

Comparación métodos heurístico y estadístico bivariado para zonificar la
susceptibilidad por deslizamientos, subzona hidrográfica río Tapias y
aférentes al Cauca

Blanca Adielá Ramírez Correa
Valentina Rodríguez Londoño



Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, noviembre de 2017

Comparación métodos heurístico y estadístico bivariado para zonificar la
susceptibilidad por deslizamientos, subzona hidrográfica río Tapias y
afuerentes al Cauca

Blanca Adielá Ramírez Correa
Valentina Rodríguez Londoño

Trabajo de grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, noviembre de 2017

Contenido

Glosario.....	6
Marco Conceptual	11
Introducción.....	11
Área problemática	12
Pregunta central	14
Delimitación.....	15
Formulación de objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos.....	20
Justificación.....	21
Marco Teórico	23
Tipos de zonificación	23
Movimientos en masa.....	24
Clasificación de los movimientos en masa.	24
Causas.....	24
Zonificación de amenaza y riesgo	29
Métodos de zonificación.....	30
Método Heurístico.....	30
Asignación de pesos en el SIG.....	33
Antecedentes	38
Marco Metodológico	40
Tipo de trabajo.....	40
Procedimiento.....	40
Resultados	75
Resultados obtenidos - valoración de la susceptibilidad - método heurístico.....	75
Resultados obtenidos - valoración de la susceptibilidad - método estadísticos bivariado	82
Discusión de resultados	87
Conclusiones	89
Recomendaciones	90
Referencias	91

Lista de figuras

Figura 1.	Localización general de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca, en el departamento de Caldas	17
Figura 2.	DEM 30m con la red de drenaje principal	18
Figura 3.	Localización general de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca	19
Figura 4.	Uso de SIGs para combinación cualitativa de mapas	33
Figura 5.	Uso de SIGs para el análisis estadístico Bivariado, en la elaboración de mapas de susceptibilidad	35
Figura 6.	Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa en la subzona hidrográfica del río Tapias y otros aferentes directos al Cauca, por el método heurístico.	79
Figura 7.	Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en la subzona hidrográfica del río Tapias u otros aferentes directos al Cauca, por el estadístico bivariado	84

Lista de tablas

Tabla 1.	Municipios presentes en la cuenca del Rio Tapias y sus afluentes al Cauca	16
Tabla 2.	Área total de la subzona hidrográfica	16
Tabla 3.	Tipos de movimientos en masa	26
Tabla 4.	Asignación de variable y valores de peso	43
Tabla 5.	Valoración de la Susceptibilidad por movimientos en masa método heurístico	62
Tabla 6.	Cuantificación de la susceptibilidad método heurístico	65
Tabla 7.	Área total en Ha de cada una de las clases del mapa de geología superficial	66
Tabla 8.	Área total en Ha de cada una de las clases del mapa de usos del suelo	68
Tabla 9.	Área total en Ha de cada una de las clases del mapa geomorfológico	69
Tabla 10.	Área total en Ha de cada una de las clases del mapa de pendientes	69
Tabla 11.	Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos en cada una de las clases (ApeCi) mapa geología superficial	70
Tabla 12.	Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos en cada una de las clases (ApeCi) mapa usos del suelo	71
Tabla 13.	Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos en cada una de las clases (ApeCi) mapa de geomorfología.	72
Tabla 14.	Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos erosivos en cada una de las clases (ApeCi) mapa de pendientes.	72
Tabla 15.	Valoración de la susceptibilidad por movimientos en masa método estadístico Bivariado	73

Glosario

Amenaza: peligro latente asociado con la posible ocurrencia de uno o varios fenómenos o eventos de origen natural, social o tecnológico, o provocados por el hombre, que pueden presentarse en un sitio específico y por un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, bienes y/o el ecosistema. La amenaza se caracteriza por estar asociada a una probabilidad de ocurrencia, tener un sitio de afectación y una intensidad particular.

ArcGIS: software de sistemas de información geográfica desarrollado por el Environmental Research Institute Systems (ESRI).

Cartografía: ciencia que tiene por objeto la realización de mapas, y comprende el conjunto de estudios y técnicas que intervienen en su establecimiento.

Cuenca hidrográfica: constituye un espacio físico delimitado por la propia naturaleza y principalmente por los límites que imponen las zonas de escurrimiento de las aguas superficiales convergiendo hacia un mismo cauce y conformando el curso de un río.

Geodatabase: es el almacenamiento físico de la información geográfica, que principalmente utiliza un sistema de administración de bases de datos (DBMS) o un sistema de archivos. Puede acceder y trabajar con esta instancia física del conjunto de datasets a través de ArcGIS o mediante un sistema de administración de bases de datos utilizando SQL.

Gestión del riesgo: proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento de riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción.

GIS: Geographic Information System o SIG, sistema de información geográfica. Un SIG captura, almacena, analiza, gestiona y representa datos vinculados a una locación.

Heurístico: el arte de idear por parte de los seres humanos, con la intención de procurar estrategias, métodos, criterios, que permitan resolver problemas a través de la creatividad, pensamiento divergente o lateral. También, se afirma que la heurística se basa en la experiencia propia del individuo, y en la de otros, para encontrar la solución más viable al problema.

Mapas temáticos: son mapas basados en mapas topográficos que representan cualquier fenómeno geográfico de la superficie terrestre. Persiguen objetivos bien definidos. Hacen referencia a la representación de ciertas características de distribución, relación, densidad o regionalización de objetos reales (vegetación, suelos, geología, etc.), o de conceptos abstractos (indicadores de violencia, de desarrollo económico, de calidad de vida, etc.).

Movimientos en masa: incluye todos aquellos movimientos ladera abajo o de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. Científicamente posee muchas clasificaciones, la mayoría se basa en el tipo de material, los mecanismos de falla, el grado de deformación del material y el grado de saturación.

Pendientes: se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje. Se relaciona con los movimientos en masa, de manera que a mayor el grado de pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa.

POMCA: es el instrumento a través del cual se realiza la planeación del adecuado uso del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna; y el manejo de la cuenca, entendido como la ejecución de obras y tratamientos, con el propósito de mantener el equilibrio entre el aprovechamiento de los recursos, así como la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente del recurso hídrico.

POT: es una herramienta de planeación para el desarrollo físico del territorio. Un POT se define como el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas adoptadas para orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo. Señala pues los derroteros de las diferentes acciones urbanísticas posibles que pueden emprenderse.

Susceptibilidad: es la predisposición de un lugar a presentar determinados fenómenos amenazantes. Estas condiciones del terreno son intrínsecas, como la geología, la pendiente, la geomorfología, entre otras. Aunque se espera que los movimientos en masa ocurran con más frecuencia en la mayoría de las zonas susceptibles, en los análisis de susceptibilidad no se tiene en cuenta el tiempo de recurrencia.

Zonificación: es parte del proceso de ordenamiento territorial. Consiste en definir zonas con un manejo o destino homogéneo que en el futuro serán sometidas a normas de uso a fin de cumplir los objetivos para el área. El modelo de zonificación es útil para distintos tipos de uso seleccionados, lo que implica una homogenización previa de las variables a detectar en terreno, y un trabajo claro con respecto a la recopilación y análisis de esa información.

Resumen

Mediante este trabajo se pretende hacer una validación y análisis de dos métodos utilizados para la zonificación por susceptibilidad de movimientos en masa para la Subzona Hidrográfica del Río Tapias y otros directos al Cauca, utilizando la información suministrada por Corpocaldas, mediante el contrato de consultoría No. 194-2014 adjudicado a la firma consultora LR ambiental SAS. Para ello, se decidió realizar una comparación metodológica, ya que en la mayoría de estos estudios se hace a través del método de zonificación heurístico.

Se realizaron los mapas de susceptibilidad por movimientos en masa, utilizando la información de este estudio y dos métodos de zonificación diferentes como son el método heurístico vs método estadístico bivariado. Igualmente, se utilizaron herramientas espaciales de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para hacer la superposición de las variables de interés como pendiente, geología, geomorfología, usos del suelo. Con ayuda del software ArcGIS, se diagramó el mapa de zonificación por susceptibilidad que la clasifica en alta, media y baja. Y al hacer la comparación se identifica que el método estadístico bivariado es mucho más preciso que el heurístico, porque minimiza la subjetividad y muestra la generación de zonas con mejor exactitud y detalle.

Palabras clave: heurístico, zonificación, SIG, estadístico bivariado, susceptibilidad.

Abstract

This work aims to do a validation and analysis of two mass movements susceptibility zoning methods, carried out for river Tapias hydrographic subzone and other direct drainages to the Cauca river, using information provided by Corpocaldas, through consultancy contract No. 194-2014, awarded to an environmental consultancy firm LR SAS. For this purpose it was decided to make a methodological comparison, taking into account that most of these studies are made through the heuristic zoning method.

Maps of mass movements susceptibility were produced using the information from this study and using two different zoning methods, which are the heuristic zoning method and the bivariate statistical method. Equally, spatial analysis tools of Geographic Information System (GIS) were used in order to overlap variables of interest such as gradient, geology, geomorphology and land uses. With help of ArcGis software was designed the susceptibility zoning map, which classifies it in high, medium and low. The results of the study showed that the bivariate statistical method is much more precise than the heuristic method, because it minimizes subjectivity and shows the generation of areas with better accuracy and detail.

Key Words: Heuristic, Zoning, GIS, Bivariate statistical, Susceptibility.

Marco Conceptual

Introducción

Las cuencas hidrográficas proporcionan diversos servicios fundamentales en su espacio-territorio (agua, suelo, fauna, flora, aire, etc.), los cuales satisfacen las necesidades humanas. Sin embargo, tienen hoy en día un deterioro ambiental importante, principalmente sobre los recursos renovables indispensables como son el agua y el suelo. El agua, en particular, tiene grandes afectaciones en calidad y en disponibilidad; por estas razones ha cobrado especial relevancia implementar acciones para su adecuada gestión, que busca ordenarla y desarrollarla de manera integral y sostenible.

Es por ello que siguiendo lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en la Guía Técnica para la elaboración de los Planes de Ordenamiento y Manejo de las Cuencas Hidrográficas (en adelante POMCAS), expedida en diciembre de 2013 y la cual fue elaborada por la Dirección de Gestión Integral de Recurso Hídrico, se solicita liderar a nivel regional, por la Corporaciones Autónomas Regionales, la elaboración de los POMCAS del país, haciendo un análisis integral de las problemáticas del territorio y ambientales, para posibilitar un marco apropiado que lleve a una mejor comprensión y que desarrolle medidas de planificación, para mitigar o corregir los efectos adversos causados principalmente por las intervenciones antrópicas.

Para el caso del departamento de Caldas, los POMCA se encuentran en construcción y/o revisión. Corpocaldas, mediante el contrato de consultoría No. 194-2014 adjudicado a LR ambiental SAS, contrató la fase de diagnóstico para la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca, siguiendo los lineamientos del decreto 1640 de 2012, Título IV, de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas

Hidrográficas, y las guías adoptadas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante resolución 1907 de 2013.

La subzona hidrográfica (SZH) del río Tapias y otros directos al Cauca se caracteriza por ser una cuenca atípica, de alta complejidad, debido a componentes como la topografía, la geología, la morfología y factores que inducen las intervenciones humanas. Es por esto que se considera importante revisar las metodologías de zonificación implementadas para determinar la susceptibilidad por movimientos en masa, aplicando algunos métodos de zonificación, método heurístico vs método estadístico bivariado, de los Sistemas de Información Geográfica (en adelante SIG) que permiten una comparación de dichas metodologías que pueden servir para validar los POMCA, antes de su aplicación por los entes territoriales.

Área problemática

El Gobierno Nacional reglamentó durante el año 2012, la Ley 1523, "por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones". Estableció, además, que a los planes de ordenamiento territorial deberá integrarse el análisis del riesgo en el diagnóstico biofísico, económico y socio-ambiental y considerar el riesgo de desastres como un condicionante para el uso y la ocupación del territorio, procurando de esta forma evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo. De igual manera, mediante el Decreto 1807 de 2014 (por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones), establece la metodología de incorporación del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Para dar cumplimiento a esta normatividad, a nivel nacional se deben realizar los estudios necesarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

La Corporación Autónoma Regional de Caldas se ha hecho acreedora a una buena reputación por ser líder en la gestión del riesgo no solamente a nivel local, o

regional, sino nacional. Por ello, atendiendo las disposiciones gubernamentales ha adelantado los estudios de los POMCAS para el departamento de Caldas, los cuales son un instrumento indispensable para los POT en los municipios.

La zona Norte del Departamento de Caldas se considera de alta complejidad por su configuración geográfica y física donde se aprecian diversos rasgos morfológicos, geológicos y estructurales, que, a su vez, hacen que sea una zona de alto interés biológico, hidrológico, socio-económico y cultural.

De las variables de riesgo, más representativa, que presenta la cuenca del río Tapias y sus afluentes al Cauca, es la de Movimientos en Masa, principalmente si se tiene en cuenta que uno de los factores detonantes de los mismos son las actividades antrópicas, que dejan los suelos susceptibles a la erosión por las actividades agrícolas (cultivos limpios), agropecuarias (ganadería extensiva) y las extractivas como la minería y la deforestación, entre otras.

Para el análisis de la cuenca en mención, se van a contrastar dos métodos de zonificación: el método heurístico, que fundamentalmente se basa en la experiencia de los expertos para categorizar y ponderar los factores causales, y el método estadístico bivariado, en el que los factores condicionantes se combinan con la frecuencia de los movimientos en masa, que permitirán identificar elementos comunes y diferenciadores en relación con el fenómeno que ocupa este estudio.

La importancia del ordenamiento de las cuencas hidrográficas, como la aplicación de los métodos de zonificación como instrumento para su gestión, desarrollo y control, han impulsado tanto a nivel nacional como internacional varios estudios importantes. Internacionalmente Walter Chamocho, en el año 2005 y siguientes, ha realizado todo un estudio sobre las “Problemáticas ambientales y la necesidad del ordenamiento de las cuencas hidrográficas en la región Andina”. En este se evidencia como un problema común en los países andinos, los cuales están asentados en las áreas geográficas más extensas de la región, cuya configuración biogeográfica se considera compleja y heterogénea. La manipulación no integrada de este espacio-

territorio en sus componentes puede definir problemas agudos e igualmente generar beneficios circunstanciales.

Recientemente a nivel nacional, Gonzales Gómez realizó para la Universidad EAFIT un trabajo cuyo objeto fue: “Comparar entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa, a escala 1:25.000, en el municipio de Santa Bárbara, departamento de Antioquia”, concluyendo que, por la importancia de estos estudios para el desarrollo y crecimiento ordenado de las sociedades y los territorios, se debe procurar utilizar métodos cuantitativos en los que la determinación no quede bajo un criterio subjetivo de expertos, ya que los resultados obtenidos, a través de los tres métodos, definen que el método estadístico bivariado es, entre los referidos, el que mejor representa la realidad de la zona de estudio. Ello en relación con las variables que considera, y la información que se deriva a partir de los análisis amplios que considera tal método.

Son estas algunas de las consideraciones teórico-conceptuales-investigativas que sustentan el sentido del proceso investigativo que se propone en relación de cotejar dos métodos de análisis, el heurístico vs estadístico bivariado, en relación con la subzona hidrográfica del río Tapias y otros aferentes directos al Cauca.

Pregunta central

¿Cuál de los dos métodos propuestos, heurístico o estadístico bivariado, para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros aferentes directos al Cauca, refleja, de manera más óptima, la realidad de la cuenca para la estructuración del POMCA?

Delimitación

Del Tomo 1 de la Fase de Diagnóstico para el POMCA, de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca, se tiene la siguiente localización:

El área bajo estudio se extiende sobre la vertiente occidental de la cordillera Central Colombiana, en el sector norte del departamento de Caldas, con una superficie total de 1.390 km². Geográficamente, la subzona hidrográfica limita al occidente con el río Cauca; al norte y nororiente con la divisoria de aguas que enmarca a la cuenca de río Arma; al oriente con la divisoria de río San Félix, río Guarinó y la quebrada Saldo; y al sur y suroriente con la divisoria de aguas de las cuencas del río Chinchiná, río Guacaica y río Perillo (Figura 2)

La zona cuenta con elevaciones mínimas de aproximadamente 650 m.s.n.m. en el río Cauca, incrementándose hacia el este, gradualmente, a medida que asciende sobre la cordillera, alcanzando valores máximos de 3.800 m.s.n.m. en su extremo este, en el nacimiento de los ríos Tapias, Chamberí y Pocito, cerca al límite entre los municipios de Marulanda, Salamina, Aranzazu y Neira, características que se evidencian en las tablas 1 y 2.

La subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca está conformada por cinco (5) subcuencas y seis (6) microcuencas directas al Cauca. Los datos que se relacionan en las tablas 1 y 2 se complementan con las figuras 1, 2 y 3.

Tabla 1.

Municipios presentes en la cuenca del río Tapias y sus afluentes al Cauca

Municipio	Distribución espacial
Aguadas	Parcialmente, costado suroccidental
Pácora	Incluye corregimientos San Bartolomé y Castilla. Exceptuando la zona alta de la cordillera (cuenca río Arma)
Salamina	Exceptuando San Félix, que pertenece a la cuenca río Guarinó
La Merced	Totalmente
Aranzazu	Totalmente
Filadelfia	Totalmente
Neira	Parcialmente en su costado norte, hasta la divisoria de aguas de la cuenca del río Guacaica
Manizales	Parcialmente en el sector Km. 41 territorios que corresponden a la subcuenca de la quebrada Llano Grande

Fuente: Construcción propia

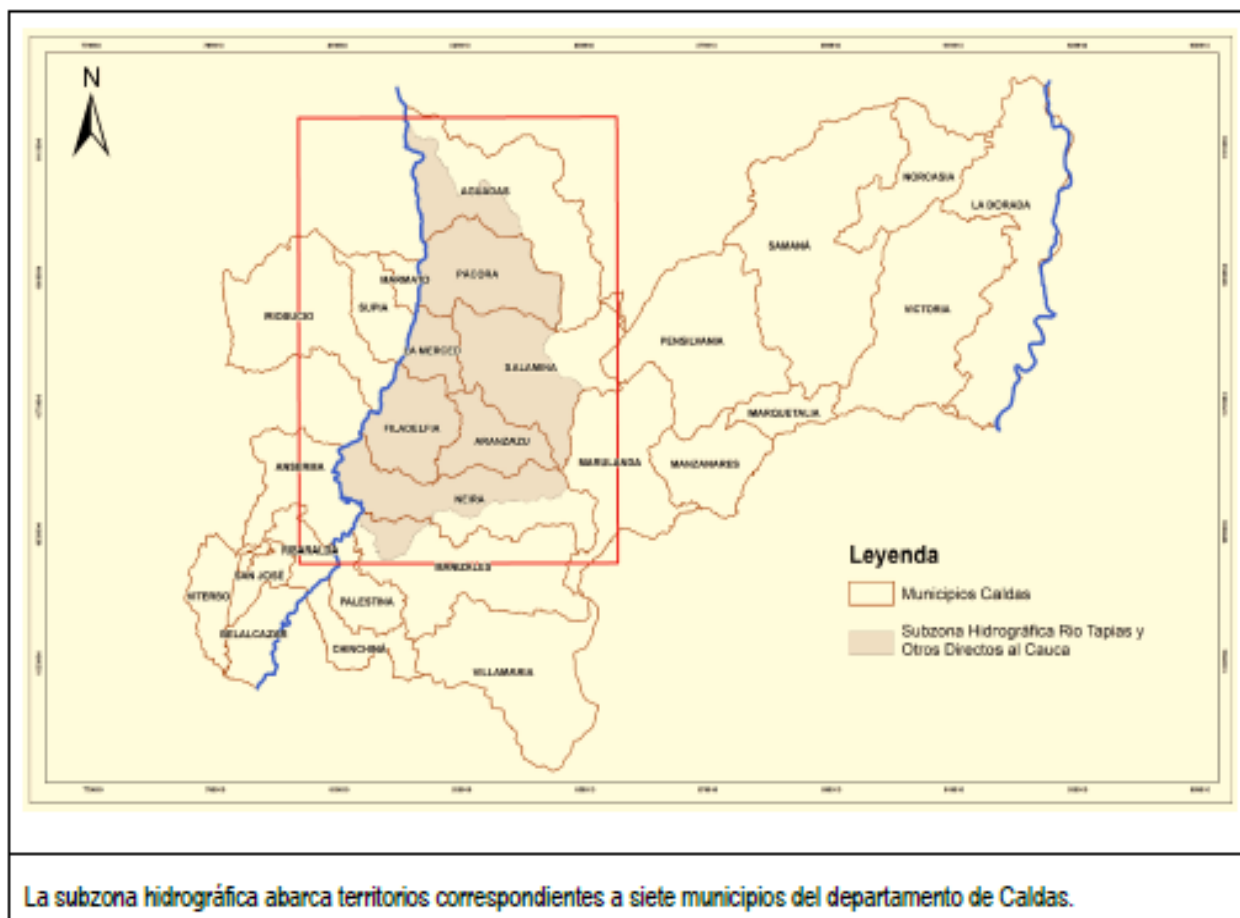
Tabla 2.

Área total de la subzona hidrográfica

Subcuencas de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca	Área (ha.)
Río Pácora	25.743,60
Río Pozo	50.305,85
Río Maibá	17.303,24
Río Tapias – Tareas	38.657,50
Quebrada Llano Grande	7.016,73
Área total de la subzona hidrográfica	139.026,92 ha.

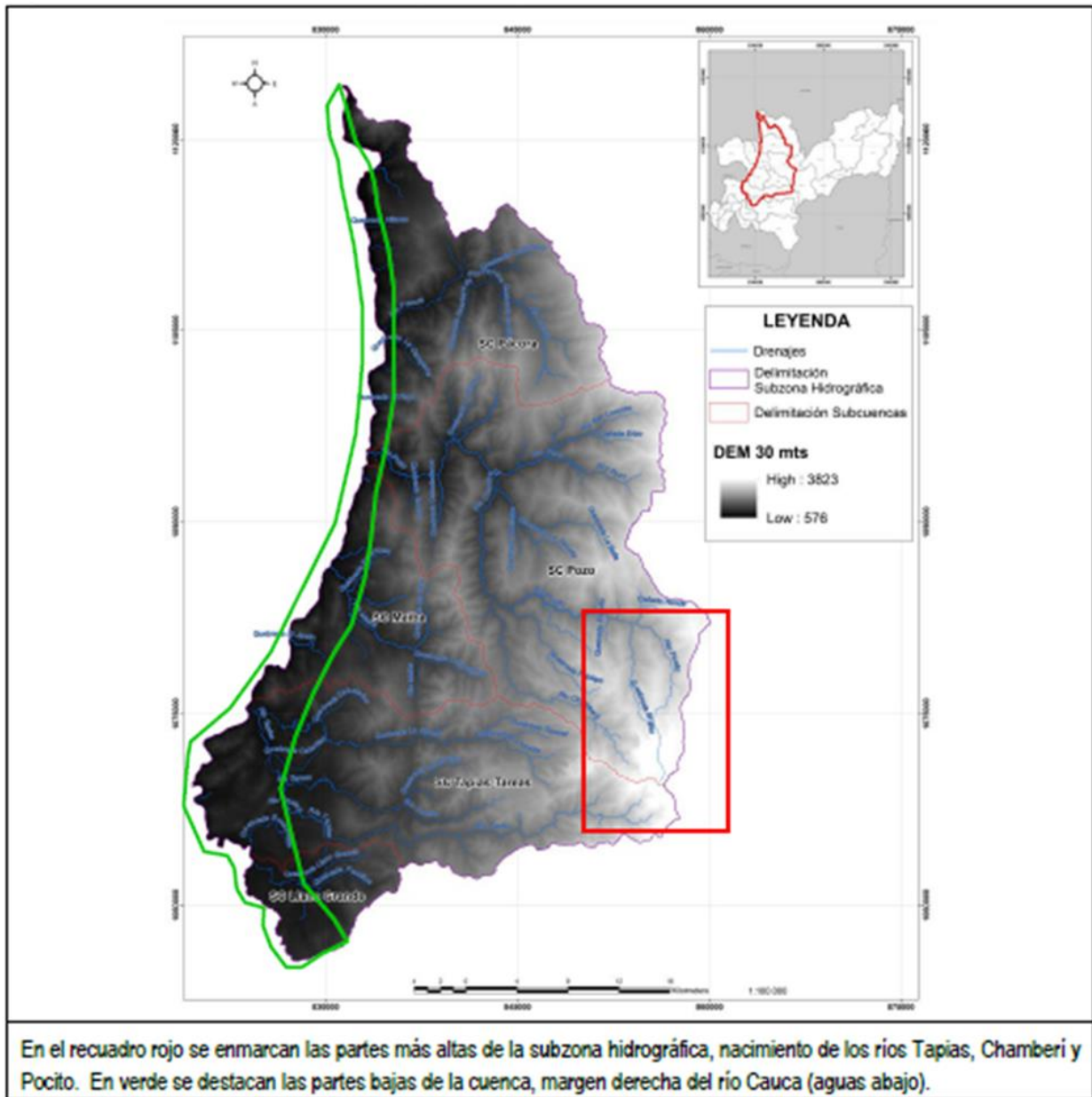
Fuente: ENA (2010)

Figura 1. Localización general de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca, en el departamento de Caldas



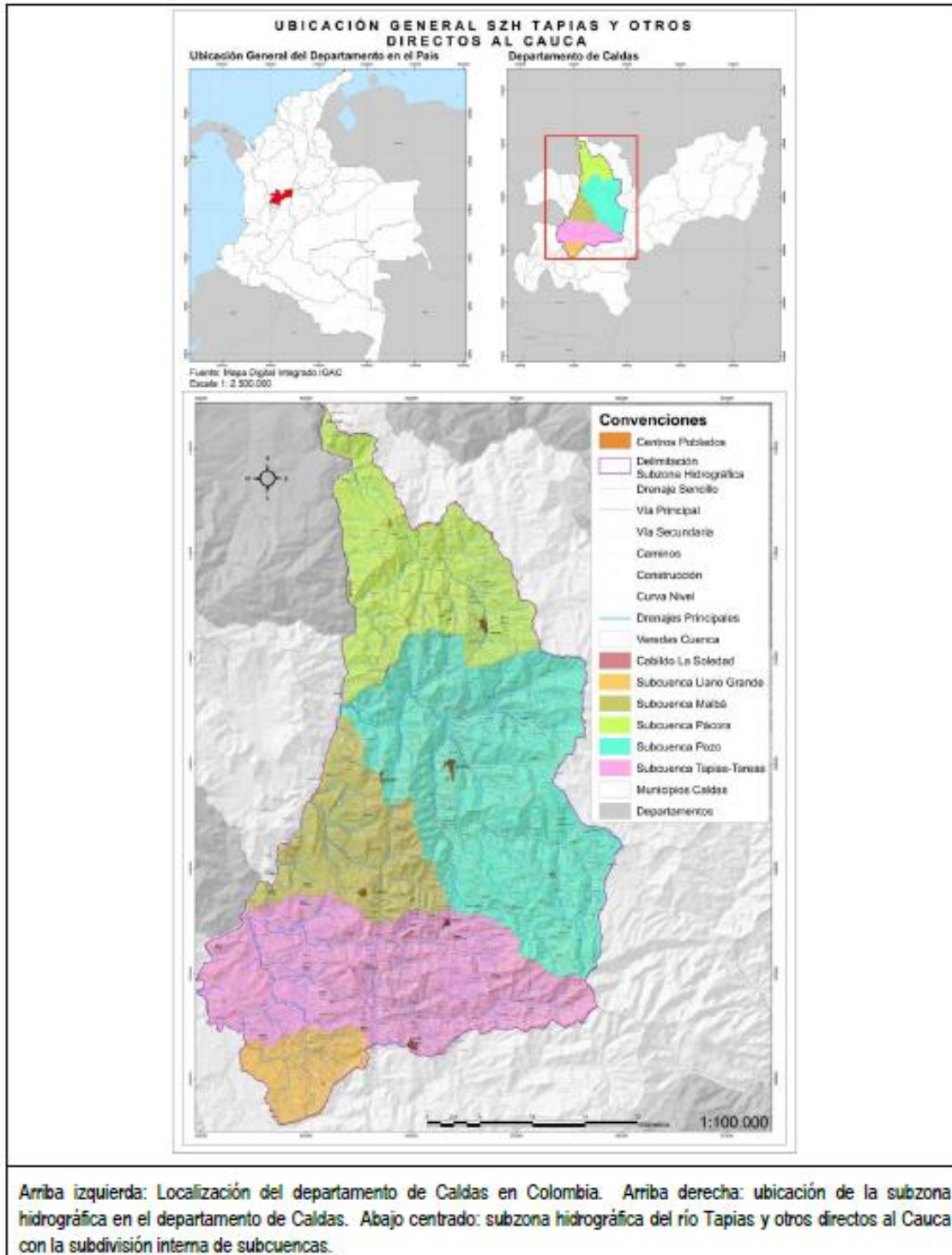
Fuente: IDEAM

Figura 2. DEM 30m con la red de drenaje principal



Fuente: LR ambiental S.A.S. (2015)

Figura 3. Localización general de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca



Fuente: LR ambiental S.A.S. (2015)

Formulación de objetivos

Objetivo general

Describir los elementos comunes y diferenciadores de la comparación entre los métodos Heurístico y Estadístico Bivariado para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en la subzona hidrográfica del río Tapias y otros aferentes directos al río Cauca, utilizando herramientas SIG.

Objetivos específicos

- Hacer el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, aplicando el método de zonificación heurístico utilizando los sistemas de información geográfica, mediante la superposición de los mapas temáticos y el análisis de la información existente.
- Elaborar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, aplicando el método de zonificación estadístico bivariado, empleando los sistemas de información geográfica, mediante la superposición de los mapas temáticos correlacionados con los procesos de inestabilidad presentes en la zona de estudio y el análisis de la información existente.
- Identificar, describir y comparar la información obtenida por cada uno de los métodos de análisis propuestos, que permita verificar la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, en la subzona hidrográfica del río Tapias y otros aferentes directos al río Cauca.

Justificación

Colombia tiene varios factores que la hacen vulnerable a múltiples eventos catastróficos, como son los fenómenos de remoción en masa, los cuales se generan en un alto porcentaje y con mayor recurrencia hacia la zona centro; principalmente por ser el área donde se ubica la mayor densidad poblacional del país.

La región Andina presenta un régimen bimodal de lluvias (dos temporadas al año, abril-mayo y octubre-noviembre), además la variabilidad climática a la cual se ha visto sometido el mundo, como consecuencia del calentamiento global, ha originado condiciones de sequía y lluvias extremas, factores que se conjugan con intervenciones antrópicas, condiciones geológicas y topográficas, ocasionando un sinnúmero de deslizamiento que han afectado el territorio, hasta al punto de causar desplazamientos de comunidades enteras, pérdida de vidas humanas y modificaciones económicas.

En vista de lo anterior, el Estado colombiano reglamenta y establece la metodología para la incorporación del riesgo en los planes de ordenamiento territorial a partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), “todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas encaminadas a la planificación del desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible”.

Actualmente es imperativo reconocer la importancia del tema observando problemas relativos al cambio climático, por la sobreexplotación de los recursos naturales no renovables, sin que se logre un consenso entre las políticas gubernamentales para definir las medidas óptimas de protección. Siendo esta una necesidad apremiante a nivel de país, se elige analizar los modelos de zonificación que actualmente se utilizan y los cuales, a pesar de su grado de incertidumbre, sirven para incluir políticas, lineamientos y directrices tanto en los POT como en los POMCAS.

Puesto que cada vez es más importante el tema del ordenamiento y manejo integral de la cuenca, se consideró oportuno realizar la comparación entre los métodos heurístico y estadístico bivariado, para la zonificación de susceptibilidad por

movimientos en masa en la subzona hidrográfica del río Tapias y otros aferentes directos al río Cauca, utilizando herramientas SIG.

Lo anterior, teniendo en cuenta que al área de estudio le anteceden un alto número de procesos de inestabilidad en la zona rural, que han generado la limitación del desarrollo económico por la pérdida de la producción agrícola y la infraestructura (viviendas, vías, redes vitales, etc.). De manera urgente los municipios implicados requieren este instrumento para avanzar en la planificación del territorio.

Para efectuar esta metodología se decide utilizar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ya que es una herramienta idónea para este tipo de proyectos porque permite la integración de la información con base espacial, con el uso de información variada y análisis simultáneo de los diferentes mapas temáticos previamente generados y georreferenciados de forma gráfica, permitiendo la interpretación clara, dinámica y real que facilita obtener datos fiables y adecuados para los objetivos que se proponen y la toma de decisiones en relación con los fenómenos objeto de estudio involucrados.

En lo que atañe a la utilidad de esta propuesta, la misma se sustenta en relación con la información que se derive de la cotejación de los métodos de análisis como son: el heurístico y el método estadístico bivariado. Ello acorde con los niveles de confiabilidad y validez, que discuten los expertos, pero cuya información permitirá consideraciones más amplias en lo que corresponde a la zonificación de la subzona geográfica del río Tapias, que permitirá pensar en estrategias tendientes a optimizar los niveles de confiabilidad, que, en política pública, redunde en las condiciones y calidad de vida de las comunidades que habitan sus zonas de influencia.

Marco Teórico

En este apartado se relacionan, en cada uno de los ítems, los elementos conceptuales que sustentan lo considerado en los objetivos. Para ello se hace alusión a qué entender por zonificación y sus diferentes aspectos. Otro elemento importante será lo referente a los movimientos en masa. Ítems que permitirán dar paso a los métodos que se emplearán y contrastarán en este estudio, como son: el método heurístico y el método estadístico bivariado.

Tipos de zonificación

Según Varnes (1984), el término de zonificación hace referencia a una división de la superficie terrestre en áreas que representan diferentes grados de amenaza potencial hacia deslizamientos u otros movimientos en masa.

La zonación o zonificación sobre áreas de ocupación por actividades humanas involucra tres términos principales: amenaza, riesgo y vulnerabilidad. Los conceptos que enmarcan estos términos, y que tiene mayor aceptación a nivel mundial, son los propuestos por la Office of the United Nations Secretary-General for Disaster Preparedness (UNDRO) y la UNESCO:

- **Amenaza natural (Hazard):** determina la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno dañino potencial, dentro de un lapso específico, en un área determinada.
- **Vulnerabilidad:** determina el grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos bajo riesgo como resultado de un fenómeno natural.
- **Riesgo específico:** determina los daños esperados debido a la ocurrencia de un fenómeno natural. Puede ser expresado por el producto de la amenaza y la vulnerabilidad.
- **Elementos en riesgo:** determina la población, propiedades, actividades económicas, incluyendo servicios públicos, etc. en riesgo en un área dada.

- **Riesgo total:** determina el número de personas afectadas, daños en propiedades o interrupción de actividades económicas, esperadas debido a un fenómeno natural. Es el producto de riesgo específico y elementos en riesgo.

Estos aspectos se consideran fundantes tanto en las consideraciones conceptuales del objeto de estudio propuesto, como en los análisis que se desprenden de la proposición y contrastación de ambos métodos de análisis.

Movimientos en masa

Se refiere al proceso por medio del cual un volumen de material constituido por roca, suelo, rellenos antropogénicos o una combinación de cualquiera de estos, se desplaza por una ladera o talud hacia abajo y hacia afuera por acción de la gravedad.

Las clasificaciones que se encuentran en la revisión de la literatura, y que se relacionan a continuación, se basan en el tipo de material, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación y el grado de saturación (PMA, GCA, 2007).

Clasificación de los movimientos en masa.

Los movimientos en masa se pueden manifestar según el tipo de movimiento, el material y otros factores en: caídas, vuelcos o volcamientos, deslizamientos (rotacional, traslacional, en cuña, compuestos), propagaciones o corrimientos laterales, flujos, reptamientos, deformaciones laterales y movimientos complejos y/o compuestos. El material involucrado en el proceso puede ser roca o suelo, por lo que se usan los términos "... de roca" o "... de suelo" después del tipo de proceso.

Causas.

Para una ladera o talud determinado, el movimiento en masa se presenta cuando los esfuerzos que actúan dentro de la masa de suelo o roca son mayores que su resistencia. (García, 2001).

Los factores que causan movimientos en masa se pueden clasificar en factores condicionantes, que hacen susceptibles a los taludes o laderas sin llegar a provocar el

movimiento; y detonantes, que hacen que un talud pase de un estado marginalmente estable a inestable.

Dentro de los factores que causan deslizamientos se encuentran las condiciones del terreno, los procesos físicos naturales y los procesos artificiales (Popescu, 1992) diferenciados a continuación:

- **Condiciones del terreno:** pendiente o inclinación, materiales débiles o sensibles, presencia de discontinuidades, procesos geomorfológicos y tectónicos, sobrecargas, entre otros.
- **Procesos físicos naturales:** lluvias intensas en periodos cortos, lluvias prolongadas o acumuladas, sismos, erosión, socavación, reducción de la vegetación (por incendios o sequías), entre otros.
- **Procesos artificiales:** excavaciones y cortes para construcción de viviendas o vías, sobrecarga en la parte alta o en el cuerpo del talud o ladera, riesgos, ausencia de sistemas de drenaje, fuga de tuberías, vertimientos de aguas domiciliarias, reducción de la vegetación (por deforestación), explotación de minas y canteras (minas a cielo abierto o galerías subterráneas), vibración artificial (incluido el tráfico y maquinaria pesada).

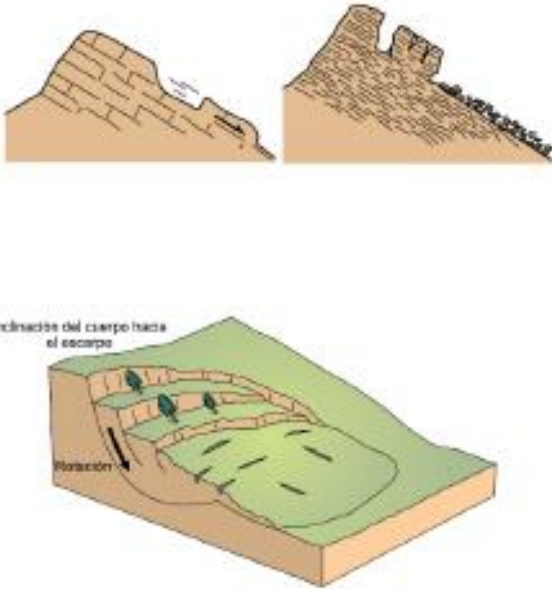
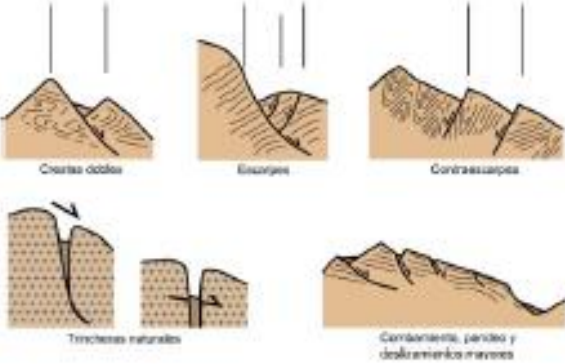
Acorde con lo relacionado hasta este punto, se puede decir, en consecuencia, que los movimientos en masa ocurren por la combinación de algunos o todos los factores, ya sean condicionantes o detonantes. Los factores detonantes son denominados así por ser la causa directa o decisiva de un proceso de remoción en masa. Suelen ser factores detonantes las elevadas y acumuladas precipitaciones y los eventos sísmicos, lo cual se relaciona en la tabla 3.

Tabla 3. Tipos de movimientos en masa

TIPOS DE MOVIMIENTO		
CAÍDAS		<p>-Uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento.</p> <p>-El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido.</p>
VOLCAMIENTOS		<p>-Rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior.</p> <p>-Pueden ser lentos y graduales.</p>
PROPAGACIÓN LATERAL		<p>-El desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material. El estrato competente superior puede fracturarse y separarse en bloques o losas; el material blando inferior fluye hacia las grietas entre los bloques.</p> <p>-El movimiento de éstos es extremadamente lento.</p>

Fuente: PMA: GCA, 2007

Continuación tabla 3. Tipos de movimientos en masa

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">DESIZAMIENTOS</p>		<ul style="list-style-type: none"> - <i>Traslacional</i>: la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual. -La velocidad puede variar desde rápida a extremadamente rápida. - <i>Rotacional</i>: la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. -Pueden ocurrir lenta a rápidamente
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">DEFORMACIONES GRAVITACIONALES PROFUNDAS</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Presentan rasgos de deformación, pero sin el desarrollo de una superficie de ruptura definida. -Usualmente con muy baja magnitud de velocidad y desplazamiento.

Continuación tabla 3. Tipos de movimientos en masa

<p style="text-align: center;">FLUJOS</p>		<p><i>-Flujo de lodo:</i> flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos</p> <p><i>-Flujo de tierra:</i> es un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico. Los flujos de tierra desarrollan velocidades moderadas.</p> <p><i>-Flujo de detritos:</i> es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada.</p>
<p style="text-align: center;">REPTACIÓN</p>		<p>-Se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla.</p> <p>-Dentro de este movimiento se incluyen la soliflucción y la geliflucción, este último término reservado para ambientes periglaciales.</p>

Zonificación de amenaza y riesgo

El punto que sustenta la ocurrencia de los deslizamientos es el producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas, y la modificación de éstas por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad.

Es así como la presencia de deslizamientos es un fenómeno sujeto a muchos grados de incertidumbre, debido a que éstos incluyen diferentes tipos de movimientos, velocidades, modos de falla, materiales, restricciones geológicas, etc., y el valor del factor de seguridad puede no ser confiable, debido a que no tiene en cuenta la incertidumbre.

Por ello, la zonificación de amenazas y riesgos permite evaluar, parcialmente, esa incertidumbre y es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, especialmente en las primeras etapas de planeación de un proyecto.

La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la calificación de cada una de estas áreas de acuerdo con el grado real o potencial de amenaza o de riesgo. El mapeo puede realizarse sobre un área donde se tiene información de la ocurrencia de deslizamientos o se tiene un inventario de estos eventos, o sobre áreas en las cuales no se tiene conocimiento de deslizamientos en el pasado, pero se requiere predecir la posibilidad de amenazas hacia el futuro.

En el primer caso, se trabaja con una metodología de mapeo directo con base en la experiencia; y en el segundo, una de mapeo indirecto con base en los factores que contribuyen a su ocurrencia. Se hace necesario diferenciar entre técnicas de análisis relativo y técnicas de análisis absoluto. El análisis relativo presenta la posibilidad diferencial de ocurrencia de deslizamientos sin dar valores exactos; y en el análisis absoluto, se presentan factores de seguridad o probabilidad real de ocurrencia de movimientos.

La zonificación de amenazas generalmente es imprecisa debido a que la inestabilidad de los taludes y las laderas es un problema de alta complejidad y todavía muy poco entendido.

El mapeo de zonas de riesgo aún es una evaluación tipo ejercicio y, aunque es indispensable en muchos casos, comúnmente no provee información suficiente para el diseño de las soluciones (Leroi, 1996). Sin embargo, esta herramienta es útil para la planeación sobre la localización de obras o asentamientos humanos.

Métodos de zonificación.

Para los mapas de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa existe una clara relación entre los siguientes tres factores:

- El propósito de la zonificación (información, planificación, pre-diseño, diseño)
- El nivel de zonificación (Básico, Intermedio y Avanzado)
- La escala de zonificación (SGC, 2013)

Método Heurístico. (Stevenson 1977).

Los métodos heurísticos se basan en el estudio conceptual de los procesos de ocurrencia de los deslizamientos y requiere del análisis por parte de profesionales con conocimientos y experiencia, tanto de la región estudiada como de los procesos.

En el análisis heurístico, el mapa de amenazas es hecho utilizando el conocimiento del profesional especializado sobre un sitio específico, a través de fotointerpretación o trabajo de campo. Este mapa puede hacerse directamente en el campo o recodificando un mapa geomorfológico.

El procedimiento es la asignación subjetiva de pesos o valores a los factores relevantes y a las subclases, para obtener una suma de susceptibilidad a amenaza relativa. Se apoya en la evaluación por un experto, que es, tal vez, el método de mapeo más utilizado. Éste se basa en la experiencia de un experto quien define las reglas y

criterios de estabilidad y evolución de los movimientos. Los criterios tienen como referente la experiencia adquirida en situaciones supuestamente similares.

La ventaja de la evaluación por parte de un experto es el análisis multicriterio que está implícito en la mente del profesional experimentado, que puede ser evaluado en diferentes escalas con un manejo constante de información anterior basada en la descripción detallada de la situación de campo. La evaluación es fácil y directa, y la información que no existe, se supone o se interpola en forma subjetiva.

La desventaja de la evaluación por expertos está en la subjetividad de los criterios, puesto que se requiere de un conocimiento muy completo y específico de las causas y factores que producen la inestabilidad en las áreas estudiadas y del conocimiento previo de cómo han ocurrido los deslizamientos históricos en dichas áreas.

Cada experto asigna pesos diferentes de acuerdo con su propia experiencia (Tabla 13). Los factores son subjetivos y se puede manejar el mapa al criterio del que lo elabora. El experto no es dado a analizar alternativas y es muy difícil, y prácticamente imposible, que el experto pueda explicar su criterio y sus reglas para permitir un análisis crítico de los resultados obtenidos (Leroi, 1996).

Comúnmente, quienes elaboran el mapa no han analizado los deslizamientos que han ocurrido en el área específica que se estudia y, en consecuencia, se pueden cometer muchos errores.

Método estadístico bivariado. (Carrara et al. 2008).

En los análisis estadísticos de amenaza por movimientos en masa se combinan factores que han generado los movimientos en masa en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística. De esta manera se hacen predicciones cuantitativas para áreas libres de movimientos en masa donde existen condiciones similares (SGC, 2013).

En el análisis estadístico bivariado cada factor condicionante (como la geología, la geomorfología, la pendiente, la rugosidad, el relieve relativo y la cobertura terrestre) se combina con la frecuencia de los movimientos en masa, y se calculan valores ponderados de densidades de movimientos en masa para cada clase. Por lo tanto, en menor área acumulada de susceptibilidad se tiene un mayor porcentaje de movimientos en masa (Chalkias et al., 2014).

Para este método, específicamente denominado método de proporción de la frecuencia (frequency ratio method), método de índice estadístico (the statistical index method) o de información ponderada, la evaluación de la susceptibilidad involucra tres pasos:

- El inventario de movimientos en masa
- El mapeo de los parámetros más significativos (factores condicionantes) en la distribución espacial de los movimientos y su análisis
- La definición de los pesos relativos a cada factor asociado con la localización de movimiento en masa (Corantioquia-Eafit, 2015).

Este método asigna un valor de peso determinado W_i a cada clase de parámetro, por ejemplo, una unidad geológica o una unidad geomorfológica. Van Westen (1997) define el valor W_i como el logaritmo natural de la densidad dentro de la clase, dividido por la densidad de deslizamientos en general en todo el mapa. A continuación se presenta la expresión utilizada para la calificación de las unidades al interior de los diferentes factores (Corantioquia-Eafit, 2015a).

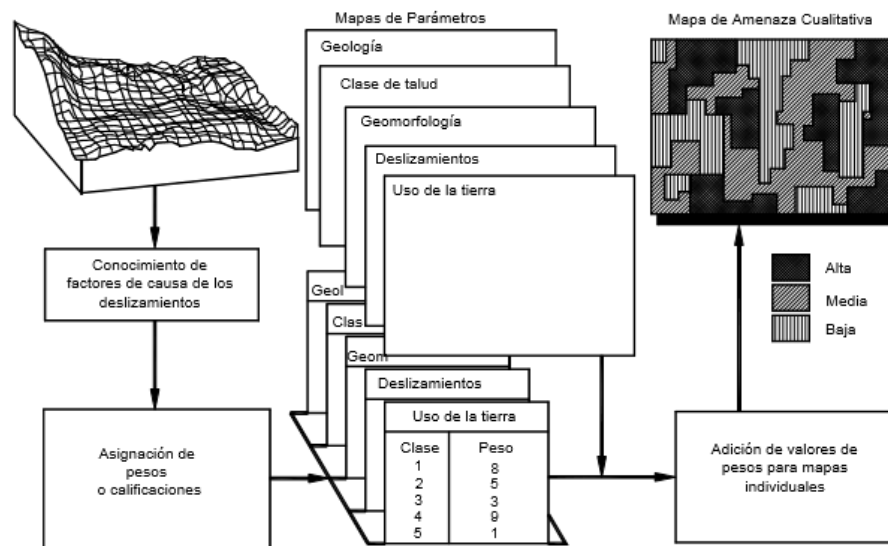
$$W_i = \ln \left(\frac{Densclas}{Densmap} \right) = \ln \left[\frac{\frac{Npix (Si)}{Npix (Ni)}}{\frac{\sum Npix (Si)}{\sum Npix (Ni)}} \right]$$

- W_i = Ponderación dado a determinado parámetro de clase (ejemplo, tipo de roca).
- $Densclas$ = Densidad de los deslizamientos dentro del parámetro de clase.
- $Densmap$ = Densidad de los deslizamientos dentro del todo el mapa.
- $Npix(S_i)$ = Número de pixeles que contienen deslizamientos dentro de un determinado parámetro de clase.
- $Npix(N_i)$ = Número total de pixeles e un determinado parámetro de clase.

Asignación de pesos en el SIG.

El SIG se utiliza como una herramienta rápida de dibujo y cuantificación, pero no se usa para el análisis de parámetros (Figura 4). El criterio con el cual se designan las clases puede variar de polígono en polígono. El análisis se puede hacer, sin embargo, utilizando los valores de peso en cada mapa de parámetros, y cada mapa recibe un diferente peso. El profesional especializado decide qué mapas y valores de peso emplearán, con base en su propia experiencia.

Figura 4. Uso de SIG para combinación cualitativa de mapas



Fuente: Soeters y Van Westen, 1996

El procedimiento del SIG, en este caso, es el siguiente:

- Clasificación de cada mapa de parámetros de acuerdo con las clases relevantes.
- Asignación de valores de peso a cada parámetro (por ejemplo, en la escala de 1 a 10).
- Asignación de pesos a cada mapa de parámetros.
- Cálculo de los pesos para cada pixel y clasificación en clases de amenaza.

Métodos Estadísticos

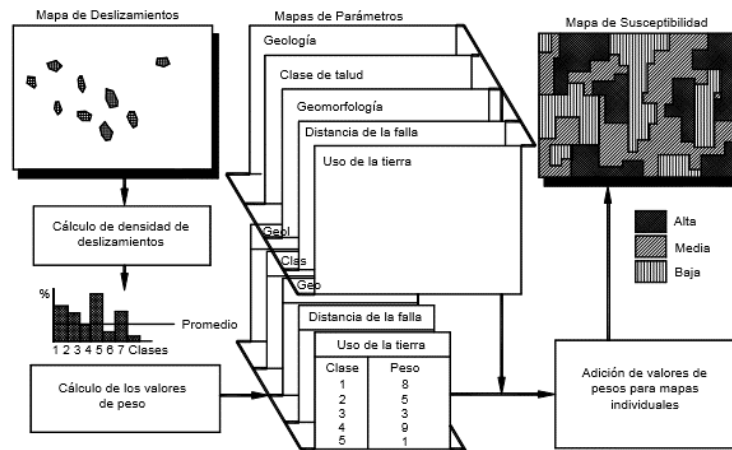
Los métodos estadísticos generalmente se refieren al cálculo de la densidad en los deslizamientos, para cada unidad geomorfológicamente homogénea o para determinados rangos de factores determinantes de la estabilidad. La densidad de los deslizamientos se toma típicamente, como el porcentaje del área que es ocupada por éstos.

El método estadístico superpone mapas de parámetros y mapas de unidades homogéneas al mapa de inventario de deslizamientos, y calcula las densidades del deslizamiento. El mapa de distribución de deslizamientos se combina con los diversos parámetros dentro de una grilla o matriz, la cual se analiza mediante el análisis de regresión múltiple o discriminante.

Los modelos estadísticos se basan en la suposición de que un área donde han ocurrido deslizamientos posee un ambiente susceptible para la ocurrencia de nuevos deslizamientos, de forma similar a los deslizamientos históricos. Estos ambientes son identificados por factores que afectan la ocurrencia de los deslizamientos como la litología, el uso de la tierra, las pendientes, las isoyetas de lluvias, etc. (Lan y otros, 2004).

Los valores de pesos de cada factor pueden basarse en la experiencia del profesional especializado, o en el análisis estadístico independiente para cada factor utilizando el inventario de deslizamientos, como se propone en la figura 5.

Figura 5. Uso de SIG para el análisis estadístico bivariado, en la elaboración de mapas de susceptibilidad



Fuente: Soeters y Van Westen, 1996

Cálculo del Coeficiente de Certeza (CF)

Para cada factor básico entre los modelos estadísticos empleados, como elementos para la elaboración de los mapas de zonificación de amenaza, se utiliza con mucha frecuencia la determinación de los coeficientes de certeza (en adelante CF) para cada uno de los factores analizados (Chung y Fabbri, 1993, 1998; Binaghi y otros, 1998; Luzi y Pergalani, 1996).

El coeficiente de certeza es una función de favorabilidad que permite manejar el problema de la heterogeneidad y de la incertidumbre de la información de entrada de los modelos. El CF, como función de probabilidad, fue inicialmente propuesto por Shortliffe y Buchanan (1975) y, posteriormente, modificado por Heckerman (1986).

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{si } PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & \text{si } PP_a < PP_s \end{cases}$$

Donde ppa es la probabilidad condicional de que ocurra un número determinado de eventos de deslizamiento, para un determinado valor de un parámetro, y pps (probabilidad anterior) es la probabilidad de que ocurra un número total de deslizamientos en el área de estudio A. El rango de variación del coeficiente CF es de -1.0 a +1.0.

El mayor valor positivo indica el aumento de la certeza en la ocurrencia de deslizamientos, mientras los valores negativos indican una disminución de la certeza. Un valor cercano a 0.0 significa que la probabilidad anterior es muy similar a la probabilidad condicional, es decir, que es muy difícil dar una indicación de la ocurrencia de deslizamientos. Cada valor de un factor tiene un determinado coeficiente de certeza (CF).

Los factores de favorabilidad (ppa, pps) se obtienen de superponer cada capa de datos en el mapa de inventario de deslizamientos en ArcGIS y de calcular la frecuencia de ocurrencia de los deslizamientos. Los valores de CF se calculan para cada valor de los parámetros básicos (litología, estructura, pendiente etc.).

Análisis bivariado y multivariado.

Si se utiliza una técnica bivariada, la importancia de cada parámetro, o combinación de parámetros, puede ser analizada individualmente. En el análisis estadístico bivariado cada factor del mapa (geología, pendiente, uso de la tierra etc.) se combina con el mapa de distribución de deslizamientos y se calcula (para cada parámetro) un peso de acuerdo con la densidad de deslizamientos (Brabb y otros, 1972) (Figura 5). Existen varios métodos para calcular los valores de peso, la mayoría de los cuales se basan en la relación entre densidad de deslizamiento y clase de

parámetros, comparados con la densidad de deslizamientos sobre el área completa. El análisis estadístico multivariado de factores importantes, relacionados con la ocurrencia de deslizamientos, da como resultado la contribución relativa de cada uno de esos factores a la amenaza total dentro de una unidad definida de área.

Los análisis se basan en la presencia o ausencia de fenómenos de movimiento (dentro de cada unidad) que pueden ser cuencas, unidades geomorfológicas, etcétera. El análisis multivariado emplea el análisis discriminante, o regresión logística, para determinar la influencia de las subclases de cada factor.

Cada método tiene sus reglas específicas para la integración de los datos requeridos para la producción de un mapa de amenazas. En la literatura se han propuesto muchos métodos de análisis multivariado, la mayoría de los cuales requieren del uso de paquetes adicionales de estadística para realizar el análisis discriminante o regresión múltiple. En estos casos, se debe manejar una gran cantidad de información, debido a que, en ocasiones, se incorporan hasta 50 parámetros diferentes.

Uso de los SIGs en los métodos estadísticos

Los SIG son muy útiles en la zonificación de amenazas por deslizamiento utilizando métodos estadísticos, especialmente los comandos macros para los cálculos repetitivos, que incorporan gran número de combinaciones de mapas y la manipulación de los datos de atributo. El usuario puede ensayar la importancia de cada mapa de parámetros y tomar decisiones sobre los mapas de entrada definitivos, de una forma iterativa.

Para ello se utiliza el siguiente procedimiento:

- Determinación de la lista de factores que se van a incluir en el análisis. Los parámetros deben convertirse en mapas numéricos.
- Clasificación de cada mapa de parámetros en un número de clases relevantes.
- Combinación de los mapas de parámetros seleccionados, con el mapa de deslizamientos, utilizando el sistema de cruce de mapas

Para producir las tabulaciones de cruce que definen las correlaciones espaciales entre los mapas de parámetros y el mapa de deslizamientos y separar los grupos de unidades estables e inestables.

- Cálculo de los valores de peso basados en la tabla de tabulación de cruce.
- Asignación de valores de peso a los mapas de parámetros o diseño de unas reglas de decisiones para ser aplicadas a los mapas y clasificaciones, de acuerdo con los resultados finales.
- Exportación de la matriz a un paquete de estadística para un análisis adicional.
- Importación de los resultados al SIG y recodificación de las unidades de área.
- Clasificación de clases de amenaza, en el mapa.

Antecedentes

A parte de los referidos en la formulación del problema, se relacionan a continuación otros estudios que aportan a la discusión del evento investigativo.

- Fase Diagnóstico del plan de ordenación y manejo ambiental de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca, realizado por CORPOCALDAS, en el año 2016.

Uno de los componentes de dicho plan comprende el estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de la cuenca del río Tapias Tareas, escala 1:25.000, dentro de la cual se ubica el municipio de Aranzazu. Para la zonificación, se utilizó el método heurístico.

- Caracterización y zonificación de la susceptibilidad por deslizamientos en el municipio de Aranzazu, según el esquema de ordenamiento territorial. Trabajo de Grado, Universidad de Caldas, Programa de Geología. Manizales, 2006.
- Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación por amenazas por movimientos en masa, a escala

1:25.000, en el municipio de Santa Bárbara, departamento de Antioquia. Realizado por Milena González Gómez, en el año 2015.

- Análisis del riesgo por inundación, utilizando herramientas SIG, para la cuenca del río Quito. Realizado por Cristian Moreno Palacios y Oscar Alejandro Bermúdez Ordóñez, en el año 2016.

Los diferentes aspectos de orden conceptual e investigativo que se han relacionado, se consideran altamente pertinentes y aportantes, en cuanto que los mismos sustentan las implicaciones, bondades y desventajas que se pueden tener en la aplicación de los métodos involucrados, en relación con el fenómeno que se analiza.

Marco Metodológico

Tipo de trabajo

La comparación de los dos métodos (heurístico y estadístico bivariado), para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en la subzona hidrográfica del río Tapias y otros aferentes directos al Cauca, corresponde a un trabajo aplicado, donde se realizó el análisis espacial de la información existente para la zona de trabajo, con métodos cualitativo y cuantitativo, mediante la utilización de herramientas SIG, con el software ArcMap 10.2.

Procedimiento

La metodología utilizada para la realización de la zonificación, por susceptibilidad por movimientos en masa, comprende las siguientes fases:

FASE I. Revisión bibliográfica y recopilación de información existente para la zona de interés.

Se revisaron mapas temáticos (geología, geomorfología, usos, cobertura del suelo, cartografía de los movimientos en masa existentes en la zona de estudio, cartografía base). Para este caso en particular se consulta el Plan de ordenación y manejo ambiental de la subzona hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca, (Corpocaldas, 2016), así como la estructura de geodatabase (GDB) de cartografía base y mapas temáticos en archivos Shapefile (shp), compatibles con el software ArcGis.

FASE II. Análisis y revisión los mapas temáticos, con el fin de garantizar la correcta correlación de los mismos en la aplicación de los métodos de zonificación.

Durante esta fase se verificó que el mapa de procesos erosivos generaba error, no permitiendo la realización de geoprocésamiento, motivo por el cual se procedió a la digitalización de los polígonos y generación de un nuevo shapefile al que se denominó "Procesos". De igual manera, se reclasificó el mapa de pendientes con el fin de facilitar

el análisis con un número menor de rangos al que se tenía en el mapa previo, generándose un nuevo shapefile con cinco rangos de pendientes. A los mapas digitales suministrados se les tuvo que hacer el procesamiento “disolve”, dado que los mismos estaban muy pesados y se dificultaba su lectura.

FASE III. Zonificación susceptibilidad por movimientos en masa por el método heurístico

La aplicación de este método se basó en la opinión subjetiva del experto, combinando el mapeo de diferentes variables, también seleccionadas de acuerdo con el criterio, la experiencia y el conocimiento de la zona por parte de los ejecutores del trabajo. Se establecieron mapas temáticos o de factores y se realizó una asignación de pesos, puntajes y calificaciones, de tal manera que la zonificación se obtuvo con la suma de las calificaciones definidas.

Selección de las variables que influyen en la susceptibilidad por movimientos en masa: Con base en el conocimiento de las condiciones naturales del área de estudio y de los factores geomorfológicos, topográficos, geológicos, geotécnicos y antrópicos, que mayormente inciden en la ocurrencia (antigua, actual o potencial) de procesos denudativos, se seleccionaron las siguientes variables:

- **Pendiente:** se establecieron cinco rangos, desde 0 grados, hasta inclinaciones mayores de 45 grados.
- **Geología Superficial:** se diferenciaron 35 unidades, basados en el origen de los materiales, composición, granulometría, grado de meteorización, dureza, control estructural, así como los transportados no consolidados correspondientes a los depósitos aluviales y coluviales o derrubios de pendientes.
- **Geomorfología:** se consideraron 17 subunidades geomorfológicas, definidas según la metodología del Servicio Geológico Colombiano, para escala 1:25.000, correspondientes a: cauce actual, cima estructural, contraescarpe, depresión, escarpe, escarpe de falla, facetas triangulares, flujos de lava, ladera denudacional,

ladera estructural, ladera inclinada, ladera moderadamente inclinada, ladera poco inclinada, llanura, lomo estructural, terraza aluvial y zona urbana

- **Uso del suelo y actividad antrópica:** se consideraron los siguientes usos: bosque de galería y ripiario, bosque denso, bosque fragmentado, cuerpos de agua artificiales, cultivos permanentes arbustivos, cultivos permanentes arbóreos, cultivos permanentes herbáceos, mosaico de cultivos, mosaico de cultivos con espacios naturales, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos con espacios naturales, mosaico de pastos y cultivos, otros cultivos transitorios, pastos arbolados, pastos enmalezados, pastos limpios, plantación forestal, ríos y tejido urbano continuo.

Determinación de la variación espacial de los parámetros o elementos que caracterizan cada variable. Se estableció con base en la recopilación de la información existente y con base en el conocimiento que se tiene de la zona, mediante visitas previas de campo. La presentación de los resultados se realizó en mapas de cada variable, en donde se diferenciaron espacialmente los parámetros o elementos que la caracterizan.

Asignación de pesos a cada variable. Se asignaron subjetivamente pesos a cada una de las variables que permiten calificar la susceptibilidad. La suma de los pesos, en cada caso, es de 100 puntos.

Asignación de puntajes a cada uno de los elementos y parámetros que caracterizan cada variable. También, de manera subjetiva, se asignaron puntajes a cada uno de los elementos que permitan caracterizar las variables (como se dijo, cada variable está compuesta por varios elementos, diferenciables entre sí). Los puntajes de cada grupo de elementos –por cada variable– también suman 100 puntos.

Calificación de los parámetros. La calificación de cada parámetro o elemento integrante de cada una de las variables, se obtuvo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{CALIFICACIÓN} = (\text{PESO} * \text{PUNTAJE}) / 100$$

De esta manera, el mapa de cada variable está dividido en zonas espacialmente delimitadas (elementos o parámetros), cada una con su calificación respectiva.

Obtención de mapas de susceptibilidad por movimientos en masa. Los mapas de cada una de las variables que contribuyen a valorar y cualificar la susceptibilidad por movimientos en masa, se superponen para obtener –finalmente– el mapa de zonificación por susceptibilidad. La superposición de los mapas se realizó utilizando un Sistema de Información Geográfica (AcMap 10.2).

La metodología parte -como ya se ha indicado- de la asignación subjetiva de pesos a cada una de las variables definidas como importantes y representativas, en la amenaza por procesos denudativos en este sector, así (Tabla 4):

Variables de la Susceptibilidad

Tabla 4.
Asignación de variable y valores de peso

Variables	Peso asignado
Pendiente	32
Geología superficial	22
Geomorfología	18
Usos y coberturas	28
Total	100

Fuente: Elaboración personal

Valoración de la susceptibilidad (Tabla 5)

Pendiente

La pendiente incide no solamente en la eventual ocurrencia de los eventos amenazantes y peligrosos en la zona de estudio (fenómenos de remoción y de transporte en masa), sino también en la intensidad y severidad de dichos procesos y,

en términos generales, en su potencial destructivo. A mayor pendiente, mayor susceptibilidad intrínseca de la zona a la ocurrencia de procesos de inestabilidad y, simultáneamente, mayor probabilidad de daño una vez ocurridos dichos eventos, teniendo en cuenta que la inclinación de la ladera se relaciona de manera directa con la energía cinética del material deslizado (a mayor pendiente, mayor velocidad de la masa fallada).

Asignación de pesos a las variables:

En el método heurístico, la asignación de pesos a las variables, se basa en el método de Stevenson 1977, es un método cualitativo basado en combinación cualitativa de mapas. Se asigna valores ponderados para las diferentes clases existentes en una serie de mapas de parámetros. Dichos valores son asignados en base a su conocimiento experto en los factores causantes de inestabilidad de laderas.

La categorización o clasificación del mapa de pendientes se basó en el siguiente criterio, utilizado por Mora Vahrson Mora, 1991, combinado con el conocimiento que se tiene de la zona objeto del estudio y de la experiencia obtenida en campo de las diferentes pendientes donde se han presentado o no deslizamientos, teniendo en cuenta además los rangos a obtener para la susceptibilidad de alta, media y baja.

Clasificación	Pendiente (ángulo de inclinación)	Criterio
Muy Bajo	0 a 5% (0 A 8.5 grados)	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos
Bajo	15 a 30% (8.5 a 16.7 grados)	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados no saturados con discontinuidades
Medio	30 a 50% (16.7 a 26.6 grados)	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos pero no existe completa seguridad de que no ocurran.
Alto	50 a 100% (26.6 a 45 grados)	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran.
Muy Alto	Más del 100% (más de 45 grados)	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurran

Clasificación para la elaboración de mapas de pendientes. Método Mora Vahrson Mora, 1991

Las escalas empleadas para la cartografía del presente estudio es escala 1:25.000, requerida para el estudio del POMCA.

En el área de estudio se establecieron cinco (5) rangos de pendiente en grados, principales:

- **Entre 0 y 7 grados (5 puntos):** comprende las áreas más bajas, ocupando un área total del 23.5 % de manera muy dispersa en todo el municipio, ubicándose principalmente en la zona sur occidental.
- **Entre 7 y 14 grados (10 puntos):** áreas con pendientes moderadas. Cubre un área total de 6.8 % del municipio, de manera dispersa, con mayor concentración en la zona sur occidental y norte de la cuenca.
- **Entre 14 y 27 grados (20 puntos):** áreas de moderadas a altas, que cuenta con un área total del 29.6% del municipio, de manera muy dispersa.
- **Entre 27 y 45 grados (30 puntos):** comprende laderas de pendientes fuertes. Ocupa el 33.8 %, del municipio, ubicándose principalmente en las zonas central y oriental de la cuenca.
- **Mayores de 45 grados (35 puntos):** laderas con pendientes muy fuertes, ocupa el 6.1 % del área del municipio, principalmente en las zonas central y noroccidental de la cuenca.

Geología superficial

Se diferenciaron 35 unidades cuya clasificación se basa en el origen de los materiales, composición, dureza, granulometría, grado de meteorización y los transportados no consolidados correspondientes a los depósitos coluviales o derrubios de pendientes. Se consideraron, también, desde el punto de vista de la importancia geotécnica, teniendo en cuenta los materiales que están comprometidos frecuentemente en los procesos denudativos que ocurren en la zona de estudio.

En este orden de ideas, en la zona de estudio se definieron las siguientes unidades geológicas superficiales:

- **Andesitas de Pan de Azúcar (Ta) (2 puntos).** Ocupan el 0.74 % del área. Esta unidad de roca presenta una dureza alta a muy alta. Se encuentra afectada por un comportamiento geomecánico que describe la presencia de diaclasas abiertas y rellenas de cuarzo, actuando como planos de discontinuidad; la calidad de la superficie es pobre con condiciones de alta descomposición en un material duro. Se generan varias familias de diaclasas que muestran la interacción tectónica de diferentes sistemas estructurales.
- **Anfibolita Saussurítica de Chinchiná (Kach) (2 puntos).** Esta unidad ocupa el 1.68 % del área; se encuentra en la parte oeste de la zona de trabajo, constituido por rocas metamórficas de textura nematoblástica y se encuentra débilmente meteorizada. Su comportamiento geomecánico resulta en la presencia de diaclasas con apertura de 1 - 2,5 cm sin relleno, con orientaciones predominantes N5W/Vertical, N10°W/32°NE, N75°E/45°NW. La calidad de la superficie es muy buena en una superficie de roca fresca, con bloques bien ajustados en un material duro. Presenta un comportamiento más dúctil cerca a la falla Cauca - Almaguer cambiando a un comportamiento frágil.
- **Batolito de Sonsón (Jbs) (2 puntos).** Ocupa el 0.13 % de área. Cuerpo de roca aflorante en la parte este de la zona de estudio, de composición tonalita - granodiorita. Macizo rocoso que se encuentra moderadamente meteorizado con aureolas de oxidación. En cuanto a su comportamiento geomecánico, presenta diaclasas abiertas y rellenas de cuarzo, que actúan como planos de discontinuidad; la calidad de la superficie es pobre con condiciones de alta descomposición, en un material duro en las partes de roca fresca, y deleznable en las zonas con mayor grado de meteorización.
- **Complejo Arquía (Ksa) (3 puntos).** Ocupa el 0.77 %. Este complejo se presenta en la parte noroeste de la zona de estudio, y se encuentra aflorante entre La Felisa y La Pintada, a la margen derecha del río Cauca. Tiene el mismo comportamiento

de la unidad correspondiente a los Esquistos de Lisboa – Palestina. Su comportamiento geomecánico describe una tendencia de fracturas N30°E/70°NW, rocas blandas con condiciones de superficie regular, en bloques angulares desajustados, con una apertura de diaclasas variables de 1 mm – 6 cm.

- **Complejo Arquía – Esquistos de Lisboa - Palestina (Kiea) (3 puntos).** Ocupa el 2.85 %. El Complejo Arquía (Kiea) se presenta en la parte suroeste de la zona, puntualmente en la vereda Llano Grande perteneciente al municipio de Neira. Este cuerpo rocoso está compuesto principalmente por esquistos negros. Su esquistosidad hace que la roca sea más frágil y se fracture a lo largo de los planos de foliación. Esta unidad está afectada en varias zonas por un alto diaclasamiento que se asocia a la falla Cauca - Almaguer al oeste, al igual que por la falla Silvia - Pijao al este. Las tendencias de diaclasas están en direcciones NS/70°SE, N50°W/30°SW, N65°W/55°NE, N45°E 50°SE, planos de foliación NS/25°SW, N45°E/Vertical, N40°E/Vertical. La diversidad de planos se da por la crenulación de la roca, dando un comportamiento geomecánico en rocas blandas con condiciones de superficie regular, suave en bloques angulares desajustados, con una apertura de diaclasas variables de 1 mm – 5 cm.
- **Complejo Ofiolítico de Filadelfia (Kcof) (2 puntos).** Ocupa el 5.40 % del área; aflora sobre la parte suroeste de la zona de estudio. Este complejo está compuesto por peridotitas y gabros; presenta débil a moderada meteorización y alto grado de diaclasamiento asociado a la falla Filadelfia al este, y la falla Cauca - Almaguer al oeste. Las diaclasas presentan una tendencia predominante en dirección N45°E/83°SE. Se describe un comportamiento geomecánico con bloques desajustados, condiciones de superficie regulares, alto grado de fracturación, formando gran número de planos de fractura en un material moderadamente duro.
- **Complejo Ofiolítico de Pácora (Kcop) (2 puntos).** Ocupa el 5.46 % del área; aflora sobre la parte norte de la zona de estudio. Corresponde a rocas ultramáficas clasificadas como peridotitas (Streckeisen, 1979). Presentan leve meteorización y alto diaclasamiento resultante de la acción de fallas locales. Esto hace que su comportamiento geomecánico describa un material moderadamente duro, con alta

deformación y trituración del material, con condiciones de superficie regular, en bloques angulares desajustados, formado por varios conjuntos de planos de fracturas.

- **Complejo Quebradagrande Sedimentario (Ksc) (3 puntos).** Ocupa el 16.97 % del área; se presenta en la parte noreste y sureste de la zona de estudio. Está compuesto por rocas sedimentarias de origen marino, principalmente por lodolitas negras intercaladas con arenitas finas a medias. Muestra una alta meteorización y se observan costras de oxidación donde el porcentaje de roca no alterada varía entre 10 y 20 %. Se nota un alto diaclasamiento, asociado con la falla Manizales – Aranzazu. Las diaclasas muestran continuidad y direcciones predominantes N55°E/34°SE, EW/Vertical, N87°W/80°SW, N35°W/18°NE, dando estructuras en enrejado por la alta densidad de fracturamiento. Su comportamiento geomecánico produce rocas moderadamente duras a blandas, con condiciones de superficie regular, en bloques angulares desajustados, con una apertura de diaclasas variables de 2 mm – 3 cm. También se observan superficies levemente rugosas.
- **Complejo Quebradagrande Volcánico (Kvc) (2 puntos).** Ocupa el 12.29 % del área. Esta unidad se encuentra sobre la parte central y norte de la zona de estudio. Se caracteriza por ser un conjunto de rocas ígneas volcánicas con un porcentaje de meteorización que varía entre 10 y 15 %. La mayor parte de esta unidad presenta un alto diaclasamiento asociado con las fallas Silvia - Pijao y Manizales – Aranzazu. Su comportamiento geomecánico describe condiciones de superficie buenas, presenta rugosidad, se encuentra ligeramente alterada y con manchas de oxidación de manganeso y hierro. En las zonas de roca fresca presenta condiciones superficiales buenas, con un dominio estructural en bloques algo desajustados, pero bien entabados, formando enrejados de los cuales se distinguen diaclasas con dirección N45°W/70°SW, N55°W/55°SW, responsables de algunos puntos de inestabilidad en la zona de estudio, descritos como un material moderadamente duro.
- **Depósitos Aluviales (Qal) (4 puntos).** Ocupan el 1.40 % del área. Se describen como depósitos aluviales recientes de material blando no consolidado. Localizados en las márgenes de los cauces de los ríos; están ampliamente desarrollados

principalmente en la subcuenca del río Tapias – Tareas. Estos depósitos se forman a partir de material erosionado de los afluentes y de las laderas adedañas, los cuales son transportados y acumulados cuando el cauce de estos pierde capacidad de arrastre. Los depósitos están modelados por terrazas aluviales y están compuestos principalmente por gravas y arenas. Se caracterizan por un comportamiento geomecánico con condiciones de superficie muy pobres, en un material inconsolidado.

- **Depósitos Piroclásticos Glaciofluviales (Qgf) (5 puntos).** Ocupan el 6.61 % del área. Roca Blanda, de origen fluvio–glaciar; el tipo de material se compone de material transportado compuesto por ceniza, lapilli y fragmentos gruesos de pómez.
- **Depósitos de Caída Piroclástica (Qp) (3 puntos).** Ocupan el 3.365 % del área. Roca blanda de origen volcánico, compuesta por ceniza, lapilli y fragmentos gruesos de pómez.
- **Flujos de Escombros (Qfe) (5 puntos).** Ocupan el 2.95 % del área. Esta unidad se presenta al sureste de la zona de estudio. Consiste en un depósito conglomerático matriz soportado, de material muy blando, conformado principalmente por fragmentos de rocas volcánicas como andesitas, metasedimentitas y metamórficas, las cuales están embebidas en una matriz arcillosa y lapilli. Su comportamiento geomecánico es similar a los depósitos aluviales, con condiciones de superficie muy pobres, en un material con poca compactación dado por bloques sueltos.
- **Flujos de Escombros y Lahares (Qfel) (5 puntos).** Ocupan el 0.32 % del área. Depósitos que rellenan las partes bajas de las estructuras sinclinales y demás depresiones topográficas, formando disconformidades angulares con la secuencia sedimentaria Irra – Tres Puertas, más frecuentemente con la unidad volcanoclástica. Se trata de depósitos de flujos torrenciales de conglomerados.
- **Flujos Andesíticos Recientes (Qa) (2 puntos).** Ocupan el 0.21 % del área al sur oriente de la cuenca. Se trata de una roca dura andesítica, de origen ígneo volcánico.

- **Flujos de Lodo (Qfl) (5 puntos).** Ocupan el 0.025 % del área. Es un depósito conglomerático matriz soportado, no consolidado, conformado principalmente por fragmentos de andesitas y fragmentos metamórficos, los cuales están embebidos en una matriz arcillosa, con presencia de lapilli de tamaño grueso, con un comportamiento geomecánico que describe condiciones de superficie muy pobres, en superficies pulidas descritas en un material frágil.
- **Formación Abejorral (Kia, Kib) (3 puntos).** Ocupa el 5.78 % del área. Esta formación, definida en Abejorral (departamento de Antioquia), en general, corresponde a una secuencia arcillo-arenosa constituida, de base a techo, por conglomerados con clastos redondeados, arenitas mixtas de terrígenos y aloquímicos, limolita, lodolitas y arcillolitas, con delgadas intercalaciones de tobas de ceniza. Contiene fósiles de amonitas, bivalvos, gasterópodos y restos de paleoflora. Los contactos con los diferentes tipos de roca infra y suprayacentes son generalmente fallados.
- **Formación Amagá Miembro Medio (Tom) (3 puntos).** Ocupa el 2.58 % del área. Se produjeron zonas de hundimiento donde se depositaron gruesas secuencias de sedimentos continentales. Aflora en cercanías de Aranzazu, con bancos de arenitas de grano fino hasta grueso que gradualmente pasan a arenitas arcillosas y arcillolitas; en estas últimas se encuentran restos de plantas fósiles.
- **Formación Amagá Miembro Superior (Tos) (4 puntos).** Ocupa el 4.52% del área. Se produjeron zonas de hundimiento donde se depositaron gruesas secuencias de sedimentos continentales. Está caracterizada por la ausencia de mantos explotables de carbón y de conglomerados, y por el predominio de arenitas oscuras, limonitas y arcillolitas de color ocre, deleznales, con ocasionales concreciones calcáreas.
- **Formación Aranzazu (Ngsa) (3 puntos).** Ocupa el 0.24 % del área. En el área de estudio, en cercanías del municipio de Aranzazu, específicamente en la vía que conduce a Salamina, aflora también una secuencia sedimentaria constituida por arenitas de grano medio, intercaladas con arenitas finas, lutitas y estratos de carbón. Esta secuencia en algunos sectores se encuentra altamente meteorizada.

- **Formación Combia (Tmc) (3 puntos).** Ocupa el 2.73 % del área. Se encuentra aflorando principalmente sobre las vías La Felisa - La Merced y La Felisa - Filadelfia. Corresponde a paquetes clasto-soportados conformados por una matriz tobácea, compuesta por vidrio volcánico, cuarzo y líticos. Ingeominas la describe como un conjunto de rocas volcanosedimentarias, de origen continental, compuesta por flujos de lava basáltica, rocas piroclásticas de composición intermedia; y para el miembro sedimentario se describen intercalaciones de conglomerados, brechas sedimentarias, areniscas de grano fino a medio y arcillolitas.
- **Formación Irra - Tres Puertas Conglomerados (Tsic) (4 puntos).** Ocupa el 3.65 % del área. Una unidad sedimentaria de extensión considerable en el sur de la zona de estudio. Corresponde a conglomerados polimícticos, soportados en una matriz arenosa de grano medio. Localmente, esta última presenta estructura festoneada. Los conglomerados están compuestos por clastos de chert, cuarzo y líticos, tanto sedimentarios como metamórficos, mal seleccionados. La matriz está constituida por cuarzo, feldespatos, mica biotita y líticos.
- **Formación Irra - Tres Puertas Volcanosedimentaria (Tsivs) (3 puntos).** Ocupa el 4.24 % del área. Compuesta por capas de gravas matriz soportadas e intercaladas con algunas capas de areniscas. Los conglomerados de guijos y guijarros son de composición basáltica, metamórfica y algunos pórfidos andesíticos, intercalados con paquetes de areniscas, lodolitas verdes y marrones; en la base predominan arcillolitas verdes y algunos conglomerados de matriz arcillosa.
- **Gabros Chinchiná - Santa Rosa (Kg) (2 puntos).** Ocupan el 2.22% del área. Roca dura de origine intrusivo; se encuentran ubicada en la parte sur de la cuenca, formando una franja alargada N-S. Sus límites están dados al este y al oeste por el sistema de fallas de Romeral, al norte por la falla Tareas, y al sur en la cuenca del río Chinchiná.
- **Lavas del Guayabo (Qlg) (2 puntos).** Ocupan el 1.69 % del área, al sureste de la zona de estudio, hacia la parte alta de la subcuenca del río Tapias – Tareas; afloran flujos andesíticos de topografía sobresaliente, con escarpes verticales de alturas

entre 15 y 20 m y cimas irregulares. Litológicamente corresponden a rocas ígneas extrusivas, de textura afanítica y porfírica, de color gris y de composición andesítica.

- ***Pórfido Dacítico de La Felisa (Td) (2 puntos)***. Ocupa el 1.77 % del área. Este cuerpo de roca aflora sobre la parte sur de la zona de trabajo, y corresponde a una roca con textura holocristalina porfírica; presenta aureolas de oxidación y estructuras como fracturas, diaclasas y fallas. Su comportamiento geomecánico describe superficies rugosas en condiciones de superficie buenas; presenta un enrejado de fracturas, variando de bloques bien ajustados a algo desajustados. Generalmente estas discontinuidades se encuentran abiertas; las diaclasas exhiben orientación predominante N30°W/54°NE y persistencia en todo el afloramiento, con un comportamiento de material duro.
- ***Pórfido de Irra (Tpi) (2 puntos)***. Ocupan el 1.71 % del área. Esta unidad corresponde a un cuerpo compacto con alteraciones hidrotermales que, en algunos sectores, da alta resistencia por recristalización del cuarzo. Geomecánicamente se describe un material moderadamente duro, con superficies rugosas de grado de calidad bueno en bloques ajustados. El grado de diaclasamiento es bajo.
- ***Pórfido de Neira (Tpn) (2 puntos)***. Ocupa el 0.54 % del área. Este cuerpo de roca aflora sobre la parte sureste de la zona, y corresponde a una roca de textura porfírica de composición andesítica, débilmente meteorizada. Su comportamiento geomecánico resulta en bloques de material duro bien ajustados, muy bien entrabados. Presenta un grado bajo de diaclasamiento con tendencias N20°W/Vertical, N60°E/65°NW, N25°W/70°SW, las cuales forman pocos planos de discontinuidades, dando condiciones de superficie muy buenas, con muy buena rugosidad en superficies de roca fresca, y presenta algunas costras de óxidos.
- ***Pórfido del Guayabo (Tpg) (2 puntos)***. Ocupa el 0.76 % del área. Esta unidad se encuentra al sureste de la zona de estudio y corresponde a una roca de textura porfírica silicificada. El macizo presenta una alta alteración hidrotermal y se observan aureolas de oxidación. Presenta un comportamiento geomecánico que

varía dependiendo de la densidad de fracturamiento. Las discontinuidades se hallan abiertas, generando varios planos con direcciones N70°E/Vertical, N75°W/8°NE, N35°E/45°NW, E-W/65°NW. En un material moderadamente duro con bloques desajustados y condiciones de superficie regular, moderadamente descompuesto, presenta superficies rugosas y onduladas. El diaclasamiento está asociado a la interacción de la falla San Jerónimo con otros sistemas estructurales. El porcentaje de roca no alterada varía de 10 a 30 %.

- ***Pórfidos dacíticos andesíticos de Arma (Tda) (2 puntos)***. Ocupan el 1.65 % del área. Sobre la vía Arma – Pácora se observa un cuerpo porfirítico de composición intermedia a básica, cuya intrusión desarrolla alteraciones hidrotermales y afectación térmica en arenitas de la Formación Amagá. Esta litología fue observada en cercanías al corregimiento de Arma, sobre las vías que conducen de Arma a Aguadas, Arma a La Pintada, y también sobre la vía terciaria que conduce a la hacienda Canadá, al suroccidente de Arma. En esta zona, dicha litología genera apófisis de colinas escarpadas con cimas redondeadas, resaltando en medio de la topografía suave generada por los depósitos cenozoicos de la formación Amagá.
- ***Rocas máficas y ultramáficas (Kus) (3 puntos)***. Ocupan el 1.88 % del área. Afloran en la parte norte del a zona. Se presentan rocas ígneas de origen, de fondo oceánico, clasificadas como gabros. Presenta una leve meteorización, donde el porcentaje de roca alterada es de 20 a 30 %. Muestran un alto diaclasamiento y fracturamiento que se ve asociado con la falla Silvia - Pijao, las diaclasas se encuentran discontinuas con tendencias N10°W/Vertical. Su comportamiento geomecánico describe superficies levemente onduladas y altamente rugosas, en bloques que varían de ajustados a desajustados, en un material moderadamente duro. Las rocas serpentinizadas presentan un comportamiento frágil. A pesar de ser rocas de carácter duro, se tienen como intermedias por interacción de varios sistemas de fallas y un metamorfismo de bajo grado, evidenciado en las serpentinas derivadas de las rocas peridotíticas de esta unidad.
- ***Sedimentitas de Filadelfia (Tsf) (4 puntos)***. Ocupan el 1.46 % del área. Son rocas sedimentarias aflorantes en sentido N-S. Estos cuerpos tienen contacto al este con

la falla Silvia – Pijao, y al oeste con la falla Filadelfia. Corresponden a arenitas finas a medias que gradan hasta arenitas conglomeráticas, intercaladas con niveles de lodolitas. Están levemente meteorizadas, con un porcentaje de roca no alterada que varía entre el 20 y 30 %. Presentan un grado medio de diaclasamiento con tendencias N60°E/60°NW, N20°E/20°SE, N10°W/15°SW, N80°E/55°SE. Este diaclasamiento se ve asociado con las fallas anteriormente mencionadas; presentan una apertura 1-5 mm; se observan superficies rugosas describiendo su comportamiento geomecánico, en un material frágil con unas condiciones en superficie pobres con superficies pulidas.

- **Stock de Cambumbia (Tdc) (2 puntos).** Ocupan el 0.65 % del área. Este cuerpo fue observado al noroccidente de la zona de estudio, en cercanías al municipio de La Pintada (departamento de Antioquia), sobre la carrilera abandonada del antiguo ferrocarril del Pacífico, que va paralela al río Cauca. Genera relieves de cuchillas y colinas de cimas redondeas, laderas largas escarpadas y riscos, asociados a una disección moderada a alta de los drenajes
- **Stock de Irra (Kmi) (2 puntos).** Ocupa el 0.28 % del área. Localizado al sur de la zona de estudio, en la vereda Tapias en el río Cauca, un cuerpo de composición monzodiorítica. Se encuentra instruyendo formaciones sedimentarias del terciario y, a su vez, es intruída por el pórfido de Irra. Se describe una roca fanerítica de tamaño de grano medio, masiva y leucocrática.
- **Stock de Pácora (Tadp) (2 puntos).** Ocupa el 0.49 % del área. Aflorando al sur del corregimiento de Santiago de Arma, en la quebrada Pácora. Se describe un cuerpo elongado en dirección norte–sur. Corresponde a una roca holocristalina, fanerítica, de composición ácida, variando de tonalita a granodiorita. De acuerdo con las relaciones de campo, este cuerpo se encuentra intruyendo las rocas sedimentarias de la formación Amagá y parcialmente las rocas metamórficas de protolito ultramáfico. Esta unidad es correlacionable con el stock de Pácora.

Geomorfología

Se consideraron 17 subunidades geomorfológicas, definidas según la metodología del Servicio Geológico Colombiano, para escala 1:25.000, descritas de la siguiente manera:

- **Cauce Actual (Fca) (2 puntos).** Comprende el 3.91 % de área.
- **Cima estructural (Sce) (4 puntos).** Comprende el 2.09 % de área. Lomo o abombamiento de la superficie del terreno, generado por plegamiento y limitado localmente por fallamiento. Pueden corresponder a la parte alta de estructuras anticlinales, y las dimensiones pueden variar fuertemente de unas decenas de metros a kilómetros, en una morfología de cerros y montañas.
- **Contraescarpe (Sc) (8 puntos).** Comprende el 1.97 % de área. Ladera con los estratos en contra de la pendiente del terreno. Son de longitud corta a larga, en forma cóncava y de pendientes abruptas o escalonadas. Su origen se relaciona con basculamiento o erosión intensa, y están asociadas con depósitos coluviales de buen espesor.
- **Depresión (Sd) (7 puntos).** Comprende el 1.54 % de área. Microcuenca de forma alargada, limitada por zonas escarpadas o filos rocosos, la cual es atravesada longitudinalmente por una falla, produciendo valles estrechos y profundos. Es una zona del relieve terrestre situada a una altura inferior que las regiones circundantes. Las depresiones pueden ser de tamaño y origen muy variados, desde cubetas de algunos metros de diámetro hasta grandes estructuras de escala continental. Este último caso lo constituyen a menudo las llamadas hondonadas, en las que la permeabilidad de la roca y el clima han permitido la formación de lagos permanentes.
- **Escarpes (De) (10 puntos).** Comprenden el 0.43 % de área. Corresponden a esta categoría las laderas cortas, verticales o semi-verticales (inclinación mayor a 70°), que se forman en macizos rocosos o en depósitos de suelo firme, debido exclusivamente a procesos denudativos o de movimientos en masa. También se

consideran las colinas y montañas con laderas empinadas a quebradas, profundamente disectadas por los drenajes. Se distribuyen hacia la zona de vertientes montañosas altas, donde las pendientes son alargadas y rectilíneas. Se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos de ladera muy inestables debido a las pendientes. En esta unidad es común encontrar procesos erosivos y de remoción en masa, concentrados alrededor de un drenaje, y sectores donde se concentran actividades antrópicas relacionadas con explotación de canteras. Su ocupación debe ser restringida ya que el uso inadecuado de estos terrenos puede generar y/o activar deslizamientos.

- **Escarpe de Falla (Sef) (11 puntos).** Comprende el 2.12 % del área. Son desniveles topográficos escarpados que se producen a lo largo de una falla, generados cuando se produce desplazamiento. Inicialmente el escarpe puede corresponder al afloramiento del plano de falla, que se transforma en una superficie declinada por procesos de degradación y erosión.
- **Facetas triangulares (Sft) (5 puntos).** Comprenden el 1.97 % del área. Superficie de forma triangular o trapezoidal inclinada, cuyo ápice apunta hacia arriba, que se presenta en la cara libre de un interfluvio cuando es cortado por una falla. Es el resultado de procesos de degradación y declinación que actúan sobre un escarpe de falla. El plano de la faceta, entonces, no representa el actual plano de falla, sino un remanente erosivo de un escarpe de falla.
- **Flujos de Lava (Vfl) (4 puntos).** Comprenden el 0.27 % del área. Suelos de texturas moderadamente gruesas (FA), bien drenados, profundos y fertilidad química baja. Presenta erosión hídrica en grado ligero
- **Ladera Denudacional (Did) (10 puntos).** Comprende el 0.33 % del área. Estas geoformas están relacionadas con los procesos denudacionales que se presentan en climas tropicales; caracterizados por erosión, depositación y movimientos en masa.
- **Ladera estructural (Sle) (8 puntos).** Comprende el 7.46 % del área. Superficie natural de morfología alomada, con los estratos inclinados a favor de la pendiente,

de longitud corta a larga, con pendientes moderadas a abruptas, formada por capas o planos de discontinuidad, ubicados en el mismo sentido de la pendiente. Su origen se asocia con procesos de basculamiento y disección intensa. Se localizaron, en su gran mayoría, hacia la margen izquierda de los ríos Chamberí, Pozo, Tapias, Tareas y Pácora.

- **Laderas inclinadas (DI) (9 puntos).** Comprenden el 35.53 % del área. Estas geoformas están relacionadas con los procesos denudacionales que se presentan en climas tropicales; caracterizados por erosión, depositación y movimientos en masa. Son aquellas geoformas cuyas laderas presentan inclinación moderada a alta, y se asocian a vertientes y microcuencas denudadas.
- **Laderas moderadamente inclinadas (DI_{mi}) (5 puntos).** Comprenden el 15.74% del área. Morfológicamente son colinas convexas de pendiente moderada, cimas redondeadas a subredondeadas; hacen parte de esta unidad la cima de las laderas en el sector de San Félix.
- **Ladera poco inclinada (DI_{pi}) (2 puntos).** Comprende el 17.69 % del área. Estas geoformas están relacionadas con los procesos denudacionales que se presentan en climas tropicales, caracterizados por erosión, depositación y movimientos en masa.
- **La llanura (FI) (2 puntos).** Comprende el 0.22 % del área. Corresponde, desde el punto de vista morfodinámico, a las áreas cubiertas por el agua durante las crecidas que se producen luego de precipitaciones pluviales de alta intensidad y duración. Dentro de los límites municipales, estas geoformas constituyen fajas comúnmente “encajadas” varios metros y pueden presentar morfologías en planta tanto rectilínea como sinuosa. Estas variaciones morfológicas están vinculadas a la existencia o no de controles estructurales en el desarrollo de la llanura aluvial. Se producen fundamentalmente en el curso alto del río, donde la energía es mayor.
- **Lomo Estructural (SI) (8 puntos).** Comprende el 4.24 % del área. Estas geoformas se originan por influencia de la actividad tectónica sobre rocas y suelos, generando expresiones en el terreno posteriormente afectadas por procesos denudacionales.

- **Terraza Aluvial (Fta) (2 puntos).** Comprende el 4.44 % del área. Son geoformas derivadas de la actividad gradacional y degradacional de las corrientes fluviales. Incluyen cauces actuales de corrientes y niveles de terrazas dejadas por sedimentación e incisión de cauces y eventos fluvio-torrenciales.
- **Zona Urbana (Azu) (3 puntos).** Comprende el 0.04 % del área. Se compone de suelos de texturas finas y medianamente finas (FAr, Ar), bien drenados, moderadamente profundos y fertilidad química moderada.

Uso y Cobertura

Los pesos de los mapas de usos y coberturas, definidos para la zonificación por el método heurístico, se asignaron con base en la opinión de los expertos en el tema, del área de ingeniería forestal y agronomía, teniendo en cuenta, los sistemas radicales, amarre y resistencia ante la ocurrencia de deslizamientos.

Se consideraron los siguientes usos y coberturas:

- **Bosque de Galería y Ripiario (2 puntos).** Comprende el 11.91 % del área. Contiene las coberturas constituidas por bosque natural, ubicados en los cursos de agua permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y los drenajes naturales. Cuando la presencia de estas franjas ocurre en sabanas, se conocen como bosques de galería o cañadas; las otras franjas de bosque en cursos de agua, de zonas andinas, son conocidas como bosque ripiario.
- **Bosque denso (2 puntos).** Comprende el 7.12 % del área. Está constituido por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, que forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo, cuya área de cobertura representa más del 70 % del área total de la unidad, y la altura del dosel es superior a cinco metros. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas, o su intervención ha sido selectiva. A su vez, estas unidades pueden subdividirse en las siguientes subclases:

- Bosque denso alto: cobertura constituida por una comunidad de bosque denso, cuya altura promedio de dosel es superior a 15 metros.
- Bosque denso bajo: cobertura constituida por una comunidad de bosque denso, cuya altura promedio de dosel es inferior a 15 metros.
- **Bosque fragmentado (3 puntos).** Comprende el 0.64 % del área. Territorios cubiertos por bosques naturales densos o abiertos, cuya continuidad horizontal está afectada por la inclusión de otro tipo de coberturas como pastos, cultivos o formaciones en transición, las cuales representan entre el 5 y el 30% del área total de bosque natural. La distancia entre fragmentos de intervención no debe ser superior a 250 metros. El bosque fragmentado se subdivide en:
 - Bosque fragmentado con pastos y cultivos: cobertura constituida por una comunidad de bosque natural donde se ha presentado intervención humana, de tal manera que el bosque mantiene su estructura original. Las áreas de intervención tienen formas variadas y distribución irregular dentro de la matriz del bosque. Las áreas de pastos y cultivos deben representar entre el 5 y el 30 % del área total de la unidad.
 - Bosque fragmentado con vegetación secundaria: cobertura establecida en territorios cubiertos con bosque naturales, que han sido intervenidos, y presentan procesos de recuperación, de tal forma que el bosque mantiene su estructura original. Las áreas intervenidas representan terrenos que han sido abandonados de las intervenciones con pastos y cultivos, y se encuentran en los primeros estados de sucesión natural. Estas áreas representan entre el 5 y el 30 % del área total de la unidad.
- **Cuerpos de agua artificiales (4 puntos).** Comprenden el 0.003 % del área. Son cuerpos de agua creados por el hombre para almacenar agua.
- **Cultivos permanentes arbustivos (4 puntos).** Comprenden el 1.41 % del área. Territorios ocupados principalmente por cultivos de hábito arbustivo, como café,

cacao, coca y viñedos, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 5,0 metros, fuertemente ramificado desde la base y sin copa definida.

Café: es la especie agrícola más difundida, no solo en la subzona Hidrográfica del río Tapias y otros directos al Cauca, sino en todo el departamento. Su presencia se localiza en la franja altitudinal que oscila entre los 1.400 y 1.900 m.s.n.m., y se constituye en plantaciones con áreas variables e irregulares y sistemas de manejo variables, en las que predomina el café a libre exposición.

Cacao: es un cultivo de alto potencial en la región, pero actualmente se encuentra poco difundido. Las áreas de este cultivo en la SZH son de bajas dimensiones y no se alcanzan a registrar en la escala de estudio. Por tal motivo han sido incluidas en mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales.

- **Cultivos permanentes arbóreos (5 puntos).** Comprenden el 10.42 % del área. Cobertura conformada por cultivos de hábito arbóreo, diferentes de plantaciones forestales maderables o de recuperación, como cítricos, palma, mango, cultivos agroforestales y cultivos confinados, entre otros.
- **Cultivos permanentes herbáceos (4 puntos).** Comprenden el 1.91 % del área. Cobertura compuesta principalmente por cultivos permanentes de hábito herbáceo, como caña de azúcar, caña panelera, plátano, banano, tabaco y papaya. Estas especies no presentan tallo leñoso y son de ciclo vegetativo anual. En la SZH se encuentran dos de estos cultivos difundidos masivamente que son:

Caña: primordialmente del tipo caña panelera, difundido en la zona baja, entre los 1.200 y 1.500 m.s.n.m., y la caña de azúcar, plantada en áreas proporcionalmente pequeñas, en el sector del kilómetro 41.

Plátano y banano: estos cultivos se encuentran altamente difundidos en la SZH, específicamente en la zona cafetera (1.300 a 1.800 m.s.n.m.). Prima el cultivo del plátano sobre el banano, especie que sólo se produce para el consumo interno.

- **Mosaico de cultivos (7 puntos).** Comprende el 0.4 7% del área. Incluye las tierras ocupadas con cultivos anuales, transitorios o permanentes, en los cuales el tamaño

de las parcelas es muy pequeño (25 ha) y la distribución de los lotes es muy intrincada para cartografiarlo de manera individual.

- **Mosaico de cultivos con espacios naturales (4 puntos).** Comprende el 0.75 % del área.
- **Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (5 puntos).** Comprende el 6.70 % del área. Considera territorios ocupados con cultivos y pastos, en combinación con formaciones naturales. El tamaño de los sistemas productivos no permite cartografiar de forma individual. Las áreas de cultivos y pastos representan entre el 30 y el 70 % del polígono.
- **Mosaico de pastos con espacios naturales (3 puntos).** Comprende el 6.66 % del área.
- **Mosaico de pastos y cultivos (5 puntos).** Comprende el 1.04 % del área. Incluye las tierras ocupadas con pastos y cultivos en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño (inferior a 2,5 ha), y la distribución de los lotes es muy intrincada para representar cartográficamente de manera individual.
- **Otros cultivos transitorios (7 puntos).** Comprenden el 0.04 % del área.
- **Pastos arbolados (4 puntos).** Comprenden el 1.01% del área. Esta categoría se configura cuando los pastos son combinados con especies arbóreas o arbustivas, diferentes de las de producción de maderas, generalmente establecidas para sombrero del ganado.
- **Pastos enmalezados (4 puntos).** Comprenden el 3.09 % del área. Sistemas productivos pecuarios que se encuentran en desuso y, en consecuencia, se comienzan a presentar procesos de regeneración natural.
- **Pastos limpios (5 puntos).** Comprenden el 40.44 % del área. Son coberturas de gramíneas de baja altura utilizadas intensivamente para producción pecuaria, generalmente bajo el sistema de rotación de potreros. Tienen manejo de siembra de especies de pasto específicas y retiro de especies arvenses.

- **Plantación forestal (2 puntos).** Comprende el 0.50 % del área. Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, establecidas directamente por el hombre con fines de manejo forestal, para la producción de madera (plantaciones comerciales) o de bienes y servicios ambientales (plantaciones protectoras).
- **Ríos (6 puntos).** Comprenden el 0.50 % del área. Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad y posee un caudal considerable; desemboca al mar, a un lago o a otro río de mayor magnitud.
- **Tejido urbano continuo (2 puntos).** Comprende el 0.27 % del área. Comprende el 0.06% del área. Son espacios conformados por edificaciones y zonas adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies, cubiertas artificialmente, representan más del 80 % de la superficie terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del tejido urbano. En esta categoría se ubican las seis (6) cabeceras municipales que se encuentran incluidas dentro del territorio de la subzona hidrográfica (Neira, Aranzazu, Filadelfia, La Merced, Salamina y Pácora). La cabecera municipal de Aguadas no alcanza a entrar en el territorio de la SZH; únicamente una línea de viviendas que se localiza al costado sur de la divisoria de aguas, de las subcuencas de los ríos Arma y Pácora. También se incluyen dentro de esta categoría los corregimientos de Arma (Aguadas), Castilla (Pácora), San Bartolomé (Pácora) y Samaria (Filadelfia).
- **Tejido urbano discontinuo (3 puntos).** Comprende el 0.06 % del área. Espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura cubren el área de forma dispersa y discontinua. El resto del área está cubierta de vegetación. En esta categoría solo participan algunos centros poblados como el Kilómetro 41, con jurisdicción compartida entre Manizales y Neira.
- **Tierras desnudas degradadas (8 puntos).** Comprenden el 0.24 % del área. Corresponden a las superficies de terreno desprovistas de vegetación, o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos, tanto naturales como antrópicos, de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras en proceso de desertificación o

con intensos procesos de erosión, que pueden llegar hasta la formación de cárcavas.

- **Vegetación secundaria o en transición (3 puntos).** Comprende el 4.78 % del área.
- **Zonas quemadas (8 puntos).** Comprenden el 0.02% del área. Corresponden a las áreas afectadas por incendios recientes, donde los materiales carbonizados aún están presentes. Estas áreas hacen referencia a los territorios afectados por incendios localizados tanto en áreas naturales como seminaturales, tales como bosques, cultivos, sabanas y arbustales.

Tabla 5.

Valoración de la susceptibilidad por movimientos en masa. Método heurístico

FACTOR	DESCRIPCIÓN	PESO ASIGNADO	PUNTAJE ASIGNADO	CALIFICACIÓN	MÁXIMA CALIFICACIÓN
Pendiente	Entre 0 y 7 grados	32	5	1.6	11.2
	Entre 7 y 14 grados		10	3.2	
	Entre 14 y 27 grados		20	6.4	
	Entre 27 y 45 grados		30	9.6	
	Mayores de 45 grados		35	11.2	
Geología Superficial	Andesitas de Pan de Azúcar	22	2	0.44	1.1
	Anfibolita Saussurítica de Chinchiná		2	0.44	
	Batolito de Sonsón		2	0.44	
	Complejo Arquía		3	0.66	
	Complejo Arquía Esquisto de Lisboa - Palestina		3	0.66	
	Complejo Ofiolítico de Filadelfia		2	0.44	
	Complejo Ofiolítico de Pácora		2	0.44	
	Complejo Quebrada Grande Sedimentario		3	0.66	
	Complejo Quebrada Grande Volcánico		2	0.44	
	Depósito Aluviales		4	0.88	
	Depósitos piroclásticos glaciofluviales		5	1.1	
	Depósitos de Caída Piroclásticos		3	0.66	
	Depósitos de Flujo de Lodo y Escombros		5	1.1	
	Flujos de Escombros y Lahares		5	1.1	

	Flujos Andesíticos Recientes		2	0.44	
	Flujos de Lodo		5	1.1	
	Formación Abejorral		3	0.66	
	Formación Amagá Miembro Medio		3	0.66	
	Formación Amagá Miembro Superior		4	0.88	
	Formación Aranzazu		3	0.66	
	Formación Combia		3	0.66	
	Formación Irra Tres Puertas Conglomerados		4	0.88	
	Formación Irra Tres Puertas Volcanosedimentario		3	0.66	
	Gabros Chinchiná Santa Rosa		2	0.44	
	Lavas del Guayabo		2	0.44	
	Pórfido Dacítico de La Felisa		2	0.44	
	Pórfido de Irra		2	0.44	
	Pórfido de Neira		2	0.44	
	Pórfido del Guayabo		2	0.44	
	Pórfido Dacitos Andesítico de Arma		2	0.44	
	Rocas Máficas y Ultramáficas		3	0.66	
	Sedimentitas de Filadelfia		4	0.88	
	Stock de Cambumbia		2	0.44	
	Stock de Irra		2	0.44	
	Stock de Pácora		2	0.44	
Geomorfología	Cauce Actual	18	2	0.36	1.5
	Cima Estructural		4	0.72	
	Contraescarpe		8	1.44	
	Depresión		7	1.26	
	Escarpe		10	1.8	
	Escarpe de Falla		11	1.98	
	Facetas triangulares		5	0.9	
	Flujos de Lava		4	0.72	
	Ladera Denudacional		10	1.8	
	Ladera Estructural		8	1.44	
	Ladera Inclinada		9	1.62	
	Ladera Moderadamente Inclinada		5	0.9	
	Ladera Poco Inclinada		2	0.36	
	Llanura		2	0.36	
	Lomo Estructural		8	1.44	
	Terraza Aluvial		2	0.36	
	Zona Urbana		3	0.54	

Usos y Coberturas	Bosque de Galería y Ripiario	28	2	0.56	2.24
	Bosque denso		2	0.56	
	Bosque fragmentado		3	0.84	
	Cuerpos de agua artificiales		4	1.12	
	Cultivos permanentes arbustivos		4	1.12	
	Cultivos permanentes arbóreos		5	1.4	
	Cultivos permanentes herbáceos		4	1.12	
	Mosaico de cultivos		7	1.96	
	Mosaico de cultivos con espacios naturales		4	1.12	
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		5	1.4	
	Mosaico de pastos con espacios naturales		3	0.84	
	Mosaico de pastos y cultivos		5	1.4	
	Otros cultivos transitorios		7	1.96	
	Pastos arbolados		4	1.12	
	Pastos enmalezados		4	1.12	
	Pastos limpios		5	1.4	
	Plantación forestal		2	0.56	
	Ríos		6	1.68	
	Tejido urbano continuo		2	0.56	
	Tejido urbano discontinuo		3	0.84	
	Tierras desnudas degradadas		8	2.24	
	Vegetación secundaria o en transición		3	0.84	
Zonas quemadas	8	2.24			
TOTAL	100	100	16.04		

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se sumaron las calificaciones máximas, se dividió en rangos de tres para la obtención de la susceptibilidad: alta, media y baja, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6.
Cuantificación de la susceptibilidad método heurístico

Susceptibilidad	Calificación cualitativa	Rango numérico
	Baja	0 -5.36
	Media	5.36 - 10.72
	Alta	> 10.72

Fuente: Elaboración propia

FASE IV. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, por el método estadístico bivariado

Es un método estadístico basado en el cálculo de áreas, densidades y pesos, que nos permite determinar las zonas que presentan o no inestabilidad por procesos erosivos y, por lo tanto, diferentes rangos de amenaza. Se hace mediante la comparación de los diferentes mapas temáticos utilizados (geológico, formaciones superficiales, geomorfología, uso y cobertura del suelo y pendientes) con el mapa de procesos erosivos, utilizando la siguiente metodología:

Este método, según Carrara et al. (2008), se basa en el análisis de las relaciones entre la distribución espacial de factores condicionantes de la inestabilidad de la ladera y la de los deslizamientos observados. Se asume que los factores que causaron roturas en una región específica son similares a los que podrían generar deslizamientos en el futuro. Utilizando una misma hipótesis, las técnicas de aprendizaje buscan definir un modelo que clasifique determinados patrones o ajustes en una función de interés, minimizando numéricamente el error encontrado entre la salida estimada y la respuesta disponible, de un conjunto de datos previamente conocido.

Es un método estadístico basado en el cálculo de áreas, densidades y pesos que nos permite determinar las zonas que presentan o no inestabilidad por procesos erosivos y, por lo tanto, diferentes rangos de amenaza. Se hace mediante la comparación de los diferentes mapas temáticos utilizados (pendientes, geología

superficial, geomorfología y uso y cobertura del suelo), con el mapa de procesos erosivos, utilizando la siguiente metodología:

- a. Cálculo del área total de la zona (A_T)

$$A_T = 139024.976494\text{ha}$$

Cálculo del área total afectada por procesos erosivos (A_{pe})

$$A_{pe} = 2681.969944\text{ha}$$

- b. Cálculo del área de cada una de las clases (A_{TCi}) de los mapas de factores (geológico y formaciones superficiales, usos del suelo y pendientes) (Tablas 7, 8, 9 y 10). Las clases están dadas por las unidades o rangos que tiene cada mapa.

Clases Mapa Geología Superficial

En la tabla 7 se encuentra la clasificación geológica por unidades y áreas.

Tabla 7.

Área total en Ha de cada una de las clases del mapa de geología superficial

CLASES	UNIDAD	A_{TCi}
Clase 1 (C1)	Andesitas de Pan de Azúcar	0.00735753542
Clase 2 (C2)	Anfibolita Saussurítica de Chinchiná	0.01677495393
Clase 3 (C3)	Batolito de Sonsón	0.00132188918
Clase 4 (C4)	Complejo Arquía	0.00772177194
Clase 5 (C5)	Complejo Arquía Esquisto de Lisboa - Palestina	0.02850264627
Clase 6 (C6)	Complejo Ofiolítico de Filadelfia	0.05404802346
Clase 7 (C7)	Complejo Ofiolítico de Pácora	0.05460736872
Clase 8 (C8)	Complejo Quebrada Grande Sedimentario	0.16966855533
Clase 9 (C9)	Complejo Quebrada Grande Volcánico	0.12294330283
Clase 10 (C10)	Depósito aluviales	0.01396798622
Clase 11 (C11)	Depósitos piroclásticos glaciofluviales	0.06611981244
Clase 12 (C12)	Depósitos de caída piroclásticos	0.03358264612
Clase 13 (C13)	Depósitos de flujo de lodo y escombros	0.02952024475
Clase 14 (C14)	Flujos de escombros y lahares	0.00318557311
Clase 15 (C15)	Flujos andesíticos recientes	0.00205527614

Continuación Tabla 7.

CLASES	UNIDAD	ATCi
Clase 16 (C16)	Flujos de lodo	0.00018443808
Clase 17 (C17)	Formación Abejorral	0.05782941982
Clase 18 (C18)	Formación Amagá, miembro medio	0.02576702509
Clase 19 (C19)	Formación Amagá, miembro superior	0.04519126996
Clase 20 (C20)	Formación Aranzazu	0.00244081595
Clase 21 (C21)	Formación Combia	0.02726977804
Clase 22 (C22)	Formación Irra Tres Puertas, conglomerados	0.03645795534
Clase 23 (C23)	Formación Irra Tres Puertas, volcanosedimentario	0.04236563879
Clase 24 (C24)	Gabros Chinchiná, Santa Rosa	0.02215063680
Clase 25 (C25)	Lavas del Guayabo	0.01691885797
Clase 26 (C26)	Pórfido dacítico de La Felisa	0.01769730486
Clase 27 (C27)	Pórfido de Irra	0.01713735254
Clase 28 (C28)	Pórfido de Neira	0.00541761751
Clase 29 (C29)	Pórfido del Guayabo	0.00756639521
Clase 30 (C30)	Pórfido aacítos andesítico de Arma	0.01654543415
Clase 31 (C31)	Rocas máficas y ultramáficas	0.01883950299
Clase 32 (C32)	Sedimentitas de Filadelfia	0.01457884961
Clase 33 (C33)	Stock de Cambumbia	0.00653886029
Clase 34 (C34)	Stock de Irra	0.00283496687
Clase 35 (C35)	Stock de Pácora	0.00489029429

Fuente: elaboración personal

Clases mapa de uso del suelo

En la tabla 8 se encuentra la clasificación por áreas y tipos de uso del suelo.

Tabla 8.

Área total en Ha de cada una de las clases del mapa de Usos del Suelo

Clases	Tipo de uso del suelo	Área_Ha
Clase 1 (C1)	Bosque de Galería y Ripiario	16554.98528730000
Clase 2 (C2)	Bosque denso	9901.40718402000
Clase 3 (C3)	Bosque fragmentado	894.50829879700
Clase 4 (C4)	Cuerpos de agua artificiales	4.57971804972
Clase 5 (C5)	Cultivos permanentes arbustivos	1958.66042477000
Clase 6 (C6)	Cultivos permanentes arbóreos	14488.41930330000
Clase 7 (C7)	Cultivos permanentes herbáceos	2656.97060303000
Clase 8 (C8)	Mosaico de cultivos	657.04081975400
Clase 9 (C9)	Mosaico de cultivos con espacios naturales	1039.96329360000
Clase 10 (C10)	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	9316.09579884000
Clase 11 (C11)	Mosaico de pastos con espacios naturales	9253.36802383000
Clase 12 (C12)	Mosaico de pastos y cultivos	1445.04267638000
Clase 13 (C13)	Otros cultivos transitorios	59.98081736580
Clase 14 (C14)	Pastos arbolados	1401.69945369000
Clase 15 (C15)	Pastos enmalezados	4289.67672468000
Clase 16 (C16)	Pastos limpios	56216.07641660000
Clase 17 (C17)	Plantación forestal	691.66618395800
Clase 18 (C18)	Ríos	689.96128045200
Clase 19 (C19)	Tejido urbano continuo	382.10681376800
Clase 20 (C20)	Tejido urbano discontinuo	87.60188425930
Clase 21 (C21)	Tierras desnudas degradadas	337.13900606000
Clase 22 (C22)	Vegetación secundaria o en transición	16554.98528730000
Clase 23 (C23)	Zonas quemadas	9901.40718402000

Fuente: elaboración personal

Clases mapa geomorfológico

En la tabla 9 se tiene la clasificación propuesta por subunidades geomorfológicas y áreas

Tabla 9.

Área total en Ha de cada una de las clases del mapa geomorfológico

Clases	Sub unidades geomorfológicas	Área_Ha
Clase 1 (C1)	Cauce actual	7813.33966825000
Clase 2 (C2)	Cima estructural	4171.84797726000
Clase 3 (C3)	Contraescarpe	3940.61072794000
Clase 4 (C4)	Depresión	3066.81545189000
Clase 5 (C5)	Escarpe	853.92542981800
Clase 6 (C6)	Escarpe de falla	4238.43838031000
Clase 7 (C7)	Facetas triangulares	3940.26721558000
Clase 8 (C8)	Flujos de lava	546.68389844200
Clase 9 (C9)	Ladera denudacional	652.39691871300
Clase 10 (C10)	Ladera estructural	14892.05947330000
Clase 11 (C11)	Ladera inclinada	70940.98141880000
Clase 12 (C12)	Ladera moderadamente Inclinada	31419.07106880000
Clase 13 (C13)	Ladera poco inclinada	35325.62012249990
Clase 14 (C14)	Llanura	433.34420013900
Clase 15 (C15)	Lomo estructural	8472.19645445000
Clase 16 (C16)	Terraza aluvial	8865.01946586000
Clase 17 (C17)	Zona urbana	7813.33966825000

Fuente: elaboración personal

Clases mapa de pendientes

En la tabla 10 se muestra la clasificación propuesta basada en las pendientes y las áreas.

Tabla 10.

Área total en Ha de cada una de las clases del mapa de pendientes

Clases	Pendientes	Área_ha
Clase 1 (C1)	Entre 0 y 7 grados	407.62733702600
Clase 2 (C2)	Entre 7 y 14 grados	698.68653605100
Clase 3 (C3)	Entre 14 y 27 grados	1278.74069104000
Clase 4 (C4)	Entre 27 y 45 grados	229.10912847600
Clase 5 (C5)	Mayores de 45 grados	67.67809220630

Fuente: elaboración personal

- c. Cálculo del área afectada por procesos erosivos en cada una de las clases (**A_{peCi}**) de cada uno de los mapas de factores (Tablas 11, 12, 13 y 14).
- d. Cálculo de densidad de procesos erosivos en toda la zona y en cada clase de cada mapa de factores (Tabla 3) según la fórmula:

d_T = A_{pe} / A_T * 100 en donde:

d_T = Densidad de procesos erosivos en toda la zona

A_{pe} = Área total afectada por procesos erosivos

A_T = Área total de la zona

d_{ci} = A_{peCi} / A_TCi* 100 en donde:

d_{ci} = Densidad de procesos erosivos en cada clase

A_{peCi} = Área afectada por procesos erosivos en cada clase

A_TCi = Área total de cada clase.

Las áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos, por clase en cada uno de los mapas temáticos, se resumen en las Tablas 11, 12, 13 y 14:

Tabla 11.

Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos en cada una de las clases (A_{peCi}). Mapa geología superficial

Nombre_Uni	Sum_área_ha	Densidad en %
Andesitas de Pan de Azúcar	72.05999111930	2.69
Anfibolita Saussurítica de Chinchiná	25.12709811430	0.94
Complejo Ofiolítico de Filadelfia	351.74941223200	13.12
Complejo Ofiolítico de Pácora	235.01927801100	8.76
Complejo Quebradagrande Sedimentario	603.34985108500	22.50
Complejo Quebradagrande Volcánico	494.45064381900	18.44
Depósitos aluviales	5.58081644920	0.21
Depósitos de caída piroclástica	199.78927719500	7.45
Depósitos de flujo de lodo y escombros	63.10441410520	2.35
Depósitos piroclásticos glaciofluviales	6.28016247881	0.23
Formación Abejorral	104.85574920400	3.91
Formación Amagá, miembro medio	56.53202512910	2.11

Continuación Tabla 11.

Nombre_Uni	Sum_área_ha	Densidad en %
Formación Amagá, miembro superior	38.06945429920	1.42
Formación Aranzazu	2.07080665555	0.08
Formación Combia	23.32385571710	0.87
Gabros Chinchiná, Santa Rosa	67.75676984820	2.53
Pórfido dacítico de la Felisa	59.19639876110	2.21
Pórfido del Guayabo	118.17209323100	4.41
Rocas máficas y ultramáficas	79.05674146460	2.95
Sedimentitas de Filadelfia	58.53813739470	2.18
Stock de Pácora	17.75880057040	0.66

Fuente: elaboración personal

Tabla 12.

Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos en cada una de las clases (ApeCi). Mapa usos del suelo

Uso del suelo	Sum_área_ha	Densidad en %
Bosque de galería y ripiario	279.02449485400	10.40
Bosque denso	0.52168684683	0.02
Bosque fragmentado	32.49403052800	1.21
Cultivos permanentes arbustivos	236.59437348700	8.82
Cultivos permanentes herbáceos	58.91491757950	2.20
Mosaico de cultivos	3.88371191057	0.14
Mosaico de cultivos con espacios naturales	125.08033672500	4.66
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243.26900474600	9.07
Mosaico de pastos con espacios naturales	188.92283300800	7.04
Mosaico de pastos y cultivos	13.55029427120	0.51
Pastos arbolados	4.80316938299	0.18
Pastos enmalezados	46.03336192380	1.72
Pastos limpios	980.65186050000	36.57
Plantación forestal	0.24552427981	0.01
Ríos	8.99143120713	0.34
Tejido urbano continuo	0.02679507487	0.00
Tierras desnudas y degradadas	223.00817836800	8.32
Vegetación secundaria o en transición	235.82576963700	8.79

Fuente: elaboración personal

Tabla 13.

Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos en cada una de las clases (A_{pe}Ci) Mapa de Geomorfología

SubUni_Geo	Sum_área_ha	Densidad en %
Cauce actual	130.17627207300	3.211
Cima estructural	116.79426904600	2.881
Contraescarpe	234.61898923500	5.787
Depresión	292.04644077100	7.204
Escarpe de falla	101.41239359900	2.502
Facetas triangulares	170.23575156300	4.199
Ladera denudacional	109.99591741900	2.713
Ladera estructural	232.65512583700	5.739
Ladera inclinada	1314.49886587000	32.424
Ladera moderadamente inclinada	555.90338022500	13.712
Ladera poco Inclinada	368.75801228300	9.096
Llanura	0.03491069114	0.001
Lomo estructural	360.24586625600	8.886
Terraza aluvial	66.68549771170	1.645

Fuente: elaboración personal

Tabla 14.

Áreas afectadas por procesos erosivos y densidad de procesos erosivos en cada una de las clases (A_{pe}Ci). Mapa de pendientes

Rangos	Sum_área_h	Densidad en %
0-7	407.62733702600	15.200
14-27	698.68653605100	26.052
27-45	1278.74069104000	47.681
45-80	229.10912847600	8.543
7-14	67.67809220630	15.200

Fuente: elaboración personal

e. Cálculo de valores de peso para cada clase de los mapas de factores (Tabla 4) mediante la fórmula:

$w_{ci} = d_{ci} - d_T$ en donde:

w_{ci} = Valor de peso para cada clase

d_{ci} = Densidad de procesos erosivos en cada clase

d_T = Densidad de procesos erosivos en toda la zona

Se asignaron los valores de densidad de cada clase obtenidos para cada mapa de factores, a los mapas de clase totales.

Se sumaron las densidades de cada uno de los mapas individuales para obtener un mapa de valores de peso único. Se tomó el dato máximo y se dividió en tres para obtener los rangos presentados en la Tabla 15.

Tabla 15.

Valoración de la susceptibilidad por movimientos en masa método estadístico bivariado

Susceptibilidad	Calificación cualitativa	Rango numérico
	Baja	0 -0.46
	Media	0.46 – 0.927
	Alta	> 0.927

Fuente: elaboración personal

Resultados

Resultados obtenidos - valoración de la susceptibilidad - método heurístico

La susceptibilidad se entiende como la predisposición de un lugar a presentar determinados fenómenos amenazantes. Estas condiciones del terreno son intrínsecas, como la geología, la pendiente, la precipitación, entre otras. Aunque se espera que los movimientos en masa ocurran con más frecuencia en la mayoría de las zonas susceptibles, en los análisis de susceptibilidad no se tiene en cuenta el tiempo de recurrencia (SGC, 2013). Fue clasificada, como ya se indicó, en tres: susceptibilidad alta, susceptibilidad media y susceptibilidad baja.

En este sentido, los resultados del análisis de susceptibilidad efectuado pueden observarse en el mapa señalado en la figura 6. En términos generales, de todo el proceso de valoración de este parámetro, pudieron obtenerse las siguientes conclusiones:

Zonas de susceptibilidad alta (color rojo)

Comprenden el 40 % del área de la zona de estudio. Se observan principalmente en la zona central de la cuenca, siguiendo la tendencia o el trazo de las fallas N-S principalmente (Fallas Silvia-Pijao, Manizales-Aranzazu y Sistema N-S); así mismo, siguiendo la dirección de las fallas E-W, como el sistema NNE–SSW, que controlan estructuralmente los ríos Pozo y San Lorenzo, falla Este-Oeste, falla Salón Rojo, en dirección de los ríos Pocito y Chambery, controlado estructuralmente por un lineamiento NNW–SSE. También se observa en la zona norte de la cuenca y norte del municipio de Aguadas, y sobre la zona oriental que comprende parte de los municipios de Neira, Salamina y Pácora.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se presentan en general las zonas que presentan alta susceptibilidad por movimientos en masa, con las características o factores que se describen a continuación.

Zona Nor-occidental

- Pendientes fuertes y muy fuertes (entre 27 y 45, y mayores a 45 grados).
- Rocas intermedias sedimentarias que comprenden la formación Amagá miembros medio y superior, rocas esquistosas del complejo Arquía, suelo residual de gabros de Chinchiná y Santa Rosa, stock de Pácora, pórfido dacítico de La Felisa, roca intermedia peridotita serpentizada.
- Pastos limpios, pastos enmalezados, mosaico de pastos con espacios naturales, bosque de galería y ripiario, bosque fragmentado bosques y áreas semi-naturales.
- Geomorfológicamente se ubica principalmente en laderas inclinadas y una pequeña porción sobre una terraza aluvial al occidente.
- Suelos a partir de rocas sedimentarias e ígneas, alteradas con inclusiones de rocas metamórficas; texturas moderadamente gruesas (FA), bien drenados y excesivamente drenados, moderadamente superficiales y superficiales, y fertilidad alta; y suelos de texturas finas y medianamente finas, altamente permeables; moderadamente profundos.

Zona Central

- Pendientes fuertes y muy fuertes (entre 27 y 45, y mayores a 45 grados).
- Rocas intermedias sedimentarias, de origen fluvial y rocas ígneas de origen volcánico (Complejo Quebradagrande sedimentario y volcánico), las cuales se encuentran afectadas por metamorfismo dinámico, dado por la influencia tectónica, caracterizadas por presentar alto grafo de fracturamiento y trituramiento, y baja resistencia a la erosión. Rocas ígneas de origen volcánico (andesitas de Pan de Azúcar), afectadas por metamorfismo dinámico, depósitos de caídas piroclásticas, que corresponden a suelos transportados, blandos, compuestos por ceniza, lapilli y fragmentos gruesos de pómez. Serpentinitas, wehrlitas, gabros cúmulo y gabros isotrópicos, y en la parte volcánica por lavas almohadilladas variolíticas, brechas almohadilladas y brechas (complejo ofiolítico de Filadelfia).

- Presencia de zonas sin vegetación o escasa cobertura vegetal, conformadas por algunas pequeñas porciones de zonas quemadas de manera aislada, y tierras desnudas y degradadas, así como la presencia de cultivos permanentes arbustivos, pastos limpios, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos con espacios naturales, vegetación secundaria o en transición y bosque fragmentado.
- Laderas de origen denudacional inclinada, moderadamente inclinadas, zonas afectadas por fuerte control estructural, donde se identifican rasgos como lomo estructural, facetas triangulares, depresiones topográficas, ladera estructural, escarpe de falla, cima estructural.
- Suelos a partir de depósitos superficiales piroclásticos sobre rocas sedimentarias e ígneas, texturas moderadamente gruesas y medianamente finas. Bien drenados, superficiales, moderadamente profundos y profundos. Y los suelos se han originado a partir de rocas metamórficas; se caracterizan por ser de texturas moderadamente gruesas y medianamente finas, drenaje moderadamente excesivo, profundos a superficiales.
- Con evidencia de algunos procesos de inestabilidad

Zona Oriental

- Pendientes fuertes y muy fuertes (entre 27 y 45, y mayores a 45 grados).
- Rocas máficas y ultramáficas con serpentización, altamente fracturadas por la influencia tectónica; rocas sedimentarias del Complejo Quebradagrande, con alto grado de meteorización, alta densidad de fracturamiento, comportamiento geomecánico. Produce rocas moderadamente duras a blandas y presencia de diaclasas abiertas; depósitos fluvio-glaciares que comprenden ceniza, lapilli y fragmentos gruesos de pómez, pertenecientes a la Formación Abejorral; rocas influenciadas tectónicamente falla de San Gerónimo que va en sentido N-S (lavas del Guayabo, pórfidos del Guayabo y pórfidos de Neira).

- Las coberturas vegetales predominantes son pastos limpios, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, vegetación secundaria en transición,
- Laderas denudacionales inclinadas, laderas con rasgos estructurales, contraescarpe, cima estructural.
- Suelos residuales originados a partir de cenizas volcánicas y rocas metamórficas, caracterizadas por ser de texturas moderadamente gruesas, medias y medianamente finas, permeables, profundos y superficiales.
- Con evidencia de algunos procesos de inestabilidad.

Zona Norte

- Pendientes fuertes y muy fuertes (entre 27 y 45, y mayores a 45 grados).
- Rocas sedimentarias de origen fluvial, correspondientes a la Formación Amagá miembro superior, con predominio de arenitas oscuras, limonitas y arcillolitas; pórfidos dacíticos y andesíticos de Arma y stock de Cambumbia.
- Tierras cubiertas por mosaico de pastos, con espacios naturales y vegetación secundaria o en transición.
- Geomorfológicamente y de manera representativa, se compone de laderas denudacionales y laderas inclinadas.
- Suelos de rocas sedimentarias e ígneas alteradas con inclusiones de rocas metamórficas; texturas moderadamente gruesas, altamente permeables, moderadamente superficiales y superficiales.

Zonas de susceptibilidad media (color amarillo)

Comprende la mayor parte del área: 36 %. Se observa disperso en la cuenca y de manera representativa en la zona norte y oriental. Dentro de las zonas de amenaza media se encontraron características relacionadas con los siguientes factores:

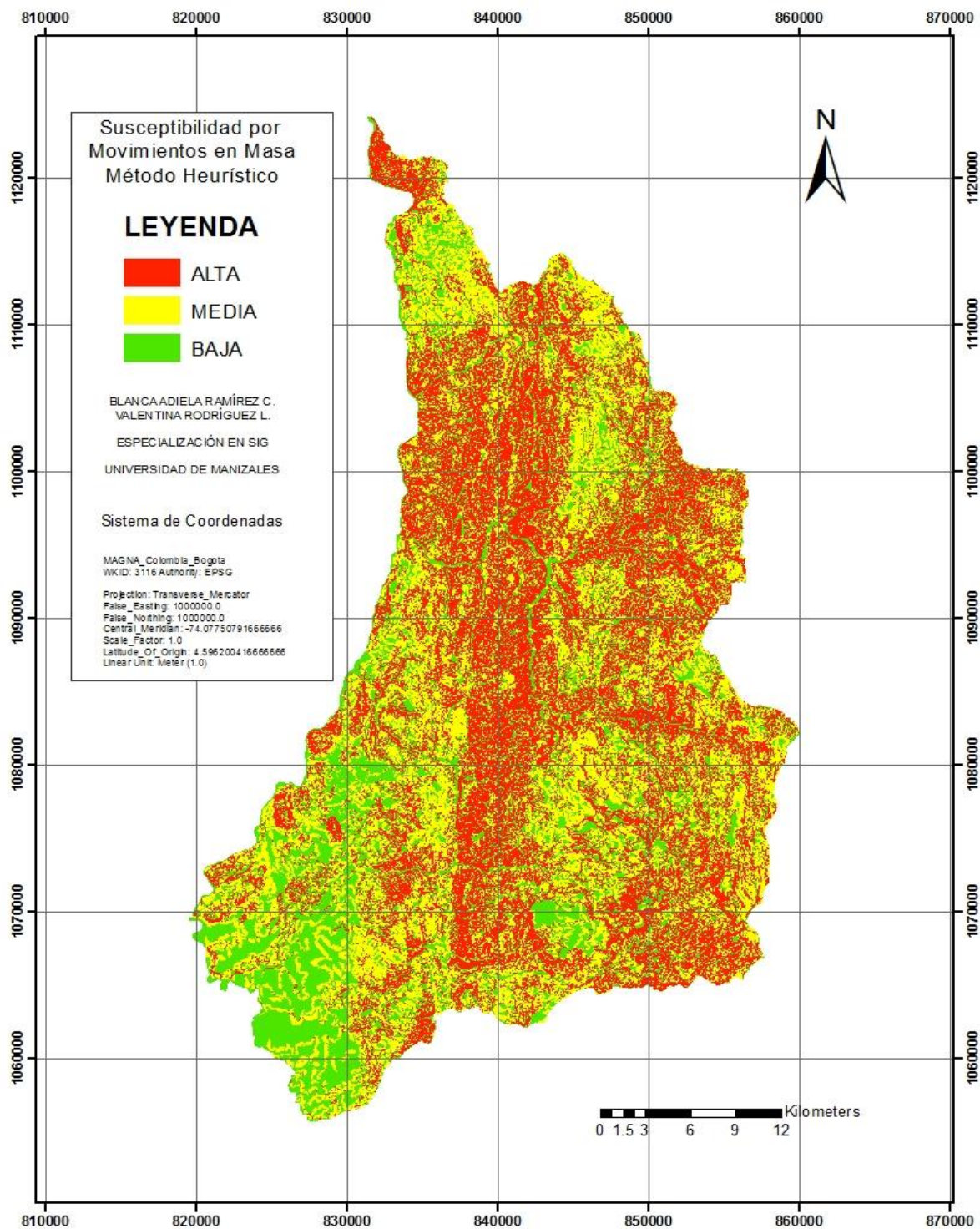
- Predominan pendientes entre 7 y 27 grados.
- Pórfidos dacíticos y andesíticos de Arma, formación Amagá miembro superior; rocas ultramáficas clasificadas como peridotitas, gabros y microgabros que están sufriendo una serpentización del complejo ofiolítico de Pácora, complejo Quebradagrande volcánico, depósitos de flujo de lodo y escombros, depósitos de caída piroclástica, depósitos piroclásticos glaciofluviales, roca blanda depósito fluvioglaciario, compuestos por ceniza, lapilli y fragmentos gruesos de pómez, de la Formación Abejorral, complejo Quebradagrande sedimentario y complejo Quebradagrande volcánico.
- Como usos del suelo se observan de manera predominante mosaico de cultivos, pastos limpios, cultivos permanentes herbáceos y cultivos permanentes arbustivos
- Laderas tipo denudacional, inclinadas, moderadamente inclinada; laderas de origen estructural, lomo estructural.
- Suelos a partir de la acumulación de espesas de cenizas volcánicas. Presenta erosión hídrica en grado ligero; texturas gruesas y moderadamente gruesas permeables, moderadamente profundos y profundos.
- Con evidencia de algunos procesos de inestabilidad.

Zonas de amenaza baja (color verde)

Comprende el 24 % del área total. Se presenta disperso en la cuenca, de manera más representativa en el suroccidente de la cuenca. Presentan características relacionadas con los siguientes factores:

- Predominan pendientes bajas menores a 7 grados.
- Formación Irra Tres Puertas conglomerados, depósitos aluviales, formación Irra Tres Puertas volcanosedimentario, serpentinitas, wehrlitas, gabros cúmulo y gabros isotrópicos, y en la parte volcánica por lavas almohadilladas variolíticas, brechas almohadilladas y brechas (complejo ofiolítico de Filadelfia). Depósitos de flujo de lodo y escombros. Depósitos de caída piroclástica. Complejo ofiolítico de Pácora (rocas ultramáficas clasificadas como peridotitas, gabros y microgabros que están sufriendo una serpentinización). Pórfidos dacíticos andesíticos de Arma.
- Tierras cubiertas principalmente de pastos limpios, cultivo permanente herbáceos en la zona sur, donde se ubican las zonas más planas; coberturas constituidas por bosque de galería y ripiario, y bosque denso más hacia la zona norte.
- Terrazas aluviales, llanura aluvial, laderas poco inclinadas de origen denudacional.
- No se evidencian procesos denudativos.

Figura 6. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en la subzona hidrográfica del río Tapias u otros aferentes directos al Cauca, por el método heurístico.



Resultados obtenidos - valoración de la susceptibilidad - método estadísticos bivariado

Los resultados del análisis de susceptibilidad efectuado pueden observarse en el mapa indicado en la figura 7. En términos generales, de todo el proceso de valoración de este parámetro por el método estadístico Bivariado, pudieron obtenerse las siguientes conclusiones:

Zonas de susceptibilidad alta (color rojo)

Comprende el 21 % del área de la zona de estudio; se observa de manera representativa en la zona oriental de la cuenca, con la dirección del río Pocito, controlado estructuralmente por la falla este-oeste, en dirección de la quebrada La Frisolera, la cual se encuentra controlada estructuralmente por la falla de Salamina; así mismo, en la parte alta de los ríos Pozo y San Lorenzo, zona que se encuentra influenciada estructuralmente por la falla de San Jerónimo en sentido N-S y el sistema NNE–SSW. De igual manera, se observa una tendencia en dirección a la falla Silvia-Pijao, con dirección N-S, en la zona central de la cuenca; en la zona norte, siguiendo la dirección del río Pácora, en sentido oriente-occidente y en la zona sur, en dirección de los ríos Tapias y Tareas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se presentan en general las zonas que presentan alta susceptibilidad por movimientos en masa, con las siguientes características o factores:

- Predominan las pendientes mayores a 27 grados.
- Rocas intermedias sedimentarias, de origen fluvial y rocas ígneas de origen volcánico (complejo Quebradagrande sedimentario y volcánico), las cuales se encuentran afectadas por metamorfismo dinámico, dado por la influencia tectónica, caracterizadas por presentar alto grado de fracturamiento y trituramiento y baja resistencia a la erosión. Formación Amagá miembros medio y superior, gabros Chinchiná Santa Rosa, rocas máficas y ultramáficas, batolito de Sonsón. complejo

ofiolítico de Filadelfia, depósitos piroclásticos glaciofluviales, compuestos por ceniza, lapilli y fragmentos gruesos de pómez; formación Abejorral, compuestos por ceniza, lapilli y fragmentos gruesos de pómez; pórfido dacítico de La Felisa, Pórfido de Irra, stock de Irra y flujos andesíticos recientes.

- Presencia de zonas sin vegetación o escasa cobertura vegetal, conformadas por algunas pequeñas porciones de zonas quemadas de manera aislada, y tierras desnudas y degradadas, así como la presencia de cultivos permanentes arbustivos, cultivos permanentes herbáceos, mosaico de cultivos, mosaico de pastos y cultivo, pastos limpios, pastos enmalezados, cultivos con espacios naturales, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos y espacios naturales, vegetación secundaria o en transición, bosque de galería y ripiario y bosque fragmentado.
- Laderas desde poco inclinadas, moderadamente e inclinadas; zonas afectadas por fuerte control estructural, donde se identifican rasgos como lomo estructural, escarpe, facetas triangulares y escarpe de falla.
- Suelos residuales a partir de acumulación de espesas de cenizas volcánicas. Presenta erosión hídrica en grado ligero, texturas gruesas y moderadamente gruesas, bien drenados, moderadamente; suelos a partir de depósitos superficiales de cenizas volcánicas sobre arenas, texturas moderadamente gruesas a través del perfil, bien drenados, muy profundos, fertilidad química baja; suelos de rocas ígneas (basaltos y andesitas basálticas porfiríticas intercaladas con aglomerados, arenitas y tobas), texturas mediana y finas, bien drenados, profundos y superficiales; suelos de texturas medianamente finas, bien drenados, moderadamente profundos; presentan fragmentos gruesos en el perfil del suelo.
- Con evidencia de procesos de inestabilidad

Zonas de susceptibilidad media (color amarillo)

Comprende la mayor parte del área (62 %), por lo que se observa disperso en la cuenca. Para las zonas de amenaza media, se encontraron características relacionadas con los siguientes factores:

- Se presenta en todos los rangos de pendientes, con predominancia de pendientes moderadas a altas (mayores a 14 grados).
- Complejo Quebradagrande sedimentario, complejo Quebradagrande volcánico, gabros Chinchiná Santa Rosa, formación Amagá miembro medio y superior, complejo Arquía, complejo ofiolítico de Pácora, pórfidos dacíticos andesíticos de Arma, andesitas de Pan de Azúcar, Anfibolita Saussuriticá de Chinchiná, Complejo Arquía, esquistos de Lisboa-Palestina, complejo ofiolítico de Filadelfia, depósitos de caída piroclástica, depósitos de flujo de lodo y escombros, depósitos piroclásticos glaciofluviales, flujo escombros y lahares, flujos andesíticos recientes, formación Abejorral, formación Combia, formación Irra Tres Puertas, conglomerados formación Irra Tres Puertas volcanosedimentario, lavas del Guayabo, pórfido dacítico de La Felisa, pórfido de Irra, pórfido de Neira, pórfido del Guayabo, sedimentitas de Filadelfia.
- Tierras desnudas y degradadas, pastos limpios, cultivos permanentes arbustivos, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, unas pequeñas porciones de bosque de galería y ripiario.
- Zonas con rasgos estructurales como lomo estructural, cima estructural, contraeskarpe, eskarpe, eskarpe de fallas, facetas triangulares, ladera estructural, laderas denudacional, ladera inclinada, ladera moderadamente inclinada y poco inclinada.
- Suelos a partir de acumulación espesas de cenizas volcánicas. Presenta erosión hídrica en grado ligero; texturas gruesas y moderadamente gruesas permeables, moderadamente profundos y profundos. Suelos de rocas sedimentarias e ígneas

alteradas con inclusiones de rocas metamórficas; texturas moderadamente gruesas, bien drenados y excesivamente drenados, moderadamente superficiales y superficiales.

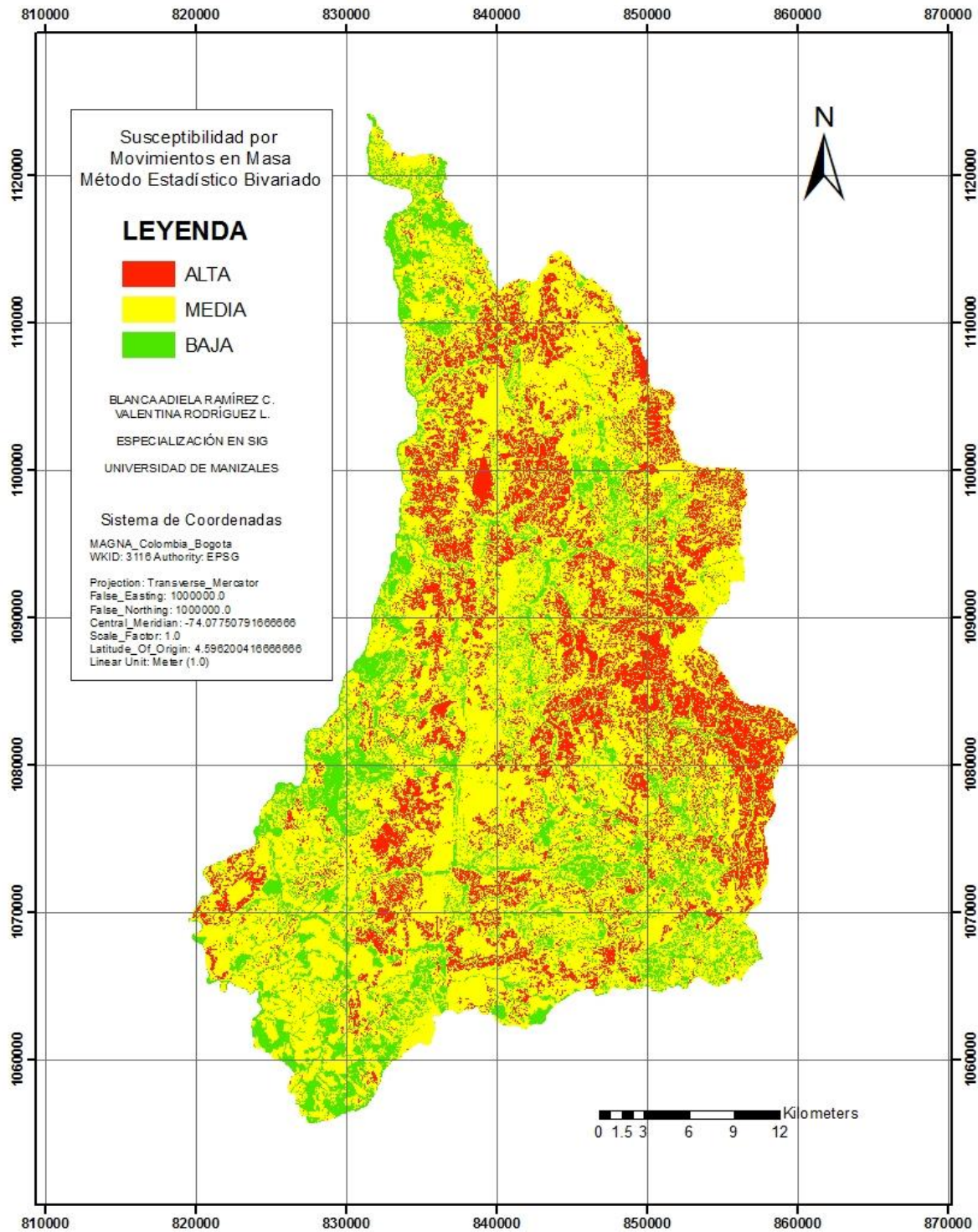
- Con evidencia de algunos procesos de inestabilidad.

Zonas de amenaza baja (color verde)

Comprende el 17 % del área total. Se presenta disperso en la cuenca. Presentan características relacionadas con los siguientes factores:

- Predominan pendientes bajas a moderadas menores a 14 grados.
- Comprende principalmente las siguientes unidades geológicas: complejo Arquía, esquistos de Lisboa-palestina, complejo ofiolítico de Filadelfia, depósitos de caída piroclástica, depósitos de flujo de lodo y escombros, algunos depósitos piroclásticos glaciofluviales, formación Amagá miembros medio y superior, formación Combia, formación Irra Tres Puertas volcanosedimentario, lavas del Guayabo, pórfido de Neira, pórfido del Guayabo, pórfidos dacíticos andesíticos de Arma.
- Comprende algunas zonas boscosas como bosque ripiario, bosque denso, cultivos permanentes arbóreos, mosaico de pastos con espacios naturales, pastos enmalezados y tierras con vegetación secundaria o en transición.
- Terrazas aluviales y laderas poco inclinadas.
- No se evidencian procesos denudativos.

Figura 7. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en la subzona hidrográfica del río Tapias u otros aferentes directos al Cauca, por el estadístico bivariado.



Discusión de resultados

Los dos métodos, cualitativo y cuantitativo, utilizados para esta zonificación han generado dos mapas con tendencias similares, mostrando en términos generales las mismas tendencias de susceptibilidad alta en los lugares donde se ubican las rocas menos resistentes, por la influencia tectónica de las fallas N-S y E-O, asociado a las laderas que presentan mayor pendiente. Sin embargo, el mapa heurístico muestra mayor cobertura de áreas con alta susceptibilidad a movimientos en masa, mientras en el método estadístico bivariado se presenta un mayor porcentaje de áreas con susceptibilidad media con respecto al área total de la cuenca. Para ambos métodos la susceptibilidad baja es la que presenta menor porcentaje de área, ubicándose en las zonas que no han sufrido procesos de inestabilidad y que, además, cuentan con bajas pendientes y mejor cobertura vegetal protectora. Las diferencias se dan por las consideraciones que se tuvieron en cuenta a la hora de asignar las calificaciones para cada uno de los factores en los mapas temáticos, mediante el método heurístico, siendo éste un método subjetivo, que es confiable siempre y cuando los expertos tengan un buen conocimiento de la zona, experiencia y criterio a la hora de asignar las calificaciones y puntajes a los factores que componen los mapas temáticos.

Los resultados obtenidos con el método estadístico bivariado se consideran más confiables, teniendo en cuenta que las áreas definidas como de alta susceptibilidad coinciden con aquellas que han sido afectadas por procesos de inestabilidad, así como las zonas que, aunque no están afectadas, cumplen con las mismas condiciones y características de las zonas que presentan los procesos cartografiados, donde se establecen factores como laderas inclinadas de altas pendientes, cubiertas por cultivos y pastos principalmente y presencia de rocas con baja resistencia a la erosión por su influencia tectónica. Sin embargo, el éxito de este método depende de la calidad de la información a utilizar.

De los mapas obtenidos se puede evidenciar que el procesado por el método heurístico es mucho más conservador, presentando un área con mayor afectación por procesos de inestabilidad, hecho que incrementa los costos a la hora de tomar

decisiones por parte de los entes territoriales; así mismo, incrementa las áreas afectadas y reduce las zonas a intervenir para diversos proyectos de desarrollo. En el método estadístico, la mayor cobertura se clasifica como de susceptibilidad media, siendo más preciso en la delimitación de zonas altamente susceptibles, dado que se ajusta a las áreas afectadas y a las que presentan iguales condiciones a las afectadas por los procesos, facilitando de manera más óptima la toma de decisiones.

A pesar de las diferencias, ambos métodos coinciden con las zonas de mayor cobertura definidas como de alta susceptibilidad hacia las zonas central y oriental de la cuenca.

Las diferencias radican principalmente en los datos obtenidos, para susceptibilidad alta en las zonas norte y sur oriental del mapa obtenido, con el método heurístico, los cuales están condicionados por factores como la presencia de laderas inclinadas de altas pendientes, la escasa cobertura vegetal protectora, la cual ha sido reemplazada por pastos y cultivos, presencia de rocas sedimentarias principalmente e influencia tectónica en la zona suroriental.

Como conclusión final de esta discusión, se deduce que aunque ambos métodos arrojan resultados acertados, el que mejor se ajusta a la realidad es el método estadístico bivariado, porque delimita con mayor precisión las zonas afectadas por procesos de inestabilidad y aquellas zonas que cumplen con las condiciones que favorecieron a la generación de dichos procesos, mientras que para lograr mayor precisión en el método heurístico se requiere de alta experiencia y conocimiento por parte del profesional que realice el análisis.

Conclusiones

El método estadístico presenta porcentajes de áreas clasificadas como de susceptibilidad alta del 40 %, susceptibilidad media del 36 % y susceptibilidad baja del 24 %, mientras que con el método estadístico bivariado, se obtuvieron porcentajes de susceptibilidad alta del 21 %, susceptibilidad media del 62 % y susceptibilidad baja del 17 %, concluyéndose que el mapa procesado con el método heurístico presenta mayor cobertura de susceptibilidad alta por movimientos en masa, mientras que el elaborado con el método estadístico bivariado se ajusta a las zonas que en la actualidad presentan procesos de inestabilidad y condiciones similares, arrojando mayor cobertura de la zona de susceptibilidad media, seguida de la alta.

De acuerdo con los diferentes factores que caracterizan los mapas temáticos tenidos en cuenta y la presencia de procesos de inestabilidad, se puede concluir que ambos métodos son idóneos siempre y cuando se cuente con adecuada información levantada en campo y buena calidad de la cartografía.

El análisis realizado por el método estadístico bivariado tiene mayor precisión, asemejándose más a la realidad, dado que en el análisis se tuvieron en cuenta los procesos de inestabilidad existentes, arrojando zonas de alta susceptibilidad en aquellas zonas afectadas y las que presentan iguales condiciones.

El método heurístico genera mayor incertidumbre, dado que es un método subjetivo y condicionado a la experiencia del experto y su conocimiento de la zona de interés.

En caso de requerirse de una zonificación por susceptibilidad, con información suministrada de segunda mano, se recomienda la aplicación del método estadístico bivariado, debido a su mayor precisión y menor grado de incertidumbre, así como la revisión detallada de la información, con el fin de determinar errores en topología que puedan conllevar a generar errores a la hora del procesamiento.

Mediante la comparación de los métodos de zonificación usados en este estudio, se logra concluir que es pertinente implementar una metodología que involucre análisis cualitativo y cuantitativo.

Recomendaciones

Para verificar la calidad de la información y obtención de mejores resultados en la aplicación del método estadístico, se hizo necesaria la verificación de la información correspondiente a la cartografía de los procesos de inestabilidad suministrados, debido a que se presentaban inconsistencias en la cartografía. Para la validación de dichos procesos se utilizó el Google Earth, lo que optimizó tiempo y evitó el desplazamiento a la zona de estudio.

Para garantizar mayor precisión en la obtención de mapa de zonificación, se recomienda la calibración de mismo, mediante la validación de la información y factores contribuyentes, lo cual puede hacerse con la utilización de imagen satelitales, orthofotos, imágenes lidar, drones, entre otros.

Con el fin de optimizar recursos a la hora de implementar estudios de zonificación se recomienda la utilización de software libres, los cuales cuentan con las mismas herramientas que ofrece ArcGis.

Referencias

- Alcaldía de Aranzazu Caldas. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio de Aranzazu*.
- Amorim, S., Corominas, N., Lantada, N., Baeza, C., Portilla, M. y Angulo, C. (2009). *Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales en el Pirineo Catalán*. Ponencia presentada en el VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Barcelona.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Perfalani, F. y Rampini, A. (1998). Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy dempster-shafer approaches.
- Carrara et al. (2008), en VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Barcelona, 27 – 30 de Octubre de 2009.
- Chalkias, C., Ferentinou, M., Polykretis, C. (2014). Gis- Based Landslide Susceptibility Mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece. *Geosciences*, 4, 176-190. doi:10.3390/geosciences4030176
- CORANTIOQUIA - EAFIT. (2015^a). *Convenio 1502-6*. Aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de Corantioquia. Municipio de Entrerriós.
- CORANTIOQUIA - EAFIT. (2015^b). *Convenio 1505-69*. Aunar esfuerzos para la actualización del mapa de amenazas 1:100.000 para veintinueve municipios de oficinas territoriales Cartama, Citará, Aburrá Sur y Hevéxicos (parcial). Jurisdicción de Corantioquia.
- CORPOCALDAS. (2004). *Agenda Ambiental Municipio de Aranzazu, Caldas*.
- Ferrer Oropeza, C., & Delgadillo Santander, A. (2014). Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. 2007. *Revista Geográfica Venezolana*, 55 (2), 333-337.
- García, M. (2001). Módulo I, Lecturas Escogidas. Especialización en evaluación de riesgos y prevención de desastres. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá D.C.
- Gonzales, G. M. (2015). *Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por*

movimientos en masa a escala 1:25000 en el municipio de Santa Bárbara, departamento de Antioquia. (Proyecto de grado). Facultad de Geología, Universidad EAFIT.

LEY 1523 de 2012. *Ley Sistema Nacional de Gestión del Riesgo.*

MINAMBIENTE. (2014). *Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.* Bogotá D.C

Moreno, C., Bermúdez, O. y Correa, L. C. (2016). *Análisis del riesgo por inundación utilizando herramientas SIG para la cuenca del río Quito.* (Trabajo de grado). Especialización en SIG, Universidad de Manizales.

Moreno Carrero, A. L., Garzón, G. y Díez-Herrero, A. (2013). *Análisis e interpretación geológica del fondo documental FRT sobre eventos de movimientos de ladera en España, en el sigloXIX.* Ponencia presentada en el VIII Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Barcelona.

Popescu, M. E. (1992). *Landslide Causal Factors And Landslide Remedial Options.* Illinois Institute of Technology. Chicago, USA.

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS (PMA: GCA). *Movimientos en masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas.* Servicio Nacional de Geología y Minería, publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432p, 1CD-ROM.

Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.* Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Van Westen, C. (1997). *Statistical Landslide Hazard Analysis.* En ITC: *Ilwis 2.1 for Windows application guide.* (pp. 73-84). Enshede, The Netherlands.

Webgrafía

<https://www.ugr.es/~jorgejp/InvestDoc/esri08.pdf> (Brabb y otros, 1972).

<https://pdfs.semanticscholar.org/.../521e8a30440b9c95046a5e45> (Chung y Fabbri, 1993)

<https://books.google.com.co/books?isbn=847840466X> (Chung y Fabbri 1998).

ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/.../Medina_Yeidy_Samira_2017.pdf?

www.cenicafe.org/es/publications/7.Zonificacion.pdf (Luzi y Pergalani, 1996)

<https://www.ugr.es/~jorgejp/InvestDoc/esri08.pdf>