

**MODELAMIENTO SIG DE LOS PROCESOS DENUDATIVOS QUE AFECTAN
LA QUEBRADA EL PERRO.**

AUTORES:

JUAN SEBASTIAN MARULANDA MOSQUERA

ELKIN ALEXIS PEREZ GUTIERREZ.

GABRIEL MANTILLA CADENA.



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2015**

**MODELAMIENTO SIG DE LOS PROCESOS DENUDATIVOS QUE AFECTAN
LA QUEBRADA EL PERRO.**

JUAN SEBASTIAN MARULANDA MOSQUERA

ELKIN ALEXIS PEREZ GUTIERREZ.

GABRIEL MANTILLA CADENA.

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Especialistas en Sistemas de Información Geográfica**

Asesor:

Geólogo – Especialista Geotecnia

FERNANDO SÁNCHEZ ZAPATA

UNIVERSIDAD DE CALDAS

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA

ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

MANIZALES

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Asesor

DEDICATORIA.

A aquellas personas que han estado a nuestro lado apoyándonos en la construcción de nuestro proyecto.

AGRADECIMIENTOS.

Al docente Fernando Sánchez, Geólogo especialista en geotecnia de la Universidad Caldas de Colombia que nos brindó, valiosos aportes técnicos y profesionales en la construcción de nuestro proyecto.

A las entidades que nos facilitaron la información que necesitábamos para la construcción de este proyecto como Corpocaldas, la Alcaldía de Manizales y el instituto de estudios ambientales (IDEA).

TABLA DE CONTENIDO.

1. INTRODUCCIÓN	18
2. JUSTIFICACIÓN.....	19
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
3.1 FONDO DEL PROBLEMA.....	20
4. HIPOTESIS.....	22
5. OBJETIVOS.....	23
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
6. LOCALIZACION.....	24
7. METODOLOGÍA.....	25
7.1 ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	25
7.2 TRABAJO DE CAMPO.....	25
7.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	26
7.4 DIGITALIZACIÓN DE MAPAS.....	26
7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	27
8. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	29
8.1 PROCESOS DE EROSIÓN Y REMOCIÓN EN MASA.....	30
8.1.1 Procesos erosivos.....	31
8.1.1.1 Erosión pluvial (laminar).....	31
8.1.1.2 Erosión hídrica.....	31
8.1.1.3 Erosión en surcos.....	31
8.1.1.4 Erosión en cárcavas.....	31
8.1.1.5 Erosión fluvial.....	32
8.1.2 Movimientos en Masa.....	32
8.1.2.1 Caídas.....	33
8.1.2.2 Inclinación o volteo.....	33

8.1.2.3 Reptación.....	33
8.1.2.4 Deslizamiento.....	34
a. Deslizamiento rotacional.....	34
b. Deslizamiento de traslación	35
8.1.2.5 Flujo	35
8.1.2.6 Avalanchas	36
8.1.2.7 Movimientos complejos	37
8.2 GEOLOGÍA	37
8.2.1 Unidades geológicas	37
8.2.2 Estructuras y discontinuidades.....	39
8.3 GEOMORFOLOGÍA.....	39
8.3.1 Análisis geomorfológico	40
8.3.1.1 Morfometría	40
8.3.1.2 Morfogénesis.....	40
8.3.1.3 Morfo dinámica	41
8.3.2 Unidades geomorfológicas	41
8.3.2.1 Unidades de origen denudacional	41
a. Unidad denudacional 1.....	41
b. Unidad denudacional 2	42
8.3.2.2 Unidad coluviones de piedemonte.....	42
8.4 COBERTURA VEGETAL.....	42
8.4.1 Pastos.....	43
8.4.2 Bosques	43
8.4.3 Plantación forestal	45
8.4.4 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva (rastroy alto).....	46
8.4.5 Tierras desnudas y degradadas.....	46
8.4.6 Terrenos agrícolas	47
8.5 PENDIENTES.....	48

8.6 PRECIPITACIÓN	49
8.7 SIG EN MOVIMIENTOS DE MASA	49
8.8 GEOPORTALES.....	52
8.8.1 El uso de los geoportales.....	53
8.8.2 Implementación del geoportal en la cuenca de la quebrada el Perro	54
8.8.2.1 Creación de la base de datos	54
8.8.2.2 Calculo del área total de los shapes	55
8.8.2.3 Georreferenciación de las coordenadas en cada shape.....	56
8.8.2.4 Asignación de iconos a los datos de los polígonos en el geoportal.....	57
8.8.2.5 Programación del geoportal	59
8.8.2.6 Creación del hosting o alojamiento en el servidor y el subdominio.....	59
8.8.2.7 Implementación de la base de datos en el hosting	60
8.8.2.8 Cargar archivos del geoportal en el servidor web.....	62
8.8.2.9 Galería de imágenes del geoportal	63
9. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN LA CUENCA QUEBRADA EL PERRO.....	65
9.1 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DENUDATIVOS.....	65
9.1.1 Erosión laminar	67
9.1.2 Erosión en surcos o cárcavas	67
9.1.3 Erosión por socavación lateral y de fondo.....	68
9.1.4 Terracetas	68
9.1.5 Deslizamientos	69
9.1.5.1 Traslacionales o planares	69
9.1.5.2 Deslizamientos rotacionales.....	69
9.1.8 Flujos.....	69
9.1.9 Reptación	70

10.	APLICACIÓN DE LA TECNICA DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	72
11.	PARÁMETROS PARA DETERMINAR LA SUSCEPTIBILIDAD.....	75
11.1	GEOLOGÍA GENERAL.....	75
11.1.1	Unidad Cretácica, Complejo Quebradagrande (miembro sedimentario) (kqd).....	75
11.1.2	Unidad cuaternaria.....	76
11.1.3	Generación del mapa geológico.....	77
11.2	USOS DE SUELO.....	80
11.2.1	Generación del mapa de usos de suelo.....	81
11.3	MAPA DE PRECIPITACIONES (ISOYETAS).....	84
11.3.1	Deslizamientos inmediatos por saturación.....	84
11.3.2	Deslizamientos diferidos por aumento de presión de poros.....	85
11.3.3	Generación del mapa de precipitación.....	86
11.4	PENDIENTES.....	91
11.4.1	Generación mapa de pendientes.....	91
11.5	GEOMORFOLOGIA.....	95
11.5.1	La unidad denudacional 1.....	95
11.5.2	La unidad denudacional 2.....	95
11.5.3	La unidad coluviones de piedemonte.....	96
11.5.4	Generación del mapa de unidades geomorfológicas.....	96
11.6	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA.....	99
11.6.1	Generación del mapa de evolución histórica de los movimientos en masa.....	99
12.	MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	101
12.1	GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	101
13.	COMPARACIÓN DEL MAPA DE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE MOVIMIENTOS EN MASA CON EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	103
14.	CONCLUSIONES.....	106
15.	RECOMENDACIONES.....	108

BIBLIOGRAFÍA..... 109

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Localización del área de estudio (cuenca de la quebrada el Perro).....24

Figura 2. Esquema de la metodología utilizada en este trabajo. Modelo Metodológico.....28

Figura 3. Ejemplo erosión en cárcavas y surcos..... 32

Figura 4. Ejemplo deslizamiento parte alta de la cuenca.....34

Figura 5. Ejemplo flujo parte baja de la cuenca.....36

Figura 6. Descripción detallada Depósitos de caída piroclástica..... 38

Figura 7. Descripción detallada contacto discordante complejo Quebradagrande y depósitos de caída piroclástica..... 38

Figura 8. Ejemplo pastos enmalezados..... 43

Figura 9. Ejemplo bosques sector norte de la cuenca.....44

Figura 10. Ejemplo bosques plantados sector norte de la cuenca..... 45

Figura 11. Ejemplo suelo desnudo sector norte de la cuenca.....47

Figura 12. Ejemplo de cultivos en la cuenca..... 48

Figura 13. Coordenadas del shape de bosques plantados en Google Earth.....57

Figura 14. Mapa de uso de suelos con su respectivo icono en el geoportal.....58

Figura 15. Entorno grafico de la cuenta de hostinger Colombia.....	60
Figura 16. Administrador de la base de datos en el hosting.....	61
Figura 17. Restauración de la base de datos en el hosting.....	62
Figura 18. Exportar archivos php, html y css del geoportal remotamente con el cliente ftp fileZilla Client al hosting.....	63
Figura 19. Ejemplo grafico de las unidades geológicas en la cuenca quebrada el Perro visualizadas en el geoportal.....	64
Figura 20. Clasificación de los tipos de deslizamientos modificada de Varnes (1958 y 1978).....	71
Figura 21. Mapa de unidades geológicas en la cuenca de la quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009).....	79
Figura 22. Mapa de usos de suelo cuenca quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009).....	83
Figura 23. Mapa de precipitación (isoyetas) cuenca quebrada el Perro, digitalizado a partir de datos tomados del Instituto de estudios Ambientales (IDEA).....	89
Figura 24. Mapa de estaciones pluviométricas cuenca quebrada el perro, digitalizado a partir de datos tomados del Instituto de estudios Ambientales (IDEA).....	90
Figura 25. Mapa de pendientes digitalizado a partir del modelo de elevación digital del terreno Colombia ASTER GDEM 2014	94

Figura 26. Mapa de unidades geomorfológicas cuenca de la quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009)...	98
Figura 27. Mapa de evolución histórica de procesos erosivos cuenca de la quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009).....	100
Figura 28. Mapa de susceptibilidad cuenca quebrada el perro, obtenido a partir de la metodología empleada.....	102
Figura 29. Mapa de susceptibilidad obtenido y movimientos en masa generados entre los años 2004 a 2009, en la cuenca de la quebrada el Perro, digitalizado y actualizado a partir de datos tomados en campo e información deCorpocaldas(2009).....	105

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Valores de peso de acuerdo a la importancia a la susceptibilidad (Satty, 1980).....	73
Tabla 2. Determinación de los pesos de los criterios, mediante la Matriz de Jerarquías Analíticas.....	74
Tabla 3. Determinación de los valores de pesos para el factor geología (tomado y modificado de Borrero, 2009), de informes Corpocaldas.....	78
Tabla 4. Determinación de los valores de pesos para el factor uso de suelo (tomado y modificado de Borrero, 2009 y de informes de Corpocaldas).....	82
Tabla 5. Registro acumulado de lluvias anuales; tomado de IDEA (Instituto de Estudios Ambientales (Universidad Nacional Sede Manizales 2011-2014).....	87
Tabla 6. Determinación de los valores de peso y rango de susceptibilidad para el factor pluviosidad tomado y modificado de Instituto de Estudios Ambientales (IDEA 2011-2014).....	88
Tabla 7. Determinación de los valores de peso y rango de susceptibilidad, para el factor de pendientes, realizado a partir del modelo de elevación digital del terreno Colombia ASTER GDEM 2014.....	93
Tabla 8. Determinación de los valores de pesos y rango de susceptibilidad para el factor geomorfología (tomado y modificado de Borrero, 2009 y de los informes de Corpocaldas).....	97

RESUMEN

La cuenca quebrada el Perro se encuentra localizada en la parte oriental del casco urbano de la ciudad de Manizales, área que presenta unas condiciones climáticas, morfológicas y litológicas que la hacen susceptible a la ocurrencia de deslizamientos.

La geología de la zona de estudio es caracterizada por dos unidades estratigráficas principales, los flujos de caída piroclástica semiconsolidados que cubren y subprayan de forma discordante la unidad del miembro sedimentario del complejo Quebradagrande, característica que sumada con las fuertes precipitaciones de lluvia y constantes cambios en la cobertura vegetal ocasionan deslizamientos de tipo planar que por lo general están controlados por el contacto entre las dos unidades.

El modelo SIG de la cuenca quebrada el Perro, sirvió para analizar diferentes variables de inestabilidad y a su vez generar una estructura firme y real de las condiciones de susceptibilidad de la zona, para generar el modelo se consultó la información bibliográfica de estudios previos hechos por diferentes entidades, además se ejecutó el trabajo de campo con el cual se comprobó y actualizó la información, lo que sirvió como punto de partida para digitalizar y editar los mapas factores.

Con los datos recopilados, almacenados e interpretados se logró obtener una base de información espacial, lo cual contribuyó, a considerar y establecer el método más adecuado para la valoración de la información, determinando como el más apropiado el método cuantitativo, que permite ponderar cada factor por medio de la técnica de evaluación multicriterio de jerarquías analíticas.

Obtenidos los diferentes pesos de los factores por medio del método, se procedió a generar el mapa de susceptibilidad mediante la suma lineal ponderada a través de la calculadora raster en Arcgis 10.1. Mostrando como resultado la distribución espacial de los rangos de susceptibilidad en la zona, donde se detalló que el área

norte es la que presenta mayor susceptibilidad y por lo general se ve más afectada por los procesos denudativos que interactúan en la zona, estos eventos no son de menos interés en el sector este-oeste donde el rango de susceptibilidad es medio a alto, el sector inferior o sur de la cuenca en su mayoría presenta un rango de susceptibilidad medio a bajo, donde se evidencia la acumulación de sedimentos que arrastran los flujos repentinos del parte superior; posteriormente se comparó el mapa de susceptibilidad con el de mapa de evolución histórica de movimientos en masa, obteniendo así una relación congruente entre los datos históricos y las zonas que en la actualidad son más susceptibles.

Para mayor funcionalidad de los modelos esquemáticos, se aplicó una serie de técnicas que permitieron visualizar por medio de un geoportal la zona de estudio, utilizando la base de datos obtenida y almacenada en un sistema de gestión (MySQL), el cual soporto todos los datos en el entorno web para convertirlos en información y posteriormente ser visualizada de una forma organizada en un medio grafico georreferenciado, con el fin de enriquecer el modelo de susceptibilidad al hacerlo más accesible y práctico.

PALABRAS CLAVE: SIG, susceptibilidad, movimientos en masa, análisis estadístico multicriterio, precipitación, usos de suelo, procesos erosivos, geoportal.

ABSTRACT

The “Quebrada del perro” is a basin located in the eastern part of the town of Manizales, this area presents climatological, morphological and lithological characteristics that make it susceptible to mass movements’ occurrence.

The geology of the study area is characterized by two main stratigraphic units, semi-consolidated flows of pyroclastic fall which are covering and sub-lying in a dissenting manner the unit of sedimentary member of “Quebradagrande”, a complex characteristic combined with heavy rainfall and constant changes on vegetation cover causing landslides of planar type that are generally controlled by the contact between the two units.

The GIS model of the Quebrada del perro” basin, served to analyze different variables of instability and this in its turn generates a firm and genuine structure of the area’s conditions of susceptibility in order to build the model, the bibliographic information from previous studies done was revised by different entities. Besides the fieldwork was with which it was found and update information was implemented, that served as a starting point to scan and edit maps factors.

With the collected, stored and interpreted data it was possible to obtain a basis for spatial information, which contributed, to consider and establish the most suitable method for the evaluation of information, determining the most appropriate quantitative method, which allows to weight up each factor by using the multi-criteria evaluation technique of analytical hierarchy.

Having obtaining the different factors’ weights by the method, it proceeded to generate the susceptibility map by the weighted linear combination through the ArcGIS 10.1. raster calculator showing as a result the spatial distribution of the ranges of sensitivity in the zone, where it was explained that the north side is the one with greater susceptibility and this is generally more affected by denudation processes that interact in the area, these events are not less importance in the eastern-western parts where the range of susceptibility is medium to high, the

lower sector or southern of the basin mostly presents a range of medium to low susceptibility, where the accumulation of sediments is evidenced, which drag the abrupt flows from the top. Subsequently, the susceptibility map with the map of the historical development of mass movements was compared, obtaining, as a result, a consistent relationship among historical data and areas that currently are more susceptible.

For further functionality of schematic models, it was applied several techniques that allowed the visualization of the study area through a geoportal, by using the database collected and stored in a management system (MySQL), which bore all the data in the web environment in order to convert them into information and then be displayed in an organized manner in a means geo-referenced graphic, so as to enrich the susceptibility pattern to make it more accessible and practical.

KEYWORDS: SIG, GIS, susceptibility, mass movements, multi-criteria statistical analysis, rainfall, soil uses, erosion process, geoportal.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca de la quebrada el Perro como zona de interés para el correspondiente estudio, es un área potencialmente susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa, lo que evidencian una problemática y por consiguiente la afectación de la infraestructura y la población que vive a sus alrededores; por tal motivo se determinó la importancia de realizar un modelamiento SIG que permita tratar las zonas más susceptibles a los procesos denudativos, este tipo de estudio no es nuevo pero si importante para delimitar las áreas donde existe mayor riesgo a esta situación, para que en futuro sirvan para evaluar y hacer un diagnóstico apropiado de los lugares más vulnerables.

A partir de la información existente, de los factores característicos como: la geomorfología, pendientes, geología, usos de suelo y precipitación; se analizan y re evalúan estas variables para que a través de un modelo SIG actualizado, crear los mapas temáticos de estas características generales, en el área de estudio.

Con esta información se realiza un mapa general de susceptibilidad donde se pueda visualizar, modelar y determinar, cuáles son las principales causas de inestabilidad, discriminando así las zonas de mayor y menor susceptibilidad a presentar deslizamientos en la cuenca de la quebrada el Perro.

La creación del geoportal permite la visualización de los datos georreferenciados en la zona de estudio, para poder tener una visión clara de la información procesada, haciéndola accesible al público mostrando un entorno web en la internet que sea intuitivo y de fácil manejo para ver los factores que han desencadenado los movimientos en masa.

2. JUSTIFICACIÓN.

Debido a la necesidad de realizar un control geotécnico sobre la zona de estudio, es de suma importancia, mostrar de forma precisa el alcance de los modelos SIG; en el presente trabajo se demuestra de forma clara los diversos procesos que afectan y aceleran la degradación de las superficies en la cuenca de la quebrada el Perro.

Es importante mencionar y hacer un análisis del alcance de las obras que se han realizado en el sector, ya que posibles soluciones prácticas pueden dar mejores resultados; técnicas actualizadas de sistemas de información geográfica (SIG), pueden ser una alternativa para dar a conocer zonas de riesgo por deslizamientos, presentando así una manera novedosa, que se pueda implementar, no solo en el sector sino en otras zonas donde se presente tal problemática.

Hacer un estudio de riesgos por deslizamiento, conlleva aplicar técnicas de análisis, que generan un alto costo y tiempo, el incremento de la utilización de software y hardware en la actualidad, nos da la oportunidad de tener estudios más detallados y mucho más eficaces; es por esto, que este estudio se realizara utilizando la ayuda relativa, que maneja bases de datos relacionadas geográficamente, dicho manejo de datos se conoce como un Sistema de Información Geográfica (SIG).

A través del modelo SIG, se implementa una forma adecuada, para visualizar de manera sencilla y eficaz, la información geográfica, que muestre la constante problemática existente en el área de estudio; la presentación del trabajo se realiza mediante una serie de etapas, partiendo desde la recolección de datos, actualización y análisis de la información, generación de una base de datos y una forma adecuada de visualización con software especializado y la presentación de resultados en APIS.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

3.1 FONDO DEL PROBLEMA

Los movimientos de masa a través del tiempo son generadores de una constante problemática, ya que la mayoría de los asentamientos urbanísticos están cerca a zonas susceptibles a sufrir este fenómeno; por consiguiente es de suma importancia tener más variables de control y procedimientos prácticos, que sirvan para prevenir y mitigar el riesgo, factores que no solo depende de los procesos denudativos, sino de una diversidad de elementos, como el cambio en la cobertura vegetal, la cantidad de lluvia caída, topografía y otras características comunes que se deben tener en cuenta para realizar este tipo de estudios.

La zona de interés no es ajena a esta problemática, por lo que es necesario y de suma importancia, manipular todas las herramientas que estén a nuestro alcance, para establecer mejores mecanismos de control a esta situación; por consiguiente se plantea una serie de procedimientos, con los que se pretende llegar a resultados más confiables, a través de tecnologías y herramientas SIG, obteniendo modelos esquemáticos más precisos.

Para que se genere la inestabilidad o movimiento en masa del terreno, deben intervenir y modificarse de forma conjunta, varios factores, los cuales se caracterizan como constantes o con poca variabilidad a lo largo del tiempo.

A continuación, se relacionan los factores que afectan y condicionan la estabilidad de la cuenca de la quebrada el Perro; tales características son fundamentales en el análisis y desarrollo del presente estudio:

- Climatología (Altas Precipitaciones).
- Erosión y movimientos en masa (Cárcavas, meteorización, deslizamientos).
- Geología (Naturaleza de los materiales, estructuras y discontinuidades).

- Geomorfología (Relieve y pendientes del terreno).
- Cobertura Vegetal (Usos de suelos).
- Acciones antrópicas (Infraestructura; actividad pecuaria).

Para establecer una posible solución a la problemática, mediante herramientas SIG, se pretende realizar un modelo de zonas de mayor y menor susceptibilidad a movimientos en masa; la parte de la metodología a desarrollar y las posibles recomendaciones que se pretenden implementar, se describen a continuación.

- Mapas de modelos actualizados de las variables utilizadas en la creación de un mapa general de susceptibilidad de riesgo por movimientos en masa.
- Nuevas alternativas de planeación en la creación de futuras infraestructuras de asentamiento humano.
- Visualización de datos espaciales en mapas generados en Arcgis y creación de un Geo Portal para mostrarlo a diversos usuarios.

4. HIPOTESIS.

Con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica, se plantea un modelo práctico, que permitirá visualizar de una forma detallada los diferentes componentes o factores que influyen en la generación de inestabilidad en la cuenca de la quebrada el Perro.

Inicialmente se describen todos los factores condicionantes y desencadenantes que influyen en los movimientos en masa; en una siguientes etapa, se menciona el uso de diversas herramientas informáticas, que sirven según los análisis propuestos para determinar la susceptibilidad; posteriormente, se detalla el método empleado y el procesamiento de los datos en el software SIG (ArcGis), así como la descripción de los aspectos metodológicos para el tratamiento de la información base, obteniendo su valoración y ponderación a través de la técnica de evaluación multicriterio.

Con los valores de peso obtenidos, se genera un mapa de susceptibilidad, el cual proporciona una mejor perspectiva de la problemática, permitiendo plantear recomendaciones y conclusiones más adecuadas; por último y para ser más prácticos e innovadores, se realizan una serie de procedimientos para visualizar los mapas esquemáticos en un geoportal, mostrando de forma sencilla y practica la información recopilada en el presente trabajo.

5. OBJETIVOS.

5.1 OBJETIVO GENERAL

- Implementar un modelo SIG, que permita analizar la susceptibilidad de riesgo a los movimientos en masa, que se evidencian en la cuenca de la quebrada el Perro.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información de los movimientos de masa, ocurridos en la cuenca, a través del tiempo.
- Verificar la información y comprobar los datos en campo.
- Procesar, analizar e interpretar la información obtenida.
- Elaborar la base de datos espaciales.
- Generar y reclasificar los mapas temáticos correspondientes a los factores de inestabilidad.
- Generar el mapa de susceptibilidad para la zona de estudio.
- Determinar las zonas potencialmente inestables, al comparar el mapa de susceptibilidad con los procesos de remoción en masa, para dar validez a los resultados y determinar los rangos de estabilidad de la cuenca.
- Establecer modelos de visualización en un geoportal, para que la presentación de los datos geo referenciados sea de fácil acceso a los usuarios.
- Proponer algunas recomendaciones y soluciones prácticas para reducir el riesgo en el área de estudio.

6. LOCALIZACION.

La cuenca de la quebrada el Perro, se localiza en la parte oriental del área urbana de la ciudad de Manizales; geográficamente está limitada al Norte por la vía que conduce al sector denominado alto del Zancudo, el límite Sur está definido por la quebrada Manizales y el río Chinchiná, al Oriente el límite corresponde a la urbanización cerros de la Alhambra y al Occidente el barrio Milán; es cruzada por la Avenida Alberto Mendoza, que comunica con el barrio la Enea y el aeropuerto La Nubia, esta delimitada por las siguientes coordenadas planas con origen Bogota.

X = 844.500 – 847.000.

Y = 1.048.500 – 1.051.500.

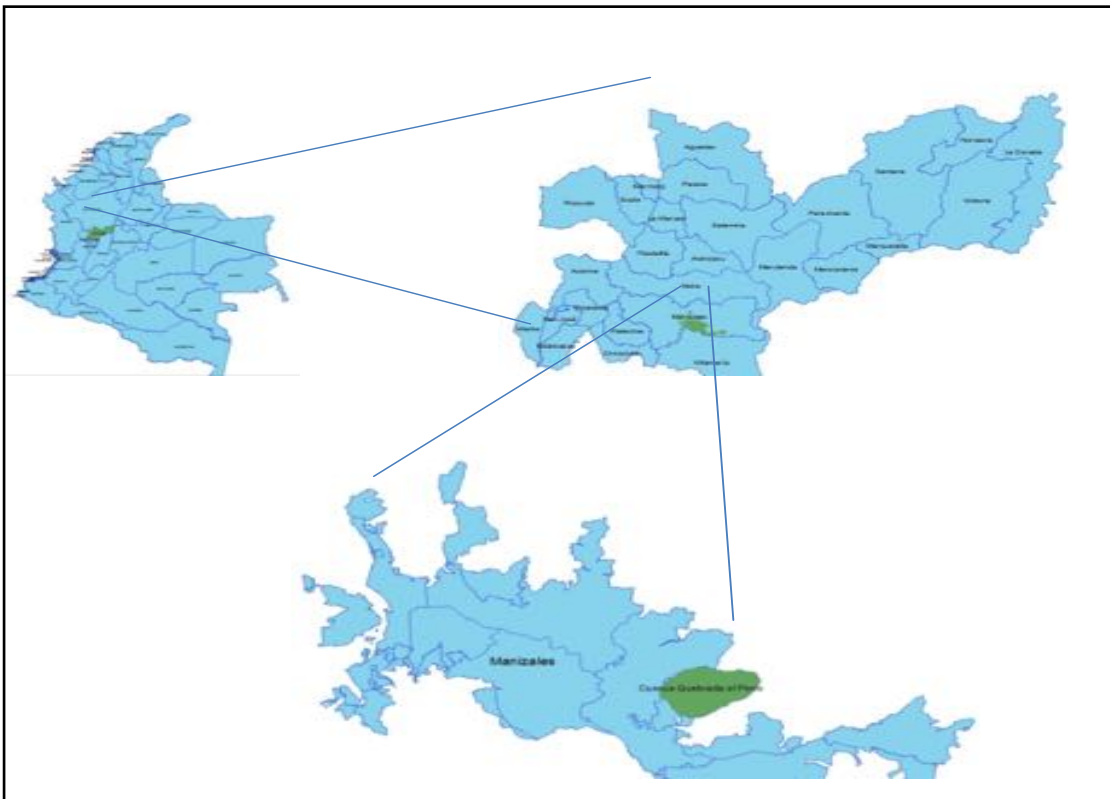


Figura 1. Localización del área de estudio (cuenca de la quebrada el Perro).

7. METODOLOGÍA.

Para el desarrollo del presente trabajo, se realizó una serie de etapas (Figura 2), que se describen a continuación:

7.1 ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN

En esta etapa, se revisó las fuentes de información que existen acerca del área de estudio; se obtuvo información acerca de los diferentes mapas temáticos que se utilizaron como base para la edición y actualización del mapa de la zona (procesos erosivos, pendientes, usos de suelo, geomorfológico y geológico); esta información fue consultada y adquirida del estudio realizado por la Universidad de Caldas en convenio con Corpocaldas.

Igualmente se consultó los datos históricos de información meteorológica e hidrológica en la página web del Instituto de estudios ambientales IDEA, de la Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales).

7.2 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se realizó a partir de recorridos a lo largo de la cuenca, marcando puntos de control que sirvieron para confirmar y actualizar la información de los diferentes factores que interactúan en la zona, proceso que sirvió para editar y completar los mapas temáticos.

En esta etapa, se evaluó los procesos que más afectan el área de estudio y se determinó los principales elementos causantes de los deslizamientos; de esta manera se logró caracterizar las variables a tener en cuenta, para procesar y ejecutar el modelo de susceptibilidad a movimientos en masa del sector.

7.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Después de definir los puntos claves para la creación de la base de datos, se recopiló, analizó e interpretó la información, lo que sirvió para la generación de los diferentes mapas temáticos y la obtención de una base de datos bien estructurada.

Para procesar la base de datos se utilizó un sistema de gestión de datos como lo es MySQL y su administrado HeidiSQL, que está constituido por siete tablas que representan los mapas, como característica principal las tablas tienen los mismos campos mas no los mismos registros; debido a que la base de datos no es relacional, no se puede utilizar una tabla diferente a la creada ya que no permitiría visualizar la información en el geoportal.

Lo que permite que se implemente el diseño del geoportal son el uso de hojas de estilo que muestran de una forma práctica el entorno gráfico en el sitio web, facilitando el ordenamiento de las capas digitalizadas con su respectiva información, para utilizar las librerías API de Google se debe implementar el lenguaje de programación que en este caso es PHP, lo que permite mostrar los mapas en el geoportal, con el uso de un subdominio y hosting para que sea visible en la internet.

7.4 DIGITALIZACIÓN DE MAPAS

Para digitalizar y delimitar la cuenca de la quebrada el Perro se utilizó el software Arcgis 10.1 y los mapas base del sector a una escala 1:2000, en este caso se editó y actualizó los mapas de pendientes, uso de suelo, geológico, precipitación y evolución histórica de los procesos denudativos, mapas que fueron caracterizados y ponderados para generar un mapa de susceptibilidad, lo que determinó las zonas potencialmente inestables.

Las curvas de nivel se obtuvieron por medio de una serie de procedimientos que evitaron la digitalización a partir de una plancha topográfica o de un mapa base, esto se logró con la delimitación de la zona de estudio y el DEM o modelo digital de Colombia en 3D, tomado de la página WEB de la NASA; por medio del software Global Mapper.12 y su herramienta (Generated Contours) se generaron las curvas de nivel de la zona delimitada y a los intervalos requeridos, (en este caso cada dos metros), lo que facilitó la digitalización de cada uno de los shapes al sobreponer las curvas obtenidas sobre de los mapas base en ArcMap permitiendo tener más detalle al digitalizar los mapas respectivos.

7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizaron todos los pasos a seguir, para la implementación del modelo metodológico, lo que permitió visualizar de una manera resumida los componentes y su factibilidad; se generó un mapa de susceptibilidad y se comparó con los procesos de remoción en masa para evaluar áreas de mayor inestabilidad, toda la información recopilada y generada de las diferentes operaciones, de esta manera se actualizó la base de datos georeferenciada.

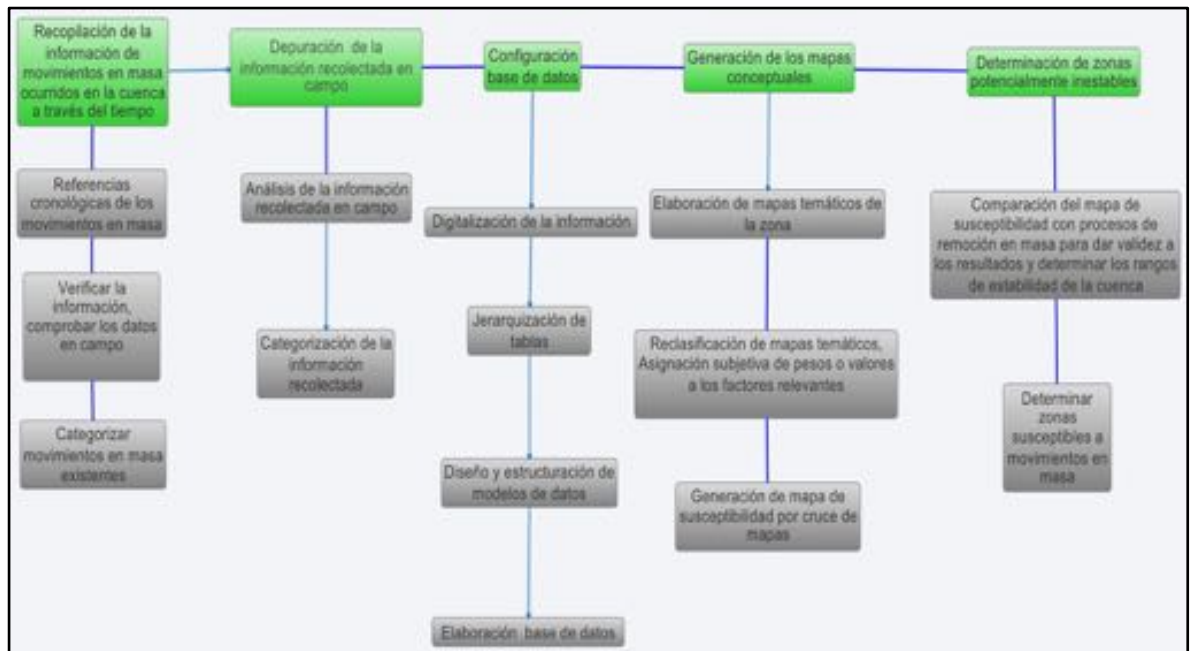


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada en este trabajo. Modelo Metodológico.

8. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.

Los Sistemas de Información Geográfica, en la actualidad son una herramienta, que permite el estudio de la superficie terrestre con más exactitud, ya que utilizan hardware y software especializados, que almacenan, transforman y permiten analizar la información geográficamente referenciada, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica, mostrando un plano real de la incidencia de algún fenómeno ocurrido en la superficie, como los desastres naturales, la sobrepoblación, los procesos antrópicos, el uso de suelos y en general la variación de cobertura vegetal.

Características que hacen fundamental la utilización de herramientas SIG en el presente estudio, ya que permiten plantear, procesar y obtener los resultados más adecuados en cuanto a la inestabilidad de las laderas.

Los movimientos en masa son uno de los eventos geológicos más destructivos y perjudiciales para los seres humanos, ya que causan miles de muertes y daños en las propiedades (Brabb y Harrod, 1989); el principal detonante de estos procesos es la expansión urbana no planificada, pero pocas personas son conscientes de que el 90% de pérdidas por deslizamiento, son evitables, si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención y control.

La zona de estudio no es ajena a esta problemática ya que presenta características como las prácticas antrópicas mal planificadas, relieve de laderas con inclinación y longitud alta, precipitaciones repentinas y fuertes que generan escorrentía y altos niveles de erosión en la superficie aumentando la susceptibilidad a presentar movimientos de masa.

Por lo general, los movimientos en masa, toman nombres diversos como deslizamientos, derrumbes, coladas de barro, soliflucción, hundimientos, desprendimientos y desplomes, los cuales dependen de la inclinación y del grado

de saturación del terreno, en términos generales los movimientos en masa, son todos aquellos procesos gravitatorios sobre la superficie terrestre y que según la cantidad de masa y el daño ocasionado a la sociedad, se pueden caracterizar como un desastre.

Para el presente estudio, es de suma importancia, saber la terminología que se implementa en su caracterización, de igual manera se consideran algunos factores importantes, con el fin de que el texto sea más fácil de comprender; para ello se utiliza el sistema de clasificación propuesto por (Varnes 1958 y 1978).

8.1 PROCESOS DE EROSIÓN Y REMOCIÓN EN MASA

Es un conjunto de procesos que involucran el desprendimiento, arrastre y depósito de materiales del suelo, ejercidos por diversos agentes como el agua, el viento y organismos vivos (el hombre y los animales). El proceso gradual de remoción de partículas de suelo y roca, en general se inicia con la caída de gotas de lluvia que impactan al suelo y producen un lavado superficial, el cual incrementa su acción a medida que la cobertura vegetal y estratos superficiales se pierden, lo que produce infiltración a través de capas permeables y posteriormente la formación de canales, generando disminución en la resistencia de la masa del suelo por saturación gradual de agua e incremento en su peso; esta característica y la interacción con la fuerza de gravedad, desencadenan fenómenos de remoción en masa.

8.1.1 Procesos erosivos

La erosión es el desprendimiento y arrastre de partículas constituyentes del suelo, los cuales son transportados principalmente por acción del agua. Los procesos de erosión son muy comunes en suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales.

8.1.1.1 Erosión pluvial (laminar)

La erosión pluvial se inicia por el impacto de las gotas de agua lluvia contra la superficie del suelo, desprendiendo su cobertura superficial, complementada por la fuerza de la escorrentía, produciendo un lavado de la superficie del terreno, sin formar canales definidos.

8.1.1.2 Erosión hídrica

Es el proceso por el cual las partículas del suelo se separan, para ser transportados por el escurrimiento superficial del agua a través de canales definidos.

8.1.1.3 Erosión en surcos.

Los surcos se forman por la concentración del flujo de agua en canales preferenciales de la superficie, arrastrando las partículas y dejando canales de poca profundidad, generalmente paralelos. (Figura 3).

8.1.1.4 Erosión en cárcavas.

Las cárcavas, se caracterizan por la profundidad de su disección, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava. (Figura 3)



Figura 3. Ejemplo erosión en cárcavas y surcos.

8.1.1.5 Erosión fluvial

La erosión fluvial, es el estado más avanzado de desgaste generado por las aguas continentales de ríos y torrentes, que desprenden y arrastran los materiales en su trayecto, para depositarlos en zonas con menor pendiente.

8.1.2 Movimientos en Masa

Es el desplazamiento hacia abajo de un volumen de material litológico importante, en el cual el principal agente es la gravedad, ya que el material se mueve vertical o inclinado en dirección del pie de una ladera. Para su clasificación se relaciona el sistema propuesto por (Varnes 1958 y 1978), el cual tipifica los principales tipos de movimientos.

8.1.2.1 Caídas

Las caídas, por lo general son producto de la gravedad y varían en su tamaño y composición, se desprenden de un talud de pendiente moderada a fuerte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, saltos o rodando; el movimiento es muy rápido a extremadamente rápido y puede o no, ser precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque o masa de material.

8.1.2.2 Inclinación o volteo

Este movimiento consiste en el desplazamiento hacia delante del material terreo, el centro de giro está por debajo del centro de gravedad, la inclinación puede abarcar formaciones rocosas pequeñas o incluir grandes hectáreas, las fuerzas que lo producen son generadas por materiales lindantes y el efecto de la gravedad.

8.1.2.3 Reptación

La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo sub-superficial, sin una superficie de falla definida, generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros por año y afecta a grandes áreas del terreno, la reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos, este tipo de movimiento se caracteriza por presentar superficies rugosas, abombamiento y geotropismo en árboles.

8.1.2.4 Deslizamiento

Este tipo de movimiento está caracterizado por una o varias superficies de ruptura, el movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla y puede o no involucrar uno o varios cuerpos de masas independientes.

Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados, deslizamientos rotacionales (circulares) y traslacionales (planares). (Figura 4)



Figura 4. Ejemplo deslizamiento planar parte alta de la cuenca.

a. Deslizamiento rotacional

En un deslizamiento rotacional, la superficie de corte es formada por una curva, cuyo centro de rotación se encuentra por encima del punto de gravedad del cuerpo en movimiento, visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de

deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento.

En la cabeza del movimiento, el desplazamiento es aparentemente semivertical y tiene muy poca rotación, sin embargo se puede observar que generalmente la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta.

b. Deslizamiento de traslación

En la traslación el desplazamiento de los cuerpos de masa, se produce hacia fuera o hacia abajo del centro de gravedad, a lo largo de una superficie más o menos plana o poco ondulada, sin embargo, un movimiento de rotación trata de auto estabilizarse, mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera y hacia abajo.

Los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización, que corresponden en términos cuantitativos a cambios en la resistencia al corte de los materiales o por el contacto entre la roca y materiales blandos o coluviones.

8.1.2.5 Flujo

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos, su clasificación depende del componente principal, como grandes clastos de roca, arenas o limos. La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de agua en los materiales sub superficiales. (Figura 5)



Figura 5. Ejemplo de un flujo parte baja de la cuenca.

8.1.2.6 Avalanchas

En las avalanchas, la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de “río de roca y suelo”. Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un prerequisite para que ocurran.

8.1.2.7 Movimientos complejos

Con mucha frecuencia los movimientos de un talud, incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento descritos anteriormente; este tipo de movimientos se les denomina como “Complejo”. Adicionalmente, un tipo de proceso activo, puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en flujo.

8.2 GEOLOGÍA

La geología de los materiales aflorantes y su grado de alteración condicionará sus características físicas mecánicas y, por lo tanto, su estabilidad potencial, por lo que el comportamiento varía de unos materiales a otros aun cuando actúen sobre todos, con igual intensidad los mismos factores.

8.2.1 Unidades geológicas

Los parámetros de resistencia dependerán de la composición mineralógica y de la textura, compactación, tamaño, forma y cementación de las partículas que formen la roca o sedimento. Por tanto, materiales poco cementados, con tamaños de grano fino (limo-arcilla o arenas limo-arcillosas), o de un amplio rango granulométrico (derrubios de ladera) son litologías más propensas al deslizamiento.

Por lo general las Unidades Geológicas más relevantes para el área de estudio son: Depósitos de caída piroclástica, que están compuestos por cenizas tamaño arenas intercaladas con capas delgadas de lapilli, poco consolidadas, espacialmente están depositados sobre la topografía pre-existente y suprayaciendo discordantemente a las rocas del Complejo Quebradagrande –

Miembro Sedimentario, que se compone principalmente por lodolitas limosas y carbonosas; fracturadas, diaclasadas y localmente plegadas. (Figura 6 y 7).



Figura 6. Descripción detallada Depósitos de caída piroclástica.



Figura 7. Descripción detallada contacto discordante entre el Complejo Quebradagrande y depósitos de caída piroclástica.

8.2.2 Estructuras y discontinuidades

Una característica de gran importancia frente a la estabilidad es la relación y combinación de la disposición geométrica de los materiales aflorantes, con respecto a la orientación, pendiente y altura de la ladera natural o talud artificial, en este sentido, deberán observarse las discontinuidades presentes (planos de estratificación, fallas, diaclasas, esquistosidad), atendiendo a su inclinación, orientación, número, densidad, naturaleza y morfología.

La principal estructura geológica, está representada, por la falla el Perro, tipo de falla inversa, que cruza el sector con dirección N28E. Reportada por (Salas y Obando, 2000), controlando linealmente el cauce de la quebrada, característica importante ya que altera físicamente los materiales, las discontinuidades entre las diferentes unidades geológicas, forman zonas de debilidad, que por lo general son conductores de corrientes de agua.

8.3 GEOMORFOLOGÍA

Las características geomorfológicas de la ladera aumentarán o disminuirán su equilibrio, ya que estas formas son además el resultado de un proceso evolutivo que nos servirán también como indicadores de inestabilidad. Una topografía abrupta, con valles profundos, grandes diferencias de altura entre vaguadas, alto gradiente hidráulico, relieve escarpado, red de drenaje denso y encajado, formas carcavadas y laderas con morfología cóncava, es indicativa de zonas con alto potencial de inestabilidad.

De este modo, mediante la combinación de determinados índices morfológicos y morfométricos del terreno, como la morfología, altura y pendiente topográfica, la superficie y longitud de la cuenca superficial y de los conos de deyección, entre

otros, se han desarrollado métodos para determinar la susceptibilidad de rotura de una ladera.

Según Borrero (2009), en general las características geomorfológicas de la zona de estudio, presentan crestas y valles moderadamente profundos, que corresponden a las unidades meta sedimentaria del Complejo Quebradagrande, presente como el basamento; la Formación Casabianca que supra yace este complejo y por último el depósito volcánico de caída piroclástica, que cubre en forma de manto toda la zona.

8.3.1 Análisis geomorfológico

Por medio de los datos obtenidos de estudios existentes, se realizó una caracterización de los componentes geomorfológicos, basados en criterios morfométricos, morfo genéticos y morfodinámicos, que permitieron definir unidades de igual comportamiento, ante el modelado de la superficie terrestre.

8.3.1.1 Morfometría

Describe cuantitativamente las características del terreno, como longitud, ángulo de inclinación y altura de la ladera y al mismo tiempo determina la distribución de las pendientes, suaves a abruptas, escarpes, concavidad y convexidad, entre otras.

8.3.1.2 Morfogénesis

En la zona de estudio, las principales formas que componen el paisaje, son colinas y valles moderadamente incisados. La morfogénesis de la cuenca está directamente relacionada a los procesos orogénicos, que produjeron el levantamiento de la cordillera Central de Colombia.

8.3.1.3 Morfo dinámica

Se refiere a los procesos denudativos que afectan y modelan las características de la zona, como la erosión (pluvial, laminar y cárcavas) y los movimientos en masa (reptación, deslizamientos y flujos).

8.3.2 Unidades geomorfológicas

En la cuenca de la quebrada el Perro, se destacan tres unidades de relieve, la primera que corresponde a zonas de tipo montañoso, donde la morfogénesis predominante es denudativa; la segunda de pendiente moderada, también es predominantemente denudativa y la tercera semiplana, asociada a zonas agradacionales o acumulativas a partir de materiales arrastrados por corrientes.

8.3.2.1 Unidades de origen denudacional

Según Borrero (2009), para la cuenca de la quebrada el Perro, las unidades de origen denudacional, donde se observan los procesos erosivos se dividieron en dos, la primera es la que posee un relieve más fuerte y es de mayor extensión y la segunda se localiza en el sector Noreste de la cuenca, diferenciándose por un relieve más suave.

a. Unidad denudacional 1

Es la unidad de mayor extensión en la cuenca, corresponde a una unidad colinada montañoso con laderas cortas de forma cóncava e inclinaciones de las laderas pendientes a muy pendientes, la cima suele ser aguda a sub redondeada, algunas veces orientadas en dirección NE, el drenaje establecido sobre esta unidad es en general dendrítico de baja densidad, predominan los valles en forma de “V” moderadamente incisados, aunque también se presentan valles en forma de “U”

con fondos planos donde se presentan zonas de acumulación de procesos erosivos como deslizamientos.

b. Unidad denudacional 2

Corresponde a una unidad relativamente pequeña ubicada en el sector Noreste de la cuenca, en la cual predominan procesos denudativos, donde se observan colinas bajas con cimas redondeadas, las laderas son cortas y moderadamente pendientes, presentan formas cóncavas y convexas lo que en alguna manera produce un relieve “Hummocky”.

8.3.2.2 Unidad coluviones de piedemonte

Se localizan en la parte inferior de las laderas del sector oriental, originadas por meteorización y erosión de la unidad colinada denudacional 1. Presenta colinas de pendientes bajas y suaves (4° a 16°), se encuentra afectada principalmente por socavamientos laterales.

8.4 COBERTURA VEGETAL

A lo largo de la zona se distribuye una gran diversidad de coberturas vegetales naturales como los bosques, matorrales y pastizales, junto con terrenos dedicados a actividades agrícolas y pecuarias. A las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal se les conoce como “uso del suelo”.

La presencia de cobertura vegetal puede disminuir o aumentar sustancialmente los procesos erosivos y por consiguiente los movimientos en masa, por su contribución a la resistencia de los materiales y al control del contenido de agua.

Según Borrero (2009), a continuación se relacionan las coberturas vegetales presenten en la zona de estudio:

8.4.1 Pastos

En general los pastos comprenden las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominada principalmente por gramíneas.

En general son utilizados como potreros, lo cual genera erosión por el permanente paso del ganado por el terreno, ocasionando terracetos por sobrepastoreo, esta cobertura se encuentra como principal constituyente en la zona y se caracteriza en las zonas por pastos limpios y enmalezados. (Figura 8)



Figura 8. Ejemplo pastos enmalezados.

8.4.2 Bosques

Las coberturas relacionadas a este tipo vegetación generan un efecto sobre la estabilidad del suelo, imprimiéndole a estas condiciones favorables en cuanto al manejo de aguas de escorrentía, superficiales y sub superficiales, debido a que

son suficientemente drenados y evitan el estancamiento de las aguas, comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un sólo tronco principal o en algunos casos con varios tallos, que tiene una copa más o menos definida.

En una clasificación general, se encuentran bosques fragmentados con o sin vegetación secundaria, que comprenden los territorios cubiertos por bosques naturales densos o abiertos con o sin intervención humana, bosques de galería o ripario que se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arbórea (vegetación secundaria), ubicada en las márgenes de cursos de agua permanente o temporal. (Figura 9)



Figura 9. Ejemplo bosques sector norte de la cuenca.

8.4.3 Plantación forestal

Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa del hombre con fines de manejo forestal y económico. (Figura 10)



Figura 10. Ejemplo bosques plantados sector norte de la cuenca.

8.4.4 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva (rastrojo alto)

Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica. En esta clase, se incluyen las áreas cubiertas por vegetación principalmente arbórea, con dosel irregular y presencia de arbustos, enredaderas y vegetación de bajo porte, que corresponde a los estadios intermedios de la sucesión vegetal. Se reconoce en la zona, por la combinación de sucesión vegetal (rastrojo), compuesto por especies pioneras como el chusque (*Chusquea* spp.) por citar alguna, con árboles dispersos dentro de la matriz y que conforman una sola unidad.

8.4.5 Tierras desnudas y degradadas

Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema. Se incluyen las áreas con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas. (Figura 11).



Figura 11. Ejemplo suelo desnudo sector norte de la cuenca.

8.4.6 Terrenos agrícolas

Estos terrenos se caracterizan por la explotación del suelo con fines de auto subsistencia, con sembrados semipermanentes y limpios, es de anotar que debido al tipo de pendientes y a los métodos de preparación de la tierra, se consideran críticos para efectos de la estabilidad.

Los cultivos semipermanentes, limpios y algunos permanentes, son los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, ya sea que se encuentren con pastos, en rotación y en descanso o barbecho, comprende las áreas

dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas. (Figura 12).



Figura 12. Ejemplo de cultivos en la cuenca.

8.5 PENDIENTES

Es la medida de inclinación de la superficie del talud o ladera. Se puede medir en grados o en porcentaje, el termino considera tanto el ángulo de inclinación como la longitud de la ladera y sus marcados cambios. En muchos casos los suelos o rocas más resistentes forman laderas de mayor pendiente y los materiales de baja resistencia o blandos, tienden a formar laderas de bajas pendientes.

La mayoría de los autores consideran que es una variable, algunos la combinan con las formas (morfología), el índice de relieve relativo, las diferencias de altura, y las direcciones de las pendientes; conceptos que son agrupadas en la ciencia

denominada geomorfología, junto con la morfo dinámica (procesos erosivos y neo tectónicos).

8.6 PRECIPITACIÓN

El agua en todas sus manifestaciones (pluvial, esorrentía y torrencial), representa un factor detonante de movimientos en masa y es el principal agente de fenómenos como la erosión y la socavación. La magnitud, duración, y frecuencia de las precipitaciones, determinan el grado en que estas puedan representar una acción desfavorable para la estabilidad de las laderas y ser detonante en cuanto a la generación de procesos erosivos en las mismas, mientras que el caudal, combinado con factores como la pendiente y el tipo de material de fondo son los condicionantes de los procesos de socavación.

8.7 SIG EN MOVIMIENTOS DE MASA

Los SIG son un conjunto de técnicas y herramientas útiles en los estudios de zonificación de fenómenos geológicos amenazantes, la clasificación de la susceptibilidad de deslizamientos con un Sistema de Información Geográfico integra factores condicionantes y desencadenantes que contribuyen a la inestabilidad de laderas.

Según (Hervas y Barredo 2001), existen diferentes métodos para el análisis de variables en la zonificación de la susceptibilidad utilizando Sistemas de Información Geográfica, entre los más utilizados se incluyen los determinísticos, estadísticos y subjetivos, la utilización de cada método en una zona determinada depende sobre todo de las características y vulnerabilidad de la zona, del tipo y extensión de los deslizamientos, de los datos geotécnicos e hidrológicos y de la escala de trabajo.

Los métodos determinísticos, están basados en las características físicas de la materia, en la fuerza y la cantidad de energía que se genera en un momento de inestabilidad, este tipo de método por lo general requiere información muy completa y detallada, que frecuentemente no se encuentran disponible, por lo tanto generar este tipo de análisis se considera poco apropiado para la cartografía a escalas intermedias (1:25.000 y 1:50.000).

El método estadístico está basado en modelos matemáticos indirectos que permiten evaluar un gran número de variables que determinan la ocurrencia del fenómeno, necesitando un gran esfuerzo en la recolección de datos, siendo una evaluación casi nada subjetiva, cabe también destacar que estos últimos no son aplicables en zonas donde predominan los deslizamientos con respecto a las áreas estables, ya que la recolección de información relacionada con deslizamientos de tierra en un área adecuada requiere un esfuerzo prolongado.

Por otra parte, el empleo de métodos cuantitativos que se basan en las opiniones de expertos, implica generalmente una gran subjetividad, por lo que los criterios de evaluación son difícilmente extrapolables a otras zonas, la aplicación más adecuada de los métodos de evaluación indirecta requiere la utilización de algún procedimiento que disminuya la subjetividad en la asignación de rangos o que normalice analíticamente el criterio con el que estos se asignan a los diferentes factores condicionantes y desencadenantes de deslizamientos considerados.

En el siguiente trabajo se propone el método cuantitativo, que se basa en categorizar y ponderar los factores condicionantes de inestabilidad según la influencia esperada de estos en la generación de movimientos en masa, en él se integra, en un SIG diversos factores de la inestabilidad de laderas y se evalúa la susceptibilidad a los movimientos mediante las técnicas de evaluación multicriterio.

El método empleado requiere en primer lugar la creación de una base de datos, mediante la cartografía de los factores del terreno y la obtención de los mapas temáticos, para esto se utilizan técnicas tradicionales, como la fotointerpretación y el reconocimiento directo de campo, tratamiento digital de mapas ya existentes, así mismo se han digitalizado y actualizado los mapas de la zona, estos factores, una vez igualados en cuanto a contenido, escala y formato gráfico, se integran en un SIG (Hervas y Barredo 2001).

A continuación se ha subdividido cada factor en clase, a las que se han asignado pesos en función de su influencia relativa en la inestabilidad, posteriormente se ha determinado el peso relativo de cada factor con respecto a los demás, usando el método de evaluación multicriterio de las jerarquías analíticas (Saaty, 1980, 1994; Eastman et al., 1995).

Este método utiliza en primer lugar los elementos o variables (los factores del terreno en nuestro caso), mediante la comparación de criterios por parejas para establecer sus pesos, con este método se crea primero una matriz cuadrada, en la que el número de filas y columnas viene definido por el número de factores, a cada elemento de la matriz se le asigna un valor que representa la importancia relativa del factor de su fila con respecto al de su columna en cuanto a posible inestabilidad.

Una vez obtenidos los pesos de los factores, se realiza la suma lineal ponderada, con lo que se obtiene los valores del mapa final de susceptibilidad (Hervas y Barredo 2001). Previa la validación del modelo, se deberá elaborar un mapa que facilite la interpretación de resultados obtenidos, para lo cual se establecen rangos para cada uno de los niveles de susceptibilidad detallando las características correspondientes a cada uno.

8.8 GEOPORTALES.

Según Honduvilla, Poveda y Manrique (2011), los geoportales son aplicaciones web soportada con bases de datos que ayudan a los usuarios a manipular y observar datos espaciales que necesiten un entorno web, además las herramientas son muy versátiles y eficientes en el desarrollo de la georreferenciación. En la actualidad el auge de los geoportales ha aumentado considerablemente por las capacidades y funcionalidades que brinda en el momento de georreferenciar datos, además dan un panorama de los beneficios de tener los datos a la disposición en cualquier momento y ofrecen las herramientas de visualización, edición, inserción y eliminación para la manipulación del SIG a través de un geoportal.

No hay que confundir los SIG, con los geoportales, ya que un SIG es conjunto de herramientas que trabajan para dar soluciones a una problemática, como por ejemplo la representación gráfica por medio de mapas que muestran problemas reales en determinado espacio, los geoportales son simplemente una herramienta más que utiliza cualquier SIG para transmitir y visualizar información en un entorno web.

Un aspecto al que se debe tomar atención, es el de la distribución de un geoportal si es libre o propietario como lo dice Roca, Crespo y Martínez (2010), al catalogarlos según las tecnologías que utilicen, los geoportales libres marcan una tendencia en el uso, porque se crearon para que toda clase de público pueda acceder a la información, no como aquellos geoportales que necesitan de alguna clave o pago ya que son administrados con algunas restricciones.

En la actualidad hay sitios web que poseen en su dominio geoportales muy competitivos en el mercado que tienen información muy valiosa y útil, así mismo como la funcionalidad de sus componentes con los que se puede llegar a

encontrar diversidad de mapas temáticos, cartografía actualizada, interfaces funcionales al cien por ciento que son agradables a sus usuarios, también presenta bases de datos bien estructuradas con suficiente capacidad de almacenamiento y herramientas eficientes y prácticas como: zoom, escalas, selección de elementos, mediciones de áreas, consulta de información ordenada, características que ofrecen tanto los geoportales libres o propietarios que están a la vanguardia cumpliendo las expectativas y necesidades de sus usuarios.

La interacción con la información es la manera en la que el usuario puede manejar los datos disponibles en el geoportal, esta característica es fundamental porque de acuerdo a la experiencia que tenga un usuario al manejar un geoportal depende el éxito de acogida por otros usuarios; es decir que si el sitio web presenta interacción con el usuario será más fácil obtener la información espacial.

Así mismo las herramientas disponibles del SIG, ofrecen beneficios y comodidad para navegar en el sitio, el zoom es la más popular y la que se encuentra disponible en gran medida en los geoportales, todo depende de lo que el usuario necesite y como fue diseñado el visor, si es pertinente tener herramientas de medición selección u otra. Un aspecto al cual los geoportales se están vinculando, es el de enviar los errores producidos al servidor del geoportal, ya que de esta manera se puede actualizar la información geográfica de manera oportuna, para que todos los usuarios tengan la mejor experiencia posible con el SIG y su geoportal.

8.8.1 El uso de los geoportales

El uso de los geoportales hace referencia a la calidad y cantidad de herramientas que facilitan el diseño de su entorno grafico (IDE), dependiendo de estas propiedades los usuarios tienen o no la facilidad de interactuar en el geoportal, ésta característica permite convertirlo en una herramienta útil en la solución de

problemas, una vez hecho el diseño e implementación hay que prestarle importancia a la infraestructura que soporta la demanda al acceso de información, ya que, debe de haber una interfaz versátil capaz de ofrecer los datos de manera oportuna, según González (2011); es un servicio eficiente que logra implementar el diseño de interfaces entendibles a cualquier tipo de usuario.

8.8.2 Implementación del geoportal en la cuenca de la quebrada el Perro

Luego de mostrar las cualidades, características, beneficios, funcionamientos y utilidades de un geoportal, se describe la aplicación realizada; todo parte a raíz de que en el Noroeste de la ciudad de Manizales, se presenta una gran problemática como lo son los movimientos de masas, por tal motivo se planteó un modelo SIG que muestra los procesos denudativos que afectan la zona, para poder determinar los factores que más influyen en su inestabilidad, haciendo relevante la creación de un geoportal que permita la visualización de la problemática.

8.8.2.1 Creación de la base de datos

Para iniciar con la implementación del geoportal se ejecutó la construcción de una base de datos, cuya funcionalidad de almacenamiento permite la visualización de la información que se divulga, el motor de la base de datos es MySQL, siendo administrado por Heidi SQL, que es un programa que permite la manipulación de la base de datos más ágilmente por tener un entorno grafico de fácil manejo, gestionando las tablas, campos y registros, ejecutando las sentencias SQL en un segundo plano.

Al diseñar una base de datos no relacional establece que cada tabla no depende de otra porque, cada tabla tiene los mismos campos que las demás y no hay necesidad de heredar características de otra para poder ver la información en el geoportal, haciendo que las llaves foráneas no estén presentes, una base datos

está constituida por tablas que son el almacén para categorizar la información, cada tabla tiene campos o atributos que son las características que la definen y registros que son los datos que se almacenan según la descripción de su campo.

Teniendo en cuenta lo anterior la estructura de la base de datos para la visualización de información en el geoportal es la siguiente: existen siete tablas que corresponden a un mapa que son el reflejo de los datos en el geoportal y a un shape digitalizado en ArcGis que es la obtención de información del estudio en la zona, las tablas son las siguientes: erosión, geomorfología, geología, suelos, pendientes e isoyetas, todas tienen los mismos campos por ser una base de datos no relacional y son un identificador que es la llave primaria, un área total del shape que hace referencia a la extensión en metros cuadrados, la latitud y longitud en grados decimales para poder georreferenciar los datos, porque solo en este formato las librerías API reconocen las coordenadas y por último el tipo, característica de cada shape que cobra importancia al momento de consultar información en el geoportal al ser visto como icono, en cuanto a los registros es la cantidad de información recopilada y obtenida producto del estudio de la cuenca quebrada el Perro, que es gestionada para mostrar datos puntuales y concretos como los describe cada campo en la base de datos.

8.8.2.2 Calculo del área total de los shapes

Para poder empezar con la delimitación de las áreas por cada shape se digitalizaron los mapas en ArcGis, al realizar este procedimiento se utiliza la calculadora geométrica para obtener el área de los polígonos en metros cuadrados y la longitud de las polilíneas en metros, este cálculo es exportado a excel con el fin de hacer la sumatoria total de las áreas por cada polígono y polilínea, esto se hace al exportar la tabla de atributos de ArcGis en formato dbBase table con extensión dbf, una vez realizado el proceso solo queda abrir el archivo en excel y hacer la sumatoria de los polígonos correspondientes a cada

shape, posteriormente con el programa Heidi SQL se agrega el área total en su atributo correspondiente en la base de datos.

8.8.2.3 Georreferenciación de las coordenadas en cada shape

La georreferenciación es indispensable en el geoportal porque con este proceso se logra observar con exactitud la información en un espacio geográfico determinado, para lograr este proceso se utiliza la herramienta de ArcGis llamada XTools, que permite exportar los shapes a Google earth en el formato kml, al aplicar la propiedad del XTools en ArcGis se guarda el archivo para ser abierto por Google earth, esto sirve para obtener las coordenadas de los shapes en grados decimales haciendo uso de las librerías de las API, porque solo en este formato es georreferenciada la información, logrando obtener la latitud y longitud de cada shape de la zona de estudio, luego se utilizó Heidi SQL para poder ingresar los registros de latitud y longitud en la base de datos, ver figura 13.

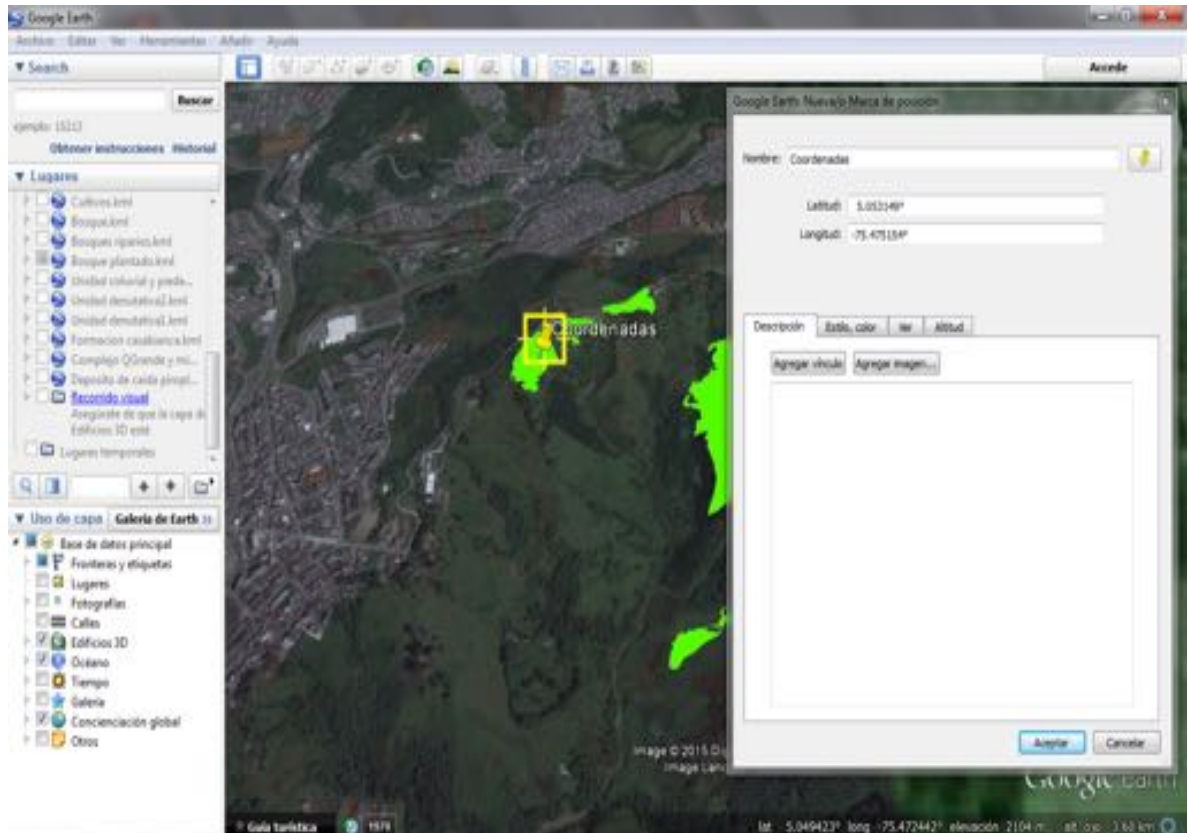


Figura 13. Coordenadas del shape de bosques plantados en Google Earth.

8.8.2.4 Asignación de iconos a los datos de los polígonos en el geoportal

En la base de datos hay un campo llamado tipo, donde se encuentran los registros que hacen referencia a las características puntuales en cada polígono de los shapes, para exponer este punto se utiliza un ejemplo, en el mapa de usos de suelos hay diferentes tipos de suelos o coberturas vegetales entonces para clasificarlos en el geoportal se hace uso de los datos almacenados en ese campo, como son: bosque riparios, bosques plantados, rastrojos altos, guaduas, pastos en malezados, bosques, suelo desnudo, pastos y cultivos, a cada cobertura se le asignan un icono, caracterizado por ser una imagen pequeña con diferentes

formas, al darle clic sobre cada imagen se despliega toda la información contenida que se refiere a ese campo de la base de datos, esto se logra por medio de la programación del geoportal que permite la conexión a la base de datos, que consiste en hacer una sentencia SQL para después ser ejecutada, lo que establece un vínculo entre el geoportal y la información contenida en la base de datos, de esta manera disponer de ella y posteriormente asignarle una imagen o icono.

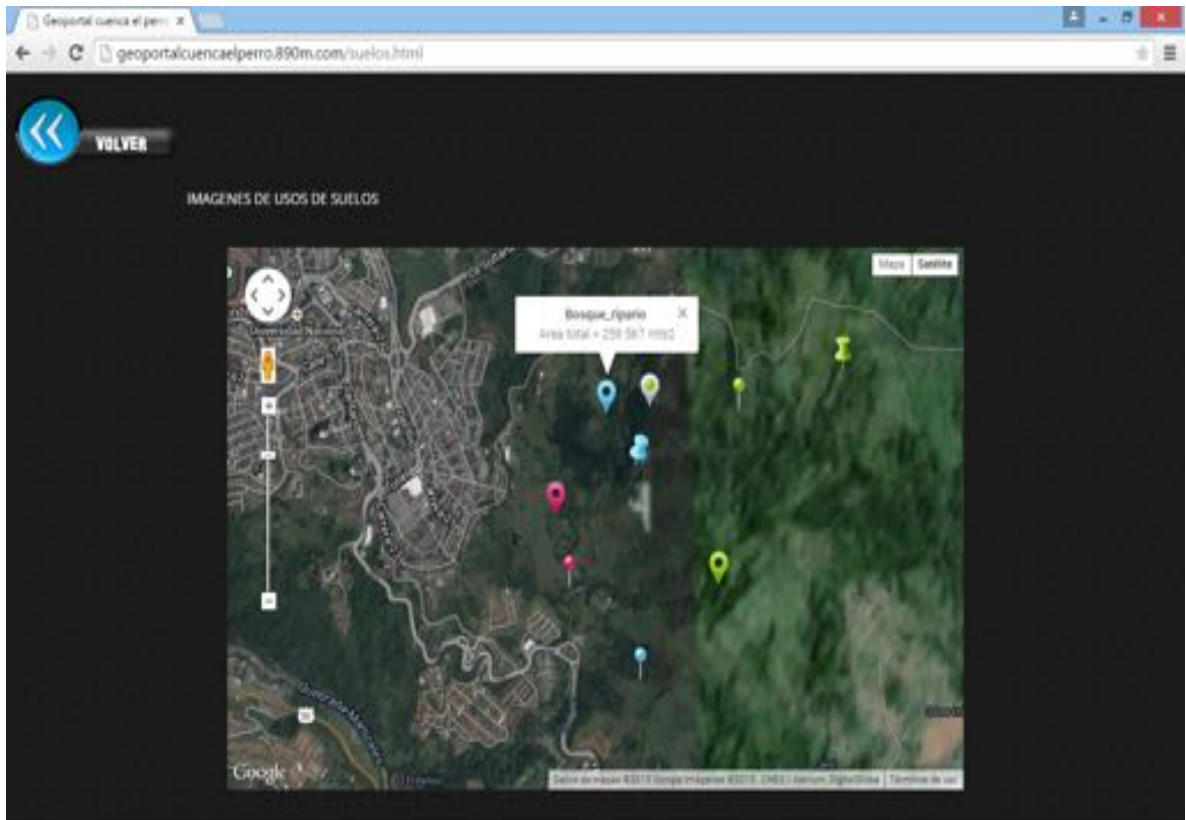


Figura 14. Mapa de usos de suelos con su respectivo icono en el geoportal.

8.8.2.5 Programación del geoportal

El lenguaje de programación para la construcción del geoportal fue php y html con css u hojas de estilo como etiquetas en la creación de un entorno gráfico en la web, en php se realiza la conexión a la base de datos y un archivo xml que se encarga de conectar los datos con las librerías API de google, para poder georreferenciar los registros de latitud y longitud, al utilizar la cartografía de Google Maps, que es proporcionada por las API se muestra una imagen con un entorno grafico de fácil interpretación y sus componentes de visualización que las librerías API dejan usar, al importar sus funcionalidades desde un servidor externo que en este caso sería las imagenes de Google, donde se plasman todos los elementos adecuados de la base de datos, para georreferenciar la información.

Para poder observar el área total y el nombre o característica de los shapes en los iconos que están en la base datos, el archivo en html ejecuta el archivo xml realizado en php, creando una hoja de estilo que ofrece un entorno agradable de vista al geoportal.

8.8.2.6 Creación del hosting o alojamiento en el servidor y el subdominio

La divulgación del geoportal en la web fue uno de los propósitos que se plantearon para hacer la información accesible, en este proceso se adquiere un hosting y un subdominio gratuito; la función de un hosting es la de facilitar un espacio en memoria en un servidor web, para almacenar los archivos html, php y css mostrando un sitio en la internet, dentro de las alternativas que ofrece el subdominio es el servicio gratuito dentro del entorno, un subdominio es un DNS sistema de nombres de dominio que convierte la dirección ip del servidor en un nombre para que sea identificado en la internet, el subdominio para el geoportal es 890m.com, que es asignado por defecto al nombre del sitio web llamado geoportalcuencaelperro.890m.com.

Entre la gran diversidad de empresas que ofrecen estos servicios se optó por hostinger Colombia, ya que ofrece un servicio web gratis con un espacio en memoria considerable de 2.000 Mb, 2 bases de datos en MySQL, más un entorno espacial para administrar el servidor de la cuenta remotamente y la facilidad de acceder por medio de una cuenta de correo electrónico en gmail.

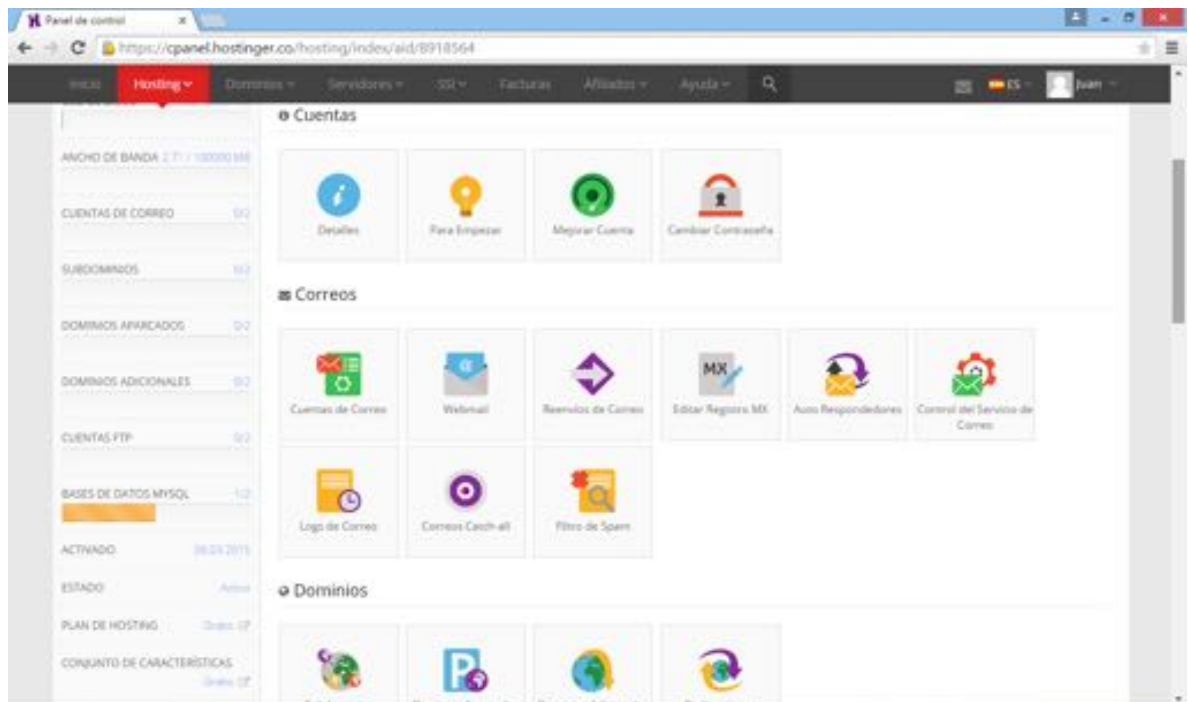


Figura 15. Entorno gráfico de la cuenta de hosting en hostinger Colombia..

8.8.2.7 Implementación de la base de datos en el hosting

Luego de haber creado un hosting y un subdominio para el geoportal, el paso siguiente es hacer uso de la base de datos para que la información pueda ser usada en el entorno web, esto con el fin de representar cada capa por medio de imágenes de una manera ordenada, para que la información sea mostrada con los datos reales de los estudios hechos de la cuenca quebrada el Perro, en este caso se utiliza el administrador de cuentas de hostinger Colombia que deja crear

un usuario de base datos llamado u824782402_datos, un usuario MySQL llamado u824782402_root y un host llamado mysql.hostinger.co o también localhost por trabajar con phpMyAdmin, estos son los parámetros esenciales de cualquier base de datos.

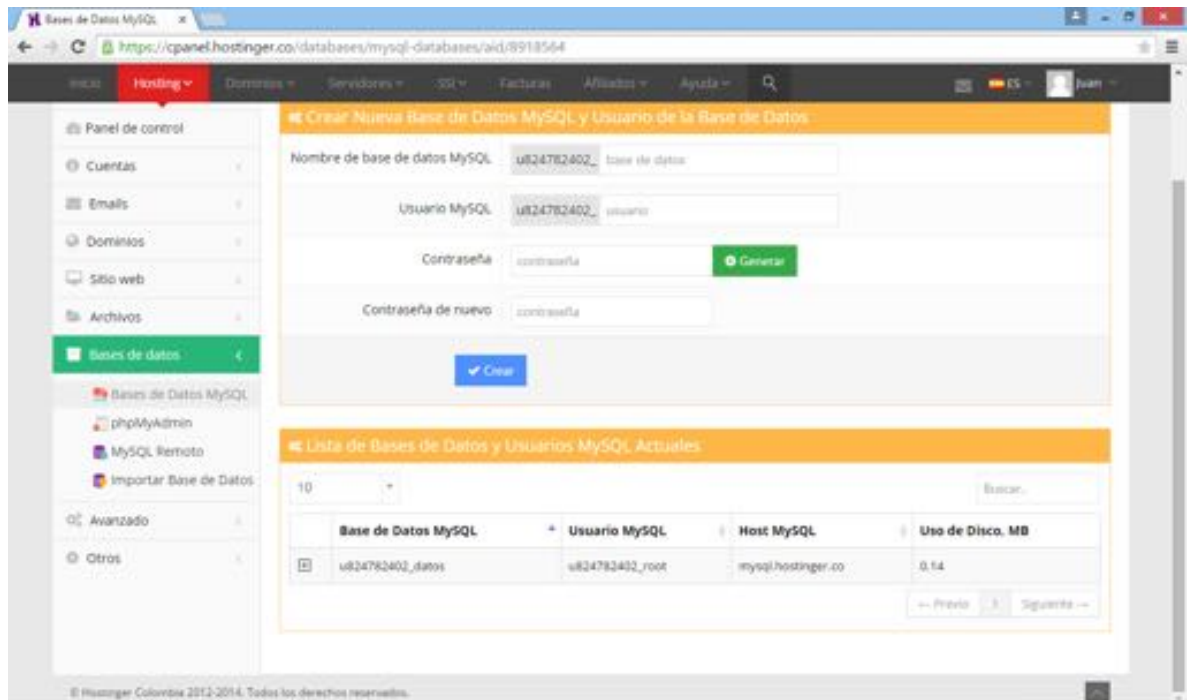


Figura 16. Administrador de la base de datos en el hosting.

Para implementar la base de datos al hosting lo que hace es crear un backup o copia de seguridad desde Heidi SQL, generando un archivo de texto con las sentencias SQL de creación de tablas, campos y registros, para posteriormente agregar a la base de datos, la información por medio del administrador de MySQL del hosting llamado phpMyAdmin, donde se ejecutan las instrucciones SQL del backup logrando restaurar toda la base de datos en el hosting.

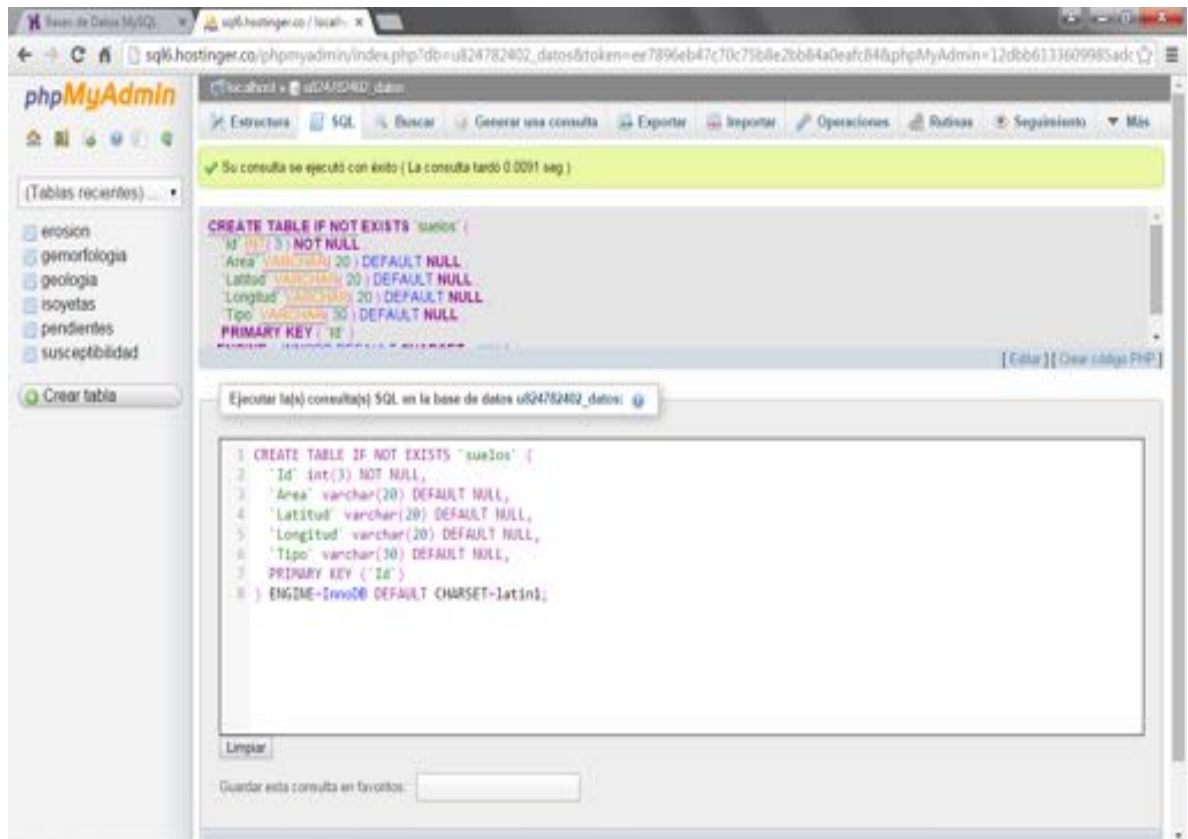


Figura 17. Restauración de la base de datos en el hosting.

8.8.2.8 Cargar archivos del geoportal en el servidor web

Una de las alternativas para subir los archivos del geoportal en la web es la de utilizar un cliente ftp, que es protocolo de transferencia de archivos que utilizan los servidores para subir ficheros a su hosting, esto con la finalidad de que el servidor web tenga en cuenta cuál es el ciberespacio o geoportal, para que sea visto en la internet, por medio del siguiente hipervínculo que apunta a los archivos del sitio web, se accede a <http://www.geoportalcuencaelperro.890m.com/> y con un navegador actualizado se tiene acceso al geoportal, el cliente ftp es fileZilla Client, programa que deja acceder remotamente al hosting para subir los archivos del geoportal, solo hay que ingresar el nombre del servidor, el usuario que hostinger

Colombia asigna y la contraseña que se crea al hacer la cuenta en este administrador de hosting y subdominios.

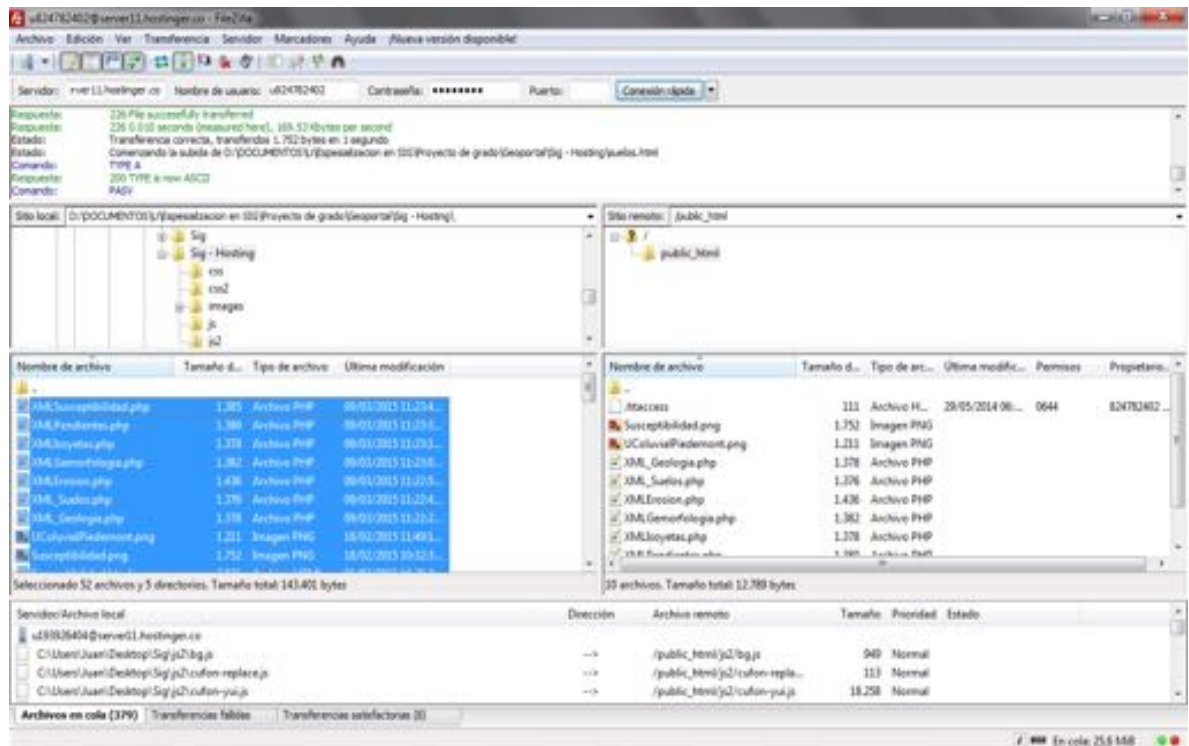


Figura 18. Exportar archivos php, html y css del geoportal remotamente con el cliente ftp fileZilla Client al hosting.

8.8.2.9 Galería de imágenes del geoportal

El geoportal tiene una sección por cada mapa, donde se pueden ver imágenes de los shapes que se digitalizaron con las imágenes de los diferentes procesos geológicos de la cuenca quebrada el Perro, y una descripción que hace referencia a las características de cada proceso, esto con el fin de hacer un geoportal más descriptivo, para ello se toman las imágenes de los shapes que digitalizaron y se exportan en google earth en formato jpg, las fotos de las unidades geológicas que fueron suministradas por corpocaldas son de finales del año 2008, año donde se

presentaron la mayoría de movimiento de masa en el sector de la cuenca quebrada el Perro, dando como resultado imágenes organizadas con una leyenda, implementadas por medio de html y css en el geoportal.

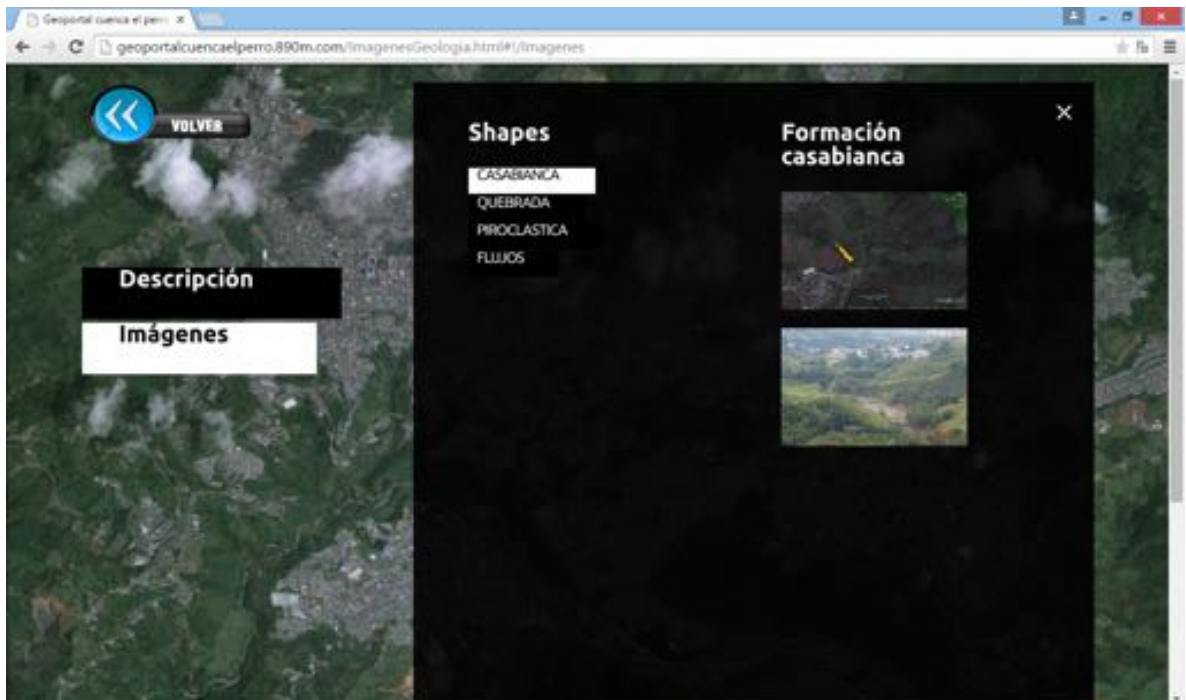


Figura 19. Ejemplo grafico de las unidades geológicas en la cuenca quebrada el Perro visualizadas en el geoportal.

9. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN LA CUENCA QUEBRADA EL PERRO.

Como punto de partida, se consideró la información existente de los estudios realizados en la cuenca, de esta manera se logró identificar los fenómenos de inestabilidad más importantes que afectan el área; entre estos, los informes generales de Corpocaldas fueron tomados como referencia para retroalimentar este análisis, la información recopilada como mapas de procesos erosivos, uso de suelos, geomorfología y geología; información de pluviosidad del IDEA (Instituto de estudios ambientales de la Universidad Nacional), sirvieron como mapas e información base, para identificar y realizar un análisis retrospectivo de la estabilidad de la cuenca.

Para corroborar la información de los mapas de referencia, se recorrió la zona, para evaluar los diferentes procesos ya caracterizados y comprobar las diferentes causas de inestabilidad, como uso de suelos, precipitación, geología, entre otros.

9.1 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DENUDATIVOS

La estabilidad de las laderas, está condicionada por la acción simultánea de una serie de factores, los deslizamientos se producen como consecuencia de los desequilibrios existentes entre las fuerzas que actúan en un volumen de terreno.

De este modo se puede hablar de dos tipos de factores los internos y externos, incluyendo en los internos las características intrínsecas relativas a las propiedades del material y a su resistencia como la litología, textura, consolidación espesor y parámetros estructurales relativos a planos de estratificación y debilidad.

En las características extrínsecas, se encuentra la pendiente de la ladera y su disposición con respecto a discontinuidades geológicas y la orientación; factores de tipo ambiental como cambios estacionales, el tipo y los cambios en la vegetación, así como la morfología de la ladera, factor condicionante que combinado con el resto de elementos influyen en la estabilidad.

Los factores externos actúan sobre el material y modifican las condiciones iniciales, provocando o desencadenando las roturas debido a las variaciones que ejercen en el estado de equilibrio de aquellas. La infiltración de agua en el terreno, que provoca el aumento de la presión intersticial, disminuyendo la resistencia de los materiales, la relación entre ocurrencia de deslizamientos y periodos lluviosos es bien conocida. Las vibraciones, por otra parte, provocan aceleraciones en el terreno favoreciendo la rotura y la licuefacción, estas pueden ser debidas a movimientos sísmicos naturales o inducidos por el hombre como explosiones mineras o por obras públicas. Actividades humanas alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación y explotaciones mineras entre otras, así mismo los cambios en la cubierta vegetal.

La zona de estudio, es el resultado de la interacción de elementos naturales internos y externos, es el producto de cambios en las características geológicas, hidrológicas y meteorológicas, es por tal motivo que la actualización de los datos es de suma importancia para el presente trabajo, con el fin de renovar la información en la zona, se realizaron recorridos de diferentes trayectos que permitieron comprobar los procesos ya existentes y actualizar la información, lo que facilitó la identificación en campo de los lugares más críticos y de mayor ocurrencia.

Se analizó con mayor detalle la información ya proporcionada por los diferentes estudios, se localizaron los principales eventos y se determinaron según el tipo y

el área de afectación, se procesaron los mapas cronológicos de movimientos en masa, se actualizó y comprobó la información en campo. Los movimientos en masa se clasificaron según (Varnes, 1958 y 1978).

Los procesos denudativos presentes en la zona, son el resultado de la interacción de diversos factores, entre los que están: Tipo de material, las precipitaciones, la geología y la intervención antrópica. Estos procesos se describen a continuación.

9.1.1 Erosión laminar

En el área de estudio, este proceso es más evidente en las caras libres de los taludes naturales, ya que están desprotegidos totalmente de vegetación. Se observa en algunas zonas de cultivos no permanentes, donde el suelo está desprotegido, se manifiesta en terrenos de pastoreo, donde la vegetación arbórea fue removida para el crecimiento de este tipo de pastos, que si bien protege la superficie del impacto directo de las gotas de lluvias, no impide que se genere un flujo laminar.

9.1.2 Erosión en surcos o cárcavas

Sobre el área de estudio se observó claramente algunas formaciones de pequeños canales irregulares y poco profundos los cuales se ven representados en los taludes y en los cuerpos de los movimientos en masa, que facilita que el agua de escorrentía se concentre por canales preferenciales debido a la irregularidad del terreno.

9.1.3 Erosión por socavación lateral y de fondo

Proceso que se presenta en los cursos de agua y afluentes de la quebrada el Perro; la socavación lateral y de fondo se observa en gran parte de la cuenca, debido al aumento temporal de las precipitaciones que se ha evidenciado en la última década y en zonas donde se concentra un caudal suficiente con energía necesaria para que arrastre materiales, tanto en rocas del complejo Quebrada grande, unidad sedimentaria como en las cenizas volcánicas.

9.1.4 Terracetas

Aunque no es un proceso natural, es muy importante en la zona, ya que es causado por la actividad antrópica, ocasionado por el sobrepastoreo, por lo general las laderas montañosas ubicadas en la zona son utilizadas con este fin, donde se produce una erosión, escalonada profunda, con pastos estrechos, claros y definidos que han sido aplanados por el efecto de la pisada de animales de gran peso.

Según las características de los materiales y la superficie de ruptura se identificaron en la zona los siguientes movimientos en masa, siendo los principales los deslizamientos, en menor proporción flujos, como consecuencia de las fuertes precipitaciones en un lapso corto de tiempo y una fuerte reptación, que aunque es un movimiento lento (pocos cm/año) afecta grandes áreas de terreno. Para la clasificación de movimientos en masa se trabajó según lo propuesto por (Varnes 1958 y 1978). (Figura 20).

9.1.5 Deslizamientos

Este tipo de movimientos se caracteriza por el desplazamiento de material litológico a través de un corte y a lo largo de una o varias superficie de ruptura, desarrollando una zona de desplazamiento y una zona de acumulación de material, por lo general los deslizamientos son rotacionales o traslacionales según la superficie de ruptura que presenten.

9.1.5.1 Traslacionales o planares

Este tipo de deslizamientos son los que predominan en el área de estudio, presentando su mayor concentración en la parte alta y media de la cuenca, mostrando su superficie de ruptura entre los depósitos de cenizas volcánicas y las rocas del complejo Quebradagrande, la superficie de falla es más o menos plana o ligeramente ondulada, desplazando la masa hacia fuera y hacia abajo y presenta muy poco movimiento de rotación o volteo. El plano de falla es de forma continua, con grietas laterales y superficiales.

9.1.5.2 Deslizamientos rotacionales

Localmente se encuentran distribuidos en algunas zonas de la cuenca. Su característica principal es la superficie de ruptura circular a semicircular y cóncava hacia arriba, generando varias grietas superficiales en la corona y provocando el avance de movimientos retrogresivos.

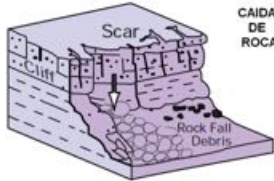
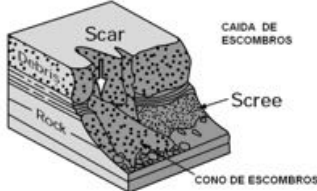
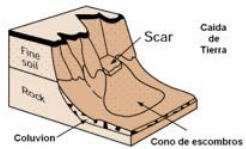
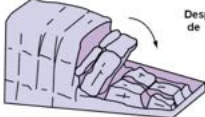
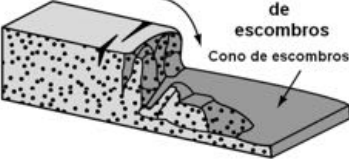
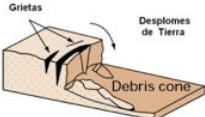
9.1.8 Flujos

En el área, estos procesos no son muy frecuentes, ya que se encuentran asociados a grandes precipitaciones en un lapso corto de tiempo, generalmente se presentan en los meses más lluviosos del año donde los materiales sub-superficiales se saturan de agua, perdiendo cohesión y generando movimientos

rápidos de materiales debido a las moderadas pendientes. Los tipos de flujos presentes en la zona corresponden principalmente a flujos de lodo y de escombros. Por lo general se desarrollan a partir de los cuerpos de los deslizamientos.

9.1.9 Reptación

En las laderas de la cuenca el proceso se intensifica debido al cambio en el uso del suelo, ya que la mayoría de la cobertura vegetal se ha remplazado por pastos que son utilizados para la industria pecuaria, ayudando a la generación de terracetas o rugosidades en el suelo, presentando movimientos lentos, condición que contribuyendo al geotropismo en los árboles y abombamientos locales, este proceso se observó en la parte media de la cuenca.

Material		ROCA	ESCOMBROS	TIERRA
Tipo de movimiento				
CAIDAS				
				


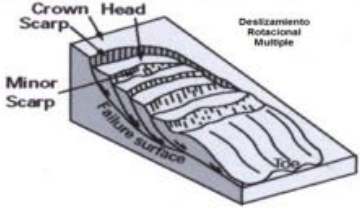
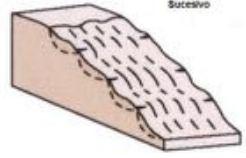

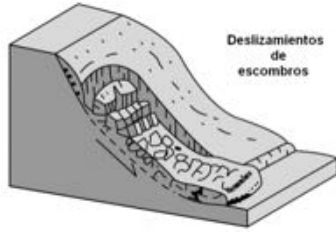
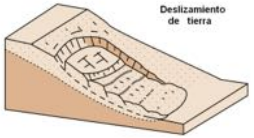
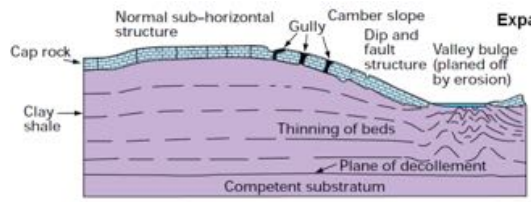
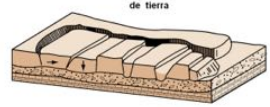
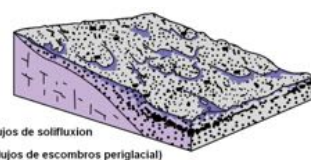
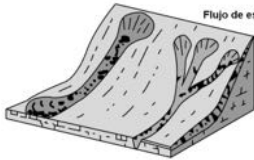
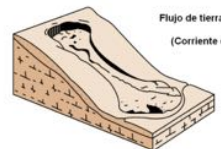
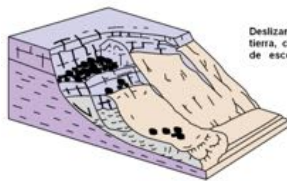
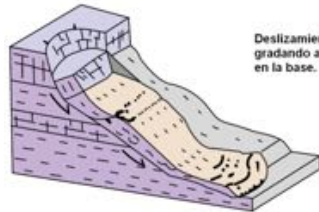
DESIZAMIENTOS	ROTACIONAL	 <p>Deslizamiento Rotacional Simple</p>	 <p>Crown Head Scarp Minor Scarp Failure surface</p> <p>Deslizamiento Rotacional Múltiple</p>	 <p>Deslizamiento Rotacional Sucesivo</p>
	PLANAR	 <p>Deslizamiento de roca</p>	 <p>Deslizamientos de escombros</p>	 <p>Deslizamiento de tierra</p>
	EXPANSIONES	 <p>Normal sub-horizontal structure Cap rock Clay shale Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planed off by erosion) Thinning of beds Plane of décollement Competent substratum</p> <p>Expansiones e.g. cambering and valley bulging</p>		 <p>Expansion de tierra</p>
FLUJOS	 <p>Flujos de solifluxion (Flujos de escombros periglacial)</p>	 <p>Flujo de escombros</p>	 <p>Flujo de tierra (Corriente de lodo)</p>	
COMPLEJO	 <p>Deslizamiento de tierra, con caída de escombros</p>	 <p>Deslizamiento compuesto, gradando a un flujo de tierra en la base.</p>		

Figura 20. Clasificación de los tipos de deslizamientos modificada de Varnes (1958 y 1978).

10. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO.

La aplicación de estos métodos de evaluación en el ámbito de los SIG, indica que cada variable o factor temático se debe estructurar en una matriz, en la cual los criterios ocupan las filas de la matriz y las alternativas propias de cada criterio ocuparían las columnas. Una vez establecidas las matrices de evaluación, se puede, a través de estos métodos, implementar y ejecutar una serie de procedimientos o reglas de decisión, que permitirán resolver los problemas en el proceso de toma de decisiones.

Para el trabajo se implementó el método de evaluación multicriterio propuesto por Saaty, 1980, que es una herramienta muy flexible y de gran alcance ya que los parámetros y la clasificación final se obtiene sobre una base de evaluaciones relativas por parte de las diferentes opciones proporcionadas que dependen de los parámetros a analizar; este método por lo tanto puede ser considerado como una herramienta que es capaz de analizar diferentes parámetros o factores de una forma subjetiva, dependiendo la importancia o no de cada factor a evaluar; este autor establece en la evaluación una serie de valores de clasificación como lo muestra la siguiente Tabla 1.

Valor	Condicionante
0.11	Extremadamente menos susceptible
0.14	Menos susceptible
0.2	Poco susceptible
0.33	Moderadamente menos susceptible
1	Son igualmente susceptibles
3	Un elemento es ligeramente más

	susceptible
5	Un elemento es más importante sobre la problemática
7	Un elemento es fuertemente más susceptible
9	Un elemento es absolutamente más susceptible
2,4,6,8	Valore intermedios (consenso entre dos juicios)

Tabla 1. Valores de peso de acuerdo a la importancia a la susceptibilidad (Satty, 1980).

Posteriormente con el análisis de los parámetros y factores condicionantes del terreno, como son el tipo de material (geología), relieve, erosión, clima, vegetación y otros que son de importancia en el estudio realizado en la cuenca quebrada el Perro; se generó la matriz cuadrada en la que el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar, de esta forma, se genera una matriz de comparación entre pares de factores, cuyo objetivo es comparar la importancia de uno sobre cada uno de los demás (Xij).

Posteriormente se determina el vector principal, el cual establece los pesos (W_j), y el valor, que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores; que se describen en la Tabla 2.

J	GEOLOGIA	USO DE SUELO	GEOMORFOLOGIA	PRECIPITACIÓN	PENDIENTES	$\sum X_{ij}/n$	PESO RELATIVO W ($\sum X_{ij}/n/\sum x_j$)
X							
GEOLOGIA	1	3	0.33	3	0.33	1.53	0.21
USO DE SUELO	3	1	0.2	5	0.2	1.88	0.26
GEOMORFOLOGIA	0.33	0,2	1	0.14	0.14	0.36	0.06
PRECIPITACIÓN	3	5	0.14	1	3	2.42	0.34
PENDIENTES	0.33	0.2	0.14	3	1	0.93	0.13
$\sum x_j$						7.12	1

Tabla 2. Determinación de los pesos de los criterios, mediante la Matriz de Jerarquías Analíticas.

De acuerdo con los valores de los pesos relativos, la influencia de mayor importancia es el factor de precipitación y la de menor el parámetro geomorfología.

Una vez obtenidos los pesos de los factores, se obtiene finalmente un índice de susceptibilidad a los movimientos en masa, mediante la suma lineal ponderada (Hervás y Barredo, 2001) de pesos de factores y clases, según la expresión:

$$ISD = \sum W_j * X_{ij}$$

Donde I es el índice de susceptibilidad.

W_j es el peso del factor j;

X_{ij} es el peso de la clase i del factor j.

Finalmente se clasifican los índices en unos pocos intervalos iguales de susceptibilidad, más estandarizados y de interpretación intuitiva.

11. PARÁMETROS PARA DETERMINAR LA SUSCEPTIBILIDAD.

Los mapas base que se utilizaron para generar el mapa de susceptibilidad de movimientos en masa, fueron el de pendientes, usos del suelo, geomorfológico, geológico y de precipitación.

De acuerdo a lo observado en campo y al análisis de evaluación multicriterio, a cada mapa factor se le asigna un peso (porcentaje), este valor representa cuanto influye la unidad en la generación de los movimientos en masa. Los pesos asignados para cada mapa factor fueron los siguientes: precipitación 34%, uso de suelo 26%, geología 21%, pendiente del terreno 13% y geomorfología 6%. Ver (Tabla 2).

A continuación, se menciona cada una de las variables que se tuvo en cuenta, como principales agentes generadores de los movimientos en masa en el sector.

11.1 GEOLOGÍA GENERAL

En el presente estudio, se menciona de manera resumida, la geología local de la cuenca, en el que se logró identificar dos unidades litológicas, comprendidas de base a techo de la siguiente manera.

11.1.1 Unidad Cretácica, Complejo Quebradagrande (miembro sedimentario) (kqd)

Según (Borrero 2009), a manera general esta unidad litológica, se localiza sobre los lineamientos en las áreas de drenaje que conforman la red hidrográfica de la cuenca, en donde se observan capas centimétricas de lodolitas limosas y carbonosas, y arenitas, de coloraciones ocre, grises y negras; fracturadas, diaclasadas y localmente plegadas, con venas de cuarzo paralelas a la estratificación.

11.1.2 Unidad cuaternaria

Para la zona de estudio, se identificó un predominio de los depósitos volcánicos de caída piroclástica (Qto), producto de la actividad volcánica explosiva de los volcanes del Complejo Ruiz – Tolima; se presentan cubriendo la topografía y suprayaciendo la unidad estratigráfica antes mencionada. Sus mejores expresiones, se presentan en la actualidad, en la parte alta de la cuenca, sector Norte del área de estudio, en sitios conocidos como La Curva del Mico y Torres de Caracol, en inmediaciones de la vía que conduce al Alto del Zancudo; lugares en los cuales se presentó una reactivación de zonas de inestabilidad importantes como consecuencia de los intensos períodos lluviosos que afectaron la ciudad a finales del año 2008.

Es importante, mencionar el comportamiento mecánico, que tienen las rocas a diferentes factores de deformación, sean naturales o humanas; aquí se realiza una descripción resumida de estos factores y su importancia en este estudio (susceptibilidad a movimientos en masa).

Como factores naturales de deformación de las rocas o macizos, se tiene en cuenta las propiedades intrínsecas dadas por el tipo de roca, la cohesión, grado de alteración; el estado de esfuerzos que sufren las rocas iniciales, residuales, tectónicas, topográficas, las propiedades ambientales dadas por la humedad o contenido de agua y las condiciones climáticas y meteorológicas, que inciden directamente en el comportamiento mecánico de los materiales.

Los factores de intervención humana, como estados de esfuerzos inducidos, debido a construcciones, cultivos y sobrepastoreo, hacen que el estado natural, se vea modificado, generando problemas de inestabilidad.

Debido al análisis de los comportamientos de las rocas frente a estos factores, se ha podido establecer que los depósitos volcánicos son lo suficientemente permeables para permitir la infiltración de agua a través de estos sedimentos hasta alcanzar el contacto discordante con rocas del complejo Quebradagrande, facilitando la escorrentía direccionada y por ende una zona inestable, factor que contribuye a la generación de movimientos de masa.

11.1.3 Generación del mapa geológico

Los polígonos, se editaron a partir del mapa geológico existente de la zona a escala 1:2000, (modificado del mapa de Corpocaldas), la información de las unidades geológicas, se corroboró con las observaciones de campo.

Para la digitalización del mapa geológico se utilizó el programa ArcGis 10.1, el cual permitió a partir del mapa de referencia, crear una serie de polígonos correspondientes a las formaciones geológicas de la zona.

Ya obtenido el mapa geológico general, se procedió a realizar una codificación a cada polígono obtenido de las unidades geológicas, por medio de la herramienta Data Management / Tools / General / Merge, donde se combinó los polígonos correspondientes en un solo shapefile con los códigos asignados, esto con el fin hacer un mapa raster con la clasificación obtenida de la influencia relativa de cada unidad geológica; por medio de la herramienta de Arctoolbox / conversión tolos / to raster / polygon to raster, generando un mapa raster con los correspondientes valores de peso, el cual se debe reclasificar por medio de la herramienta de Arc Tool Box donde se emplea Spatial Analyst Tools / Reclass / Reclassify, generando una reclasificación dada por el valor de pesos asignado, lo cual servirá para posteriormente generar el mapa de susceptibilidad (Figura 21).

EDAD GEOLOGICA	FORMACION GEOLOGICA	LITOLOGIA	VALOR DE PESO PARA EL FACTOR TIPO DE ROCA
Cuaternaria	Depósitos volcanicos de caída piroclastica	Depósitos de Cenizas volcanicas, pumitas.	5
Terciaria	Formación Casabianca	Conglomerados clastosoportados	3
Cretacica	Complejo Quebradagrande (Miembro sedimentario)	Lodolitas limosas y carbonosas, y arenitas	4

Tabla 3. Determinación de los valores de pesos para el factor geología (tomado y modificado de Borrero, 2009), de informes Corpocaldas.

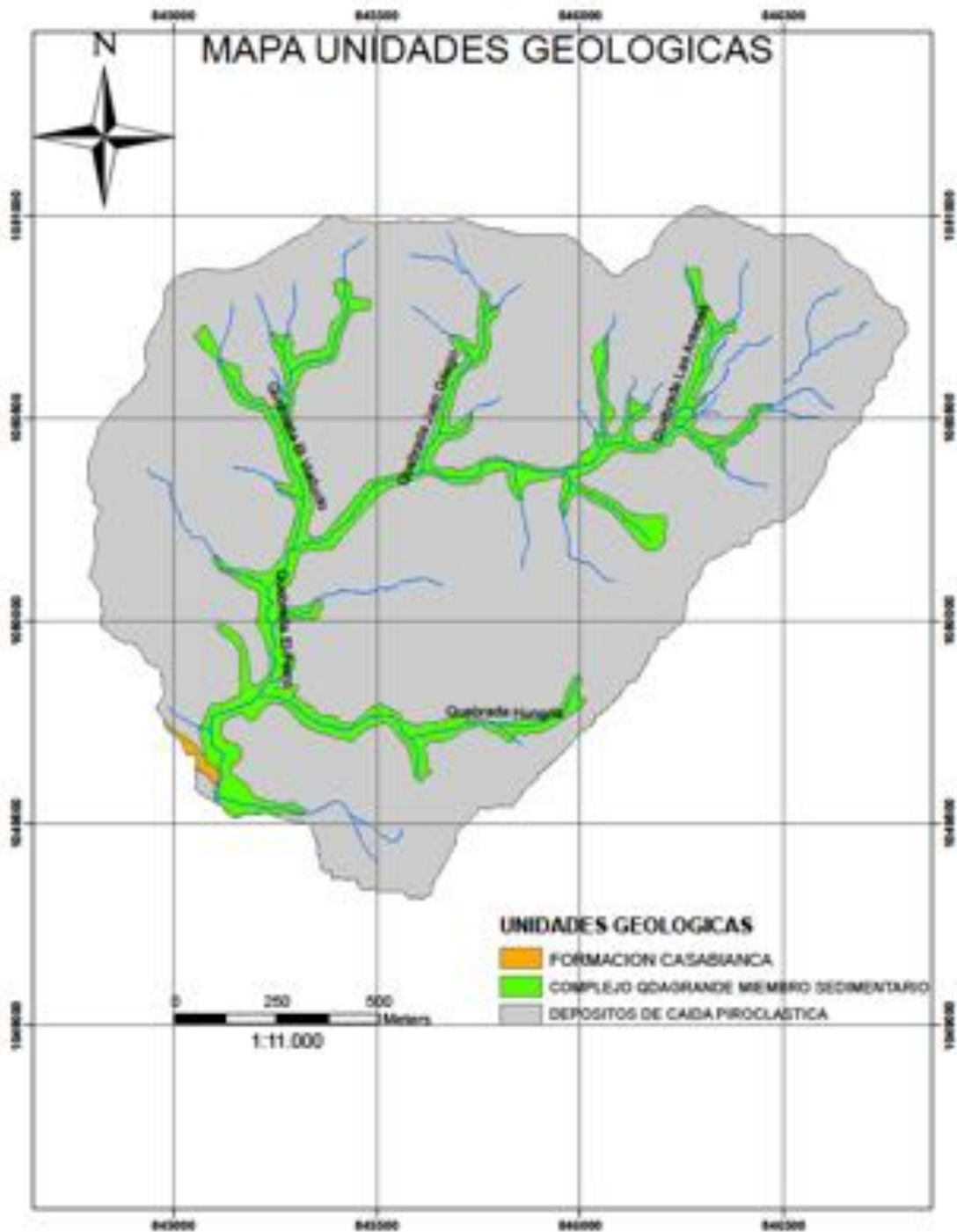


Figura 21. Mapa de unidades geológicas en la cuenca de la quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009).

11.2 USOS DE SUELO

Este factor de análisis, muestra su importancia con una explicación de la problemática o no que se da con una caracterización de la presencia o ausencia de una cubierta vegetal; una ausencia de cubiertas vegetales permite que el suelo sea más susceptible al desprendimiento de sus partículas y ocasiona la pérdida de las capas superficiales, llegando en algunos casos a exponerse el lecho de la roca madre al medio ambiente.

Por el contrario, una cubierta de arbustos y árboles, una capa de hojas muertas o en descomposición, o una alfombra de pasto, son los agentes encargados de regular los excesos de agua que pueden saturar y erosionar el suelo; además cuando existen áreas boscosas las raíces de bosques autóctonos pueden profundizar algunos metros y por consiguiente mejorar la resistencia del suelo al proveer mayor cohesión.

Hacia el sector Norte de la cuenca, existen áreas con diferentes usos de suelo, pero con el predominio de cobertura vegetal como pastos, comúnmente utilizados para sobrepastoreo, este factor asociado con la geología permiten que el área sea más susceptibles y de mayor exposición a presentar movimientos en masa.

Los otros usos de suelo, presentes en la cuenca, son la presencia de bosques, cultivos y suelos urbanos; realizando el análisis y la interpretación, se logró establecer que en estos se generaron algunos deslizamientos, debido a que hay que tener en cuenta la importancia de otras características como son la geología, además de un valor importante que son las pendientes y los regímenes de precipitación durante algunas etapas del año hacen que estas áreas no estén exentas de generar movimientos en masa.

11.2.1 Generación del mapa de usos de suelo

El mapa base de uso de suelo de referencia a escala 1: 2000, fue tomado del informe técnico (Corpocaldas, 2009). La valoración de los usos del suelo, se realizó de acuerdo a la disposición de cada unidad frente a la ocurrencia y probabilidad de movimientos en masa, esto fue recopilado del mapa de referencia y corroborado con observaciones hechas en campo.

Para la digitalización del mapa temático se utilizó el software ArcGis 10.1, en el cual se crearon los shapefiles de forma (polígono) donde se editó cada una de las coberturas vegetales de la zona, a los cuales se les asignó un código correspondiente al rango de susceptibilidad, ya por medio de la herramienta Data Management / Tools / General / Merge, se obtuvo un solo shapefile con datos combinados con todas las características de dicho mapa temático, finalmente este mapa se reclasificó de acuerdo a los códigos asignados, para la reclasificación donde se utilizó ArctoolBox y su herramienta Spatial Analyst Tools / Reclass / Reclassify, obteniendo un mapa raster, el cual será utilizado para generar el mapa de susceptibilidad (Figura 22).

A continuación se indica la Tabla 4, donde se observa la valoración de susceptibilidad y códigos generados para cada cobertura o uso correspondiente.

USO DE SUELO	VALOR DE PESO PARA LOS FACTORES DE USOS DE SUELO
Bosques	1
Bosques riparios	7
Bosques plantados	3
Pastos	7
Pastos enmalezados	7
Rastrojos Altos	5
Cultivos	3
Guadua	1
Tejido Urbano	1
Suelo Desnudo	9

Tabla 4. Determinación de los valores de pesos para el factor uso de suelo (tomado y modificado de informes de Corpocaldas).

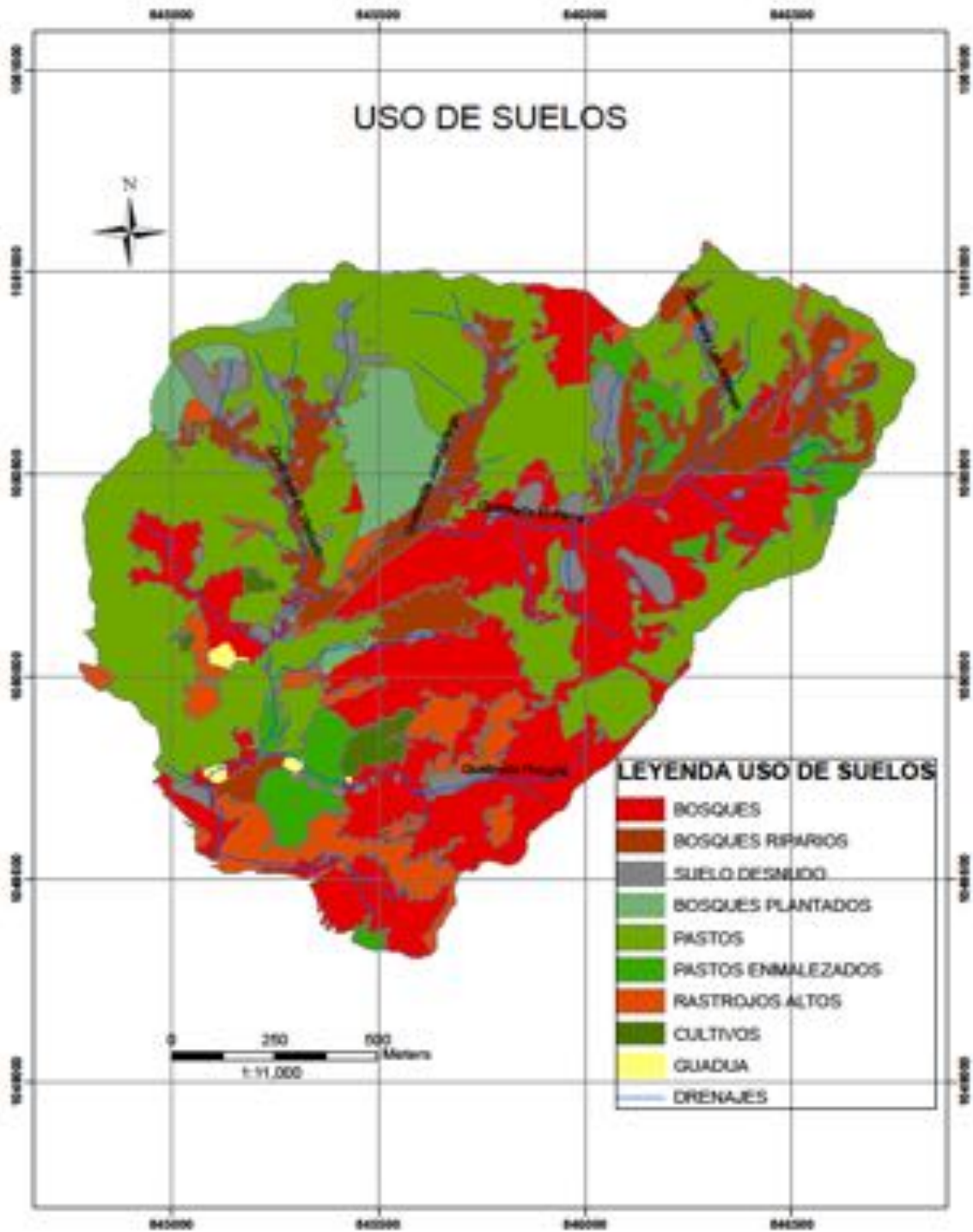


Figura 22. Mapa de usos de suelo cuenca quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009).

11.3 MAPA DE PRECIPITACIONES (ISOYETAS)

Las precipitaciones, en la ciudad de Manizales, presentan una gran variación espacial, las zonas de fuertes pendientes reciben lluvias más abundantes que las zonas de hondonadas y valles, las lluvias en la ciudad obedecen a una distribución temporal armónica de doble onda (bimodal), con períodos intranuales secos y lluviosos definidos, la precipitación promedio anual varía entre 1780 mm y 2090 mm, con máximos de 2757 mm (año más lluvioso) y mínimos de 1548 mm (año más seco). El promedio de días lluviosos al año es de 237; en un 65% del año se presentan precipitaciones (Arango Gartner, 2000).

Existen evidencias muy claras de la relación directa entre el régimen de lluvias y la ocurrencia de deslizamientos, se recomienda tener en cuenta para el análisis la intensidad de la lluvia en una hora, la lluvia de 24 horas y la lluvia antecedente por períodos hasta de tres meses, se pueden diferenciar dos procesos diferentes (Suárez 1998).

11.3.1 Deslizamientos inmediatos por saturación

Estos ocurren durante o inmediatamente después de una lluvia y están relacionados con la eliminación de la succión al producirse la saturación por acción del frente húmedo de infiltración, cuando las lluvias son muy intensas puede llegarse incluso a la saturación completa del talud durante la lluvia.

11.3.2 Deslizamientos diferidos por aumento de presión de poros

Su ocurrencia está relacionada con el régimen de aguas subterráneas, el cual a su vez depende del régimen de lluvias del sitio y de la región, se ha encontrado que existe un lapso de tiempo entre la ocurrencia de las lluvias, el aumento de la presión de poros y los deslizamientos.

La activación de un deslizamiento, puede depender no solamente de la cantidad total de lluvia, sino también de la duración y de la intensidad de la lluvia y del régimen de los periodos lluviosos; existe un valor crítico de lluvia que activa un deslizamiento, pero su cuantificación previa es muy difícil, generalmente los valores por encima del promedio de lluvias son los que generan la mayoría de los problemas, entre más lenta sea la lluvia habrá más infiltración y menos escorrentía, en zonas de pluviosidad moderada las lluvias lentas pueden producir el mayor número de deslizamientos. La proporción escorrentía infiltración, depende de la intensidad de la lluvia, la pendiente, la cobertura vegetal, la permeabilidad del suelo sub superficial y la características de los materiales.

En el análisis de la cuenca de la quebrada el Perro, se relacionan datos de pluviosidad y condiciones climáticas correspondientes a estaciones cercanas, CENICAFE y varias entidades cuentan con diferentes estaciones de este tipo a lo largo del país, ubicándose en la ciudad de Manizales. El IDEA de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, lleva un registro de nuevas estaciones, algunas ubicadas en cercanía de la zona, como es el caso de la Estación Niza, de la cual se muestra una serie de registros de lluvia diaria y mensual desde el año 2011 hasta principios del año 2014 (Tabla 5).

El análisis de los movimientos en masa, está determinado por la relación que existe entre las altas tasas de pluviosidad y la susceptibilidad de los terrenos a la ocurrencia de deslizamientos, aumentando a medida que los regímenes de lluvia aumentan; en la ciudad se tiene registros históricos de procesos denudativos relacionados con altas precipitaciones, como se presentó en el segundo semestre de 2008, donde se reportaron deslizamientos inmediatos por saturación. La susceptibilidad por este tipo de fenómeno, aumenta de acuerdo a la disminución en las coberturas vegetales y la extensión de la pendiente.

11.3.3 Generación del mapa de precipitación

Para la elaboración del mapa de precipitación fue necesario trabajar en Excel creando una tabla de valores de precipitación media anual de cada una de las estaciones, para uso práctico del presente trabajo se recopiló información disponible desde el año 2011 hasta el año 2014 (Tabla 6); luego se procedió a insertar el archivo de Excel a la hoja de trabajo en ArcMap, para poder visualizar estos datos se utilizó la herramienta (Display) la cual permite la referenciar la información de las coordenadas, posteriormente se transformaron los datos a un archivo shapefile para poder crear la interpolación de la información meteorológica, proceso que se realiza exportando los datos y convirtiendo sus características a un gráfico, con la herramienta Data Data/Export.

En el presente trabajo fue necesario la identificación de las estaciones pluviométricas próximas a la zona para realizar un correcto análisis, una vez seleccionada el área general de estudio se procedió a generar un shapefile que englobara las estaciones pluviométricas y la zona de estudio, facilitando la extrapolar datos a zonas distantes, para este proceso se utilizó la herramienta de Arctoolbox / Spatial analyst tools / Interpolation / IDW o la técnica de la distancia inversa ponderada, obteniendo un mapa de precipitación de curvas de isoyetas.

Las isoyetas, son isolíneas que une los puntos en un plano cartográfico, que presentan la misma precipitación en la unidad de tiempo considerada; así, para una misma área, se puede diseñar un gran número de planos con isoyetas, que se utiliza para interpolar y en este caso para hacer un análisis pluviométrico. En una siguiente etapa, se generó un mapa raster reclasificado con valores ponderados que muestran las zonas de menor y mayor intensidad de lluvias por medio de ArcToolBox y su herramienta Spatial Analyst Tools / Reclass / Reclassify, (Figuras 16 y 17).

ESTACIONES METEOROLOGICAS	PREPICIPITACIÓN ANUAL (2011) mm	PREPICIPITACIÓN ANUAL (2012)	PREPICIPITACIÓN ANUAL (2013)	PREPICIPITACIÓN ANUAL (2014)	MEDIAN ANUAL (2011-2014)
YARUMO	3177.8	1820.9	1977.3	1733.6	1899.1
NIZA	2027	1233.6	1694.6	1427.8	1561.2
ENEA	1855.3	1357.3	1671.5	1475.2	1573.35
POSGRADOS	2726.2	1802.8	1988.4	1558.8	1895.6

Tabla 5. Registro acumulado de lluvias anuales; tomado de IDEA (Instituto de Estudios Ambientales (Universidad Nacional Sede Manizales 2011-2014).

CLASIFICACIÓN	PROMEDIO ANUAL (MM/AÑO)	VALOR PESO FACTOR PLUVIOSIDAD
Baja	1690-1760	3
Moderada	1760-1810	5
Alta	1810-1860	7
Muy alta	>1860	9

Tabla 6. Determinación de los valores de peso y rango de susceptibilidad para el factor pluviosidad tomado y modificado de Instituto de Estudios Ambientales (IDEA 2011-2014).

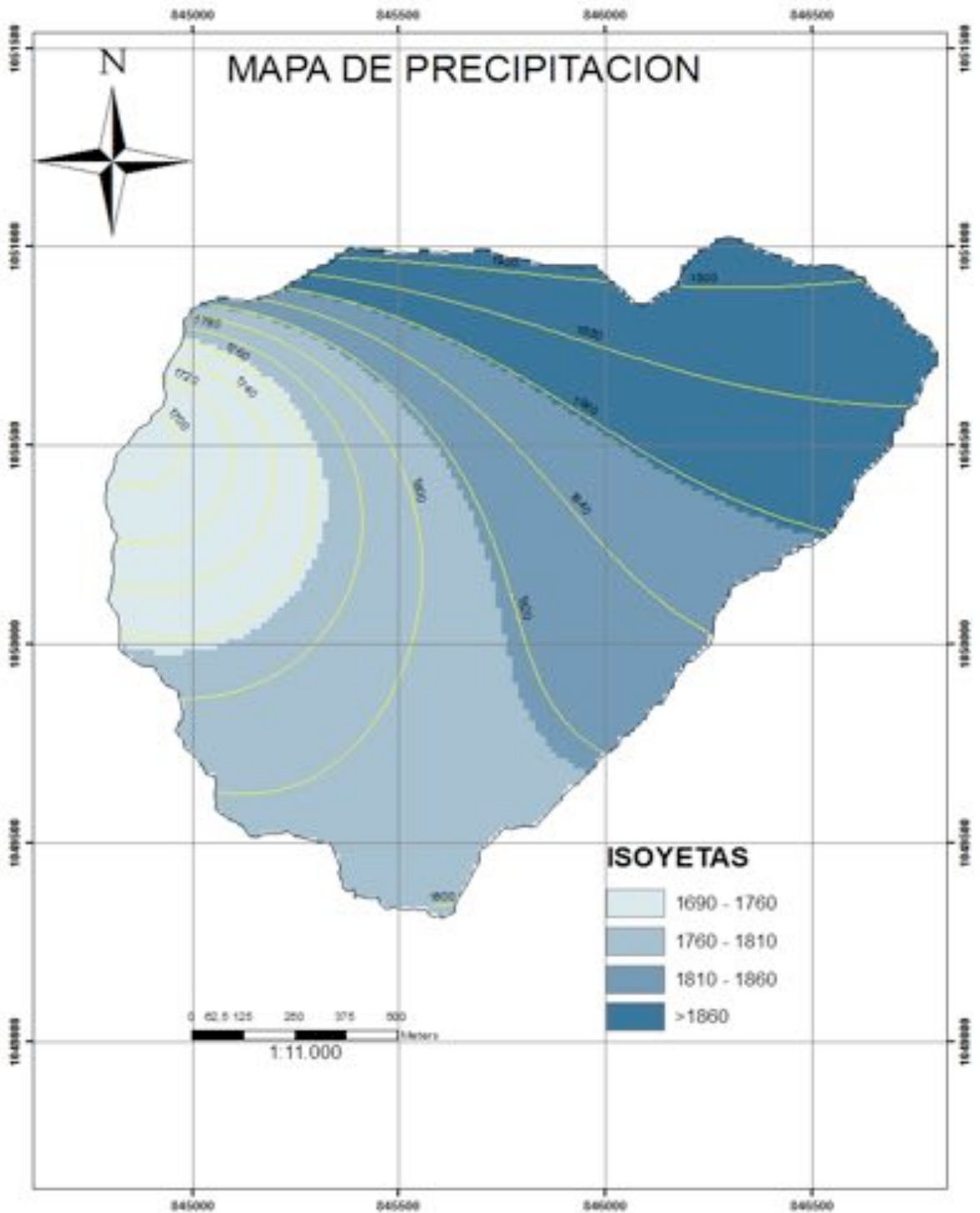


Figura 23. Mapa de precipitación (isoyetas) cuenca quebrada el Perro, digitalizado a partir de datos tomados del Instituto de estudios Ambientales (IDEA).

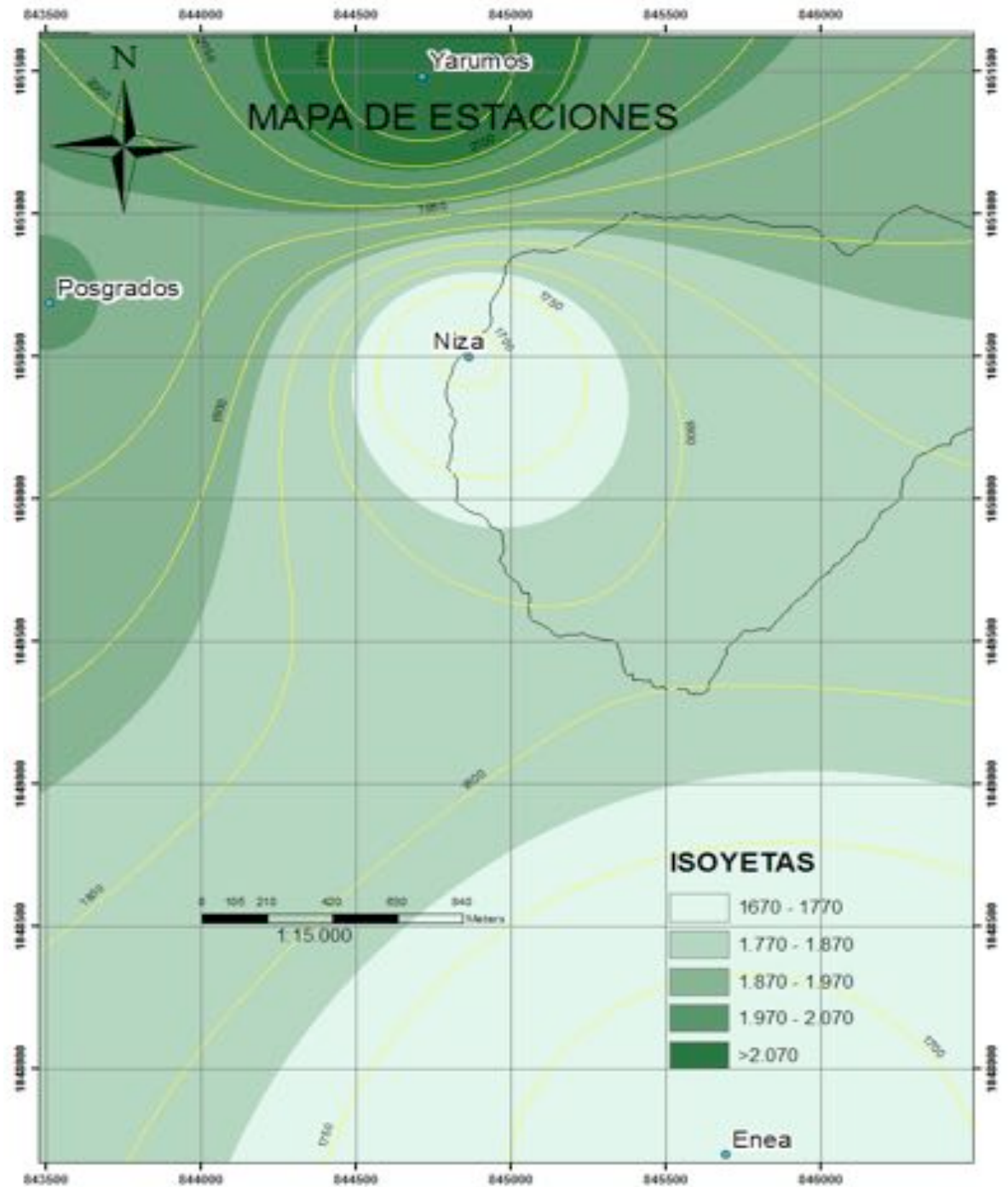


Figura 24. Mapa de estaciones pluviométricas cuenca quebrada el Perro, digitalizado a partir de datos tomados del Instituto de estudios Ambientales (IDEA).

11.4 PENDIENTES

La pendiente topográfica y la altura de las laderas, son factores que condicionan el desarrollo de procesos de deslizamiento, por su contribución a la inestabilidad de los materiales, a mayor pendiente del terreno mayor es el componente de gravedad que actúa en dirección potencial del movimiento, en terrenos homogéneos cada tipo de material tendrá una altura crítica y un ángulo máximo, a partir de los cuales se producirá un desequilibrio gravitacional, siendo posible la rotura, no obstante, en zona muy húmedas, la morfología no tiene que ser necesariamente abrupta para que se generen movimientos en masa.

La mayoría de estudios y autores, consideran que el grado de inclinación influye directamente en la susceptibilidad de las laderas a procesos denudativos, lo que está directamente relacionado con las características del material geológico, la cobertura vegetal y las precipitaciones, que aceleran o disminuyen la ocurrencia de movimientos en masa.

11.4.1 Generación mapa de pendientes

El mapa de pendientes proporciona una idea del relieve de la zona, en cuanto al grado de inclinación, lo que ayuda a determinar qué tan inestable es terreno. Para generar el mapa de pendientes, se debe tener en primer lugar las curvas de nivel, que en este caso se obtienen del modelo digital de elevación de Colombia, descargado de ASTER GDEM.,

A partir de las curvas de nivel insertadas en la hoja de trabajo de ArcMap generamos el TIN, que es una forma de datos geográficos digitales, basado en vectores que se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos) conectados con una serie de bordes para formar una red de triángulos, el

TIN se creó con la herramienta 3D Analyst Tools / Data Management / Tin / Create TIN, posteriormente se procedió a generar un mapa raster con la aplicación 3D Analyst Tools / Conversion / From Tin / Tin to Raster; obteniendo como resultado un modelo digital de elevación expresado en metros.

Ya obtenido el DEM debemos cambiar las unidades del mapa a grados para un mejor análisis, empleando la herramienta Spatial Analyst Tools / Surface – Slope generamos el mapa de pendientes expresado en grados, por último se realizó una reclasificación del mapa para asignarle valores de peso de acuerdo al grado de la pendiente (Tabla 7), para esto se trabajó con la herramienta Spatial Analyst Tools / Reclass / Reclassify, obteniendo el mapa de pendientes reclasificado que al ser combinado con los demás factores servirá para la generación del mapa de susceptibilidad de la zona (Figura 25).

A partir de lo que se observó en la zona se pudo determinar que las áreas de mayor y moderada pendiente, está relacionado con los principales movimientos de masa, esta característica es un factor de importancia, sin discriminar los otros factores u eventos que convergen en el área de estudio.

RANGO	ANGULO DE INCLINACIÓN (grados)	VALOR DE PESO PARAMETROS FACTOR PENDIENTES
Clasificación		
Muy baja	<10°	1
Baja	11°-16°	3
Moderada	17°-22°	5
Alta	23°-29°	7
Muy alta	30°-45°	9

Tabla 7. Determinación de los valores de peso y rango de susceptibilidad, para el factor de pendientes, realizado a partir del modelo de elevación digital del terreno Colombia ASTER GDEM 2014.

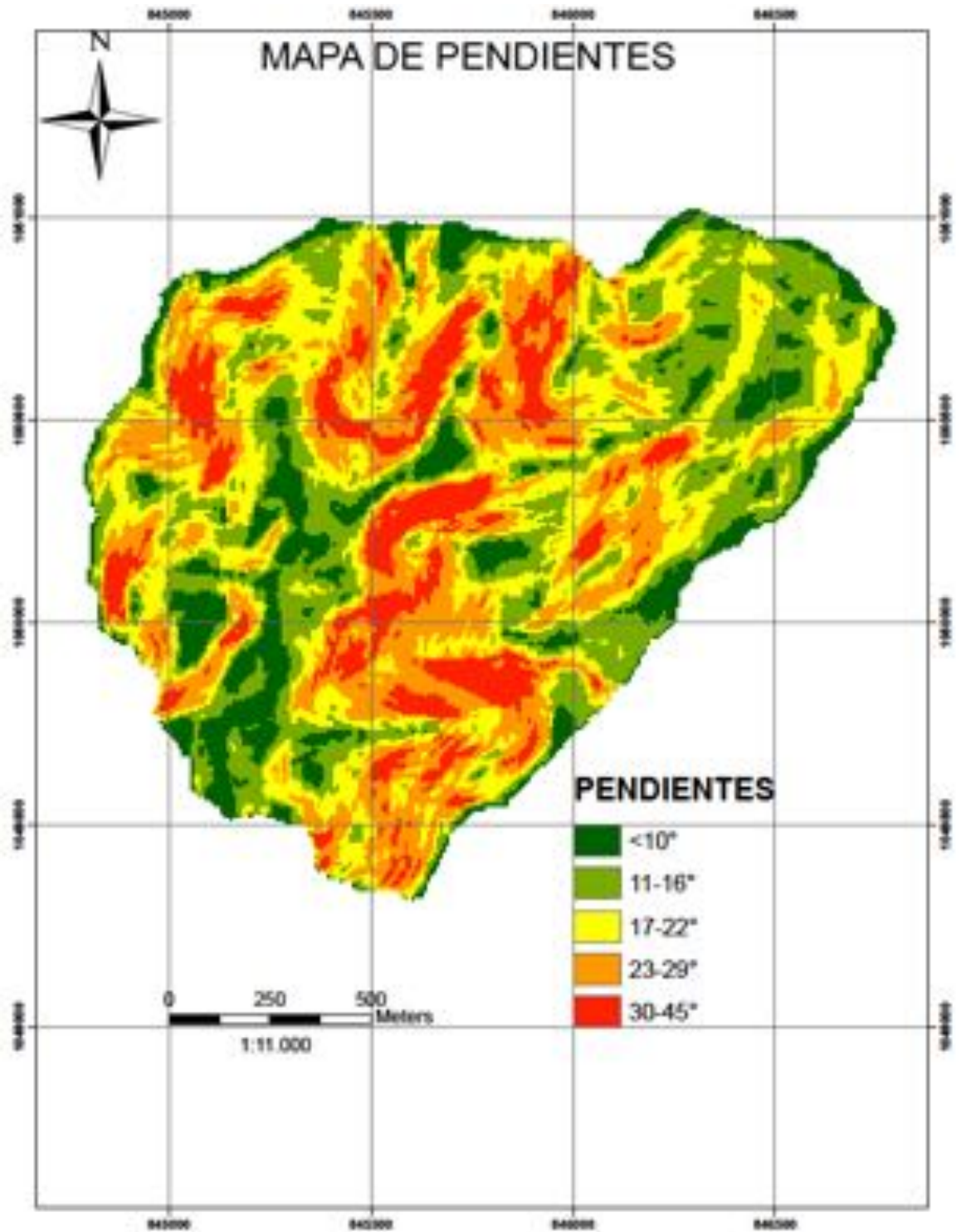


Figura 25. Mapa de pendientes digitalizado a partir del modelo de elevación digital del terreno Colombia ASTER GDEM 2014).

11.5 GEOMORFOLOGIA

11.5.1 La unidad denudacional 1

Corresponde a zonas montañosas con laderas cortas de forma cóncava e inclinaciones de las laderas pendientes a muy pendientes, la cima suele ser aguda a sub redondeada, presentan por lo general drenajes dendríticos con valles en forma de “V” moderadamente incisados.

Los principales procesos denudacionales que afectan esta unidad, están representados por deslizamientos traslacionales en su mayoría, rotacionales reptación y sobrepastoreo. La geología correspondiente a esta unidad son depósitos de caída piroclástica, el cual cubre en forma de manto toda la zona de estudio.

11.5.2 La unidad denudacional 2

Corresponde a una unidad relativamente pequeña ubicada en el sector Noreste de la cuenca, donde se observan colinas bajas con cimas redondeadas, las laderas son cortas y con moderadas pendientes, presentan formas cóncavas y convexas.

Los procesos denudacionales activos que están presentes en esta unidad, corresponden principalmente a erosión en cárcavas y sobrepastoreo, sin embargo, se observan evidencias de procesos antiguos que modelaron el paisaje de esta cuenca, la geología corresponde a depósitos volcánicos de caída piroclástica.

11.5.3 La unidad coluviones de piedemonte

Se localiza en la parte inferior de las laderas del sector oriental, originadas por meteorización y erosión de la unidad denudacional 1. Presenta colinas bajas, de pendientes suaves (4° a 16°). Esta unidad se encuentra afectada por algunos procesos denudacionales tales como erosión en cárcavas y deslizamientos menores (Borrero 2009).

Para este trabajo, se utilizó la información geomorfológica del mapa base de la entidad Corpocaldas de acuerdo a la metodología utilizada por (Borrero 2009), para discriminar cada una de las unidades, dicha información se comprobó y actualizó con recorridos de campo.

11.5.4 Generación del mapa de unidades geomorfológicas

Para la digitalización del mapa de unidades geomorfológicas, se utilizó el programa ArcGis 10,1, se creó un shapefile de cada unidad geomorfológica con sus características; posteriormente se utilizó la herramienta Data Management / Tools / General / Merge, para obtener una sola capa y una tabla de atributos combinada, después del proceso anterior se procedió a reclasificar las unidades geomorfológicas asignándole valores de pesos relativos (Tabla 8), por medio de herramienta Spatial Analyst Tool/ Reclass/ Reclassify, generando así un mapa raster con la clasificación correspondiente (Figura 26).

CALIFICACIÓN	UNIDAD GEOMORFOLOGICA	VALOR PESO FACTOR GEOMORFOLOGIA
Baja	Unidad coluvial de piedemonte	3
Moderada	Unidad denudativa2	5
Alta	Unidad denudativa1	7

Tabla 8. Determinación de los valores de pesos y rango de susceptibilidad para el factor geomorfología (tomado y modificado de Borrero, 2009 y de los informes de Corpocaldas).

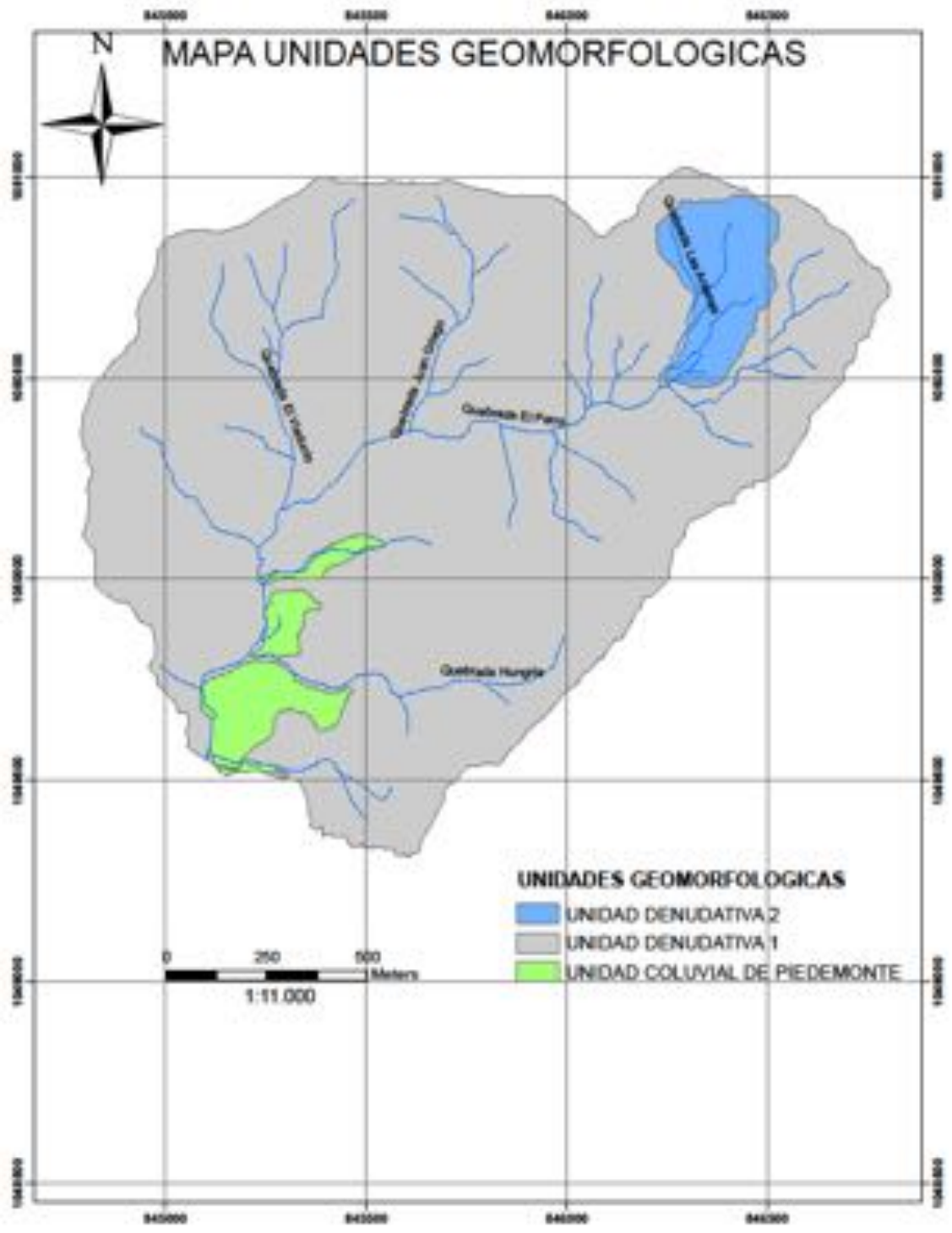


Figura 26. Mapa de unidades geomorfológicas cuenca de la quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009).

11.6 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Para este factor de análisis se consideró la estadística de la generación de movimientos en masa para diferentes periodos de tiempo, la información fue recopilada del informe de Corpocaldas (Borrero, 2009).

11.6.1 Generación del mapa de evolución histórica de los movimientos en masa

Para la digitalización del mapa temático, se utilizó el programa ArcGis 10.1, el cual se realizó mediante la creación de Shape files de forma (polígonos), donde se editó cada área correspondiente y se da a conocer los deslizamientos para cada intervalo de tiempo (Figura 20).

Ya con el mapa digitalizado, se procedió a realizar una comparación con el mapa general de susceptibilidad, observando claramente que la mayor eventualidad de deslizamientos ocurren en los años 2004 a 2009, en determinados meses del año, donde la precipitación es más alta, junto con otras variables directas como es el caso de zonas de pendientes altas, en depósitos no consolidados de caída piroclástica y que son suelos que se utilizan para sobrepastoreo y donde estas características son vulnerables a la ocurrencia de estos eventos de movimientos en masa (Figura 28).

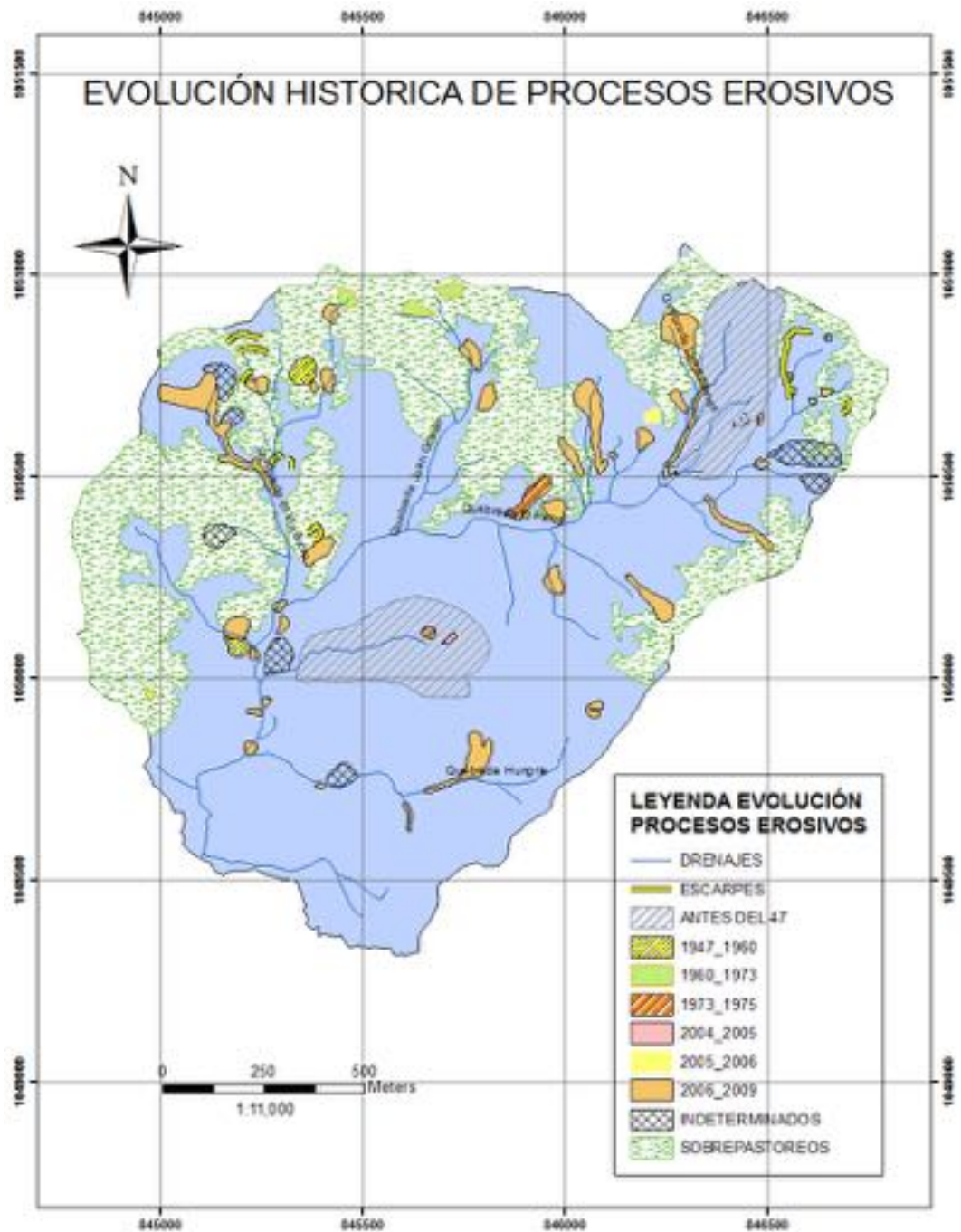


Figura 27. Mapa de evolución histórica de procesos erosivos cuenca de la quebrada el Perro (tomado y modificado de informes técnicos de Corpocaldas, 2009).

12. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.

El desarrollo secuencial y método que se planteó para el resultado y análisis del mapa de susceptibilidad en la cuenca de la quebrada el Perro, objetivo principal del trabajo, tuvo una serie de procedimientos que se describen a continuación.

Mediante un análisis multicriterio, se evaluó y comparó de una manera práctica y analítica, los factores detonantes, mediante el cálculo de una matriz cuadrada en la que se determinó el peso o porcentaje de influencia en la generación de deslizamientos o movimientos en masa en el sector; de esta forma se logró establecer que los factores de mayor importancia son la precipitación, el uso de los suelos y geología.

12.1 GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Una vez obtenidos los mapas raster con sus respectivos códigos o índices de susceptibilidad, de los factores que se consideraron como los principales agentes en la generación de movimientos en masa, se procedió a realizar una suma lineal en una calculadora raster del software arcgis 10.1, mediante la suma ponderada de los factores o agentes que influyen en la zona, por medio de la herramienta Spatial Analyst Tools / Map Algebra / Raster Calculator; de esta manera el software calculó y generó un mapa temático donde se puede visualizar los rangos de susceptibilidad (Baja, moderada, alta y muy alta; Figura 28).

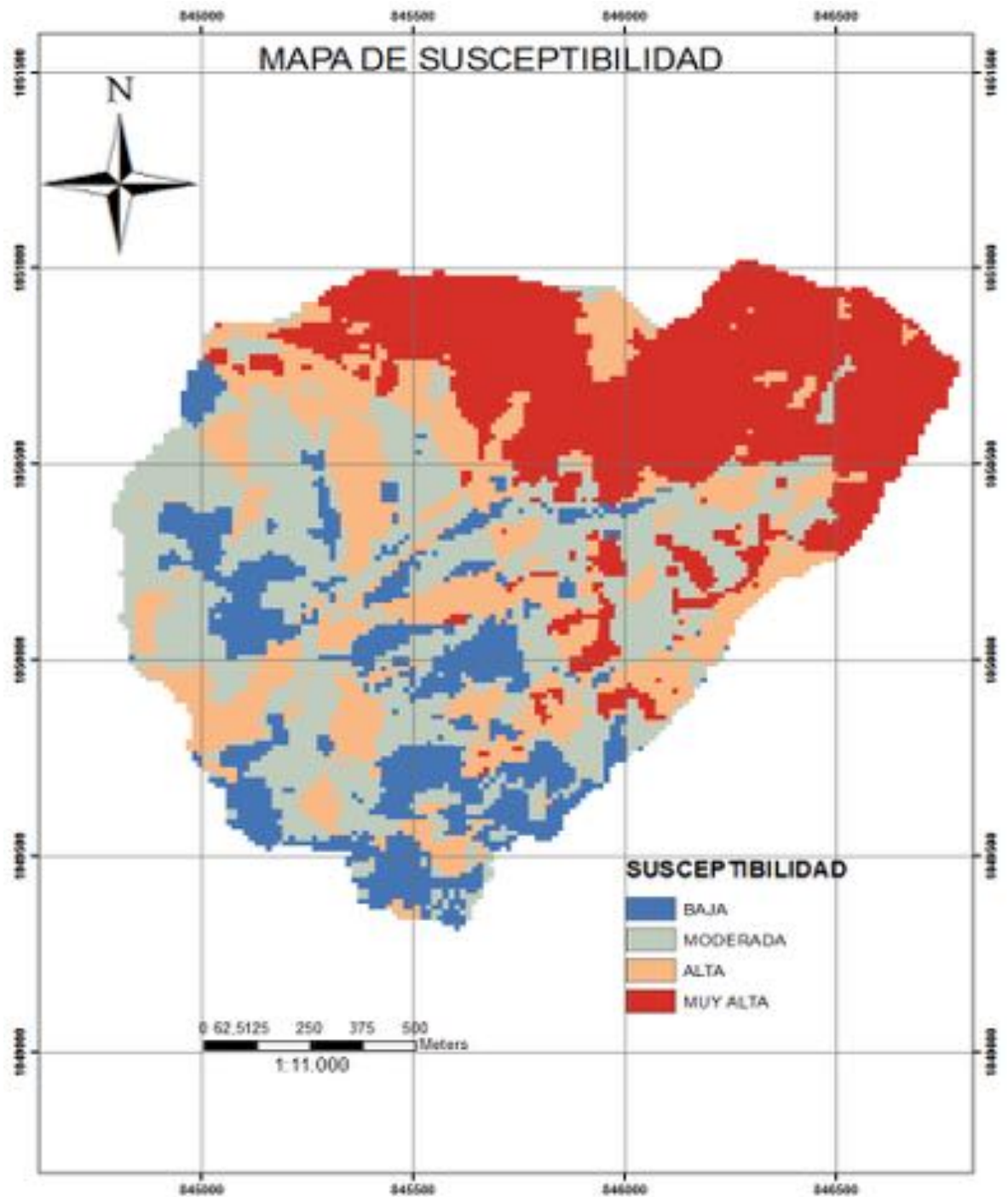


Figura 28. Mapa de susceptibilidad cuenca quebrada el perro, obtenido a partir de la metodología empleada.

13. COMPARACIÓN DEL MAPA DE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE MOVIMIENTOS EN MASA CON EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Para validar la información obtenida, se realizó una comparación del mapa de susceptibilidad con los deslizamientos generados en los años 2004 a 2009, tiempo en el cual se presentó la mayor cantidad de deslizamientos, como se puede observar en la (Figura 22). Los resultados muestran una relación lógica, en la que la mayor cantidad de deslizamientos generados en este intervalo de tiempo, se localizan en las zonas de moderadas, altas a muy altas susceptibilidades.

Como datos histórico hay que tener en cuenta que los procesos denudativos en la cuenca se han incrementado considerablemente ya que se presenta una diferencia muy notoria en cuanto a el aumento de la inestabilidad presentado en el entre los años 2004 a 2009, donde el grado de susceptibilidad alta comprendía una zona relativamente extensa de la cuenca, pero comparado con el mapa generado en este trabajo se puede apreciar que el grado de susceptibilidad alto aumento en cuanto a su extensión evidenciando los graves problemas de inestabilidad presentes en la zona.

Las zona de mayor susceptibilidad de la cuenca es el área norte, ya que refleja la cantidad considerable de movimientos en masa y procesos erosivos; estos eventos no son de menos interés en el sector este-oeste donde el rango de susceptibilidad es medio a alto y los agentes denudativos son notorios, el sector inferior o sur de la cuenca en su mayoría presenta un rango de susceptibilidad medio a bajo, pero se ve afectada por la acumulación de sedimentos repentinos trasportados por los flujos provenientes de la parte alta de la cuenca, los principales factores que interactúan en la cuenca generando la inestabilidad son las altas precipitaciones de lluvia que se precipitan en intervalos de cortos tiempo,

así como las zonas de contacto entre los depósitos de caída volcánica y complejo Quebradagrande, las altas a moderadas pendientes y la intervención antrópica.

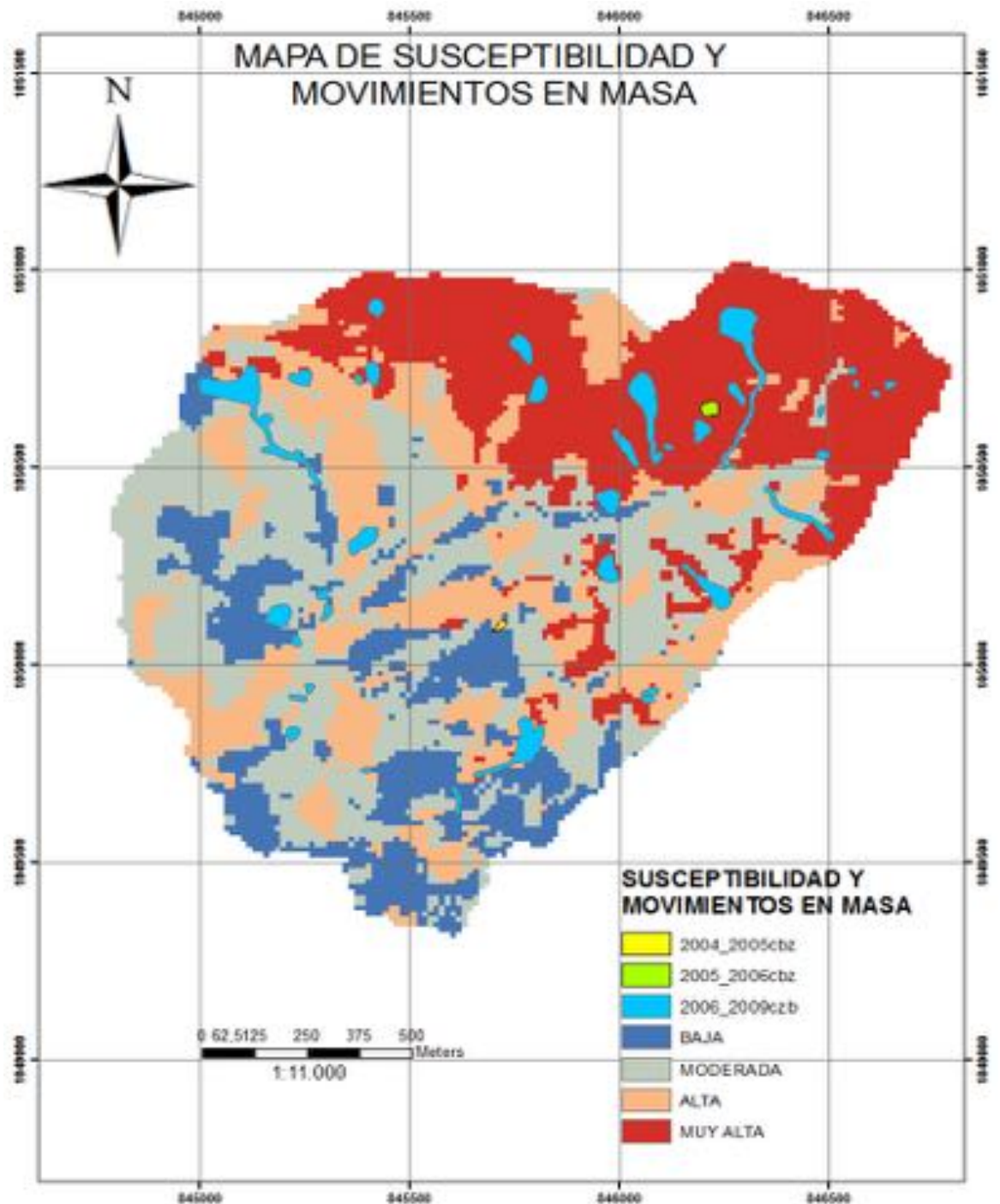


Figura 29. Mapa de susceptibilidad obtenido y movimientos en masa generados entre los años 2004 a 2009, en la cuenca de la quebrada el Perro, digitalizado y actualizado a partir de datos tomados en campo e información de Corpocaldas (2009).

14. CONCLUSIONES.

- Con la información recopilada de entidades como Corpocaldas, Alcaldía de Manizales y el IDEA y con la actualización de la información obtenida en campo, se logró realizar una evaluación previa de la zonificación general de riesgos por movimientos en masa de la cuenca de la quebrada el Perro.
- La mayoría de deslizamientos observados en la zona de estudio son de tipo planares, los cuales presentan una superficie de contacto o zona de debilitamiento entre los depósitos de caída piroclástica y la unidad sedimentarias del complejo Quebradagrande.
- El continuo cambio de la cobertura vegetal, genera una mayor inestabilidad en la zona, ya que se han cambiado áreas de bosques primarios con desarrollo radicular por pastos que sirven como zonas de sobrepastoreo ocasionando una mayor erosión y inestabilidad de la superficie.
- Según el análisis de la información recopilada y el estudio realizado, se determinó que a través del tiempo, el factor que más influye de la inestabilidad en la zona es la precipitación, ya que cuando se presenta, tiene como características una frecuencia y magnitud considerables, aumentando el riesgo de inestabilidad y posible generación de movimientos repentinos de masa.
- Con los datos recopilados, almacenados e interpretados, se logró crear una base de información espacial, que sirvió para procesar y generar el mapa de susceptibilidad de la zona, permitiendo brindar observaciones y recomendaciones más apropiadas a la problemática de inestabilidad.
- Mediante el cálculo y ponderación de la suma de mapas temáticos, en formato raster de los factores condicionantes en la generación de movimientos en masa, como son precipitación, usos de suelos, pendientes, geología y geomorfología; se

realizó el mapa de susceptibilidad, de acuerdo a la información procesada y digitalizada en el software Arcgis 10.1.

- De acuerdo al método de análisis multicriterio utilizado, se logró establecer que las variables o factores de mayor ponderación e incidencia en la generación de movimientos en masa en la cuenca de la quebrada el Perro, son la precipitación, uso de suelos y geología.

- El modelo SIG de la cuenca de la quebrada el Perro, sirvió para analizar diferentes variables de inestabilidad y a su vez generar una estructura firme y real de las condiciones de susceptibilidad de la zona de estudio, que son de suma importancia en el análisis de riesgo por movimientos en masa.

- La creación de la base de datos se constituyó con la información obtenida y los mapas temáticos que se generaron en ArcGis, con sus correspondientes coordenadas, área y características, que a su vez fueron exportadas y almacenadas en un motor de base de datos (MySQL), para posteriormente visualizarla a través de un geoportal.

- Logrando utilizar la información recolectada y analizada se implementó la visualización del geoportal con todos los datos de los polígonos con sus áreas respectivas en metros cuadrados, la georreferenciación de los datos en la zona exacta del estudio, y sus respectivos atributos de identificación de cada shape haciendo al geoportal un sitio web que especifica de manera detallada los resultados de la susceptibilidad de la cuenca quebrada el perro.

15.RECOMENDACIONES.

- Es importante actualizar la información cierto periodo de tiempo ya que la susceptibilidad depende de sus factores condicionantes y el periodo que influyen sobre la superficie terrestre.
- Es importante tener una visualización de la información que se quiere dar a conocer con datos espaciales precisos y bien detallados, de esta manera se generan mapas en ArcGis confiables y de fácil entendimiento para mostrarlo a diversos usuarios.
- La información del geoportal es una herramienta que ayuda a la divulgación de datos geográficos por esta razón se debe observar detenidamente los resultados aquí expuestos para que sea un punto de partida a futuros estudios en la cuenca quebrada el Perro.

BIBLIOGRAFÍA.

ARANGO GARTNER. David. Relaciones lluvias – deslizamientos y zonificación geotécnica en la comuna dos de la ciudad de Manizales: Medellín. 2000.135p. Trabajo de grado (Especialista en Recursos Hídricos). Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de minas.

ARISTIZÁBAL. Edier. MARTÍNEZ. Hernán. VÉLEZ. Jaime, Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 34 (131): 209-227, 2010. ISSN 0370-3908.

BRABB, E.E. and HARROD, B.L. 1989: Landslides: extent and economic significance. Proceedings of the 28th International Geological Congress: Symposium on Landslides. Washington DC.

BORRERO. Carlos. Caracterización geológica y geomorfológica de la cuenca quebrada el Perro ubicada al oriente de Manizales. Manizales: 2009.168 p.

BOSQUE, GONZALES. I. Las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) y el patrimonio histórico. Unidad de SIG del Centro de Ciencias Humanas y Sociales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CCHS-CSIC). 2011 3p. Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/37802/1/IDE%20y%20Patrimonio_Del%20Bosque_Vicent.pdf.

EASTMAN, J.R., Jin, W., KYEM, P.A.K. y TOLEDANO, J. (1995). "Raster procedures for multicriteria/ multi-objective decisions". Photogrammetric Engineering. & Remote Sensing, Vol. 61, 539-547.

GREGORIO. José. Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. En: Revista Geográfica Venezolana, Vol. 48 (2) 2007, 183-219.

HERVÁS. Javier. BARREDO. José. Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, teledetección y métodos de evaluación Multicriterio. Aplicación al barranco de Tirajana (Gran Canaria). En: V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. (Madrid, 27 - 30 Noviembre 2001). 12p.

IDEA. Instituto de estudios ambientales de la universidad Nacional de Colombia sede Manizales; <http://idea.manizales.unal.edu.co/>.

MONTAÑA SALAS. Julián. MORALES OBANDO. Juan. Estudio geológico-estructural de la falla el Perro al este de la ciudad de Manizales. Manizales, 2000. 97 p. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas. Programa de Geología.

MOYA, HONDUVILLA, J. BERNABÉ POVEDA, M.A. MANRIQUE SANCHO, M.T. La usabilidad de los geoportales: Aplicación del Diseño Orientado a Metas (DOM). Grupo de Investigación Mercator – UPM ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía Campus Sur, Autovía de Valencia, km 7,5. 2011. 13p. Disponibles en: [http://latingeo.upm.es/intranet/CCD/Lists/DI_Publicaciones/Attachments/106/La%20usabilidad%20de%20los%20geoportales_Aplicaci%C3%B3n%20del%20Dise%C3%B1o%20Orientado%20a%20Metas%20\(DOM\).pdf](http://latingeo.upm.es/intranet/CCD/Lists/DI_Publicaciones/Attachments/106/La%20usabilidad%20de%20los%20geoportales_Aplicaci%C3%B3n%20del%20Dise%C3%B1o%20Orientado%20a%20Metas%20(DOM).pdf).

ROCA, SANXIAO, P, CRESPO, G, MARTINEZ. La EIEL y los Geoportales: Cómo poner la información a disposición de la ciudadanía. 2010. 14p. Disponible en: http://www.sigte.udg.edu/jornadassiglibre2012/uploads/articulos_12/art13.pdf.

SAATY. Thomas. (1980). Multicriteria decisión making. The analytic hierarchy process. Volume I. AHP Series. McGrawHill. New York, NY. Internet. 17 July 1989. xiv + 385 pp. 38.50 cloth.

SAATY, Thomas. (1994). "Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process"; RWS Publications, Pittsburgh. Internet.

SEGURA. Gustavo. BADILLA. Elena, OBANDO. Luis. Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. Costa Rica: 2011. 21p.

SUAREZ DIAZ. Jaime. Mecanismos de activación de deslizamientos en ambientes tropicales. Bucaramanga: 1998. 14 p. EN: BRABB E.E., HRROD B.L. (1989). "Landslides: Extent and economic significance": Proc., 28th International Geological Congress: Symposium on landslides, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands, 385 p.

SUAREZ DIAZ. Jaime. Mecanismos de activación de deslizamientos en ambientes tropicales. Bucaramanga: 1998. 14 p.

SUAREZ DIAZ. Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: 1998. 550 p.

VARNES D.J. (1958). Landslides types and processes. Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.

VARNES D.J. (1978). Slope movement types and processes. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.