ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS COMO FACTOR DETONANTE PARA LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE CABAL - RISARALDA

MONICA ALZATE LLANO

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

MANIZALES, 2015

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS COMO FACTOR DETONANTE PARA LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE CABAL - RISARALDA

MONICA ALZATE LLANO

Proyecto presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

MANIZALES, 2015

CONTENIDO

1 AREA PROBLEMÁTICA 1
2 OBJETIVOS 3
2.1 OBJETIVO GENERAL 3
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 3
3 JUSTIFICACION 4
4 LOCALIZACION 6
5 METODOLOGIA 7
5.1 RECOPILACION Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 7
5.2 ESTRUCTURACIÓN DE LAS BASES DE DATOS 7
5.3 DIGITALIZACIÓN DE LA INFORMACION 8
5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS 8
6 ANTECEDENTES 9
7 AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA 12
7.1 Calculo del Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa. 13
7.1.1 Pendientes 15
7.1.2 Unidades Litológicas 15
7.1.3 Suelos 16
7.1.4 Uso y Cobertura 17
7.1.5 Geomorfología 18
7.1.6 Fallas 19
7.2 Detonante por Precipitaciones Máximas. 21
8 CLASIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA 36
8.1 Cálculo del mapa de amenaza por movimientos en masa mediante Raster 37
9 Conclusiones y Recomendaciones 42
Bibliografía 46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN ZONA DE INTERÉS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 6

FIGURA 2. ESQUEMA QUE MUESTRA LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTA SIG, EN EL ANÁLISIS HEURÍSTICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA. TOMADO Y ADAPTADO DE VAN WESTEN (2003).....14

FIGURA 3. MAPA DE PENDIENTES (ÁREA LOCAL DE EJEMPLO) E INVENTARIOS DE PENDIENTES Y VALORES DE PESO ASIGNADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 15

FIGURA 4. MAPA DE UNIDADES LITOLÓGICAS (ÁREA LOCAL DE EJEMPLO) Y VALORES PESO ASIGNADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....16

FIGURA 5. MAPA DE UNIDADES DE SUELOS (ÁREA LOCAL DE EJEMPLO) Y VALORES DE PESO ASIGNADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....17

FIGURA 6. MAPA DE USOS DEL SUELOS Y COBERTURA VEGETAL (ÁREA LOCAL DE EJEMPLO) Y VALORES DE PESOS ASIGNADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....18

FIGURA 7. MAPA DE VARIABLES GEOMORFOLÓGICAS CON SUS CONDICIONANTES (ÁREA LOCAL DE EJEMPLO) Y VALORES DE PESO ASIGNADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 18

FIGURA 8. MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS (ÁREA LOCAL DE EJEMPLO) Y VALORES DE PEOS ASIGNADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....19

FIGURA 9. FLUJOGRAMA DEL PROCESO METODOLÓGICO UTILIZADO PARA OBTENER EL MAPA DE AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA, MEDIANTE EL USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....20

FIGURA 10. MAPA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS PROMEDIO EN 24 HORAS, CON UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA EL ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....23

FIGURA 11. TABLA CON LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DE LA ESTACIÓN LA HERMOSA, PARA LOS AÑOS DE REGISTRO DE 1987 A 2012. 24

FIGURA 12. TABLA PARA EL CÁLCULO DE PROBABILIDAD POR GUMBEL, CALCULO DE LAS VARIABLES PROBABILÍSTICAS Y DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS PROBABLES PARA DISTINTAS FRECUENCIAS. 25

FIGURA 13. TABLA PARA EL CÁLCULO DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS POR TIEMPOS DE DURACIÓN. 25

FIGURA 14. TABLA CON LA INFORMACIÓN COMPILADA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS, CON DATOS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS PROMEDIO. 26

FIGURA 15. DIAGRAMA DE FLUJO DE KRIGING. TOMADO DE ANÁLISIS GEO-ESTADÍSTICO Y DE EXPOSICIÓN SOLAR. POR XANDER BAKKER. 2002, BÓGOTA. 27

FIGURA 16. SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA PREDICCIÓN POR KRIGING ORDINARIO A. SELECCIÓN MÉTODO KRIGING Y LOS DATOS A ANALIZAR B. SELECCIÓN DEL TIPO DE KRIGING A UTILIZAR (KRIGING ORDINARIO) C. ELECCIÓN DEL TIPO DE GEOMETRÍA A ANALIZAR (ESFÉRICA) Y DE LA ANISOTROPÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 28

FIGURA 17. BÚSQUEDA DE LA VECINDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 29

FIGURA 18. RESUMEN ESTADÍSTICO. PARA OBTENER LA VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE PREDICCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 30

FIGURA 19. MAPA RESULTANTE DEL ANÁLISIS DEL DETONANTE POR PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA EL CÁLCULO Y ESTUDIO DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE CABAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 32

FIGURA 20. MAPA DE PRECIPITACIÓN MEDIA MULTIANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA LOS REGISTROS TOTALES. TOMADO DE LA CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE AGUAS Y AGUAS DE PEREIRA AGOSTO 2014. 34

FIGURA 21. MAPA DE ISOYETAS. TOMADO DE BASE AMBIENTAL CON ÉNFASIS EN RIESGOS DEL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE CABAL, AÑO 2000. 35

FIGURA 22. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE CABAL 39

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CALIFICACIÓN, VALORES DE PESO Y COLORES REFERENTES PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS FACTORES QUE HACEN PARTE DEL CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD. 14

TABLA 2.ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CON VALORES DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24H. 22

TABLA 3. VALORES Y PESOS ASIGNADOS AL PARÁMETRO DETONANTE POR PRECIPITACIÓN .31

TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA..... 36

TABLA 5.TOTAL DE HECTÁREAS BAJO AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA..... 37

GLOSARIO

Para un mejor desarrollo y conceptualización de este proyecto, se hace necesario describir de manera clara y concisa los términos empleados en este texto, con el fin de que el escrito sea más fácil de comprender.

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Movimientos en Masa: Incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, detritos o de tierras por efectos de la gravedad. (Servicio Geológico 2015)

Susceptibilidad: La susceptibilidad del suelo a los movimientos de ladera (S), se define como la favorabilidad del ambiente físico y de los elementos inherentes de las masas de terreno y superficie como la geología, pendiente, geomorfología, usos del suelo, etc., a la ocurrencia de deslizamientos. Indica la predisposición del terreno a deslizarse pero no implica el aspecto temporal del mismo. (Fell et. al., 2008).

Detonante: es la acción de inicio o disparo del fenómeno del movimiento de ladera, que normalmente se identifica con fuertes lluvias o con terremotos. (PMA – GCA, 2007).

Amenaza: se define como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área específica. Implica por tanto, localizar las áreas inestables y las potencialmente inestables. La amenaza se expresa como función de la susceptibilidad del terreno a deslizarse y el detonante. (Fell et. al., 2008).

Vulnerabilidad: Se define como la predisposición que tiene un elemento u objeto a ser afectado. (Fell et. al., 2008).

Riesgo: se obtiene al relacionar la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento de ladera, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. (Fell et. al., 2008).

Precipitación: Es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve,

granizo. (WMO, 1986).

Precipitaciones máximas: Se definen como la mayor cantidad de precipitación meteorológicamente posible correspondiente a una determinada duración, en una ubicación geográfica particular. (WMO, 1986).

Valores de Peso: Los pesos son indicadores de la importancia que se atribuye a cada uno de los criterios o alternativas. Se determina analíticamente el peso relativo de cada factor con respecto a los demás, usando para ello el método de evaluación multicriterio de las jerarquías analíticas (Saaty, 1980, 1994; Eastman et al., 1995) que ofrece la oportunidad de obtener un análisis equilibrado de todos los aspectos. Los valores de peso se usan en la modelación por el método heurístico.

Método Heurístico: Es un conjunto de pasos que deben realizarse para identificar en el menor tiempo posible una solución de alta calidad para un determinado problema; se basa en la utilización de reglas empíricas para llegar a una solución. El método heurístico conocido como "IDEAL", fue formulado por Bransford y Stein (1984). Como disciplina científica, la heurística es aplicable a cualquier ciencia e incluye la elaboración de medios auxiliares, principios, reglas, estrategias y programas que faciliten la búsqueda de vías de solución a problemas; o sea, para resolver tareas de cualquier tipo para las que no se cuente con un procedimiento algorítmico de solución.

ANALISIS GEOESTADISTICO

Probabilidad de Gumbel: En teoría de probabilidad y estadística la distribución de Gumbel (llamada así en honor de Emil Julius Gumbel (1891-1966)) es utilizada para modelar la distribución del máximo (o el mínimo), por lo que se usa para calcular valores extremos. (El Caudal Mínimo Medioambiental del Tramo inferior del Río Ebro, 2009). La distribución de Gumbel ha sido utilizada con buenos resultados para valores extremos independientes de variables meteorológicas y parece ajustarse bastante bien a los valores máximos de la precipitación en diferentes intervalos de tiempo y después de muchos años de uso parece también confirmarse su utilidad en los problemas prácticos de ingeniería de dimensionamiento de redes de drenaje y diversas obras hidráulicas. En nuestro trabajo, se ha empleado para el estudio de los períodos de retorno de las precipitaciones máximas registradas en 24 horas.

Tiempo de Retorno: Concepto estadístico que intenta proporcionar una idea de hasta qué punto un suceso puede considerarse raro. Suele calcularse mediante distribuciones de variables extrémales, sobre la base de series de valores extremos registrados dentro de periodos iguales y consecutivos; por ejemplo, en hidrología, se realiza el estudio a partir de tablas con la precipitación máxima recogida en 24 horas en un año, durante una serie de años consecutivos. (El Caudal Mínimo

Medioambiental del Tramo inferior del Río Ebro, 2009).

Geoestadística: La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel & Huijbregts, 1978). Su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Myers, 1987). Esta herramienta ofrece una manera de describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks & Srivastava, 1989). (Introducción a la Geoestadistica, Universidad Nacional de Colombia)

Técnicas de interpolación geoestadísticas: El objetivo de las técnicas de interpolación geoestadísticas es generar superficies que incorporen las propiedades estadísticas de los datos muéstrales y que proporcionen una medida del error de las mismas, siendo este último un indicador de una buena o mala predicción. Todos los métodos geoestadísticos forman parte de la familia Kriging.

- **Kriging Ordinario:** En este se asume que la variable es estacionaria y que no tiene tendencia.

- **Kriging Simple:** Es similar al Kriging Ordinario, salvo que considera la media de los datos una constante conocida y que la suma de los pesos no da 1.

- **Kriging Universal:** Se utiliza cuando existe una tendencia de los datos o un lento cambio en los valores medios, y los errores se suponen estacionarios. (R.M. Cañada Torrecilla).

RESUMEN

Factores como la lluvia pueden modificar las condiciones de estabilidad de una ladera, ya que a mayor valor de lluvia máxima diaria, mayor saturación y por ende, mayor probabilidad de que se generen procesos de inestabilidad en las laderas. En este proyecto para el análisis de la amenaza se utilizó la metodología desarrollada por el Servicio Geológico de Colombia (SGC), en el año 2013, para determinar la Susceptibilidad por movimientos en masa de la Plancha 208, Honda – Dorada, a escala 1:100.000. Usando como factor detonante considerado para el análisis de la amenaza de los movimientos en masa para el municipio de Santa Rosa de Cabal, las lluvias.

Para el análisis del detonante se tomó la información de las precipitaciones máximas mensuales en 28 estaciones meteorológicas distribuidas principalmente en el municipio de Santa Rosa de Cabal y otras tantas de los municipios aledaños. El estudio del detonante por precipitaciones se desarrolló a través de un análisis geoestadistico, donde primero se calcula la distribución de probabilidad mediante el Método de Gumbel que incluye variables probabilísticas como la media, la desviación estándar y la probabilidad de ocurrencia, esto para calcular el periodo de retorno en 100 años. La información obtenida para cada estación es llevada al Software ArcGis con su extensión Geostatistical Wizard donde se calcula un modelo por medio de la interpolación de datos de precipitaciones máximas usando el método Kriging Ordinario, obteniendo como resultado el mapa de probabilidades de precipitaciones máximas, que sumado al mapa de susceptibilidad a movimientos en masa (tomado del Documento Técnico soporte del Plan de Ordenamiento Territorial de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, de Santa Rosa de Cabal) permite generar el mapa de amenaza por movimientos de masa para lluvias con un periodo de retorno de 100 años para el municipio de Santa Rosa de Cabal.

PALABRAS CLAVES: Detonante, Amenaza, Precipitaciones, Geoestadistica, Movimientos en masa.

ABSTRACT

The detonating factor considered for the analysis of the threat of landslide for the municipality of Santa Rosa de Cabal are the rainfalls, factors such as rain can modify the stability conditions of the slope, since the higher value of maximum daily rainfall, more saturated as a consequence more probability of generated instability processes on the slopes. For this analysis of the risk was utilized the methodology developed by Geological Survey of Colombia (SGC), in 2013, for determination of the susceptibility to landslides in the map 208, Honda-Dorada, scale 1:100 000.

For the analysis of the detonating was taken the information from monthly maximum rainfall in 28 meteorological stations distributed mainly in the municipality of Santa Rosa de Cabal and the others ones from neighboring municipalities. The study of rainfall detonating was developed through geo-statics analysis, where first is calculated the probability distribution by the method of Gumbel including probabilistic variables such as the mean, standard deviation and the probability of occurrence, that for calculate the period return to 100 years. The information obtained for each station is carried to Software ArcGIS extension Geo-statistical Wizard where a model is calculated by interpolation of data maximum precipitation using the Kriging Ordinary method, as result the probability map of maximum precipitation, which added to map susceptibility to landslides (taken from the technical document support of the POT of susceptibility by landslides, Santa Rosa de Cabal) the hazard map is produced by landslides for the municipality of Santa Rosa de Cabal.

KEY WORDS: Detonating, Hazard, Rainfall, Geo-statics, Landslides

INTRODUCCION

La amenaza por movimientos en masa de una ladera, entendida como un evento natural, humano o combinado, potencialmente destructivo de vidas, bienes, economía y/o cultura de una comunidad (Servicio Geológico Colombiano, 2006), involucra en su evaluación el conocimiento claro del tipo de movimiento en masa, así como estimativos de su magnitud, recurrencia y localización geográfica. Dadas ciertas condiciones de susceptibilidad del terreno, la ocurrencia de ciertos eventos denominados detonantes tales como la actividad sísmica, la intervención humana, procesos erosivos y lluvias de alta intensidad, pueden generar el desarrollo de movimientos en masa definiendo su potencial a la ocurrencia de dichos eventos. Para el presente estudio el detonante utilizado en la generación de los mapas de amenazas por movimientos en masa es la lluvia máxima. La precipitación media anual y la temperatura media anual influyen en el contenido de humedad del suelo, es decir, en zonas en donde la precipitación media anual sea alta y la temperatura media anual sea baja, la humedad del suelo será mayor, lo cual contribuiría en mayor medida a la generación de movimientos en masa.

La cantidad de lluvia que recibe la Republica de Colombia, depende fundamentalmente de los aspectos físicos característicos que influyen en el clima, la latitud del lugar, el relieve, la extensión del continente y las corrientes marinas. El clima interviene tanto en los procesos condicionantes como en los desencadenantes de los deslizamientos, es la causa principal del intemperismo de las rocas que originan la formación de suelos residuales, además de brindar los elementos para que actúen los agentes de la erosión, principalmente el agua.

En la elaboración de los mapas de amenaza, se emplean técnicas automáticas tanto en la integración como en la gestión de la información espacial como el tratamiento estadístico y la implementación de resultados, el cual se realiza en la plataforma SIG, a partir de datos cartográficos de tipo topográfico, geomorfológico, litológico, estructural, coberturas de la tierra y de suelos. Los mapas de zonificación de amenazas por

movimientos en masa a nivel nacional son importantes como insumo en la toma de decisiones sobre políticas nacionales para la gestión y reducción del riesgo.

1 AREA PROBLEMÁTICA

A lo largo de la historia, los seres humanos se han visto afectados por una serie de fenómenos naturales que han cambiado su entorno, siendo los movimientos en masa uno de los eventos más comunes; es por ello, que la prevención del riesgo de la población es de suma importancia; el estudio de este, permite identificar las zonas de mayor riesgo para la población y de esta manera evitar grandes desastres. Los movimientos en masa pueden ser inducidos por diversas causas, que actúan como factores detonantes. Los más frecuentes son las fuertes lluvias y los terremotos.

La zona Andina Colombiana y específicamente la región cafetera, es un territorio rico en fuentes hídricas y topografía quebrada, donde es fácil encontrar alturas como la del Municipio de La Virginia en Risaralda, a 500 m.s.n.m, hasta cumbres nevadas a 5300 m.s.n.m en el Nevado del Ruiz dentro del Parque Natural Nacional de los Nevados; donde los promedios de precipitación anuales alcanzan niveles muy altos. El municipio de Santa Rosa de Cabal presenta gran variedad y riqueza de fuentes hídricas superficiales destacándose las cuencas del Río Otún, Campoalegre y San Francisco además de las sub-cuencas del Río San Eugenio y Campoalegrito. El escenario anterior ofrece peculiaridades de tipo geomorfológico y meteorológico que han desencadenado deslizamientos de laderas, los cuales han causado considerables daños económicos.

Santa Rosa de Cabal está localizada al sur oriente del Departamento de Risaralda en las coordenadas 4 grados 52 minutos latitud norte y 75 grados 37 minutos de longitud oeste, su cabecera municipal se encuentra a 1840 metros sobre el nivel del mar y a una distancia de 15 kilómetros de Pereira. En el Municipio encontramos un clima templado de montaña, con una temperatura promedio de 19°C, la precipitación media anual de 2931 mm, Los deslizamientos están asociados con mayor frecuencia a zonas con clima cálido húmedo y semihúmedo, en segundo término a zonas templadas y, finalmente a las zonas áridas. (Diagnostico Plan Integral, 1982).

A mayor contenido de humedad antecedente en el suelo y mayor valor de lluvia máxima diaria, se incrementa la probabilidad de generarse movimientos en masa, por eso para este estudio se analizaran las precipitaciones máximas mensuales y en 24h (horas) en 28 estaciones Hidrológicas ubicadas en su mayoría dentro del Municipio y otras ubicadas en municipios limítrofes; Usando el SIG como herramienta de procesamiento de la información que buscará desarrollar un modelo cartográfico que permitirá determinar las zonas de alto riesgo a presentar movimientos en masa según sus características evaluadas y así emitir una alerta temprana que ayudará a la toma de decisiones principalmente en temporadas de lluvias.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar las precipitaciones máximas como detonante en la evaluación y creación del mapa de amenaza por movimientos en masa del territorio que integra el municipio de Santa Rosa de Cabal, departamento de Risaralda.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar las precipitaciones de las estaciones pluviométricas localizadas en Santa Rosa de Cabal y sus municipios vecinos.

- Establecer las máximas, el promedio y el tiempo de retorno de precipitaciones, según metodología de Gumbel, de cada una de las estaciones pluviométricas.

- Desarrollar un Modelo Geoestadístico, que permita la clasificación por pesos de las precipitaciones máximas, manejando la información por medio del sistema de información geográfica, utilizando el software ArcGis10.2, y su extensión de Geostatistical Wizard.

- Elaborar el mapa de amenaza por movimiento en masa, a través de valores tanto del mapa de susceptibilidad como del mapa del factor detonante por las precipitaciones máximas, usando ArcGis10.2.

3 JUSTIFICACION

En el estudio de los movimientos de masa es de primordial importancia el reconocimiento de los factores que condicionan la estabilidad de las laderas y aquellos que los desencadenan.

Con el fin de entender adecuadamente las causas y desarrollo de la inestabilidad se diferencias 3 factores, los primeros intrínsecos, suelen ser naturales y se relacionan con las aguas subterráneas, tipo de materiales, tectónica, con la topografía abrupta, etc. los segundos son factores Contribuyentes que afectan de alguna manera las propiedades intrínsecas del sistema o que agravan el factor detonante del evento. Por ejemplo la remoción del soporte (natural o artificial), la sobrecargas (construcciones, saturación, deposiciones) los terceros son los factores Detonantes, son aquellos que inician el movimiento y la ladera llega a ser inestable como las lluvias intensas, sacudidas sísmicas. (Manual de Geología para ingenieros, Universidad Nacional de Colombia.

De todos los parámetros climáticos el más importante, es la precipitación, ya que es el principal contribuyente a la inestabilidad. Esta puede tener lugar por aumento de la presión de los poros, lo que reduce la resistencia del material por hidratación de arcillas, peso del material saturado y, como agente de meteorización. El agua que penetra en el regolito satura los poros, el aumento de la presión de agua de los poros producen un cambio de consistencia, que a su vez disminuye la cohesión y la fricción interna, lo que facilita los movimientos de deslizamiento, sobre todo en arenas finas y limosas.

Con frecuencia, las fuertes precipitaciones dan lugar a deslizamientos e inundaciones de carácter catastrófico, como por ejemplo el registrado el 17 de noviembre de 2010 en Santa Rosa de Cabal donde se presentó un deslizamiento que cayó sobre una vivienda dejando una persona muerta y una más herida, este movimiento en masa se presentó en épocas de precipitaciones máximas.

Con el fin de minimizar estos acontecimientos se hace necesario el desarrollo de un modelo de Riesgo por Movimientos en Masa para el cual el mapa de amenazas es el insumo base, siendo de vital importancia el énfasis sobre el estudio y análisis de las precipitaciones máximas como factor detonante a través de las técnicas de Geoestadística, que ayuden en el entendimiento del comportamiento de los suelos y de los macizos rocos en temporadas de lluvias en todo el territorio del municipio de Santa Rosa de Cabal, tanto en su zona urbana como rural.

4 LOCALIZACION

La zona de estudio se encuentra ubicada en el departamento de Risaralda, Santa Rosa de Cabal se encuentra localizada a los 4º 52’ de latitud norte y 75º 37’ de longitud oeste, (Ver Figura 1) a una altura promedio de 1766 metros sobre el nivel del mar, asentado sobre el flanco occidental de la parte media de la cordillera central. Su temperatura media es de 19ºC y la precipitación media anual de 2931mm.

Santa Rosa de Cabal es el tercer municipio del departamento de Risaralda, con una extensión de 486km^2, de los cuales 20Km corresponden al área urbana.

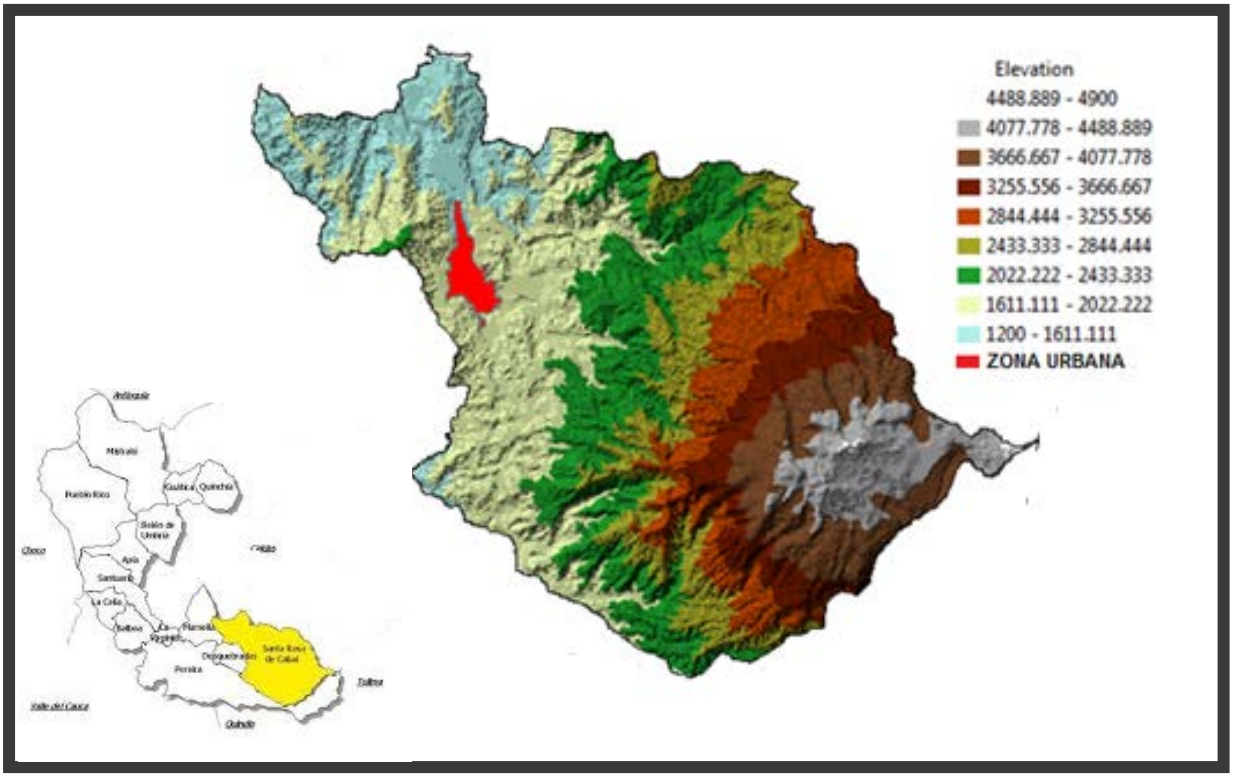


Figura 1. Mapa de ubicación zona de interés. Fuente: Elaboración Propia

5 METODOLOGIA

Para el desarrollo de los objetivos planteados en este trabajo se llevaron a cabo diferentes etapas que son conceptualizadas a continuación.

5.1 RECOPILACION Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se realizó la búsqueda de material bibliográfico alusivo a la geología, suelos, geomorfología, pendientes, fallas, uso y coberturas vegetales, sismicidad y precipitaciones del municipio.

Igualmente se revisaron los trabajos realizados por la CARDER sobre movimientos en masa, estabilidad de laderas y demás estudios relacionados.

Se recopiló información digital tipo shape, necesaria para el análisis de la información en el Software ArcGis 10.2, como límites municipales, modelos de elevación digital del terreno (DEM), curvas de nivel, y demás variables nombradas en el párrafo anterior.

Finalmente se trabajó con información de estaciones pluviométricas tanto de Santa Rosa de Cabal como de sus Municipios cercanos, Esta información correspondió a estaciones de entidades como el Centro de Investigación del Café (CENICAFE), la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

5.2 ESTRUCTURACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Se definieron los ítems de la base de datos para el levantamiento de la información y los diferentes mapas temáticos que fueron utilizados en el estudio, además de la estructuración de la geodatabase.

5.3 DIGITALIZACIÓN DE LA INFORMACION

La información cartográfica se estructura por medio de una base de datos geográfica (Geodatabase) en el software ArcGIS 10.2, empleando el sistema de coordenadas Magna_Colombia_Oeste. La información hidroclimática se actualizó al año 2012 y comprende información del IDEAM, la CHEC y CENICAFE. Se utilizó la extensión de Análisis Geoestadístico de ArcGis 10.2, para procesar, modificar y clasificar las precipitaciones máximas de las estaciones pluviométricas, además se corrió un modelo general de amenaza con el Raster Calculator del ArcToolBox de ArcGis10.2 donde se sumaron y se pusieron porcentajes de peso a los factores que influyen en los Movimientos en Masa, el resultado se dio en valores de amenaza de Alto, Medio, o Bajo.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se determinaron las zonas potencialmente inestables para prevenir el riesgo a movimientos en masa de la población en el área de influencia. Los mapas que se generaron y el resultado de las diferentes operaciones Raster fueron almacenados en una geodatabase para un almacenamiento óptimo de la información.

6 ANTECEDENTES

A continuación se presentan algunos trabajos realizados en la misma temática:

- SERVISIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Memoria explicativa de zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100.000, plancha 207 – Honda, departamentos de Tolima, Cundinamarca y Caldas. Bogotá D.C, Diciembre de 2013. 153 pág.

Con esta memoria buscaron generar conocimiento científico que se pueda emplear para el ordenamiento territorial regional, planeación del desarrollo y la gestión de riesgo; por los entes del orden departamental y nacional. Aplicando y validando la metodología para la elaboración de los mapas nacionales de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa y de amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000.

- SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C, Mayo 2014. 179 Pág. Colección guías y manuales.

La guía Metodológica es una contribución del servicio geológico colombiano a las entidades territoriales para comprender y aplicar los lineamientos, estrategias y requerimientos del Decreto 1807 de 2014, en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial.

Entre los objetivos están la investigación, seguimiento y monitoreo de las amenazas geológicas como base para la gestión integral del riesgo, ordenamiento territorial y la planificación del territorio. La guía describe lineamientos metodológicos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada y local.

AGUAS Y AGUAS DE PEREIRA. Consultoría para la elaboración del diagnóstico hidrológico del área de influencia de Aguas y Aguas de Pereira.

En esta consultoría se busca actualizar la oferta y demanda Hídrica en la subregión No.1 del Departamento de Risaralda, que comprende los municipios de Pereira, Dosquebradas, La Virginia, Santa Rosa de Cabal y la Virginia, con base en información secundaria y utilizando herramientas de análisis hidrológico tradicional y nuevas tecnologías y conceptos.

- MORENO, ANTONIO. Sistemas y análisis de la información geográfica. Segunda edición. México 2008. 940 Pág.

El libro es un manual de autoaprendizaje con ArcGis, en su Lección 10 explica los Análisis Geoestadísticos a través de la extensión Geostatistical Analyst de ArcGis, esta permite crear modelos de superficies usando métodos deterministas y geoestadísticos. En la Unidad 10.5 se presentan las técnicas de interpolación geoestadísticas: Kriging Ordinario, cuyo objetivo de su utilización radica en generar superficies que incorporan las propiedades estadísticas de los datos muéstrales y proporcionan una predicción de los datos.

- OSCAR A. CUANALO, EDGAR BARONA D. Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de puebla, México. Puebla 2006. 15 Pág. Universidad de Guadalajara, México.

En este artículo se describe brevemente las características geomorfológicas del estado de Puebla, considerando su clima, el cual tiene impacto en la meteorización de las rocas que conforman la región montañosa; además se incluye su historia sismológica en los últimos 100 años, para eventos mayores de 6° Richter, y las lluvias torrenciales de 1999 y 2005 que han desencadenado deslizamientos de laderas.

- NATHALIA GOMEZ, YULIANA OSORIO, JULIAN A. SALAZAR. SIG para la determinar la susceptibilidad a movimientos en masa en la Cuenca del Río Campoalegre. Manizales 2013. 80 Pág. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialistas en Sistemas de Información Geográfica.

Desarrollaron un Sistema de Información Geográfica que permite evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa para la prevención del riesgo en la cuenca del río Campoalegre, en el Municipio de Santa Rosa de Cabal – Risaralda, para la cual recolectaron información de campo, procesaron y analizaron la información y elaboraron la base de datos para la posterior creación del SIG que ayudara en la identificación de la Susceptibilidad a deslizamientos en masa.

- CARDER. Base ambiental con énfasis en riesgo Municipio de Santa Rosa de Cabal. Pereira 2000. 96 Pág.

En este trabajo realizaron un balance del estado del conocimiento sobre los riesgos en el Municipio de Santa Rosa de Cabal, como base para la formulación del Plan Municipal de Prevención de Desastres y Mitigación de Riesgos, esto a través de la recopilación de información, identificación de zonas en riesgo del municipio, elaboración de mapas preliminares. Encontrando en el municipio riesgos como volcánicos, sísmicos, geotécnicos, hidrológicos, por avenidas torrenciales y riesgo antrópico, además realizaron propuestas para la mitigación de los riesgos identificados.

7 AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Los movimientos en masa son el resultado de la interacción de factores intrínsecos del terreno que lo predisponen hacia una situación de inestabilidad (susceptibilidad), con factores extrínsecos al terreno (detonantes) que generan o desencadenan una amenaza, en este caso específico los movimientos en masa.

En este capítulo se describen los aspectos metodológicos propuestos para elaborar la zonificación de amenaza por movimientos en masa a través del detonante por lluvias máximas. Para efectuar los estudios de amenaza se requiere de cartografía básica del área de análisis y a partir de esta se genera la cartografía temática.

Para el área del municipio de Santa Rosa de Cabal, se obtuvo primeramente el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa (tomado del Documento Técnico soporte del Plan de Ordenamiento Territorial de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, de Santa Rosa de Cabal, elaborado por el Geólogo Juan Manuel González Castaño, en abril de 2015) y a este resultante se le suma el mapa de precipitaciones (detonantes). Para este estudio se sigue la siguiente Ecuación:

$$St = f\,(P + Li + SU + UCAS + Geo + Fa) \qquad (1)$$

Ecuación tomada del documento técnico soporte del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Santa Rosa de Cabal.

En donde:

St	=	Susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa
P	=	Inclinación de la pendiente
Li.	=	Litología
SU	=	Suelos Edafológicos

UCAS = Uso y cobertura actual del suelo

Geo = Geomorfología

Fa = Fallas

Para la realización del mapa de susceptibilidad por parte del equipo del POT de Santa Rosa de cabal, se basaron en la metodología usada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el año 2013, donde se emplean variables cualitativas y cuantitativas. Dentro de las variables cualitativas se encuentra la geología, geomorfología, etc. y dentro de las cuantitativas se usan variables como la pendiente (Derivada del Modelo Digital de Elevación DEM).

7.1 Calculo del Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa.

Como se mencionó anteriormente este mapa fue tomado del Documento Técnico soporte del Plan de Ordenamiento Territorial de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, de Santa Rosa de Cabal, en este capítulo se hará un recorrido por la evaluación de los factores que tuvieron en cuenta para la elaboración de dicho mapa.

Para el cálculo primero definieron los factores o variables que intervendrán en la susceptibilidad, como son los mapas de temáticos de pendientes, litología, suelos, uso y cobertura de suelos, geomorfología y fallas. (Ver Figura 2). Una vez tuvieron digitalizada la información de cada mapa temático, les asignaron valores de pesos a los diferentes condicionantes de cada variable o mapa. Partiendo de esta información, inician con la aplicación de la metodología propuesta para la evaluación de la Susceptibilidad; los mapas o variables se generaron a partir de información secundaria utilizando la herramienta SIG.

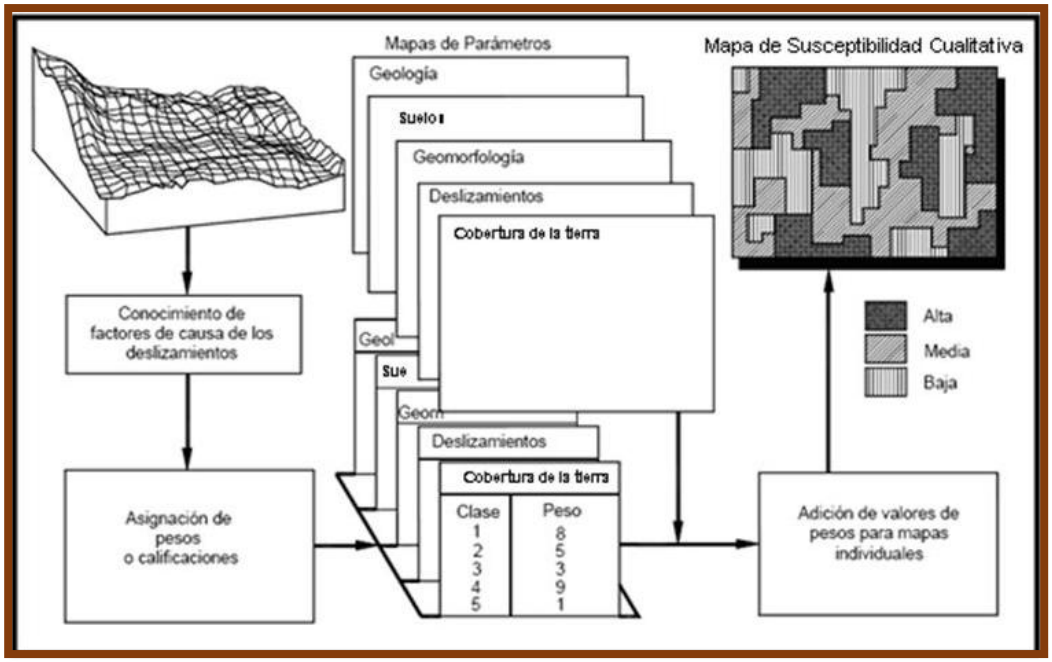


Figura 2. Esquema que muestra la aplicación de herramienta SIG, en el análisis heurístico de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa. Tomado y adaptado de Van Westen (2003).

A continuación se describen los parámetros, con sus respectivas variables y calificación y pesos asignados, posteriormente se explica cómo definieron y clasificaron la susceptibilidad.

Tabla 1. Calificación, valores de peso y colores referentes para la interpretación de los factores que hacen parte del cálculo de la susceptibilidad.

CALIFICACION	PESO	COLOR
Muy Baja	1	
Baja	2	
Media	3	
Alta	4	
Muy Alta	5	

7.1.1 Pendientes

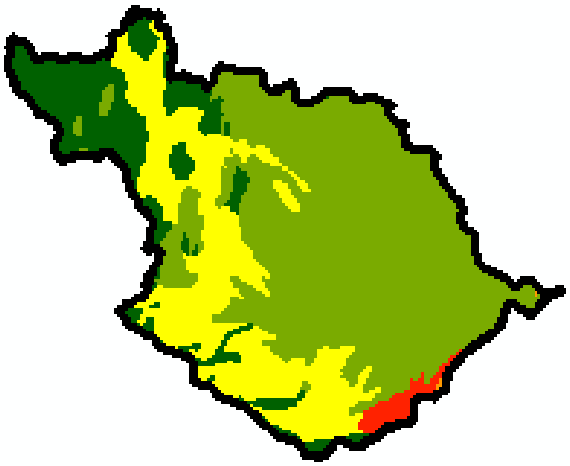
Este factor está asociado con la inclinación del terreno, en términos generales; es uno de los agentes más importantes para el análisis de susceptibilidad, al presentar movimientos en masa, ya que muestra una relación lineal. Ver Figura 3.

PENDIENTE	PESO
Menor a 11.3°	1
11.3° a 19.3°	2
19.3° a 26.6°	3
26.6° a 31°	4
Mayor 31°	5

Figura 3. Mapa de pendientes (área local de ejemplo) e inventarios de pendientes y valores de peso asignados. Fuente: Elaboración Propia

7.1.2 Unidades Litológicas

Con base en la plancha geológica 224 Pereira escala 1:100.000 (INGEOMINAS, 1980). A nivel general dicha plancha contiene información litológica y estructural que facilitó la caracterización liltoestratigráfica de las unidades. De la información cartográfica geológica se generaron mapas de Litología. Ver Figura 4.

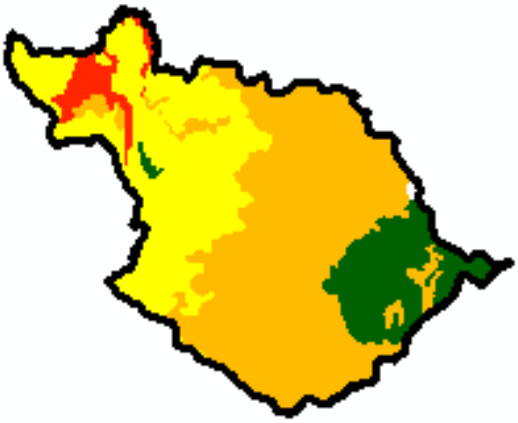


LITOLOGIA	PESO
Diabasas, pillow lavas y piroclásticas parcialmente espilitizadas	1
Stock diorítico gabroide de Chinchiná Santa Rosa	1
Esquistos anfibólicos y anfibolitas localmente con granate y zoisita	1
Litodema volcánico. Derrames lávicos submarinos parcialmente	1
Esquistos cuarzo-sericíticos y cuarcitas localmente con cloritoidegranate	1
Pórfidos hornblenda	1
Esquistos cuarzo-sericíticos y cuarcitas localmente con cloritoidegranate	1
Stock diorítico gabroide de Chinchiná Santa Rosa	1
Aluviones recientes	1
Miembro inferior, conglomerados, areniscas grises y arcillolitas	2
Unidad sedimentaria. Pizarras arcillosas y silíceas grauvacas, limolitas.	2
Cenizas y tobas con estructura de flujo y tefras	2
Esquistos cuarzo-sericíticos, grafitos pizarras y filitas.	2
Flujos andesíticos porfiríticos de edad Mioceno-Pleistoceno	2
Esquistos actinolíticos, cloríticos y calcáreos	2
Depósitos compuestos principalmente por cenizas, arena y bloques de rocas	3
Depósitos detríticos formados por acción glaciar reciente	4
Depósitos no consolidados, cenizas volcánicas, flujo de lodo y depósitos de	5

Figura 4. Mapa de Unidades Litológicas (área local de ejemplo) y valores peso asignados. Fuente: Elaboración Propia

7.1.3 Suelos

El término “Suelos”, se define de acuerdo con el IGAC (1986), como cualquier extensión de terreno cartografiable con características físico-mecánicas y geomorfológicas propias, las que normalmente sólo se conservan hasta unos pocos metros de profundidad a partir de la superficie. Su importancia radica en que sobre ellas se desarrolla la mayor parte de las actividades agropecuarias. Se tomó el mapa de unidades de suelos del IGAC (1998) a escala 1:100.000. Ver Figura 5.

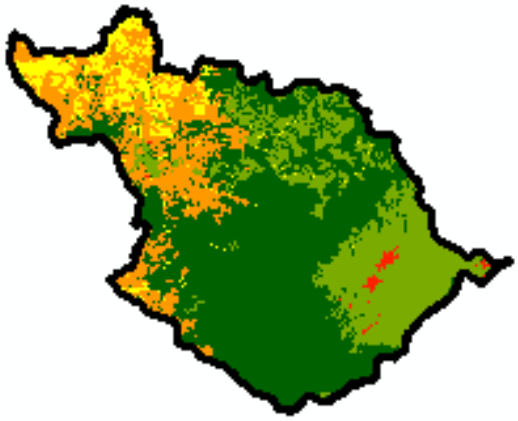


SUELOS	PESO
Suelos superficiales, excesivamente drenados:	5
Suelos profundos, bien drenados	2
Suelos profundos en las laderas, bien drenados	3
Suelos moderadamente profundos, bien drenados ocacionalmente inundables	2
Suelos profundos en los dique, bien drenados, ocacionalmente mal drenados	2
Suelos moderadamente profundos, limitado por horizonte endurecidos	2
Suelos muy superficiales en las crestas y profundos en los relieves suaves	3
Suelos superficiales en las crestas y moderadamente profundos en relieves	4
Suelos muy superficiales con abundantes afloramientos rocosos	2
Suelos profundos en las laderas y superficiales en las crestas, bien	4
Suelos moderadamente profundos, limitados por gravilla y piedra	4
Suelos muy superficiales en las depresiones y profundos en las declives	4
Suelos profundos, bien drenados, ricos en carbón orgánico	4
Afloramientos rocosos y acumulaciones de arenas	1

Figura 5. Mapa de Unidades de Suelos (área local de ejemplo) y valores de peso asignados. Fuente: Elaboración Propia

7.1.4 Uso y Cobertura

La cobertura vegetal, natural o manejada por el hombre, tiene una incidencia marcada sobre la ocurrencia de los movimientos en masa. Los bosques y las plantaciones de árboles tienen sistemas radiculares que amarran el suelo y hasta el subsuelo, frenando las condiciones ante deslizamientos; mientras que los cultivos limpios aumentan fuertemente las posibilidades de generación de movimientos en masa. Para el presente ejercicio se utilizaron usos y coberturas vegetales determinadas por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda – CARDER (2011), la cual utilizó la metodología CORINE LAND COVER. Ver Figura 6.

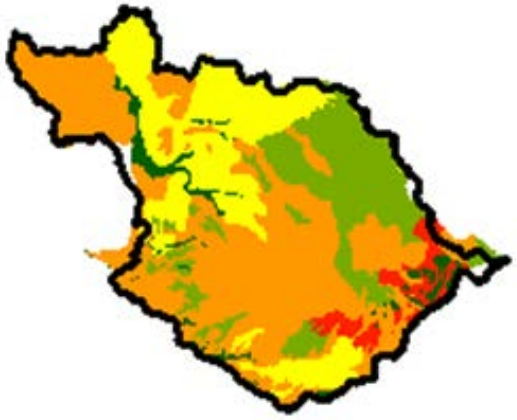


USO Y COBERTURA	PESO
Aguascontinentales	1
Bosques	1
Áreasconvegetaciónherbáceaoarbustiva	2
Cultivospermanentes	3
Zonasindustrialescomercialesyredesdecomur	3
Zonasverdesartificializadasnoagrícolas	3
Áreasagrícolasheterogéneas	4
Cultivostransitorios	4
Pastos	4
Áreasabiertasinoconpocavegetación	5
Zonasurbanizadas	5

Figura 6. Mapa de Usos del Suelos y Cobertura Vegetal (área local de ejemplo) y valores de pesos asignados. Fuente: Elaboración Propia

7.1.5 Geomorfología

Las geoformas y su localización respecto a la ladera inciden de forma importante en la susceptibilidad a los movimientos en masa. Se tomó el mapa de unidades geomorfológicas del IGAC (1998) a escala 1:100.000. Ver Figura 7.



CODIGO	PESO
Planicies aluviales	1
Terrazas fluviales	1
Centro Poblado	1
Lahar	2
Flujos lávicos subrecientes	2
Montañas y colinas denudativas estratificadas	3
Abanico fluvio-volcánico (Pereira-Armenia)	3
Terrazas fluvio-volcánicas	3
Montañas denudativas ígneas	4
Valles en "V", materiales hidrovolcánicos	4
Coluvios y conos coluviales	4
Circos y valles glaciales	4
Campos de morrenas	5

Figura 7. Mapa de Variables Geomorfológicas con sus condicionantes (área local de ejemplo) y valores de peso asignados. Fuente: Elaboración Propia

7.1.6 Fallas

Se tomó como base la plancha geológica 224 Pereira escala 1:100.000 (INGEOMINAS 1980), A nivel general dicha plancha contiene información litológica y estructural que facilitó el reconocimiento de las fallas geológicas existentes. Ver Figura 8.

TIPO FALLA	PESO
ALINEAMIENTO	1
PROBABLE	1
INFERIDA	1
COMPROBADA	5

Figura 8. Mapa de Fallas Geológicas (área local de ejemplo) y valores de peos asignados. Fuente: Elaboración Propia

Para la obtención de la zonificación de la Susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa, los realizaron con la superposición de cada uno de los mapas temáticos (uno a uno), Ver figura 9, a través de la acción **UNION** en el SIG y álgebra de mapas mediante el formato **RASTER** y se reclasifica, consiguiendo como resultado final el **MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA**.

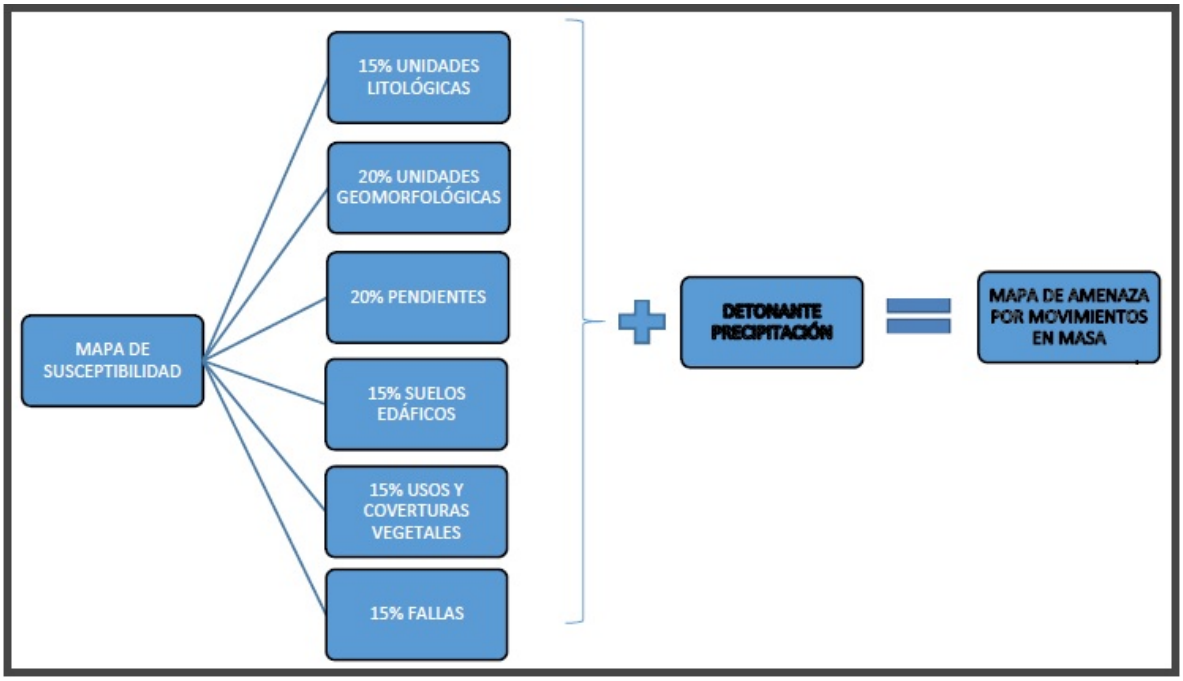


Figura 9. Flujograma del proceso metodológico utilizado para obtener el Mapa de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica.

7.2 Detonante por Precipitaciones Máximas.

Los movimientos de ladera causados por lluvias están relacionados con el volumen, intensidad y distribución de dichas precipitaciones. En consecuencia, es importante tener en cuenta la respuesta del terreno a precipitaciones durante horas, días, meses, años o incluso durante ciclos de lluvia y sequía de varios años. Cuando la precipitación cae sobre una ladera, un porcentaje de ella es interceptado por la vegetación, otro se infiltra en el suelo o se almacena en las depresiones para luego infiltrarse. El proceso de infiltración continúa, aún después del cese de las lluvias y en algún momento pueden crearse condiciones críticas, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, incrementando la presión de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y, por tanto, la resistencia al esfuerzo cortante. Es entonces cuando se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o toda la ladera.

Los movimientos en masa detonados por lluvias, que se desarrollan sobre las laderas, desestabilizándolas, generan desastres que causan daños y muertes incluyendo pérdidas en vidas humanas, ambientales y económicas que impactan el desarrollo de algunas regiones.

Partiendo de la hipótesis que a mayor lluvia diaria máxima, mayor es la probabilidad que se detone un movimiento en masa, se generó una cobertura de lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años, para lo cual se seleccionaron las estaciones meteorológicas que se encuentren dentro de la zona de análisis y vecinas a ésta, con el fin de disminuir la incertidumbre en el límite de la misma. El procedimiento para su cálculo se describe a continuación.

Para este estudio se analizaron 28 Estaciones Pluviométricas, donde nueve son datos de la CHEC (Central Hidroeléctrica de Caldas), una del IDEAM (Estación El Alto Español) y las 18 restantes son obtenidas de los anuarios Meteorológicos Cafeteros de Cenicafé. De estas tablas se seleccionaron los valores máximos de precipitación en 24 horas (Ver Tabla 2), arrojando valores promedio anuales máximos de precipitación de 86mm2 y 463mm2 respectivamente.

Tabla 2.Estaciones pluviométricas con valores de precipitaciones máximas en 24h.

MUNICIPIO	NOMBRE	X	Y	Z	FUENTE	PREC. MAX.
Santa Rosa	La Hermosa	1160221.73	1031315.24	1681	CHEC	406.7
Santa Rosa	San Esteban	1174996.12	1031956.81	2800	CHEC	370.6
Santa Rosa	La Gaviota	1156518.88	10245[illegible]38	1700	CHEC	463.7
Santa Rosa	Los Alpes	1176862.81	1024586.19	3400	CHEC	1215.1
Chinchiná	La ínsula	1158325.02	1044824.91	1235	CHEC	444
Chinchiná	Campoalegre	1163888.19	1037462.56	1481	CHEC	415.7
Chinchiná	Chispero	1162022.81	1044833.04	1400	CHEC	395.8
Chinchiná	Enf. Esmeral	1152778.44	1044813.08	1040	CHEC	399.3
Dosquebrad	Sub. La Rosa	1154831.19	1026860.83	1453	CHEC	457.1
Manizales	Almacafé Le	1193446.51	1048597.47	3684	CENICAFE	327.3
Santa Rosa	El Jazmín	1162043.13	1035614.85	1635	CENICAFE	464.4
Chinchiná	Cenicafé	1163871.72	1044837.17	1310	CENICAFE	408.2
Chinchiná	La Sierra	1160177.95	1042985.32	1440	CENICAFE	485.8
Chinchiná	La Divisa	1163875.86	1042993.52	1590	CENICAFE	442.8
Chinchiná	Naranjal	1158333.12	1041137.69	1381	CENICAFE	483.2
Chinchiná	La Romelia	1156484.04	1041133.72	1335	CENICAFE	453.8
Chinchiná	Moravo	1150925.78	1046652.78	1146	CENICAFE	474.7
Chinchiná	La Francia	1154631.19	1042973.39	1267	CENICAFE	484.2
Dosquebrad	Las Hortensi	1152808.94	1030064.52	1977	CENICAFE	511.5
Marsella	La Palmera	1147231.97	1044801.66	1450	CENICAFE	383.8
Pereira	El cedral	1171343.16	1011667.55	2120	CENICAFE	354.1
Pereira	Plt. Tratamie	1156522.69	1022697.79	1487	CENICAFE	451.2
Pereira	La Playa	1147272.18	1024522.82	1290	CENICAFE	394.2
Murillo	Inciensal	1215685.22	1032063.29	2400	CENICAFE	472
Anzoátegui	Janiyof	1223164.7	1004422.65	1720	CENICAFE	377.5
Salento	Normandía	1162117.23	1000585.94	1637	CENICAFE	483.7
Villamaría	Bello Horizo	1169422.83	1043006.15	1690	CENICAFE	464
Santa Rosa	Alto Español	1152793.79	1037438.79	1740	IDEAM	481

En la figura 10 se muestran las estaciones pluviométricas, ubicadas en gran parte en el Municipio de Santa Rosa de Cabal; con el fin de darle una mejor calidad e interpretación a los datos obtenidos y como apoyo para que la interpolación de los datos abarcara el total del área de municipio se hizo necesaria recurrir a estaciones de municipios cercanos como Chinchiná, Villamaría y Manizales al Norte del Santa Rosa de Cabal, hacia el oeste los municipios de Marsella, Pereira y Dosquebras, hacia el sur se tomaron estaciones de Pereira y Salento; Murillo y Anzoátegui ubicados al Este del municipio.

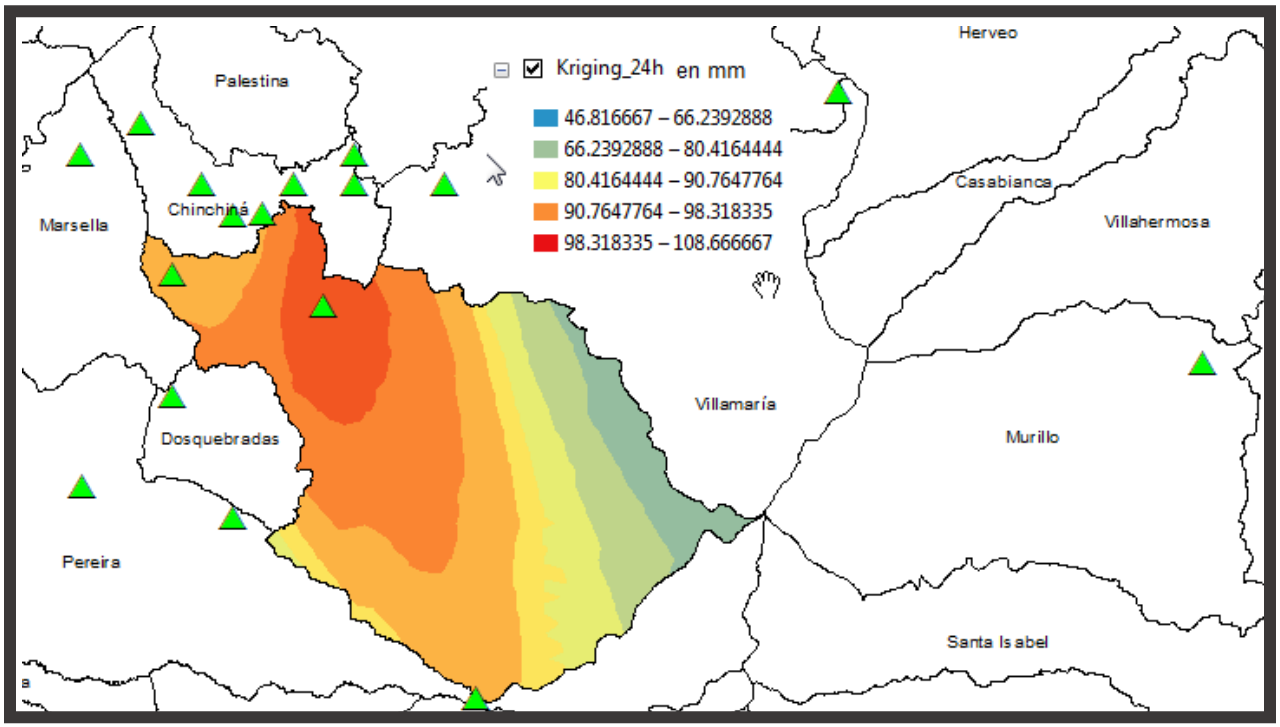


Figura 10. Mapa de precipitaciones máximas promedio en 24 horas, con ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas para el estudio. Fuente: Elaboración Propia

La caracterización de los regímenes de lluvia se zonificó de acuerdo a los valores de precipitación máxima en 24h media anual. La distribución espacial de la precipitación media anual se obtuvo a partir de las 28 estaciones por interpolación geoestadística. Los datos para esta interpolación se hacen estación por estación mediante la técnica de Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel, las tablas se completan con los datos de las máximas precipitaciones por año, ya sean mensuales o diarias, por los años en los que se tengan registros. Ver Figura 11.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		DATOS ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA													
2		Estación: La Hermosa			Coordenadas UTM Huso 31			X = 4° 52,67'		Cota =	1681				
3		Denominación:			(m)			Y = 75° 37,99'							
4															
5		DATOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 Hrs. (mm)													
6															
7	Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	eptiembr	Octubre	oviembr	Diciembr	Máximo	
8	1987	132.00	39.00	178.00	170.00	271.00	128.00	333.00	73.00	340.00	549.00	259.00	79.00	549.00	549.00
9	1988	111.00	489.00	106.00	374.00	147.00	172.00	291.00	242.00	268.00	285.00	297.00	324.00	489.00	489.00
10	1989	270.00	162.00	245.00	245.00	272.00	137.00	151.00	90.00	165.50	277.00	214.00	220.00	277.00	277.00
11	1990	115.00	136.00	313.00	333.00	312.00	299.00	548.00	415.00	242.00	497.00	324.00	166.00	548.00	548.00
12	1991	284.00	208.00	382.00	180.00	333.00	255.00	116.00	132.00	215.00	202.00	330.00	275.00	382.00	382.00
13	1992	335.00	264.00	80.00	210.00	227.00	151.00	172.00	162.00	168.00	135.00	218.00	250.00	335.00	335.00
14	1993	195.00	127.00	145.00	176.00	260.00	136.00	95.00	210.00	419.00	274.00	425.00	326.00	425.00	425.00
15	1994	162.00	212.00	174.00	263.00	150.00	162.00	84.00	141.00	173.00	256.00	204.00	153.00	263.00	263.00
16	1995	90.00	83.00	150.00	364.00	193.00	233.00	128.00	142.00	146.00	364.00	209.00	348.00	364.00	364.00
17	1996	251.00	333.00	315.00	198.00	294.00	242.00	286.00	279.00	198.00	305.00	213.00	94.00	333.00	333.00
18	1997	349.00	175.00	297.00	219.00	179.00	219.00	1.00	10.00	330.00	190.00	250.00	100.00	349.00	349.00
19	1998	21.00	274.00	212.00	308.00	641.00	340.00	407.00	294.00	275.00	363.00	278.00	242.00	641.00	641.00
20	1999	222.00	295.00	275.00	276.00	177.00	312.00	172.00	184.00	414.00	526.00	495.00	353.50	526.00	526.00
21	2000	203.00	292.00	519.00	335.00	334.00	256.00	239.00	126.00	442.00	206.00	259.00	284.00	519.00	519.00
22	2001	200.00	177.00	309.00	204.00	297.00	300.00	160.00	66.00	169.00	230.50	228.00	269.00	309.00	309.00
23	2002	88.00	82.00	264.00	387.00	193.00	134.00	180.00	105.00	183.00	205.00	132.00	126.00	387.00	387.00
24	2003	106.00	290.00	33.00	303.00	418.00	185.00	140.00	140.00	230.00	330.00	285.00	105.00	418.00	418.00
25	2004	220.00	130.00	172.00	389.00	193.00	64.00	100.00	66.00	242.00	135.00	336.00	243.00	389.00	389.00
26	2005	186.00	256.00	180.00	258.00	315.00	359.00	157.00	159.00	189.00	627.00	382.00	238.00	627.00	627.00
27	2006	117.00	211.00	288.00	432.00	305.00	269.00	128.00	168.10	187.00	352.00	402.00	300.00	432.00	432.00
28	2007	208.00	134.00	275.00	312.00	320.00	67.00							320.00	320.00
29	2008	138.00	246.00	217.00	338.00	274.00	231.00	336.00	374.00	195.00	329.00	295.00	376.00	376.00	376.00
30	2009	173.00	59.40	60.00	215.00	229.00	85.70	53.00	191.00	126.00	315.00	321.00	216.00	321.00	321.00
31	2010		91.20	206.50	225.50	336.00	425.00	227.00	142.00	24.45	364.70	449.40	425.30	449.40	449.40
32	2011	137.00	295.00	400.00	475.00	177.00	306.00	195.00	151.00	161.00	451.00	472.00	441.00	475.00	475.00
33	2012	178.00	168.60	169.00	310.60	214.60	11.20	9.70	120.80	207.10	543.20	209.90	216.30	543.20	543.20
34	MAX	349.00	489.00	519.00	475.00	641.00	425.00	548.00	415.00	442.00	627.00	495.00	441.00	641.00	

Registros Pluviómetro | Precip. Máx. Probable | Tabla Pd | Tabla I

Figura 11. Tabla con las precipitaciones máximas de la estación La Hermosa, para los años de registro de 1987 a 2012.

Después se calcula la Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel, se hallan las variables probabilísticas, ($\overline{X}$): la media, S: la desviación estándar de la muestra, la probabilidad de ocurrencia, μ: Se refiere a la población como tal, α: simboliza la intercepción o un error de tipo I. Además se hace el Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias. Ver Figura 12

K24

N°	Año	Mes Max. Precip.	Precipitación (mm) xi	(xi - x)^2
1	1987	0	549.00	15408.45
2	1988	0	489.00	4112.76
3	1989	0	277.00	21865.31
4	1990	0	548.00	15161.19
5	1991	0	382.00	1837.77
6	1992	0	335.00	8076.48
7	1993	0	425.00	0.02
8	1994	0	263.00	26201.65
9	1995	0	364.00	3705.06
10	1996	0	333.00	8439.96
11	1997	0	349.00	5756.14
12	1998	0	641.00	46712.51
13	1999	0	526.00	10227.43
14	2000	0	519.00	8860.60
15	2001	0	309.00	13425.68
16	2002	0	387.00	1434.08
17	2003	0	418.00	47.19
18	2004	0	389.00	1286.60
19	2005	0	627.00	40856.85
20	2006	0	432.00	50.85
21	2007	0	320.00	10997.56
22	2008	0	376.00	2388.20
23	2009	0	321.00	10788.82
24	2010	0	449.40	601.76
25	2011	0	475.00	2513.09
26	2012	0	543.20	14002.17
26		Suma	11046.6	274758.2

Cálculo variables probabilísticas

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 424.87 \text{ mm}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 104.83 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s = 81.74 \text{ mm}$$

$$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha = 377.69 \text{ mm}$$

Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias

Periodo Retorno Años	Variable Reducida YT	Precip. (mm) XT (mm)	Prob. de ocurrencia F(xT)	Corrección intervalo fijo XT (mm)
2	0.3665	407.6478	0.5000	460.6420
5	1.4999	500.2934	0.8000	565.3315
10	2.2504	561.6328	0.9000	634.6451
25	3.1985	639.1353	0.9600	722.2229
50	3.9019	696.6311	0.9800	787.1932
100	4.6001	753.7024	0.9900	851.6837
500	6.2136	885.5854	0.9980	1000.7114

$$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$$

Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel

Registros Pluviómetro | Precip. Máx. Probable | Tabla Pd | Tabla I

Figura 12. Tabla para el cálculo de probabilidad por Gumbel, Calculo de las variables probabilísticas y de precipitaciones máximas probables para distintas frecuencias.

Y por último se calculan las precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias, para este estudio se utilizara un tiempo de recurrencia de 100 años como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Tabla para el cálculo de las precipitaciones máximas por tiempos de duración.

F19 ='Precip. Máx. Probable'!P10*$G6

Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas — *Fuente: D. F. Campos A., 1978*

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	460.6420	565.3315	634.6451	722.2229	787.1932	851.6837	1000.7114
18 hr	X18 = 91%	419.1842	514.4517	577.5270	577.7783	716.3458	775.0322	910.6474
12 hr	X12 = 80%	368.5136	452.2652	507.7160	577.7783	629.7545	681.3470	800.5692
8 hr	X8 = 68%	313.2366	384.4254	431.5586	491.1116	535.2914	579.1449	680.4838
6 hr	X6 = 61%	280.9916	344.8522	387.1335	440.5560	480.1878	519.5271	610.4340
5 hr	X5 = 57%	262.5660	322.2390	361.7477	411.6671	448.7001	485.4597	570.4055
4 hr	X4 = 52%	239.5339	293.9724	330.0154	375.5559	409.3404	442.8755	520.3700
3 hr	X3 = 46%	211.8953	260.0525	291.9367	332.2225	362.1089	391.7745	460.3273
2 hr	X2 = 39%	179.6504	220.4793	247.5116	281.6669	307.0053	332.1566	390.2775
1 hr	X1 = 30%	138.1926	169.5995	190.3935	216.6669	236.1580	255.5051	300.2134

Registros Pluviómetro | Precip. Máx. Probable | Tabla Pd | Tabla I

Table

Pre_pm_24horas

FID	Shape *	Name	Preci_Pon_	Clasificac	POINT_X	POINT_Y	POINT_Z	CODIGO	MUNICIPIO	FUENTE	PROM__PREC	TIPO_DE_ES	CORRIENTE
0	Point ZM	Almacafe	75.5578	2	1193446.5105	1048597.4668	3684	201	Manizales	CENICAFE	46.816667	PRINCIPAL	R. Chinchina
1	Point ZM	Alto Espanol	147.9816	3	1152793.7911	1037438.7884	1740	311	Santa Rosa	IDEAM	87.5	PLUVIOGRAFICA	R. San Francisco
2	Point ZM	Bello Horizonte	128.4691	3	1169422.8283	1043006.1549	1690	291	Villamaria	CENICAFE	87	PLUVIOMETRICA	R. Claro
3	Point ZM	Cenicafe	162.3294	4	1163871.7241	1044837.1687	1310	221	Chinchina	CENICAFE	90.37	PRINCIPAL	R. Chinchina
4	Point ZM	El Cedral	172.4742	4	1171343.1594	1011667.5456	2120	251	Pereira	CENICAFE	91.78	PRINCIPAL	R. Otun
5	Point ZM	El Jazmin	285.5268	5	1162043.1283	1035614.8503	1635	211	Santa Rosa	CENICAFE	105.55	PRINCIPAL	R. San Eugenio
6	Point ZM	Inciensal	237.1887	5	1215685.2249	1032063.2918	2400	261	Murillo	CENICAFE	92	PLUVIOMETRICA	R. Lagunilla
7	Point ZM	Janiyof	242.3767	5	1223164.7047	1004422.6465	1720	271	Anzoategui	CENICAFE	108.666667	PLUVIOMETRICA	R. Totare
8	Point ZM	La Divisa	125.7735	3	1163875.8618	1042993.5162	1590	223	Chinchina	CENICAFE	80	PLUVIOMETRICA	R. Chinchina
9	Point ZM	La Francia	173.8099	4	1154631.1907	1042973.3874	1267	227	Chinchina	CENICAFE	86.7	PLUVIOMETRICA	R. Campoalegre
10	Point ZM	La Palmera	203.6172	4	1147231.9712	1044801.6617	1450	241	Marsella	CENICAFE	84.67	PLUVIOMETRICA	R. San Francisco
11	Point ZM	La Playa	189.0522	4	1147272.1796	1024522.8213	1290	253	Pereira	CENICAFE	88	PLUVIOMETRICA	R. Otun
12	Point ZM	La Romelia	130.4253	3	1156484.036	1041133.7217	1335	225	Chinchina	CENICAFE	80.18	PLUVIOGRAFICA	R. Campoalegre
13	Point ZM	La Sierra	171.491	4	1160177.9532	1042985.3244	1440	222	Chinchina	CENICAFE	101.67	PLUVIOMETRICA	R. Campoalegre
14	Point ZM	Las Hortensias	209.0562	4	1152808.9378	1030064.5157	1977	231	Dosquebradas	CENICAFE	96.17	PLUVIOMETRICA	R. Otun
15	Point ZM	Moravo	133.7098	3	1150925.7803	1046652.7847	1146	226	Chinchina	CENICAFE	90.5	PLUVIOMETRICA	R. San Francisco
16	Point ZM	Naranjal	137.9282	3	1158333.0034	1041137.6875	1381	224	Chinchina	CENICAFE	83.07	PRINCIPAL	R. Campoalegre
17	Point ZM	Nomandia	152.6676	4	1162117.2312	1000585.9385	1637	281	Salento	CENICAFE	70	PLUVIOMETRICA	R. Quindio
18	Point ZM	Planta Tratamiento	128.156	3	1156522.6885	1022697.7895	1487	252	Pereira	CENICAFE	78.73	PLUVIOGRAFICA	R. Otun

1 (0 out of 19 Selected)

Pre_pm_24horas

Figura 14. Tabla con la información compilada de las estaciones pluviométricas, con datos de precipitaciones máximas promedio.

Para realizar los cálculos estadísticos se reúne en una tabla los valores de precipitación máxima promedio para un periodo de retorno de 100 años, además de información importante como nombre de la estación pluviométrica, corriente hidrográfica en la que se ubica, tipo de estación, Municipio a la que pertenece, además de la distribución espacial dadas en coordenadas X, Y y Z, (Ver Figura 14) con estos datos se hace el siguiente análisis geoestadístico:

El Kriging Ordinario es el método geoestadístico utilizado para la interpolación de los valores de precipitación. Los objetivos de las técnicas de interpolación geoestadistica son generar superficies que incorporan las propiedades estadísticas de los datos muéstrales y que proporcionan una medida de error de las mismas, siendo este último un indicador de una buena o mala predicción. Todos los métodos geoestadistico forman parte de la familia KRIGING. En el Análisis Geoestadistico son posibles el Kriging Ordinario, Kriging Simple, el Kriging Universal, el de probabilidad, el indicador y el disyuntivo.

El siguiente es un diagrama de flujo (Figura 15) para determinar el proceso de Kriging que debe usarse y para verificar si el conjunto de datos es apto para su aplicación:

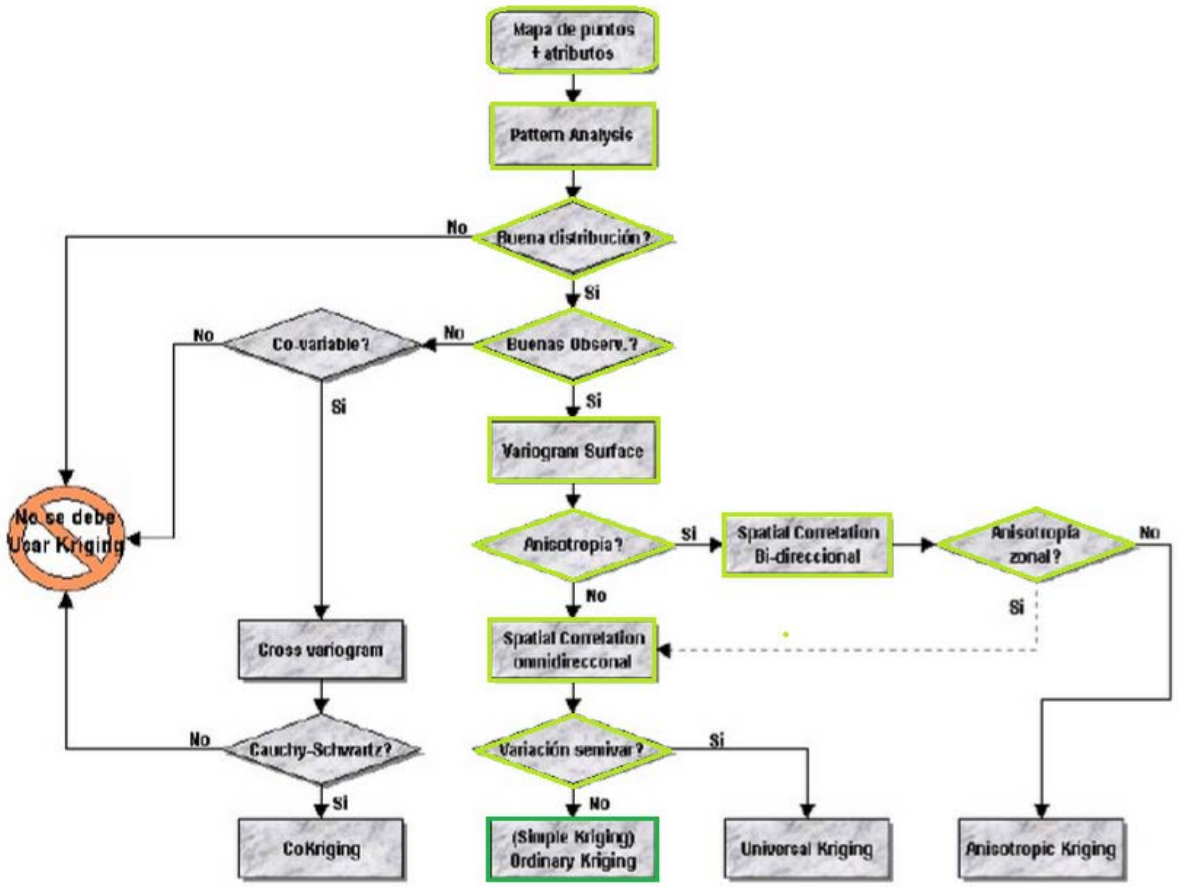


Figura 15. Diagrama de flujo de Kriging. Tomado de Análisis Geo-Estadístico y de Exposición Solar. Por Xander Bakker. 2002, Bógota.

El más frecuente de los Kriging es el ORDINARIO O PUNTUAL que asume que la variable es estacionaria y que no tiene tendencia, su ecuación es: Z(s)=u(s)+e(s), siendo Z(s) la variable de interés; u(s) una constante (media) desconocida, e(s) los errores aleatorios, (s) simplemente indica el lugar con unas determinadas coordenadas especiales X (Longitud), Y (Latitud).

El Kriging se basa en el concepto de semivariograma cuyo objetivo es explorar y cuantificar la dependencia espacial de una variable, es decir, su autocorrección

espacial; esta asume el principio de estacionariedad, que consiste en que si dos lugares están a una distancia y dirección similar tendrán similares diferencias al cuadrado entre sus valores. El semivariograma puede variar no solo con la distancia sino también con la dirección. El modelo isotrópico es aquel que es el mismo en todas las direcciones, mientras que el modelo anisótropo alcanza la meseta más rápidamente e unas direcciones que en otras. Cuando los datos tienen anisotropía las diferencias en los valores de los datos cambian bastante más con la distancia en una dirección que en otra. Ver Figura 16.

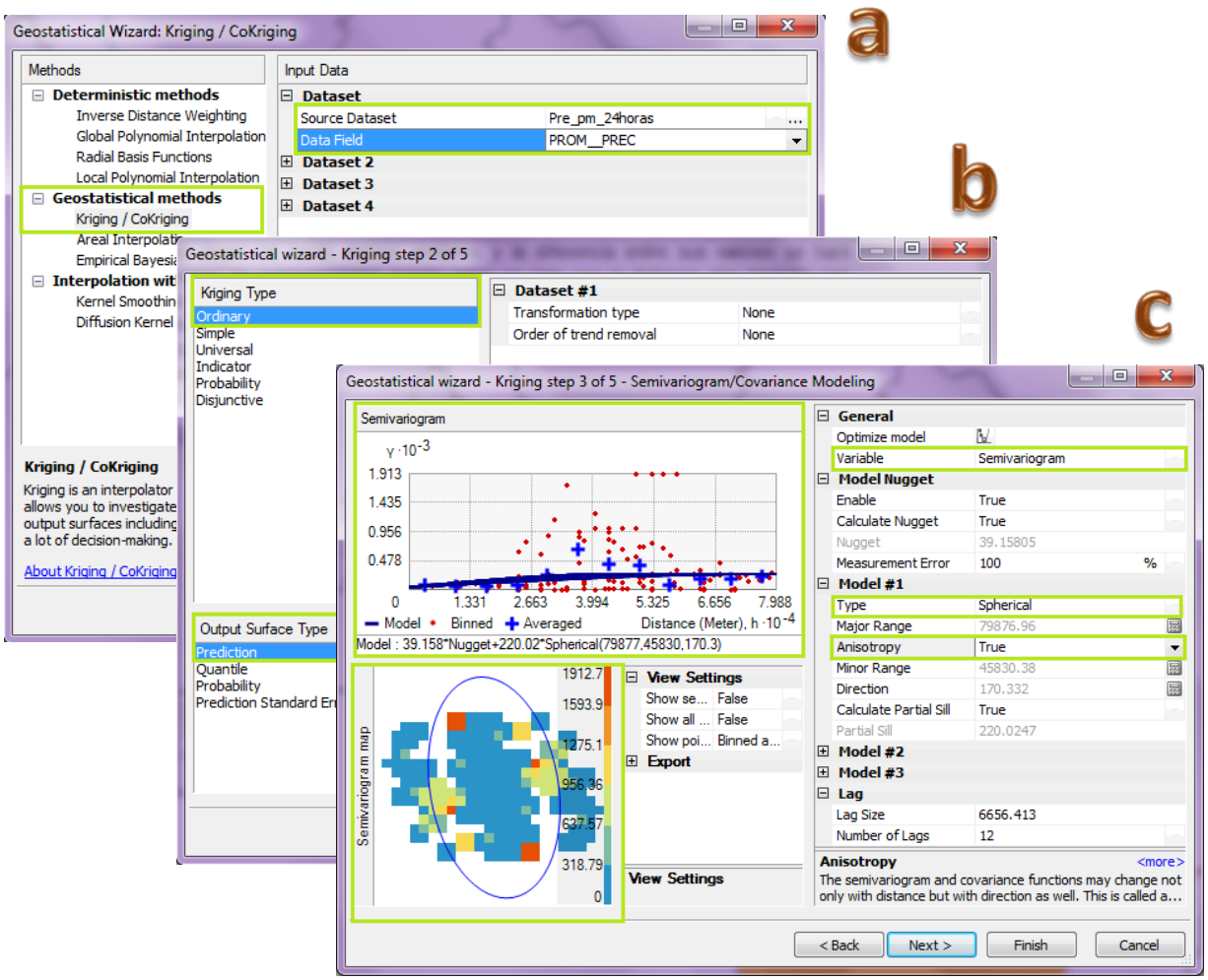


Figura 16. Selección de los parámetros para el cálculo de la predicción por Kriging Ordinario a. Selección Método Kriging y los datos a analizar b. Selección del tipo de Kriging a utilizar (Kriging ordinario) c. Elección del tipo de geometría a analizar (Esférica) y de la anisotropía. Fuente: Elaboración Propia

Cuando se ajusta un modelo al semivariograma hay que especificar la búsqueda de vecindad que limita el número y la configuración de los puntos que se van a utilizar en la predicción. Hay dos mecanismos de control para limitar los puntos usados. Que son la forma de vecindad y el establecimiento de restricciones de los puntos dentro de la forma.

La forma de la búsqueda de vecindad estará dictada por los datos de entrada. Si en los datos muéstrales no hay influencia direccional (Isotropía), los puntos utilizados para predecir se elegirán en todas direcciones desde el lugar no maestral, por lo tanto la forma que se elegirá será un círculo. Pero si los datos tienen autocorrelación direccional (Anisotropía) entonces se elegirá una elipse como forma de búsqueda de vecindad.

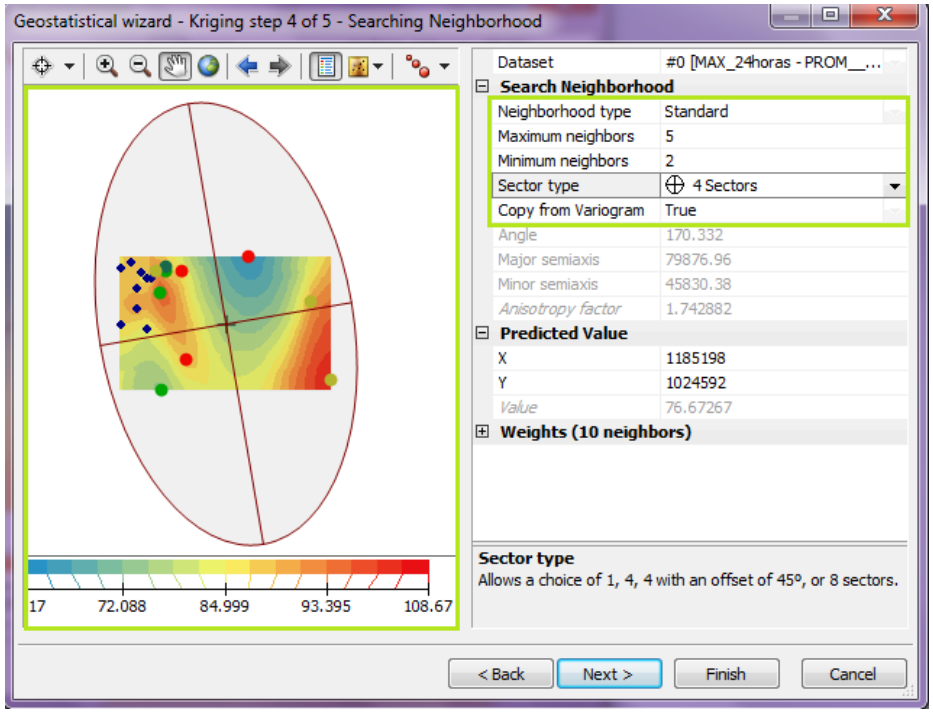


Figura 17. Búsqueda de la vecindad. Fuente: Elaboración Propia

Definida la forma, el segundo mecanismo de control de la vecindad es establecer restricciones dentro de la forma. Primero se elige el número de puntos que se van a ser usados para la predicción, oscilando entre el deseable y un mínimo. En segundo lugar

para evitar tendencias en una determinada dirección, el círculo o la elipse son divididos en sectores en los cuales se elige igual número de puntos. Ver Figura 17.

El último paso es la validación cruzada, técnica que permite comparar las estimaciones de diferentes métodos de interpolación y elegir aquel que menos errores proporcione. Se basa en la eliminación de un dato muestral, al que predice con el resto de la muestra, después compara el valor de ese punto con el valor observado. Este procedimiento se repite con cada uno de los puntos muéstrales y al final la validación cruzada compara los valores observados con los calculados.

Para esta validación se dispone de un cuadro resumen estadístico y de diversos gráficos para valorar los valores pronosticados. Los datos estadísticos más representativos son la media estandarizada de los errores que debe estar muy cercana a cero, y el error cuadrático medio estandarizado que su valor debe estar muy próximo a 1, como se observa en la Figura 18.

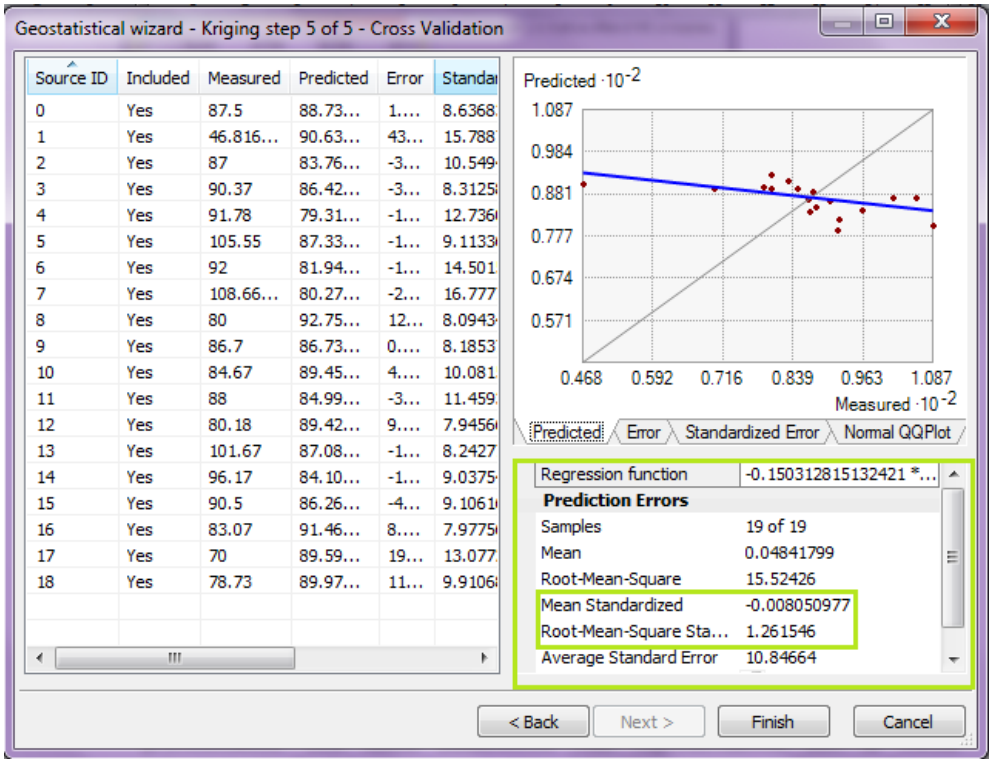


Figura 18. Resumen estadístico. Para obtener la validación de los datos de predicción. Fuente: Elaboración Propia

Comprobando con este paso que la predicción y la validación del error dan como resultado los valores apropiados y esperados, se procede a la clasificación por valores de pesos de los datos de precipitaciones máximas promedio en 24h de acuerdo a lo establecido en la Tabla 2.

De acuerdo a los valores anteriores se adoptaron los datos de lluvia o precipitación crítica en 24 horas (285.5268mm), donde se asignó un peso de 3, 4 y 5 para todo Santa Rosa de Cabal. Véase Figura 19.

Los pesos son indicadores de la importancia que se atribuye a cada uno de los criterios o alternativas. Parece, por tanto, razonable asignar los pesos teniendo en cuenta las escalas escogidas para las evaluaciones. Aunque existen diferentes métodos de ponderación, cada uno con sus problemas específicos, en realidad hay sólo dos grandes formas de abordar este problema: o bien se parte de las evaluaciones hechas a las alternativas en la matriz de evaluación para posteriormente, mediante métodos objetivos, deducir los pesos de cada criterio; o bien, se asigna primero los pesos a los criterios y, en segundo lugar, deducimos los valores de las alternativas. Los primeros reciben el nombre de métodos objetivos y a los segundos suele conocérseles como métodos de asignación directa.

La especialización de los datos se realiza con el fin de obtener un valor de lluvia máxima diaria, correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, el cual luego será calificado de acuerdo con el rango de precipitaciones que se presenta en la Tabla 2. Los rangos de precipitaciones máximas fueron obtenidos del estudio de Susceptibilidad y amenaza del Servicio Geológico Colombiano del 2013 para los departamentos de Tolima, Cundinamarca y Caldas.

Tabla 3. Valores y pesos asignados al parámetro detonante por precipitación

Prec. Max.	CALIFICATI	PESO
< 50	Muy Baja	1
51 - 100	Baja	2
101 - 200	Media	3
201 - 300	Alta	4
> 300	Muy Alta	5

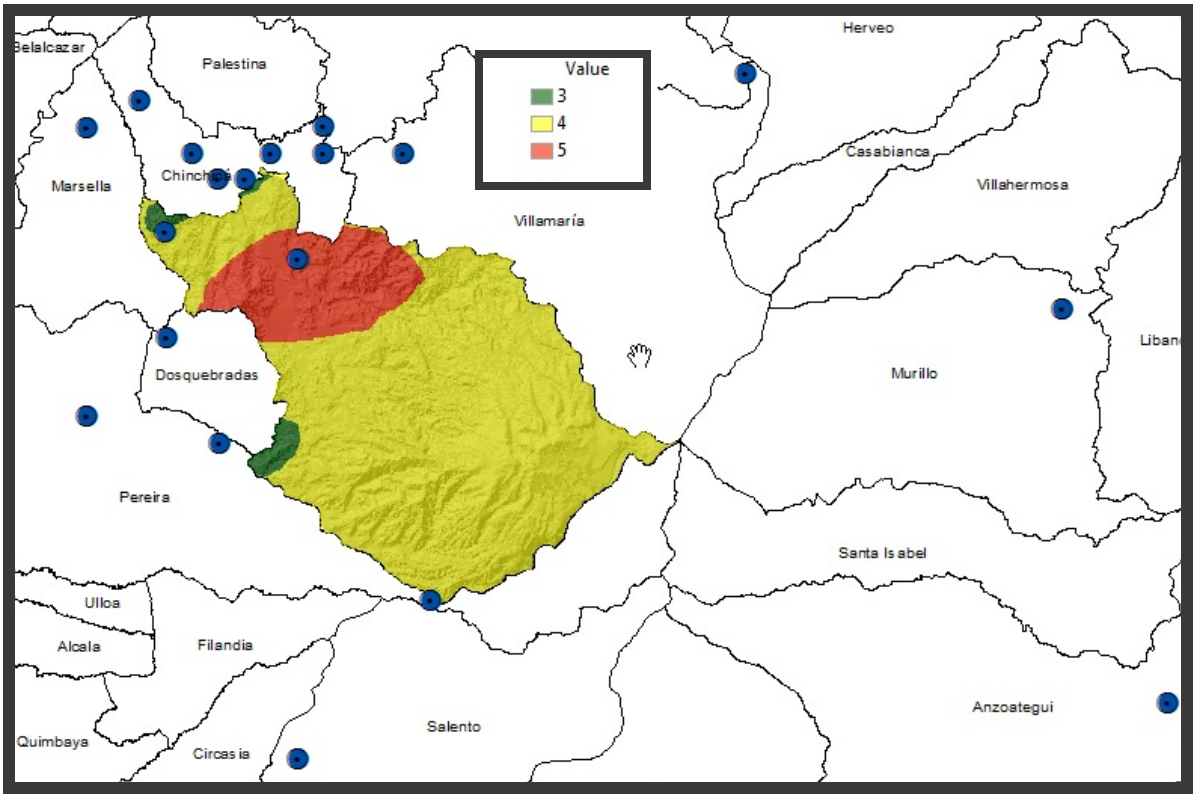


Figura 19. Mapa resultante del análisis del detonante por Precipitaciones Máximas para el cálculo y estudio de la amenaza por deslizamiento en el municipio de Santa Rosa de Cabal. Fuente: Elaboración Propia

Generalmente los movimientos en masa están asociados a las lluvias, es por esto que diversos autores han abordado el tema desde diferentes puntos de vista, tal como se describe en Guzetti et al. (2007), quien recopiló los parámetros tenidos en cuenta para el cálculo de los umbrales por diferentes autores. Algunos presentan ecuaciones universales independientemente de las condiciones geomorfológicas, litológicas y de uso del suelo, como los propuestos por Caine (1980), otros autores han definido distribuciones espaciales de lluvia como umbrales que detonan eventos relacionados con movimientos en masa. Por tanto, no existe una única metodología aplicada a la evaluación de distribuciones de lluvia como detonantes de fallas en taludes ni se ha usado un único conjunto de medidas de lluvia, razones que conllevan a que los valores

obtenidos no sean siempre comparables, aún para una misma región (Guzetti et al., 2007).

El mapa de precipitaciones máximas resultante está muy ajustado a la realidad, esta afirmación se puede hacer debido a las comparaciones que se logran realizar con el diagnóstico hidrológico del área de influencia de aguas y aguas de Pereira, realizado en agosto de 2014, con influencia en el municipio de Santa Rosa de Cabal, que aunque utilizando metodologías diferentes, describen en la zona la presencia de un ciclo bimodal de lluvias caracterizado por dos temporadas típicamente húmedas correspondientes a los periodos marzo-mayo y octubre-noviembre y dos temporadas típicamente secas correspondientes a los periodos de junio - agosto y diciembre - febrero.

En el mapa de precipitaciones media multianual resultado del Estudio del Balance Hídrico que incluye a los municipios de Cartago, La Virginia, Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal (Ver figura 20) se observa una distribución de lluvias muy relacionable a modelo de precipitaciones máximas del presente trabajo para el municipio de Santa Rosa de Cabal, donde se muestran mayores precipitaciones hacia las zona Este Central y hacia la cabecera del municipio, con lluvias medias hacia los límites con el Departamento de Caldas y tienden a disminuir hacia la zona de paramo.

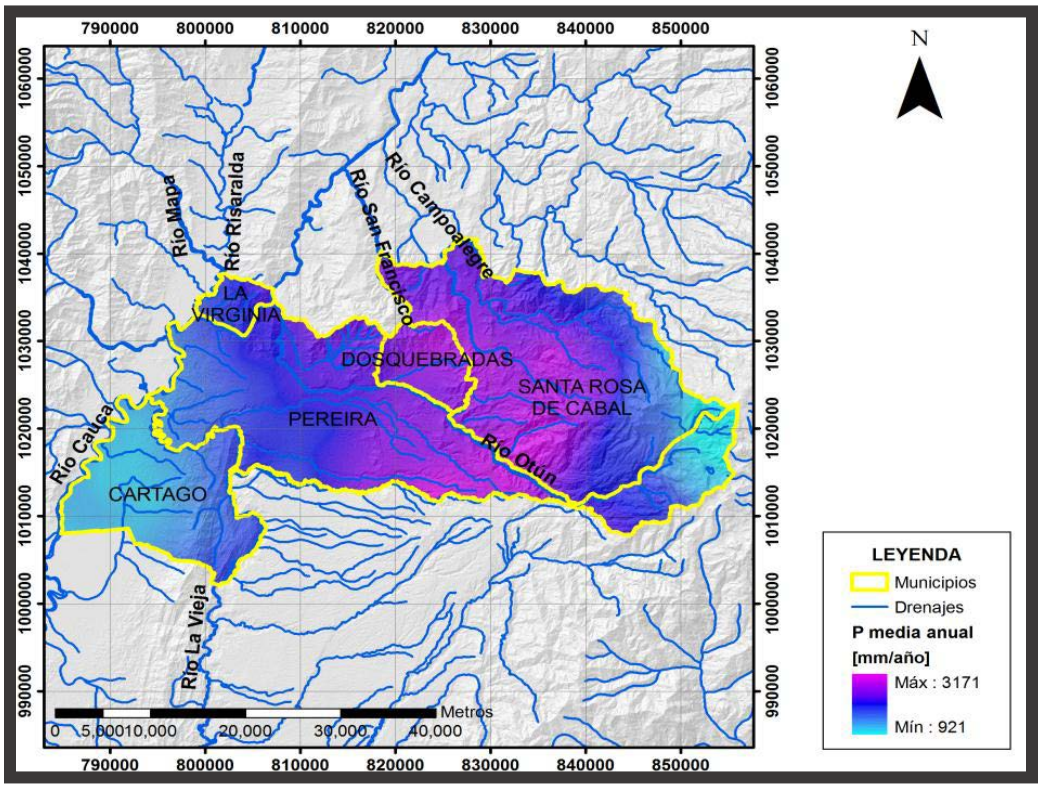


Figura 20. Mapa de precipitación media multianual en la zona de estudio para los registros totales. Tomado de la consultoría para la elaboración del diagnóstico hidrológico del área de influencia de aguas y aguas de Pereira Agosto 2014.

En el Documento del diagnóstico hidrológico hacen mención a la necesidad de continuar con las actualizaciones del Balance Hídrico que incluya nueva información, para de esta forma aumentar el conocimiento y disminuir las incertidumbres con respecto a las respuestas hidrológicas ante fenómenos climáticos y cambios en los usos de los suelos.

En el año 2000 se realizó la base ambiental con énfasis en riesgos del Municipio de Santa Rosa de Cabal, realizando un estudio de precipitaciones con 12 estaciones pluviométricas, los resultados de estudio también demuestra que el modelo de precipitaciones máximas realizadas para el presente trabajo son muy acertadas ya que en este se dice:

En el mapa de Isoyetas de Santa Rosa de Cabal, (Figura 21) desarrollado en el Estudio de Oferta y Demanda Hídrica en la Subregión 1 del departamento (1998), se puede ver que la precipitación en este municipio, varía entre 1.700 y 3.100mm/año, presentando las mayores pluviosidades hacia el centro del municipio en la cuenca media del Río San Eugenio donde se han registrado valores entre 2.700 y 3.100mm/año; y hacia el noroccidente en la cuenca alta del Río San Francisco con valores entre 2.900 y 3.100mm/año. La precipitación tiende a disminuir hacia el suroriente en el Parque Nacional Natural Los Nevados llegando a los 1.700mm/año. La precipitación media anual de todo el municipio es de 2.693mm. La cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal se localiza a una altura promedio de 1.766m.s.n.m. en donde el valor anual multianual de lluvia es de 2.485mm, la media mensual es de 207.1mm.

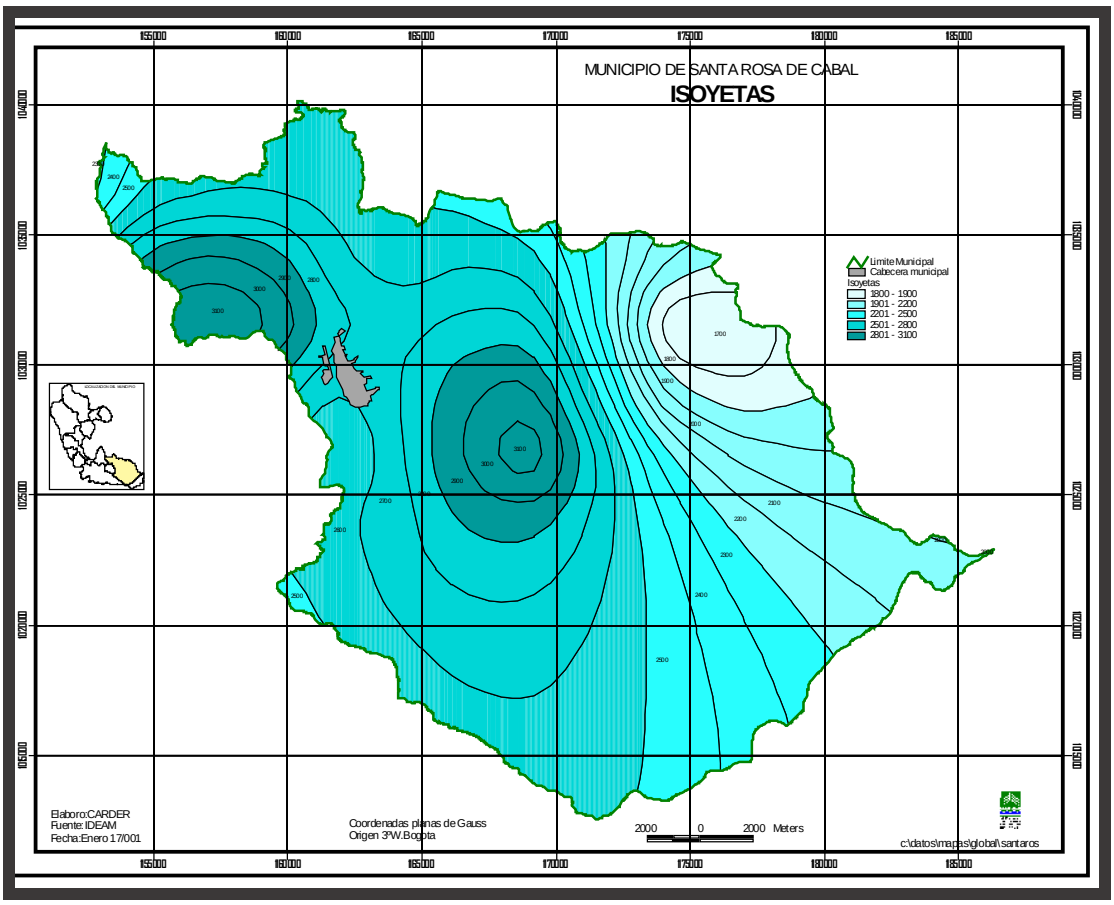


Figura 21. Mapa de Isoyetas. Tomado de base ambiental con énfasis en riesgos del Municipio de Santa Rosa de Cabal, Año 2000.

8 CLASIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Los mapas de zonificación de amenazas por movimientos en masa a nivel nacional son importantes como insumo en la toma de decisiones sobre políticas nacionales para la gestión y reducción del riesgo, siendo además de utilidad para generar acciones que conduzca a la planificación, el desarrollo de infraestructura y la prevención de los desastres.

A partir de lo descrito en el Capítulo 7, La superposición produce un mapa de trabajo denominado Unidades Integradas de Susceptibilidad, que es la suma total de las diferentes variables en diferentes sectores. Estos valores o sectores se agrupan en rangos predeterminados para clasificar la amenaza y generar el mapa final de amenaza por movimientos en masa por zonas homogéneas de acuerdo al siguiente cuadro, véase tabla 3. En la figura 21 se muestra el mapa de amenaza por movimientos en masa para Santa Rosa de Cabal.

Tabla 4. Clasificación de la Amenaza por Movimientos en Masa

CLASIFICACION	RANGO
BAJA	5 - 10
MODERADA	10 - 14
ALTA	14 -21

- **Amenaza Alta:** La intervención para la mitigación de la amenaza no es viable, dadas las características del fenómeno y/o factible según las posibilidades técnico económicas actuales. Se recomienda manejo de usos del suelo y coberturas vegetales.

- **Amenaza Media (Moderada):** La intervención para la mitigación es viable y factible y se deben generar restricciones y consideraciones particulares para el uso de la zona.

- **Amenaza Baja:** Es posible la realización de intervenciones mínimas encaminadas más a los usos del suelo.

El área de cada rango o categoría de amenaza por movimientos en masa de la zona rural de Santa Rosa de Cabal es la siguiente:

Tabla 5.Total de hectáreas bajo Amenazas por Movimientos en Masa

AMENAZA	Área en ha	Porcentaje
BAJA	15741.43	28.92%
MODERADA	26946.05	49.51%
ALTA	11738.50	21.57%
TOTAL	**54426.78**	**100%**

Observando el mapa Reclasificado según los valores de peso, se concluye que la mayor parte del territorio de Santa Rosa de Cabal se encuentra clasificado como zona Moderada de precipitación media anual calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa, La zona de clasificación alta se centra hacia la cabecera municipal y sus alrededores.

Los anteriores rangos de clasificación cualitativa de la amenaza por movimientos en masa, se determinaron de acuerdo al decreto ley 1807 de septiembre de 2014

8.1 Cálculo del mapa de amenaza por movimientos en masa mediante Raster

Las modelaciones para la zonificación de amenaza por movimientos en masa se pueden adoptar de acuerdo con los requerimientos en niveles preliminares, intermedio o avanzado, con lo cual se puede definir un procedimiento heurístico, estadístico, estocástico o determinístico, es decir puede dárseles diferentes enfoques y metodologías. Generalmente, se considera necesario contar con un análisis de la distribución temporal y espacial de movimientos en masa que permita estimar probabilidades de ocurrencia de los mismos.

Un mapa de amenazas debería contener el tipo de proceso, la localización, el potencial de daño que pueda causar, ya sea expresado en términos de su magnitud (volumen) o de su intensidad; y la posibilidad de su ocurrencia, ya sea expresada cualitativamente

en términos de posibilidad (alta, media o baja) o cuantitativamente en términos de frecuencia o probabilidad (PMA:GCA, 2007). A nivel nacional la identificación de los atributos anteriormente mencionados son limitados debido a la falta de registros históricos completos de movimientos en masa.

En la zona existe una disponibilidad limitada de información climatológica (precipitación y caudales) lo que restringe la simulación hidrológica, igual sucede con la información sismología la cual es muy general y se requiere de una red de mayor densidad tanto de meteorología como de sismicidad.

Para el área del municipio de Santa Rosa de Cabal, se obtuvo primeramente el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa (tomado del Documento Técnico soporte del Plan de Ordenamiento Territorial de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, de Santa Rosa de Cabal, elaborado por el Geólogo Juan Manuel González Castaño, en abril de 2015) y a este resultante se le suma el mapa de precipitaciones (detonantes). Para este estudio se sigue la siguiente ecuación:

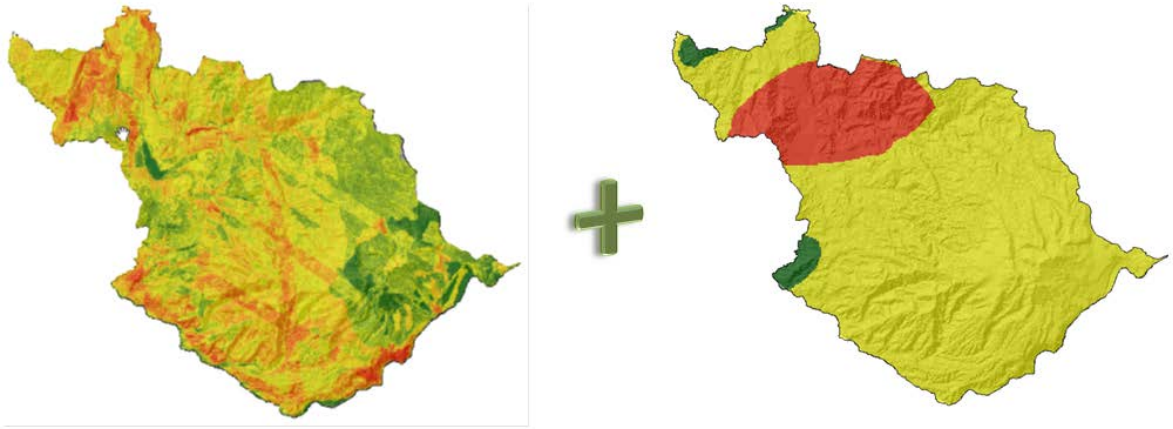
$$A = St + Dp \quad (1)$$

Dónde:

A= Amenaza

St=Susceptibilidad

Dp= Detonante por precipitación



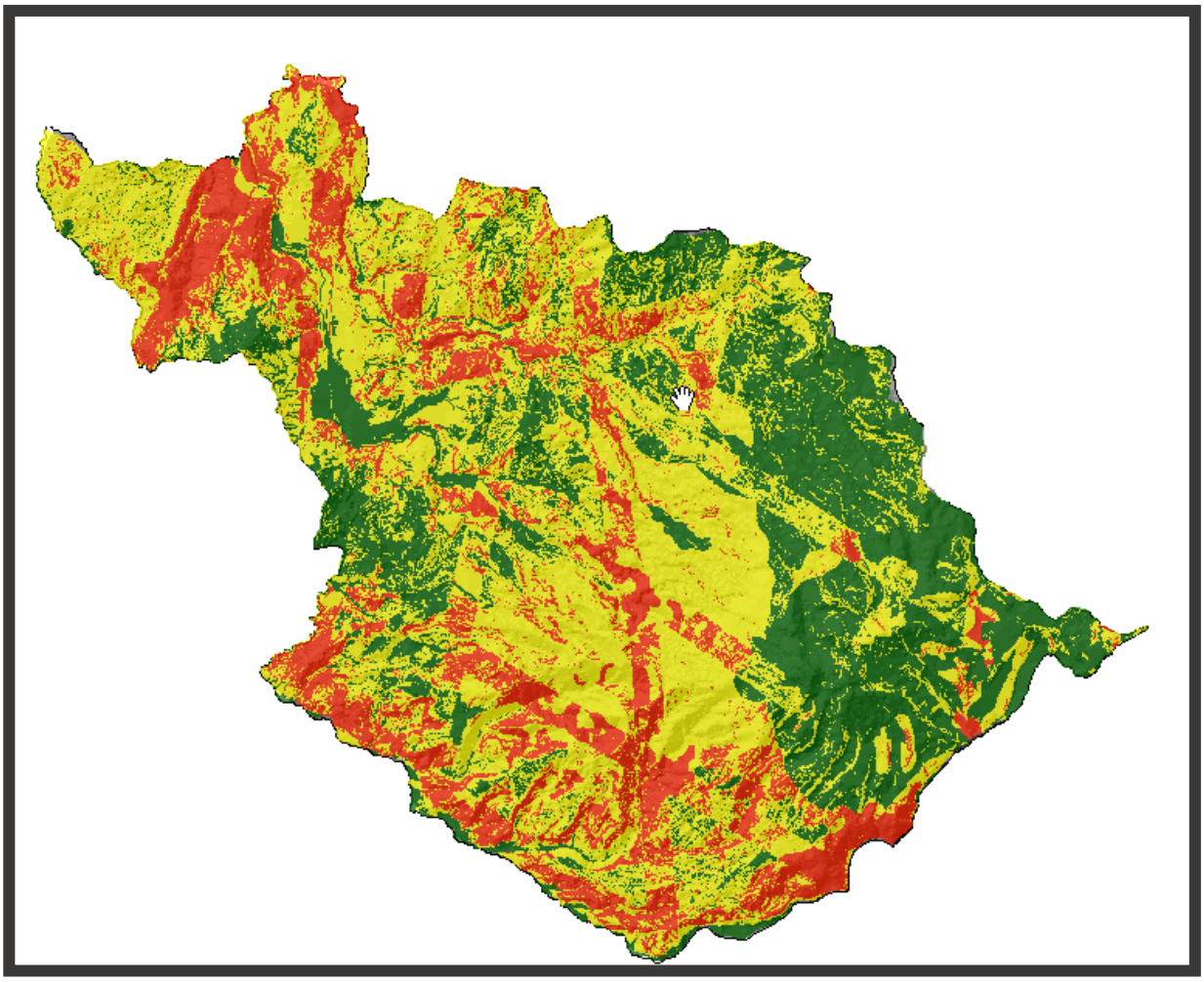


Figura 22. Amenaza por movimientos en masa Municipio de Santa Rosa de Cabal

Fuente: Elaboración propia.

Estos escenarios muestran la contribución del detonante por precipitaciones máximas tiene sobre las zonas susceptibles a los movimientos en masa, involucrando los demás indicadores, obtenidos de la observación e información secundaria, en cuanto a los tipos de procesos y daños que se pueden originar, así como de otras causas contribuyentes a las condiciones de inestabilidad.

Con el mapa obtenido se pudo determinar que el 28.97 % del área de estudio se encuentra con amenaza baja mientras que el 49.51% con amenaza media y un 21.57% se encuentran en amenaza alta.

La Amenaza alta fue identificada en zonas altamente inestables con pendientes escarpadas. Se evidencian procesos de deforestación, deslizamientos, flujos, reptación entre otras. Corresponde a las áreas de cruce de fallas, especialmente con orientación norte – sur, entre ellas: Santa Ana, Cocinas, Carmen, de Río Colorado y de Cocinas. Los suelos son superficiales a muy superficiales con altos contenidos de arcillas y contenido de materia orgánica medio a muy bajo. Con precipitaciones entre 200 y 300 mm por día.

La Amenaza baja se encuentra en zonas estables, con pendientes planas a inclinadas, prácticas adecuadas en manejo y uso del suelo. Presencia de altos contenidos de materia orgánica, suelos profundos con texturas francas. Con precipitaciones entre 50 y 100 mm por día. En zonas cercanas a ríos pueden darse procesos de socavación lateral que pueden generar inestabilidad en las laderas.

La Amenaza Media de estas zonas se caracteriza por tener pendientes inclinadas y contenidos medios de materia orgánica. La forma de la ladera es recta y los suelos son superficiales con texturas franco arcillosas y franco arenosas. Con precipitaciones entre 100 y 200 mm por día.

Los resultados obtenidos, demuestran que el método es eficiente como herramienta para la identificación de áreas bajo amenaza a movimientos en masa, el uso del SIG permite relacionar y analizar las diversas variables que inciden en los fenómenos de remoción en masa, para llevar a cabo el análisis multicriterio.

La diversidad de condiciones físico naturales que están presentes en la zona hace que sea propensa a diferentes grados de amenazas por movimientos en masa, por lo tanto es perentorio crear políticas y recomendaciones que permitan minimizar o mitigar el impacto de estas amenazas, así como, considerar al momento de establecer en su

territorio asentamientos de población y actividades económicas, además se deben definir las orientaciones para la disminución del riesgo existente y su gestión.

Se trataron de relacionar estudios anteriores que permitieran una comparación del modelo realizado en este trabajo, pero no se cuenta gran cantidad de trabajos de este tipo. En el documento base ambiental con énfasis en riesgos del año 2000 se encuentra un mapa de amenaza por deslizamientos (ver Figura) clasificado en 5 rangos de amenaza, muy baja, baja, media, alta y muy alta, según el mapa la amenaza por deslizamientos para el Municipio de Santa Rosa de Cabal Seria Entre Media y Alta, el problema encontrado con este modelos es la falta de información sobre cómo se llegó a este resultado, métodos e información recolectada para llegar a dicho calculo, el otro inconveniente se encuentra en la fecha de elaboración, ya que su fecha de elaboración es del año 1994 fechas en las que no se contaban con las herramientas necesarios ni con un adecuados desarrollo de Software y tecnologías geoespaciales que permitieran una análisis adecuado de la información, además si para estos momentos la información existente sobre varios aspectos como estaciones meteorológicas son deficientes para ese entonces esta información debió ser casi nula.

9 Conclusiones y Recomendaciones

- Según los resultados obtenidos por sistemas de información Geográfica (SIG), demuestran la problemática y la influencia que genera la variable de precipitación, que mayor valor de lluvia máxima diaria, mayor saturación y por ende, mayor probabilidad de que se generen procesos de inestabilidad en las laderas. Esto queda demostrado en el mapa de amenazas donde coinciden la amenaza alta con las lluvias máximas localizadas para el municipio.

- El proceso de cálculo con la técnica Geoestadística del Kriging Ordinario realizado con ayuda de la herramienta Geostatical Wizard de ArcGis para la determinación del mapa de precipitaciones máximas, da una predicción muy acertada y lógica de la distribución de las precipitaciones máximas, además de ser acordes con la realidad, las zonas con bajas precipitaciones se encuentran registradas hacia la zonas de alta montaña en límites con el nevado santa Isabel, área donde por sus condiciones atmosféricas las precipitaciones son muy pocas; las mayor concentración de lluvias máximas en el modelo están ubicadas hacia el oriente del Municipio, Lugar donde geográficamente se ubica la cabecera municipal donde se tienen reportes y estudios anteriores donde se identifica que esta es la zona más lluviosa del total de área que cubre al Municipio.

- Otros resultados que se pueden sacar del análisis de SIG, indican la importancia del factor litológico y de las pendientes en la determinación de los niveles de amenaza para el área estudiada, donde los valores de amenaza alta se localizan en la zona Nor-Occidental y en otros sectores que presentan una amenaza alta por movimientos en masa corresponde a las áreas de cruce de fallas, especialmente con orientación Norte-Sur.

- Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten el análisis de las precipitaciones máximas, susceptibilidad y amenaza a los movimientos en masa, así como la elaboración de mapas de precipitaciones máximas, susceptibilidad y amenaza de manera sistemática, rápida y eficiente. Ello ha posibilitado tratar las bases de datos y realizar cálculos para la estimación de la susceptibilidad en grandes áreas.

- Las modelaciones para la zonificación de amenaza por movimientos en masa se pueden adoptar de muchas formas, de acuerdo con los requerimientos en niveles preliminares, intermedio o avanzado, con lo cual se puede definir un procedimiento heurístico, estadístico, estocástico o determinístico, es decir puede dárseles diferentes enfoques y metodologías. Para este estudio se utilizaron métodos heurísticos y estadísticos que por los resultados obtenidos demuestran ser métodos lógicos y aplicables en la generación de la clasificación de Movimientos en masa. Por tanto, no existe una única metodología aplicada a la evaluación de distribuciones de lluvia como detonantes de fallas en taludes ni se ha usado un único conjunto de medidas de lluvia, razones que conllevan a que los valores obtenidos no sean siempre comparables, aún para una misma región.

- Para lograr un modelo más acertado se debería tener un inventario de los movimientos en masa, además de su registro histórico, que permitan la identificar las características de los eventos, su distribución espacial y temporal y su relación con los demás factores detonantes. A nivel nacional la identificación de los atributos anteriormente mencionados son limitados debido a la falta de registros históricos de movimientos en masa.

- Analizando la importancia que tienen los factores desencadenantes que son aquellos que inician el movimiento y la ladera llega a ser inestable como las lluvias intensas, sacudidas sísmicas; otro detonante a tener en cuenta seria la intervención antrópica, donde se deben identificar los cortes de terreno, taludes,

rellenos y demás accidentes del terreno que intervienen en la estabilidad. Estudios que se salen del alcance y objetivos de este trabajo, pero que ayudaría en el ajuste y mejoramiento de los resultados obtenidos.

- Los mapas de zonificación de amenazas por movimientos en masa a nivel nacional son importantes como insumo en la toma de decisiones sobre políticas nacionales para la gestión y reducción del riesgo, siendo además de utilidad para generar acciones que conduzcan a la planificación, el desarrollo de infraestructura y la prevención de los desastres. Cuanto más exhaustivos sean los estudios técnicos y científicos realizados sobre el medio físico de un territorio, mejores herramientas de trabajo tendrán las administraciones para tomar decisiones y, por lo tanto, mayor grado de seguridad y de desarrollo presentarán los habitantes que lo pueblan.

- Las variables de geológica, suelos, topográfica y geomorfológica propuestas en la metodología para la evaluación de la susceptibilidad y la amenaza por inundación y FRM, junto con la evaluación de los detonantes precipitación y sismicidad, posibilitan su aplicación en cualquier espacio geográfico. Para la obtención del mapa de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa se aplicó la metodología heurística AHP que evaluó y calificó las variables geológicas, geomorfológicas, de suelos y cobertura de la tierra, las cuales se procesaron en una herramienta SIG, utilizando una estructura de datos Raster.

- Observando el mapa Reclasificado de precipitaciones, según los valores de peso, se concluye que la mayor parte (49.51%) del territorio de Santa Rosa de Cabal se encuentra clasificado como zona media de precipitación media anual calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa, La zona de clasificación alta que representa el 21.57% se centra hacia la cabecera municipal y sus alrededores.

- Se hace necesario la revisión y seguimiento del balance hídrico del municipio De Santa Rosa de Cabal, que aporte nueva información, pues de esta forma aumenta el conocimiento y disminuye las incertidumbres con respecto a las respuestas hidrológicas ante fenómenos climáticos y cambios en los usos del suelo.

- El procedimiento utilizado en la asignación de pesos a las diferentes variables consideradas en el análisis permite establecer un orden de importancia relativa de cada una de ellas en relación con la explicación de la ocurrencia de movimientos en masa. Sin embargo por la naturaleza del procedimiento, los resultados obtenidos son válidos en el contexto del territorio donde se realiza la evaluación. La extrapolación de los resultados hacia unidades de carácter similar no puede realizarse de manera directa, sin que medie un proceso de validación.

- El análisis de las precipitaciones máximas y la zonificación de amenaza por movimientos en masa, se convierte como un buen insumo para la toma de decisiones a nivel Municipal, y para la identificación de zonas susceptibles a presentar movimientos en masa, con el objetivo de acometer estudios de mayor detalle.

Bibliografía

AGUAS Y AGUAS. (2014). Consultoría para la elaboración del diagnóstico hidrológico del área de influencia de Aguas y Aguas de Pereira.

A., D. C. (1978). Tablas de distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel y tablas de coeficiente para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas.

CARDER. (2000). Base ambiental con énfasis en riesgo, Municipio de Santa Rosa de Cabal. Pereira.

CARDER. (2000). Base ambiental con énfasis en Riesgos Municipio de Santa Rosa de Cabal. Pereira.

CORANTIOQUIA. (2002). Mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA. Medellín.

CORPOCALDAS. (2012). Identificación y análisis de amenazas para evaluar y riesgo de las cuencas hidrográficas de los ríos Arma y Campoalegre y los aferentes directos a los Ríos Cauca y Magdalena. Manizales.

Corporación Universitaria Lasallista. (2014). Manual para la presentación de trabajos de grado. Itagüí, Colombia.

Cuanalo, O. A. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas en Puebla, México. Puebla, México.

E., S. (1995). Metodología de taludes naturales (MTN), principios y aplicaciones de la sociedad colombiana de geotecnia. Bogotá.

ESRI. (2010). Geostatistical Analyst Tutorial.

Gómez, N. (2013). SIG para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca del Río Campoalegre. Manizales.

IGAC. (2014). Memoria explicativa del mapa de susceptibilidad del terreno a la generación de fenómenos de remoción en masa e inundaciones. Bogotá.

Meteorología, I. N. (1999). Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus periodos de retorno en España. Un estudio por regiones. Cataluña, España.

Ministerio de Fomento. (1999). Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.

Moreno, A. (2008). Sistemas y análisis de la información geográfica. México: Alfaomega RA-MA.

Sánchez, F. J. (2013). Cálculos Estadísticos en Hidrología. Salamanca, España.

Sánchez, F. J. (2013). Gráficos de probabilidad. Salamanca, España.

Servicio Geológico Colombiano. (2014). Guía Metodológica para estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá.

Servicios Hidrogeológicos integrales S.A.S. (2014). Elaboración del diagnóstico hidrológico del área de influencia de aguas y aguas de Pereira. Medellín.

Servicio Geológico Colombiano. (2013). Memoria explicativa de zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa, Escala 1:100.000, Plancha 207- Honda, Departamentos de Tolima, Cundinamarca y Caldas. Bogotá.

Suarez, j. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Santander.

Vidal, J. N. (2012). Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante S.I.G. en el municipio de Berlín, El Salvador. Berlín, El Salvador.