos iniciales en la superficie; y (2) a través de lluvias prolongadas que aumentan la presión en los poros a lo largo de una posible superficie de falla, desencadenando movimientos de masa más profundos, generalmente a lo largo de superficies de cizalla preexistentes. Los movimientos superficiales suelen ser desencadenados por lluvias breves pero intensas (Crosta, 1998), mientras que los movimientos más profundos están más relacionados con la distribución y variación de la lluvia en períodos largos (Aleotti, 2004).

Collins & Znidarcic (2004) presentan dos mecanismos de falla diferentes causados por la infiltración. En el primer mecanismo, la falla se produce debido al aumento de la presión de poros positiva, lo que resulta en la licuefacción del material. En el segundo mecanismo, la falla ocurre en condiciones de presiones de poros negativas, donde el material aún no está saturado de agua, y la falla se debe a la disminución de la succión, haciendo que la masa se comporte de manera similar a un cuerpo rígido. Los suelos de grano fino con una baja tasa de infiltración generalmente no tienden a desarrollar presiones de poros positivas, y la falla suele ser el resultado de una disminución en la resistencia al corte causada por la pérdida de succión. En términos generales, los desplazamientos superficiales se relacionan con el desarrollo de presiones

de poros positivas, mientras que los movimientos más profundos están vinculados a la pérdida de succión (Collins & Znidarcic, 2006).

Jaiswal & van Westen (2009) proponen un enfoque para estimar la probabilidad temporal de que ocurra un deslizamiento superficial. Consistiendo en utilizar la probabilidad de que la lluvia supere un umbral crítico, siguiendo el modelo de probabilidad de Poisson, y al considerar la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en función de un umbral de lluvia específico. Los umbrales de lluvia se establecen tomando en cuenta la relación entre la lluvia previa y la lluvia diaria.

El Servicio Geológico Colombiano (2017) Implementa una guía metodológica para técnicos y profesionales en materia de zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000, para respaldar la gestión del riesgo y planes de ordenamiento territorial, especialmente en áreas rurales a nivel nacional.

Algunos otros esfuerzos aislados y específicos han abordado temas similares, como el informe de CORPOCALDAS (1990), que estableció una relación entre la lluvia acumulada en 25 días y el número de eventos en la carretera de Manizales a Chinchiná. Finalmente, el Municipio de Manizales ha realizado intentos desde 1993, después de eventos catastróficos en la ciudad, para aplicar modelos hidrológicos holandeses (Terlien, 1996) y establecer umbrales de lluvia, aunque hasta el momento no ha logrado consolidar relaciones, metodologías o procedimientos fácilmente aplicables en la práctica

Correa et al. (2019) proponen una metodología para establecer umbrales lluvia-deslizamiento mediante un enfoque probabilístico que considera la lluvia acumulada como una variable aleatoria. Esta metodología se aplica en una región específica, que se divide en áreas con patrones de lluvia similares. Para cada una de estas áreas, se emplean métodos estadísticos avanzados para ajustar un modelo de probabilidad en función del tiempo de acumulación. Los umbrales se determinan al establecer intervalos de confianza. Las mediciones de lluvia acumulada en tiempo real se utilizan para calcular las probabilidades instantáneas de deslizamiento en cada área y para cada período de acumulación. La probabilidad máxima instantánea identifica la cantidad crítica de lluvia acumulada y, en función de esto, se emite un nivel de alerta correspondiente.

4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

En los últimos 30 años, en Colombia se han creado leyes y regulaciones debido a desastres que mezclan causas naturales y problemas sociales. Estas reglas tratan sobre cómo se debe planificar y desarrollar la tierra, cómo usarla y cómo manejar los riesgos de desastres. Para aplicar estas reglas, se necesitan estudios técnicos para tomar decisiones inteligentes sobre cómo organizar el territorio, y al mismo tiempo, garantizar que los planes de desarrollo de los municipios incluyan medidas para prevenir desastres.

Algunas de estas reglas incluyen la Ley 388 de 1997 y varios decretos relacionados con la organización de las áreas urbanas y rurales, y la Ley 1523 de 2012 que se enfoca en la gestión de riesgos de desastres. Todas estas normas son iniciativas impulsadas desde el gobierno nacional y tienen como objetivo principal entender a fondo cómo es el territorio para asegurar la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas, así como promover un desarrollo sostenible.

El Decreto 1729 de 2002 establece los lineamientos y etapas para la gestión de cuencas hidrográficas, y su objetivo principal es la planificación del uso sostenible y la gestión adecuada de los recursos naturales renovables de una cuenca. El propósito es lograr un equilibrio apropiado entre la explotación económica de estos recursos y la conservación de la estructura física y biótica de la cuenca, en particular, de sus recursos hídricos. Este enfoque de gestión sirve

como marco para planificar el uso sostenible de la cuenca y la implementación de programas y proyectos específicos destinados a conservar, preservar, proteger y prevenir el deterioro, así como a restaurar la cuenca hidrográfica.

La Ley 1523 de 2012 fue promulgada en abril de 2012 y representa una actualización importante en la legislación del gobierno nacional en lo que respecta a la gestión del riesgo de desastres. Su objetivo principal es la adopción de la política nacional de gestión del riesgo de desastres y el establecimiento del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Esta ley establece un marco conceptual e institucional que se centra en comprender el riesgo y su construcción, así como en la reducción de dicho riesgo. También pone un fuerte énfasis en la rendición de cuentas por parte de los municipios en relación con las medidas y acciones tomadas para abordar el riesgo de desastres.

El Decreto 1640 de 2012 reglamenta la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos en Colombia, además de establecer otras disposiciones relacionadas. Este decreto se basa en las facultades constitucionales y legales del gobierno nacional, especialmente en lo que concierne a la protección del medio ambiente y la gestión sostenible de los recursos naturales renovables. Define la ordenación de cuencas como la planificación coordinada del suelo, agua, flora y fauna, mientras que el manejo de cuencas implica la ejecución de obras y tratamientos. Se destaca la importancia de la participación de la comunidad y la consulta a los usuarios de los recursos de la cuenca. El decreto también establece criterios de priorización y coordinación entre las Corporaciones Autónomas Regionales y el Sistema de

Parques Nacionales o Reservas en áreas de confluencia de jurisdicciones. En resumen, este decreto regula la gestión integral de cuencas y acuíferos en el país, con el objetivo de garantizar su uso sostenible y la preservación ambiental.

La Ley 388 de 1997 en Colombia tiene como objetivos la actualización de las regulaciones relacionadas con el ordenamiento del territorio y el uso del suelo, promoviendo el desarrollo sostenible, garantizando el acceso a la vivienda y servicios públicos, protegiendo el medio ambiente y previniendo desastres. Se basa en principios como la función social y ecológica de la propiedad, la prevalencia del interés general y la distribución equitativa de cargas y beneficios, y fomenta la participación ciudadana en la planificación urbana, siendo esencial para el ordenamiento territorial en el país y el bienestar de sus habitantes.

El Decreto 1807 de 2014 en Colombia regula la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Este decreto se basa en el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 y considera la importancia de delimitar y zonificar áreas de amenaza y riesgo, así como establecer medidas para su mitigación. Además, se alinea con la Ley 388 de 1997, que promueve la consideración del riesgo en la planificación territorial. El principio de gradualidad, según la Ley 1523 de 2012, guía la gestión del riesgo, asegurando un enfoque continuo y secuencial. Los planes de ordenamiento territorial deben integrar el análisis del riesgo en su diagnóstico, considerando los aspectos biofísicos, económicos y socioambientales, para evitar nuevas condiciones de riesgo. Este decreto establece estudios técnicos y básicos que deben realizarse para la revisión de los planes de ordenamiento territorial, incluyendo la delimitación y

zonificación de áreas de amenaza y riesgo, así como la determinación de medidas de intervención. También se especifica la escala de trabajo mínima para estos estudios.

El Decreto 1077 de 2015 en Colombia se refiere al "Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio". Este decreto tiene como objetivo simplificar y compilar la normativa reglamentaria del sector, lo que contribuye a la eficiencia económica y social del sistema legal y a la seguridad jurídica. La compilación abarca las normas vigentes en el momento de su expedición, sin perjuicio de disposiciones derogadas previamente. El contenido material de este decreto se corresponde con decretos previos compilados.

El Decreto 879 de 1998 de Colombia reglamenta las disposiciones relacionadas con el ordenamiento del territorio municipal y distrital, así como los planes de ordenamiento territorial. Establece la obligación de que todas las administraciones municipales y distritales formulen y adopten sus planes de ordenamiento territorial antes del 24 de enero de 1999. A partir de la adopción del plan, solo se pueden expedir licencias de construcción o urbanización y realizar actuaciones urbanísticas de acuerdo con el plan. El decreto también define los componentes de estos planes, incluyendo el general, urbano y rural, y establece los contenidos y requisitos que deben cumplir.

5. REFERENTE TEÓRICO

Para evaluar la amenaza de deslizamientos de tierra, es un proceso que involucra la colaboración de varias disciplinas relacionadas con las ciencias de la tierra y un conocimiento profundo de la zona que se está estudiando. El método consta de varias etapas que permiten evaluar los factores condicionantes para deslizamientos de tierra que están ocurriendo en la actualidad, junto a las características y las causas que detonan estos movimientos en masa conocido también como factor desencadenante o detonante.

Posteriormente, definido el fundamento teórico necesario para la evaluación de la amenaza que resulta del producto entre el factor condicionante y el factor detonante, se busca modelar un sistema en tiempo real de tal manera que permita funcionar de manera autónoma, para entender el método propuesto se requiere abordar unos conceptos y métodos geoinformáticos, apoyados en herramientas SIG para la implementación del Sistema de zonificación de amenaza continua en tiempo real

Las etapas del proceso que nos llevan a la zonificación de la amenaza son las siguientes:

- Caracterización de movimientos en masa y los factores condicionantes.
- Análisis de la susceptibilidad.
- Análisis de la Precipitación como factor detonante.

Las etapas del proceso que nos llevan a la zonificación de la amenaza en tiempo real son las siguientes:

- Base de datos Relacionales (SQL) y extensión Geo espacial
- Programación en Python y usos de librerías GIS (PyQGIS / ArcPy)

A continuación, se dan unos tópicos generales para entender la teoría necesaria para el entendimiento de la tesis propuesta:

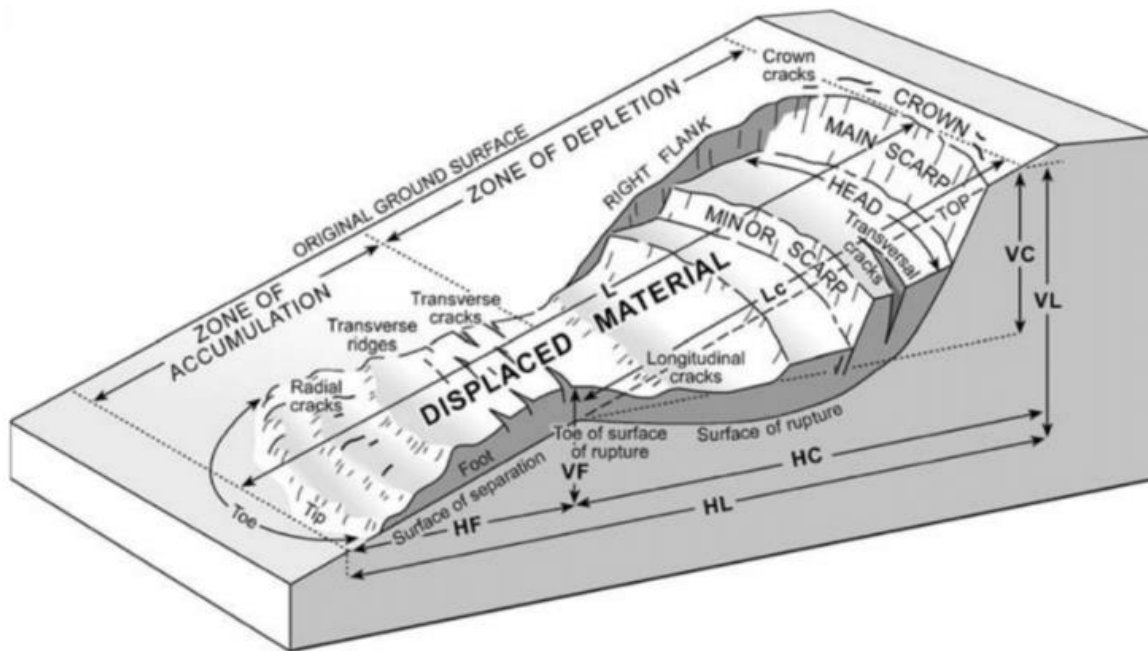
Se recomienda profundizar con la guía metodología para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000, donde se profundiza en mayor detalle tópicos de movimientos en masa, susceptibilidad, amenaza y los métodos implementados para tal fin, adicionalmente, se recomienda un repaso a fundamentos básicos de programación y bases de datos geo espaciales y ciencia de datos, que son las herramientas con la cual se optimizaran los procesos SIG, que se verán en el capítulo de metodología.

Caracterización de Movimientos en Masa y los Factores Condicionantes.

Los deslizamientos que están catalogados como un miembro entre los posibles movimientos en masa, son consecuencia de múltiples factores, donde la estructura física y desarrollo de las pendientes desempeñan un papel fundamental (Hutchinson, 1988). La definición más básica y universalmente aceptada se encuentra en la descripción proporcionada por (Cruden & Varnes, 1996), quienes caracterizan este fenómeno como el desplazamiento de una masa de roca, desechos o suelo a lo largo de una pendiente. Dentro de esta definición, se engloba una amplia gama de desplazamientos en masa. Algunos son caracterizados por ser lentos, pequeños y apenas perceptibles, mientras que otros involucran grandes volúmenes de material y adquieren altas velocidades, causando una considerable destrucción. Por otro lado, (Scheidegger, 1998) interpreta los deslizamientos como cambios en la configuración del terreno dentro del continuo ciclo geomorfológico, que resultan de la respuesta natural del sistema ante diversos y complejos factores externos (meteorológicos) e internos (tectónicos).

Figura 1

Descripción conceptual de la morfología de un deslizamiento rotacional.



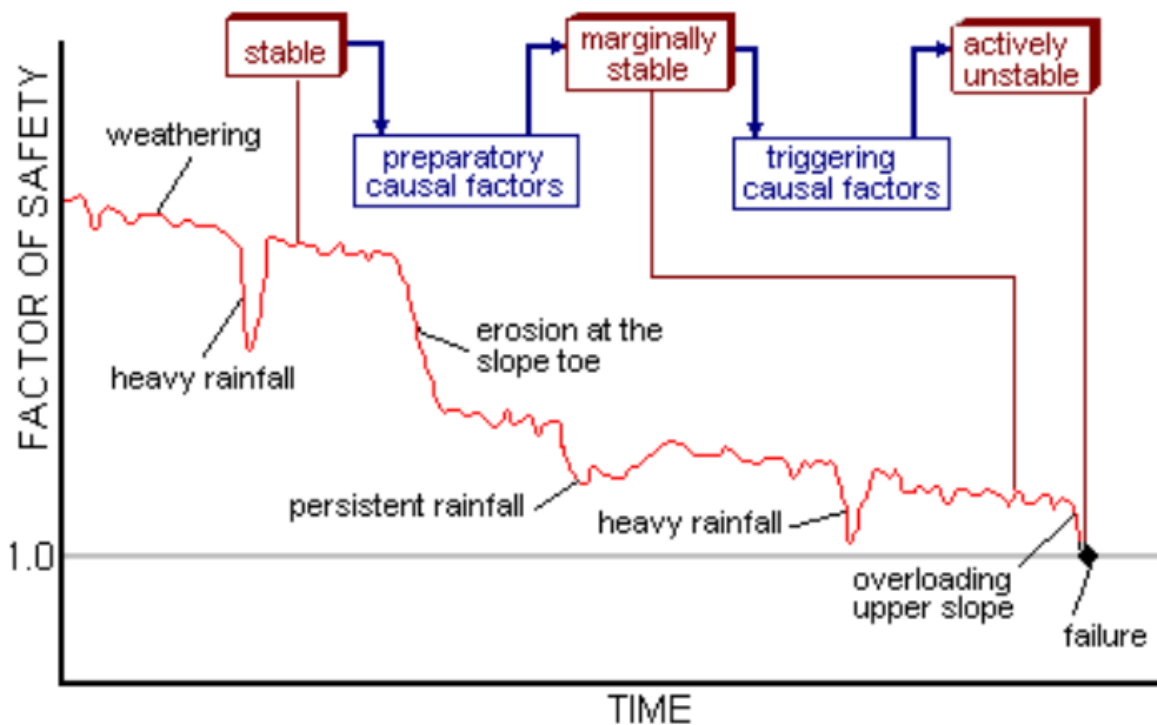
Nota. El grafico representa la morfología de un deslizamiento de tipo rotacional donde se aprecian la forma de la corona, las fracturas del bloque deslizante y la deformación del frente de separación.. Tomado de Glade and Crozier (2005).

Los deslizamientos se originan a medida que las propiedades mecánicas de los materiales que componen las laderas se debilitan gradualmente debido a procesos naturales como la meteorización, los movimientos tectónicos y las actividades humanas, que desencadenan movimientos de carácter lento y generalmente poco perceptibles (M.J. Glade, 2005). No obstante, un solo factor, típicamente la lluvia intensa o un terremoto, es considerado como el

estímulo externo que puede provocar una respuesta casi instantánea al movilizar los materiales que conforman la pendiente, ya sea por el rápido aumento de las fuerzas o la disminución de la resistencia (Wang et al. 2002).

Figura 2

Reducción de las condiciones de estabilidad

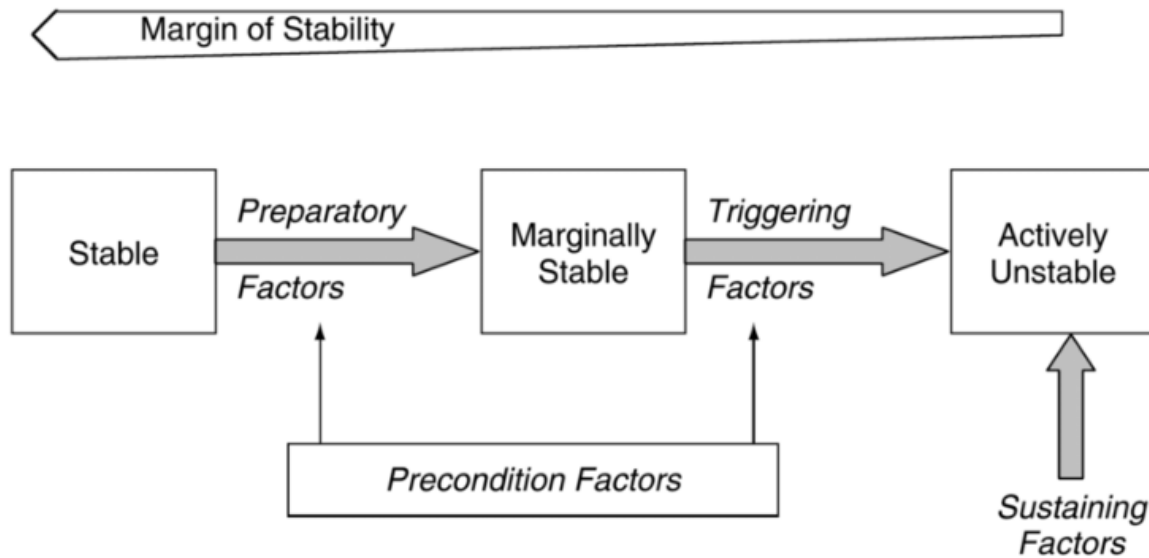


Nota Representación grafica del factor de seguridad respecto al tiempo de precipitación, donde se aprecia que entre mayor sea el tiempo d precipitación, se reduce el factor de seguridad por lo que puede generar un deslizamiento. Tomado de Popescu [1994].

Así, los factores que influyen en la aparición y extensión de los deslizamientos se pueden clasificar en dos grupos principales: los factores estáticos o condicionantes y los factores dinámicos o desencadenantes. Los factores estáticos, como las características de los suelos y la topografía, contribuyen a la predisposición de las pendientes y determinan cómo se distribuyen espacialmente los deslizamientos. Por otro lado, los factores dinámicos, como el nivel de saturación del suelo y la cohesión, controlan los elementos que desencadenan los deslizamientos en pendientes propensas. Además, la climatología, los procesos hidrológicos y las actividades humanas también influyen en los factores dinámicos y configuran el patrón temporal de los deslizamientos.

Figura 3

Evolución de los movimientos en masa



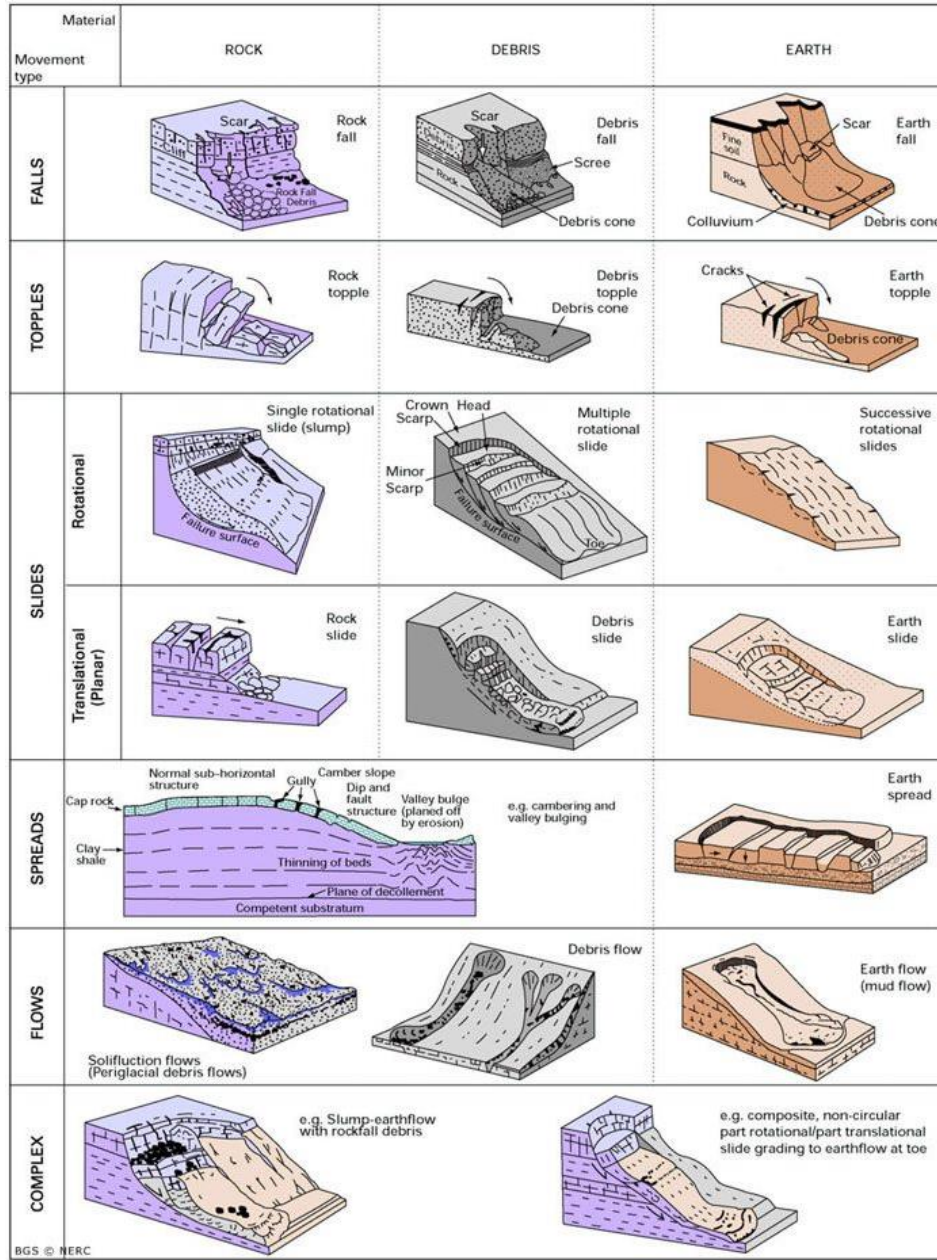
Nota. El proceso de formación de movimientos en masa comienza cuando empieza a perder la estabilidad por factores primarios y es finalmente generado por un factor detonante. Tomado de Glade and Crozier (2005).

Clasificación de Movimientos en Masa

La clasificación más ampliamente reconocida y aceptada para los deslizamientos fue presentada por (Varnes, 1978) y posteriormente actualizada por (Cruden y Varnes 1996). Estos investigadores utilizan principalmente dos criterios para esta clasificación: el tipo de movimiento y el tipo de material involucrado. Los tipos de movimientos que definen incluyen caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y propagación lateral. Por otro lado, categorizan los materiales en suelo y roca. A partir de la combinación de estos criterios aparentemente simples, surge una amplia gama de movimientos complejos.

Figura 4

Clasificación de movimientos en masa



Nota. Se generan diferentes tipos de movimientos en masa dependiendo de su litología, suelos y pendiente, por lo que cada uno tiene una interpretación diferente de acuerdo con Varnes & Cruden (1996).

Dentro del grupo principal de movimientos en masa, el más común de estos son los deslizamientos y los flujos en taludes o laderas. A diferencia de los flujos, los deslizamientos exhiben una superficie de ruptura; cuando esta superficie es curva y cóncava, se denominan deslizamientos rotacionales, y tienden a ocurrir con mayor frecuencia en suelos finos y uniformes. Por otro lado, cuando la superficie de ruptura es plana, se les conoce como deslizamientos translacionales o planares. Estos deslizamientos suelen ser superficiales y están influenciados por discontinuidades como diaclasas, foliación o planos de depósito. En ciertas ocasiones, la superficie de ruptura puede estar compuesta por dos discontinuidades, lo que provoca que el deslizamiento se desarrolle en la dirección de la línea de intersección, formando una cuña, y por esta razón se les llama deslizamientos de cuña.

Figura 5

Movimiento en masa de tipo rotacional



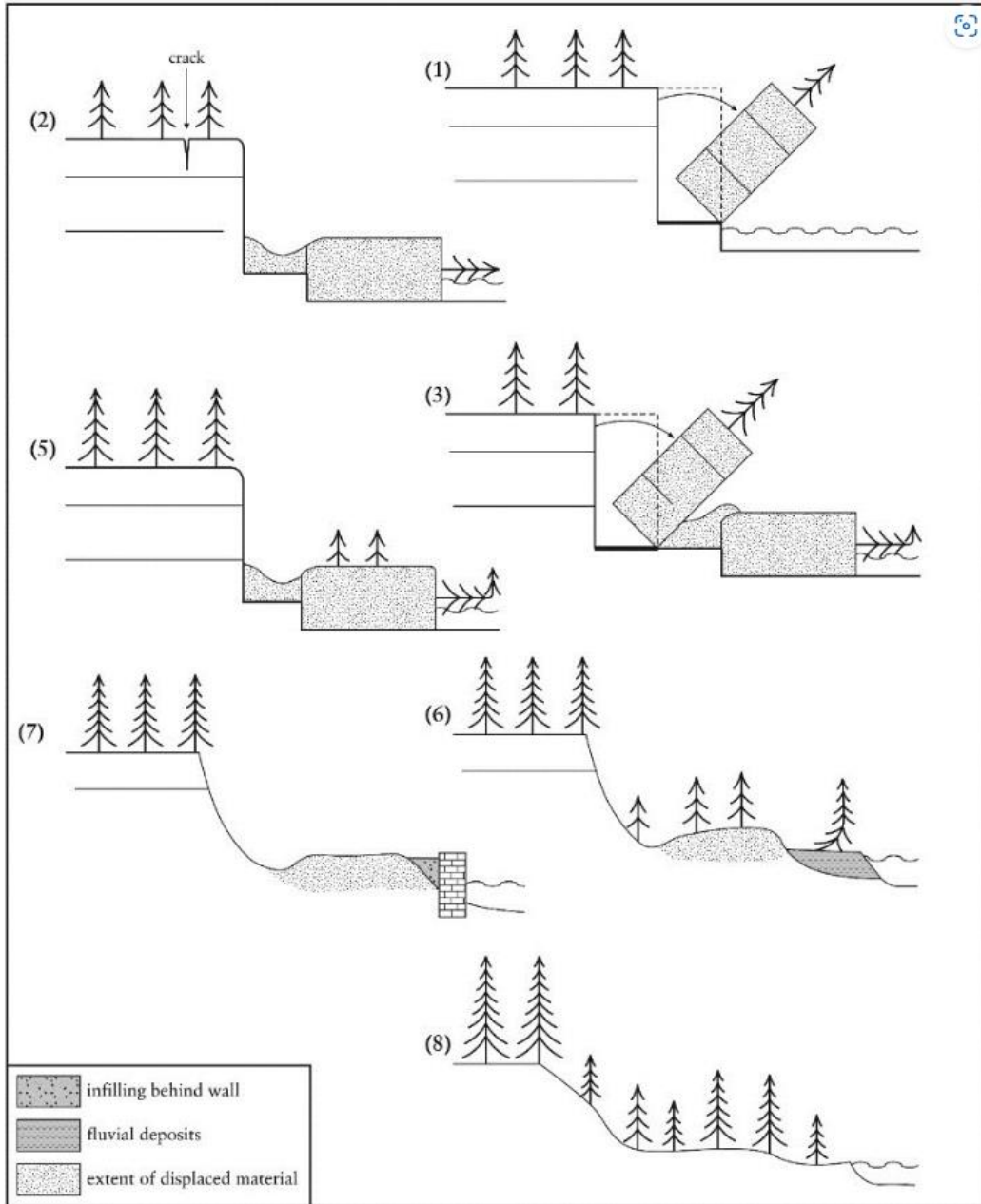
Nota. En la ciudad de Manizales en su mayoría los deslizamientos son típicamente rotacionales, como lo fue en este caso en el barrio La Castellana, Manizales que cobro la vida de 10 personas. Foto de Bomberos Manizales 2022.

Actividad de los Movimientos en Masa

(Cruden y Varnes, 1996) proporcionan una definición de la actividad para los movimientos en masa, basada en tres criterios relacionados con la superficie de ruptura: estado, distribución y condición. El estado de la actividad se refiere al período de tiempo durante el cual el desplazamiento ha ocurrido, y se divide en varias categorías: activo, que está en movimiento en la actualidad; reactivado, que ha vuelto a estar activo después de un período de inactividad; suspendido, que se ha desplazado en el último año pero no está en movimiento en el presente; e inactivo, que no ha mostrado movimiento en un período que abarca más de un año. Entre los inactivos, se encuentran los latentes (dormant), que mantienen las causas originales que lo generaron; los abandonados, en los cuales las razones del movimiento han cambiado; los estabilizados, en los cuales se han llevado a cabo medidas de mitigación que han detenido su movimiento; y los relictos, que se formaron en condiciones climáticas y geomorfológicas diferentes a las actuales.

Figura 6

Categorización del estado de actividad de desplazamientos en grupo



Nota. Representación gráfica de como los movimientos en masa pueden repetirse de manera cíclica a través del tiempo tal y como lo propone Varnes y Cruden (1996).

Dentro de esta categorización tenemos los siguientes estados:

- (1) Activo: Movimiento en curso.
- (2) Suspendido: Experimentó movimiento en el último año pero no se encuentra actualmente en movimiento.
- (3) Reactivado: Vuelve a estar activo después de un período de inactividad.
- (5) Latente (dormant): Inactivo con causas originales que persisten.
- (6) Abandonado: Inactivo debido a un cambio en las causas del movimiento.
- (7) Estabilizado: Inactivo debido a medidas de mitigación que previenen el movimiento.
- (8) Relicto: Se formó en condiciones climáticas y geomorfológicas diferentes a las actuales.

La distribución de la actividad se refiere a la dirección en la que se está moviendo o desplazando la superficie de ruptura. Se define como "avanzando" si la superficie de ruptura se extiende en la dirección del desplazamiento, "retrogrado" cuando la superficie de ruptura se mueve en la dirección opuesta al deslizamiento, "ampliándose" cuando la superficie de ruptura se desplaza hacia ambos lados, "alargándose" cuando el material desplazado continúa agregando más volumen de material y "reduciéndose" cuando ocurre lo contrario. Finalmente, se utiliza el

término "confinado" cuando se observa el escarpe, pero la superficie de ruptura no es visible en la base del desplazamiento.

En cuanto al estilo de la actividad, se refiere a cómo diferentes movimientos contribuyen al desplazamiento en grupo y se divide en:

- Complejo: cuando se presentan al menos dos tipos de movimientos en secuencia, es decir, una partícula experimenta dos tipos de movimientos en momentos diferentes.
- Compuesto: cuando se manifiestan al menos dos tipos de movimientos en diferentes partes de la masa desplazada, a veces simultáneamente.
- Sencillo: cuando solo se observa un tipo de movimiento.
- Múltiple: cuando se presentan diferentes movimientos del mismo tipo.
- En relación a la escala de velocidad de los movimientos en grupo, Cruden y Varnes [1996] proponen una figura que muestra las velocidades en términos de:
 - Extremadamente rápidos: en metros por segundo (m/s).
 - Muy rápidos :en metros por minuto (m/min).
 - Rápidos: en horas por minuto (hr/min).
 - Moderados: en metros por mes (m/mes).
 - Lentos: en metros por año (m/año).
 - Muy lentos: para magnitudes alrededor de milímetros por año (mm/año).

Figura 7

Escala de velocidad de movimientos en masa

Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical Velocity	Probable Destructive Significance
7	Extremely Rapid	5×10^3	5 m/sec	Catastrophe of major violence; buildings destroyed by impact of displaced material; many deaths; escape unlikely
6	Very Rapid	5×10^1	3 m/min	Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/hr	Escape evacuation possible; structures, possessions, and equipment destroyed
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month	Some temporary and insensitive structures can be temporarily maintained
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year	Remedial construction can be undertaken during movement; insensitive structures can be maintained with frequent maintenance work if total movement is not large during a particular acceleration phase
2	Very Slow	5×10^{-7}	15 mm/year	Some permanent structures undamaged by movement
	Extremely SLOW			Imperceptible without instruments; construction POSSIBLE WITH PRECAUTIONS

Nota. Los movimientos en masa pueden causar un grado de daño equivalente a su tasa de velocidad con la que se propagan, esto depende principalmente del tipo de suelo, contenido de agua y pendiente de acuerdo con Varnes & Cruden (1996).

Variables Condicionantes

La creación de un mapa de susceptibilidad y/o amenaza para movimientos en masa implica la construcción de un modelo predictivo de la siguiente manera:

Donde:

$$y = f(x)$$

(y) representa la variable dependiente, es decir, de la ocurrencia o no de un deslizamiento

(x) corresponde a las variables independientes, que también se conocen como condicionantes, preparatorias, explicativas, cuasi-estáticas, predictoras, entre otros términos.

(f) representa la relación, función o mecanismo que explica la ocurrencia de un deslizamiento

MenM, entiéndase como la abreviación de Movimientos en Masa

En otras palabras, se puede expresar como:

$$\text{MenM} [0,1] = f(\text{pendiente, geología, geomorfología, coberturas, etc., etc...})$$

En la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, se utilizan una amplia gama de variables predictoras. Estas variables se consideran como características o propiedades que se supone que contribuyen a la ocurrencia de movimientos en masa. Por lo tanto, estas variables suelen estar relacionadas con el terreno, como los tipos de materiales presentes o la topografía, pero también pueden incluir aspectos de la cobertura del suelo o la

proximidad a elementos como cuerpos de agua o carreteras. Estas variables pueden clasificarse en diferentes categorías según su naturaleza y su nivel de medición.

En cuanto a la categoría de las variables, existen variables cualitativas, como la geología, que representan características no numéricas del terreno. Por otro lado, las variables cuantitativas se dividen en variables discretas y continuas.

Las variables continuas son aquellas que pueden tomar un número infinito de valores precisos y no son contables. Se pueden subdividir en variables de intervalo, que no tienen un punto de partida natural o un cero con significado físico, como la temperatura en grados Celsius, y variables de razón, que tienen un cero con significado físico, como la temperatura en grados Kelvin o la cohesión del suelo.

Las variables discretas, por otro lado, son contables y finitas. Pueden ser tanto cuantitativas como cualitativas. Las variables nominales no tienen un orden específico, como las categorías de uso del suelo, mientras que las variables ordinales tienen un orden definido, como las categorías de acumulación de flujo.

Es importante destacar que algunas variables continuas pueden transformarse en variables discretas mediante la reclasificación. Por ejemplo, la pendiente, que es una variable continua que

varía de 0° a 90°, puede reclasificarse en rangos discretos, como 0° - 10°, 11° - 20°, y así sucesivamente, para simplificar el análisis o la interpretación de los datos.

Tabla 1

Variables para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa

FACTOR / TEMÁTICA	CAPAS Y TIPOS DE DATOS
INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS	Inventario de movimientos en masa y erosión
	Actividad de los movimientos en masa
	Distribución
GEOMORFOLOGÍA	Pendiente
	Curvatura
	Morfogénesis
UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES	Tipos de roca
	Meteorización
	Discontinuidades
	Aspectos estructurales
	Fallas
	Tipos de suelo
	Espesor del suelo
Propiedades geotécnicas	
COBERTURA Y USO DEL SUELO	Propiedades hidrológicas
	Cobertura de la tierra
	Uso del suelo actual
DETONANTES	Cambio de la cobertura de la tierra
	Lluvia
	Sismo

Nota. El Servicio Geológico de Colombia propone una recopilación de insumos mínima para elaborar el mapa de susceptibilidad y Amenaza. Tomado de SGC (2017)

Las propiedades del suelo y la intensidad de la lluvia (I) desempeñan un papel fundamental en el control de la estabilidad de los taludes. La magnitud y la tasa de disminución en el factor de seguridad (FS) están directamente relacionadas con la intensidad de la lluvia; a mayor intensidad, el factor de seguridad disminuye más rápidamente (Rahardjo et al., 2007). Además, pequeñas variaciones en la conductividad hidráulica (k) influyen en la ubicación de la ocurrencia de desplazamientos en grupo, lo que explica en cierta medida la naturaleza aleatoria en la distribución de los desplazamientos en una misma ladera aparentemente homogénea (Reid, 1997).

Cho & Lee (2001) investigaron los mecanismos de falla en taludes compuestos por suelos residuales no saturados. Encontraron que el campo de tensiones se ve afectado por la distribución de la presión de poros (Ψ), la cual está controlada por las variaciones espaciales en la conductividad hidráulica durante la infiltración de la lluvia. Aunque el talud puede ser texturalmente homogéneo, la conductividad hidráulica muestra una distribución no homogénea, ya que depende del contenido de agua o de la succión.

De acuerdo con la mecánica previamente descrita, la complejidad de prever la ocurrencia de los deslizamientos por lluvias radica en la interacción de una gran cantidad de variables que están estrechamente relacionadas entre sí. El aumento de la presión de poros en el suelo depende de factores como la porosidad, la permeabilidad, la conductividad hidráulica y el contenido de agua en el suelo. Además, la topografía y morfología del terreno desempeñan un papel esencial, ya que influyen no solo en la resistencia del suelo, sino también en el flujo de agua en el suelo.

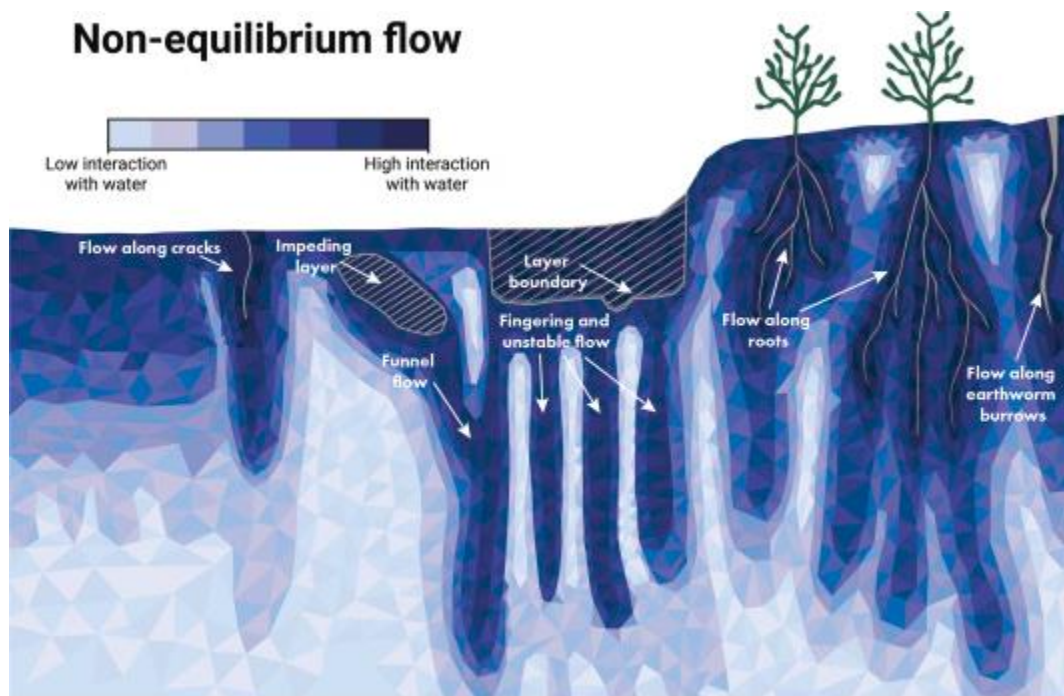
La permeabilidad controla el equilibrio entre la generación y disipación de la presión de poros, lo cual es crucial para iniciar el desplazamiento (Wang & Shibata, 2007). El efecto de las lluvias previas es más crítico en suelos con baja permeabilidad, ya que el tiempo requerido para que la lluvia se infiltre es considerablemente largo, y la recuperación del factor de seguridad después de una lluvia es muy lenta (Hengxing et al., 2003; Rahardjo et al., 2007; Setyo & Liao, 2008). Esta situación también explica por qué los mecanismos de falla en laderas con diferentes niveles de permeabilidad no son similares. En eventos de lluvia intensa, los suelos altamente permeables suelen fallar debido al aumento de la presión de poros positiva, manifestándose como movimientos tipo flujos, mientras que los suelos de baja permeabilidad fallan debido a la reducción de la succión, lo que se manifiesta como movimientos tipo deslizamientos.

Adicionalmente, pequeñas variaciones en la conductividad hidráulica influyen en la ubicación de la ocurrencia de desplazamientos en grupo, ya que esta conductividad es una función del contenido de agua o la succión, lo que contribuye en cierta medida a la naturaleza aleatoria en la distribución de los desplazamientos (Reid, 1997; Cho & Lee, 2001; Cho & Lee 2002). La capilaridad proporciona una presión de confinamiento isotrópico que reduce la conductividad hidráulica cuando el suelo no está saturado. Sin embargo, durante una tormenta, el suelo tiende a alcanzar condiciones de saturación, lo que resulta en una mayor conductividad hidráulica (Anderson & Sitar, 1995). Los suelos residuales son especialmente susceptibles a la formación de conductos debido a las juntas relictas y a los efectos biológicos. Estos suelos desarrollan un sistema de porosidad secundaria que aumenta significativamente la permeabilidad

y la conductividad hidráulica, actuando como trayectorias preferenciales para el flujo del agua subterránea (Fernández et al., 2004).

Figura 8

Contenido de agua en el suelo por diferentes tipos de flujos preferenciales

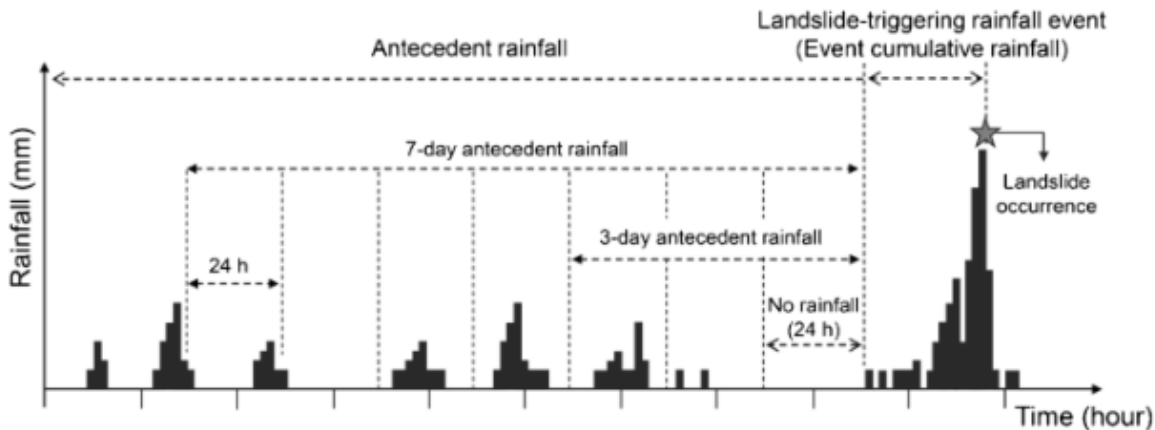


Nota. El proceso de infiltración del agua no solo depende de su porosidad sino también otros factores como lo es la pendiente donde pendientes planas y suaves el agua tiene más tiempo de infiltrar, y otros factores biológicos donde las raíces y fracturas permiten el paso de agua a niveles más profundos. Tomado de Franklin et al. [2021].

Otro factor esencial a considerar es la porosidad efectiva. La capacidad de retención de agua en el suelo depende de los espacios abiertos o poros presentes en el suelo, y esto está principalmente influenciado por la textura del suelo. Los suelos con una alta porosidad efectiva

tienen una mayor capacidad para retener y almacenar agua, lo que ralentiza la infiltración en el subsuelo. Para lluvias no muy intensas, no se suelen observar desplazamientos superficiales cuando la porosidad efectiva es alta. Sin embargo, estos valores elevados de porosidad efectiva tienden a aumentar el contenido de agua en la masa desplazada, lo que finalmente conduce a desplazamientos más rápidos que abarcan distancias mayores y se depositan en áreas más extensas (Mukhlisin et al., 2006).

Aunque se reconoce que la lluvia previa es un factor importante que prepara las condiciones de inestabilidad en una ladera, su influencia es complicada de cuantificar debido a diversos factores, incluyendo la heterogeneidad del suelo (Guzzetti et al., 2005; Rahardjo et al., 2007). Los desplazamientos superficiales suelen desencadenarse por lluvias breves y intensas, mientras que los desplazamientos más profundos están más relacionados con la distribución y variación de la lluvia en períodos anteriores prolongados (Aleotti, 2004). Varios investigadores coinciden en que la importancia de la lluvia previa es equivalente a la intensidad de la lluvia y depende de la permeabilidad del suelo (Guzzetti et al., 2005; Rahardjo et al., 2007). En general, existe un consenso en que para suelos con baja permeabilidad y conductividad hidráulica, la lluvia previa desempeña un papel crucial, ya que mantiene las presiones de poros positivas durante un período más largo después de las lluvias (Hengxing et al., 2003; Rahardjo et al., 2008).

Figura 9*Lluvia antecedente*

Nota. El factor detonante por precipitación puede medirse en diferentes temporalidades, donde se puede tener un riesgo de generarse deslizamiento en lluvias intensas de las últimas 24 horas, de los últimos 3 días o lluvias no intensas pero constantes en periodos de tiempos mas largos. . Tomado de king et al. (2021).

La succión es una de las variables más cruciales en la teoría de suelos no saturados (Fredlund & Morgerstern, 1977; Fredlund & Rahardjo, 1993; Huat et al. 2006). En suelos no saturados, la permeabilidad está directamente relacionada con la succión debido a la distribución heterogénea de los poros y del agua dentro de la masa de suelo. La cantidad de agua retenida también depende de la succión de la matriz y de la capacidad intrínseca del suelo para retener la humedad (Ng & Shi, 1998). A medida que disminuye el contenido volumétrico de agua, la succión y, por ende, la conductividad hidráulica disminuyen. Esto se debe a que hay menos poros conectados en la estructura del suelo, lo que reduce la cantidad de canales disponibles para el

flujo de agua (Collins & Znidarcic, 2004). Los suelos de granos finos generalmente no desarrollan presiones de poros positivas, y la falla suele ocurrir debido a la pérdida de succión.

En relación a la morfometría de las laderas, varios investigadores han examinado el comportamiento hidrológico de puntos específicos en una cuenca al considerar la pendiente y la topografía. A partir de los trabajos de Montgomery & Dietrich (1994) y Montgomery et al. (1998), se ha evidenciado que los desplazamientos en grupo superficiales están fuertemente influenciados por la topografía superficial, que afecta la convergencia del flujo subsuperficial y aumenta la saturación del suelo (Guimaraes et al., 2003; Pellenq et al., 2003; Rosso et al., 2006; Fernandes et al., 2004). Estos estudios se basan en la idea de que, bajo condiciones hidráulicas estáticas, los flujos de agua subsuperficial están relacionados con el llamado índice topográfico, que refleja la tendencia del agua a acumularse en cualquier punto de la cuenca (expresado en términos de A_c) y la tendencia de las fuerzas gravitacionales a mover el agua hacia abajo (indicado en términos de $\tan\beta$ como un gradiente hidráulico aproximado) (Quinn et al., 1991). No obstante, no solo la pendiente sino también la forma de esta (concavidad y convexidad) son factores que influyen en la aparición de desplazamientos en grupo superficiales (Talebi et al., 2008; Borga et al., 2002; Iida, 1999). En la literatura se consideran tres formas hidrogeomorfológicas básicas para evaluar la estabilidad: (1) divergentes; (2) planas; y (3) convergentes.

En las laderas divergentes o de forma convexa, el flujo subsuperficial es disperso, lo que hace que un nivel freático suspendido sea poco común y que las presiones de poros sean más bajas en comparación con otras geoformas en las laderas (Berne et al., 2005; Sidle & Ochiai, 2006). Específicamente, la curvatura del perfil (cóncava, recta y convexa) controla cómo cambia la velocidad del flujo de masa de agua descendente en la ladera, mientras que el plano de curvatura (convergente, paralelo y divergente) define la convergencia topográfica, que es un factor importante en la concentración del flujo subsuperficial. Los perfiles convexos generalmente son más estables que los perfiles cóncavos o planos. En cuanto a los planos de curvatura, la estabilidad aumenta cuando el plano cambia de convergente a divergente, especialmente en los perfiles convexos (Talebi et al., 2008). En general, los investigadores están de acuerdo en que los controles topográficos del flujo subsuperficial afectan los patrones de humedad a largo plazo en una cuenca y determinan la presión inicial antes del inicio de una tormenta.

Por último, el espesor del suelo en una ladera representa un parámetro crítico en el análisis de la estabilidad de la pendiente (Segoni et al., 2012). Los suelos relativamente delgados son más susceptibles a los flujos terrestres saturados en comparación con los suelos más gruesos, que tienen una mayor capacidad para retener agua. La profundidad del suelo se refiere al alcance hasta la roca subyacente, pero es importante tener en cuenta que una superficie de falla puede generarse en cualquier cambio significativo de la conductividad hidráulica, por lo que la superficie de falla no está necesariamente relacionada con el espesor total del suelo. A medida que aumenta la profundidad del suelo, es necesario considerar intervalos de lluvia antecedente

más largos. Cuando se trata de movimientos en masa con espesores de suelo superficiales, puede ser suficiente tener en cuenta la lluvia de las horas previas. Sin embargo, para movimientos en masa con espesores de suelo más profundos, es necesario considerar horizontes temporales de varios meses (Capparelli et al., 2009). Por último, el espesor del suelo en una ladera representa un parámetro crítico en el análisis de la estabilidad de la pendiente (Segoni et al., 2012). Los suelos relativamente delgados son más susceptibles a los flujos terrestres saturados en comparación con los suelos más gruesos, que tienen una mayor capacidad para retener agua. La profundidad del suelo se refiere al alcance hasta la roca subyacente, pero es importante tener en cuenta que una superficie de falla puede generarse en cualquier cambio significativo de la conductividad hidráulica, por lo que la superficie de falla no está necesariamente relacionada con el espesor total del suelo. A medida que aumenta la profundidad del suelo, es necesario considerar intervalos de lluvia antecedente más largos. Cuando se trata de movimientos en masa con espesores de suelo superficiales, puede ser suficiente tener en cuenta la lluvia de las horas previas. Sin embargo, para movimientos en masa con espesores de suelo más profundos, es necesario considerar horizontes temporales de varios meses (Capparelli et al., 2009).

Análisis de la Precipitación Como Factor Detonante

Los movimientos en masa causados por la lluvia, a menudo conocidos como deslizamientos superficiales planares o "soil slips," se caracterizan por ser delgados (0,3 – 2 m),

con una superficie de falla que sigue la pendiente y un escarpe de área reducida (Anderson & Sitar, 1995). Estos movimientos se desencadenan durante lluvias intensas debido a un rápido aumento en la presión de poros o la pérdida de cohesión aparente (Wang & Sassa, 2003; Terlien, 1998; Crosta, 1998; Crosta & Frattini, 2003). El material desplazado, a menudo a través de licuefacción o reducción rápida de la resistencia al corte en condiciones no drenadas, se convierte en un flujo que se mueve hacia abajo, erosionando y transportando sedimentos del canal, lo que aumenta el volumen del material desplazado inicialmente (Wang & Sassa, 2003; Wieczorek et al., 2000).

Para suelos parcialmente saturados, Li et al. (2005) describen cómo la infiltración de la lluvia reduce la succión en la matriz del suelo en la ladera, disminuyendo la resistencia al corte del material. Una vez que el suelo está completamente saturado, la succión desaparece y se forma un nivel freático colgado con presión de poros positiva, lo que disminuye aún más la resistencia al corte, aumentando la probabilidad de deslizamientos.

La lluvia puede actuar de dos maneras en la estabilidad de las laderas según Gostelow (1991) e Iiritano et al. (1998): (1) lluvias intensas reducen la resistencia al corte por pérdida de cohesión, causando deslizamientos superficiales y (2) lluvias de larga duración aumentan la presión de poros en superficies de falla potenciales, generando deslizamientos más profundos a lo largo de superficies de cizalla preexistentes.

La percolación del agua en el suelo es clave en la generación de deslizamientos. Los suelos pueden mantener agua en poros pequeños debido a la adhesión y tensión superficial, contrarrestando la gravedad. Si el contenido de agua supera el contenido capilar, el agua gravitacional percola hacia abajo.

La estabilidad de la ladera se ve afectada por el aumento de la presión de poros, siendo más crítica cuando el agua saturada alcanza la superficie de la ladera (Anderson & Sitar, 1995).

La falla del suelo puede ocurrir durante o después de la lluvia, siendo influenciada por la saturación o la pérdida de succión del suelo (Collins & Znidarcic, 2004).

Métodos Estadísticos Basados en Datos para el Cálculo de la Susceptibilidad

Los métodos basados en datos, se dividen en dos categorías: bivariados y multivariados. Un requisito fundamental para implementar estos métodos y evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa es disponer de un inventario de estos movimientos. Para esta tesis se empleó el método Bivariado

Métodos Bivariados:

En los métodos bivariados, cada mapa de factores, como geología, pendiente, coberturas, etc., se combina con el inventario de movimientos en masa para calcular los pesos de las clases que conforman las variables. Estos pesos se basan típicamente en la densidad de movimientos en masa. Los métodos estadísticos bivariados son herramientas útiles para que los analistas identifiquen qué factores o combinaciones de factores desempeñan un papel importante en la ocurrencia de movimientos en masa.

Es importante destacar que estos métodos se basan en la relación observada entre la distribución de los movimientos en masa y cada categoría de la variable, lo que requiere que cada variable se convierta en una variable categórica dividida en clases. Además, los métodos bivariados solo permiten asignar peso a las clases y no a las variables en sí, lo que significa que todas las variables tienen igual importancia en la ocurrencia de movimientos en masa. Para abordar esta limitación, es común combinar los métodos estadísticos bivariados con métodos heurísticos como AHP (Análisis Jerárquico de Procesos) para asignar pesos a las variables.

Pesos de Evidencia (WofE)

Este método se basa en evaluar la relación entre factores condicionantes (evidencias) y áreas propensas a movimientos en masa mediante la asignación de pesos. Los pesos de cada factor se calculan utilizando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y

condicional de que ocurran movimientos en masa (Bonham, 1994). La probabilidad incondicional se determina mediante el análisis de movimientos en masa pasados durante un período específico y puede modificarse al agregar nueva evidencia, lo que da lugar a una probabilidad posterior (Bonham, 1994). La probabilidad posterior se obtiene al sumar los pesos de cada factor en una función aditiva, generando así una función de probabilidad para cada mecanismo analizado.

Es importante destacar que la aplicación de este método está sujeta a ciertas condiciones que deben considerarse al interpretar los resultados. Según van Westen (2013), un análisis estadístico efectivo requiere una gran cantidad de zonas inestables relacionadas con varios tipos de mecanismos y con información de edad precisa. Para una escala de 1:25,000, se recomienda combinar este método estadístico con un enfoque ponderado basado en el criterio de expertos.

Ventajas del método:

Objetividad, ya que evita la subjetividad en la asignación de pesos a los factores, como ocurre en métodos semicuantitativos.

Evaluación de la relación entre los factores condicionantes y los movimientos en masa mediante análisis estadísticos.

Replicabilidad y control del proceso de zonificación resultante.

Capacidad de controlar la eficacia predictiva del modelo.

Desventajas del método:

Suposición de que los movimientos en masa son causados por la misma combinación de factores en toda el área de estudio.

Requiere experiencia en la selección de factores condicionantes relacionados con las hipótesis de falla planteadas.

Sensibilidad a errores de mapeo, completitud del inventario, resolución de datos y unidad de terreno considerada.

Limitaciones en regiones poco conocidas, y resultados potencialmente menos confiables cuando se basan en una muestra pequeña de eventos de procesos conocidos.

Suposición de que los factores son condicionalmente independientes, lo que debe ser verificado.

Los mapas resultantes no se pueden verificar mediante una solución analítica.

Los pesos positivos ($W+$) indican la presencia de una clase como un factor que favorece la ocurrencia de movimientos en masa, y su magnitud representa la fuerza de la correlación. En

contraste, los pesos negativos (W-) señalan que la ausencia de una clase está relacionada con la ausencia de movimientos en masa.

Los términos utilizados en la fórmula son los siguientes:

Tabla 2

Método de Peso de la Evidencia.

$Npix$ = number of pixels		B_i : Potential landslide conditioning factor	
		(Present)	(Absent)
S: Landslides	Present	$Npix_1$	$Npix_2$
	Absent	$Npix_3$	$Npix_4$

$$W_I^+ = \log_e \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1+Npix_2}}{\frac{Npix_3}{Npix_3+Npix_4}}$$

$$W_I^- = \log_e \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1+Npix_2}}{\frac{Npix_4}{Npix_3+Npix_4}}$$

Nota. El peso de evidencia se obtiene mediante una formula estadística que evalua los pixeles que tienen y no tienen relación y son evaluados en una ecuación logarítmica.

Npix1: Número de píxeles con movimientos en masa (S) en la clase Bi.

Npix2: Número de píxeles con movimientos en masa que no pertenecen a la clase Bi.

Npix3: Número de píxeles en la clase Bi donde no hay movimientos en masa (S).

Npix4: Número de píxeles fuera de la clase Bi donde no hay movimientos en masa (S).

La fórmula $C = W_+ - (W_-)$ calcula el contraste, que representa la relación espacial entre la clase y la predicción de movimientos en masa.

En este contexto, los pesos positivos (W_{i+}) señalan la importancia de la presencia de un factor en el deslizamiento de la siguiente manera:

$W_{i+} > 0$: Un valor positivo indica que la presencia del factor contribuye a la ocurrencia del deslizamiento. La magnitud del valor positivo refleja el grado de correlación directa o el nivel de contribución del factor al deslizamiento.

$W_{i+} < 0$: Un valor negativo indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia de deslizamientos. La magnitud del valor negativo refleja el grado de correlación inversa, es decir, que la presencia de este factor está relacionada con la falta de deslizamientos.

$W_{i+} = 0$: Un valor igual a cero indica que el factor no tiene relevancia en la ocurrencia de deslizamientos, es decir, no afecta de manera significativa ni contribuye a la presencia o ausencia de deslizamientos.

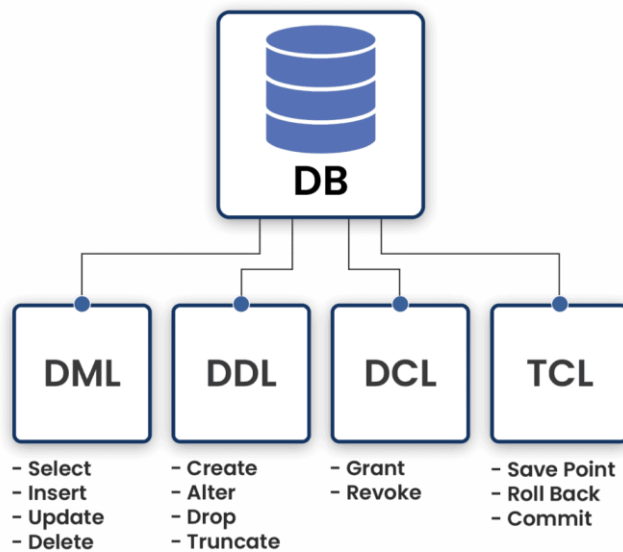
Base de datos Relacionales (SQL) y Extensión Geo espacial

Bases de Datos Relacionales:

Según Connolly y Begg (2014), una base de datos relacional es un conjunto de datos organizados en tablas relacionadas entre sí mediante claves. Cada tabla representa una entidad y las relaciones entre ellas se basan en claves primarias y foráneas. El modelo relacional se basa en la teoría de conjuntos y álgebra relacional para manipular datos.

Figura 10

Representación de estructura SQL



Nota. Se representan las sentencias SQL utilizadas en el desarrollo normal de una base de datos. Tomado de k21Academy

Comandos DDL (Data Definition Language):

Estos comandos se utilizan para definir la estructura y el esquema de la base de datos, es decir, para crear, modificar y eliminar tablas y otros objetos de la base de datos.

CREATE TABLE: Este comando se utiliza para crear una nueva tabla en la base de datos.

Define la estructura de la tabla, especificando las columnas y sus tipos de datos.

ALTER TABLE: Permite modificar la estructura de una tabla existente. Puede utilizarse para agregar, modificar o eliminar columnas, entre otras acciones.

DROP TABLE: Elimina una tabla completa, incluyendo todos sus datos y estructura.

Comandos DML (Data Manipulation Language):

Estos comandos se utilizan para manipular y gestionar los datos almacenados en las tablas de la base de datos.

SELECT: Utilizado para recuperar datos de una o más tablas. Puedes especificar qué columnas deseas ver y aplicar condiciones para filtrar los resultados.

INSERT: Agrega nuevos registros a una tabla existente, especificando los valores para cada columna.

UPDATE: Modifica registros existentes en una tabla al especificar los nuevos valores.

DELETE: Elimina registros de una tabla que cumplan con una condición específica.

Entidad-Relación:

El modelo entidad-relación (ER) es una técnica para diseñar bases de datos relacionales. Consiste en representar las entidades (objetos o conceptos del mundo real) y las relaciones entre ellas en un diagrama. Según Elmasri y Navathe (2015), en un diagrama entidad-relación, las entidades se representan como rectángulos y las relaciones como líneas que conectan las entidades. Las entidades pueden tener atributos que describen sus propiedades.

Bases de Datos Geoespaciales:

Las bases de datos geoespaciales almacenan y gestionan datos relacionados con la ubicación geográfica. Según Longley et al. (2015), estas bases de datos incluyen información espacial, como coordenadas geográficas y polígonos, y permiten realizar consultas y análisis espaciales. Ejemplos comunes de bases de datos geoespaciales incluyen PostgreSQL con el complemento PostGIS y MongoDB con GeoJSON.

Programación en Python y Usos de Librerías GIS (PyQGIS / ArcPy)

Lenguaje de Programación Python:

Python es un lenguaje de programación de alto nivel creado por Guido van Rossum en 1991. Es conocido por su sintaxis simple y legible, lo que lo hace muy adecuado para principiantes. Python es interpretado, lo que significa que el código fuente se ejecuta línea por línea en lugar de compilarlo previamente. Es un lenguaje versátil que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde desarrollo web hasta análisis de datos y automatización de procesos SIG, se han creado algunas librerías para ello, dentro de las principales tenemos :

PyQGIS:

PyQGIS es una biblioteca de Python que permite interactuar con QGIS, un popular sistema de información geográfica de código abierto. PyQGIS proporciona acceso a la funcionalidad de QGIS a través de Python, lo que permite la automatización de tareas de procesamiento y análisis espacial. Se utiliza comúnmente en el desarrollo de complementos y scripts para QGIS.

ArcPy:

ArcPy es una biblioteca de Python desarrollada por Esri para trabajar con ArcGIS, un conjunto de software de SIG. ArcPy permite automatizar tareas dentro de ArcGIS, como la creación y manipulación de datos geospaciales, análisis espaciales y generación de mapas. Es ampliamente utilizado en la comunidad de SIG, especialmente en entornos que dependen de ArcGIS.

Otras librerías que son muy útiles para automatización SIG.

GDAL/OGR: El paquete GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) y la biblioteca OGR (Simple Features Library) son bibliotecas esenciales para la manipulación y transformación de datos geospaciales en diversos formatos.

Fiona: Una biblioteca de Python que se utiliza para leer y escribir datos en formato vectorial, compatible con OGR.

GeoPandas: Extiende las capacidades de Pandas para trabajar con datos geospaciales, permitiendo análisis espaciales y manipulación de datos tabulares georreferenciados.

PostGIS: Una extensión espacial para PostgreSQL que agrega soporte para datos geospaciales, permitiendo el almacenamiento y análisis de datos espaciales en una base de datos relacional.

Leaflet: Una biblioteca JavaScript ampliamente utilizada para crear mapas interactivos en aplicaciones web.

GRASS GIS: Un sistema de información geográfica de código abierto y completo con una amplia gama de funcionalidades de análisis espacial.

6. METODOLOGÍA

6.1 Enfoque Metodológico

Este trabajo presenta una investigación de tipo cuantitativa, el método para el cálculo de la susceptibilidad y la amenaza están basados en la probabilidad bayesiana que es soportado por datos cuantificables.

Para evaluar inicialmente la susceptibilidad por movimientos en masa se parte inicialmente de la evaluación de la literatura geológica y geotécnica del municipio para identificar cuáles son los principales condicionantes y detonantes que inciden en la generación de movimientos en masa, desde la literatura se identificaron que específicamente para el municipio de Manizales los principales condicionantes son modelados por la geología y por condiciones climáticas medio ambientales, se concluye como diagnostico general, las formaciones geológicas, procesos geomorfológicos, usos del suelo, actividad tectónica, relieve topográfico montañoso, entre otros. Estos aspectos identificados desde la teoría y diagnostico profesional se procede a su recopilación cartográfica y posterior evaluación empleando el método Bayesiano (WoF) para finalmente determinar cuáles son los condicionantes que más afectan la generación de movimientos en masa del municipio.

Posteriormente Se realiza una recopilación de datos de la precipitación acumulada de los últimos 25 días, desde las estaciones meteorológicas, para interpolar el A25 en todo el municipio

y así obtener el factor detonante que será ponderado con la susceptibilidad para tener como mapa resultante la Amenaza por deslizamientos detonados por lluvia.

Tabla 3

Adquisición de Datos Ráster

Material	Fuente	Anotaciones	Tipo
DEM 12.5m	ALOS PALSAR	La elevación del terreno es fundamental para identificar áreas propensas a movimientos en masa.	RASTER
Pendientes	Derivado DEM	Las pendientes o inclinaciones pronunciadas aumentan la probabilidad de movimientos en masa, ya que la gravedad tiene mayor influencia en terrenos con fuertes pendientes, lo que puede desencadenar deslizamientos, avalanchas o erosiones.	RASTER
Curvatura de Perfil	Derivado DEM	La curvatura en el perfil del terreno puede indicar áreas propensas a acumular agua, lo que aumenta la saturación del suelo y, por lo tanto, el riesgo de movimientos en masa.	RASTER
Curvatura Tangencial	Derivado DEM	La curvatura tangencial es una herramienta útil para detectar cambios abruptos en la topografía, lo cual podría señalar la presencia de fallas geológicas o debilidades en el terreno con potencial para movimientos en masa	RASTER
Aspecto	Derivado DEM	La orientación de las pendientes en relación con los puntos cardinales es crucial para entender la exposición al sol y la distribución de la vegetación, factores determinantes de la estabilidad del terreno.	RASTER
Dirección de Flujo	Derivado DEM	Conocer la dirección del flujo de agua en la superficie es esencial para evaluar la erosión y la saturación del suelo, dos factores críticos en la susceptibilidad a movimientos en masa.	RASTER
Rugosidad	Derivado DEM	La textura y la irregularidad de la superficie del terreno, conocida como rugosidad, pueden influir significativamente en la estabilidad. Superficies más rugosas suelen ser más estables, mientras que las suaves pueden ser más susceptibles a la erosión y a los movimientos en masa.	RASTER

Alturas	Derivado DEM	La altitud del terreno juega un papel crítico en la identificación de áreas susceptibles a movimientos del suelo. Áreas con altitudes más elevadas tienden a ser más estables, mientras que las de menor altitud pueden estar más propensas a experimentar deslizamientos y desprendimientos.	RASTER
---------	--------------	---	--------

Nota. Tabla resumen de los insumos ráster necesarios para el cálculo de Susceptibilidad

Tabla 4

Adquisición de Datos Vectoriales

Material	Fuente	Anotaciones	Tipo
Unidades Geológicas Superficiales	Corpocaldas	La identificación y clasificación de las formaciones geológicas en la superficie son fundamentales para comprender cómo diferentes tipos de rocas y depósitos sedimentarios pueden influir en la estabilidad del terreno.	VECTORIAL
Geomorfología	Corpocaldas	El estudio de la forma y estructura de la superficie terrestre permite identificar características topográficas, como laderas, montañas y valles, que pueden indicar áreas propensas a movimientos en masa o no.	VECTORIAL
Tipos de Suelos	Corpocaldas	La composición y las propiedades del suelo, como su cohesión y permeabilidad, son críticas para evaluar la estabilidad del terreno y su susceptibilidad a deslizamientos y erosión.	VECTORIAL
Usos de suelos	Corpocaldas	La utilización de la tierra, como la urbanización o la agricultura intensiva, puede modificar la estructura del suelo y aumentar la vulnerabilidad a los movimientos en masa.	VECTORIAL
Red hídrica	Corpocaldas	El análisis de los cursos de agua, su caudal y la capacidad de drenaje es esencial para entender cómo el agua puede influir en la saturación del suelo y desencadenar deslizamientos.	VECTORIAL

Geología y sistema de fallas	Servicio Geologico Colombiano	La identificación de características geológicas, como fallas activas o inactivas, puede ayudar a prever movimientos en masa relacionados con eventos sísmicos o deformaciones del terreno.	VECTORI AL
Precipitación A25	SIMAC- IDEAM	El registro de precipitación es vital, especialmente la lluvia intensa en un periodo de 25 años (A25), ya que eventos de lluvia extrema pueden desencadenar movimientos en masa.	NUMERIC O
División política, Municipios, Vías y Manzanas	DANE	La información sobre la distribución urbana y la infraestructura vial es importante para evaluar el riesgo en áreas pobladas y planificar medidas de mitigación.	VECTORI AL
Inventario de movimientos en Masa	Corpocaldas, Servicio Geológico Colombiano y Digitalización Propia	Un registro de eventos previos de movimientos en masa es esencial y el insumo más importante para comprender las áreas históricamente afectadas y anticipar posibles futuros deslizamientos.	VECTORI AL

Nota. Tabla resumen de los insumos Vectoriales necesarios para el cálculo de Susceptibilidad

Para cada uno de los insumos obtenidos, se hace una posterior depuración y normalización de la información, la cartografía puede venir en sistemas de coordenadas diferentes y se re proyectan a Colombia MAGNA SIRGAS -3115.

Una vez Re proyectada Cada una de las cartografías, se procede a realizar un recorte asociado al área de estudio, donde se toma como base la división política del municipio de Manizales.

Se inspecciona su tabla de atributos y se realiza la limpieza de la información, puesto que en algunos casos algunas columnas vienen con vacíos y en otros casos campos se limpian datos con caracteres incomprensibles.

Se normaliza la información previamente antes de comenzar con el procedimiento para el cálculo de susceptibilidad por Movimientos en Masa.

6.2 Tipo de estudio

El tipo de estudio realizado es un estudio exploratorio. La elección de este enfoque se fundamenta en la necesidad de investigar y comprender una nueva metodología para la zonificación de amenazas por deslizamientos detonados por lluvia para el municipio de Manizales-Caldas de manera continua y en tiempo real basados en metodologías previamente aceptadas. Este estudio se enfoca en el desarrollo de un sistema innovador que automatice la cartografía de amenazas y garantice la disponibilidad de información en tiempo real. Al tratarse de un enfoque poco estudiado y novedoso, se considera un estudio exploratorio debido a su naturaleza de investigación pionera en esta área específica. Su objetivo principal es aumentar la familiaridad con este fenómeno y determinar la viabilidad de implementar un sistema de zonificación en tiempo real para la gestión de amenazas por deslizamientos detonados por lluvia.

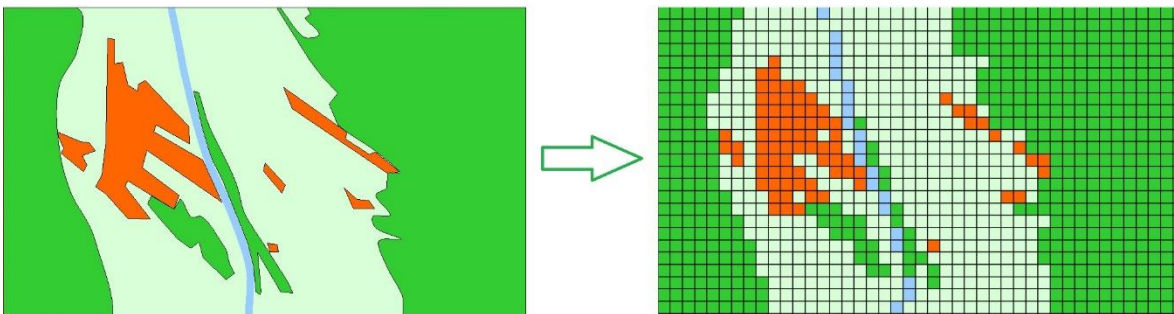
6.3 Procedimientos

6.3.1 Rasterización de Insumos

La apertura del procedimiento de la metodología propuesta comienza con los insumos cartográficos previamente obtenidos y normalizados, y la cartografía correspondiente al inventario por movimientos en masa debe ser de tipo polígono, en el caso de que sea punto, se debe aplicar un buffer de mínimo 12 metros de diámetro, ya que es el área mínima cartografiable está asociada a la resolución espacial del DEM obtenido (12,5m para este caso), posteriormente se hace una rasterización de cada uno de los mapas e insumos obtenidos en formato shapefile a un formato ráster como tif o jpeg

Figura 11

Representación de vectorial a ráster



Nota. Se representa gráficamente como sería el cambio de figuras de mapas vectoriales a una transformación de un mapa ráster. tomado de cursosgis.com

Se usa la herramienta Rasterizar de QGIS, se ubica la capa origen (vectorial), se define la densidad de pixeles equivalente a 12,5m (en base al DEM, de trabajo) y la ruta de salida en formato tif u otro formato ráster.

Para el caso del Inventario de movimientos en masa el valor ráster debe definirse en valores de 0 y 1, debe ser del tipo entero en donde los valores de 0, son equivalentes a zonas donde no hay presencia de movimientos en masa y 1 para lugares donde si hay presencia de movimientos en masa.

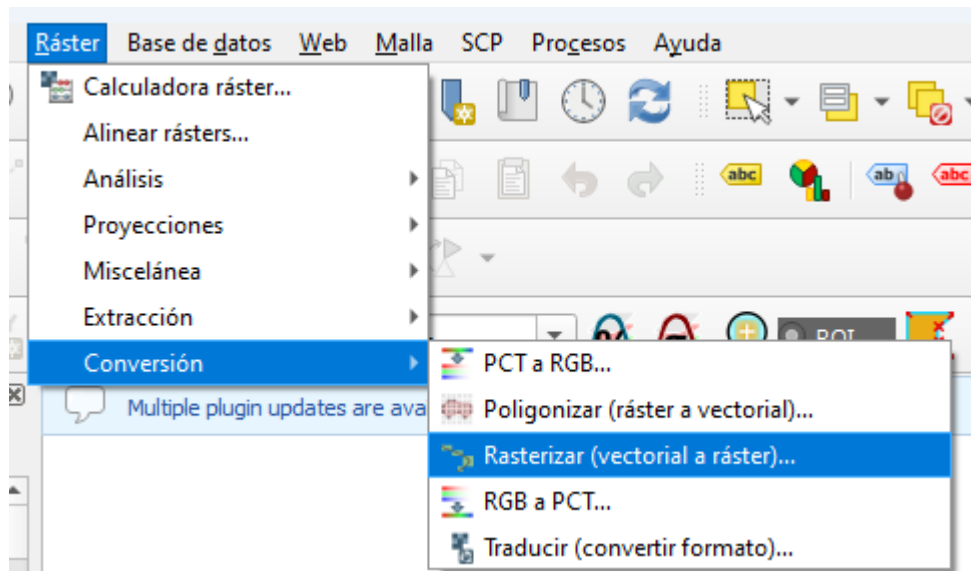
Se recomienda hacer una unión de todos los polígonos que representan movimientos en masa, de tal manera que solo se tenga una única fila con los polígonos y asignarle el valor de 1 en su tabla de atributos, posteriormente con una copia del polígono del área de la zona de estudio, que también debe ser un único polígono se hace una intersección con el inventario de movimientos en masa, eliminando en este polígono de la zona de estudio las áreas de movimientos en masa y posteriormente se une esta capa vectorial con el inventario de movimientos, y ahora se deberán tener 2 filas, un polígono representando las áreas que no tienen movimientos en masa, se le asigna el valor de 0 y otra serie de polígonos unidos en un campo que indican presencia de movimientos en masa asignándole el valor de 1. Se guardan cambios y se procede a rasterizar

Al momento de la rasterización preguntara con que campo serán representados los pixeles, se recomienda poner un ID ya previamente establecido desde la normalización, para el inventario de movimientos en masa será la columna que indica el valor de 0 y 1.

También se debe indicar la resolución del pixel que debe ser equivalente al DEM.

Figura 12

Herramienta Rasterizar



Nota. Esta herramienta permite cargar un mapa en formato vectorial shp, kml u otros a un archivo de salida ráster como tif o jpeg. tomado de QGIS.

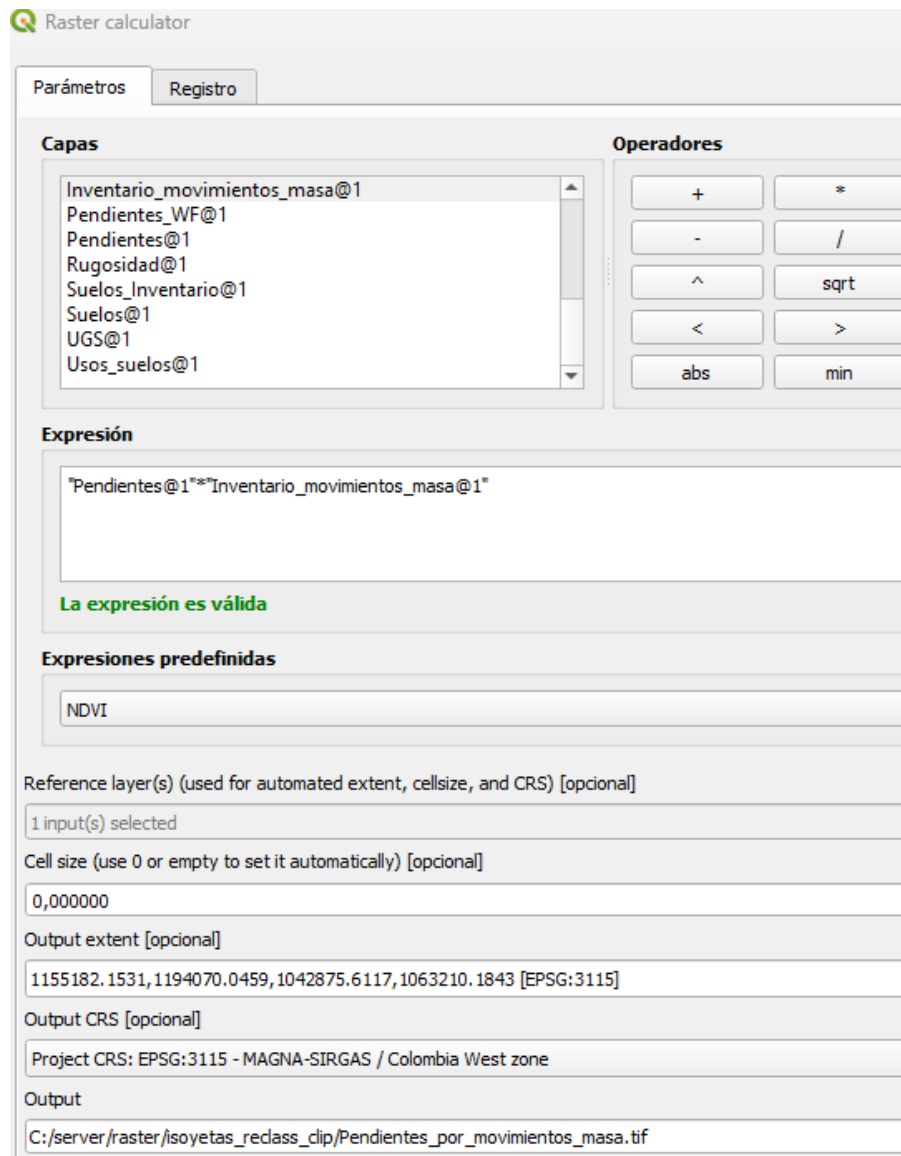
6.3.2 Cruce Entre los Insumos y el Inventario de Movimientos en Masa

Una vez se tiene la rasterización de todos los mapas que se tenían en formato vectorial, también se incluyen los que ya estaban en formato ráster que son los insumos derivados del DEM, se procese a realizar una multiplicación de cada uno de los mapas ráster con el inventario

de movimientos en masa, aplicando algebra de mapas usando la herramienta de Calculadora Ráster de QGIS.

Figura 13

Ráster Calculator

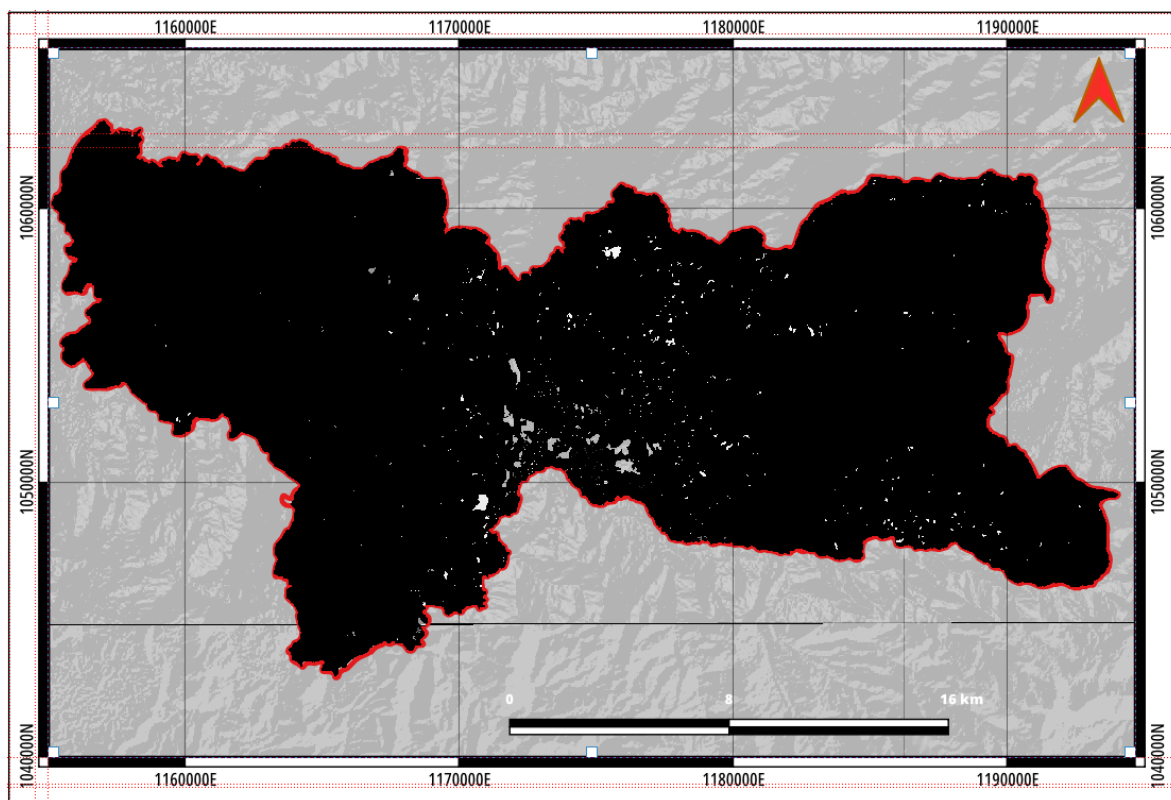


Nota. Configuración de calculadora ráster para cada insumo x MenM

Al multiplicar cada uno de los insumos se obtendrá otro conjunto de imágenes ráster, se recomienda indicar guardar en una carpeta específica para este procedimiento y darle un nombre adecuado para mantener un orden, puesto que puede ser una gran cantidad de mapas donde se deberá obtener informe ráster de cada uno de estos mapas (cruce insumo x inventario MenM) y de los originales (ráster) en el siguiente proceso.

Figura 14

Inventario de movimientos en masa en formato ráster



Nota. Ejemplo de cruce entre un mapa de pendientes y el inventario por MenM.

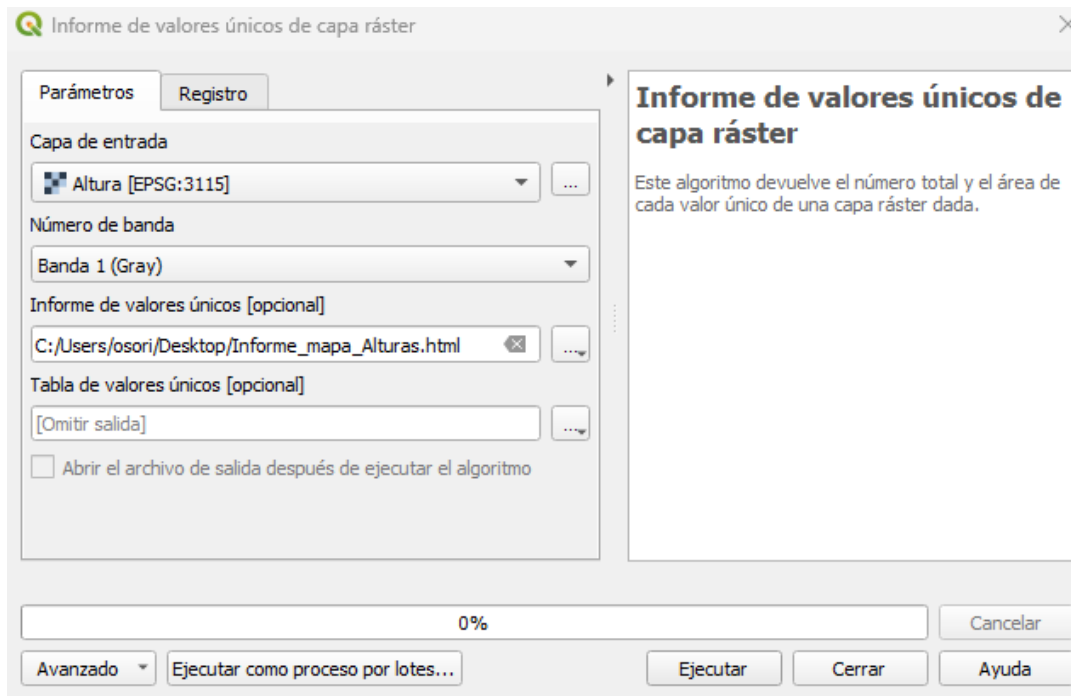
6.3.3 Informe de Valores Únicos en Capas Ráster

En este procedimiento se debe tener preferiblemente por separado las imágenes rasterizadas de los insumos originales, de las imágenes ráster de los insumos originales cruzados con el inventario de Movimientos en Masa, y de manera individual la imagen ráster del Inventario de movimientos en Masa.

Ya que se debe obtener un informe de cada uno de los mapas, para este procedimiento se utilizó la herramienta “Informe de valores únicos de capa ráster”, donde se solicita la imagen ráster y una ruta de salida en formato HTML.

Figura 15

Herramienta de reporte ráster



Nota. Configuración de la herramienta de reporte ráster para Informes de imágenes Ráster. Tomado de Qgis

Este informe Ráster se divide en Tres columnas que se comprende de la siguiente manera:

Valor o ID: Este asociado a cada una de las sub capas previamente normalizadas en el insumo evaluado como ejemplo para este caso otorga valores entre 2 y 18, donde cada uno de estos valores corresponde a una altura específica ejemplo 2: 800 metros sobre el nivel del mar, 3: 900 metros sobre el nivel del mar... 17: 2300 msnm. En este caso se omitió el valor de 1, puesto que no se encontró ningún pixel con este valor.

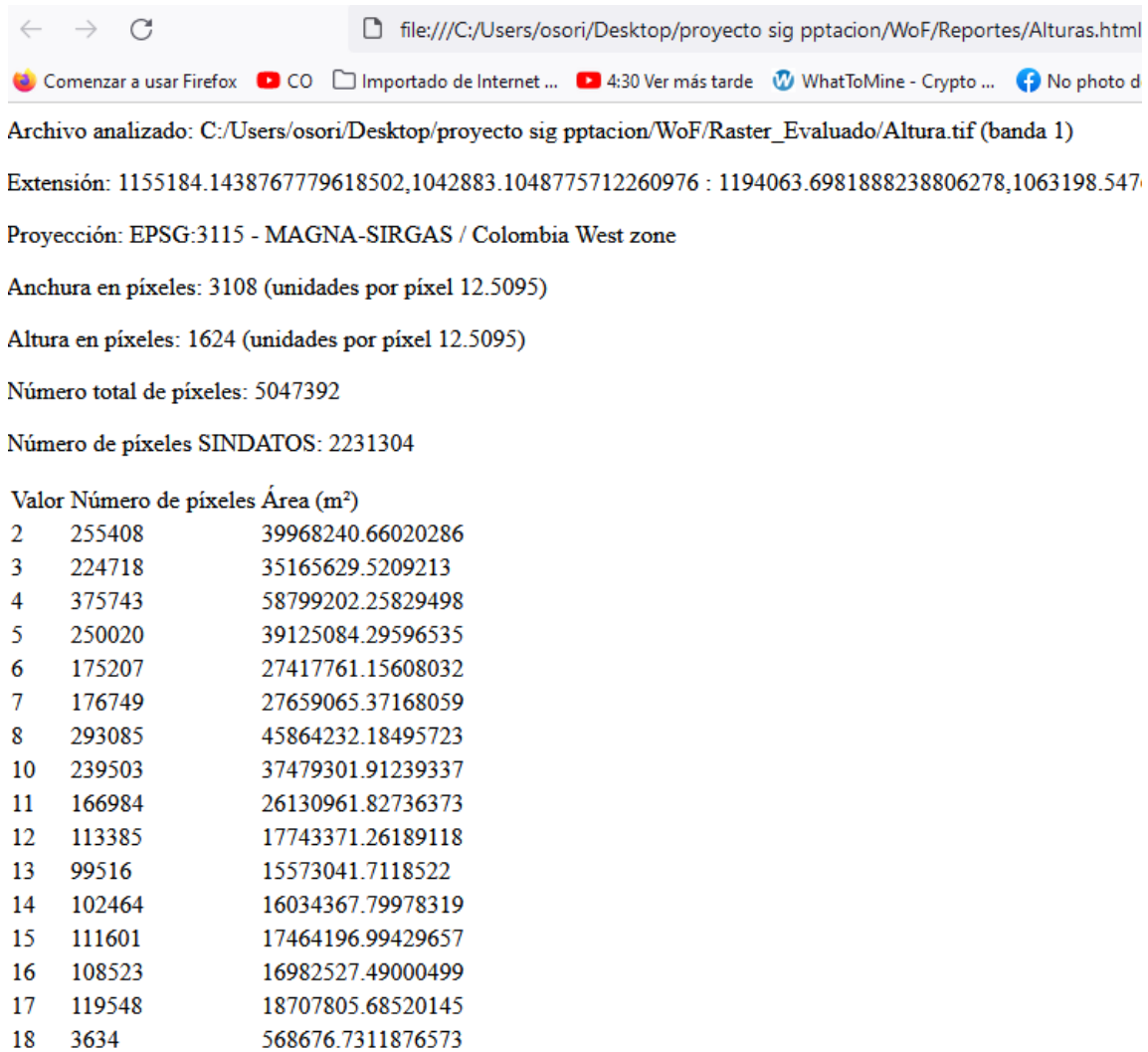
Numero de Pixeles: Sera el conteo o sumatoria total de todos los pixeles con el mismo valor asociado al ID dispuestos de manera espacial, ejemplo en el ID de valor 2, que puede corresponder a una altura de 800 msnm, tiene un conteo total de 255408 pixeles que registraron esta altura.

Área: Será la sumatoria del área de cada uno de los pixeles identificados con el mismo valor ID.

Este procedimiento debe repetirse con cada insumo y hacer una recopilación de los pixeles obtenidos en cada uno de los mapas, a continuación, se dan una recomendación para la recopilación de los pixeles correspondientes a cada uno de los mapas de la cartografía original o mapas derivados del DEM, los inventarios de movimientos en masa y la cartografía original cruzada por el inventario de movimientos en masa.

Figura 16

Resultado de Reporte ráster para mapa de Alturas.



Nota, Este sería el ejemplo de un resultado del informe ráster del mapa de Alturas, donde indica por tipo de clase su cantidad de píxeles y el área que ocupa en el mapa.

Informe de Cartografía Original o Derivados del DEM en Formato Ráster.

Teniendo en cuenta una normalización previa de la información en cada uno de los mapas, se busca asociar cada una de las filas en la columna “valor” que será el código que tengan en común con la normalización de los mapas o ráster originales para mantener la relación presente a la hora de del mapa a evaluar, esta relación puede visualizarse mejor en un ejemplo apoyados en una hoja de cálculo que a su vez será útil para los cálculos estadísticos explicados en el siguiente

Tomaremos como ejemplo el resultado del Mapa de rugosidad derivado del DEM, puesto que tiene pocas capas y es más practico para el ejemplo

Figura 17

Resultado de Reporte raster para mapa de Rugosidad.

Archivo analizado: C:/Users/osori/Desktop/proyecto sig pptacion/WoF/Raster_Evaluado/Rugosidad.tif (banda 1)
 Extensión: 1155184.1438767781946808,1042883.1048775711096823 : 1194063.6981888243462890,1063198.54
 Proyección: EPSG:3115 - MAGNA-SIRGAS / Colombia West zone
 Anchura en píxeles: 3108 (unidades por píxel 12.5095)
 Altura en píxeles: 1624 (unidades por píxel 12.5095)
 Número total de píxeles: 5047392
 Número de píxeles SINDATOS: 2233441

Valor	Número de píxeles	Área (m ²)
1	531089	83108958.85793211
2	1712761	268026231.9168174
3	570101	89213861.61992802

Nota. resultado del informe ráster del mapa de Rugosidad

A continuación, se tomara el ID asociado a los nombres de las capas en una hoja de cálculo para facilitar el procedimiento estadístico explicado en el siguiente capítulo.

Tabla 5

Informe ráster del mapa de Rugosidad

Código	CLASE	NPC	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4
1	BAJO	531089	2227	13621	528862	2269241
2	MEDIO	1712761	10724	5124	1702037	1096066
3	ALTO	570101	2878	12970	567223	2230880

Nota. recopilación del informe ráster del mapa de Rugosidad, el cual indica por tipo de clase cada uno de los píxeles evaluados.

La columna “Valor” del informe de pixel es asociada a cada clase de los mapas, como ejemplo para el mapa de rugosidad se tiene Rugosidad, Alta, media y baja, se guarda la información del número total de píxeles en el informe lo guardamos en la columna NPC, respetando las relaciones entre el ID o Valor asociado, también tener presente que el nombre en las columnas de la hoja de cálculo no son obligatorias, sin embargo se recomienda darles un nombre para tener presente a que columna consisten.

Es de anotar que en el caso de que la columna “Valor” no cuente con todos los valores de la cartografía original, es decir que no identifique algunos de ellos, se deben tener en cuenta y para estos casos se le asigna el valor de 0 en el conteo de píxeles indicados en la columna “NPC” de la hoja de cálculo, ya que es importante incluirlos en el procedimiento estadístico.

Las columnas Npix1, Npix2, Npix3 y Npix4 se explican en el capítulo siguiente, que aborda el procedimiento estadístico WofE.

Informe del Inventario de Movimientos en Masa.

Para este procedimiento recordar que ya era estrictamente necesario haber normalizado o binarizado el inventario de movimientos en masa en valores de 0, para áreas sin presencia de movimientos en masa y valores de 1, para áreas con presencia de movimientos en masa y pasarlos a un formato ráster

Figura 18

Resultado del informe ráster del inventario por movimientos en masa

Archivo analizado: C:/Users/osori/Desktop/proyecto sig pptacion/WoF/Inventario_mm_12_5_n
 Extensión: 1155182.1530999999959022,1042875.6117000000085682 : 1194070.045900000002
 Proyección: EPSG:3115 - MAGNA-SIRGAS / Colombia West zone
 Anchura en píxeles: 3111 (unidades por píxel 12.5001)
 Altura en píxeles: 1627 (unidades por píxel 12.4982)
 Número total de píxeles: 5061597
 Número de píxeles SINDATOS: 2240844

Valor	Número de píxeles	Área (m ²)
0	2804905	438207748.0091377
1	15848	2475918.574942401

Nota: El informe indica que solo tiene 2 posibles resultados 1 si hay presencia de movimientos en masa o 0 si no hay registro de movimientos en masa en toda la zona de estudio.

Se toman los valores de los pixeles correspondientes a las áreas no deslizadas (0), y las correspondientes a las áreas deslizadas (1). Y se guardan en una hoja de cálculo que será información obligatoria para el cálculo estadístico.

Este procedimiento solo se hace una única vez, los demás mapas se evalúan todos.

Informe de Cartografía o Derivados del DEM Cruzados con el Inventario de Movimientos Masa Obtenidos en Formato Ráster.

Este procedimiento es similar a los anteriores con la diferencia, que aparecerán los pixeles afectados por movimientos en masa y los que no son afectados, en la columna ID el contador inicia con el valor de 0, en esta fila se tienen dichos pixeles que no tienen ningún cruce o fueron afectados por movimientos en masa, para las filas posteriores que continúan con 1,2,3... corresponden a los ID de las capas asociados a la cartografía original, que en este caso si fueron afectados por movimientos en masa, de igual forma si se da el caso que algunas capas no fueron identificadas en el informe, se deben incluir asignándole el valor de 0 en el conteo de pixeles afectados.

Figura 19

Resultado del informe ráster del inventario por movimientos en masa

```

Archivo analizado: C:/Users/osori/Desktop/proyecto sig pptacion/WoF/Raster_Evaluado/Rugosida
Extensión: 1155182.1530999999959022,1042875.61170000000085682 : 1194070.04590000000264
Proyección: EPSG:3115 - MAGNA-SIRGAS / Colombia West zone
Anchura en píxeles: 3109 (unidades por píxel 12.5082)
Altura en píxeles: 1626 (unidades por píxel 12.5059)
Número total de píxeles: 5055234
Número de píxeles SINDATOS: 2243367

Valor Número de píxeles Área (m²)
0 2796038 437372291.1381639
1 2227 348360.1053936646
2 10724 1677509.551073937
3 2878 450193.2569928005

```

Imagen x, resultado del informe ráster del cruce entre el mapa de rugosidad y el inventario por MenM.

Los valores de los píxeles que comienzan desde 1, son guardados en una hoja de cálculo, se recomienda que sea en la misma hoja de cálculo como en el ejemplo de la figura 19 dispuestos ahora en la columna Npix1. Que serán explicados en el siguiente capítulo con el método WofE.

6.3.4 Método Estadístico WofE

En este procedimiento, como es bien explicado en el Marco teórico busca evaluar la relación entre cada uno de los factores condicionantes y las áreas propensas a movimientos en masa representados en este caso con un inventario por movimientos en masa, con el objetivo de definir dentro de cada una de las capas de cada factor condicionante, cuales son las capas que están incidiendo en la generación de movimientos en masa, cuales son las capas que no tienen ninguna relación o cuales son las capas que por el contrario favorecen una estabilidad.

Se parte de que ya se tienen recopilados todos los informes de las capas ráster para continuar con el análisis

Tabla 6

Resumen y resultados estadísticos del informe asociado al mapa de rugosidad

Código	CLASE	NPC	NPIX1	NPIX2	NPIX3	NPIX4	WI+	WI-	WF
1	BAJO	531089	2227	13621	528862	2269241	-0,29641848	0,05806568	-0,35448417
2	MEDIO	1712761	10724	5124	1702037	1096066	0,10655683	-0,19189364	0,29845047
3	ALTO	570101	2878	12970	567223	2230880	-0,11000326	0,02614125	-0,13614451

Tabla 7

Pixeles totales, afectados y no afectados por MenM.

No. de Pixeles area total	2813951
No. de Pixeles area total Deslizada	15848
No. De pixeles area total NO Deslizada	2804905

Gráfico, x pixeles totales, afectados y no afectados por MenM.

A continuación, se explican cada una de las columnas de la hoja de cálculo para comprender las variables necesarias en las fórmulas estadísticas:

Código: Es el Valor o ID asociado a cada una de las clases de cada un condicionante evaluado.

Clase: Corresponde al nombre de cada una de las capas de un mapa o condicionante evaluado.

No. de Pixeles área total: Es la cantidad total de pixeles comprendidos en la zona de estudio.

No. de Pixeles área total Deslizada: Es la cantidad del total de pixeles registrados en el informe ráster para el inventario de movimientos en masa

No. de Pixeles área total NO deslizada: es la resta que se le hace al área total de pixeles en la zona de estudio menos los pixeles totales que registraron deslizamientos en el Informe ráster.

NPC: Es el conteo de pixeles en total de cada una de las clases en toda el área geográfica dentro de los límites establecidos para la zona de estudio, en este caso el municipio de Manizales.

NPiX1: Es el número de pixeles con presencia del factor condicionante y de deslizamientos, es decir pixeles dentro de una clase que si tienen presencia de movimientos en masa.

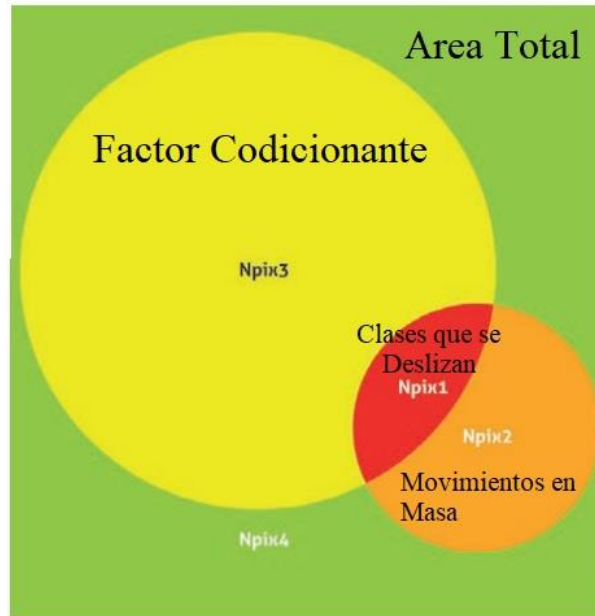
NPiX2: Es el número de píxeles con ausencia del factor condicionante y presencia de deslizamientos, es decir es el número total de píxeles identificados menos los píxeles de la clase evaluada que tienen cruce con los que tienen presencia de movimientos en masa, dicho de otro modo, es el total de píxeles que se deslizan menos NPiX1

NPiX3: Numero de píxeles con presencia del factor condicionante y ausencia de deslizamientos, es decir el NPC menos NpiX1

NPiX4: Número de píxeles con ausencia del factor condicionante y de deslizamientos, dicho de otra forma, es el conteo total de todos los píxeles en el área de estudio menos la clase condicionante evaluada (NPC), menos el número total de píxeles que se deslizaron en la zona de estudio, más la suma de NPiX1 asociada a la clase evaluada.

Figura 20

Descripción Grafica de la evaluación de pixeles por tipo de mapa



Nota. Representación gráfica de relación MenM y factor Condicionante. Modificado de SGC 2017.

Para los cálculos de $W_i (+)$, $W_i (-)$ y W_f , se emplearon las siguientes formulas apoyados en una hoja de cálculo.

$$W_i(+)=\log_{10}\left[\frac{\frac{NPiX1}{NPiX1+NPiX2}}{\frac{NPiX3}{NPiX3+NPiX4}}\right]$$

$$W_i(-) = \log_{10} \left[\frac{\frac{NPiX2}{NPiX1 + NPiX2}}{\frac{NPiX4}{NPiX3 + NPiX4}} \right]$$

$$W_f = (W_i(+)) - (W_i(-))$$

Una vez se obtiene cada uno de los pesos Finales W_f , como en el ejemplo tabla 6, se procede realizar una revisión rápida de los resultados por cada clase ya que nos pueden dar unos primeros indicios de las clases de cada factor condicionante, de la siguiente manera:

$W_i (+) > 0$: Positivo, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento

$W_i (+) < 0$: Negativo, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento

$W_i (+) = 0$: Indica que el factor no es relevante

$W_i (-) > 0$: Positivo, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento

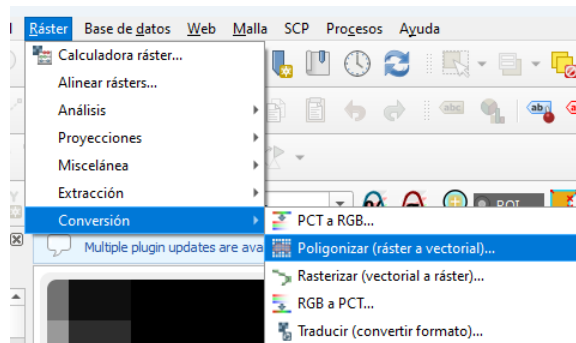
$W_i (-) < 0$: Negativo, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento

$W_i (-) = 0$: Indica que el factor no es relevante

6.3.5 *Vectorización de los Mapas en formato Ráster*

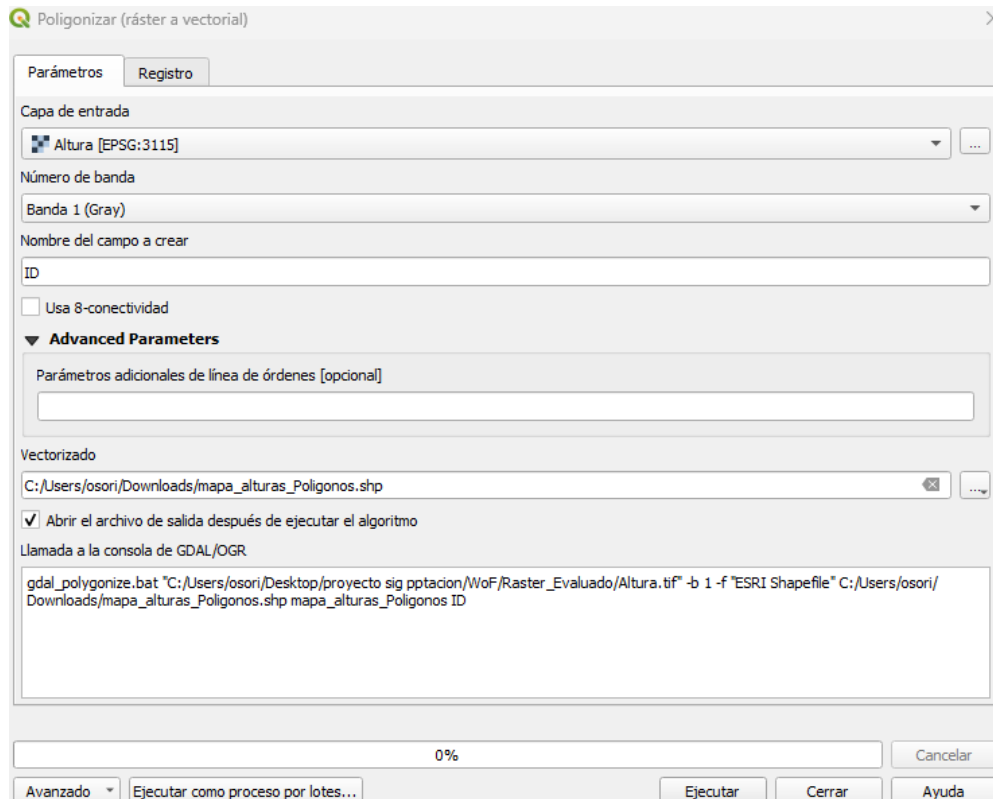
Ahora para obtener un resultado general de los pesos finales Wf, se debe continuar con la creación de un nuevo campo en la tabla de atributos para cada una de las clases con el valor del peso final Wf, para el caso de los mapas que ya estaban en formato ráster, derivados del DEM, como pendientes, alturas, rugosidad, curvaturas etc. se procede a vectorizar estos mapas, para el caso de los mapas que en un principio se contaban en formato vectorial, como la geología, geomorfología, suelos. Etc. se pueden saltar este paso y usar estos archivos.

La finalidad de vectorizar es para poder usar su tabla de atributos y crear un nuevo campo de pesos finales Wf, es de anotar que este paso no es necesario si se desea hacer en un software como ArcGIS Pro, que da un acceso a su tabla de atributos desde formato ráster y se puede crear el campo directamente.

Figura 21*Herramienta de Vectorización en QGIS*

Nota. Esta Herramienta permite pasar de un mapa o un plano en formato ráster a un archivo vectorial como shp o kml. Tomado de QGIS

Una vez seleccionada la herramienta, se procede hacer una breve configuración, se selecciona el ráster a vectorizar y se le crea un campo para almacenar los valores salientes de cada pixel, serán los valores que se definieron al momento de normalizar los mapas ráster.

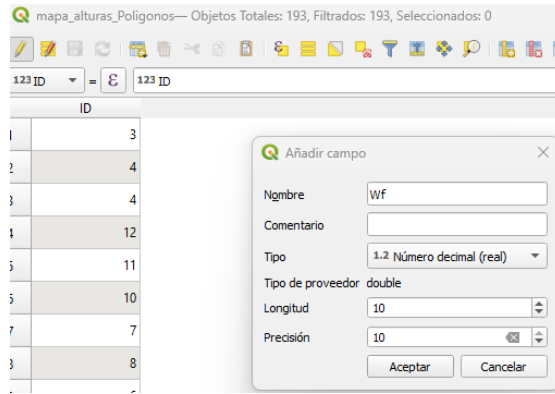
Figura 22*Configuración herramienta Vectorización*

Nota. Se carga la capa ráster a vectorizar tomando una de las columnas como el valor de NDI o Nivel digital de imagen que será el valor del polígono

Una vez creado el archivo vectorial, se abre su tabla de atributos y se crea un nuevo campo para ingresar los valores de los pesos finales W_f , el tipo debe ser real o numérico con una prolongada capacidad decimal, mínimo 10, recomendable 15.

Figura 23

Adición de un nuevo campo en la tabla de atributos



Nota. El campo puede tener cualquier nombre, sin embargo es deseable recordar que va hacer referencia al peso final wf, el tipo de dato debe ser real o doublé de 10 dígitos decimales.

Figura 24

Visualización del nuevo campo de atributos creado

	ID	Wf
1	3	NULL
2	4	NULL
3	4	NULL
4	12	NULL
5	11	NULL
6	10	NULL
7	7	NULL

Resultado de la creación del campo wf para pesos finales.

Una vez agregado el campo en cada uno de los mapas en formato vectorial, se recomienda en una hoja de calculo almacenar exclusivamente los valores de la clase y el peso final Wf correspondiente a cada factor Condicionantes y guardarlo como un texto delimitado por comas o tabulación.

Se procede a cargar todas las hojas de calculo o archivos de texto de cada uno de los factores condicionantes en el software GIS para facilitar el procedimiento y se revisa que cada archivo contenga las columnas indicadas CLASE que será el equivalente al ID de los archivos vectoriales y el campo Wf donde se copiaran estos valores a el campo destino Wf en el archivo vectorial correspondiente.

Figura 25

Hojas de cálculo de los resultados estadísticos Wolfe.

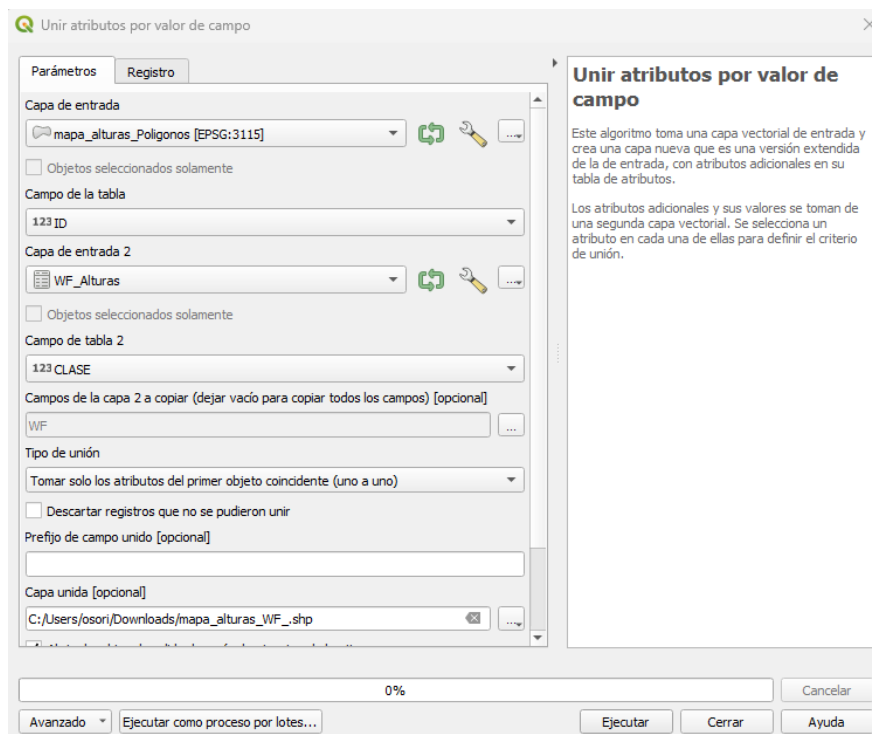
	CLASE	WF
1	1	0,207393404403...
2	2	-0,02527637605...
3	3	-0,09812440761...

Nota. Al cargar una carpeta o repositorio en QGIS donde se encuentren las hojas de calculo, estas podrán visualizarse en la barra de navegación. Y se podrán visualizar sus tablas de atributos seleccionando cada una y buscando la opción propiedades de la capa y luego atributos o cargándola a la ventana del mapa.

Para almacenar la información estadística en cada una de las capas vectoriales de los factores condicionantes, se utiliza la herramienta “Unir atributos por valor de campo”, aquí se especifica el mapa ya vectorizado, se le indica el campo Valor o ID, que será la llave para identificar el campo de las hojas de cálculo, en capa de entrada se indica la hoja de calculo correspondiente, junto con su ID que en este caso la llave foránea será “CLASE” o como se halla definido previamente en la hoja de cálculo, y el paso final es indicarle la columna a copiar de la hoja de calculo a el archivo vectorial que definimos como WF.

Figura 26

Configuración de la Unión por atributos.



Nota, se carga el mapa vectorial original y tomaremos como llave de referencia su ID, posteriormente seleccionamos la tabla de los pesos finales por cada clase y también tomamos su

id o clase como llave para hacer una unión de campos con el mapa vectorial, luego seleccionamos las columnas de la tabla a adicionar al mapa y guardamos el archivo, por ultimo se procede a ejecutar el proceso.

Finalmente tenemos el resultado del archivo vectorial o mapa de polígonos con los valores WF, donde indicara cual es la relación entre cada clase y si esta asociada o no a generar movimientos en masa.

Figura 27

Resultado de unión por atributos.

ID	WF_2
1	3 -2,14574194595...
2	4 -2,08250839086...
3	4 -2,08250839086...
4	12 -0,05056345993...
5	11 -0,06281716618...
6	10 0,769257822855...
7	7 1,113642201709...
8	8 0,925606956865...
9	6 0,738251735892...
10	3 -2,14574194595...
11	5 -0,10821785740...
12	6 0,738251735892...
13	5 -0,10821785740...
14	7 1,113642201709...

Nota. La columna de pesos finales serán el valor del Nivel digital de imagen para plotear el mapa ráster. Tomado de QGIS.

Ya terminado el proceso con cada uno de los mapas, se procede una vez mas a rasterizar para realizar un algebra de mapas y obtener el mapa de susceptibilidad.

6.3.6 *Rasterización de los Mapas WofE*

En este paso se repite el procedimiento de rasterización de todos los mapas en formato vectorial y se debe obtener un conjunto de todos los factores condicionantes en valores de pixeles de los pesos finales Wf, se repite simplemente el proceso explicado en el capitulo 6.3.1 con la diferencia que el campo a usar como valor de marcado esta vez será el campo Wf o el definido con los pesos finales.

Es recomendable aplicar un Fill Data o Relleno sin datos a cada uno de los mapas condicionantes, para asegurarse de que el ráster no venga con pixeles vacíos y no afecte el calculo de la susceptibilidad.

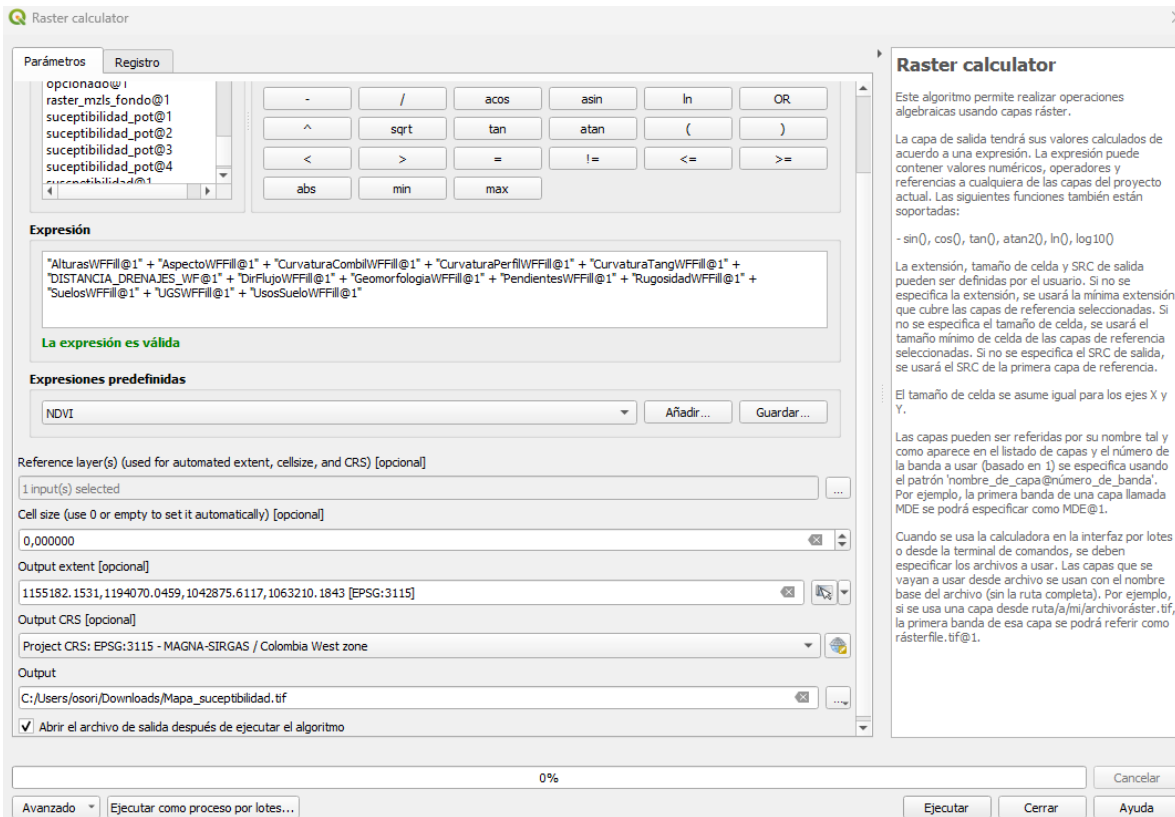
6.3.7 *Algebra de Mapas*

En este proceso ya se debe contar con todos los mapas condicionantes en formato ráster empleando el campo Wf o de pesos finales, se realizará una sumatoria de todos y cada uno de estos mapas ráster usando la herramienta de “Raster Calculator” que es diferente a Calculadora

ráster de QGIS, en el caso de ArcGIS solo hay una Calculadora ráster que sirve para hacer este procedimiento.

Figura 28

Raster Calculator -Algebra de Mapas



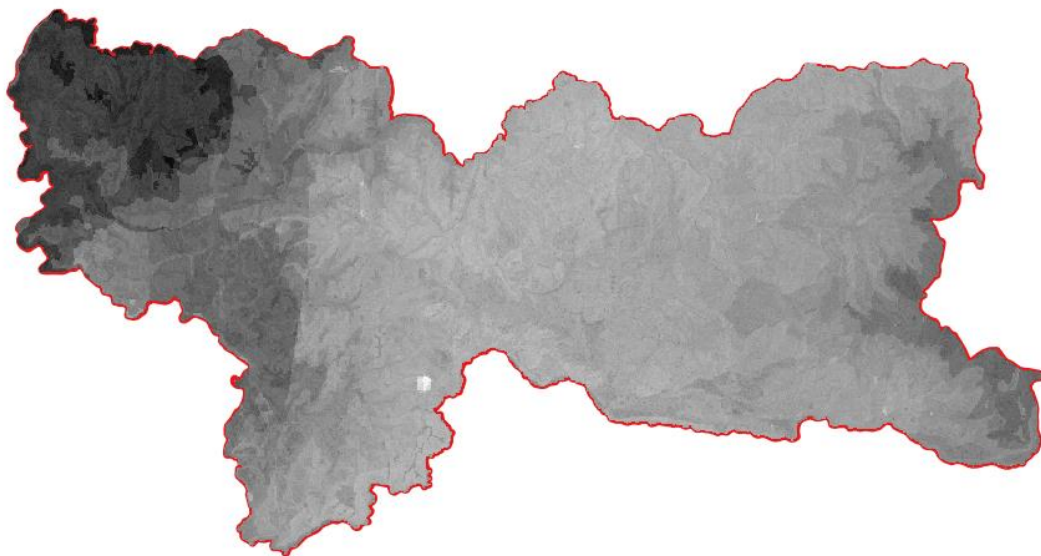
Nota. Seleccionamos cada mapa en formato ráster planteado con su respectivo peso final y realizamos una Sumatoria de los factores condicionantes, este mapa será guardado como mapa de Susceptibilidad.

El resultado de la sumatoria de todos los factores condicionantes corresponderá a el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, el resultado será explicado con más detalle en el capítulo de resultados.

También es recomendable nuevamente aplicar un fill de Datos y posteriormente un recorte de los bordes con el shapefile o capa vectorial de los límites de la zona de estudio.

Figura 29

Resultado Algebra de mapas – Mapa de Susceptibilidad.



Nota. Al realizar la sumatoria de los ráster anteriores se tiene como Mapa resultante el Mapa Susceptibilidad por movimientos en masa.

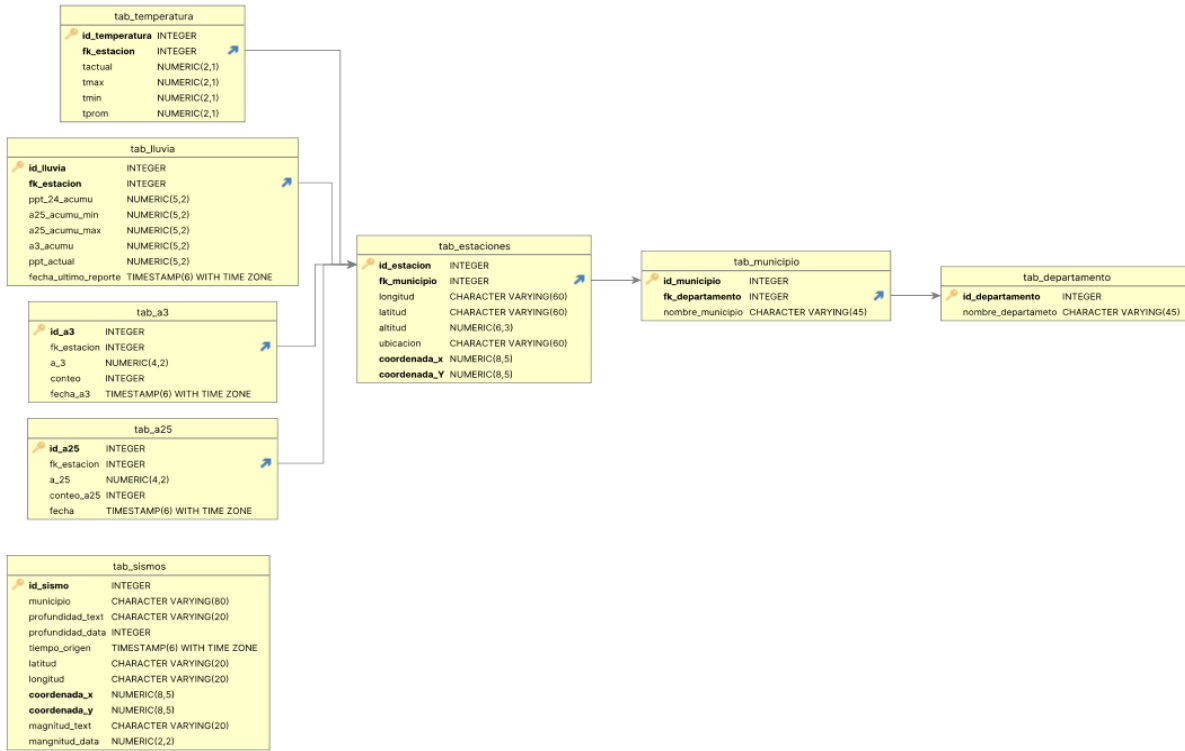
La obtención del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa solo será necesario una vez, puesto que es el factor condicionante o estático y será el insumo principal para el cálculo de la amenaza por movimientos en masa.

6.3.8 Diseño de Bases de Datos Relacionales

El diseño de la base de datos cumplirá la función de almacenar toda la información de las precipitaciones diarias y antecedentes A25, que se actualizan cada 5 minutos en el portal SIMAC del IDEAM, para almacenar esta información, primero se hace una revisión del número de estaciones, nombres, códigos, coordenadas de cada estación meteorológica, posteriormente se crea un modelo relacional, donde se incluye una tabla Departamentos, tabla de municipios, estaciones meteorológicas que incluyen campos como id_Estacion (proporcionada por la plataforma del IDEAM, coordenadas geográficas y altitud, de aquí derivan tablas que pueden incluir información de la precipitación diaria, A3, A25 incluso la temperatura que registra la estación en el ultimo registro, adicionalmente se deja construida una tabla para registros sísmicos para un posible escalamiento del trabajo de grado u otro estudiante interesado en continuar con la investigación.

Figura 30

Modelo Relacional



Nota, se crea una base de datos relacional en PostgreSQL para almacenar información básica, que servirá más adelante para un análisis espacial.

Figura 31

Tabla de las Estaciones meteorológicas.

	id_estacion [PK] bigint	fk_municipio integer	longitud character varying (60)	latitud character varying (60)	altitud integer	ubicacion character varying (200)	coordenada_x numeric (10,3)	coordenada_y numeric (10,3)	nombre_estacion character varying (60)	geom geometry
1	170010101004	9	75° 31' 27.5" W	5° 4' 17.2" N	2226	Observatorio Vulcanológico y Sismológico Manizales - Barrio Chipre	1172250.236	1052759.932	Observatorio Vulcanológico	0101000020E6100000E753E688EE152C0
2	170010101006	9	75° 28' 52.5" W	5° 3' 47.3" N	2195	Centro de Bioinformática y Biología Computacional - BIOS	1177028.574	1051852.738	Yarumos	0101000020E6100000CDCCCCC0DE52C0
3	170010101007	9	75° 31' 11.2" W	5° 3' 41.4" N	2112	Centro Integral de Servicios Comunitarios-El Carmen	1172755.134	1051661.054	El Carmen	0101000020E61000006692050A44E152C0
4	170010101008	9	75° 30' 1.6" W	5° 2' 34.2" N	1915	Institución Educativa Aranjuez	1174904.784	1049601.238	Aranjuez	0101000020E6100000F6D01D4807E052C0
5	170010101009	9	75° 29' 19.3" W	5° 4' 59.2" N	2126	Institución Educativa Bosques del Norte	1176187.200	1054069.800	Bosques del Norte	0101000020E61000005F620BC546DF52C0
6	170010101010	9	75° 31' 46.0" W	5° 5' 45.4" N	1967	Hospital Geriátrico San Isidro	1171673.715	1055468.831	La Palma	0101000020E6100000E786E6AE2E152C0
7	170010101011	9	75° 30' 1.9" W	5° 3' 46.3" N	2183	S.E.S Hospital de Caldas	1174890.607	1051632.402	Hospital de Caldas	0101000020E61000008A75BABA508E052C0
8	170010101012	9	75° 28' 35.5" W	5° 3' 5.1" N	2230	Planta de tratamiento Niza - Aguas de Manizales S.A.E.S.P	1177555.607	1050557.252	Milán - Planta Niza	0101000020E610000012AF5F6E7FDE52C0
9	170010101013	9	75° 31' 40.1" W	5° 3' 60.0" N	2057	Instituto de Valoración de Manizales - INVAMA	1172972.534	1052233.137	Alcázares	0101000020E610000035B6F890C7E152C0
10	170010201003	9	75° 29' 32.1" W	5° 3' 22.2" N	2179	Campus Palogrande. UN - Bloque I	1175810.223	1051078.449	Posgrados	0101000020E61000002FD0240681DF52C0
11	170010202001	9	75° 30' 2.9" W	5° 3' 20.5" N	2014	Lavautos Ruta 30	1175276.848	1059994.786	Q. Palogrande - Ruta 30	0101000020E61000008876C3320DE052C0
12	170010207056	9	75° 28' 17.9" W	5° 1' 47.0" N	2091	Campus La Nubia Universidad Nacional de Colombia Bloque W	1178103.859	1048158.615	La Nubia	0101000020E61000009704E2542FDE52C0
13	170010301018	6	75° 30' 38.3" W	5° 4' 5.3" N	2150	Colonia Icahall 1 a CatMira	1173767.131	1059307.914	Lirio Icahall 1 a CatMira	0101000020E610000068778D4E4FDE052C0

En el diseño de la base de datos fue necesario crear mas tablas auxiliares e instalar la extensión Geo-espacial Postgis.

Figura 32

Instalación de extensión Postgis a la base de datos.

```
## Crear la extensión PostGIS
CREATE EXTENSION postgis;

## Instalar extensiones recomendadas asociadas a PostGIS

## pgRouting para enrutamiento avanzado
CREATE EXTENSION pgrouting;

## PostGIS Topology para habilitar topología
CREATE EXTENSION postgis_topology;
```

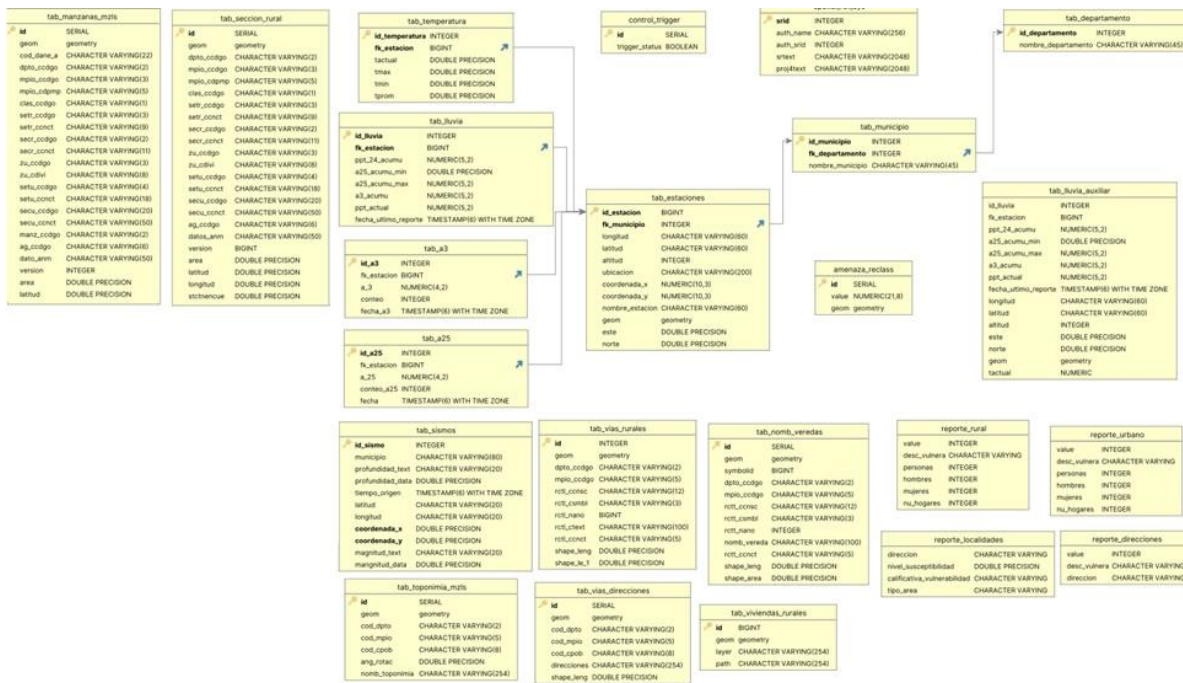
Nota. La extensión postgis es necesaria para posteriores análisis geoespaciales entre geometrías

Las tablas adicionales son necesarias para la automatización de la información, puesto que se desea también obtener algunas estadísticas o información organizada inmediatamente después de que entran nuevos valores de precipitación a las tablas de lluvias, como por ejemplo tener una tabla de lluvia auxiliar que reúna algunos campos de otras tablas, actualizar de manera inmediata el estado de vulnerabilidad de las carreteras , predios y manzanas entre otros, para ello además de crear las tablas auxiliares, es necesario efectuar funciones de tipo trigger y procedimientos almacenados de las bases de datos para ejecutar la información de manera automática y/o cuando se requiera.

En el caso de los trigger funcionan de manera inmediata actualizando algunos campos en las tablas auxiliares según se haya definido la función, para el caso de procedimientos almacenados, es un comando SQL que se ejecutara solo cuando el usuario lo indique, en este caso los procedimientos almacenados servirán para sacar algunas estadísticas y actualización de la información una vez termine un proceso alterno en el cálculo de la amenaza y este se pueda efectuar una vez se cumplan las condiciones dadas.

Figura 33

Modelo Relacional de la base de datos Completa.



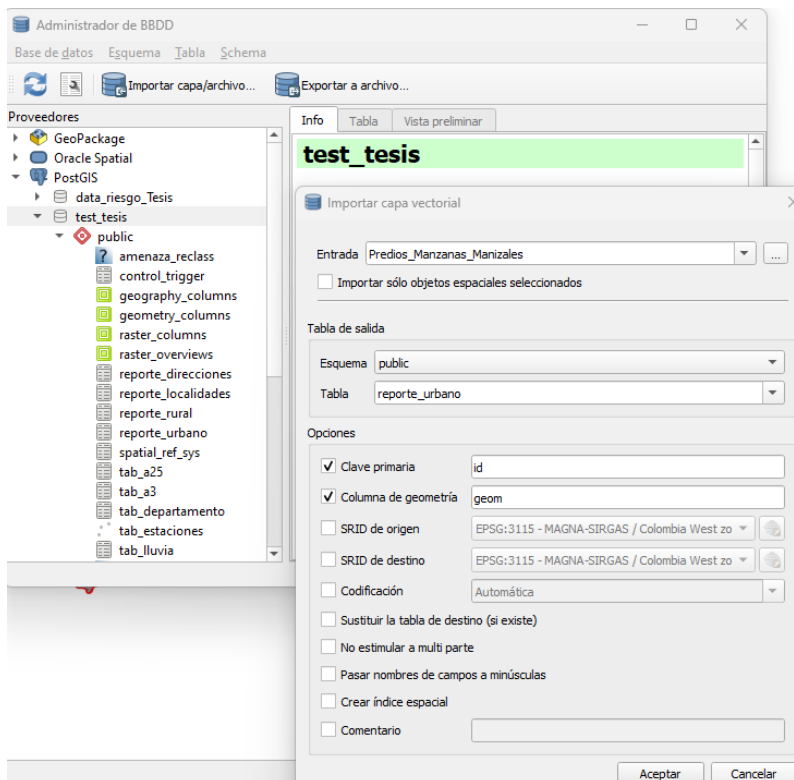
Nota. Se crean tablas adicionales para futuras investigaciones de vulnerabilidad y amenaza sísmica.

En este caso se incluyen tablas como lluvia auxiliar, reporte urbano, reporte rural, vías rurales y vías urbanas, entre otros. Con la finalidad de evaluar la amenaza en disposición espacial de zonas rurales y urbanas.

Es de anotar que si se desea evaluar carreteras, predios u otros inmuebles debe subirse mediante postgis estas capas vectoriales a la base de datos. Mediante la herramienta propia de Postgis Bundle 3, o mediante un entorno SIG como QGIS/ArcGis.

Figura 34

Carga de capas vectoriales a Postgis mediante QGIS.



Nota. Una de las alternativas para subir capas vectoriales a postgis es vía QGIS, sin embargo otra opción es mediante la herramienta de PostGIS bundle 3

Se debe en primer lugar conectar a la base de datos conociendo nombre de la base de datos, puerto y contraseña del administrador de la base de datos, posteriormente se especifica la capa vectorial o shapefile a cargar, la ruta de la tabla (esquema public o el definido por el usuario), revisar las opciones de carga que tenga la columna geom y cumpla con las demás condiciones con las que se ha construido la capa vectorial.

A continuación, se muestran algunos comandos SQL, para la creación de la función trigger que actualiza datos de manera automática en una tabla auxiliar, inmediatamente después de ingresar información en la tabla lluvia.

Figura 35

Funcion Trigger

```

Query Query History
1 CREATE OR REPLACE FUNCTION actualizar_tabla_auxiliar()
2 RETURNS TRIGGER AS $$
3 BEGIN
4     -- Actualizar los registros en la tabla auxiliar
5     UPDATE tab_lluvia_auxiliar
6     SET
7         ppt_24_acumu = NEW.ppt_24_acumu,
8         a25_acumu_min = NEW.a25_acumu_min,
9         a25_acumu_max = NEW.a25_acumu_max,
10        a3_acumu = NEW.a3_acumu,
11        ppt_actual = NEW.ppt_actual,
12        fecha_ultimo_reporte = NEW.fecha_ultimo_reporte
13    FROM
14        tab_estaciones
15    WHERE
16        tab_lluvia_auxiliar.id_lluvia = NEW.id_lluvia
17        AND tab_lluvia_auxiliar.fk_estacion = tab_estaciones.id_estacion;
18
19    RETURN NEW;
20 END;
21 $$ LANGUAGE plpgsql;
22
23 -- Crear trigger para actualizar la tabla auxiliar después de un UPDATE en tab_lluvia
24 CREATE TRIGGER trigger_actualizar_tabla_auxiliar
25 AFTER UPDATE ON tab_lluvia
26 FOR EACH ROW
27 EXECUTE FUNCTION actualizar_tabla_auxiliar();

```

Nota, Se crean funciones trigger para optimizar y automatizar el registro de datos, de esta manera se puede almacenar información en una tabla auxiliar.

6.3.9 *Código de Programación Para Obtener Datos Desde el Geo Portal SIMAC*

Este método consiste en la obtención de los datos de precipitación en tiempo real, A25 e incluso la temperatura si se desea, de manera totalmente automatizada, desde el geo portal SIMAC-IDEAM Manizales, se debe conocer el tipo de pagina web en la que se encuentra el geo portal, con el objetivo de identificar cual es la librería de programación mas adecuada para obtener la información.

Para este caso se usa el lenguaje de programación Python por su buena operabilidad en adquisición de datos y se recurre principalmente al uso de la librería Selenium, puesto que el tipo de pagina web es dinámica y requiere operaciones complejas en la web que otras librerías como requests beautifulsoup o scrapy no podrían hacerlo eficientemente, al ser una web dinámica, la URL de navegación se mantiene constante pero se puede adquirir información diferente que no estaba previamente cargada en el geo portal a medida de que se navega en el, al tratarse de una plataforma dinámica se requiere una librería capaz de navegar en la página a través de un navegador web sea: Google chrome, Firefox, Microsoft Edge, safari etc.

La librería requiere el uso de un driver asociado a la versión del navegador web que se este utilizando en este caso el navegador elegido fue Firefox por su buena operación con los controladores y no requiere un driver para hacerlo, sin embargo para otros navegadores se puede obtener de: <https://www.selenium.dev/documentation/webdriver/>

Una vez descargado el driver correspondiente a la versión del navegador a utilizar, se recomienda guardar dicho driver en una ruta de trabajo ya que será ejecutado cada vez que

funcione el código, para el caso de Firefox simplemente se crea una variable para guardar la ruta del ejecutable de Firefox (solo para usuarios Windows, para Linux IOS se requiere driver)

Para visualizar el código completo, se encuentra en la sección de Anexos, a continuación, se trata de explicar la lógica y funcionamiento del código.

El código comienza con la importación de todas las librerías a utilizar

```
from selenium import webdriver  
import re  
import pyxlsb  
import os  
import time  
from openpyxl import Workbook  
import psycopg2
```

Las librerías selenium permite ingresar a la web y hacer algunas operaciones como clicar, enviar y recibir texto a través de estructura HTML, selenium permite buscar la ruta específica de cada uno de los campos a utilizar , las demás librerías permiten usar el sistema operativo como os para conectar con una lista de las estaciones meteorológicas a buscar en un Excel con pyxlsb, psycopg2 es la librería que permite ejecutar código SQL desde Python con una base de datos con postgres además de abrir y cerrar la conexión. Time y re permiten controlar el tiempo de ejecución del código.

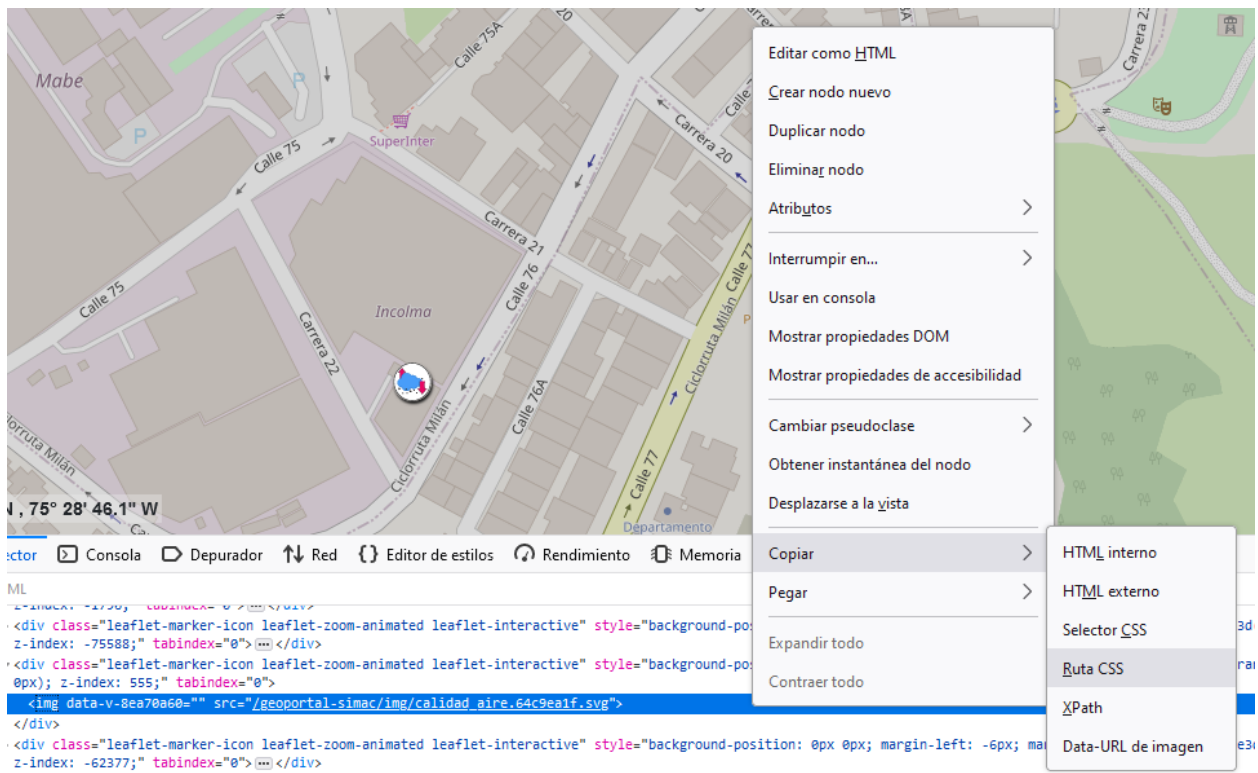
La metodología incluye los siguientes pasos:

- 1- Definir las librerías a emplear
- 2- Cargar en una variable la ruta de un Excel que tenga los nombres exactos de las estaciones meteorológicas y definir las columnas a emplear, es de anotar que con posterioridad se debe buscar dichos nombres de las estaciones y por cada estación

meteorológica, se debe obtener la ruta “XPath”, este paso se hace con ayuda del inspeccionador de elementos de un navegador web.

Figura 36

Obtención de un XPath de un elemento web.



Nota. Una vez localizado el elemento en la página web, con la herramienta de inspeccionar elemento, se selecciona el objeto hasta encontrar la ruta más específica y se copia su xpath clicando con el mouse derecho.

Se realiza este procedimiento para todas las estaciones meteorológicas que se van a incluir en la consulta de precipitación. Donde se incluye el nombre exacto de la estación que será información con la que el código buscara la estación en el navegador en conjunto con el path, estos datos permiten ingresar a la sección de precipitación.

Figura 37

Lista por nombre de estaciones y su Xpath

nombre_est	path_estacion
Observatorio Vulcanológico	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[19]/img
Yarumos	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[21]/img
El Carmen	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[22]/img
Aranjuez	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[41]/img
Bosques del Norte	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[42]/img
La Palma	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[43]/img
Hospital de Caldas	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[44]/img
Milán - Planta Niza	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[45]/img
Alcázares	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[46]/img
Posgrados	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[18]/img
Q. Palogrande - Ruta 30	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[40]/img
La Nubia	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[38]/img
Liceo Isabel La Católica	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[75]/img
Alto de La Coca	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[49]/img
El Mirador	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[55]/img
Finca La Paz	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[50]/img
Hacienda Manzanares	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[51]/img
Peralonso - Chec	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[52]/img
Antenas - Alto del Guamo	/html/body/div/div[3]/div/div[4]/div[4]/div[58]/img

Nota. Para cada estación que es un elemento diferente en la web, se busca su Xpath para tener acceso a su información

3. Inicializar el driver o el navegador web y la ruta html del geoportal

#Iniciar Navegador

```
firefox_options = webdriver.FirefoxOptions()
```

```
firefox_options.binary_location = "C:\\Program Files\\Mozilla Firefox\\firefox.exe"
```

```
#Crear el controlador de Firefox
```

```
driver = webdriver.Firefox(options=firefox_options)
```

```
#Conectar a SIMAC
```

```
driver.get("https://cdiac.manizales.unal.edu.co/geoportal-simac/")
```

```
time.sleep(10)
```

4. continua con la carga del geo portal e inicia un proceso de búsqueda, donde iterara el Excel o csv con el nombre de las estaciones meteorológicas, primero buscara el campo para consultar estaciones por nombre, buscara aquí el nombre de la estación y el código dará click en buscar.

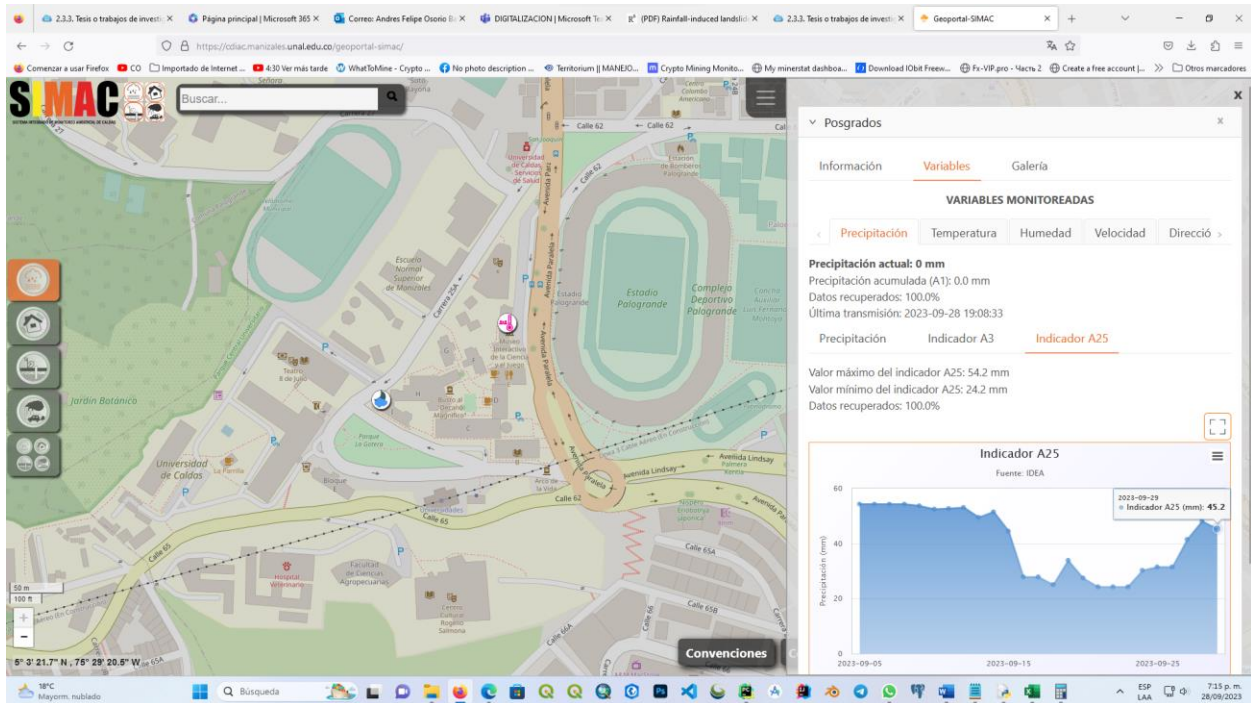
5- Una vez aparece la estación el código clikea en esta con la ruta path que habíamos configurado previamente, en este paso si no hay problemas debería ingresar a la sección de Información, luego se le indica que continua con la sección de variables, A25 y que tome el dato html de este lugar.

6-Una vez el código hace lectura del valor de precipitación, ingresara este valor en la base de datos de postgres en la tabla de tab_lluvia, primero con el nombre de la estación buscada en el archivo de Excel buscará otra columna, pero en la misma fila el valor id de la estación, tomará este dato y con este valor será la llave para actualizar la precipitación en la columna a25 de la tabla tab_lluvia por cada estación meteorológica.

Este proceso se repite cíclicamente siempre y cuando no exista un error o imprevisto en el procedimiento del código como lo podrían ser caídas de internet o que la estación meteorológica este en mantenimiento, en este caso el código omitirá esta estación y continuara con otra para ello se agrega un validador esperando que encuentre una referencia html para evaluar si continua con la estación meteorológica consultada o no.

Figura 38

Visualización del A25 del SIMAC



Nota. El valor A25, es el ultimo registro acumulado y medido en los últimos 5 minutos.

6.3.10 Código de Programación Para Automatización de Procedimientos

Este apartado continuo una vez se recopilan los datos de precipitación de cada una de las estaciones definidas y almacenadas en la base de datos, sin embargo, siempre y cuando existan información actualizada en la base de datos ya sea local o en la nube, este apartado puede ejecutarse de manera independiente si se llega a disponer de por lo menos 2 servidores para esta

función, En este caso solo se dispone de un equipo de cómputo y se continuara de manera lineal después de ejecutarse el procedimiento anterior.

6.3.10.1 Calculo del Factor Detonante Interpolación IDW.

El código comienza con el uso de las librerías embebidas en PyQGIS, donde el primer paso consiste en la conexión a la base de datos PostgreSQL, definición de sistema de coordenadas, obtener los datos de la tabla auxiliar que contiene la información necesaria para la interpolación, de allí copia los puntos con sus valores de precipitación mas actualizada posible, se le indica el tamaño de pixel y una ruta de salida, Es importante mencionar que desde este apartado se debe mantener una ruta de trabaja bien estructurada para todos los procedimientos, preferiblemente en la raíz del disco duro.

Figura 39

Script para la generación de isoyetas o interpolación IDW

```
>>> # l-conecta a postgres y crea la isoyeta en qgis

processing.run("qgis:idwinterpolation", {'INTERPOLATION_DATA': 'dbname=\'amenaza_db\' port=
5432 user=\'postgres\' password=\'123\' sslmode=allow key=\'tid\' estimatedmetadata=true s
rid=4326 type=Point checkPrimaryKeyUnicity=\'1\' table="public"."tab_lluvia_auxiliar" (geo
m)::~:~:0::~:~:~:3::~:~:~:0', 'DISTANCE_COEFFICIENT': 2, 'EXTENT': '-75.803735597, -75.321735597, 4.974
569367, 5.232569367 [EPSG:4326]', 'PIXEL_SIZE': 0.0001, 'OUTPUT': 'C:/server/raster/isoyetas/ma
pa_isoyetas.tif'})
```

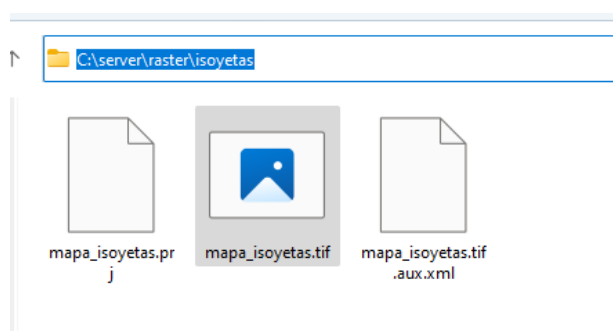
Para el usuario que se encuentre manipulando este código, es importante mencionar las precauciones que se deben tener si se dispone de información confidencial, puesto que aquí se

exponen credenciales de la base de datos y para este ejemplo se uso una base de datos local con credenciales de prueba.

El resultado de este código se discute en el siguiente capitulo, sin embargo, es almacenado una imagen ráster con la interpolación IDW en la ruta definida por el usuario.

Figura 40

Resultado del script No.1



Nota. El resultado de la ejecución del Script almacenara el mapa de isoyetas en la ruta especificada en formato ráster tif

6.3.10.2 Normalización del Ráster IDW.

Una vez generado el ráster de interpolación, para este caso corresponde al municipio de Manizales, el ráster ha tomado los valores de precipitación del A25 mas actualizado, sin embargo, desde lo planteado en los antecedentes del municipio se propone un ajuste en los

rangos de peligro por precipitación tomando valores de precipitación entre 0 y 400 mm en los últimos 25 días o A25, acogidos por la UGR Manizales siendo 0 el valor mas bajo de amenaza y precipitaciones iguales os superiores a 400 mm la alerta máxima de peligro, en ese orden de ideas se dispone a normalizar el mapa de isoyetas de la siguiente manera, valores comprendidos entre 0 y 100 en términos de porcentaje de los niveles de alerta propuestos por Correa et al (2019).

Es decir, una precipitación de 4mm equivale a un valor de 1% de peligro, o una precipitación de 200 mm equivale al 50% de peligro, siendo el 100% para valores iguales o superiores a 400 mm de precipitación en los últimos 25 días.

Una vez comprendida la escala a normalizar, se procede a configurar el código, recordar 0 4 mm es el 1% de Alerta, ya que el arreglo en el código de programación asociada a la librería de reclasificación por tabla, solicita además de la ruta ráster (interpolación mapa isoyetas), en el siguiente orden [valor mínimo, valor máximo, Nuevo valor], en ese orden de ideas la seria comenzaría en [0,4,1... y terminaría en 396,400,100].

Figura 41*Normalización del ráster Interpolado*

```
# 2-normaliza el raster isoyetas ( a 100%)

processing.run("native:reclassifybytable", {'INPUT_RASTER':'C:/server/raster/isoyetas/mapa_isoyetas.tif','RASTER_BAND':1,'TABLE':

['0','4','1','4','8','2','8','12','3','12','16','4','16','20','5','20','24','6','24','28','7','28','32','8','32','36','9','36','40','10','40','44','11','44','48','12','48','52','13','52','56','14','56','60','15','60','64','16','64','68','17','68','72','18','72','76','19','76','80','20','80','84','21','84','88','22','88','92','23','92','96','24','96','100','25','100','104','26','104','108','27','108','112','28','112','116','29','116','120','30','120','124','31','124','128','32','128','132','33','132','136','34','136','140','35','140','144','36','144','148','37','148','152','38','152','156','39','156','160','40','160','164','41','164','168','42','168','172','43','172','176','44','176','180','45','180','184','46','184','188','47','188','192','48','192','196','49','196','200','50','200','204','51','204','208','52','208','212','53','212','216','54','216','220','55','220','224','56','224','228','57','228','232','58','232','236','59','236','240','60','240','244','61','244','248','62','248','252','63','252','256','64','256','260','65','260','264','66','264','268','67','268','272','68','272','276','69','276','280','70','280','284','71','284','288','72','288','292','73','292','296','74','296','300','75','300','304','76','304','308','77','308','312','78','312','316','79','316','320','80','320','324','81','324','328','82','328','332','83','332','336','84','336','340','85','340','344','86','344','348','87','348','352','88','352','356','89','356','360','90','360','364','91','364','368','92','368','372','93','372','376','94','376','380','95','380','384','96','384','388','97','388','392','98','392','396','99','396','400','100'],'NO_DATA':-9999,'RANGE_BOUNDARIES':2,'NODATA_FOR_MISSING':False,'DATA_TYPE':6,'OUTPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass/isoyetas_reclass.tif'})
```

También para este caso se debe guardar en una ruta organizada para que el proceso pueda ejecutarse en un proceso cíclico sin inconvenientes.

La normalización de 0 a 100 facilitara el proceso de la zonificación de la amenaza final, sin embargo es fácilmente adaptable a la normalización propuesta por el Correa et al (2019), donde se puede homologar de la siguiente manera alerta muy baja de 0 a 25%, alerta baja de 25 a 50%, alerta medrada o naranja de 50 a 75%, alerta alta de 75 a 100, y alerta muy alta superior a 100% o dicho de otro modo superior a 400mm en los últimos 25 días A25.

6.3.10.3 Recorte del Ráster Interpolado y Normalizado.

Una vez normalizado el ráster, ahora se procede hacer un clip mask o recorte de mascara usando los límites de la zona de estudio, para este caso se utiliza el polígono del municipio de Manizales para recortar el ráster interpolado ya normalizado.

Figura 42

Recorte del ráster clip Mask.

```
# 3- clip isoyetas reclass(recorta el raster isoyetas con la extencion de manizales.shp
processing.run("gdal:cliprasterbymasklayer", {'INPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass/isoyetas_reclass.tif','MASK'
:'C:/server/shapes/limite_manizales/limite_manizales4326.shp','SOURCE_CRS':None,'TARGET_CRS':None,'TARGET_EXTENT':'-7
5.678032121,-75.327689161,4.982233753,5.166230314 [EPSG:4326]','NODATA':None,'ALPHA_BAND':False,'CROP_TO_CUTLINE':Tru
e,'KEEP_RESOLUTION':False,'SET_RESOLUTION':False,'X_RESOLUTION':None,'Y_RESOLUTION':None,'MULTITHREADING':False,'OPTI
ONS':'','DATA_TYPE':7,'EXTRA':'','OUTPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass_clip/isoyetas_reclass_clip.tif'})
```

En este apartado se indica la ruta del ráster ya normalizado, la ruta del polígono de la zona de estudio y una ruta de salida.

6.3.10.4 Calculo de la Amenaza.

Para este apartado ya se debe contar con el mapa de susceptibilidad anteriormente elaborado, sin embargo, también se debe normalizar como en el procedimiento anterior, pero solo se requiere una única vez y guardar el ráster de susceptibilidad normalizado de 0 a 100, además de contar con el ráster de interpolación IDW para precipitación ya normalizado, este ultimo es dinámico ya que se están generando interpolaciones normalizadas constantemente.

Este procedimiento consta de obtener finalmente el mapa de amenazas entre la suma ponderada entre el ráster de susceptibilidad y el ráster de Interpolación IDW para la precipitación de los últimos 25 días A25.

La suma Ponderada es necesaria puesto que en la zona de estudio en algunas de las áreas, no son exactamente igual de susceptibles a generarse movimientos en masa en toda la zona de estudio, generalmente en zonas con muy baja susceptibilidad el detonante no tendrá un efecto significativo por muy intenso que sea el periodo lluvioso, mientras que para áreas donde la susceptibilidad por movimientos en masa puede ser de moderada a alta, incluso una precipitación moderada en rangos de 200 mm o superior ya pueden generarse movimiento en masa, en ese orden de ideas la fórmula de ponderación le dará mas peso a las zonas con mayor susceptibilidad.

La formula empleada es la siguiente:

$$Amenaza = (Suceptibilidad + \left(Suceptibilidad * \left(\frac{Interpolacion\ IDW\ A25}{100} \right) \right))$$

Teniendo en cuenta que tanto la Susceptibilidad y la Interpolación IDW A25, pueden tener valores comprendidos entre 1 y 100.

La amenaza, podrá tomar valores entre 1 y 200 sin embargo se acude a una nueva normalización en rangos de amenaza de 1 a 5.

Figura 43

Script del cálculo de la Amenaza

```
# 4-mapa amenaza (suma isoyeta + susceptibilidad (PONDERADO))

processing.run("gdal:rastercalculator", {'INPUT_A':'C:/server/raster/suceptibilidad/Mapa_suceptibilidad_reclass_clip.tif', 'BAND_A':1, 'INPUT_B':'C:/server/raster/isoyetas_reclass_clip/isoyetas_reclass_clip.tif', 'BAND_B':1, 'INPUT_C':None, 'BAND_C':None, 'INPUT_D':None, 'BAND_D':None, 'INPUT_E':None, 'BAND_E':None, 'INPUT_F':None, 'BAND_F':None, 'FORMULA':'(A+(B*(A/100)))', 'NO_DATA':None, 'EXTENT_OPT':0, 'PROJWIN':'-75.678032121,-75.327689161,4.982233753,5.166230314 [EPSG:4326]', 'RTYPE':5, 'OPTIONS':'', 'EXTRA':'', 'OUTPUT':'C:/server/raster/amenaza/Mapa_Amenaza.tif'})
```

6.3.10.4 Normalización de la Amenaza.

Se recomienda la normalización de la amenaza para poder zonificar de manera mas adecuada el rango de los pixeles en valores discriminantes más fácilmente interpretables de 1 a 5, en este orden de ideas sería más sencillo la cuantificación de la amenaza por tercetos y el cálculo de vulnerabilidad.

En este orden de ideas se espera define la Amenaza en valores de Amenaza muy baja, Amenaza baja, Amenaza media, Amenaza alta y Amenaza muy alta, definidos en intervalos de 1 a 5 correspondiente mente.

Figura 44

Script Normalización de la Amenaza.

```
# 5- reclasificar mapa amenaza (1-5)
processing.run("native:reclassifybytable", {'INPUT_RASTER':'C:/server/raster/amenaza/Mapa_Amenaza.tif','RASTER_BAND':1,'TABLE': ['-1000','50','1','50','86','2','86','105','3','105','120','4','120','1000','5'],'NO_DATA':-9999,'RANGE_BOUNDARIES':0,'NODATA_FOR_MISSING':False,'DATA_TYPE':5,'OUTPUT':'C:/server/raster/amenaza_reclass/amenaza_reclass.tif'})
```

6.3.10.4 Procedimientos Para el Cálculo de Vulnerabilidad.

Es de anotar que a pesar de que en esta tesis se incluyó un breve procedimiento para calcular la vulnerabilidad en vías, viviendas y veredas a nivel urbano y rural, no es aconsejable tomar estos datos para otros estudios puesto que el decreto 1807 del 2014 exige una escala mínima de 1:5.000 para ser considerada aceptable, sin embargo se incluye con fines netamente ilustrativos y académicos de como un sistema en tiempo real puede aplicarse a otras metodologías y como seria el impacto esperado de poder representar mediante este sistema información útil del estado actual de vulnerabilidad en general también en tiempo real.

El procedimiento consta de convertir el ráster de Amenazas reclasificado o normalizado en un formato vectorial para poder ser cargado a PostgreSQL con la extensión PostGIS, de manera automatizada a partir de código de programación.

Se caga en una tabla llamada amenaza_reclas que tiene extensión geo espacial.

Figura 45

Script de ráster a polígono y carga a la base de datos con Postgis

```
>>> #raster a poligono

processing.run("native:pixelstopolygons", {'INPUT_RASTER':'C:/server/raster/amenaza_reclass/amenaza_reclass.tif',
'RASTER_BAND':1,'FIELD_NAME':'VALUE','OUTPUT':'C:/server/shapes/amenaza_reclass/amenaza_reclass.shp'})

# shape a postgres

processing.run("gdal:importvectorintopostgisdatabasewconnection", {'INPUT':'C:/server/shapes/amenaza_reclass/am
enaza_reclass.shp','SHAPE_ENCODING':'','GTYPE':2,'A_SRS':QgsCoordinateReferenceSystem('EPSG:4326'),'T_SRS':None,'
S_SRS':None,'HOST':'localhost','PORT':'5432','USER':'postgres','DBNAME':'amenaza_db','PASSWORD':'123','SCHEMA':'p
ublic','TABLE':'','PK':'id','PRIMARY_KEY':'','GEOCOLUMN':'geom','DIM':0,'SIMPLIFY':'','SEGMENTIZE':'','SPAT':'-75
.678032121,-75.327689161,4.982233753,5.166230314 [EPSG:4326]','CLIP':False,'FIELDS':[],'WHERE':'','GT':'','OVERWR
ITE':True,'APPEND':False,'ADDFIELDS':False,'LAUNDER':False,'INDEX':False,'SKIPFAILURES':False,'PROMOTETOMULTI':Tr
ue,'PRECISION':True,'OPTIONS':''})
```

Una vez cargada la tabla de amenaza_reclas en la base de datos, se proceden a ejecutar los procedimientos almacenados (SQL) definidos con anterioridad par el calculo de algunos reportes y análisis de la vulnerabilidad con ayuda de las funciones que tiene postgis para análisis geo espacial.

Se recuerda y se hace énfasis en el uso prudente de este apartado puesto que la escala de trabajo es 1:25.000 y es aconsejable abordar términos de vulnerabilidad y riesgo en escalas mínimas de 1:5.000 a 1: 2.000.

La información actualizada en las tablas asignadas para los procedimientos almacenados incluye reporte del estado general de las vías o carreteras, direcciones predios y manzanas en sector urbano y veredas en sector rural, también localidades en general como barrios y veredas expresados en términos de vulnerabilidad según sea el valor de la amenaza en la disposición espacial equivalente.

Figura 46*Script de ejecución de los procedimientos Almacenados*

```
>>> ###ejecutar el procedimiento almacenado
processing.run("native:postgisexecutesql", {'DATABASE':'test_tesis','SQL':'CALL generar_reporte_urbano();'})
### ejecutar el procedimiento almacenado para reporte rural
processing.run("native:postgisexecutesql", {'DATABASE':'test_tesis','SQL':'SELECT generar_reporte_rural();\n'})
### ejecutar el procedimiento almacenado para reporte direcciones
processing.run("native:postgisexecutesql", {'DATABASE':'test_tesis','SQL':'CALL generar_reporte_direcciones();\n'})
### ejecutar el procedimiento almacenado para reporte LOCALIDADES
processing.run("native:postgisexecutesql", {'DATABASE':'test_tesis','SQL':'CALL actualizar_reporte_localidades();\n'})
```

El código de programación cierra en este punto y se repite una vez termine todo el proceso, se pueden definir rangos de tiempo entre procedimientos y/o definir rangos de tiempo prudentes antes de iniciar nuevamente con la ejecución del código.

7. RESULTADOS

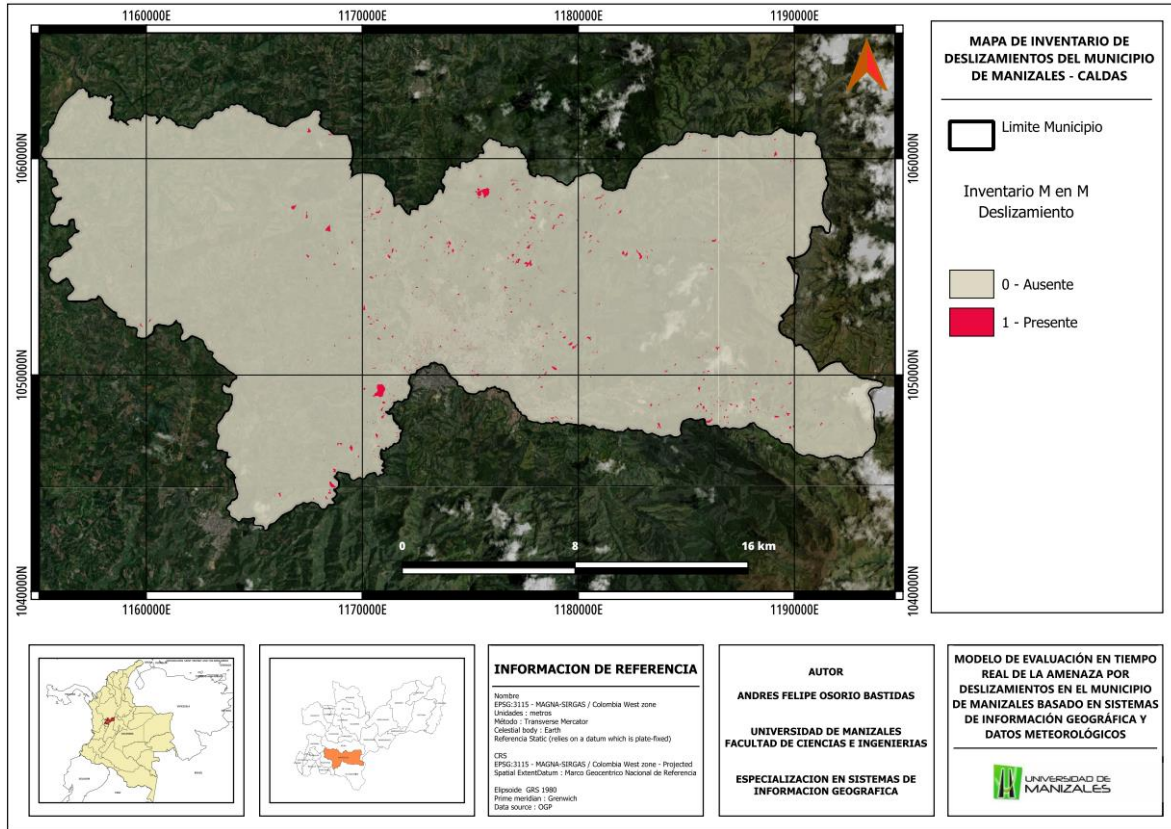
7.1 Factores Condicionantes y Detonantes Generadores de Movimientos en Masa en el Municipio de Manizales.

Esta etapa consiste en la recopilación de los insumos necesarios para establecer los factores condicionantes que influyen en la generación de movimientos en masa, además del inventario de procesos morfodinámicos conocido también como el inventario de movimientos en masa, para el caso de los factores condicionantes se obtienen los insumos para el análisis propuesto por el Servicio Geológico colombiano en su guía metodológica para movimientos en masa de escala 1:25.000 del 2017.

Es de anotar que la disponibilidad de los factores condicionantes y el inventario de movimientos en masa, esta sujeta a la publicación de entidades publicas y en algunos caso la información puede estar desactualizada o incompleta como lo es el caso de inventario de movimientos en masa, se obtuvieron principalmente de tres fuentes, de Corpocaldas, SGC y digitalización propia empleando imágenes satelitales de Google Earth y Bing Satélite, en ninguno de los casos existe un registro temporal de los sucesos, sino única y exclusivamente la ubicación geográfica de estos movimientos en masa que pueden ser antiguos o recientes, esto imposibilita el hecho de poder realizar una zonificación de amenazas que presente una probabilidad temporal, ni la magnitud de la amenaza puesto que los insumos obtenidos deben tener una representación espacial representada en polígonos y no solo coordenadas definidas por puntos como los insumos de Corpocaldas.

Figura 47

Mapa de procesos morfodinámicos



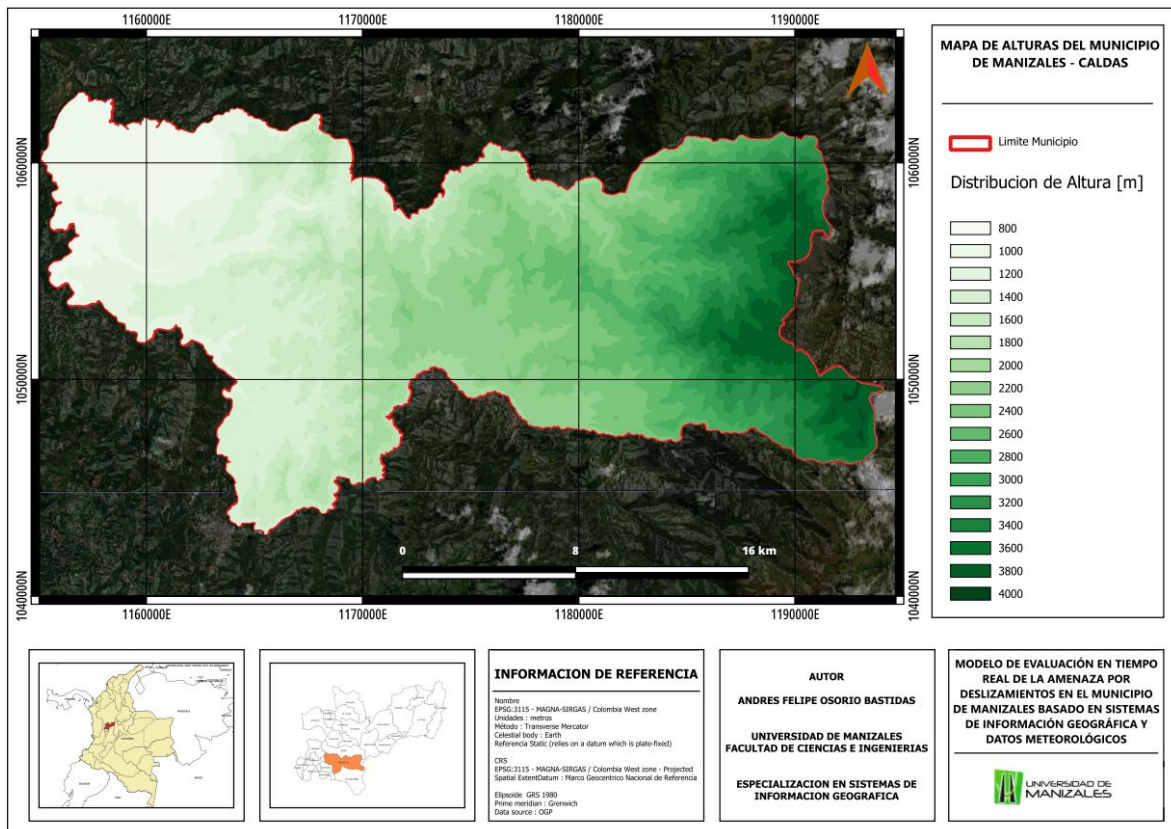
El mapa de inventario de movimientos en masa reporto un total de 1268 registro de movimientos en masa donde la gran mayoría son de tipo punto exceptuando poco mas de 250 movimientos en masa digitalizados en forma de polígono, sin embargo, son insuficientes para el calculo de magnitud de la Amenaza, pero los 1268 registros que están distribuidos en el municipio son suficientes para el calculo de la probabilidad espacial de la amenaza.

Factores Condicionantes

Una vez obtenido el mapa o archivo vectorial del inventario por movimientos en masa, se procede a obtener los mapas derivados del DEM, que son insumos muy importantes para el calculo de la susceptibilidad, estos factores condicionantes son los mapas de Alturas, Aspecto, Curvatura de Perfil, Curvatura Tangencial, Dirección de Flujo, Irregularidad del terreno y mapa de Pendientes.

Figura 48

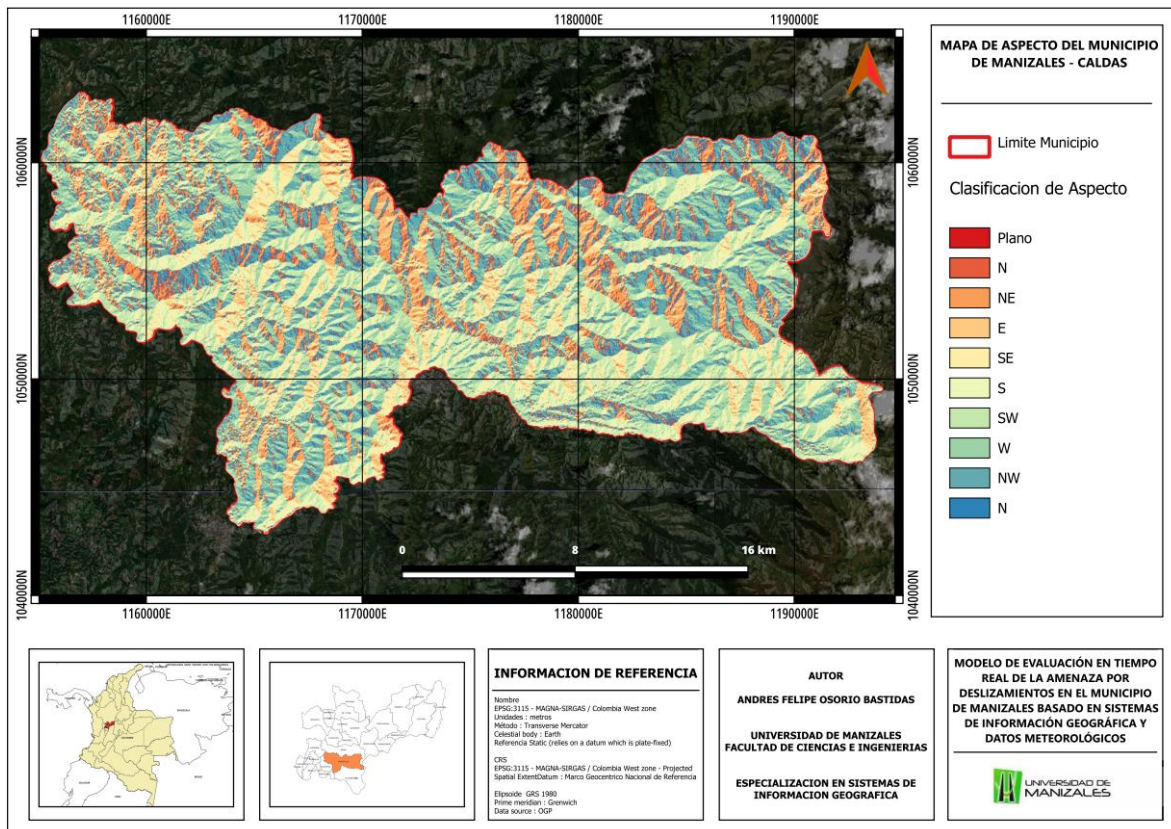
Mapa de Alturas



La altitud del terreno juega un papel importante en la identificación de áreas susceptibles a movimientos en masa. Estos pueden estar sujetos a diferentes usos del suelo por actividad económica, donde pueden las acciones antrópicas pueden presentarse en pisos térmicos preferidos y se evaluara si hay o no relación con este aspecto en el cálculo estadístico WofE.

Figura 49

Mapa de Aspecto

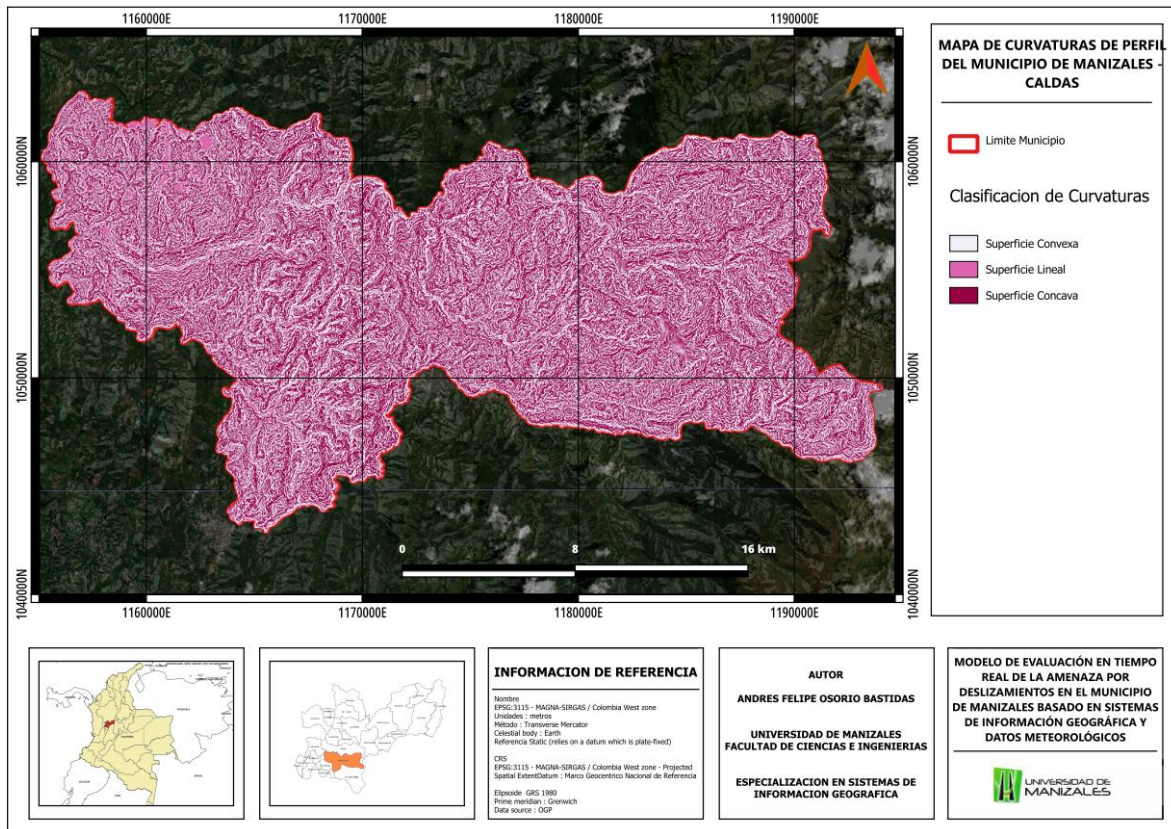


La orientación de las pendientes en relación con los puntos cardinales es crucial para entender la exposición al sol y la distribución de la vegetación, además la importancia de la orientación "Aspecto" adquiere relevancia cuando consideramos que, de acuerdo con la

investigación de Dahal, Hasegawa, Nonomura, Yamanaka, Masuda et al (2008), el término "aspecto" se define como la dirección de mayor inclinación del terreno.

Figura 50

Mapa de Curvatura de Perfil



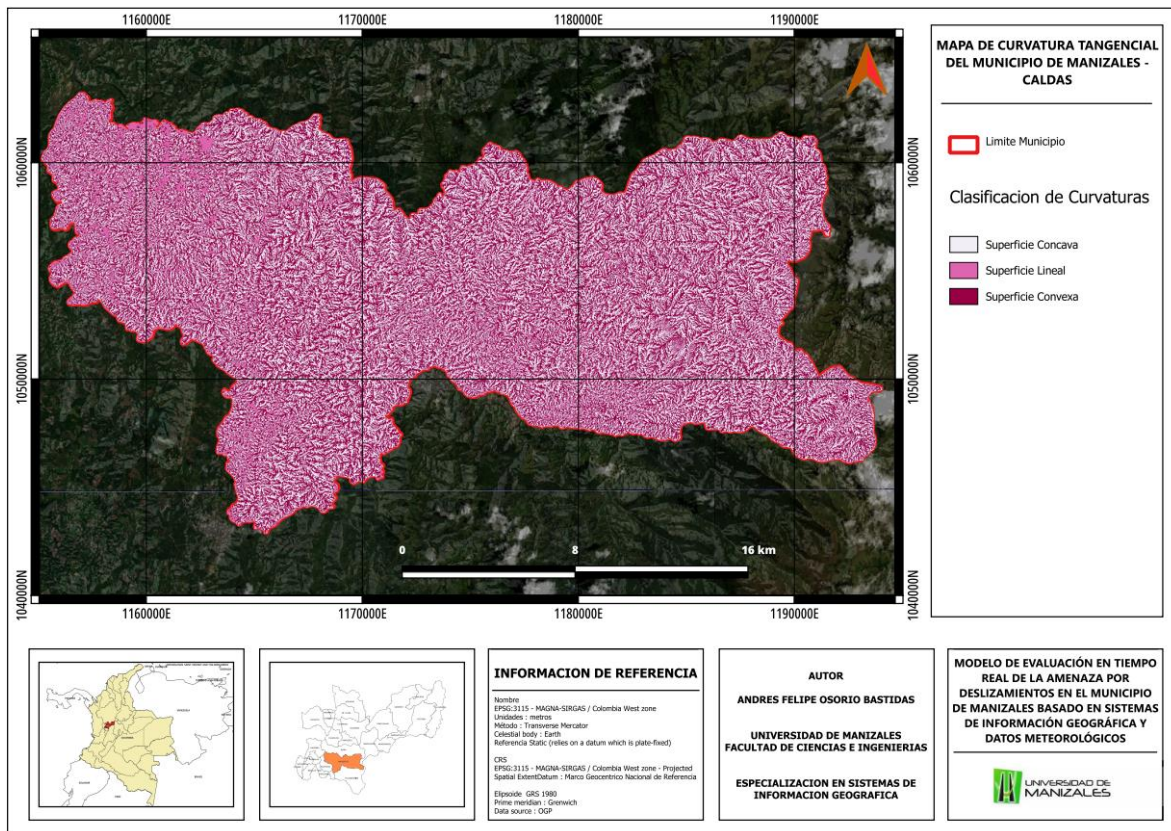
La curvatura en el perfil del terreno puede indicar áreas propensas a acumular agua, lo que aumenta la saturación del suelo y, por lo tanto, el riesgo de movimientos en masa.

La curvatura de perfil se relaciona con la dirección de la pendiente más pronunciada en una superficie y cómo afecta la velocidad del flujo. Un valor negativo indica que la superficie se

inclina hacia arriba, lo que ralentiza el flujo, mientras que un valor positivo indica una inclinación hacia abajo, acelerando el flujo. Un valor de cero indica una superficie relativamente plana.

Figura 51

Mapa de Curvatura Tangencial



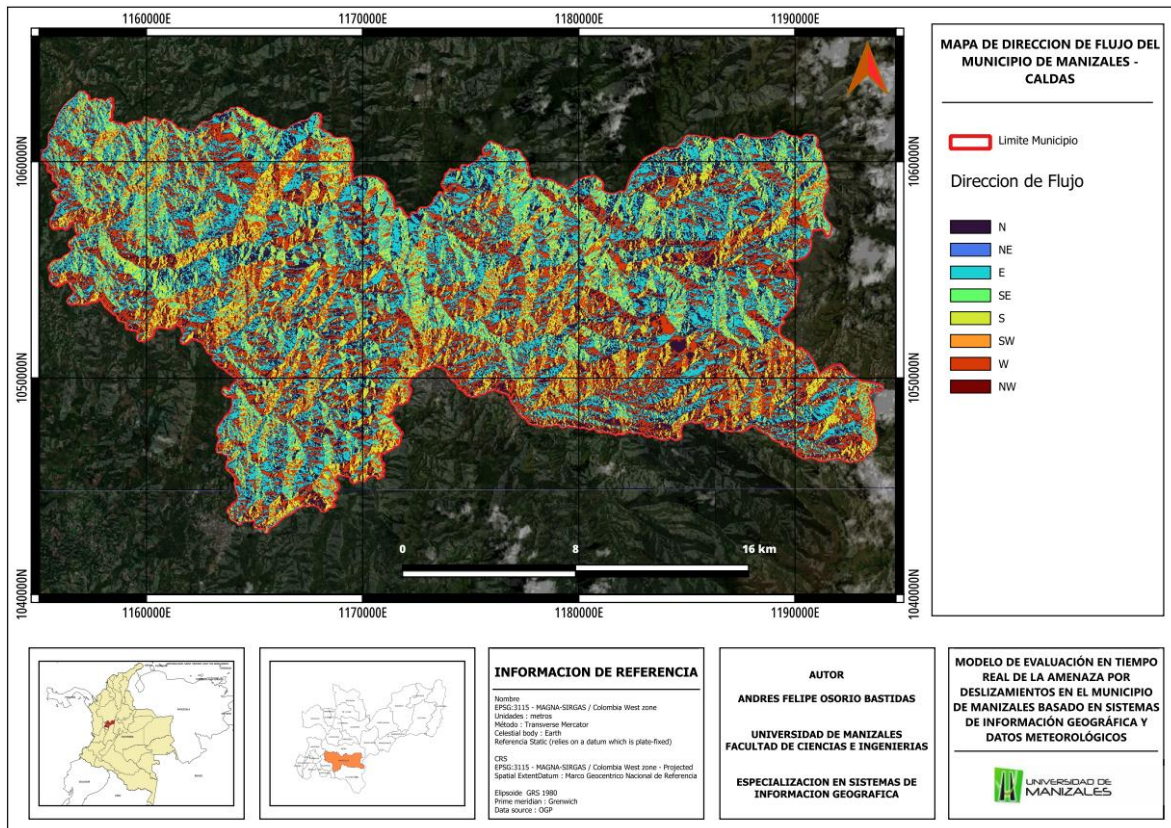
La curvatura tangencial es una herramienta útil para detectar cambios abruptos en la topografía, lo cual podría señalar la presencia de fallas geológicas o debilidades en el terreno con potencial para movimientos en masa

La curvatura tangencial, a diferencia de la curvatura de perfil, está relacionada con la convergencia y divergencia del flujo en la superficie y es perpendicular a la pendiente máxima.

Si se registra un valor positivo en la curvatura tangencial, esto sugiere que la superficie se curva hacia afuera en esa ubicación, lo que indica una convexidad lateral. Por otro lado, un valor negativo en la curvatura tangencial indica que la superficie se curva hacia adentro en esa área, denotando una concavidad lateral. Un valor de cero en la curvatura tangencial señala que la superficie es esencialmente plana o lineal en esa celda.

Figura 52

Mapa Dirección de Flujo

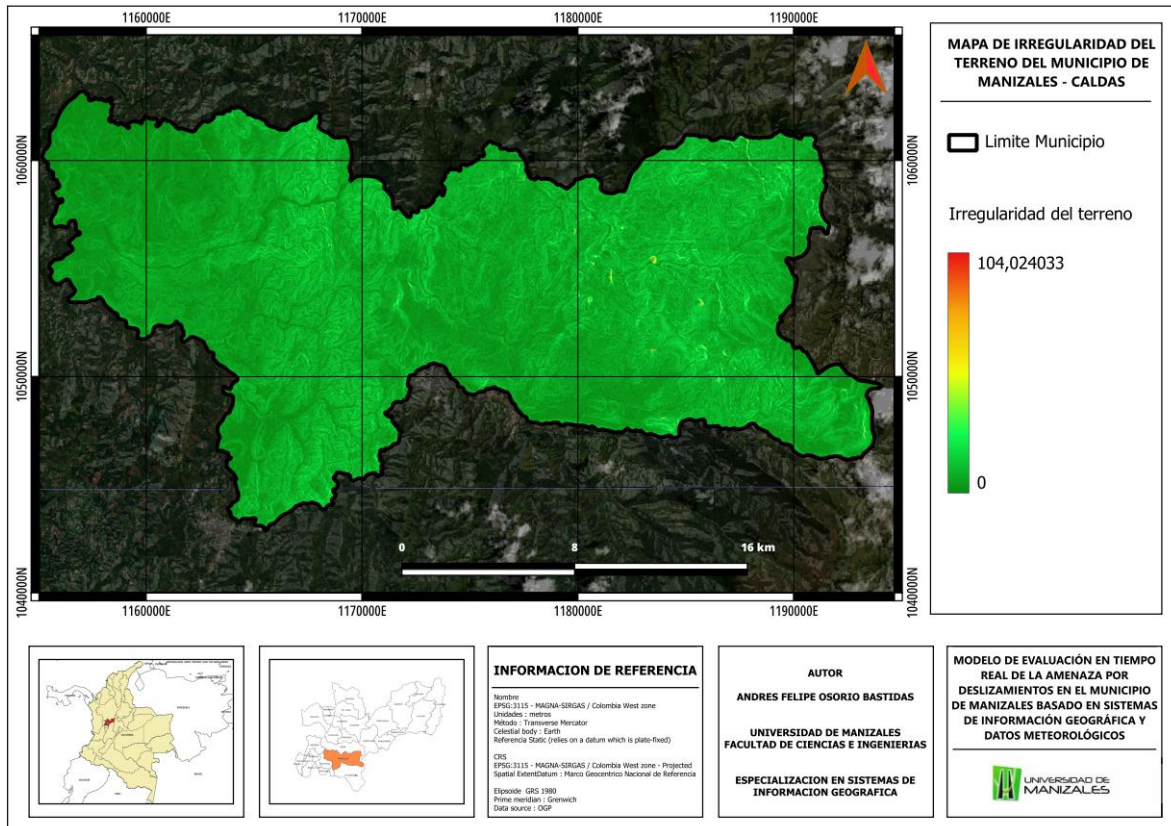


Conocer la dirección del flujo de agua en la superficie es esencial para evaluar la erosión y la saturación del suelo, cuando el agua fluye en una dirección específica, puede erosionar

gradualmente el suelo en su camino, debilitando la estabilidad de las pendientes y aumentando la probabilidad de deslizamientos. Además, la acumulación de agua en áreas con un flujo inadecuado puede saturar el suelo, lo que también aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa al reducir la cohesión y la resistencia del terreno. En resumen, la dirección del flujo de agua en la superficie es un factor crítico que influye en la vulnerabilidad de una región a los movimientos en masa, y su comprensión adecuada es esencial para la gestión de riesgos y la planificación adecuada del uso del suelo.

Figura 53

Mapa Irregularidad del Terreno



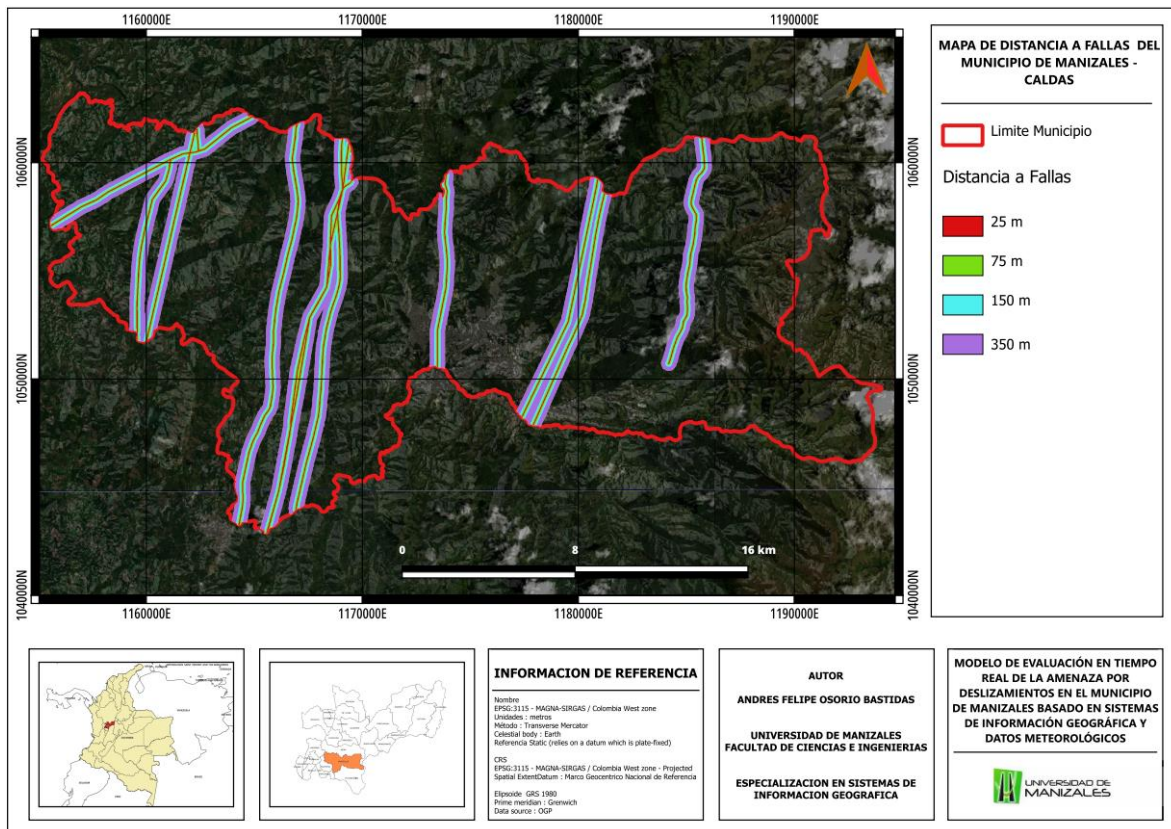
La textura y la irregularidad de la superficie del terreno, conocida como rugosidad, pueden influir significativamente en la estabilidad. Superficies más rugosas suelen ser más

estables, mientras que las suaves pueden ser más susceptibles a la erosión y a los movimientos en masa.

Una vez obtenidos los resultados de los mapas derivados del DEM, se procede a definir los factores condicionantes obtenidos a partir de cartografía de Campo, como Geología, Sistemas de fallas, Vías y carreteras, Red hídrica, Geomorfología, Usos de suelo y Tipos de suelo o unidades geológicas superficiales.

Figura 54

Mapa Distancia a Fallas

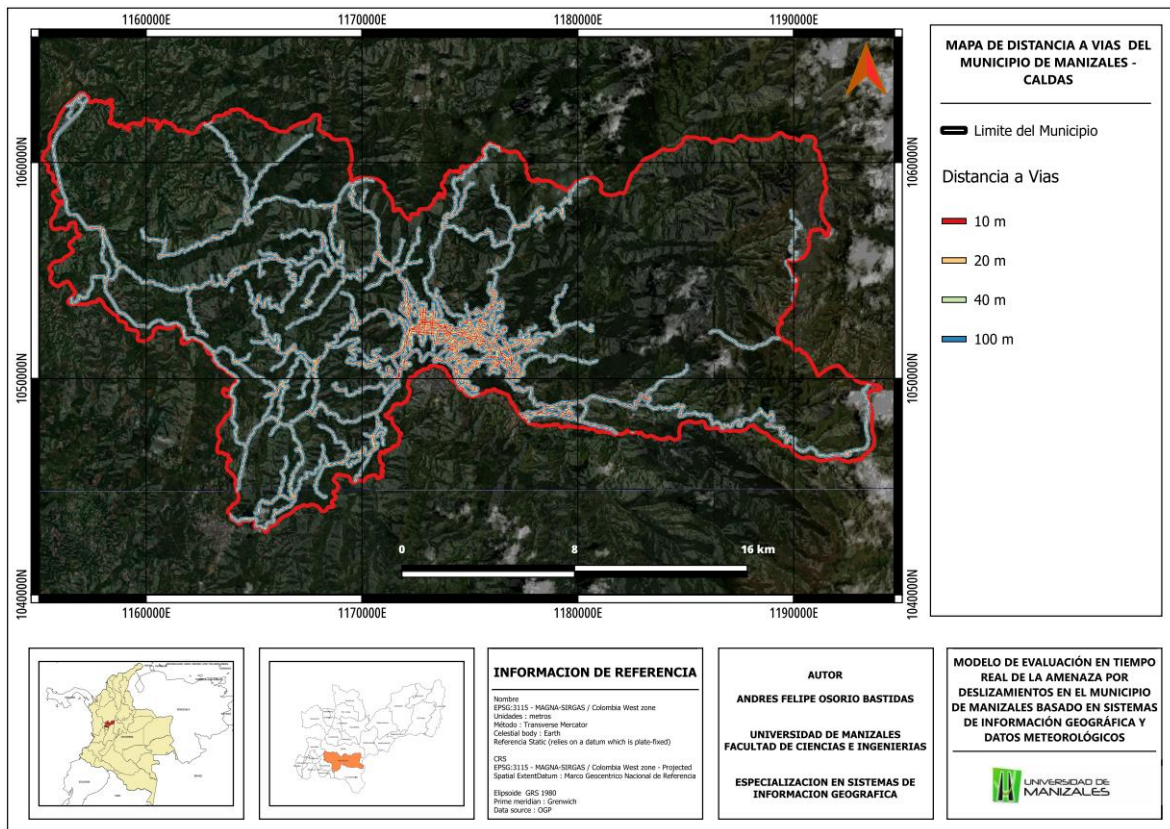


La identificación de características geológicas, como fallas activas o inactivas, puede ayudar a prever movimientos en masa relacionados con eventos sísmicos o deformaciones del terreno.

La distancia a las fallas geológicas también es una variable fundamental en los modelos de susceptibilidad a movimientos en masa. A medida que se aleja de una falla, es menos probable que sus efectos sean directos y significativos. Por lo tanto, en la modelización de la susceptibilidad, se utiliza la distancia a las fallas como una métrica para evaluar cuán cerca está una ubicación determinada de una fuente potencial de inestabilidad geológica.

Figura 55

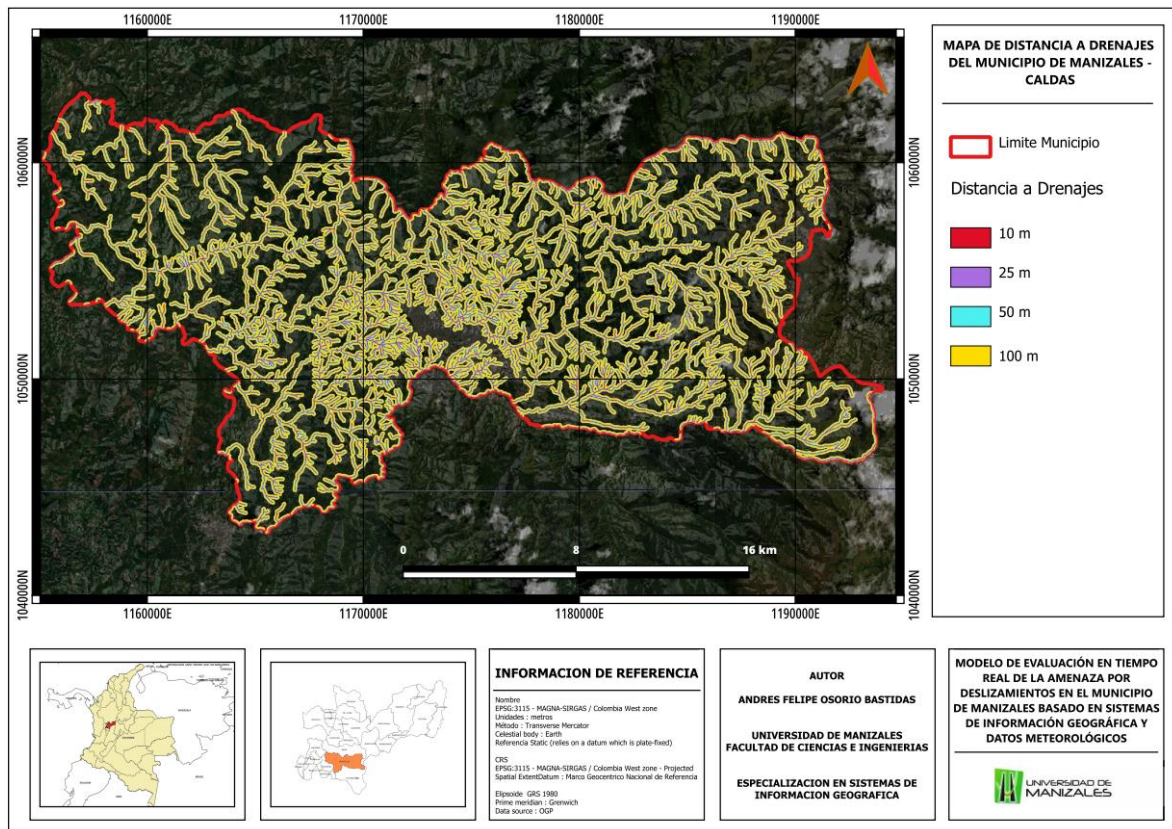
Mapa Distancia a Vías



La distancia a vías de transporte, como carreteras y vías férreas, es un factor importante en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa. Estas infraestructuras pueden alterar la topografía natural, influir en el flujo de agua y generar actividades humanas que aumentan el riesgo de deslizamientos. En la evaluación de riesgos, se considera la proximidad a vías de transporte como un indicador importante de la vulnerabilidad de una zona a movimientos en masa, lo que ayuda en la planificación de medidas de mitigación y desarrollo seguro del terreno.

Figura 56

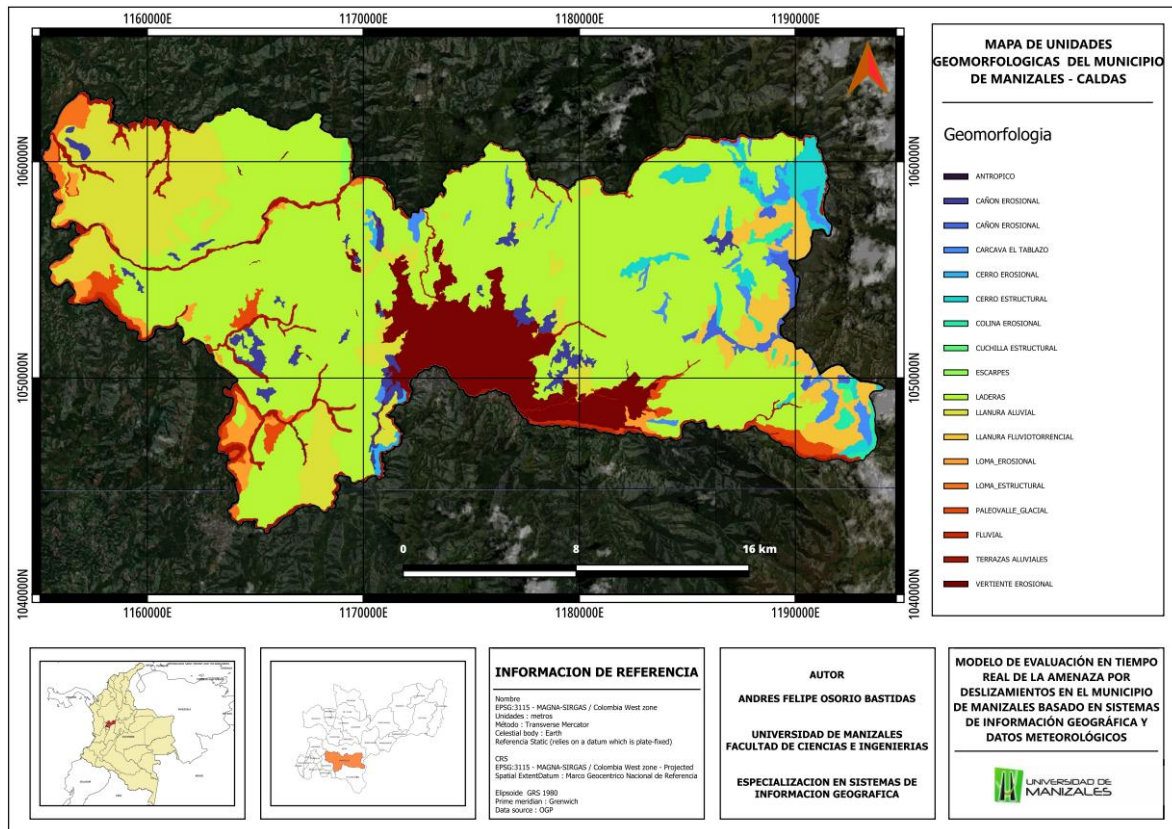
Mapa Distancia a Drenajes



El análisis de los cursos de agua, su caudal y la capacidad de drenaje es esencial para entender cómo el agua puede influir en la saturación del suelo y desencadenar deslizamientos.

Figura 57

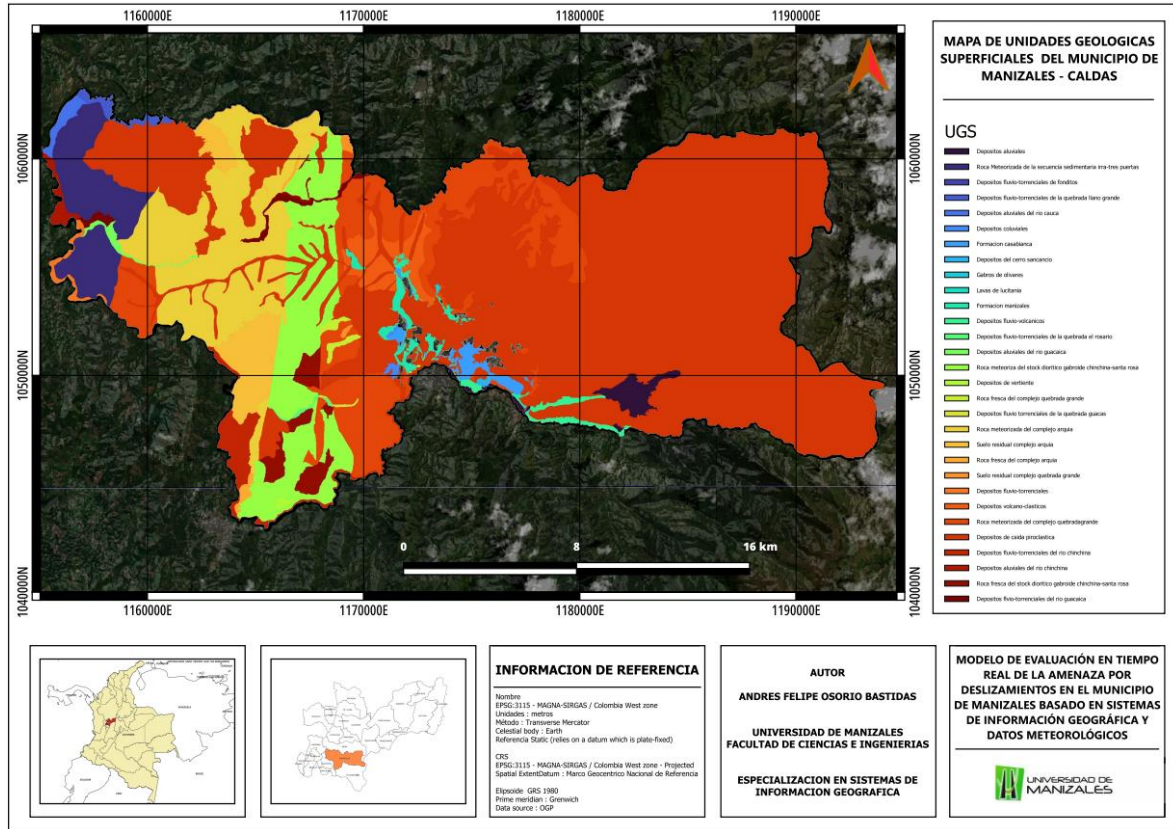
Mapa de Unidades Geomorfológicas



El estudio de la forma y estructura de la superficie terrestre permite identificar características topográficas, como laderas, montañas y valles, que pueden indicar áreas propensas a movimientos en masa o no.

Figura 58

Mapa de Unidades Geológicas Superficiales



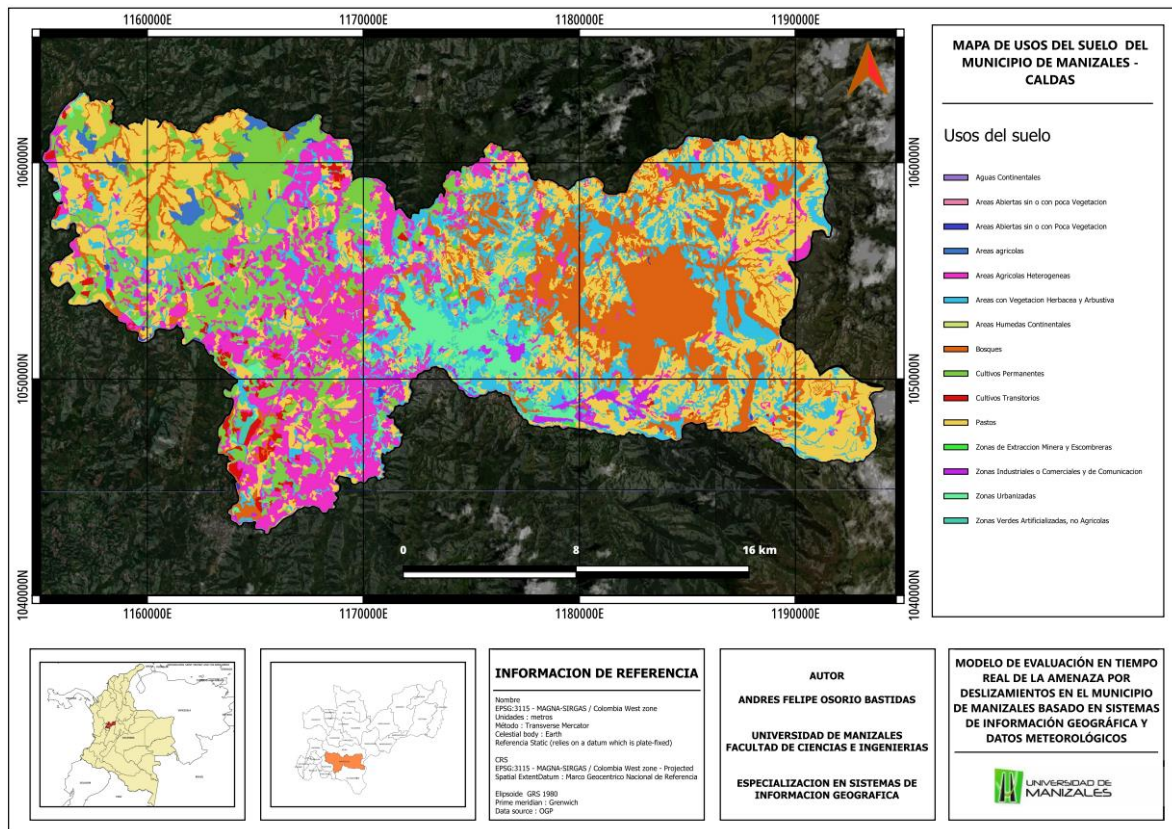
La identificación y clasificación de las formaciones geológicas en la superficie son fundamentales para comprender cómo diferentes tipos de rocas y depósitos sedimentarios pueden influir en la estabilidad del terreno.

La composición y las propiedades del suelo, como su cohesión y permeabilidad, son críticas para evaluar la estabilidad del terreno y su susceptibilidad a deslizamientos y erosión.

La utilización de la tierra, como la urbanización o la agricultura intensiva, puede modificar la estructura del suelo y aumentar la vulnerabilidad a los movimientos en masa.

Figura 59

Mapa de Suelos



7.2 Calculo de la Susceptibilidad con el método WofE.

Para el desarrollo del calculo de la susceptibilidad que inicio con la rasterización de los mapas e insumos previamente analizados en la determinación de los factores condicionantes, se aplico un algebra de mapas de cada uno de los factores condicionantes multiplicados por el Inventario de movimiento en masa.

Este procedimiento es indicado en la metodología que se obtiene como resultado una serie de mapas ráster que se encuentran en una escala de grises y para interpretarlos, tiene mejor significado si se representan en forma de tablas estadísticas, por lo tanto a continuación se presenta una muestra de los resultados del análisis ráster en formato alfanumérico.

Los resultados a continuación incluyen el informe ráster de cada uno de los factores condicionante, así como el resultado del cálculo estadístico de Peso final W_f de cada clase o categoría del factor condicionante, incluye también el informe del cruce de cada factor condicionante con el inventario de movimientos en masa.

Para visualizar el resultado de cada una de las tablas se pueden ver en la sección de Anexos.

Tabla 8

Resultado de pixeles Mapa de Alturas.

Categoría [M.s.n.m.]	NPiX 1	NPiX 2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
1000	3	15845	255405	2544835	-6	9,54E-02	-6,273026
1200	160	15688	224558	2575682	-2	7,34E-02	-2,145742
1400	300	15548	375443	2424797	-2	0,12484602	-2,082508
1600	1275	14573	248745	2551495	-9,91E-02	9,15E-03	-0,108218
1800	1922	13926	173285	2626955	0,6728457 7	-6,54E-02	0,738252
2000	2662	13186	174087	2626153	0,9939396 4	-0,11970256	1,113642
2200	3572	12276	289513	2510727	0,7793425 6	-0,1462644	0,925607
2400	2635	13213	236868	2563372	0,6757972 6	-9,35E-02	0,769258
2600	886	14962	166098	2634142	-5,92E-02	3,62E-03	-0,062817
2800	608	15240	112777	2687463	-4,86E-02	1,99E-03	-0,050563
3000	449	15399	99067	2701173	-0,22	0,01	-0,22939
3200	683	15165	101781	2698459	0,17	-0,01	0,177362
3400	494	15354	111107	2689133	-0,24	0,01	-0,250115
3600	154	15694	108369	2691871	-1,38	0,03	-1,411631
3800	13	15835	119535	2680705	-3,95	0,04	-3,994803
4000	15	15833	3619	2796621	-0,31	0	-0,311832

Nota, resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de Alturas

En general para el mapa alturas tenemos movimientos en masa en alturas de 2000 a 2400 msnm, posiblemente por factores antrópicos puesto que es la altura promedio del municipio de Manizales de 2000 a 2200 msnm. También posiblemente alturas de 2400 pueden tener diferentes causas como sobre pastoreo, relieves más agudos y acumulación de agua.

Tabla 9

Resumen de Áreas del Mapa de Alturas.

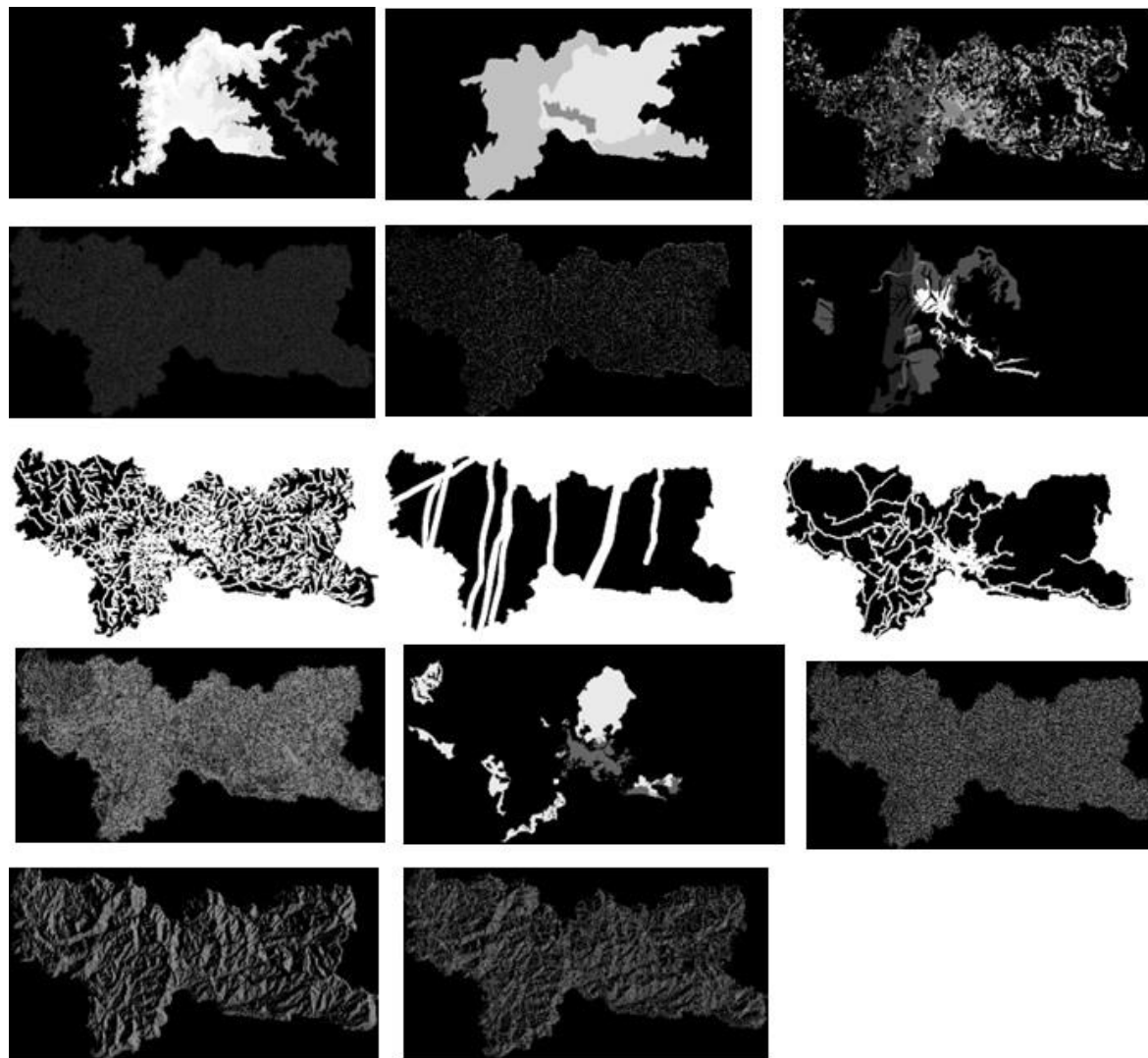
Categoría [msnm]	Total, pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pixeles con Movimiento
1000	255408	39968240,7	9,07	3	0,02
1200	224718	35165629,5	7,98	160	1,01
1400	375743	58799202,3	13,34	300	1,9
1600	250020	39125084,3	8,88	1275	8,05
1800	175207	27417761,2	6,22	1922	12,14
2000	176749	27659065,4	6,28	2662	16,82
2200	293085	45864232,2	10,41	3572	22,56
2400	239503	37479301,9	8,5	2635	16,64
2600	166984	26130961,8	5,93	886	5,6
2800	113385	17743371,3	4,03	608	3,84
3000	99516	15573041,7	3,53	449	2,84
3200	102464	16034367,8	3,64	683	4,31
3400	111601	17464197	3,96	494	3,12
3600	108523	16982527,5	3,85	154	0,97
3800	119548	18707805,7	4,25	13	0,08
4000	3634	568676,731	0,13	15	0,09
Total	2816088	440683467	100	15831	100

Nota, resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Alturas

Para el municipio de Manizales tenemos que el 51% aproximadamente de las zonas con movimientos en masa se comprenden en alturas de 2000 a 2400 msnm donde el área ocupada es aproximadamente del 25%, lo que puede indicar una posible generación de movimientos en masa por factores antrópicos.

Una vez obtenidos los resultados del proceso estadístico se procede a ingresar los pesos finales en cada uno de los factores condicionantes, para ello se deben tener los mapas en formato vectorial, si están en formato ráster se aplica una vectorización como se indicó en la metodología y posteriormente se agrega un nuevo valor de campo para ingresar los valores de los pesos finales en cada mapa de susceptibilidad.

Cuando se tienen todos los mapas en formato vectorial con su respectivo campo de pesos finales, se deben rasterizar nuevamente para continuar con el álgebra de mapas

*Resultado de Imágenes Ráster con Valores de Campo de Pesos Finales Wf***Figura 60***Mosaico de imágenes ráster*

Nota. Mosaico de imágenes ráster de los factores condicionantes empleando los pesos finales Wf para cada uno de los insumos.

El procedimiento siguiente a tener los pesos finales en cada factor condicionante, consiste en ingresar en sus tablas de atributos el campo de pesos finales y rasterizar los archivos

vectoriales usando el campo de peso final WF como valor de marcado o usado como índice para generar los mapas ráster.

Una vez generado los mapas ráster tendrán un aspecto como el mosaico de imágenes anterior, que es el resultado para los factores condicionantes del municipio de Manizales.

Resultado de la Susceptibilidad por movimientos en Masa

El resultado del mapa de susceptibilidad se obtiene una vez se tienen listos las imágenes o mapas en formato ráster con el campo de pesos finales Wf como valor de marcado se procede a aplicar la sumatoria de mapas ráster para obtener el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, como se indico en el apartado de metodología.

El resultado de la sumatoria ráster usando la herramienta “Ráster Calculator “, emplea la siguiente formula tal y como lo propone la guía metodológica del servicio geológico para el calculo de susceptibilidad por movimientos en masa 1:25.000 del 2107.

$$\text{Susceptibilidad por Movimientos en masa} = \sum \text{Factores condicionantes}$$

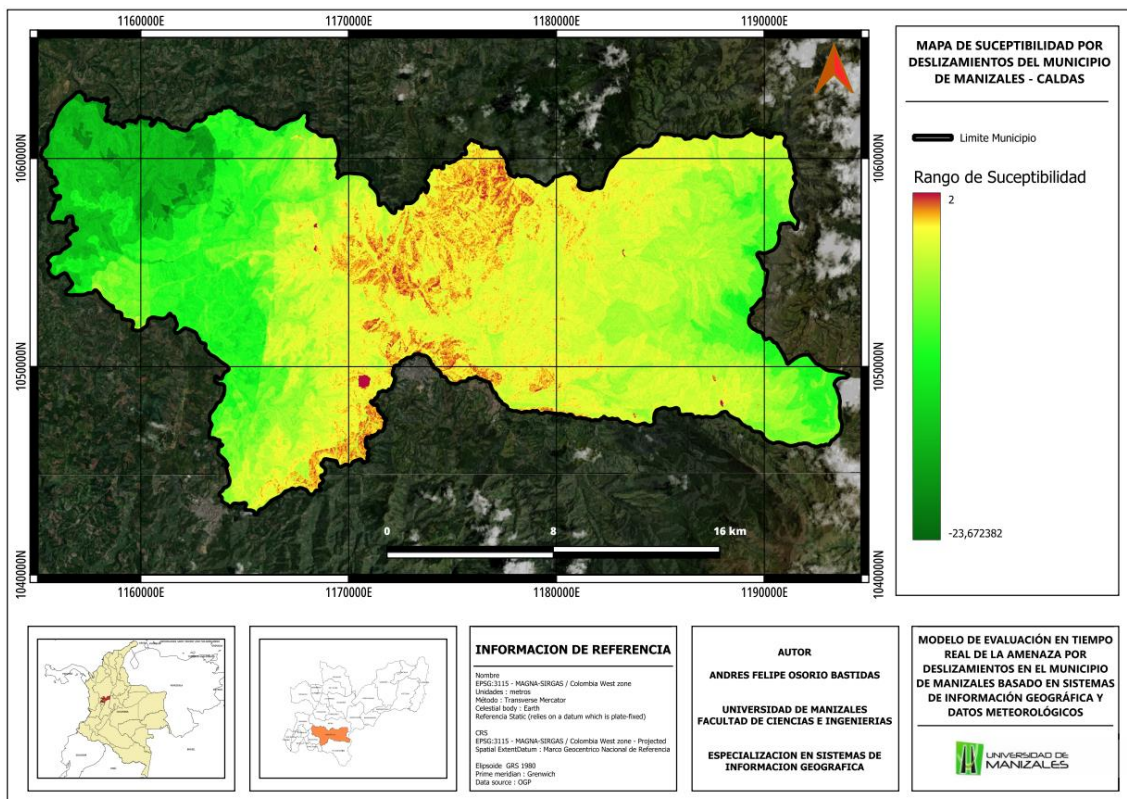
Suceptibilidad MenM = (Mapa de : Alturas + Aspecto + Curvatura de Perfil + Curvatura Tangencial + Direccion de Flujo + Irregulariad o Rugosidad del Terreno +

Distancia Fallas + Distancia Vias + Distancia a Drenajes + Geomorfologia + Unidades geologicas Superficiales + Mapa de Suelos)

El resultado de esta sumatoria en la herramienta de la calculadora ráster, genera una nueva imagen ráster que reúne las características de cada uno de los factores condicionantes aplicado en la formula, donde los valores más altos en el valor de los pixeles corresponden a las áreas más susceptibles y los valores mas bajos a las áreas menos susceptibles a movimientos en masa.

Figura 61

Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa



Resultado mapa de susceptibilidad, donde los valores positivos indican que son zonas susceptibles de generar movimientos en masa.

El resultado del mapa de susceptibilidad indica valores comprendidos entre -23 y 2, sin embargo el resultado oficial comprende entre -23,67 a +10,94 lo que significa que para valores entre -23 y -1 se tienen zonas de susceptibilidad por movimientos en masa de muy baja a baja, y los valores que estén cercanos a 0 son áreas en las que pueden existir o no presencia de movimientos en masa por lo que se considera susceptibilidad media y para valores cercanos a 1 o superiores son los que tienen una susceptibilidad alta a muy alta, solo se requiere que los valores resultantes de este calculo de susceptibilidad sean positivos diferentes de 0 para considerarse susceptibles a generarse movimientos en masa.

Se puede re clasificar nuevamente el ráster de susceptibilidad para definirlo en 5 posibilidades de susceptibilidad, muy baja, baja, media, alta y muy alta según se requiera.

Para este caso se realizó dicha re clasificación para evaluar en términos estadísticos, como se encuentra el municipio de Manizales en términos de susceptibilidad por movimientos en masa.

Tabla 10

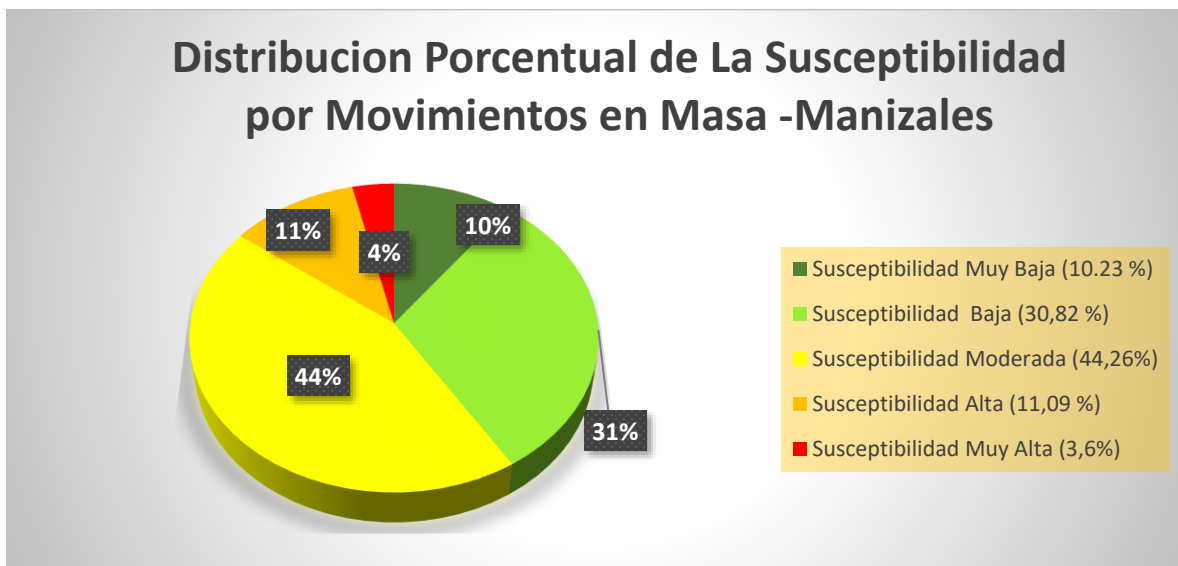
Informe de la Susceptibilidad por movimientos en masa

Categoría	Conteo Píxeles	Área [m ²]	porcentaje ocupación
Susceptibilidad Muy Baja	303198	47442931,6	10,23
Susceptibilidad Baja	913667	142966118	30,82
Susceptibilidad Moderada	1311986	205293116	44,26
Susceptibilidad Alta	328839	51455109,2	11,09
Susceptibilidad Muy Alta	106720	16699020,6	3,6
Sumatoria	2964410	463856295	100

El conteo estadístico por categoría indica que el municipio de Manizales está inmerso principalmente en una susceptibilidad de moderada a baja en condiciones normales, sin embargo, puede incrementarse considerablemente en condiciones climáticas muy lluviosas.

Figura 62

Estadísticas de la Susceptibilidad por movimientos en masa en Manizales Caldas



Nota. Para el municipio de Manizales los valores de susceptibilidad predominan principalmente de susceptibilidad baja a moderada, sin embargo existen zonas muy susceptibles de generar movimientos en masa que ocupan cerca del 4% del territorio municipal de Manizales.

7.3 Resultados de la Base de Datos

En la base de datos diseñada y presentada en el capítulo de metodología se ingresa la siguiente información a la tabla de las estaciones meteorológicas, que incluye id de cada estación como lo dispone el SIMAC, las coordenadas en WGS 84 y cambien en MAGNA SIRGAS 3115 que se obtuvo de la re proyección de las coordenadas originales, el nombre de la estación y su descripción de ubicación además de la extensión geoespacial geom.

Figura 63

Tabla de estaciones Meteorológicas

	id_estacion [PK] bigint	fk_municipio integer	longitud character var	latitud character var	altitud integer	ubicacion character varying (200)	coordenada_x numeric (10,3)	coordenada_y numeric (10,3)	nombre_estacion character varying (60)
1	170010101004	9	75° 31' 2...	5° 4' 17.2...	2226	Observatorio Vulcanológico y Sismológico Manizales - Barrio Chipre	1172250.236	1052759.932	Observatorio Vulcanológico
2	170010101006	9	75° 28' 5...	5° 3' 47.3...	2195	Centro de Bioinformática y Biología Computacional - BIOS	1177028.574	1051852.738	Yarumos
3	170010101007	9	75° 31' 1...	5° 3' 41.4...	2112	Centro Integral de Servicios Comunitarios-El Carmen	1172755.134	1051661.054	El Carmen
4	170010101008	9	75° 30' 1...	5° 2' 34.2...	1915	Institución Educativa Aranjuez	1174904.784	1049601.238	Aranjuez
5	170010101009	9	75° 29' 1...	5° 4' 59.2...	2126	Institución Educativa Bosques del Norte	1176187.200	1054069.800	Bosques del Norte
6	170010101010	9	75° 31' 4...	5° 5' 45.4...	1967	Hospital Geriátrico San Isidro	1171673.715	1055468.831	La Palma
7	170010101011	9	75° 30' 1...	5° 3' 46.3...	2183	S.E.S Hospital de Caldas	1174890.607	1051632.402	Hospital de Caldas
8	170010101012	9	75° 28' 3...	5° 3' 5.1"...	2230	Planta de tratamiento Niza - Aguas de Manizales S.A E.S.P	1177555.607	1050557.252	Milán - Planta Niza
9	170010101013	9	75° 31' 4...	5° 3' 60.0...	2057	Instituto de Valoración de Manizales - INVAMA	1172972.534	1052233.137	Alcázares
10	170010201003	9	75° 29' 3...	5° 3' 22.2...	2179	Campus Palogrande. UN - Bloque I	1175810.223	1051078.449	Posgrados
11	170010202001	9	75° 30' 2...	5° 3' 20.5...	2014	Lavautos Ruta 30	1175276.848	1059994.786	Q. Palogrande - Ruta 30
12	170010207056	9	75° 28' 1...	5° 1' 47.0...	2091	Campus La Nubia Universidad Nacional de Colombia Bloque W	1178103.859	1048158.615	La Nubia
13	170010301018	9	75° 30' 3...	5° 4' 5.3"...	2150	Colegio Isabel La Católica	1173767.131	1052397.914	Liceo Isabel La Católica
14	170010301021	9	75° 25' 5...	5° 4' 53.5...	2930	Alto de La Coca - Reserva Río Blanco	1184009.021	1053904.602	Alto de La Coca

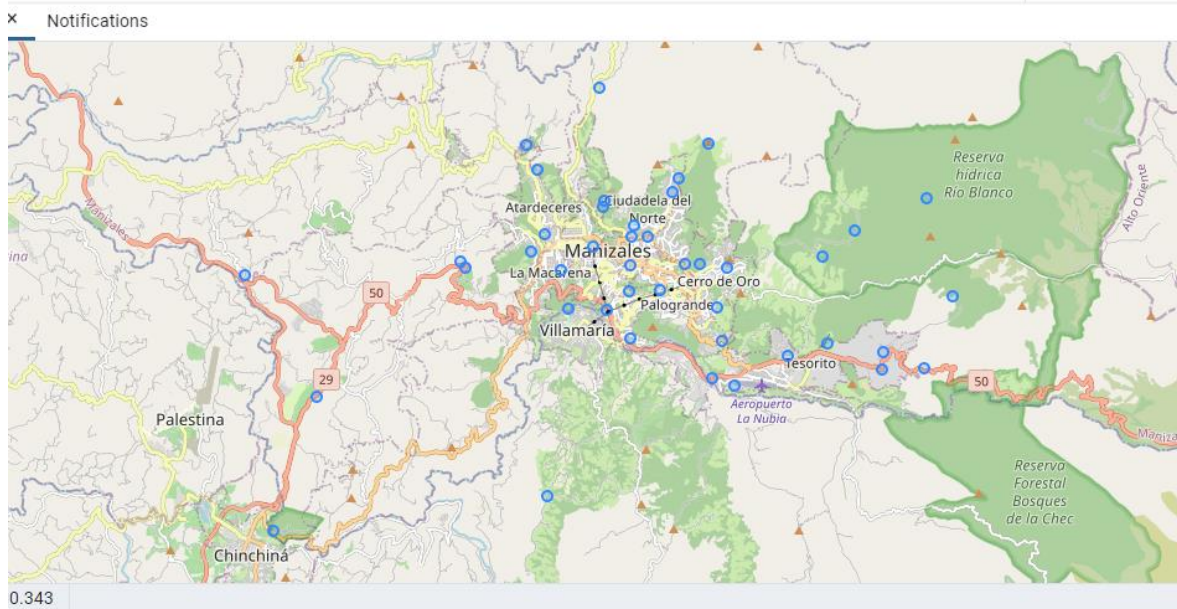
Nota. La tabla de estaciones incluye datos como ID, nombre y posición geográfica, para este caso son 42 estaciones en Manizales y 5 alrededor.

Las estaciones meteorológicas tienen una extensión geo espacial con Postgis puesto que es fundamental conocer su distribución espacial en el municipio para efectos de Interpolación de

la precipitación en estos puntos que dan como resultado un mapa de isoyetas o el resultado del factor detonante de los movimientos en masa.

Figura 64

Representación geo espacial de las estaciones Meteorológicas en PostgreSQL



La base de datos cuenta con mas de 20 tablas, sin embargo se muestran los resultados de las tablas mas representativas y utilizadas para el ejercicio de interpolación, puesto que también tienen tablas para reportes de temperaturas, precipitación actual, niveles de vulnerabilidad en sectores urbanos y rurales, sin embargo como se ha mencionado no hacen parte de esta investigación por condiciones de escala definidas en el decreto 1807 del 2014 , que exige condiciones mínimas para fines de vulnerabilidad y riesgo, sin embargo este apartado se adiciona con fines educativos de como los SIG pueden ayudar en estos procesos cuando se cumplen las condiciones mínimas manifestadas en el decreto en mención.

Figura 65

Tabla Auxiliar de Información Meteorológica

	id_lluvia integer	fk_estacion bigint	ppt_24_acumu numeric (5,2)	a25_acumu_min double precision	a25_acumu_max numeric (5,2)	a3_acumu numeric (5,2)	ppt_actual numeric (5,2)	fecha_ultimo_reporte timestamp with time zone	longitud character varying (60)	latitud character varying (60)	altitud integer
1	19	170010302040	8.69	150	449.46	5.91	1.91	2023-06-18 20:16:51-05	75° 27' 24.5" W	5° 2' 16.8" N	2102
2	20	170010302026	2.76	72.8	136.28	9.28	2.28	2023-06-18 20:59:12-05	75° 29' 13.2" W	5° 5' 12.8" N	1659
3	21	170010302035	1.33	153	370.79	10.33	4.33	2023-06-18 20:57:46-05	75° 30' 32.8" W	5° 6' 42.5" N	1690
4	23	170010302038	3.94	105	226.04	8.16	4.16	2023-06-18 20:10:04-05	75° 28' 29.6" W	5° 2' 31.7" N	2032
5	24	170010302033	7.95	157.4	279.73	13.61	2.61	2023-06-18 20:51:55-05	75° 32' 51.5" W	5° 3' 50.1" N	1630
6	26	170010302027	5.62	180.4	371.55	10.34	0.34	2023-06-18 20:56:27-05	75° 26' 44.5" W	5° 2' 29.2" N	2179
7	27	170010302032	0.97	175.4	161.21	10.91	1.91	2023-06-18 20:44:33-05	75° 32' 46.1" W	5° 3' 44.0" N	1620
8	28	170010302034	4.14	197.6	201.87	10.23	0.23	2023-06-18 20:29:26-05	75° 35' 14.7" W	5° 1' 35.6" N	1250
9	13	170010301025	2.47	160.2	209.39	11.47	4.47	2023-06-18 20:54:40-05	75° 29' 57.8" W	5° 4' 26.2" N	2094
10	14	170010201003	9.84	231.6	198.71	13.11	3.11	2023-06-18 20:45:07-05	75° 29' 32.1" W	5° 3' 22.2" N	2179
11	15	170010207056	4.56	166.8	281.09	6.56	3.56	2023-06-18 20:28:41-05	75° 28' 17.9" W	5° 1' 47.0" N	2091
12	36	170010202001	4.83	315.6	345.36	10.77	0.77	2023-06-18 20:30:49-05	75° 30' 2.9" W	5° 3' 20.5" N	2014
13	37	170010302036	6.64	288	189.99	11.27	0.27	2023-06-18 20:05:14-05	75° 30' 25.6" W	5° 3' 2.2" N	1890
14	39	170010302016	1.42	284.8	406.11	10.13	0.13	2023-06-18 20:33:44-05	75° 25' 50.9" W	5° 2' 2.8" N	2314

Nota. Es en esta tabla que se guardan los datos de precipitación y temperatura que se registran por estación meteorológica.

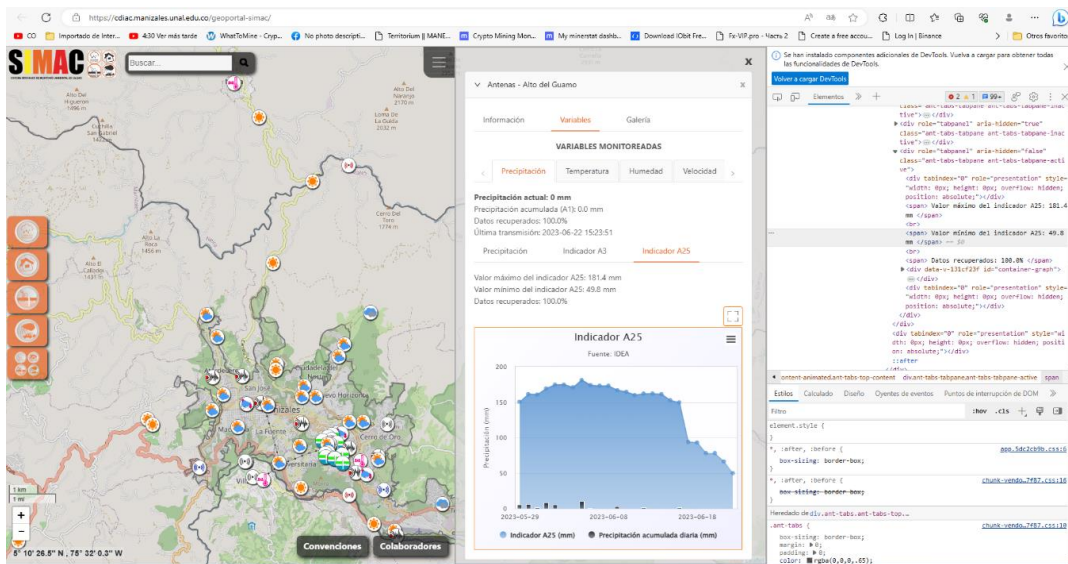
La tabla auxiliar de lluvia reúne los últimos reportes de la precipitación actual, A3 A25 min, A25 Max, altitud, coordenadas y fechas, para el caso de la interpolación de la precipitación de los últimos 25 días o A25 se emplea los datos recogidos desde el geo portal como A25 Min, que es empleado desde un código de programación para efectuar la interpolación y generar el mapa de isoyetas (Factor Detonante).

7.4 Scripts de Programación

Los resultados de programación se ven reflejados en la actualización constante de la base de datos y en la generación de los mapas de interpolación IDW y los mapas de amenaza, sin embargo, se explica de manera más resumida respecto al capítulo de metodología de como se generan estos resultados

En este apartado se tiene el resultado de dos bloques de programación empleando Python, en primer lugar se encuentra el código empleado para lo obtención de la precipitación actualizada del A25, esta información es reportada en un periodo de cada 5 minutos, donde se seleccionan algunos datos, entre ellos la precipitación Actual, A3, A25 y temperatura, de los cuales el A25 reporta dos valores un valor mínimo y un valor máximo, se puede hacer lectura de ambos, sin embargo el valor más importante de todos es el A25 mínimo con el cual se elabora la interpolación.

Figura 66
Geovisor SIMAC -IDEAM.



Nota. El geovisor tiene una estructura web dinámica que carga información de precipitación cada cinco minutos por lo que es necesaria una librería de selenium para obtener los datos de precipitación

El geo portal es una web de datos abiertos al público que fue construida bajo una interfaz dinámica, es decir que su estructura web se actualiza sin modificar la ruta web, manteniendo constante el URL, este es el primer análisis que se realiza en la web para evaluar cual es la mejor metodología para obtener la información de cada estación meteorológica, como es del tipo dinámico se emplea una librería adecuada para este caso llamada “Selenium”, esta librería se puede emplear en otros lenguajes de programación sin embargo para efectos de manejo de datos el más optimo es el lenguaje de programación Python.

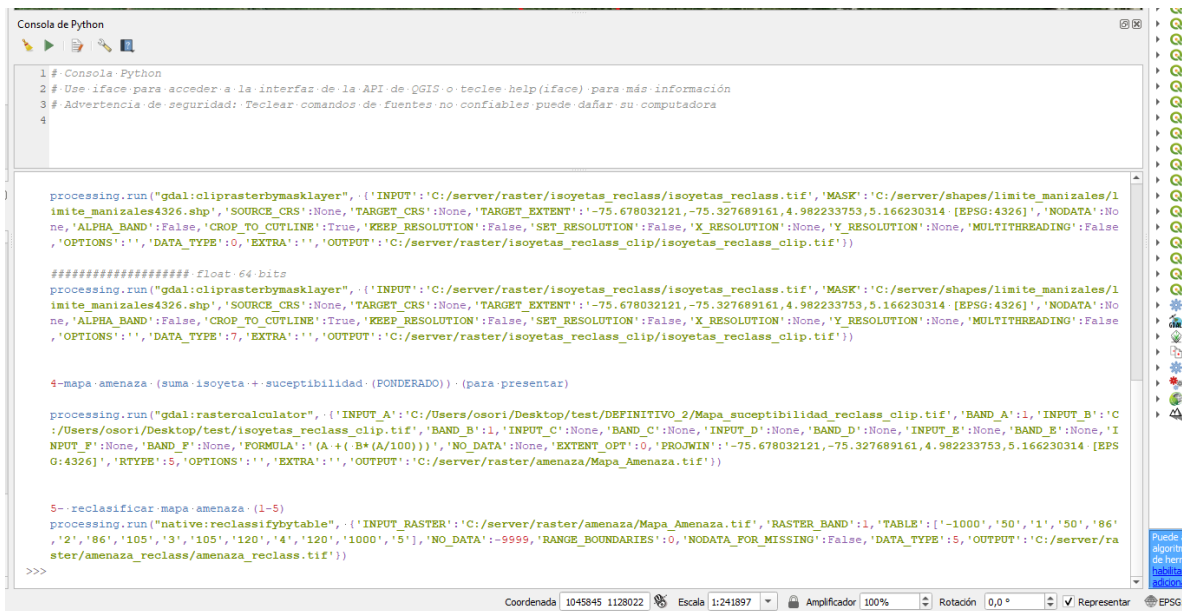
El método de obtención de la información de este método es mas ampliamente explicado en la sección de metodología, el resultado de la elaboración de este código cumple con el objetivo de hacer lectura y copia del valor de precipitación a25 min que se encuentra en una ruta especifica de cada estación meteorológica, guardada en un arreglo matricial y posteriormente indicada una conexión a la base de datos hace un Update de las columnas en las tablas de precipitación como se muestra en el resultado de bases de datos. (poner imagen de código solamente)

El segundo apartado del código consiste en la automatización de procesos como la generación de la interpolación o mapa de isoyetas que da como resultado una imagen ráster, posteriormente continua con el recorte de la imagen ráster con los limites de la zona de estudio también conocido como clip mask, posteriormente aplica un algebra de mapas que da como resultado el mapa de amenazas por movimiento en masa y finalmente hace una reclasificación del mapa.

De manera adicional se dejan programados unos resultados para la vulnerabilidad sin embargo se recuerda nuevamente que estos resultados deben tratarse con cautela por las limitaciones presentes de escala establecidas en el decreto 1807 del 2014.

Figura 67

Scripts de PyQGIS para la automatización de proceso.



```

1 # Consola Python
2 # Use iface para acceder a la interfaz de la API de QGIS o teclee help(iface) para más información
3 # Advertencia de seguridad: Teclear comandos de fuentes no confiables puede dañar su computadora
4

processing.run("gdal:cliprasterbymasklayer", {'INPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass/isoyetas_reclass.tif','MASK':'C:/server/shapes/limite_manizales/limite_manizales4326.shp','SOURCE_CRS':None,'TARGET_CRS':None,'TARGET_EXTENT':{'-75.678032121,-75.327689161,4.982233753,5.166230314 [EPSG:4326]','NODATA':None,'ALPHA_BAND':False,'CROP_TO_CUTLINE':True,'KEEP_RESOLUTION':False,'SET_RESOLUTION':False,'X_RESOLUTION':None,'Y_RESOLUTION':None,'MULTITHREADING':False,'OPTIONS':'','DATA_TYPE':0,'EXTRA':'','OUTPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass_clip/isoyetas_reclass_clip.tif'})

##### Float 64 bits
processing.run("gdal:cliprasterbymasklayer", {'INPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass/isoyetas_reclass.tif','MASK':'C:/server/shapes/limite_manizales/limite_manizales4326.shp','SOURCE_CRS':None,'TARGET_CRS':None,'TARGET_EXTENT':{'-75.678032121,-75.327689161,4.982233753,5.166230314 [EPSG:4326]','NODATA':None,'ALPHA_BAND':False,'CROP_TO_CUTLINE':True,'KEEP_RESOLUTION':False,'SET_RESOLUTION':False,'X_RESOLUTION':None,'Y_RESOLUTION':None,'MULTITHREADING':False,'OPTIONS':'','DATA_TYPE':7,'EXTRA':'','OUTPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass_clip/isoyetas_reclass_clip.tif'})

4-mapa-amenaza (suma isoyeta + susceptibilidad (PONDERADO)) (para presentar)

processing.run("gdal:rastercalculator", {'INPUT_A':'C:/Users/osori/Desktop/test/DEFINITIVO_2/Mapa_susceptibilidad_reclass_clip.tif','BAND_A':1,'INPUT_B':'C:/Users/osori/Desktop/test/isoyetas_reclass_clip.tif','BAND_B':1,'INPUT_C':None,'BAND_C':None,'INPUT_D':None,'BAND_D':None,'INPUT_E':None,'BAND_E':None,'INPUT_F':None,'BAND_F':None,'FORMULA':'(A+(B*(A/100)))','NO_DATA':None,'EXTENT_OPT':0,'PROJWIN':{'-75.678032121,-75.327689161,4.982233753,5.166230314 [EPSG:4326]','RTYPE':5,'OPTIONS':'','EXTRA':'','OUTPUT':'C:/server/raster/amenaza/Mapa_Amenaza.tif'})

5--reclasificar mapa-amenaza (1-5)
processing.run("native:reclassifybyscale", {'INPUT_RASTER':'C:/server/raster/amenaza/Mapa_Amenaza.tif','RASTER_BAND':1,'TABLE':{'-1000','50','1','50','86','12','86','105','3','105','120','4','120','1000','5'],'NO_DATA':-9999,'RANGE_BOUNDARIES':0,'NODATA_FOR_MISSING':False,'DATA_TYPE':5,'OUTPUT':'C:/server/raster/amenaza_reclass/amenaza_reclass.tif'})
>>>

```

Nota. Los scripts de qgis se procesaron en 5 pasos, en anexos se encuentra los scripts completos.

Al ejecutar el código en conjunto se tiene como resultado una serie de procedimientos que incluye la actualización constante de la precipitación A25 en la base de datos, que será el insumo fundamental para continuar con el procedimiento de interpolación IDW, y cálculo de amenaza que son obtenidos en los próximos apartados de este capítulo de resultados.

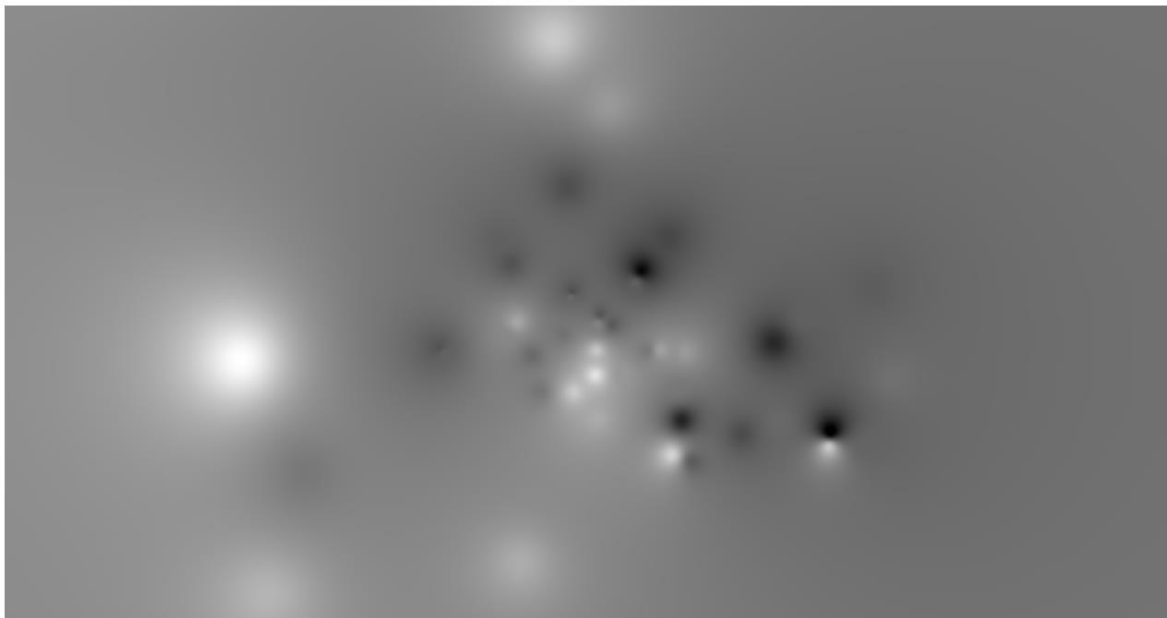
7.4 Mapa de Isoyetas -Interpolación IDW

El resultado de la ejecución del código una vez actualizado la base de datos, continua con la generación de la interpolación de los datos de precipitación, se emplea el método IDW en el cual es necesario indicar la ubicación geográfica de cada una de las estaciones meteorológicas y la precipitación que cada estación reporta, toda esta información proviene directamente desde la base de datos diseñada, que da como resultado una imagen ráster de la interpolación.

El resultado del primer script también solicita la resolución espacial del pixel objetivo, que debe ser de la misma resolución espacial del DEM empleado en este caso de 12,5 m.

Figura 68

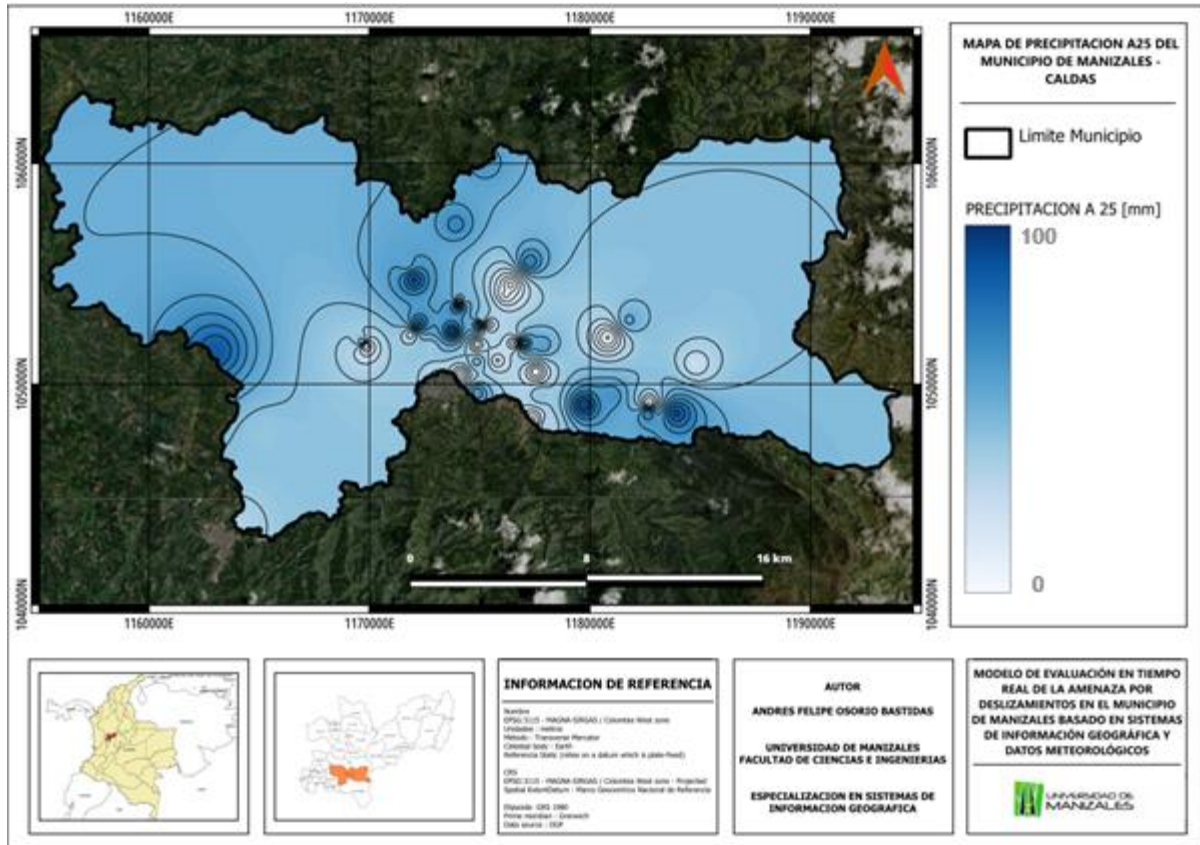
Generación de la interpolación IDW de la precipitación.



Nota. El IDW corresponde al resultado del primer script ejecutado.

Figura 69

Mapa de isoyetas reclasificado



Gráfico, x Mapa de Isoyetas Obtenido desde de los scripts de PyQGIS.

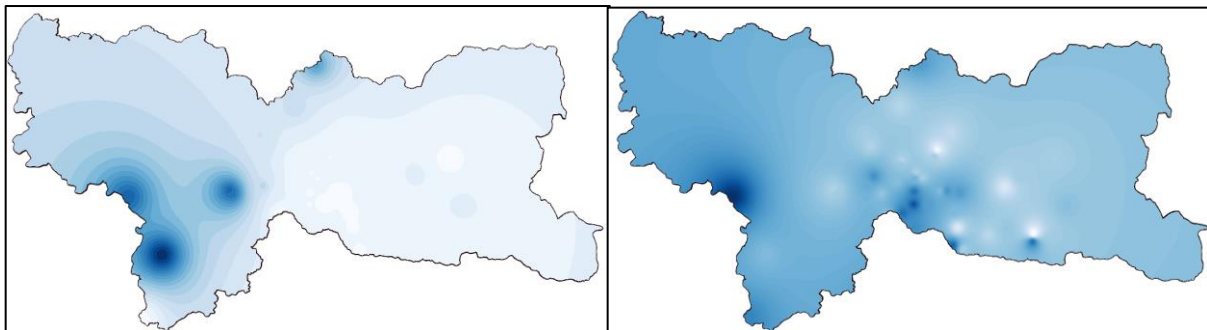
El script otorga como resultado un mapa reclasificado en valores de 0 a 100, donde cada unidad representara 4mm de precipitación, siendo así para un valor de 100 se tienen 400mm o más ya que es el valor de precipitación más alto con el que se tiene alerta máxima en el A25, después de 400 seguirá siendo alerta máxima por lo que se normalizo en valores de 0 a 100% dependiendo del nivel de alerta.

Cuando se obtiene el mapa reclasificado, se procede a realizar un recorte del raster siguiendo la zona de estudio, siendo ejecutado por la tercera instrucción del script.

Una vez ejecutada la Tercera instrucción da como resultado la imagen ráster de la interpolación IDW para las precipitaciones indicadas con el recorte adecuado de la zona de estudio, para este caso se presentan el resultado de dos imágenes ráster de diferentes temporalidades previamente recortadas con el script de programación

Figura 70

Imágenes ráster recortadas



Nota. Las imágenes recortadas corresponden a la ejecución del segundo script de QGIS.

El resultado del código arroja una imagen que excede los límites de la zona de estudio, por lo cual es necesario indicarle en el procedimiento siguiente realizar un clip mask con una capa vectorial de los límites de la zona de estudio, en este caso del municipio de Manizales.

El script continuara con la cuarta instrucción que será la metodología de algebra de mapas para la obtención del mapa de amenazas, sin embargo tanto en este punto como en anterior y los siguientes, los resultados son guardados en una carpeta de trabajo y este ítem puede ser insumo para presentar como resultado la precipitación actual del A25 ene l municipio de Manizales.

7.5 Mapa de Amenazas por movimientos en masa

El resultado del calculo de la amenaza consiste en la sumatoria del mapa de susceptibilidad de manera pondera con el factor detonante, en este caso la interpolación de la precipitación de los últimos 25 días A25, explicado con mayor detalle en el capitulo de la metodología.

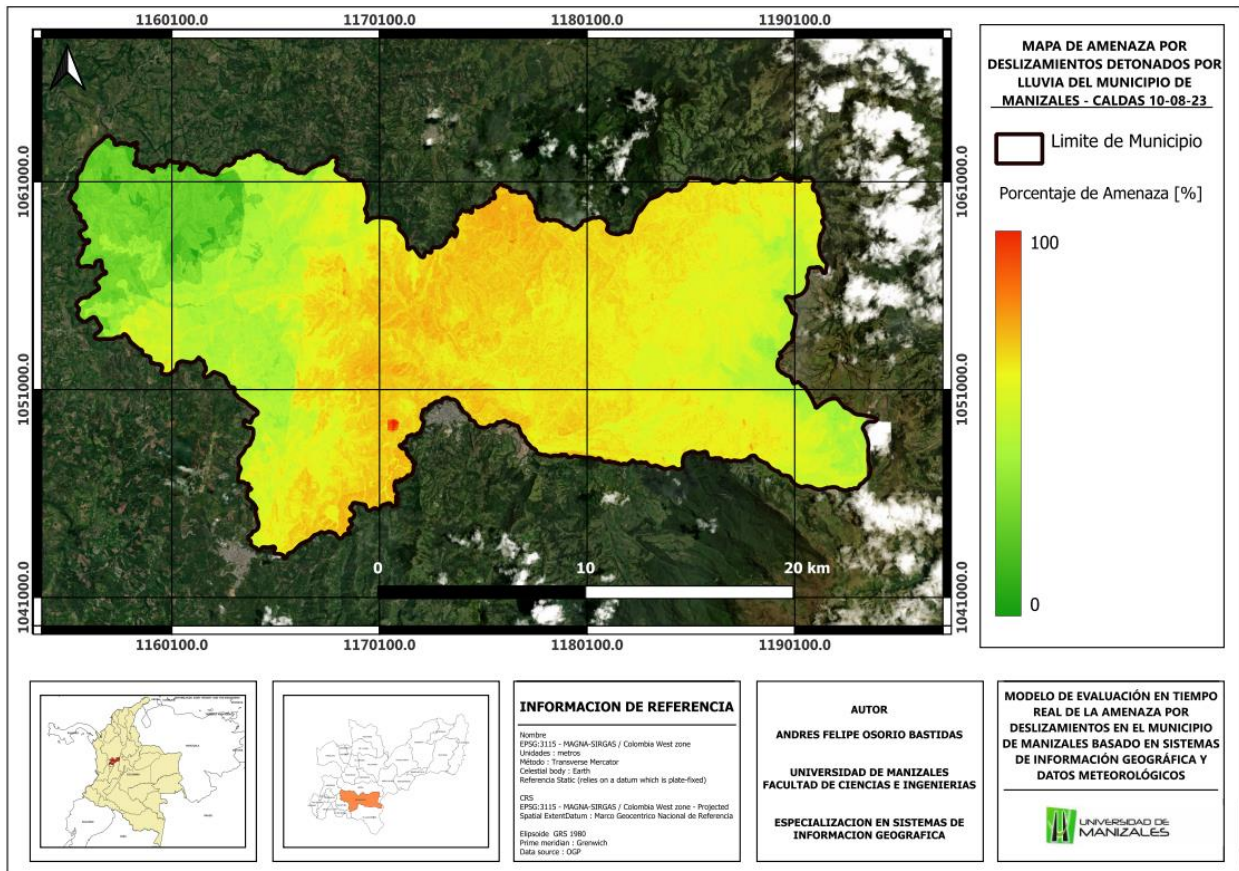
El resultado del mapa de Amenazas consta de 2 fases, el primer resultado es la imagen ráster resultante del algebra de mapas, sin embargo esta imagen no esta reclasificada en función de una escala cuantificable de amenaza, es decir requiere re clasificarse en 5 posibles valores de Amenaza (Amenazas Muy baja, baja, moderada, alta y muy alta), este proceso requiere una instrucción adicional en el código de programación.

Como resultado de la primera fase se tiene una imagen ráster que tiene generalmente valores mas altos respecto al mapa de susceptibilidad, para demostrar que los niveles de amenaza por movimientos en masa si varían respecto a diferentes periodos climáticos, se traen 2 ejemplos particulares el primer resultado consiste en una fecha resiente 10 de agosto del 2023, donde la

precipitación fue muy escaza y los valores de amenaza en general son de moderados a bajos en el municipio de Manizales.

Figura 71

Mapa de Amenazas Obtenido desde de los scripts de PyQGIS.

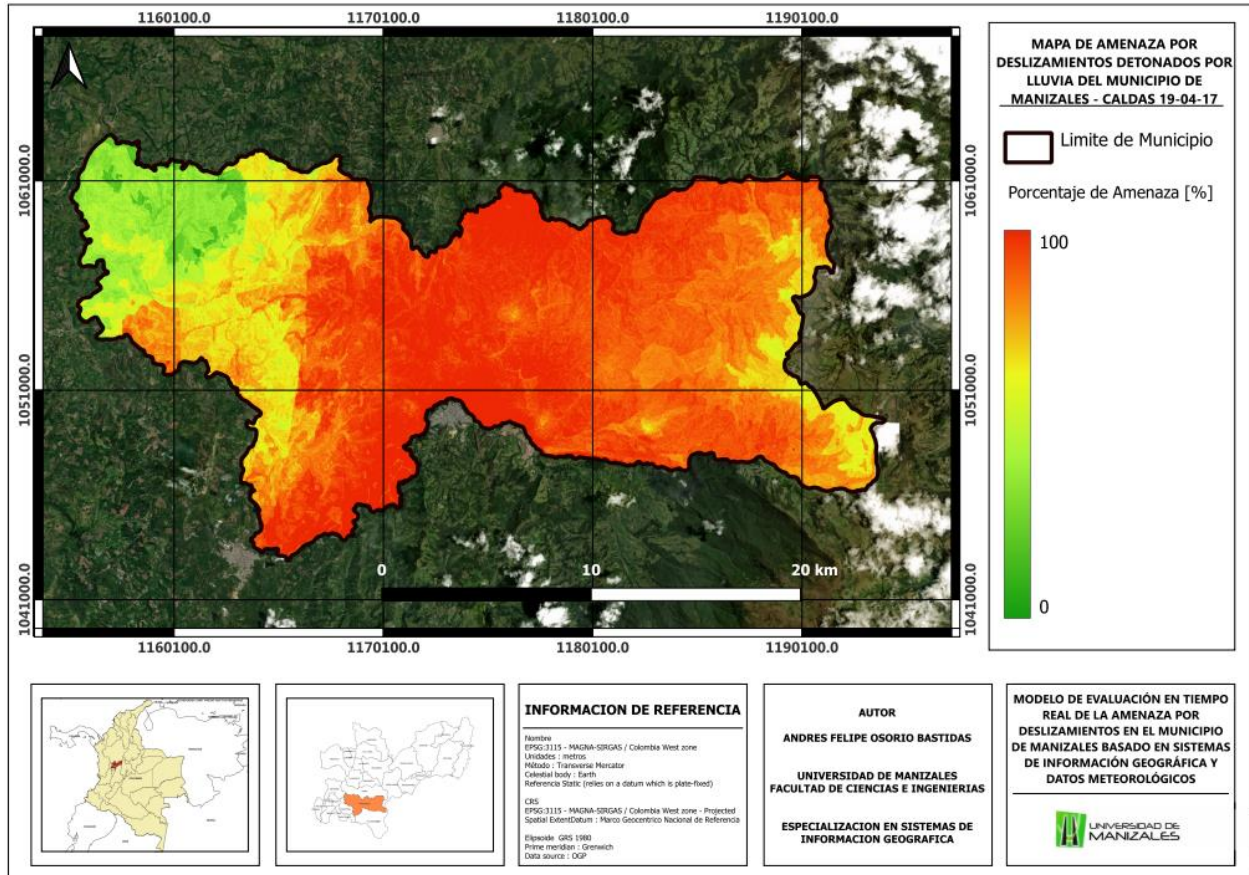


Nota. El mapa de amenaza corresponde al 10/08/2023

El otro ejemplo en particular, se trae a colación el caso de la precipitación reportada el 19 de abril del 2017, donde se generaron gran cantidad de deslizamientos en la ciudad de Manizales y en todo el municipio donde además murieron 19 personas por los deslizamientos ocurridos.

Figura 72

Mapa de Amenazas Obtenido desde de los scripts de PyQGIS.



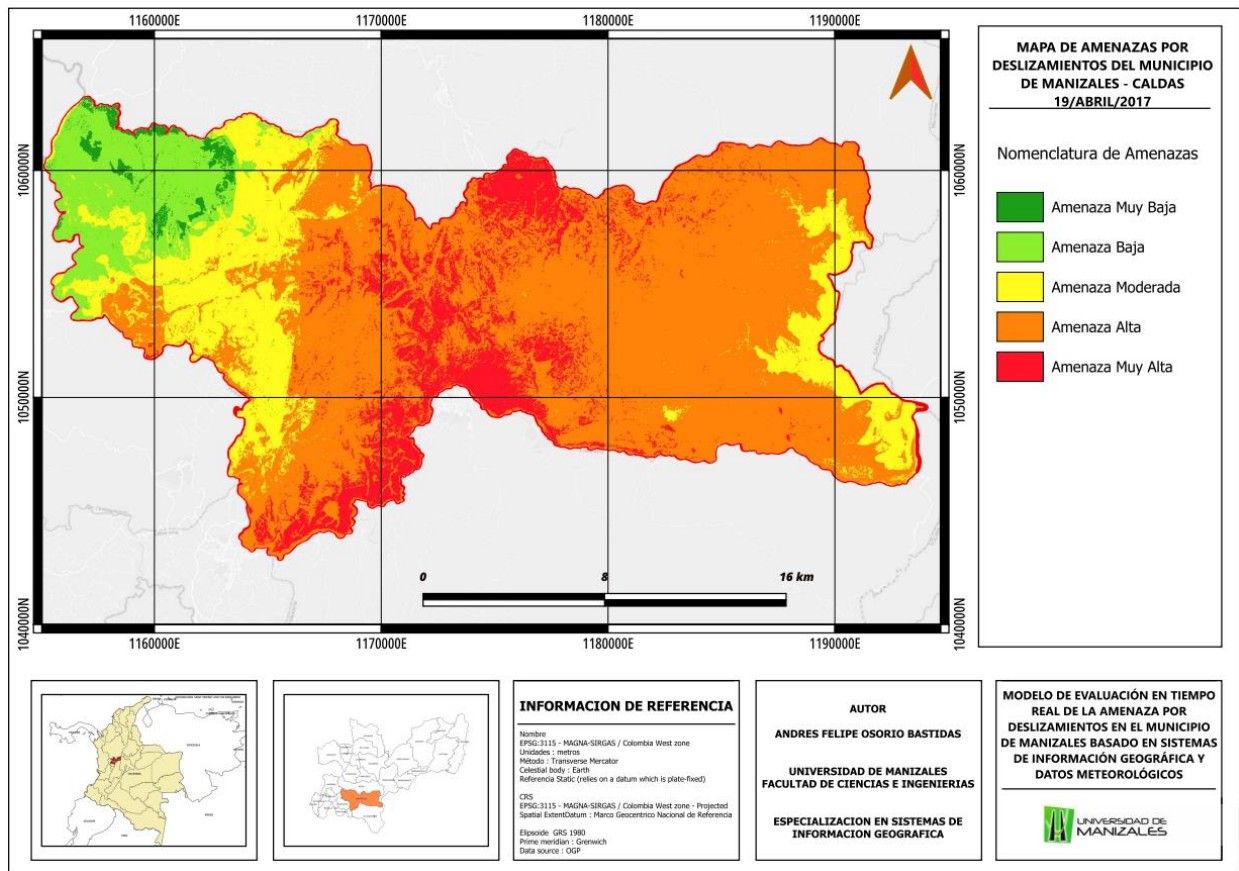
Nota. El mapa de amenaza corresponde al 19/04/2017, donde se presentó una emergencia por deslizamientos en todo el municipio, mas de 40 deslizamientos registrados en el casco urbano y 17 fallecidos.

Este resultado confirma la hipótesis de que el nivel de amenaza varía respecto a los periodos climáticos y la cartografía de amenaza elaborada para los municipios en la actualidad están sujetas a factores ambientales y climáticos del momento, poniendo así en riesgo al municipio en caso de presentarse lluvias intensas y prolongadas.

Sin embargo, el mapa en este punto requiere una reclasificación como se ha venido mencionado, para poder zonificar de manera un poco más precisa el nivel de amenazas, ya que de solo emplear la primera fase la zonificación estaría muy difusa y la escala de colores estaría más diseminada, por lo tanto, el mapa final que debe emplearse debe contar con una reclasificación.

Figura 73

Mapa de Amenazas definitivo (normalizado) para el 19 de abril del 2017.



Nota. El mapa de amenaza reclasificado para le municipio de Manizales, tiene mayor índice de amenaza en colindancia con el municipio de Neira caldas y con el municipio de Villamaría caldas. Las zonas que presentan menor valor de amenaza corresponden a zonas de topografía suaves a planas cercanas al rio Cauca.

El resultado termina con el mapa de amenazas reclasificado, donde el código estará ejecutándose en un ciclo infinito ejecutando uno a uno las instrucciones definidas en el orden indicado, para este sistema se decide iniciar la ejecución cada hora ya que el procedimiento dependerá del poder de cómputo y puede tardar de 10 a 15 minutos realizar todos los procedimientos, sin embargo el tiempo se puede modificar para ejecutarse en mas o menos veces en el día, incluso en periodos lluviosos muy intensos es poco probable que el nivel de amenaza cambie significativamente en pocas horas, pero ira registrando estos cambios paulatinamente.

Es de anotar que en los resultados además de estudios de vulnerabilidad, no se incluyen resultados de la probabilidad temporal ni la magnitud de la amenaza, puesto que para el municipio de Manizales no se reporta de manera publica una cartografía con la digitalización adecuada de los movimientos en masa ni tampoco la fecha de la ocurrencia. En este orden de ideas solo se plantea la zonificación espacial de la amenaza.

8. CONCLUSIONES

Se logro Identificar, analizar y determinar los factores condicionantes y detonantes por precipitación que influyen en la generación de movimientos en masa del Municipio de Manizales, de los cuales se identificaron desde la revisión bibliográfica para estudios de movimientos en masa del Municipio y un posterior análisis profundo de 12 factores condicionantes, mas relevantes que tiene Manizales, de los cuales los factores condicionantes que se determinaron como los mas susceptibles se encuentra la distancia a Vías como un factor de susceptibilidad que influye de manera significativa en la generación de movimientos en masa, la dirección de flujo con predominancia al Oriente reporta un rango considerable en la incidencia por Movimientos en masa, la cartografía geomorfológica de procesos denudaciones identifica zonas propensas a generar movimientos en masa y algunas Unidades de la cartografía Geológica Superficial, especialmente en unidades Geológicas Cuaternarias que son poco consolidadas y de baja rigidez. Para el factor detonante por precipitación, bajo una revisión bibliográfica profunda de publicaciones científicas sugieren en términos generales como factor detonante un periodo de retorno de 25 días para el municipio de Manizales, dentro del cual se le asocia un valor mínimo de precipitación acumulado de 200mm en 25 días en generar movimientos en masa para el municipio de Manizales y valores de precipitación superiores pueden registrar un mayor número de Movimientos en masa del tipo deslizamiento

El resultado de la susceptibilidad por movimientos en masa para el municipio de Manizales Caldas, basado en la metodología del Servicio geológico para escalas 1:25.000 indica que hay una predominancia de una susceptibilidad principalmente Moderada y en segunda instancia una

susceptibilidad Baja, donde la susceptibilidad moderada puede ocupar aproximadamente el 44% del municipio y una susceptibilidad Baja puede representar el 30% , los valores de susceptibilidad se mantienen relativamente constantes en el tiempo por lo que este insumo no requiere una elaboración constante a diferencia de los factores detonantes que cambian constantemente.

La base de datos fue diseñada con PostgreSQL junto con la extensión PostGIS para consultas geoespaciales, donde cumplido con el objetivo de poder almacenar la información de precipitación de las diferentes estaciones meteorológicas, el uso de la base de datos geo espacial permitió realizar la interpolación de los diferentes registros de precipitación con el método IDW apoyados con librerías de QGIS.

El script de programación cumple con el objetivo de obtener información de la precipitación actualizada desde el geoportal SIMAC-IDEAM para cada una de las estaciones indicadas, para un total de 47 estaciones meteorológicas, de las cuales 43 se distribuyen entre el perímetro urbano y rural de Manizales y 4 limitan con municipios vecinos, una vez obtiene el valor de precipitación , el código ingresa el valor de precipitación a la estación correspondiente mediante sentencias SQL. Posterior a este proceso el código conecta las librerías de PyQGIS con posgreSQL y ejecuta una serie de procedimientos que comienza con la interpolación IDW de la precipitación generando una imagen ráster, continua con el recorte de esta imagen, realiza una reclasificación de la precipitación en función de los rangos de peligrosidad propuesto por Correa(2019) y adoptado por la unidad del riesgo de Manizales, continua aplicando un instructivo para efectuar la sumatoria ponderada entre el mapa de susceptibilidad y el ráster

reclasificado de precipitación para obtener un mapa resultante de amenazas por movimiento en masa y termina con la reclasificación de este mapa de amenazas como imagen ráster para su posterior análisis, este proceso puede repetirse inmediatamente se termina de ejecutar la última instrucción, sin embargo se empleó un tiempo prudente para que el sistema se ejecute cada hora donde puede tener una duración entre 10 y 15 minutos, el sistema cumple con los objetivos planteados en términos de automatización de procedimientos y generación de mapas de precipitación y amenazas de diferentes temporalidades, el Código puede estar sujeto a modificaciones para posibles mejoras o adicionar otras sentencias.

9. RECOMENDACIONES

Recomendaciones Generales

El sistema creado para la generación de mapas en tiempo real de la zonificación de amenazas por movimientos en masa, es desarrollado para una escala 1:25.000 por lo que no es posible elaborar la zonificación por vulnerabilidad, riesgo ni calcular factores de Seguridad, de acuerdo al decreto 1807 del 2017, para cálculos de vulnerabilidad y riesgo se debe contar con una cartografía e insumos de una escala mínima entre 1:5.000 y 1:2.000.

El sistema puede realizar una zonificación de amenazas en la escala que se desee, siempre y cuando los insumos y el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa también tengan la misma escala, el mapa de susceptibilidad en escalas de 1:5000 o 1:2000 tienen un gran componente de insumos de base física obtenidos en laboratorios por lo que no es procedente aplicar el método de susceptibilidad para escalas 1:25.000 propuesto por El servicio Geológico Colombiano, en cambio debe emplearse la guía metodológica propuesta para escalas 1:5000 y 1:2000. "Guía Metodológica Para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en Masa".

Es ideal emplear sistemas de zonificación de amenazas en tiempo real en otras áreas como Avenidas torrenciales, Inundaciones, Tormentas, Incendios entre otros. Se podrá

emplear un sistema similar siempre y cuando existan insumos suficientes para hacerlo y alguna variable dinámica que cambie en el tiempo, esta debe poder cuantificarse de alguna manera en tiempo real mediante algún sensor y que sus datos puedan obtenerse de manera constante, como podría ser datos obtenidos por sensores satelitales o estaciones hidrológicas y mantener una cartografía en temas de Amenazas mas actualizada y correspondiente al nivel de amenaza real al momento de consultarse.

En caso de contarse con insumos de suficiente nivel de detalle para lograr una estudio de vulnerabilidad y riesgo, sería muy provechoso para los municipios puesto que podría indicarse con mayor precisión cuales son los predios a nivel de manzanas o veredas que tienen niveles de vulnerabilidad alta, además de cuantificar de manera aproximada cuantas personas viven en dichos predios saber su estado de vulnerabilidad actual y también tener información de su ubicación relativa como direcciones residenciales por manzana o vereda.

Recomendaciones Especificas

El sistema requiere tener Instalado QGIS (uso libre), instalar Python e instalar las librerías de Selenium y el driver asociado a la versión del navegador web que se este empleando en el servidor o equipo, instalar el motor de base de datos PostgreSQL junto con PostGIS, en la instalación de PostgreSQL asignarle las credenciales al a base de datos y crear una base de datos

donde se puede usar los comandos SQL del apartado Anexos para generar cada una de las tablas, triggers y procedimientos almacenados.

El Despliegue del sistema requiere de por lo menos un servidor dedicado para el funcionamiento del código y la base de datos, es deseable contar con 2 equipos dedicados donde uno de ellos sea dedicado a efectuar cada uno de las instrucciones del código y otro servidor dedicado al funcionamiento de la base de datos o usar un servicio en la nube.

El método de ScraPi para obtener información del Geoportal SIMAC puede estar sujeto a modificaciones, ya que el más mínimo cambio en la web o la información de las estaciones en el Geo Portal, impide llegar a la ruta exacta donde se encuentra el valor de la precipitación y/o Datos de Interés.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anderson, M.; Lloyd, D. (1991). Using a combined slope hydrology - Stability model to develop cut slope design charts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 91(4), 705-718. <https://doi.org/10.1680/iicep.1991.17486>

Anderson, MG., & Kemp, MJ. (1991). Towards an improved specification of slope hydrology in the analysis of slope instability problems in the Tropics. *Progress in Physical Geography*, 15, 29 - 52. <https://doi.org/10.1177/030913339101500103>

Anderson S.A., Sitar N. (1995). Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering*. Pág. 544-552. <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281995%29121%3A7%28544%29>

Berne, A., Uijlenhoet, R., Troch, A. (2005). Similarity analysis of subsurface flow response of hillslopes with complex geometry. *Water Resources Research* 41. <https://doi.org/10.1029/2004WR003629>

Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS* (398 p). Oxford: Pergamon. <https://doi.org/10.4236/jgis.2016.85050>

Borga, M. (2002). Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 267(1-2), 26-39. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00137-3).

-
- Campbell, R.H. (1975). Soil slips, debris flows and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California, USGS professional Paper 851. 51 pág
<https://doi.org/10.3133/pp851>
- Canuti, P., Focardi, P. & Garzonico, C.A. (1985). Correlation between rainfall and landslides, Bulletin Geologie de ingenieur, París. <https://doi.org/10.1007/BF02594765>
- Capparelli G, Biondi D, De Luca DL, Versace P (2009). Hydrological and complete models for forecasting landslides triggered by rainfalls. Proceedings of IWL - The First Italian Workshop on Landslides. Naples, 8/10 June 2009 1:162–173
https://www.researchgate.net/publication/270574606_Hydrological_and_complete_models_for_forecasting_landslides_triggered_by_rainfalls
- Ceccarini, F., Focardi, P., & Zanchi, C. (1981). Modello per la previsione delle oscillazioni di falda in funzione dei parametri climatici. Istituto Sperimentale Studio Difesa Suolo, Firenze, (12), 161,173.
http://scholar.google.com/scholar_lookup?title=+Modello+per+la+previsione+delle+oscillazioni+di+falda+in+funzione+dei+parametri+climatici&author=CECCARINI+F&author=FOCARDI+P&author=ZANCHI+C&publication_year=1981&volume=12&pages=161-173
- Cho, S.E.; Lee, S.R. (2001). Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. Computers and Geotechnics, 28(3), 185-208. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(00\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(00)00027-6)
- Cho, S.E.; Lee, S.R. (2002). Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(9), 756-763. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:9\(756\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:9(756))
- Correa, O., García, F., Bernal, G., Cardona, O. D., & Rodriguez, C. (2019). Early warning

- system for rainfall-triggered landslides based on real-time probabilistic hazard assessment. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03815-w>
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation. *Environmental Geology*, 35, (2-3), 131-145.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372016000200003
- Crozier, M.J., (1986). A technique for predicting the probability of mudflow and rapid landslide occurrence, International Seminar on Landslides and Mudflows, Alma Ata, USSR, Proceedings, pm 420-430, Unesco, Paris. <https://doi.org/10.7202/032702ar>
- Cruden D. M. y D. J. Varnes (1996). "Landslides types and processes", in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board. Special report 247, National Academy Press, Washington D.C., pp. 36-75. https://www.researchgate.net/publication/269710355_CrudenDM_Varnes_DJ_1996_Landslide_Types_and_Processes_Special_Report_Transportation_Research_Board_National_Academy_of_Sciences_24736-75
- Collins, B., & Znidarcic, D. (2004). Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 362.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(362))
- Fernandes N F, Guimarães R F, Gomes R A T, Vieira B C, Montgomery D R, Greenberg H (2004). Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. *Catena*, 55(2): 163–181. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00115-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00115-2)
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, Inc., New York. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 103. Pàg. 447-466.
<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000423>

Gómez, S. (1990). Predicción de niveles freáticos a partir de la precipitación y su influencia en la estabilidad de taludes (caso de aplicación en la meseta de Bucaramanga) (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Medellín).
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000119&pid=S1794-1237201100010000900018&lng=en

Glade, T., Anderson, M., & Crozier, M. J. (Eds.). (2005). *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470012659>

Gostelow, P. (1991). Rainfall and landslides en *Prevention and Control of landslides and other mass movements*, editado por AlmeidaTeixeira, M.; Fantechi, R., Oliveira, R., Gomez Coelho, A. Commis. European Communities, Bruselas. Pàg. 139-161.
https://doi.org/10.1007/978-94-015-8680-1_8

Guidicini, G., & Iwasa, O.Y. (1977). Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 16, 13-20.
<https://doi.org/10.2307/520449>

Guimaraes, F.R., Montgomery, D.R., Greenberg, H.M., Fernandes, N.F., Trancoso Gomes, R.A.,

de Carvalho O.A. 2003. Parameterization of soil properties for a model of topographic control on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology* 69. Pág. 9-108. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00263-6)

Guzzetti, F.; Peruccacci, S.; Rossi, M.; Stark, C.P. (2008). The rainfall intensity–duration control

of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, 5(1), 3-17.
<https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>

Hoyos P., F. (1990). Efectos de infiltraciones distantes en la inestabilidad de laderas de alta

pendiente, *Boletín de vías*, XVII, 71,96-129. https://www.academia.edu/es/6502097/Efecto_de_infiltraciones_distantes_en_la_inestabilidad_de_laderas

Hengxing, L., Chenghu, Z., Lee, C.-, F., Wang S., Faquan, W., U. (2003). rainfall-induced

landslide stability analysis in response to transient pore pressure- a case study of natural terrain landslide in Hong Kong. *Science in China*, Vol. 46. Supp. 52-68

https://www.researchgate.net/publication/209804122_Rainfallinduced_landslide_stability_analysis_in_response_to_transient_pore_pressure

Hoyos P., F. & Arnason, B., (1994). Claves isotópicas en la hidrogeología de alta montaña,

Boletín de Vías, XXI, 90, 34-46 <https://sai.org.co/wp-content/uploads/2022/12/Revista-SAI.pdf>

Huat B.B.K., Ali F.H.J., Low T.H. (2006). Water infiltration characteristics of unsaturated soil

slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering* 24. Pág. 1293-1306. DOI <https://doi.org/10.1007/s10706-005-1881-8>

- Hutchinson, J. N. (1988). General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides (C. Bonnard, ed.), 1: 3-35. Balkema: Rotterdam.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0)
- Iiritano, G., Versace, P., Sirangelo, B. (1998). Real-time estimation of hazard for landslides Triggered by rainfall. *Environmental Geology* 35 (2-3). Pág. 175-183.
<https://doi.org/10.1007/s002540050303>
- Jaiswal, P., & van Westen, C. J. (2009). Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. Geological Survey of India, Bandlaguda, Hyderabad, Andhara Pradesh, India, & International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Hengelosestraat 99, 7500 AA, Enschede, The Netherlands.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.008>
- Kashiwaya, K., Okimura, T., Kawatani, T.(1987). Critical precipitation conditions for landslide and tree ring responses in the Rokko Mountains, Kyoto, Japan». international Union of Geodesy and Geophysics (IUGO) Union Geodesique et Geophysique Internationale (UGOL); XIX general assembly; abstracts. International Union of Geodesyand Geophysics, General Assembly, 19 (Vol. 3). p.915.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132938322>
- Li A.G., Yue L.G., Tham L.G., Lee C.F., Law K.T. (2005). Fieldmonitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. *Canadian Geotechnical Journal* 42. Pág. 13-26.
<https://www.ingentaconnect.com/content/cndscipub/cgj/2005/00000042/00000001/art00002>

-
- Lida, T. (1999). A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm. *Catena* 34. Pág. 293-313. <https://doi.org/10.1016/S0341-8162%2898%2900093-9>
- Lumb, P. (1975). Slope Failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 8, 31-65. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129498444>
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control of shallow landsliding. *Water Resource Research* 30. Pág. 1153-1171. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>
- Ng C.W.W., Shi Q. (1998). A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. *Computers and Geotechnics*, Vol. 22, No. 1. Pág. 1-28. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1998.031.P2.04>
- PAZ, Cristina. TORRES, Adriana. (1989). Precipitación y su influencia sobre algunos Deslizamientos ocurridos en las laderas del valle de aburra. Ing. Civil. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Ca 174 p http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200001
- Pellenq J., Kalma J., Boulet G. Saulnier G.M., Wooldridge S., Kerr Y. Chehbouni A. (2003). A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth. *Journal of Hydrology* 276. Pág. 112-127 [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00066-0)
- Quinn P., Beven K., Chevalier P., Planchon O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes* 5. Pág. 59-79 <https://doi.org/10.1002/HYP.3360050106>

Reid, E.M. (1997). Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(8), 717-725.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:8\(717\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:8(717))

Rosso, R. Rulli, M. C., Vannucchi, G. (2006). A physically based model for the hydrologic control on

shallow landsliding. Water Resources Research 42- Pág. 16.

<https://re.public.polimi.it/handle/11311/522139>

Segoni S, Rossi G, Catani F (2012) Improving basin-scale shallow landslides modelling using

reliable soil thickness maps. Nat Hazards 61(1):85–101

<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9770-3>

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por

movimientos en masa escala 1:25,000. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>

SCHEIDEGGER, A. E. (1998). Tectonic predesign of mass movements, with examples from the

Chinese Himalaya. Geomorphology 26, 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00050-6)

Sidle R.C., Ochiai H. (2006). Landslides: processes, prediction, and land use. Water Resources

Monograph 18. American Geophysical Union, Washington D.C

<https://doi.org/10.1029/WM018>

-
- Talebi, A., Troch, P., A., Uijlenhoet, R. (2008). A steady-state analytical stability model for complex hillslopes. *Hydrological Processes* Volume 22 Issue 4. pág. 546-553.
https://www.accefyn.com/revista/Vol_34/131/209-227.pdf
- Talebi, A., Troch, P., A., Uijlenhoet, R. (2008). A steady-state analytical stability model for complex hillslopes. *Hydrological Processes* Volume 22 Issue 4. pág. 546-553
<https://doi.org/10.1002/esp.1648>
- Terlien, M. T. J. (1996). Hydrological landslide triggering in ash-covered slopes of Manizales(Colombia).[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00022-6)
- Van Asch, Th. W. J., Hendriks, M. R., Hessel, R., and Rappange, F. E.(1996). Hydrological Triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps, *Eng. Geol.*, 42, 239–251, 11042 <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:140146657>
- Van Westen, C.J., Van Duren, I, Kruse, H.M.G. and Terlien, M.T.J.(1993). GISSIZ: training package for Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation. ITC-Publication Number 15, ITC, Enschede, The Netherlands, Volume 1: Theory, 245 pp. Volume 2: Exercises, 359 pp. <https://research.utwente.nl/en/publications/gissiz-training-package-for-geographic-information-systems-in-slo>
- Wang, G., Sassa, K. (2003). Pore pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine particle content. *Engineering Geology* Vol. 69, Pág. 109-125
[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00268-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00268-5)

Wang, F.; Shibata, H. (2007). Influence of soil permeability on rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1128-1136.
<https://doi.org/10.1139/T07-042>

Wieczorek, G.F. Morgan B.A., Campbell, R.H. (2000). Debrisflow hazards in the Blue Ridge of Central Virginia, *Environ. Eng. Geosci.*, 6 (1). Pág. 3-23.
<https://doi.org/10.2113/gseegeosci.6.1.3>

11. ANEXOS

11.1 Anexo del Cálculo de la Susceptibilidad.

Resultado Mapa de Aspecto.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
Plano	87	15761	26835	2769886	-1	4,14E-03	- 0,562531
N	823	15025	143802	2652919	0	-5,41E-04	0,010464
NE	1844	14004	248826	2547895	0	-3,05E-02	0,298863
E	1601	14247	220083	2576638	2,50E-01	-2,45E-02	0,274318
SE	1702	14146	260746	2535975	0,141416906	-1,57E-02	0,157159
SE	2072	13776	326711	2470010	0,112597965	-1,59E-02	0,128488
SW	2191	13657	396312	2400409	-2,47E-02	4,02E-03	- 0,028702
W	2513	13335	485354	2311367	-9,02E-02	1,80E-02	- 0,108199
NW	2181	13667	504780	2291941	-2,71E-01	5,10E-02	- 0,322169
N	813	15035	183293	2613428	-2,45E-01	1,51E-02	- 0,260073

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de Aspecto.

Los resultados en el mapa de aspecto indican que no hay una correlación clara entre los movimientos en masa con cada una de estas categorías, lo que significa que este factor condicionante no incide a la generación de movimientos en masa.

Categoría	Total pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pixeles en Movimiento
Plano	26922	4212965,04	0,96	87	0,55
N	144625	22632050,7	5,14	823	5,20
NE	250670	39226801,38	8,91	1844	11,65
E	221684	34690845,48	7,88	1601	10,12
SE	262448	41069914,9	9,33	1702	10,75
SE	328783	51450534,32	11,69	2072	13,09
SW	398503	62360865	14,17	2191	13,84
W	487867	76345242,38	17,35	2513	15,88
NW	506961	79333220,78	18,02	2181	13,78
N	184106	28810346,25	6,55	813	5,14
Total	2812569,00	440132786,23	100,00	15827,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Aspecto

Resultados mapa Curvaturas de Perfil.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
Superficie Convexa	6764	9084	118939 9	161084 1	0,0048281 1	-3.58E+03	0,0084080 7
Superficie Lineal	2554	13294	484095	231614 5	0,0702033 1	1.41E+04	0,0842737 7
Superficie Cóncava	6513	9335	112676 3	167347 7	0,0211130 8	-1.45E+04	0,0355839 8

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de Curvatura Perfil.

Para el caso de la curvatura de perfil, tampoco parece ser un factor condicionante que propicie a la generación de movimientos en masa, puesto que los valores de WF son muy cercanos a 0.

Categoría	Total píxeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Píxeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
Superficie Convexa	1196163	187184937,9	42,48	6764	42,73
Superficie Lineal	486649	76154640,17	17,28	2554	16,13
Superficie Cóncava	1133276	177343888,5	40,24	6513	41,14
Total	2816088,00	440683466,56	100,00	15831,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Curvatura de Perfil

Resultados mapa Curvaturas Tangencial.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
Superficie Cóncava	7570	8278	1131295	1668945	0,167492	1.32E+03	0,29942037
Superficie Lineal	2094	13754	472368	2327872	0,244265	4.30E+02	0,28730210
Superficie Convexa	6167	9681	1196594	1603646	0,093605	6.45E+02	0,15815211

Nota. resumen informe píxeles y resultados estadísticos de Curvatura Tangencial.

En este resultado de curvatura Tangencial, tampoco se aprecia un valor significativo asociado a posible generador ante movimientos en masa, ni se trata de un factor que realmente estabilice el terreno.

Categoría	Total pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
Superficie Cóncava	1138865	178218498,9	40,44	7570	47,82
Superficie Lineal	474462	74247523,13	16,85	2094	13,23
Superficie Convexa	1202761	188217444,5	42,71	6167	38,96
Total	2816088,00	440683466,56	100,00	15831,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Curvatura

Tangencial.

Resultados Mapa Dirección de Flujo.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
N	3913	11935	731530	2068710	0	1.92E+01	-7.56E+01
NE	23	15825	11972	2788268	-1	2.83E+00	-1.08E+03
E	3943	11905	756562	2043678	0	2.89E+01	-1.11E+02
SE	14	15834	12155	2788085	-1,59E+00	3.47E+00	-1.60E+03
SE	3814	12034	582531	2217709	0,145713202	-4.21E+01	1.88E+02
SW	21	15827	11043	2789197	-1,090,612,487	2.63E+00	-1.09E+03
W	4088	11760	682645	2117595	5,65E-02	-1.89E+01	7.54E+01
NW	15	15833	11819	2788421	-1,494,996,387	3.28E+00	-1.50E+03

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de dirección de Flujo.

En el resultado de la dirección de flujo indican categorías que están asociadas a generación de movimientos en masa como en dirección W y SE, puede deberse a una condición del plano que pueda facilitar los procesos morfodinámicos o erosivos, sin embargo, también hay categorías que están asociadas a una ausencia de movimientos en masa como principalmente en dirección Norte, probablemente se debe a una disposición del plano que favorece al factor de seguridad de los taludes.

Categoría	Total, pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
N	735443	115087870,4	26,12	3913	24,72
NE	11995	1,877,071,379	0,43	23	0,15
E	760505	119009768,1	27,01	3943	24,91
SE	12169	1,904,300,259	0,43	14	0,09
SE	586345	91755849,74	20,82	3814	24,09
SW	11064	1731381,22	0,39	21	0,13
W	686733	107465348,8	24,39	4088	25,82
NW	11834	1851876,84	0,42	15	0,09
Total	2816088,00	440683466,86	100,00	15831,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Dirección de Flujo

Resultado Irregularidad del Terreno.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
BAJO	2227	13621	528862	2269241	0,2964185	5.81E+01	0,354484
MEDIO	10724	5124	1702037	1096066	0,1065568	-1.92E+02	0,298450
ALTO	2878	12970	567223	2230880	0,1100033	2.61E+01	0,136145

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de Irregularidad del Terreno

En la irregularidad del terreno no se definió una correlación directa con la generación de movimientos en masa en ninguna de sus categorías, sin embargo no quiere decir que no se puedan generar movimientos en masa, solo que no se tiene una correlación directa.

Categoría	Total, pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
BAJO	531089	83108958,86	18,87	2227	14,07
MEDIO	1712761	268026231,9	60,87	10724	67,75
ALTO	570101	89213861,62	20,26	2878	18,18
Total	2813951,00	440349052,39	100,00	15829,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Irregularidad del Terreno

Resultado Mapa Distancia a Fallas Geológicas.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
25 m	183	15665	43137	464836	-2	7,71E-02	-2,072,394
75 m	373	15475	81562	426411	-2	1,51E-01	-2,071,362
150 m	620	15228	116192	391781	-2	0,21981782	-1,985,713
350 m	1168	14680	280586	227387	2,01E+00	7,27E-01	-2,741,420

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de distancia a Fallas

En este resultado de distancia a fallas, no se identificaron como factores susceptibles a generar movimientos en masa, sino que en cambio informa que poco se generar movimientos en masa, probablemente se debe a que no hay una cartografía lo suficientemente detallada para este estudio, ya que bajo ninguna condición geológica la actividad tectónica asegura la estabilidad del terreno.

Categoría	Total pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
25 m	43320	6821206,53	8,27	183	7,81
75 m	81935	12901559,5	15,64	373	15,91
150 m	116812	18393323,6	22,30	620	26,45
350 m	281754	44365240,6	53,79	1168	49,83
Total	523821,00	82481330,23	100,00	2344,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Distancia a fallas Geológicas

Resultado Mapa Distancia a Vías.

Categoría	NPiX 1	NPiX 2	NPiX3	NPiX 4	WI+	WI-	WF
10 m	3	15845	67680	407694	-662,287,515	0,15339565	-677,627,081
20 m	160	15688	59656	415718	-252,011,764	0,1239475	-264,406,514
40 m	300	15548	107340	368034	-247,891,562	0,23681524	-271,573,086
100 m	1275	14573	254808	220566	-189,650,559	0,68403208	-258,053,767

Tabla x, resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de distancia a Vías.

Para el caso de distancia a vías, se tiene una red vial relativamente bien cartografiada y basándonos en los resultados indica que si hay una relación directa a ser susceptible de generar movimientos en masa, probablemente el factor antrópico y la implementación de carreteras desestabiliza los taludes adyacentes en conjunto a la constante actividad vial pueden incidir en la generación de movimientos en masa.

Categoría	Total, pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
1000	67683	10657426,6	13,78	3	286
1200	59816	9418681,67	12,18	160	298
1400	107640	16949092,1	21,91	300	587
1600	256083	40323061,7	52,13	1275	1499
Total	491222,00	77348262,09	100,00	1738,00	2670,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Distancia a Vías.

Resultado Mapa Distancia a Drenajes.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
10 m	856	14992	140908	1118684	-1	6,31E-02	-0,791201
25 m	891	14957	138386	1121206	-1	5,85E-02	-0,728477
50 m	1818	14030	270433	989159	-1	0,119842636	-0,746630
100 m	5032	10816	717116	542476	-5,84E-01	4,60E-01	-1,044,303

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de distancia a Drenajes

En el caso de distancia a Drenajes no se encontró una correlación directa ante la generación de movimientos en masa, a pesar de tener una buena cartografía de la red hídrica, los movimientos en masa reportados son ajenos a la distribución hídrica del municipio

Categoría	Total pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
10 m	141764	22322288,15	11,11	856	9,96
25 m	139277	21930682,87	10,92	891	10,36
50 m	272251	42868889,63	21,35	1818	21,15
100 m	722148	113710079,7	56,62	5032	58,53
Total	1275440,00	200831940,35	100,00	8597,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Distancia a Drenajes.

Resultado Mapa Geomorfológico.

Para el resultado de la cartografía geomorfológica se tienen clases o categorías que bien pueden incidir o estar asociadas a la presencia de movimientos en masa, como los identificados por lomas erosionales que precisamente fueron identificados como zonas donde se generan procesos morfodinámicos, sin embargo, hay otras clases que no parecen tener una correlación directa en la presencia de movimientos en masa y otras clases que favorecen la estabilidad del terreno.

Categoría	Total pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaj e Clase	Pixeles Movimient o	Porcentaje Pix / Movimient o
Antrópico	886126	138452251,2	31,63	4721	29,86
CAÑÓN EROSIONAL	253558	39617025,02	9,05	1196	7,56
CAÑÓN EROSIONAL	86403	13499987,43	3,08	274	1,73
CARCAVA EL TABLAZO	791421	123655122,5	28,25	3846	24,32
CERRO EROSIONAL	333046	52036582,22	11,89	3716	23,50
CERRO ESTRUCTURAL	105546	16490974,54	3,77	678	4,29
COLINA EROSIONAL	11362	1,775,249,20 6	0,41	0	0,00
CUCHILLA ESTRUCTURAL	43134	6,739,447,21 6	1,54	0	0,00
ESCARPES	4983	7,785,659,91 4	0,18	0	0,00
Movimiento en Masa	28162	4,400,155,61 9	1,01	0	0,00
LLANURA ALUVIAL	12428	1,941,805,76 8	0,44	6	0,04
LLANURA FLUVIOTORRENCIA L	1693	2,645,218,18 9	0,06	2	0,01
LOMA EROSIONAL	1727	2,698,341,29 5	0,06	1117	7,06
LOMA ESTRUCTURAL	75389	11779111,28	2,69	60	0,38

PALEOVALLE GLACIAL	9251	1,445,417,21 6	0,33	0	0,00
Principal mente fluvial	2405	3,757,678,52 6	0,09	3	0,02
TERRAZAS ALUVIALES	92502	14452922,2	3,30	0	0,00
VERTIENTE EROSIONAL	45205	7,063,029,42 9	1,61	62	0,39
VERTIENTE ESTRUCTURAL	4803	7,504,419,94 2	0,17	49	0,31
VOLCAN TESORITO	12631	1,973,523,38 7	0,45	83	0,52
Total	2801775,0 0	437761736,0 4	100,00	15813,00	100,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa Geomorfológico.

Resultados Unidades Geológicas Superficiales.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
Depositos aluviales	32	15816	24019	274315 0	- 145,832,781	0,0066966 6	- 146,502,44 7
Roca Meteorizada de la secuencia sedimentaria irra-tres puertas	0	15848	122279	264489 0	0	0,0451953	-0,0451953
Depositos fluvio-torrenciales de fonditos	0	15848	938	276623 1	0	0,0003390 3	- 0,00033903
Depositos fluvio-torrenciales de la quebrada llano grande	2	15846	9068	275810 1	- 325,682,309	0,0031561 7	- 325,997,92 6
Depositos aluviales del rio cauca	0	15848	8543	275862 6	0	0,0030920 5	- 0,00309205

Relleno sanitario	0	15848	0	276716 9	0	0	0
Depositos coluviales	8	15840	3338	276383 1	0,87114882	- 0,0007020 9	- 0,87185091
Formacion casabianca	295	15553	18252	274891 7	103,748,216	-0,012172	104,965,41 6
Depositos del cerro sancancio	3	15845	1346	276582 3	0,94374348	- 0,0002972 2	-0,9440407
Gabros de olivares	7	15841	515	276665 4	0,86427999	- 0,0002556 7	0,86453566
Lavas de lucitania	4	15844	327	276684 2	0,75887094	- 0,0001342 5	0,75900519
Flujos de lodo	0	15848	0	276716 9	0	0	0
Suelo residual del stock diorítico gabroide chinchina-santa rosa	0	15848	0	276716 9	0	0	0
Formacion manizales	290	15558	22876	274429 3	0,79457406	- 0,0101670 4	0,8047411
Depositos fluvio-volcanicos	157	15691	13209	275396 0	0,73012886	- 0,0051711 1	0,73529997
Depositos fluvio-torrenciales de la quebrada el rosario	0	15848	2244	276492 5	0	0,0008112 7	- 0,00081127
Depositos aluviales del rio guacaica	0	15848	6264	276090 5	0	0,0022662 5	- 0,00226625
Roca meteoriza del stock diorítico gabroide chinchina-santa rosa	1201	14647	206040	256112 9	0	-1,43E-03	0,019052
Depositos de vertiente	9	15839	1695	276547 4	0	4,47E-05	-0,075721

Roca fresca del complejo quebrada grande	45	15803	6019	276115 0	0	-0,000666	0,267189
Depositos fluvio torrenciales de la quebrada guacas	0	15848	1113	276605 6	0,00E+00	4,02E-04	-0,000402
Roca meteorizada del complejo arquia	158	15690	279339	248783 0	-23,150,496	9,64E-02	-2,411,444
Suelo residual complejo arquia	20	15828	71698	269547 1	-302,194,911	0,0249890 3	-3,046,938
Roca fresca del complejo arquia	31	15817	6481	276068 8	-0,18010615	0,0003868 5	-0,180493
Suelo residual complejo quebrada grande	0	15848	3058	276411 1	0	0,0011057 1	-0,001106
Depositos fluvio-torrenciales	0	15848	7306	275986 3	0	0,0026437 4	-0,002644
Depositos volcano-clasticos	416	15432	41480	272568 9	0,56025534	-0,0114965	0,571752
Roca meteorizada del complejo quebrada grande	3588	12260	283122	248404 7	0,79425379	-1,49E-01	0,943019
Depositos de caida piroclastica	9124	6724	153476 8	123240 1	3,73E-02	-4,85E-02	0,085810
Depositos fluvio-torrenciales del rio chinchina	145	15703	35079	273209 0	-3,26E-01	3,57E-03	-0,329654
Depositos aluviales del rio chinchina	0	15848	8278	275889 1	0,00	0,00	-0,002996
Roca fresca del stock dioritico	98	15750	36497	273067 2	-0,76	0,01	-0,764555

gabroide chinchina- santa rosa Depositos fluvio- torrenciales del rio guacaica	0	15848	12193	275497 6	0,00	0,00	-0,004416
--	---	-------	-------	-------------	------	------	-----------

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de UGS

Para el caso de la cartografía geológica también similar a la geomorfología se encontraron algunas unidades que pueden ser más susceptibles a generar movimientos en masa como la Formación casa Blanca que aflora muy recurrentemente en el municipio de Manizales y otras unidades geológicas que por el contrario por su rigidez posiblemente favorecen a la estabilidad del terreno, en general las formaciones superficiales del cuaternario pueden ser mas susceptibles a presentar movimientos en masa.

Formaciones geológicas antiguas asociadas a rocas ígneas y metamórficas pueden del triásico pueden ser mas resistentes y si no presentan capas poco consolidadas supra yaciendo estas unidades geológicas, pueden favorecer la estabilidad del terreno.

Categoría	Total pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaj e Clase	Pixeles Movimi ento	Porcentaje Pix / Movimiento
Depositos aluviales	24051	3787092,3	0,86	32	0,20
Roca Meteorizada de la secuencia sedimentaria irra- tres puertas	122279	19254162,4	4,39	0	0,00
Depositos fluvio- torrenciales de fonditos	938	147,698,33 2	0,03	0	0,00

Depositos fluvio-torrenciales de la quebrada llano grande	9070	1428170,43	0,33	2	0,01
Depositos aluviales del rio cauca	8543	1345188,54	0,31	0	0,00
Relleno sanitario	0	0	0,00	0	0,00
Depositos coluviales	3346	526,864,19 8	0,12	8	0,05
Formacion casabianca	18547	2920427,46	0,67	295	1,89
Depositos del cerro sancancio	1349	212,414,76 5	0,05	3	0,02
Gabros de olivares	522	821,945,93 9	0,02	7	0,04
Lavas de lucitania	331	521,195,60 5	0,01	4	0,03
Flujos de lodo	0	0	0,00	0	0,00
Suelo residual del stock dioritico gabroide chinchina-santa rosa	0	0	0,00	0	0,00
Formacion manizales	23166	3647739,39	0,83	290	1,86
Depositos fluvio-volcanicos	13366	2104622,49	0,48	157	1,00
Depositos fluvio-torrenciales de la quebrada el rosario	2244	353,342,27 7	0,08	0	0,00
Depositos aluviales del rio guacaica	6264	986,335,12 7	0,23	0	0,00
Roca meteoriza del stock dioritico gabroide chinchina-santa rosa	207241	32632356	7,45	1201	7,68
Depositos de vertiente	1704	268,313,38 7	0,06	9	0,06
Roca fresca del complejo quebrada grande	6064	954,842,94 5	0,22	45	0,29
Depositos fluvio-torrenciales de la quebrada guacas	1113	175253,99	0,04	0	0,00
Roca meteorizada del complejo arquia	279497	44009851,4	10,04	158	1,01
Suelo residual complejo arquia	71718	11292781,4	2,58	20	0,13
Roca fresca del complejo arquia	6512	1025385,43	0,23	31	0,20
Suelo residual complejo quebrada grande	3058	481,515,45 6	0,11	0	0,00

Depositos fluvio-torrenciales	7306	1150409,39	0,26	0	0,00
Depositos volcanoclasticos	41896	6596982,2	1,51	416	2,66
Roca meteorizada del complejo quebradagrande	286710	45145616,9	10,30	3588	22,95
Depositos de caida piroclastica	1543892	243102636	55,48	9124	58,36
Depositos fluvio-torrenciales del rio chinchina	35224	5546403,02	1,27	145	0,93
Depositos aluviales del rio chinchina	8278	1303461,4	0,30	0	0,00
Roca fresca del stock dioritico gabroide chinchina-santa rosa	36595	5762281,92	1,31	98	0,63
Depositos fluvio-torrenciales del rio guacaica	12193	1919920,85	0,44	0	0,00

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de UGS.

Resultado Mapa de Suelos.

Categoría	NPiX1	NPiX2	NPiX3	NPiX4	WI+	WI-	WF
BN	0	15848	7026	2775787	0	2,53E-03	-0,002528
CA	0	15848	1766	2781047	0	6,35E-04	-0,000635
CI	177	15671	239792	2543021	-2	0,0788781	-2,122,081
CL	0	15848	3680	2779133	0,00E+00	1,32E-03	-0,001323
GR	1021	14827	387588	2395225	-0,77098612	8,34E-02	-0,854378
LE	5	15843	248986	2533827	-564,753,978	0,09341593	-5,740,956
LU	2	15846	57961	2724852	-510,620,421	0,02092197	-5,127,126
MA	0	15848	2969	2779844	0	1,07E-03	-0,001067
RC	6885	8963	714253	2068560	5,26E-01	-2,73E-01	0,799611
SI	0	15848	10037	2772776	0,00E+00	3,61E-03	-0,003613
SM	202	15646	85746	2697067	-0,88	0,02	-0,901172
SR	186	15662	175873	2606940	-1,68	0,05	-1,737,076

TH	1467	14381	148251	2634562	0,55	-0,04	0,594877
VI	326	15522	43650	2739163	0,27	0,00	0,276088
ZU	5451	10397	655361	2127452	0,38	-0,15	0,531776

Nota. resumen informe pixeles y resultados estadísticos del mapa de Suelos

En el resultado de suelos en general parecen no tener una relación directa a presentar movimientos en masa posiblemente por los usos que se le pueden dar a estos suelos, donde en algunos casos tienen usos antrópicos y en otros casos en las mismas unidades de suelo pueden ser protegidos por reservas forestales en el municipio, lo que equilibra el resultado estadístico entre presencia y ausencia de movimientos en masa y dando como resultado una pobre correlación de estos.

Categoría	Total pixeles/ Clase	Área (M2)	Porcentaje Clase	Pixeles Movimiento	Porcentaje Pix / Movimiento
BN	7026	1,106,320,338	0,25	0	0,00
CA	1766	2,780,759,632	0,06	0	0,00
CI	239969	37785736,59	8,57	177	1,13
CL	3680	5,794,561,408	0,13	0	0,00
GR	388609	61190725,92	13,89	1021	6,49
LE	248991	39206348,9	8,90	5	0,03
LU	57963	9126906,6	2,07	2	0,01
MA	2969	4,675,014,353	0,11	0	0,00
RC	721138	113551044,1	25,77	6885	43,79
SI	10037	1,580,435,132	0,36	0	0,00
SM	85948	13533450,1	3,07	202	1,28
SR	176059	27722409,97	6,29	186	1,18
TH	149718	23574732,2	5,35	1467	9,33
VI	43976	6,924,500,882	1,57	326	2,07
ZU	660812	104052057,4	23,61	5451	34,67

Total	2798661,00	440679701,73	100,00	15722,00	100,00
--------------	------------	--------------	--------	----------	--------

Nota. resumen informe por áreas y zonas con presencia de MenM del mapa de Suelos.

11.2 Anexo del Código de Programación Para obtener datos de las estaciones

meteorológicas

```
("\\n***** CODIGO PARA LA ADQUISICION DE PRECIPITACION AUTOMATIZADA
DESDE LA WEB PARA FINES ACADEMICOS *****\\n")
```

```
print("DESARROLLADO POR: ANDRES FELIPE OSORIO BASTIDAS")
```

```
print("=====\\n")
```

```
print("SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA")
```

```
print("UNIVERSIDAD DE MANIZALES")
```

```
print("_____")
```

```
print("email: afosorio95781@umanizales.edu.co Whatsapp: 3506037927")
```

```
from selenium.webdriver.common.keys import Keys
```

```
from selenium.webdriver.support.ui import Select
```

```
from selenium.common import TimeoutException
```

```
from selenium.webdriver.common.action_chains import ActionChains
```

```
from pyxlsb import convert_date
```

```
from selenium import webdriver
```

```
from selenium.webdriver.common.by import By
```

```
from selenium.webdriver.support.ui import WebDriverWait
```

```
from selenium.webdriver.support import expected_conditions as EC

import re

import pyxlsb

import os

import time

from openpyxl import Workbook

import psycopg2

#RUTA ESTACIONES

carpeta_xlsb = r'C:\server\code\lista_estaciones'

archivo_salida_xlsb = r'C:\server\code\reportes\reporte_scrapy.xlsx'

# EVALUAR ARCHIVO

for ruta_carpeta, _, archivos in os.walk(carpeta_xlsb):

    for archivo in archivos:

        if archivo.endswith('.xlsb'):

            ruta_exacta = os.path.join(ruta_carpeta, archivo)

# Ruta del archivo xlsb de entrada

archivo_xlsb = ruta_exacta

# Columnas que deseas buscar

columnas_objetivo = ["id_estacio", "nombre_est", "path_estacion"]
```

```
# Inicializar una lista para almacenar los resultados
resultados = []
matriz_datos = []
#=====Iniciar configuracion Navegador /config=====

firefox_options = webdriver.FirefoxOptions()
firefox_options.binary_location = "C:\\Program Files\\Mozilla Firefox\\firefox.exe"

# Crear el controlador de Firefox
driver = webdriver.Firefox(options=firefox_options)
#=====Conectar a SIMAC=====
driver.get("https://cdiac.manizales.unal.edu.co/geoportal-simac/")
time.sleep(10)

# Hacer clic en el botón de Apagar las estaciones
Apagar_Estacion_button = WebDriverWait(driver, 200).until(
    EC.presence_of_element_located(
        (By.XPATH, '/html/body/div/nav/ul/li[5]/a'))
    )
Apagar_Estacion_button.click()
time.sleep(1)

# Hacer clic en el botón de Encender solo estaciones Meteorologicas
Prender_Estacion_button = WebDriverWait(driver, 200).until(
    EC.presence_of_element_located(
        (By.XPATH, '/html/body/div/nav/ul/li[1]/a'))
    )
```

```
)
```

```
Prender_Estacion_button.click()
```

```
time.sleep(2)
```

```
with pyxlsb.open_workbook(archivo_xlsb) as wb:
```

```
    with wb.get_sheet(1) as sheet:
```

```
        # Crear un archivo xlsb de salida
```

```
        salida_wb = Workbook()
```

```
        salida_sheet = salida_wb.active
```

```
        # Agregar una columna "Status" a las columnas objetivo solo para el archivo de salida
```

```
        columnas_objetivo_salida = columnas_objetivo + ["Status"]
```

```
        # Escribir las cabeceras en el archivo de salida
```

```
        salida_sheet.append(columnas_objetivo_salida)
```

```
        # Leer las cabeceras (primeras filas)
```

```
        cabeceras = [item.v for item in next(sheet.rows())]
```

```
        # Encontrar los índices de las columnas de interés en el archivo de entrada
```

```
        indices_columnas = [cabeceras.index(col) for col in columnas_objetivo]
```

```
        # Iterar a través de las filas y recopilar datos
```

```
        contador = 0
```

```
        j = 0
```

```
        for row in sheet.rows():
```

```
j += 1

try:
    fila = [row[i].v for i in indices_columnas]

    if j > 1:
        print("Consultando la Precipitacion de la estacion : ",fila[1],"....")
        buscar_estacion_field = WebDriverWait(driver, 100).until(
            EC.presence_of_element_located(
                (By.CSS_SELECTOR, 'div.leaflet-control-search:nth-child(5) > input:nth-
child(2)'))))
        buscar_estacion_field.clear()
        buscar_estacion_field.send_keys(fila[1])
        time.sleep(2)

        #===== INICIAR BUSQUEDA=====

        busqueda_estacion_button = WebDriverWait(driver,
200).until(EC.presence_of_element_located((By.XPATH,
'/html/body/div/div[3]/div/div[5]/div[1]/div[5]/a[2]')))
        busqueda_estacion_button.click()

    try:
        # Configura el tiempo máximo de espera en segundos
        tiempo_maximo_espera = 12

        #Busqueda de Estaciones
        Matriz_estaciones_button = WebDriverWait(driver, 10).until(
            EC.presence_of_element_located(
```

```
(By.XPATH, fila[2]))
)
Matriz_estaciones_button.click()
time.sleep(5)

# Ir a variables
variables_general_button = WebDriverWait(driver,
tiempo_maximo_espera).until(
    EC.presence_of_element_located(
        (By.XPATH,
'/html/body/div/div[4]/div[2]/div/div[2]/div/div/div[1]/div/div/div/div/div[1]/div[2]'))
)
variables_general_button.click()
time.sleep(1)
# verificar estar en Precipitacion
precipitacion_general_button = WebDriverWait(driver, 200).until(
    EC.presence_of_element_located(
        (By.XPATH,
'/html/body/div/div[4]/div[2]/div/div[2]/div/div/div[3]/div[2]/div[2]/div[2]/div[1]/div/div/div/div
/div[1]/div[1]'))
)
precipitacion_general_button.click()
time.sleep(1)
```

```
#?=====Seccion A 25
```

```
seccion_A25_button = WebDriverWait(driver, 200).until(
```

```
    EC.presence_of_element_located(
```

```
        (By.XPATH,
```

```
        '/html/body/div/div[4]/div[2]/div/div[2]/div/div/div[3]/div[2]/div[2]/div[2]/div[3]/div[1]/div[2]/div/div[1]/div/div/div/div/div[1]/div[3]'))
```

```
    )
```

```
    seccion_A25_button.click()
```

```
    time.sleep(1)
```

```
#=====Obteniendo el Valor A25 A fecha de ultimo momento=====
```

```
texto_element = driver.find_element(By.XPATH,
```

```
        '/html/body/div/div[4]/div[2]/div/div[2]/div/div/div[3]/div[2]/div[2]/div[2]/div[3]/div[1]/div[2]/div/div[3]/div[3]/span[2]')
```

```
        texto_A25_1 = texto_element.text
```

```
        texto_element2 = driver.find_element(By.XPATH,
```

```
        '/html/body/div/div[4]/div[2]/div/div[2]/div/div/div[3]/div[2]/div[2]/div[2]/div[3]/div[1]/div[2]/span[1]')
```

```
        texto_A25_2 = texto_element2.text
```

```
# PASAR DE TEXTO A NUMERICO
```

```
dato1 = texto_A25_1
```

```
dato2 = texto_A25_2
```

```
# Usar una expresión regular para encontrar el número flotante
match1 = re.search(r"\d+\.\d+", dato1)
match2 = re.search(r"\d+\.\d+", dato2)

if match1:
    # Obtener el valor coincidente y convertirlo a float
    valor_A25_1 = float(match1.group())
    #print(valor_A25_1)
else:
    print("No se encontró un valor numérico en el dato.")

if match2:
    # Obtener el valor coincidente y convertirlo a float
    valor_A25_2 = float(match2.group())
    #print(valor_A25_2)
else:
    print("No se encontró un valor numérico en el dato.")

#VALOR A25 LISTO PARA SUBIR A BD redondeado a 2 decimales
data_A25 = valor_A25_1 + valor_A25_2

ppt_A25 = round(data_A25, 2)

print("Precipitacion A25 Actual:", ppt_A25, " mm")
time.sleep(1)
```



```
#Enviar ala BD

conn = psycopg2.connect(
    database="amenaza_db",
    user="postgres",
    password="123",
    host="localhost", # Cambia esto si tu base de datos está en otro servidor
    port="5432"      # Puerto predeterminado de PostgreSQL
)

# Definir la consulta SQL de actualización
sql = "UPDATE tab_lluvia SET a25_acumu_min = %s WHERE fk_estacion =
%s"

# Crear un cursor
cursor = conn.cursor()

# Definir los nuevos valores
nuevo_valor = ppt_A25
fk_estacion = int(fila[0])

# Ejecutar la consulta SQL
cursor.execute(sql, (nuevo_valor, fk_estacion))

# Confirmar los cambios en la base de datos
conn.commit()
```

```
# Cerrar el cursor y la conexión
cursor.close()
conn.close()

#Salir de la subconsulta

salida_subconsulta_button = WebDriverWait(driver, 200).until(
    EC.presence_of_element_located(
        (By.CSS_SELECTOR, '#btn-close-panel')
    )
)
salida_subconsulta_button.click()
time.sleep(1)

#=== CERRAR CONSULTA =====

    cerrar_consulta_button = WebDriverWait(driver,
200).until(EC.presence_of_element_located((By.XPATH,
'/html/body/div/div[3]/div/div[5]/div[1]/div[5]/a[1]/span')))

    cerrar_consulta_button.click()

except Exception as e:

    # Maneja la excepción si la operación no se completa dentro del tiempo máximo

    print(f"La operación no se completó dentro de {tiempo_maximo_espera}
segundos.")

finally:

    # Cierra el navegador cuando hayas terminado
```

```
driver.get("https://cdiac.manizales.unal.edu.co/geoportal-simac/")
time.sleep(1)

# Hacer clic en el botón de Apagar las estaciones
Apagar_Estacion_button = WebDriverWait(driver, 200).until(
    EC.presence_of_element_located(
        (By.XPATH, '/html/body/div/nav/ul/li[5]/a')))
Apagar_Estacion_button.click()
time.sleep(1)

# Hacer clic en el botón de Encender solo estaciones Meteorologicas
Prender_Estacion_button = WebDriverWait(driver,
200).until(EC.presence_of_element_located((By.XPATH, '/html/body/div/nav/ul/li[1]/a')))
Prender_Estacion_button.click()
time.sleep(1)

except Exception as e:
    print(f"Error al procesar fila: {str(e)}")

    # Si se produce un error, agregar "Fallido" como estado en la columna "Status" en el
    archivo de salida

driver.quit()
```

11.3 Anexo del Script Qgis para formar el mapa de isoyetas, normalice la data, recorte los límites de acuerdo a la zona de estudio, realice un algebra de mapas para obtener la amenaza y finalmente sea reclasificada.

11.3.1 Conecta con postgis y crea un mapa de interpolación en una extencion que cubre el municipio

```
processing.run("qgis:idwinterpolation", {'INTERPOLATION_DATA': 'dbname=\amenaza_db\'
port=5432 user=\postgres\' password=\123\' sslmode=allow key=\tid\' estimatedmetadata=true
srid=4326 type=Point checkPrimaryKeyUnicity=\1\' table="public"."tab_lluvia_auxiliar"
(geom)::~::0::~:3::~:0\' \'DISTANCE_COEFFICIENT':2, 'EXTENT': '-75.803735597,-
75.321735597,4.974569367,5.232569367
[EPSG:4326]', 'PIXEL_SIZE':0.0001, 'OUTPUT': 'C:/server/raster/isoyetas/mapa_isoyetas.tif'})
```

11.3.2 normaliza el ráster isoyetas al 100%

```
processing.run("native:reclassifybytable",
{'INPUT_RASTER': 'C:/server/raster/isoyetas/mapa_isoyetas.tif', 'RASTER_BAND': 1, 'TABLE': ['
0','4','1','4','8','2','8','12','3','12','16','4','16','20','5','20','24','6','24','28','7','28','32','8','32','36','9','36','4
0','10','40','44','11','44','48','12','48','52','13','52','56','14','56','60','15','60','64','16','64','68','17','68','7
2','18','72','76','19','76','80','20','80','84','21','84','88','22','88','92','23','92','96','24','96','100','25','100',
'104','26','104','108','27','108','112','28','112','116','29','116','120','30','120','124','31','124','128','32',
'128','132','33','132','136','34','136','140','35','140','144','36','144','148','37','148','152','38','152','156',
'39','156','160','40','160','164','41','164','168','42','168','172','43','172','176','44','176','180','45','180',
'184','46','184','188','47','188','192','48','192','196','49','196','200','50','200','204','51','204','208','52',
'208','212','53','212','216','54','216','220','55','220','224','56','224','228','57','228','232','58','232','236',
'59','236','240','60','240','244','61','244','248','62','248','252','63','252','256','64','256','260','65','260',
'264','66','264','268','67','268','272','68','272','276','69','276','280','70','280','284','71','284','288','72',
'288','292','73','292','296','74','296','300','75','300','304','76','304','308','77','308','312','78','312','316']
```

```
, '79', '316', '320', '80', '320', '324', '81', '324', '328', '82', '328', '332', '83', '332', '336', '84', '336', '340', '85', '340',
'344', '86', '344', '348', '87', '348', '352', '88', '352', '356', '89', '356', '360', '90', '360', '364', '91', '364', '368', '92',
'368', '372', '93', '372', '376', '94', '376', '380', '95', '380', '384', '96', '384', '388', '97', '388', '392', '98', '392', '396',
'99', '396', '400', '100'], 'NO_DATA':-
9999, 'RANGE_BOUNDARIES':2, 'NODATA_FOR_MISSING':False, 'DATA_TYPE':6, 'OUTPUT':
'C:/server/raster/isoyetas_reclass/isoyetas_reclass.tif'})
```

11.3.3 clip isoyetas (recorta el ráster isoyetas con la extensión del municipio o zona de estudio)

```
processing.run("gdal:cliprasterbymasklayer",
{'INPUT':'C:/server/raster/isoyetas_reclass/isoyetas_reclass.tif', 'MASK':'C:/server/shapes/limite_
manizales/limite_manizales4326.shp', 'SOURCE_CRS':None, 'TARGET_CRS':None, 'TARGET_
EXTENT': '-75.678032121, -75.327689161, 4.982233753, 5.166230314
[EPSG:4326]', 'NODATA':None, 'ALPHA_BAND':False, 'CROP_TO_CUTLINE':True, 'KEEP_R
ESOLUTION':False, 'SET_RESOLUTION':False, 'X_RESOLUTION':None, 'Y_RESOLUTION':
None, 'MULTITHREADING':False, 'OPTIONS':'', 'DATA_TYPE':7, 'EXTRA':'', 'OUTPUT':'C:/ser
ver/raster/isoyetas_reclass_clip/isoyetas_reclass_clip.tif'})
```

11.3.4 mapa ponderado de amenaza (suma isoyeta + susceptibilidad)

```
processing.run("gdal:rastercalculator", {'INPUT_A':'C:/Users/osori/Desktop/test/DEFINITIVO_2
/Mapa_suceptibilidad_reclass_clip.tif', 'BAND_A':1, 'INPUT_B':'C:/server/raster/isoyetas_reclass
_clip/isoyetas_reclass_clip.tif', 'BAND_B':1, 'INPUT_C':None, 'BAND_C':None, 'INPUT_D':None
, 'BAND_D':None, 'INPUT_E':None, 'BAND_E':None, 'INPUT_F':None, 'BAND_F':None, 'FORM
ULA': '(A + (B*(A/100)))', 'NO_DATA':None, 'EXTENT_OPT':0, 'PROJWIN': '-75.678032121, -
75.327689161, 4.982233753, 5.166230314
[EPSG:4326]', 'RTYPE':5, 'OPTIONS':'', 'EXTRA':'', 'OUTPUT':'C:/server/raster/amenaza/Mapa_A
menaza.tif'})
```

11.3.5 reclasificar mapa amenaza en niveles de amenaza clasificados del 1 al 5.

```
processing.run("native:reclassifybytable",
{'INPUT_RASTER':'C:/server/raster/amenaza/Mapa_Amenaza.tif','RASTER_BAND':1,'TABLE
':[-100,'25','1','25','50','2','50','75','3','75','100','4','100','200','5'],'NO_DATA':-
9999,'RANGE_BOUNDARIES':0,'NODATA_FOR_MISSING':False,'DATA_TYPE':5,'OUTPU
T':'C:/server/raster/amenaza_reclass/amenaza_reclass.tif'})
```