

Zonificación de la Susceptibilidad por Movimientos Tipo Deslizamiento y Flujo no Canalizado a
Escala 1:25.000 para la Cuenca del Río Frío, municipio de Floridablanca, Santander.

Andrés Felipe Ronderos Chaparro

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

Director

Joaquín Andrés Valencia Ortiz

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A Dios por permitirme continuar mis estudios en los momentos en que ni yo mismo pensé que podría llegar a culminarlos.

A mi mamá por ser la única persona que nunca dudo de mi a lo largo de la carrera y siempre hizo hasta lo imposible por apoyarme pese a las adversidades que tuvimos que afrontar como familia. Su esfuerzo, amor y sacrificio sembraron en mi la voluntad de seguir adelante pese a cualquier contrariedad.

Andrés Felipe Ronderos Chaparro

Agradecimientos

A mis abuelos y a mi hermana por estar conmigo, darme palabras de aliento y motivarme a continuar con el proyecto en los momentos difíciles del mismo.

Al profesor Joaquín Andrés Valencia por el seguimiento y guía especialmente en la etapa final de este proyecto.

A mi tío Jorge Leonardo Chaparro por hacer el papel de ejemplo, tutor, consejero y amigo aun cuando su tiempo siempre ha sido tan limitado.

A mis amigos y algunos futuros colegas quienes de manera directa o indirecta en algún momento del proceso fueron de ayuda para mí.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander por brindarme una educación y especialmente un espacio donde no tuvo lugar simplemente una formación académica, sino una con conciencia social y autonomía personal.

Andrés Felipe Ronderos Chaparro

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Planteamiento del Problema	16
2. Justificación	19
3. Objetivos	21
3.1 Objetivo General.....	21
3.2 Objetivos Específicos.....	21
4. Marco de Referencia.....	22
4.1. Localización.....	22
5. Marco Teórico.....	24
5.1 Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa a Escala 1:25.000.....	24
5.1.1 Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento	25
5.1.2 Susceptibilidad por Movimientos en Masa tipo Flujo no Canalizado	26
5.2 Antecedentes.....	27
5.3 Marco Geológico Regional.....	30
5.3.1 Estratigrafía.....	30
5.3.2 Geología estructural.....	33
5.3.3 Geomorfología.....	35

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	5
6. Metodología	36
6.1 Fase 1. Recopilación de Información Secundaria.....	37
6.2 Fase 2. Análisis de la Información y Fotointerpretación	38
6.3 Fase 3. Comprobación y Análisis de Campo	39
6.4 Fase 4. Procesamiento de los Datos Adquiridos en Campo y Alistamiento de las Variables Temáticas Para Modelación de Susceptibilidad	40
6.5 Fase 5. Elaboración del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 en la parte alta de la cuenca del Río Frío	40
6.5.1 Análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado	41
6.6 Fase 6. Ajuste y Validación del Modelo	41
7. Resultados	42
7.1 Caracterización Geoambiental	42
7.1.1 Inventario de Procesos Morfodinámicos	43
7.1.1.1 Información Secundaria.....	43
7.1.1.2 Inventario Geomorfológico:.....	46
7.1.2 Factores Condicionantes	51
7.1.2.1 Capa de subunidades Geomorfológicas:.....	51
7.1.2.2 Capa de Unidades Geológicas Superficiales.....	65
7.1.2.3 Capa de Variables Geométricas.....	80
7.2 Análisis de Susceptibilidad por Movimientos en Masa.....	81
7.2.1 Susceptibilidad por Movimientos en Masa Tipo Deslizamiento y Tipo Flujo (Método Estadístico Bivariado WofE)	81

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

6

8. Conclusiones	99
9. Recomendaciones	102
Referencias Bibliografía	103

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Ejemplos de movimientos en masa recientes ocurridos en Floridablanca</i>	19
Tabla 2. <i>Métodos de Análisis Propuesto para cada tipo de Movimiento en Masa,</i>	25
Tabla 3. <i>Listado de Movimientos en Masa de la Zona de Estudio Recopilados mediante Fuentes de Información Secundaria.</i>	45
Tabla 4. <i>Listado de las Subunidades Geomorfológicas Cartografiadas y su Respectiva Área en la Cuenca</i>	53
Tabla 5. <i>Listado de las Unidades Geológicas Superficiales Cartografiadas con su Respectiva Área en la Cuenca.</i>	65
Tabla 6. <i>Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (Verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos Dentro de la Variable de Pendientes.</i>	86
Tabla 7. <i>Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos dentro de la Variable SGMF.</i>	87
Tabla 8. <i>Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos dentro de la Variable UGS.</i>	89
Tabla 9. <i>Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos dentro de la Variable Curvatura.</i>	90

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Localización del Área de Estudio</i>	22
Figura 2. <i>Vista Satelital del Área de Estudio</i>	24
Figura 3. <i>Clasificación de los Métodos para el Análisis de Susceptibilidad</i>	27
Figura 4. <i>Cuenca de Estudio Utilizando las Categorías Usadas en el Mapa de Susceptibilidad General por Movimientos en Masa Escala 1:100.000 por el SGC 2015</i>	29
Figura 5. <i>Columna Generalizada de la Zona de Estudio según las Fuentes Consultadas</i>	33
Figura 6. <i>Mapa Geológico Escala 1:100.000</i>	34
Figura 7. <i>Mapa de unidades geomorfológicas escala 1:100.000 usado como insumo en el proyecto de zonificación de amenaza por movimiento en masa del SGC 2015</i>	36
Figura 8. <i>Esquema Metodológico del Proyecto de Investigación</i>	37
Figura 9. <i>Mapa de Estaciones seguidas Durante los 6 días de la Campaña de Campo</i>	39
Figura 10. <i>Diagrama Explicativo del Proceso de Entrega de Resultados que Finaliza con la Zonificación de la Susceptibilidad</i>	43
Figura 11. <i>Diagrama Ilustrativo del Porcentaje de Movimientos en Masa en la Zona de Estudio</i>	46
Figura 12. <i>Diagrama Ilustrativo de la Cantidad de Movimientos en Masa por Vereda en la Zona de Estudio</i>	47

Figura 13. <i>Ejemplos de Deslizamientos Encontrados en el Área de Estudio</i>	49
Figura 14. <i>Ejemplos de Flujos no Canalizados en el Área de Estudio</i>	50
Figura 15. <i>Ejemplo de Movimiento en Masa Tipo Deslizamiento y Caída Encontrada al Margen Izquierdo de la Carretera.</i>	51
Figura 16. <i>Diagrama ilustrativo del porcentaje de subunidades geomorfológicas por tipo de ambiente en el área de estudio</i>	52
Figura 17. <i>Mapa Final de Subunidades Geomorfológicas a Escala 1:25.000 para la Cuenca del Río Frío</i>	54
Figura 18. <i>Geoformas controladas en campo donde en A) se observa un lomo denudado de longitud baja (Dldebc) y un cerro denudado (Dce) y en B) se observa una ladera ondulada muy abrupta (Dloma)</i>	56
Figura 19. <i>Control de la Geomorfología en Campo 2</i>	57
Figura 20. <i>Control de la Geomorfología en Campo 3</i>	60
Figura 21. <i>Control de la Geomorfología en Campo 4</i>	61
Figura 22. <i>Geoformas Fluviales ubicadas en Puente Rojo sobre el Río Frío correspondientes a Llanura de Inundación (Fpi) y Escarpe de Terraza Aluvial (Ftae)</i>	63
Figura 23. <i>Geoforma de origen Antrópico Ladera Explanada (Ale) ubicada en la Vereda Casiano</i>	64
Figura 24. <i>Diagrama ilustrativo que muestra el porcentaje de los materiales presentes en la cuenca del Río Frío</i>	65
Figura 25. <i>Mapa final de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) a escala 1:25.000 para la cuenca del Río Frío</i>	66

Figura 26. <i>Fotografías de Rocas de Calidad Mala de la Cuarzomonzonita la Corcova (Rmcmc)</i>	68
Figura 27. <i>Fotografías de Rocas de Calidad Mala del Neis de Bucaramanga (Rmnb)</i>	69
Figura 28. <i>Fotografías de Rocas de Calidad muy Mala del Neis de Bucaramanga (Rmmnb)</i>	71
Figura 29. <i>Fotografías de Rocas de Calidad muy Mala del Ortoneis de Bucaramanga (Rmmonb)</i>	72
Figura 30. <i>Fotografías de Rocas de Calidad Regular de la Cuarzomonzonita la Corcova (Rrcmc)</i>	73
Figura 31. <i>Fotografías del Suelo Residual de la Cuarzomonzonita la Corcova (Srcmc)</i>	74
Figura 32. <i>Fotografías del Suelo Residual del Ortoneis del Bucaramanga (Sronb)</i>	76
Figura 33. <i>Fotografía Del suelo Residual del Neis de Bucaramanga (Srn)</i>	77
Figura 34. <i>Fotografía del Suelo Transportado Aluvial (Stal) donde se Observan parte de sus Características a lo Largo del Cauce Alto del Río Frío</i>	78
Figura 35. <i>Fotografía del Suelo Transportado Aluvial de Terraza (Stat)</i>	79
Figura 36. <i>Mapa de Landslide Susceptibility Index (LSI) para la cuenca del Río Frío</i>	92
Figura 37. <i>Curva de Validación y Éxito para el Modelo de Susceptibilidad por Deslizamientos y Flujos no Canalizados</i>	93
Figura 38. <i>Mapa final de Susceptibilidad por Deslizamientos y Flujos no Canalizados Reclasificado en 4 Categorías para la Cuenca del Río Frío</i>	95

Listado de apéndices

Apéndice A. Mapa de inventario de procesos morfodinámicos

Apéndice B. Mapa de subunidades geomorfológicas

Apéndice C. Mapa de unidades geológicas superficiales

Apéndice D. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa

Apéndice E. Libreta, formatos y fotos de campo

Resumen

Título: Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 para la cuenca del río frío en su parte alta, municipio de Floridablanca, Santander*

Autor: Andrés Felipe Ronderos Chaparro**

Palabras Clave: Cuenca Río Frío, Santander, Colombia.

Descripción: Este proyecto de investigación se centra en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado, el cual proporciona una herramienta importante de prevención y evaluación en materia de geoamenazas y a su vez, un insumo importante para los planes de ordenamiento territorial municipales en Colombia.

El objetivo principal de la investigación fue realizar una delimitación de las zonas susceptibles a movimientos en masa en la parte alta de la cuenca del Río Frío (4658 ha), la cual está ubicada principalmente en la zona rural del municipio de Floridablanca. El análisis se realizó siguiendo los lineamientos de la “Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25.000” propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el 2017, la cual plantea el método estadístico bivariado de pesos de evidencia para el análisis de los tipos de movimientos en masa mencionados.

En este informe se presenta la caracterización geoambiental desde el punto de vista del Inventario de Procesos Morfodinámicos (IPM), Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y Subunidades Geomorfológicas (SGFM). La susceptibilidad se distribuye en la cuenca en 5 categorías: Muy alta con 0,54%, Alta con el 57,22% ocupando la mayor parte del territorio, Media con el 20,1% y finalmente Baja con el 22,14%, donde predominan geoformas denudacionales como cerros denudados sobre rocas de muy mala calidad del neis de Bucaramanga y suelos residuales de los esquistos del Silgará.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, Geólogo

Abstract

Title: Zoning of susceptibility due to mass movements at a scale of 1: 25,000 for the Río Frío basin in its upper part, municipality of Floridablanca, Santander*

Author: Andrés Felipe Ronderos Chaparro**

Key Words: Río Frío basin, Santander, Colombia.

Description: This research project focuses on the analysis of susceptibility due to landslide-type mass movements and non-channelized flow, which provides an important tool for prevention and evaluation of geo-hazards and, in turn, an important input for municipal land use plans. In Colombia.

The main objective of the research was to define the areas susceptible to mass movements in the upper part of the Río Frío basin (4658 ha), which is located mainly in the rural area of the municipality of Floridablanca. The analysis was carried out following the guidelines of the "Methodological Guide for Zoning Hazards by Mass Movements at a scale of 1:25,000" proposed by the Colombian Geological Service (SGC) in 2017, which proposes the bivariate statistical method of evidence weights for the analysis of the types of mass movements mentioned.

This report presents the geoenvironmental characterization from the point of view of the Inventory of Morphodynamic Processes (IPM), Superficial Geological Units (UGS) and Geomorphological Subunits (SGFM). The susceptibility is distributed in the basin in 5 categories: Very high with 0.54%, High with 57.22% occupying most of the territory, Medium with 20.1% and finally Low with 22.14%, where denudational geofoms predominate, such as denuded hills on rocks of very poor quality from the Bucaramanga neis and residual soils from the Silgará schists.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Geology. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, Geologist

Introducción

Durante las últimas décadas, la prevención de desastres naturales y la gestión del riesgo han tomado un papel fundamental al momento de hablar de planeación territorial. A nivel mundial, los análisis de susceptibilidad por movimientos en masa se han articulado lentamente como estudios fundamentales no solo para prevención de desastres sino para planeación del territorio y asignación de espacio para obras en grandes urbes o pequeñas ciudades (Bathrellos, 2012). Entre las diferentes amenazas de tipo geológico que se toman en cuenta para la construcción de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) en Colombia, los movimientos en masa se mencionan como algunos de los más frecuentes y dañinos. A lo largo del país se ha determinado que al menos el 8% de la población está bajo amenaza media o alta en materia de movimientos en masa, solo “entre 2000 y 2009 se han registrado 9270 eventos desastrosos de los cuales su mayoría corresponden a inundaciones y deslizamientos” (Banco Mundial, 2012). En Floridablanca, municipio de Santander, según información verificada en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA, SGC, s. f <https://simma.sgc.gov.co>), existe una ocurrencia de eventos casi anual que no cesa desde hace más de una década y que se han visto potenciados principalmente por eventos de lluvias intensas.

Debido a las pérdidas, tanto humanas como en costos que han dejado este tipo de eventos y la necesidad de realizar estudios con un mayor nivel de detalle, utilizando metodologías estandarizadas y efectivas, este proyecto de investigación busca hacer un análisis de la susceptibilidad en la parte alta de la cuenca de aporte de uno de los afluentes más importantes de Floridablanca, como lo es el Río Frío. Esta cuenca es especialmente problemática dado que toma

parte de 5 de las 8 veredas de Floridablanca y parte de su casco urbano, esto se traduce en que muchos de los deslizamientos en dichas veredas hacen parte de los eventos que se dan en la cuenca, como por ejemplo los ocurridos en las veredas Helechales y Aguablanca (Vanguardia, 2011).

Este estudio permite actualizar el conocimiento acerca de la ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado en esta área, aplicando la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) que actualmente sirve de referente nacional.

1. Planteamiento del Problema

A nivel mundial, el cambio climático ha causado múltiples estragos. Eventos a gran escala son lo que más preocupan a la comunidad científica dado que no se trata solo de un cambio en la media de temperatura, sino un aumento en la frecuencia de eventos extremos asociados a una variabilidad climática que señala la existencia de un gran problema (Katz & Brown, 1992). Localizando un poco mejor esta problemática, las afectaciones que tienen esta variabilidad climática se relaciona con la influencia térmica del océano pacífico, esto en Colombia está asociado con el fenómeno conocido como El Niño- Oscilación del Sur (ENOS), el cual “se manifiesta con variaciones anómalas de la presión atmosférica (Oscilación del Sur) y de la temperatura en la superficie del mar (El Niño - fase cálida o La Niña-fase fría) en el océano Pacífico” (Orozco & Escobar, 2008). Esta gran variación climática que genera periodos de tiempo en los que la precipitación aumenta drásticamente, significa también un aumento en fenómenos que se ven influenciados por el clima, tal es el caso de los Movimientos en Masa (MM).

A nivel regional, los MM representan una amenaza media del 71% en el departamento de Santander y un 29% de amenaza alta según el mapa nacional de amenaza por MM escala 1:100.000 de la plancha 109 Rionegro (SGC, 2015), dentro de los municipios que se encuentran en amenaza media y alta se encuentra Floridablanca, municipio donde se plantea el presente proyecto y que, como es notable en la región, ha presentado problemas con este tipo de amenazas geológicas.

En el municipio de Floridablanca, si bien no se tiene una gran cantidad de antecedentes oficiales de estos fenómenos en un margen de tiempo extenso, en los últimos años han tenido un aumento sustancial, la mayoría de los ejemplos se presentan luego de la ola invernal del 2010, año en el que se declaró alerta naranja en el municipio (Vanguardia, 2010). Estadísticamente los eventos han aumentado en la zona, esto es comprobable en la plataforma SIMMA del SGC, la cual reporta en su catálogo 15 eventos después del 2010 contra 8 en el periodo de 2000 a 2010. Por otro lado, mediante la herramienta de Desinventar de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (UNDRR), se tienen registros que indican no solo el aumento en muertos y daños a estructuras derivadas de los movimientos en masa, sino también un número mayor de muertes en el registro histórico del municipio de Floridablanca, también, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), asegura gracias a su recopilación histórica de eventos que, Santander es el sexto departamento con más incidentes relacionados a movimientos en masa con un total de 785 registros importantes en los últimos 100 años. Dicho esto, se ve una creciente necesidad de realizar una actualización en el registro de movimientos en masa en el municipio, además de una periódica revisión a la zonificación de la susceptibilidad pues, así como una extensa ola invernal u otros factores condicionantes y detonantes pueden reactivar antiguos eventos, como, también se pueden generar otros nuevos.

Desde el 2020 se ha registrado un aumento en la cantidad y afectación de eventos asociados a movimientos en masa (Tabla 1), los cuales han tenido diferentes afectaciones en todo el municipio de manera directa como es el caso de los deslizamientos en asentamientos humanos como Asomiflor y Los puentes o indirecta como la avenida torrencial del Río Frío a principios del mismo año. Por lo que frente a un escenario donde hay un notable aumento de afectaciones derivadas de estas amenazas geológicas, la falta de un mejor entendimiento de la susceptibilidad

en las diferentes cuencas de los principales ríos que atraviesan el municipio, propicia que se presente más de estos incidentes en un futuro sin posibilidad de tomar las mejores medidas para prevenirlo.

Se define una serie de alcances que el trabajo debe seguir, dentro de los cuales se encuentran:

- Este estudio busca identificar la susceptibilidad a movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado en la cuenca del Río Frío.
- En esta investigación se plantea el uso de la metodología del SGC del 2017 utilizando los insumos más básicos planteados por la misma, especialmente en la propuesta que realiza para la campaña de campo e insumos de la caracterización geoambiental.
- Para la creación del mapa de zonificación se busca crear capas temáticas que sirvan de información base para otros proyectos a más detalle.

Se define una serie de limitaciones de este proyecto las cuales se exponen a continuación:

- El análisis no llega a una zonificación de amenaza debido a la falta de insumos necesarios y criterio experto que pudiera otorgar un mayor grado de confianza al análisis multidisciplinario necesario para llevar a cabo tal proyecto, por esta misma razón no se incluye el apartado de cobertura y usos del suelo en el análisis de susceptibilidad.
- Existe cierto grado de incertidumbre en la generación de los insumos, esto debido a que no se consigue tener una cobertura mayor al 50% del área de estudio dado que se contaba con recursos propios y tiempo limitado para la campaña de campo.
- La cantidad de datos temporales y estudios en la zona no es lo suficientemente detallada como para hacer una comparativa precisa de la evolución total de los movimientos en masa a lo largo del tiempo.

Tabla 1. *Ejemplos de movimientos en masa recientes ocurridos en Floridablanca*

Fecha del evento	Ubicación	Tipo de evento	Afectaciones
28/01/2020	Barrios Villa Piedra del Sol y Santa Coloma	Avenida Torrencial	Viviendas de al menos 130 familias
04/04/2020	Asentamiento humano Asomiflor	Movimiento en masa	13 viviendas afectadas
10/01/2021	Asentamiento humano Los Puentes	Micro deslizamientos	Reubicación de 40 familias
02/02/2021	Conjunto residencial Bosques de la Florida	Micro deslizamientos	Al menos dos árboles derrumbados

2. Justificación

Los motivos que llevan al desarrollo de este proyecto son principalmente los que están presentes en las disposiciones de la normatividad vigente, referente a la gestión del riesgo en el país, solo por mencionar algunas, tenemos el decreto 1807 del 2014 – el cual en sus artículos 3 y 4 clasifica a los mapas de susceptibilidad y amenaza a escala 1:25.000 como estudios básicos en el plan de ordenamiento, la Ley 1523 del 24 de abril del 2012 – en la cual especifica la importancia de la adquisición de nuevo conocimiento en materia de gestión de riesgo por parte de gobiernos locales como alcaldías de municipios y por último, el decreto 1077 del 2015 en su título 2- en donde coloca como prioridad la prevención de amenazas y riesgos naturales.

Además de la necesidad legal relacionada con los mapas de susceptibilidad, en los últimos años en el municipio de Floridablanca y especialmente en los barrios por donde se abren paso sus ríos y quebradas, la comunidad se ha visto afectada de manera notable. En algunos casos las pérdidas o afectaciones no son más que algunas vías, sin embargo, particularmente en 2020 se han visto afectados autos, casas y hasta parques que albergan tipos exóticos de fauna y flora (SGC, 2020). El Río Frío, considerado como uno de los principales afluentes que atraviesan el municipio posee una cuenca donde los movimientos en masa están muy presentes, ya que destacan grandes pendientes en donde hay registros de estos eventos; todo este material llega al río y posteriormente es canalizado, por lo que conocer acerca de las zonas más propensas a tener estos problemas es de suma importancia. Al no haber estudios de la cuenca y no tener un conocimiento actualizado, no es posible conocer lo que genera un aumento de nuevos movimientos en masa en la zona rural del municipio, la cual es la parte más cercana al nacimiento de la fuente hídrica y por ende la zona que más alimenta el río con sedimentos que lo pueden, por ejemplo, represar y causar desastres asociados a esto.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Elaborar un mapa de zonificación donde se identifiquen las áreas susceptibles a movimientos en masa de tipo deslizamiento y flujo no canalizado en la parte alta de la cuenca del Río Frío en el municipio de Floridablanca, aplicando los lineamientos propuestos en la “Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25.000” del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), mediante el uso de herramientas de **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**.

3.2 Objetivos Específicos

Realizar la caracterización de los procesos morfodinámicos presentes en la parte alta de la cuenca del Río Frío.

Elaborar el mapa de subunidades geomorfológicas (SGMF) a escala 1:25.000 de la parte alta de la cuenca del Río Frío.

Caracterizar los materiales geológicos que afloran en el área de estudio mediante la elaboración del mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) a escala 1:25.000.

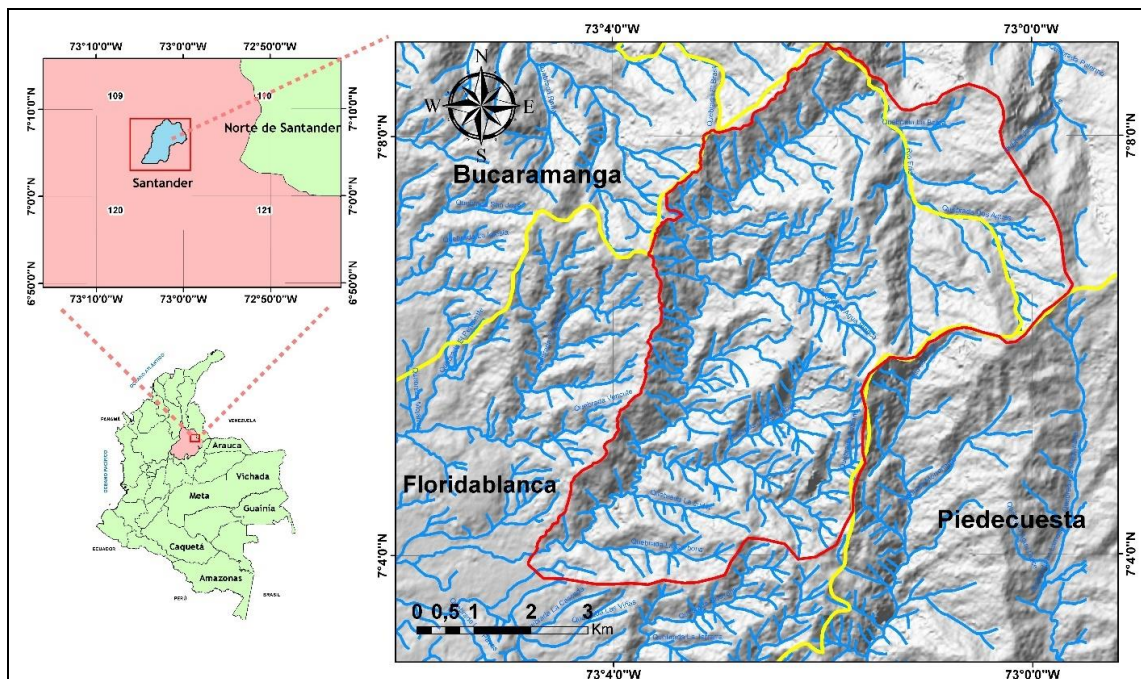
Realizar el análisis de susceptibilidad de movimientos en masa tipo deslizamientos y flujo no canalizado aplicando los métodos planteados por SGC (2017), para la obtención del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, utilizando herramientas SIG.

4. Marco de Referencia

4.1. Localización

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco occidental de la cordillera oriental, en el departamento de Santander al sureste del municipio de Floridablanca. Está limitando al noreste con el municipio de Tona, al noroeste con el municipio de Bucaramanga y hacia el sureste con el municipio de Piedecuesta (Figura 1).

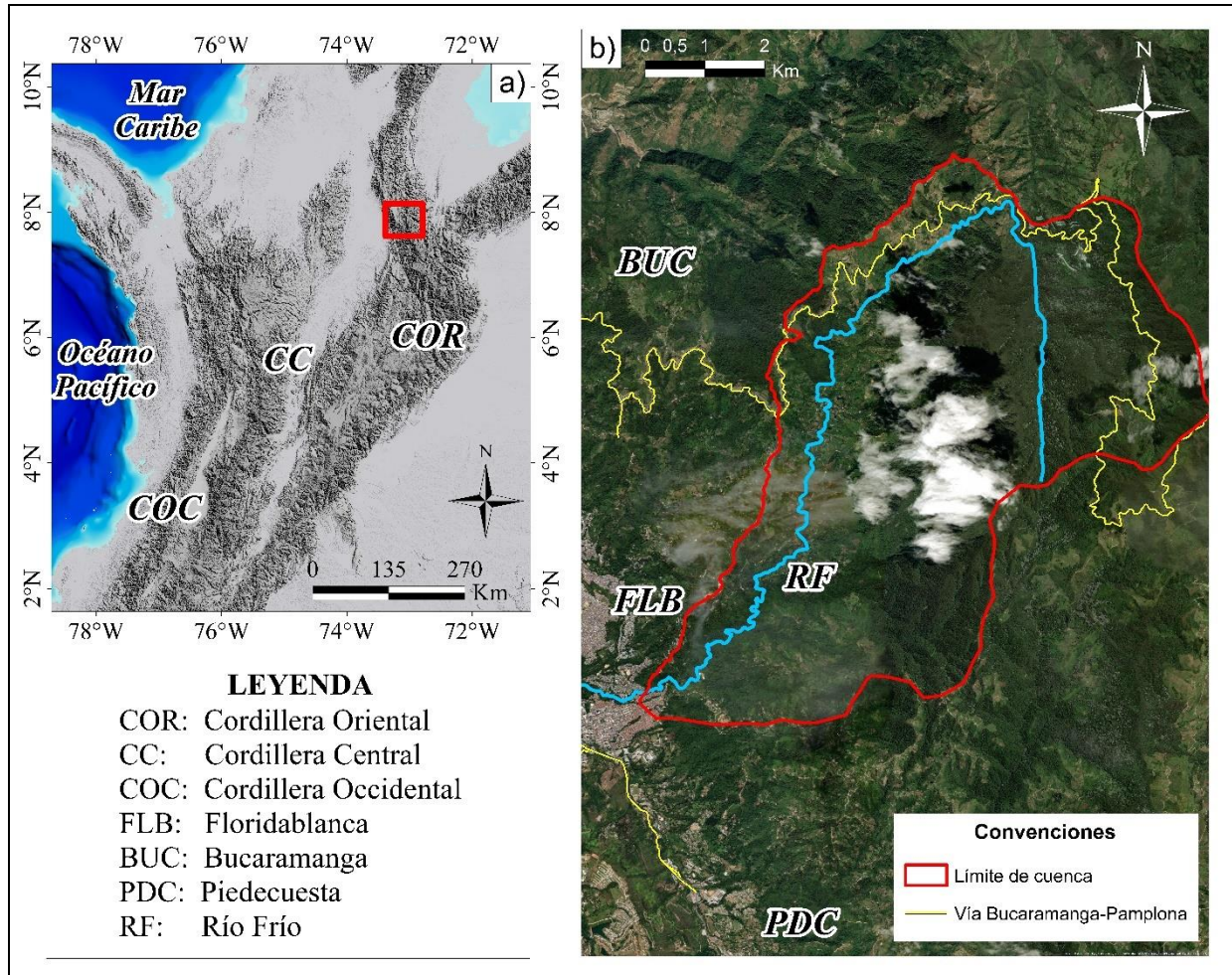
Figura 1. Localización del Área de Estudio



Nota: En el recuadro inferior izquierdo se observa el departamento, en el superior izquierdo la localización de la cuenca en Santander y en el recuadro de la derecha se observa la cuenca con su respectiva red hidrográfica.

La delimitación del área de trabajo corresponde a 46,58 Km² (4658 hectáreas) y se presenta dentro de las veredas Aguablanca, helechales, Alsacia y la zona urbana por parte de Floridablanca y una pequeña parte de la Corcova en el municipio de Tona, esto conforme al recorrido que lleva el Río Frío el cual se observa en la (Figura 2). Climatológicamente el municipio de Floridablanca presenta una temperatura media que va desde los 18 a los 25°C y un régimen de precipitación bimodal (invierno y verano) donde entre los meses más secos y húmedos, la diferencia en las precipitaciones es 342 mm (Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB, 2015). A nivel geomorfológico se diferencian dos dominios, uno hacia la parte rural donde se presenta un relieve en donde prevalecen los sectores alomados y montañosos (POT Floridablanca, 2016) y otro que corresponde al casco urbano, donde hay una extensa planicie que atraviesa el Río Frío.

Figura 2. Vista Satelital del Área de Estudio



5. Marco Teórico

5.1 Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa a Escala 1:25.000

Para elaborar un mapa de susceptibilidad siguiendo los lineamientos de la guía metodológica del SGC se debe tener en cuenta que estos mapas son un producto final en sí mismos y su elaboración puede ser distinta según las variables que se escojan, en el caso de este

trabajo, la elección es el tipo de movimiento en masa, donde para cada uno se aplica un método diferente, como se muestra en la (Tabla 2).

Tabla 2. *Métodos de Análisis Propuesto para cada tipo de Movimiento en Masa,*

TIPO	MÉTODO	ZONA DE ANÁLISIS
Deslizamientos	Estadístico bivariado (Pesos de evidencia - WofE)	Zonas de inicio y depósito
Caídas	Criterios geológicos y geomorfológicos	Zonas de inicio y depósito
Flujos	Mapeo geomorfológico	Zonas de depósito
Reptación	Identificación en el inventario	Zona de afectación directa

Nota: Tomado de SGC 2017

5.1.1 Susceptibilidad por Movimientos en Masa tipo Deslizamiento

Para este análisis se usa el método estadístico bivariado de pesos de la evidencia o WofE, “Este método evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos. El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa” (SGC, 2017).

Luego de algunos ajustes explicados en Bonham, donde se plantean los pesos de la evidencia tanto positivos como negativos, se plantea que en términos de pixeles el área q está compuesta por un número total de pixeles $N = N_{pix1} + N_{pix2} + N_{pix3} + N_{pix4}$ (Van Westen, 1993).

Teniendo en cuenta lo anterior, el peso final se calcula los pesos de cada variable mediante la siguiente formula:

$$W_{if} = w_i^+ - w_i^-$$

Donde W_{if} es el peso final, W_{i+} son los pesos positivos y W_{i-} son los pesos negativos.

Respecto a la aplicabilidad de este método, según el SGC (2017), una vez que se han definido los factores condicionantes y se ha alistado la información de las capas temáticas consideradas, es necesaria la definición de la variable de agrupamiento mediante la función final de susceptibilidad o LSI para posteriormente combinarla con cada uno de los factores condicionantes. Esta función se representa mediante la ecuación:

$$LSI = W_f \text{Pendiente} + W_f \text{Curvatura} + W_f \text{UGS} + \dots W_f \text{Uso del suelo}$$

La evaluación de la calidad de esta función se hace a través de la construcción de una curva de éxito, la cual antecede el resultado final.

La curva de éxito mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados y para su construcción se deben ordenar los valores de la *LSI* en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías. Cada grupo de 1% se deberá cruzar con la variable de agrupamiento para determinar con cuantos pixeles de la variable tiene relación (SGC, 2017).

5.1.2 Susceptibilidad por Movimientos en Masa tipo Flujo no Canalizado

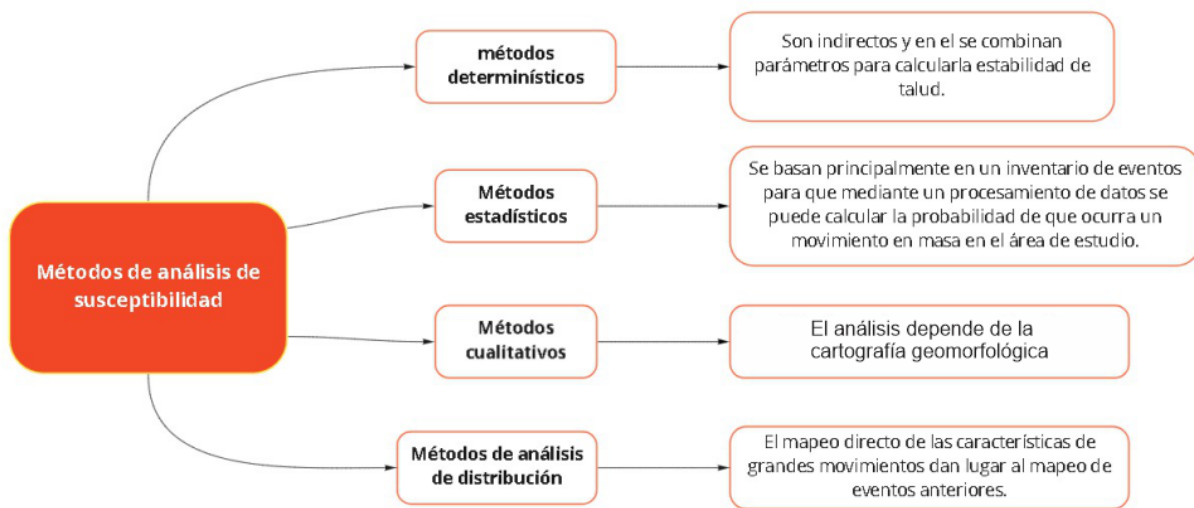
La guía metodológica propone la identificación de zonas susceptibles a ser afectadas mediante la cartografía directa de subunidades geomorfológicas. El objetivo de los análisis a esta escala es identificar las zonas posiblemente afectadas por el depósito de estos procesos, en las

cuales se deberán ejecutar estudios más detallados. En cuanto a la clasificación, es cualitativa de grado alto, medio o bajo según el tipo de subunidad que presenta la zona.

5.2 Antecedentes

La susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa es un tema que ha preocupado a numerosos investigadores a nivel global, esto ha generado que a lo largo de los años se creen e implementen diferentes métodos para obtener un análisis certero de la susceptibilidad, estos métodos están clasificados como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Clasificación de los Métodos para el Análisis de Susceptibilidad



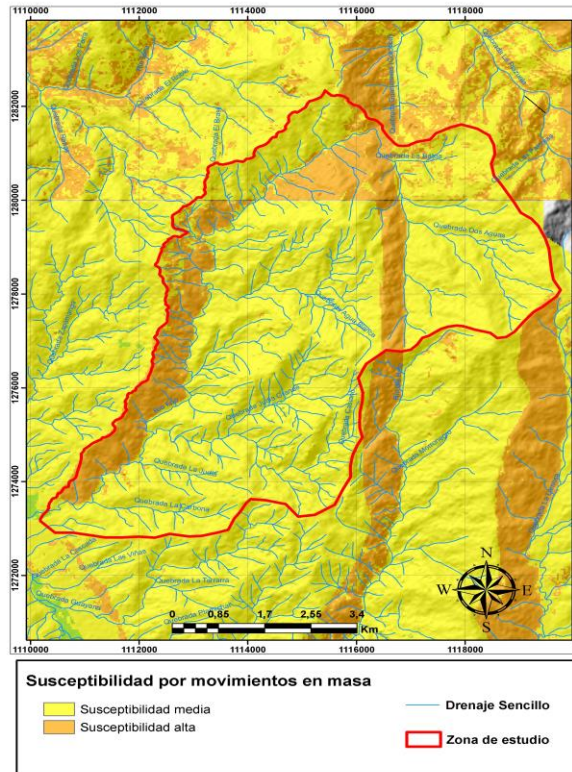
Nota: Tomado de Van Westen, 1993

Dentro de los métodos estadísticos, se encuentra el método bivariado, el cual es usado por el SGC actualmente. En Colombia los movimientos en masa son fenómenos que desde hace décadas han venido siendo un problema cada vez mayor. Esta afirmación se sustenta haciendo una breve revisión a los registros de estragos que han causado dichos desastres a lo largo de la

historia de Colombia. Entre los años más catastróficos de los que se tiene registro oficial se encuentra 1987, del cual se tienen reportes oficiales de 609 muertos y 109 heridos en el territorio nacional (UNDRR, 2015), pero no es sino hasta 2001 que se genera el primer Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:1'500.000 por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (INGEOMINAS) el cual sirve para iniciar procesos de delimitación y prevención de estos fenómenos geológicos.

Desde entonces no se ha llegado a un pico más devastador en pérdidas humanas, sin embargo, a nivel de registro histórico, el 2011 se posicionó como el segundo año en el que los daños a raíz de movimientos en masa fueron muy significativos dejando 269 muertos y 199 heridos en el país (UNDRR, 2015). Debido a este suceso a gran escala y tan notable en el registro, el SGC creó en 2015 una actualización al mapa de amenaza a escala 1:100.000 donde se ubica a todo el municipio entre amenaza media y alta (Figura 4), algo que no se hacía desde la actualización en 2009 a escala 1:500.000, estos mapas que zonifican la susceptibilidad y la amenaza a movimientos en masa en todo el territorio proporcionaron un apoyo fundamental para el ordenamiento territorial en todas las regiones.

Figura 4. Cuenca de Estudio Utilizando las Categorías Usadas en el Mapa de Susceptibilidad General por Movimientos en Masa Escala 1:100.000 por el SGC 2015



Floridablanca ha sido uno de los 12 municipios de Santander que tienen una elevada cantidad de muertes producto de los movimientos en masa de entre los 87 que hay en total (UNDRR, 2015), además de ocupar el segundo puesto en cuanto a densidad demográfica en el departamento, esto hace que según la ley 388 de 1997 al tener más de 100.000 habitantes en su casco urbano y área rural, se precisen estudios con cierto nivel de detalle y precisión en materia de ordenamiento territorial. En 2009, INGEOMINAS realizó un estudio detallado a escala 1:5.000 de Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa de algunas laderas de los Municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, el cual incluyó la geología detallada de algunos barrios de Floridablanca y clasificó algunas zonas dentro del área de estudio con una

susceptibilidad media, posteriormente en 2010, la CDMB realizó el estudio de zonificación y amenaza por inundación en la cuenca media y baja del Río Frío donde se identifican las zonas con mayores problemas de inestabilidad. En 2017 se publicó la guía metodológica para la zonificación de amenaza por MM a escala 1:25.000, poco tiempo después que se generara el ordenamiento territorial para el municipio (2016-2029), por lo que actualmente no hay registros de nuevos estudios que apliquen esta metodología estandarizada para la cuenca del Río Frío. Por último, el SGC realizó una visita técnica al municipio donde se hacía un análisis a la avenida torrencial ocurrida en enero del 2020 donde detalla aspectos de los movimientos en masa a escala local en la cuenca del Río Frío y de manera general en el municipio.

5.3 Marco Geológico Regional

5.3.1 Estratigrafía

En el siguiente apartado se describirán las principales unidades geológicas ubicadas en la parte alta de la cuenca del Río Frío. La litología que predomina en la zona corresponde a rocas ígneas y metamórficas, sin embargo, existe una gran variedad litológica, encontrándose en ciertos sectores más locales algunas rocas sedimentarias, además, ya que la zona de estudio se encuentra dentro de dos bloques tectónicos, uno que queda en una depresión tectónica y otro que está al pie de la Mesa de Ruitoque (Vargas & Niño , 1992), hay un evidente control estructural ejercido por algunas fallas que atraviesan los materiales presentes. A continuación, se hace una breve descripción de la estratigrafía y un esquema representativo (Figura 5)

Precámbrico. Neis de Bucaramanga (PCab). Esta unidad consta de rocas metamórficas de alto grado, con fábrica orientada y textura gruesa a media. Está compuesta, principalmente, de neis semipelítico, neis hornbléndico, anfibólita y esquisto; incluye también zonas de migmatitas (Ward et al, 1973) y es posible la existencia de rocas cataclásticas, cerca de los planos de las fallas principales. Las unidades que corresponden al neis del Precámbrico son esquistos, neis y migmatitas con un metamorfismo de alto grado (PCab).

Paleozoico. Formación Silgara (PDs). Corresponde a una secuencia de rocas clásticas metamorfoseadas, típicamente delgada y cíclicamente estratificadas que consta de pizarras, filitas, metalimonitas, metareniscas impuras, metawacas y metawacas guijarrosas con menos cantidades de pizarras y filitas calcáreas que suprayacen a la formación Neis de Bucaramanga (Ward et al. 1973).

Ortogneis (PCamb). Corresponde a rocas ígneas plutónicas afectadas por un metamorfismo regional de grado bajo, respecto a su Genesis no se ha establecido claramente para la zona de estudio si está más relacionada con el Neis de Bucaramanga o con los esquistos del silgara, sin embargo, según el esquema geológico del macizo de Santander modificado por Goldsmith et al en 1971, durante el emplazamiento del magma, la asociación genética se daría con el gneis de Bucaramanga.

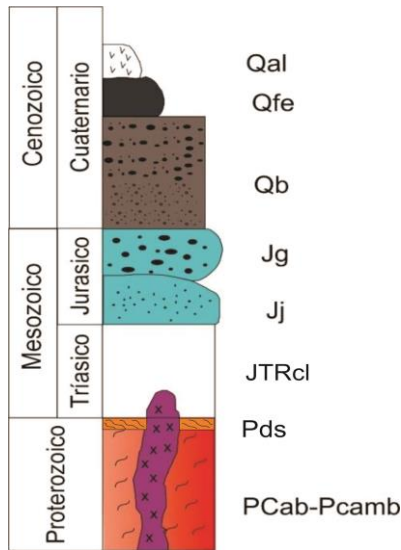
Triásico. Cuarzo monzonita de la Corcova (JTRcl). La cuarzomonzonita típica de La Corcova tiene una edad que se ha demostrado es al menos del Triásico inferior. Es de grano fino a medio, principalmente equigranular y de textura sacaroide, con biotita uniformemente diseminada. Es gris cuando está fresca, pero meteoriza a gris claro o gris amarillento. En algunos sitios muestra una débil estructura fluida. Cuando es masiva, tiende a meteorizar esferoidalmente, formando cantos con núcleo rocoso (INGEOMINAS, 1973).

Jurásico. Formación Jordán (Jj). Está constituida por areniscas gris verdosas, de grano grueso a ligeramente conglomeráticas, con estratificación cruzada; intercalados se presentan niveles de arcillolita gris verdosas. En la parte superior se encuentran intercalaciones de limolitas, color marrón rojizo a rojo grisáceo y areniscas de grano fino en capas medianas. También existen dos capas delgadas de tobas félsicas soldadas. El ambiente de depósito es continental – vulcano - clástico. El espesor varía entre 300 y 660 m (Ward et al, 1973).

Formación Girón (Jg). Afloramientos esporádicos de la formación Girón aparecen en la parte baja de las quebradas que llegan del escarpe occidental del Abanico de Bucaramanga hacia el río de Oro. Se caracterizan por ser capas competentes de conglomerados, areniscas verdosas y rojizas, intercaladas con lodolitas violáceas masivas (INGEOMINAS, 2007).

Cuaternario. Formación Bucaramanga (Qb). Conformada de base a techo por los miembros Órganos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr). De los cuales para la zona de estudio se encuentran solo los miembros finos y gravoso.

Depósitos de flujos de Escombros (Qfe). Son depósitos de piedemonte de origen fluvio torrencial y fluvio gravitacional, provenientes principalmente de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander, los cuales son transportados a lo largo de los cauces de las corrientes de agua que nacen en éste (INGEOMINAS, 2007).

Figura 5. Columna Generalizada de la Zona de Estudio según las Fuentes Consultadas

5.3.2 Geología estructural

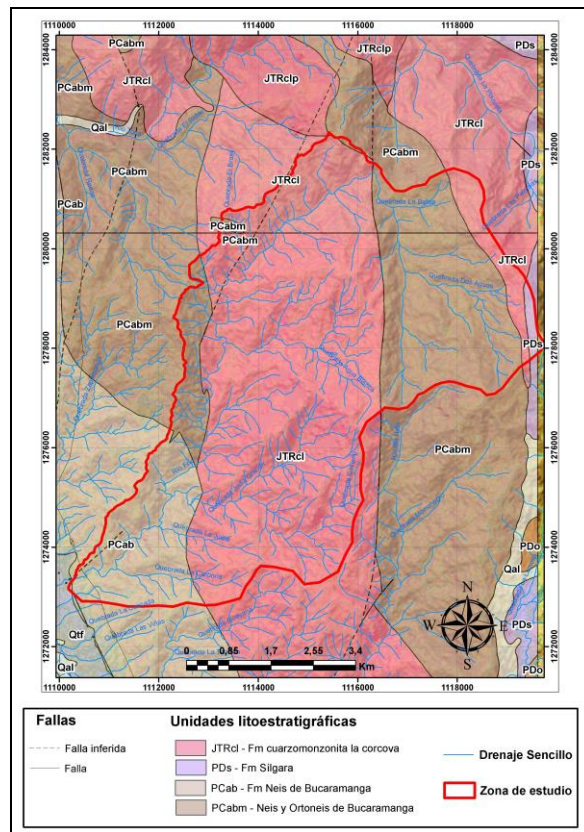
El área de estudio se caracteriza por tener una gran estructura que la atraviesa, y además condiciona el cauce del río en su parte más baja dentro de la misma, esto tiene una fuerte influencia especialmente a nivel geomorfológico en el municipio de Floridablanca, a continuación, se detallara más acerca de la misma y de fallas asociadas.

Falla de Bucaramanga. La Falla de Bucaramanga, hacía la zona de Bucaramanga y gran parte de Floridablanca, y Piedecuesta, determina el frente montañoso que marca el límite occidental del Macizo de Santander con la franja hundida de la Mesa de los Santos, la Mesa de Ruitoque y el Abanico de Bucaramanga. Esta franja deprimida está limitada por la Falla de Bucaramanga, al oriente, y la Falla de Suárez, al occidente, que a la vez da lugar a un notable escarpe que define el límite oriental de la Plataforma de Lebrija (Diederix et al, 2009).

Sistema de fallas asociado a la falla de Bucaramanga. Según la base de datos de fallas de Colombia (INGEOMINAS, 2001) y el mapa geológico a escala 1:100.000 (INGEOMINAS

1973) (Figura 6); si bien se dejó la denominación de fallas, las estructuras asociadas a la falla Bucaramanga-Santa Marta en el municipio de Floridablanca corresponden más a un fracturamiento que podría tener una fuerte influencia sobre el paisaje, sin embargo, estas presuntas fallas, que en su tramo no son regulares sino que están inferidas, no serían más que una consecuencia derivada de la creación de una amplia zona de brecha que dio cabida a que se originase un metamorfismo cataclástico para la zona de estudio.

Figura 6. Mapa Geológico Escala 1:100.000



Nota: Ingeominas 1973

5.3.3 Geomorfología

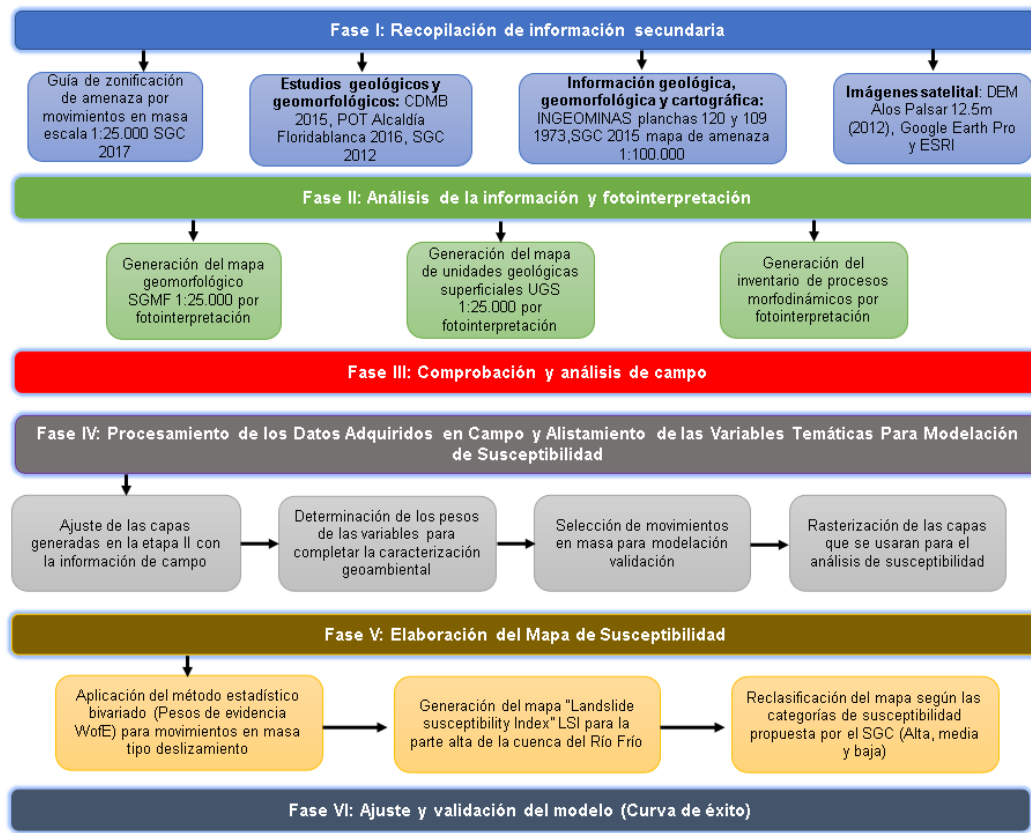
El municipio de Floridablanca se caracteriza por tener un contraste de paisajes entre su parte urbana y la rural, esto basado en lo que se observa en el mapa de unidades geomorfológicas usado para la delimitación de la amenaza por movimientos en masa a escala 100.000 (Figura 7).

En este se observan dos tipos de paisajes en el municipio, el primero es uno fluvial donde está ubicada la cabecera urbana del municipio y corresponde principalmente a un abanico aluvial. Sin embargo, la parte rural en donde se ubica más del 75% de la zona de estudio corresponde a un ambiente estructural, evidenciado por geoformas como: Sierra y lomo de presión, escarpe de línea de falla y un espolón facetado. A estas geoformas se les conoce como de origen morfoestructural y las definen como “aquellas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente las asociadas a plegamientos y fallamiento, cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural” (Memoria explicativa mapa de geomorfología para movimientos en masa de la plancha 120 Bucaramanga Departamento de Santander, 2015).

A pesar de lo anterior, a esta escala se reconoce que las geoformas no son netamente de origen estructural, sino que también se han visto afectadas por procesos denudativos, pero que a pesar de esto se establece un predominio en el origen estructural para la zona de estudio que corresponde a la plancha 120 de Bucaramanga.

que presenta el proyecto de investigación, a continuación, se presenta el esquema metodológico que se seguirá para realizar el posterior análisis (Figura 8).

Figura 8. Esquema Metodológico del Proyecto de Investigación



Nota: Tomado y ajustado de SGC, 2017

6.1 Fase 1. Recopilación de Información Secundaria

Recopilación de información disponible de la zona para la generación de los insumos para las primeras etapas del análisis de la investigación, por lo que se acude a fuentes como el del SGC, tesis de universidades de la región cuyo objeto de estudio sea el municipio de Floridablanca, mapas disponibles en el IGAC o el SGC disponibles desde 1973 en donde se analizó algunos de los insumos en los que se basa el mapa de susceptibilidad y otras herramientas

que proporcionen información geológica, cartográfica, geomorfológica para su posterior procesamiento, todo lo anterior tomado principalmente de bases de datos de la UIS, IGAC, INGEOMINAS y el SGC.

6.2 Fase 2. Análisis de la Información y Fotointerpretación

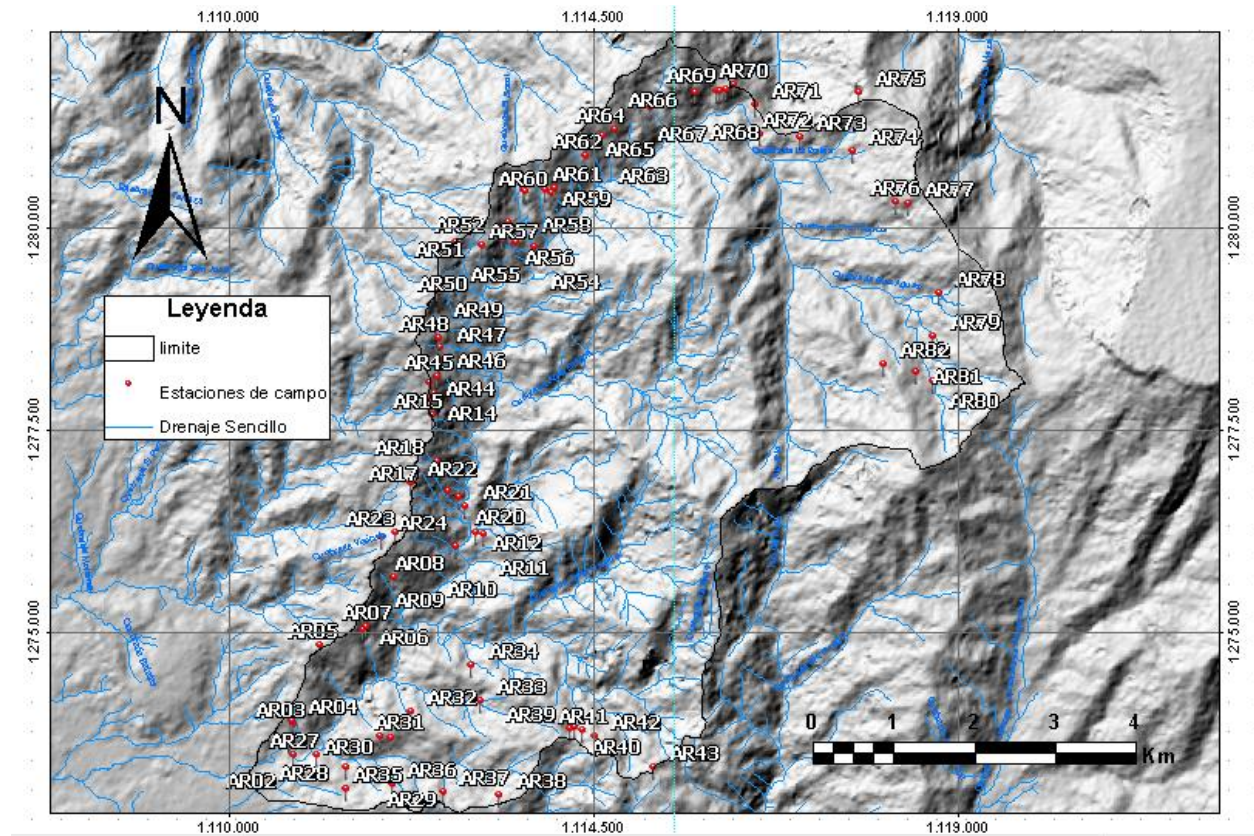
Tras hacer la recopilación de la información se procede a usar fuentes de imágenes satelitales como Google Earth y herramientas para el análisis remoto de la zona, con el fin de identificar a nivel general la presencia de movimientos en masa y geoformas de manera previa al análisis en campo.

Con la información secundaria disponible, se hace un análisis de como las condiciones y los procesos que se dan en la zona de estudio pueden o no, ser un factor condicionante para que se den procesos de movimientos en masa (deslizamiento y flujos no canalizados). A partir de dicha información se tiene una base que sirve como referente para iniciar el proceso de fotointerpretación de las diferentes capas temáticas, el cual se lleva a cabo mediante el uso de insumos como el MDE Alos Palsar (orientación, pendientes, mapa de sombras de laderas) el cual posee una resolución de 12,5 m y fuentes de imágenes satelitales como Google EARTH, ESRI y las mismas imágenes satelitales de misiones como el LANDSAT 7 y el SENTINEL, publicadas de manera gratuita por la universidad de Alaska Fairbanks en la página de sus instalaciones Alaska Satellite FACILITY (ASF). Como resultado de esta fase se obtienen las capas preliminares de los factores condicionantes de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), Inventario de Procesos Morfodinámicos (IPM), Subunidades Geomorfológicas (SGMF) y rasgos geomorfológicos, las cuales son digitalizadas utilizando el programa ARCGIS 10.5 de ESRI con licencia académica suministrada por la Universidad Industrial de Santander.

6.3 Fase 3. Comprobación y Análisis de Campo

El reconocimiento en campo consistió en una campaña de 6 días en la zona de estudio en donde se realizaron 82 estaciones de control (Figura 9).

Figura 9. Mapa de Estaciones seguidas Durante los 6 días de la Campaña de Campo



El trabajo de campo consistió principalmente en la búsqueda e identificación de nuevos movimientos en masa y depósitos de los mismos, los cuales no se pudieron registrar mediante fotointerpretación o aquellos que cuya información se pudiera actualizar, esto mediante los formatos creados por el SGC en su guía metodológica y actualizados en el 2021, los cuales proporcionan una información mucho más detallada de los movimientos en masa identificados, además, se realizan actividades de validación de la información fotointerpretada para las capas

temáticas, revisando los límites y controlando las características en las UGS mediante formatos actualizados igualmente por el SGC y tomando un registro fotográfico con mayor detalle de las SGMF.

6.4 Fase 4. Procesamiento de los Datos Adquiridos en Campo y Alistamiento de las Variables Temáticas Para Modelación de Susceptibilidad

El objetivo de esta etapa consiste en generar la caracterización geoambiental, la cual es la base para realizar el análisis de la susceptibilidad. Considerando lo anterior, durante esta fase se lleva a cabo una actualización, ajuste y refinamiento de las capas temáticas con base en el levantamiento de campo, y así obtener los mapas finales de: UGS, IPM y SGMF. Adicionalmente, se debe realizar una revisión de la información contenida en dichas capas para obtener las variables finales de modelación que serán utilizadas en los análisis de susceptibilidad. Tanto para la elaboración de los mapas temáticos como para la construcción de las capas de modelación se utiliza el programa ARCGIS usado en la fase de fotointerpretación, teniendo la licencia gratuita proporcionada durante la pandemia por el COVID-19 para universidades a lo largo del mundo durante el año 2020 y 2021.

6.5 Fase 5. Elaboración del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 en la parte alta de la cuenca del Río Frío

El objetivo de esta etapa es generar los mapas de susceptibilidad para deslizamientos y flujos no canalizados con el método estadístico bivariado de pesos de evidencia WofE, esto mediante la generación de la capa de Landslide Susceptibility Index (LSI), el cual, está dividido en 100 percentiles los cuales, al ser reclasificados, arrojan el mapa de susceptibilidad final.

6.5.1 Análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado

Siguiendo los lineamientos de la guía metodológica, se realiza el análisis de susceptibilidad mediante el método estadístico bivariado de pesos de evidencia WofE, el cual consiste en darle un valor a cada variable de los insumos previamente generados mediante pixeles, para posteriormente sumarlos y así, las zonas que tengan un mayor valor sean aquellas que son más susceptible a que ocurran movimientos en masa que aquellas que no reúnan el suficiente “peso” que se traduce a cantidad de factores condicionantes para que ocurra dicho evento.

6.6 Fase 6. Ajuste y Validación del Modelo

Para validar el modelo, la guía propone un análisis mediante una curva de éxito como se hace en el caso de movimientos tipo deslizamiento, esto basándose en el inventario de movimientos en masa, sin embargo, el criterio experto juega un papel fundamental, además de la densidad de movimientos en la zona por lo que según los resultados obtenidos se optará por una validación estadística o mediante otro mecanismo. Esta etapa sirve de aclaración para entender que el mapa de susceptibilidad antes de su finalización es una serie de diferentes modelaciones y análisis considerando el conocimiento del área y la experticia misma para establecer cuál es el modelo que se ajusta más a la realidad encontrada en la zona. Por último, en esta etapa también se considera que para el análisis mediante el método estadístico bivariado se debe analizar la variable de agrupamiento (Inventario de Procesos Morfodinámicos) para seleccionar bien los datos de esta y como incluirla en la ecuación del método (la cual deberá incluir movimientos en masa tanto activos como inactivos). Por último, de la totalidad de los datos se eligen el 70% de

estos como muestra de entrenamiento manera aleatoria para la generación de la curva de éxito del mapa de susceptibilidad, luego con el 30% de los movimientos en masa restantes, se realiza la curva de validación, con el objetivo de que ambas curvas queden similares al menos sobre un 70%.

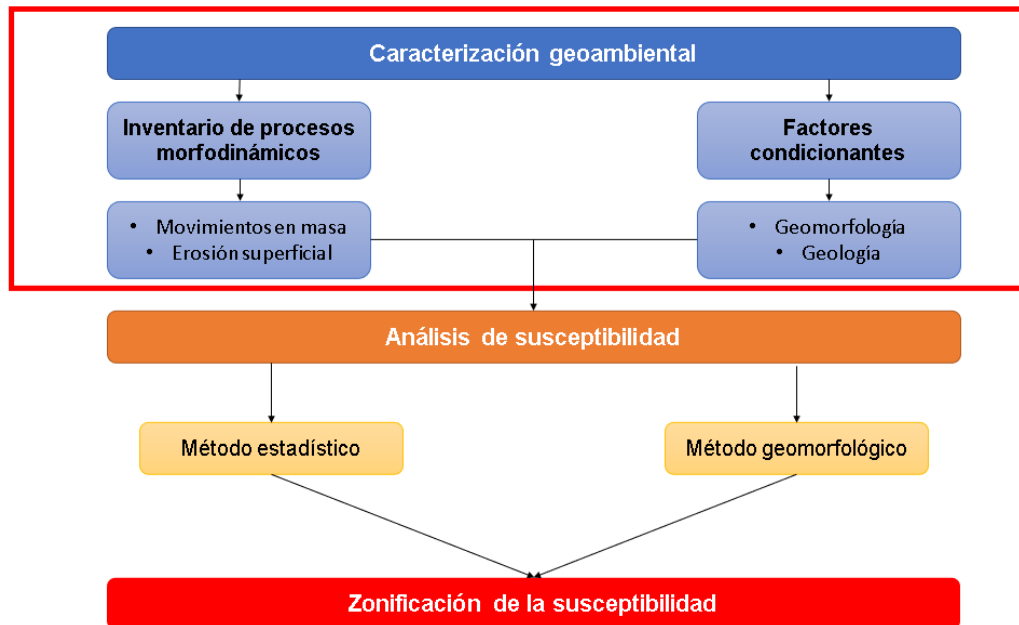
7. Resultados

7.1 Caracterización Geoambiental

Como lo define la guía metodológica, la caracterización geoambiental “comprende al levantamiento y consecución de la información temática y los datos de entrada requeridos para obtener de la zonificación de susceptibilidad (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo, clima y sismicidad)”. Está compuesta por dos elementos fundamentales (Figura 10), uno de ellos son los factores condicionantes, los cuales son relevantes a la hora de identificar posibles elementos que promuevan la aparición de movimientos en masa. Los factores condicionantes usados para el presente proyecto son especialmente dos: La geomorfología representada mediante un mapa de subunidades geomorfológicas y la geología, representada mediante un mapa de unidades geológicas superficiales. Además de estos factores condicionantes, se tienen en cuenta otros elementos implícitos como la morfometría, la morfogénesis y la morfodinámica que otorgan un mayor peso a la variable. El segundo elemento corresponde a el inventario de procesos morfodinámicos, el cual nos permite tener un precedente

de los movimientos en masa ocurridos en la zona de estudio y nos proporciona una idea de las zonas que pueden ser más susceptibles a los movimientos en masa.

Figura 10. Diagrama Explicativo del Proceso de Entrega de Resultados que Finaliza con la Zonificación de la Susceptibilidad



7.1.1 Inventario de Procesos Morfolodinámicos

Los resultados que arroja el IPM se dividen en el inventario de información secundaria y el inventario geomorfológico, este último funcionando a su vez como insumo para el cálculo de la susceptibilidad.

7.1.1.1 Información Secundaria. Fue adquirida mediante el Sistema de inventario de efectos de desastres (DesInventar) y el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), que compila espacialmente múltiples fuentes como INGEOMINAS, UIS, SGC,

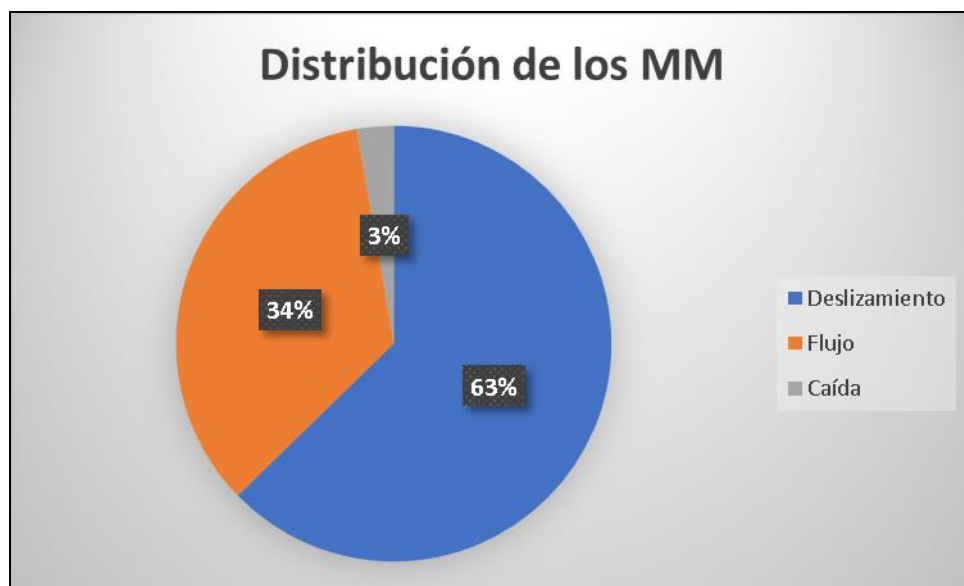
Vanguardia, UNGR, IDEAM y el Sistema nacional de Gestión del riesgo de Desastres SIGPAD (Tabla 3). Mediante esta herramienta se identificaron 3 movimientos en masa de tipo deslizamiento y 1 tipo flujo dentro de la zona de estudio y otros más hacía el casco urbano de Floridablanca el cual no hace parte de la cuenca. Se hace la aclaración que tras una revisión desde Google Earth se encontró que estos movimientos actualmente están inactivos.

Tabla 3. Listado de Movimientos en Masa de la Zona de Estudio Recopilados mediante Fuentes de Información Secundaria.

Fuente	Fecha de movimiento	Municipio	Vereda	Tipo de movimiento	Latitud	Longitud	Altura	Referente geográfico	Afectación
SIMMA	1/11/2011	Floridablanca	Aguablanca	Flujo	7,128333333	-73,05111111	1903	Km 20. Vía Bucaramanga-Cúcuta cerca de la tienda parador el vecino.	Daño a infraestructura vial
SIMMA	12/05/2018	Floridablanca	Aguablanca	Deslizamiento	7,136639	-73,036219	977	Sector la nevera	Daño a infraestructura vial
DesInventar	28/07/1997	Floridablanca	Helechales	Deslizamiento	7,094703	-73,030943			Daño a infraestructura vial
SIMMA	5/03/2018	Floridablanca	Helechales	Deslizamiento	7,080767	-73,067014	1359		Daño a infraestructura vial

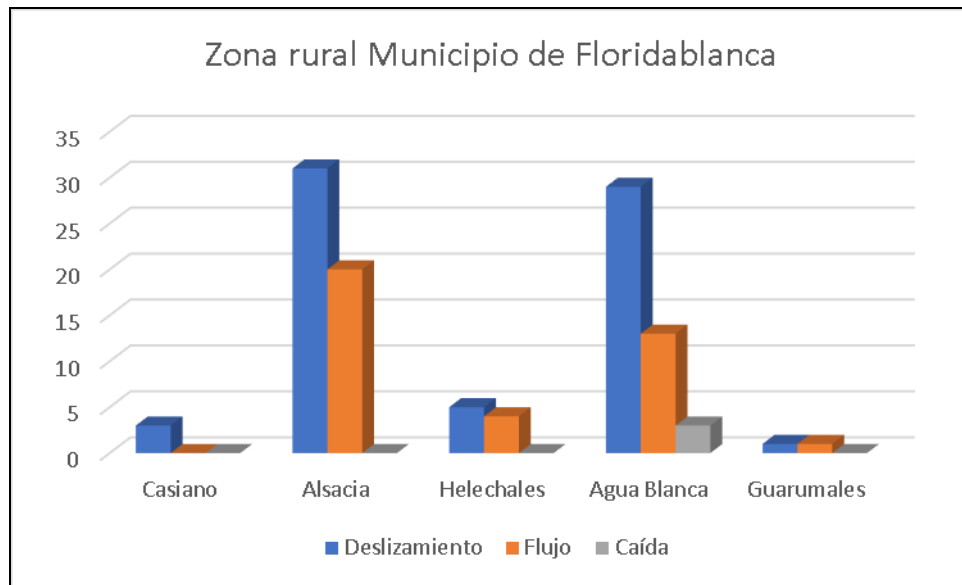
7.1.1.2 Inventario Geomorfológico: En la cuenca del Río Frío, fueron identificados mediante fotointerpretación y análisis de campo un total de 110 movimientos cartografiables y 8 de tipo punto con dimensiones no cartografiables que serán tomados en cuenta en análisis posteriores, de aquellos cartografiables se obtuvieron: 62,72% (69) correspondientes a deslizamientos, 34,54% (38) a flujos y 2,72% (3) a tipo caída (Figura 11).

Figura 11. Diagrama Ilustrativo del Porcentaje de Movimientos en Masa en la Zona de Estudio



Con respecto a la distribución de los movimientos en masa dentro del área de estudio, se encontró un promedio de 22 movimientos en masa cartografiables por vereda. Las veredas que muestran inestabilidades son Agua blanca (45) y Alsacia (51) (Figura 12).

Figura 12. Diagrama Ilustrativo de la Cantidad de Movimientos en Masa por Vereda en la Zona de Estudio.



El tipo de movimiento que predomina en todas las veredas corresponde a los deslizamientos, siendo el más representativo en las veredas Casiano (100%), Agua blanca (64,44%) y Alsacia (60,78%), siendo esta ultima la más representativa en cuanto a cantidad de procesos. Por parte de los flujos, las veredas más representativas son Guarumales (50%) y Helechales (44,4%), esta ultima siendo más representativa en cuanto a cantidad de procesos. Para los movimientos tipo caída, la totalidad de movimientos reportados y cartografiados se encuentran en la vereda agua blanca, sin embargo, se reportan otros procesos tipos caída de escala más local visualizados en campo, estos ubicados en la vereda Alsacia (2) y Casiano (1).

Los procesos cartografiados en la cuenca son de baja magnitud, con una media de 0,14 ha, donde el proceso más grande alcanza un área de 1,85 ha y se encuentra ubicado en la parte occidental de la vereda Aguablanca, cercano a la vía a Cucuta.

En general el area afectada por movimientos en masa, es de alrededor de 25,63 ha, lo que representa el 0,55% del area de la cuenca del Río Frío que corresponde a la zona rural del municipio de Floridablanca. A pesar de que los movimientos en masa ocupan un area muy minima con respecto a la total, dos veredas presentan una concentracion especialmente alta, presentandose una fuerte inestabilidad en zonas residenciales como la corcova en la vereda Agua blanca con una concentracion de más del 40% de los procesos y diferentes fincas y cazerios como La Mata distribuidas en la vereda Alsacia que cuenta con el 46% de los procesos.

Caracterización de los tipos de procesos: A continuación, se describen los diferentes tipos de procesos encontrados en la cuenca del Río Frío, describiendo el área total ocupada por cada tipo, aspectos morfométricos, el tipo de materiales involucrados en cada tipo.

Deslizamientos. Este es el tipo de movimiento más común en la zona de estudio contando con al menos 69 procesos cartografiables, ocupando un área total de 15,36 ha, siendo muy representativos en la vereda Casiano y Agua blanca, ubicándose la mayoría de los movimientos en esta última, se concentran en la zona montañosa al margen izquierdo del río frío en el tramo que atraviesa la vereda y al margen izquierdo de la vía Bucaramanga – Cucuta (Figura 13).

Los procesos de tipo deslizamiento en la cuenca tienen un área promedio de 0,14 ha y pueden llegar a tener una longitud de hasta 100 m. Están asociados a procesos erosivos intensos y de meteorización que generan suelos residuales, unidad en donde junto con las rocas de calidad muy mala, se concentran gran parte de estos.

Figura 13. Ejemplos de Deslizamientos Encontrados en el Área de Estudio

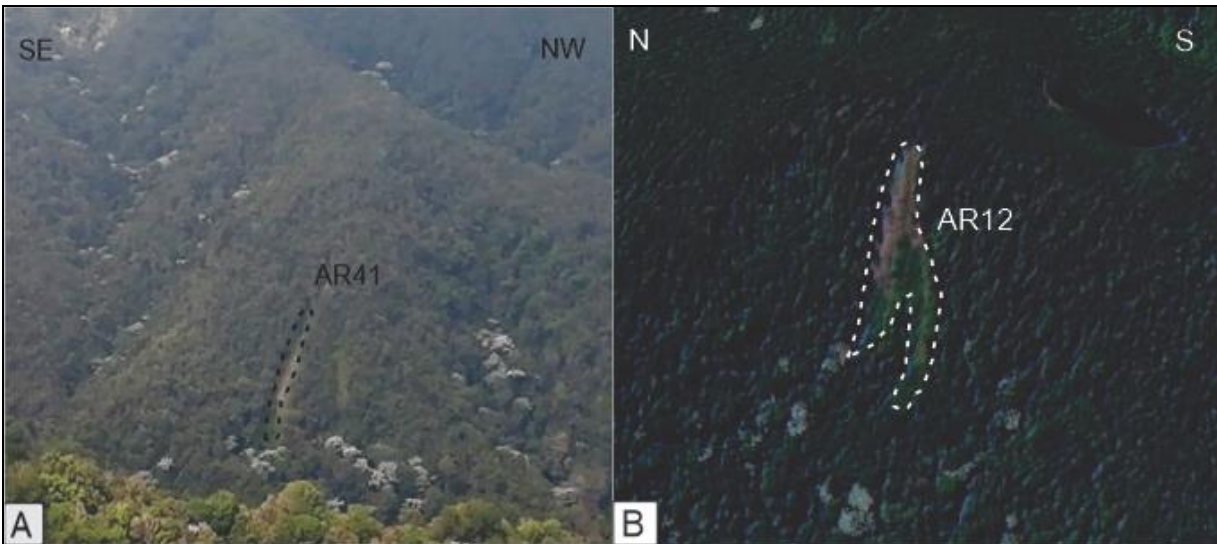


Nota: a) muestra un deslizamiento de menor magnitud en la vereda Casiano, B) muestra el movimiento AR23 foto interpretado y controlado en campo y en C) se observa un deslizamiento inactivo (AR105) al margen izquierdo de la carretera Bucaramanga – Cúcuta, el cual fue previamente foto interpretado

Flujo. Después de los deslizamientos, los flujos tienen la mayor presencia en la cuenca contando con 38 procesos cartografiables, ocupando un área total de 10 ha, siendo muy representativo porcentualmente en las veredas Guarumales y Helechales (Figura 14). Sin embargo, el mayor volumen de procesos se encuentra en la vereda Alsacia, contando esta con 20 procesos. Los movimientos tipo flujo se concentran principalmente en el extremo este de la vereda Alsacia y otra parte sobre la geofoma ladera denudada muy escarpada, que se ubica en la vereda Agua blanca.

Los procesos de tipo flujo en la cuenca tienen un área promedio de 0,15 ha y pueden llegar a tener una longitud de 500 m. Están asociados principalmente suelos y roca de calidad mala de la cuarzomonzonita la corcova, que es donde se acumula la mayor parte de estos.

Figura 14. Ejemplos de Flujos no Canalizados en el Área de Estudio



Nota: A) muestra un movimiento en masa previamente cartografiado mediante foto interpretación en las coordenadas latitud: 7.121040, longitud: -73.019852 con orientación oeste y en B) un ejemplo de flujo de ladera encontrado mediante foto interpretación en las coordenadas Latitud: 7.113356, longitud: -73.012858 con orientación este.

Caída. Estos procesos no se encuentran a una escala cartografiable salvo unos pocos que son notables en la vereda Guarumales al margen de la vía Bucaramanga - Cúcuta, dado que la calidad de los materiales en la cuenca no permite que en las laderas se acumule un exceso de material blocoso de gran tamaño (Figura 15) que dé lugar a este tipo de procesos, sin embargo, existe una mayor posibilidad de encontrar estos procesos en rocas de mala calidad del neis de Bucaramanga, dado que por su condición de roca foliada, tiende a generar más fracturamiento

antes de la degradación a suelos, que es justamente lo que no permite que se generen procesos de este tipo.

Figura 15. *Ejemplo de Movimiento en Masa Tipo Deslizamiento y Caída Encontrada al Margen Izquierdo de la Carretera.*



7.1.2 Factores Condicionantes

A continuación, se realizará una revisión a cada uno de los factores condicionantes utilizados para la creación del mapa de susceptibilidad, la forma de llegar a cada uno de los productos y el resultado en sí:

7.1.2.1 Capa de subunidades Geomorfológicas: El tipo de análisis que se realiza en esta capa tiene un enfoque morfogenético ya que estos se definen como aquellos que agrupan las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se formaron las geoformas

(SGC, 2012). Sin embargo, también se tienen en cuenta otros aspectos cuantitativos que son inherentes en la geomorfología como la forma, longitud y altura (Figura 17).

Se cartografiaron unidades de tipo denudacional, fluvial y antrópico (Figura 16) en donde cada unidad de terreno tiene características especiales y una serie de atributos que permiten diferenciarla de otras (SGC, 2017).

Como resultado de la fotointerpretación y posterior validación de campo, fueron cartografiadas 28 subunidades geomorfológicas, distribuida en ambientes así: 24 denudacionales, 3 fluviales y 1 antrópica. En la Tabla 4 se relaciona el área en hectáreas que ocupa cada una de las subunidades y el porcentaje que representa frente al área total del área de la cuenca, así como la distribución porcentual de área ocupada por cada uno de los ambientes morfogenéticos presentes.

Figura 16. Diagrama ilustrativo del porcentaje de subunidades geomorfológicas por tipo de ambiente en el área de estudio

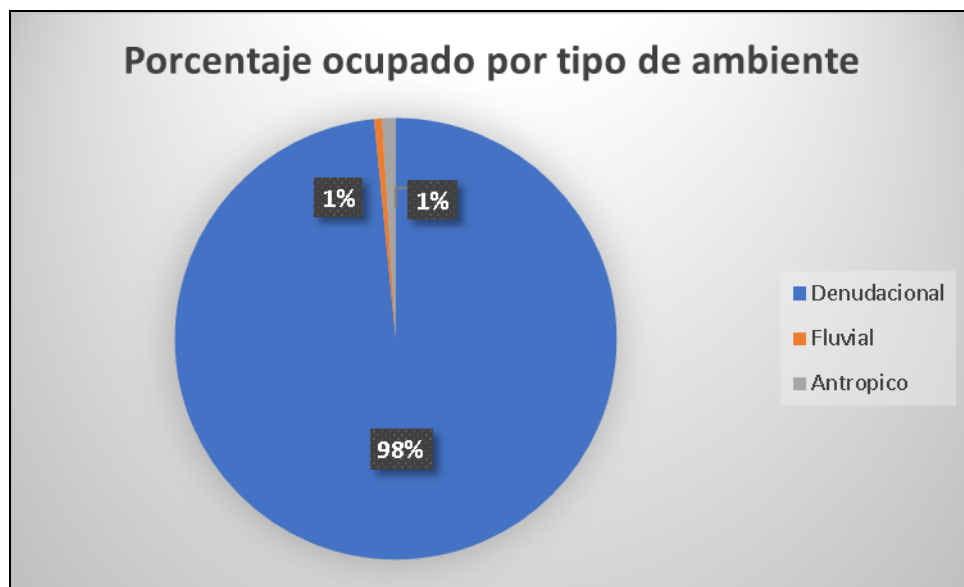


Tabla 4. Listado de las Subunidades Geomorfológicas Cartografiadas y su Respectiva Área en la Cuenca

Ambiente / SGMF	SGMF - COD	Área (ha)	Área (%)
Denudacional	-	4585,42	98,43
Cima	Dc	6,13	0,13
Colina denudada	Dcd	108,34	2,33
Cerro denudado	Dce	89,44	1,92
Cerro remanente	Dcrem	16,50	0,35
Ladera abrupta	Dla	238,46	5,12
Lomo angosto	Dlan	14,10	0,30
Lomo denudado bajo de longitud corta	Dldebc	123,16	2,64
Lomo denudado bajo de longitud larga	Dldebl	611,35	13,12
Lomo denudado bajo de longitud media	Dldebm	521,13	11,19
Ladera denudada	Dlden	375,11	8,05
Ladera disectada	Dldi	684,06	14,68
Ladera erosiva muy abrupta	Dlema	257,42	5,53
Ladera erosiva muy escarpada	Dleme	192,67	4,14
Ladera escarpada ondulada	Dleo	81,15	1,74
Ladera escarpada	Dlesc	404,16	8,68
Ladera inclinada	Dli	3,36	0,07
Ladera muy abrupta	Dlma	449,56	9,65
Ladera denudada muy escarpada	Dlme	130,71	2,81
Ladera muy escarpada	Dlmesc	36,02	0,77
Ladera ondulada abrupta	Dloa	24,32	0,52
Ladera ondula muy abrupta	Dloma	171,83	3,69
Lomo residual	Dlor	19,76	0,42
Montículo denudacional	Dmo	26,70	0,57

A continuación, se hace una corta descripción de las geoformas encontradas en el área de estudio, organizadas en sus respectivos ambientes, estas descripciones están basadas como se mencionó con anterioridad en la propuesta hecha por el SGC en 2012, en el anexo A “Glosario de términos geomorfológicos” y adaptado a las necesidades del área de interés a escala 1:25.000:

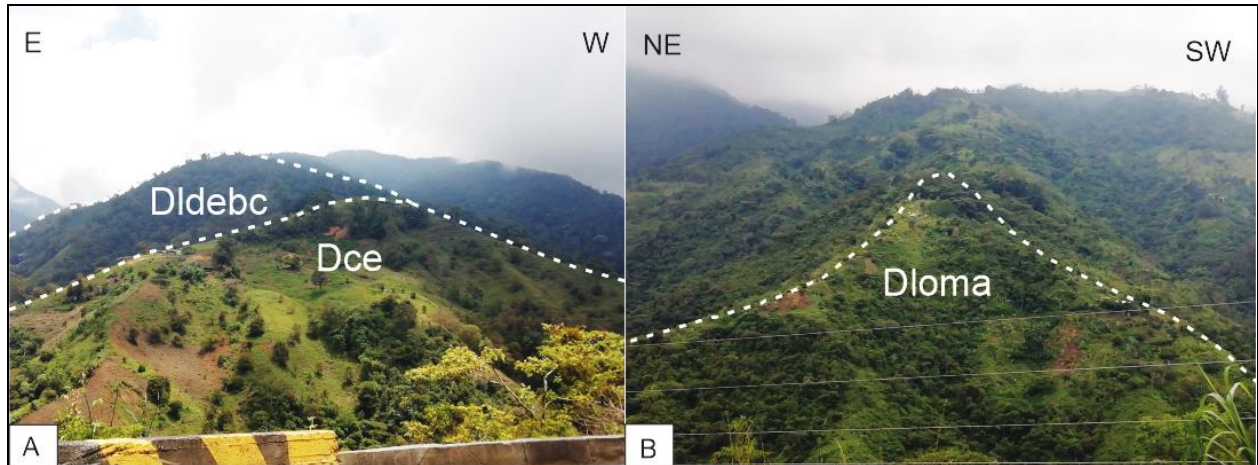
Ambiente denudacional. De los 212 polígonos reportados en toda la capa de subunidades, 203 de estos corresponden a geoformas denudacionales, siendo alrededor del 96% del área de estudio perteneciente a este ambiente (Tabla 4).

Cima (Dc): Superficie amplia convexa a plana, dispuesta en franjas alargadas que bordean algunas divisorias de agua. Presentan pendientes planas a inclinadas con anchos entre 200 a 800 m. Esta unidad se encuentra en la vereda Alsacia donde los procesos denudativos son intensos y las alturas poco prominentes en comparación con otras veredas del municipio.

Colina denudada (Dcde): Esta subunidad consiste en una propuesta para la presente investigación dada las características morfométricas de la subunidad, teniendo una longitud de más de 1 km y un relieve entre los 200 y 400 m, consiste en una unidad de igual descripción a una colina remanente, salvo que, al no estar comprobado su origen tectónico, se atribuyen sus características a procesos denudativos muy presentes en la zona.

Cerro desnudado (Dce): Esta subunidad también corresponde a una propuesta de este proyecto, las características morfométricas hacen que sea un cerro residual, sin embargo, su origen está asociado a procesos de erosión de una sola unidad observada en el área de estudio más que a cambios por erosión diferencial de dos unidades diferentes. Esta unidad se encuentra hacia los extremos norte y sur del área de estudio, pero su concentración principal está en la vereda Alsacia (Figura 18).

Figura 18. *Geoformas controladas en campo donde en A) se observa un lomo denudado de longitud baja (Dldebc) y un cerro denudado (Dce) y en B) se observa una ladera ondulada muy abrupta (Dloma)*



Coluvion (Dco): Subunidad en forma de cono o lóbulo resultante del desplazamiento y la acumulación de materiales sobre las laderas por efecto de procesos hidro-gravitacionales en materiales saturados y no saturados. Esta unidad no tiene una distribución específica, sin embargo, las entidades cartografiadas en esta capa tienen una tendencia a ubicarse hacia la parte este del área de estudio.

Cerro remanente (Dcrem): Prominencia topográfica parcialmente aislada de morfología alomada (elevación entre 50 - 200 m) que sobresale de la topografía circundante. La subunidad presenta cimas redondeadas y convexas cuyo ancho no suele ser continuo longitudinalmente debido a la acción denudativa que le dio origen y que lo sigue formando. Esta unidad se encuentra ubicada en la vereda Aguablanca hacia el sector oeste.

Ladera abrupta (Dla): Superficie inclinada de forma irregular y/o ondulada, de longitud corta a larga (51 a 1000 m) de pendiente promedio abrupta (15° - 20°), acompañada en menor medida por algunos sectores de pendientes muy inclinadas (10° - 15°) y muy abruptas (20 - 30°).

Esta unidad se encuentra especialmente hacia la parte norte de la cuenca y más específicamente en la vereda Aguablanca (Figura 19).

Figura 19. Control de la Geomorfología en Campo 2



Nota: Ladera abrupta (Dla), Ladera muy abrupta (Dlma), Lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm), Ladera erosiva ondulada (Dleo), Ladera escarpada (Dlesc) y Lomo denudado bajo de longitud corta (Dldebc)

Lomo angosto (Dlan): Geoforma alargada y alomada de inclinada a sub-horizontal, desarrollada por corrientes de agua que erosionaron y profundizaron, con cima angosta, plana a redondeada. Las laderas son predominantemente cortas (50 m a 250 m), limitada por laderas muy inclinadas a muy escarpadas ($11^\circ - 45^\circ$). No presentan movimientos en masa debido a su baja pendiente. Esta unidad se encuentra ubicada en la vereda Aguablanca hacía el sector oeste.

Lomo denudado bajo de longitud corta (Dldebc): Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor que 250 m y la longitud

del eje principal es menor que 250 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. Esta unidad se encuentra distribuida por toda la cuenca, sin embargo, su mayor concentración se encuentra hacia el norte de la vereda Aguablanca (Figura 19).

Lomo desnudo bajo de longitud larga (Dldebl): Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor de 250 m y la longitud del eje principal es mayor que 1000 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. Esta unidad se encuentra distribuida por toda la cuenca, sin embargo, sus mayores concentraciones se encuentran hacia el sur de la vereda Aguablanca y también hacia el sur de la vereda Alsacia (Figura 20).

Lomo desnudo bajo de longitud media (Dldebm): Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor que 250 m y el eje principal tiene una longitud entre 250 m y 1000 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. Esta unidad se encuentra distribuida por toda la cuenca, sin embargo, su mayor concentración se encuentra hacia nororiente de la vereda Aguablanca (Figura 19).

Ladera desnuda (Dlden): Superficie de pendientes abruptas a escarpadas (16° - 45°), con longitud de hasta 1000 m, de forma irregular, cóncava y/o convexa, con patrones de drenaje subparalelo. Esta unidad se encuentra distribuida principalmente hacia los extremos de la cuenca, sin embargo, su mayor distribución se encuentra en las veredas Alsacia y Aguablanca.

Ladera disectada (Dldi): Superficie ondulada, convexa o parcialmente cóncava con longitud es que varían ampliamente (120 – 1500 m), de pendientes muy abruptas a escarpada. Su génesis obedece a los procesos de incisión generada por una alta densidad de drenaje. Esta

unidad se encuentra distribuida en casi toda la cuenca, sin embargo, se observa una ligera concentración hacia la parte sur, principalmente en la vereda Helechales (Figura 20).

Ladera erosiva muy abrupta (Dlema): Superficie de forma irregular, alomada y elongada, con cimas agudas a redondeadas estrechas, presenta pendientes muy abruptas (21-430 m), con una ladera de longitud moderadamente larga (25– - 500 m), la forma es convexa, cóncava y recta, el drenaje es subparalelo a dendrítico con alta disección. Esta unidad se concentra principalmente en la vereda Aguablanca en su sector norte (Figura 21).

Ladera erosiva muy escarpada (Dleme): Superficie de forma irregular, alomada y elongada, con cimas agudas a redondeadas estrechas, presenta pendientes escarpadas (31°-45°), con una ladera de longitud moderadamente larga (250-500 m), la forma es convexa, cóncava y recta, el drenaje es subparalelo a dendrítico con alta disección. Esta unidad se encuentra concentrada en la parte central de la cuenca, más específicamente hacía en sur de la vereda Helechales y el norte de la vereda Aguablanca (Figura 21).

Ladera escarpada ondulada (Dleo): Ladera elongada, con una inclinación escarpada (31°-45°), laderas de longitud muy larga a extremadamente larga (501-2500 m), de formas convexas y cóncavas. Esta unidad se concentra principalmente en la vereda Helechales (Figura 19).

Ladera escarpada (Dlesc): Superficie inclinada de forma recta y/o convexa, eventualmente compleja, de longitud moderada a muy larga (201 a 2500 m), de pendiente predominantemente escarpada (30° - 45°), acompañada en menor medida por algunos sectores de mayor pendiente. Esta unidad predomina en la parte oeste de la cuenca (Figura 20).

Figura 20. Control de la Geomorfología en Campo 3

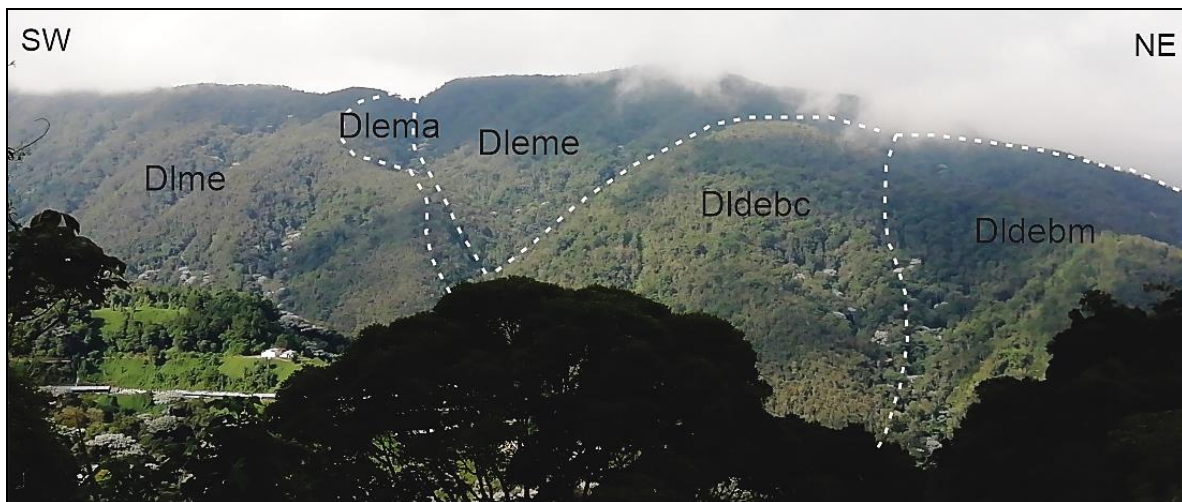
Nota: Lomos denudados bajos de longitud larga (Dldebl), Ladera escarpada (Dlesc), Ladera denudada abrupta (Dlda) y ladera disectada (Dldi)

Ladera inclinada (Dli): Superficie inclinada de forma irregular y/o ondulada, de longitud corta a moderada (51 a 500 m), eventualmente larga (501 - 1000 m) de pendientes inclinadas a muy inclinadas (6° - 15°), acompañada en menor medida por algunos sectores de pendientes abruptas (15° - 20°). Esta unidad se encuentra cerca al casco urbano del municipio de Floridablanca al extremo sur de la cuenca.

Ladera muy abrupta (Dlma): Superficie inclinada de forma convexa y/o compleja, eventualmente recta, de longitud moderada a larga (201 a 1000 m), de pendiente predominantemente muy abrupta (21° - 30°), acompañada en menor medida por algunos sectores de mayor pendiente. Esta unidad se encuentra distribuida a lo largo de toda la cuenca, su presencia más notable está en la parte oeste de la cuenca (Figura 19).

Ladera desnuda muy escarpada (Dlme): Superficie alomada y elongada, laderas de longitud moderada (251-500 m), de formas rectas y cóncavas, con pendientes escarpadas (31°-45°). Presenta drenaje dendrítico a subparalelo con alta disección. Esta unidad se encuentra en el sector este de las veredas Aguablanca y Alsacia (Figura 21).

Figura 21. Control de la Geomorfología en Campo 4



Nota: se observan principalmente laderas erosivas (Dlme, Dlma, Dlem) y Lomos desnudos (Dldebc y Dldebm). Las laderas de la foto se ubican en la vereda Agua blanca, en la zona central de la cuenca

Ladera muy escarpada (Dlmes): Superficie inclinada de forma recta, de longitud moderada a muy larga (201 a 2500 m), de pendientes predominantemente muy escarpadas (>45°) a escarpadas (30°-45°). Esta unidad se encuentra en las veredas Alsacia, Helechales y Aguablanca únicamente.

Ladera ondulada abrupta (Dloa): Superficie en declive de morfología alomada o colinada, con pendientes que varían de 15° a 20°, su longitud varía entre corta y muy larga. El

patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Esta unidad cuenta con una entidad al extremo norte y otra en el extremo sur de la cuenca.

Ladera ondulada muy abrupta (Dloma): Superficie en declive de morfología alomada o colinada, con pendientes que varían de 20° a 30°, su longitud varía entre corta y muy larga. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Esta unidad se encuentra en el sector norte y sur de la cuenca principalmente, sin embargo, su mayor concentración está en la parte central de la vereda Alsacia (Figura 18).

Loma residual (Dlor): Prominencias topográficas con relieve relativo bajo (<200 m) sobre su nivel de base local, de morfología alomada y elongada. Esta unidad se encuentra en la vereda Alsacia y Helechales.

Montículo denudacional (Dmo): Elevación del terreno con una altura menor de 50 m sobre su nivel de base local, con una morfología colinada, cóncava o convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente. Esta unidad se encuentra en las veredas Casiano y Aguablanca.

Ambiente fluvial. Los polígonos que forman parte de este ambiente están asociados principalmente a los márgenes del río frío y a su movimiento a lo largo de los años. Corresponde a 6 polígonos que representan alrededor del 3% de la totalidad de estos y ocupan un total de 27 ha que equivalen al 0,6% de la totalidad de la zona de estudio (Tabla 8). A continuación, se presenta las geoformas identificadas en la región de estudio:

Plano o llanura de inundación (Fpi): Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza. Incluye los planos fluviales menores en formas de “U” o “V”, al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontanos. En

regiones montañosas, donde las corrientes fluviales tienden a unirse con sus tributarios para formar el cauce principal, la red de drenaje es de tipo subparalelo de mediana densidad, se presentan como superficies estrechas, alargadas y profundas (Figura 22).

Figura 22. *Geoformas Fluviales ubicadas en Puente Rojo sobre el Río Frío correspondientes a Llanura de Inundación (Fpi) y Escarpe de Terraza Aluvial (Ftae)*

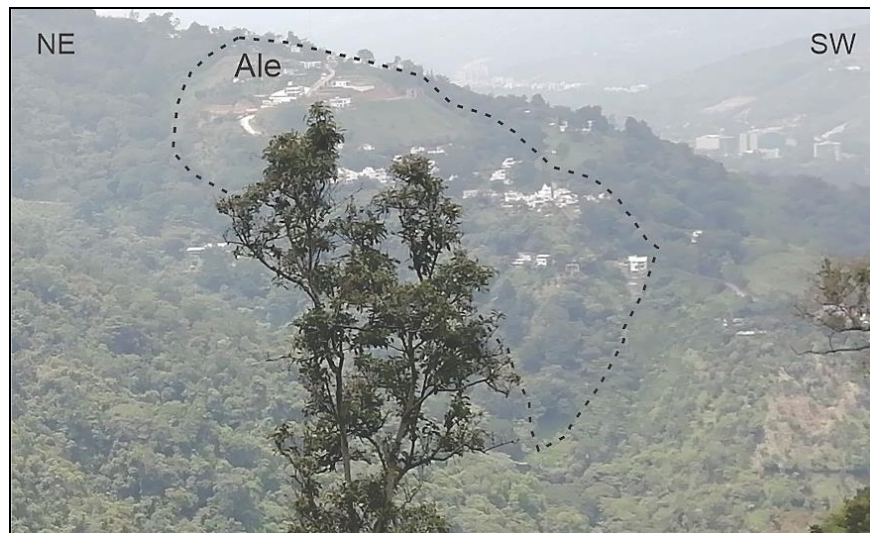


Terraza de acumulación alta (Ftaa): Superficie plana de varios metros de extensión, con pendientes suavemente inclinadas a inclinadas (5° a 10°), en la parte alta limitadas por escarpes. Hacen parte de la antigua llanura de inundación y de abanicos aluviales que fueron basculadas y sometidas a procesos denudativos intensos, que dejaron una morfología suavemente inclinada.

Escarpe de terraza de acumulación (Ftae): Plano vertical a subvertical, escalonado, excavado en sedimentos aluviales que bordean las terrazas de acumulación. Su origen es relacionado a la incisión y profundización del cauce. La altura de los escarpes puede alcanzar decenas de metros (Figura 22).

Ambiente antrópico. A este ambiente se le asignan 3 polígonos de una misma geoforma, los cuales corresponden a un poco más del 1% de la totalidad de los mismo y en cuanto a su área, tienen en conjunto 46 hc que representan un 0,9% del área de estudio. La geoforma en particular se trata de *laderas explanadas*, las cuales están asociadas a terrenos donde se han realizado cortes de laderas con el fin de adecuar terrenos para viviendas e infraestructuras en este caso particular, esto es evidente debido a que el casco urbano no tiene como expandirse hacía su margen izquierdo, por lo que éstas explanaciones se dan con más frecuencia en la zona rural hacía el margen derecho donde se encuentra la zona de estudio, un ejemplo de esto son las explanaciones de mayor dimensión en la cuenca, que se encuentran en la vereda Guarumales y Casiano oriental (Figura 23).

Figura 23. *Geoforma de origen Antrópico Ladera Explanada (Ale) ubicada en la Vereda Casiano*



7.1.2.2 Capa de Unidades Geológicas Superficiales. En el área de estudio que corresponder a la parte alta de la cuenca del río frío se cartografiaron en total 13 unidades geológicas superficiales: 2 unidades de roca de calidad mala, 3 unidades de roca de calidad muy mala, 1 unidad de roca de calidad regular y 7 unidades de suelo residual (Tabla 5).

Figura 24. Diagrama ilustrativo que muestra el porcentaje de los materiales presentes en la cuenca del Río Frío

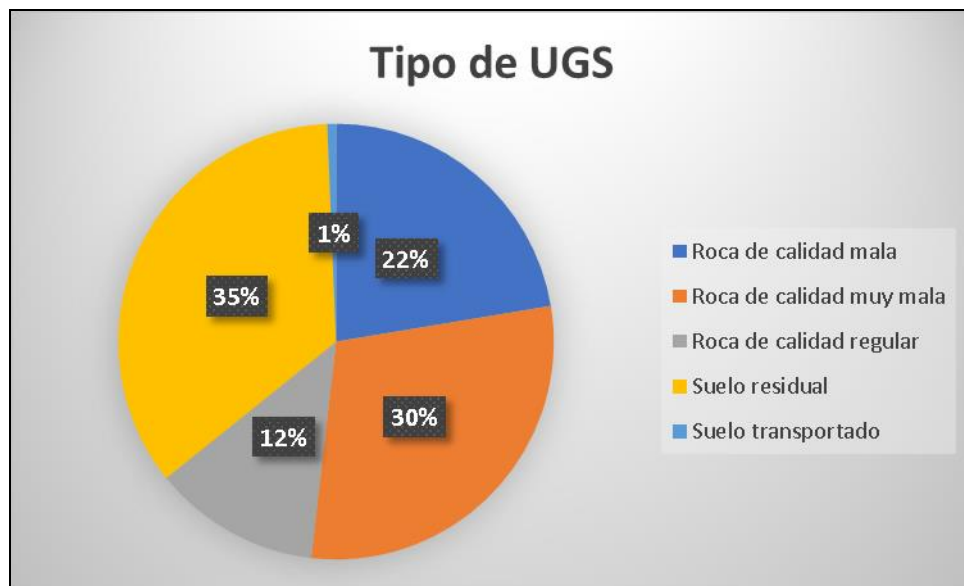
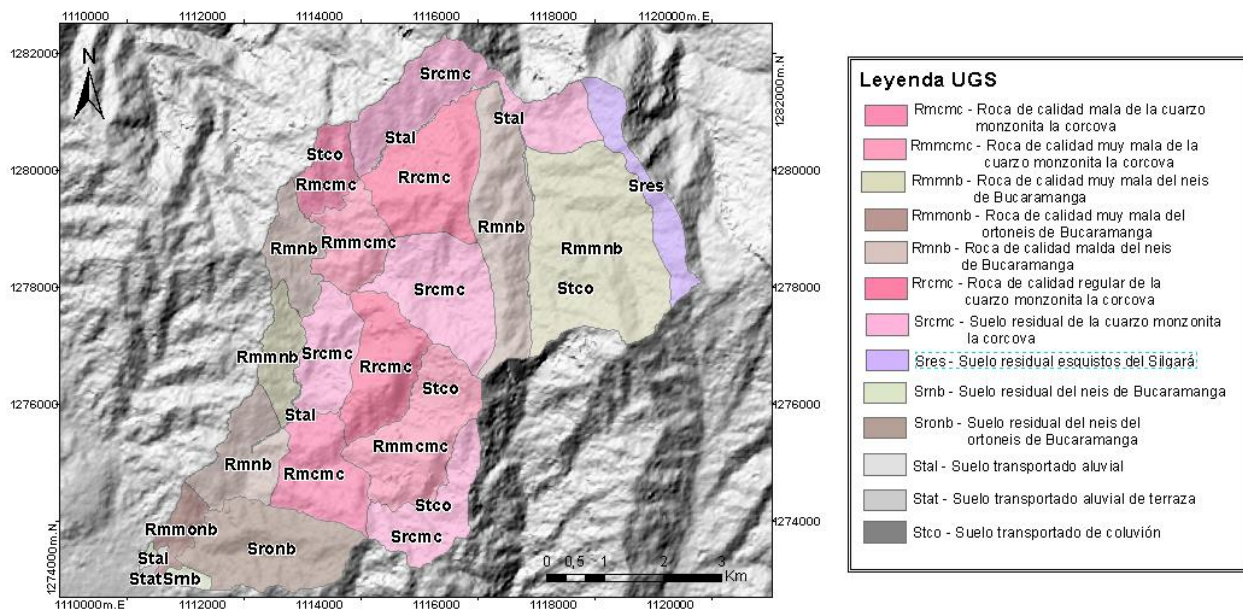


Tabla 5. Listado de las Unidades Geológicas Superficiales Cartografiadas con su Respectiva Área en la Cuenca.

UGS	Nombre ugs	Área (ha)	Área (%)
Rmcmc	Roca de calidad mala de cuarzomonzonita la corcova	344,69	7,40
Rmmcmc	Roca de calidad muy mala de cuarzomonzonita la corcova	503,11	10,80
Rmmnb	Roca de calidad muy mala del Neis de Bucaramanga	797,66	17,12
Rmmonb	Roca de calidad muy mala del ortoneis de Bucaramanga	70,78	1,52
Rmnb	Roca de calidad mala del Neis de Bucaramanga	697,92	14,98

UGS	Nombre ugs	Área (ha)	Área (%)
Rrcmc	Roca de calidad regular de cuarzomonzonita la corcova	577,98	12,41
Srcmc	Suelo residual de la cuarzo monzonita la corcova	1094,06	23,49
Sres	Suelo residual de los esquistos del Silgara	162,49	3,49
Smb	Suelo residual del neis de Bucaramanga	29,79	0,64
Sronb	Suelo residual del ortoneis de Bucaramanga	349,76	7,51
Stal	Suelo transportado aluvial	21,73	0,47
Stat	Suelo transportado aluvial de terraza	5,18	0,11
Stco	Suelo transportado de coluvión	3,22	0,07
		4658,37	100

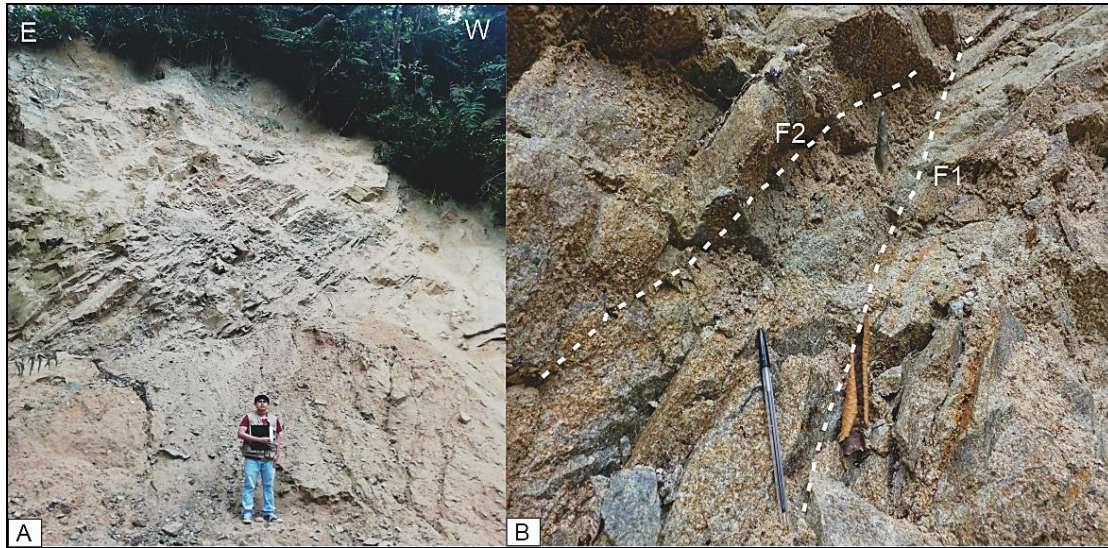
Figura 25. Mapa final de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) a escala 1:25.000 para la cuenca del Río Frío



Unidades de roca: Para la clasificación de un material como roca, varios factores se tienen en cuenta, pero se destaca el Índice Geológico de Resistencia o GSI por sus siglas en inglés como mínimo, este es “un sistema que utiliza el carácter geológico del material rocoso junto con la evaluación visual del macizo, como una forma para la selección de parámetros que permiten la predicción de su resistencia y deformabilidad” (SGC,2017). Este factor está relacionado con el análisis geomecánico, el cual es ideal para la clasificación de macizos rocosos. A partir de lo anterior, se describen las siguientes unidades de roca:

Roca de calidad mala de la cuarzomonzonita la Corcova (Rmcmc): Para esta unidad se estimó un índice geológico de resistencia $GSI = 20 - 40$, caracterizándose por una estructura descompuesta debido al fracturamiento y meteorización, posee también superficies lisas y en algunos sectores presenta relleno poco consolidado y arcilloso, por lo cual se clasifica como macizo de calidad mala (Tipo VI y VII). Presenta superficies de discontinuidad con una alta persistencia y a nivel composicional presenta fragmentos de roca de tamaño de grano medio con cuarzo y feldespato cristalino diseminado entre la matriz que rellena las fracturas. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización de III, lo cual permite clasificarla como roca modernamente descompuesta. La resistencia a la compresión uniaxial estimada mediante índices de campo se encuentra en el rango entre 50 – 100 Mpa, que corresponde a una roca dura a muy dura. Se encuentra ubicada en la zona central del área de estudio hacia el occidente de las veredas Aguablanca, Helechales y Alsacia (Figura 26).

Figura 26. Fotografías de Rocas de Calidad Mala de la Cuarzomonzonita la Corcova (*Rmcmc*)



Nota: en A) escala de afloramiento sobre un movimiento en masa y B) A mayor detalle donde se observan dos familias de diaclasas F1 y F2

Roca de calidad mala del neis de Bucaramanga (Rmnb): Para esta unidad se estimó un índice geológico de resistencia $GSI = 30 - 40$, caracterizándose por una estructura blocosa debido al alto fracturamiento y angularidad de los bloques sin una presencia destacable de material muy particulado acumulándose en las fracturas, por lo cual se clasifica como macizo de calidad mala (Tipo VII). Presenta múltiples direcciones en sus discontinuidades (N62, N73, N110...) cuya persistencia en el afloramiento es de baja a muy baja, a nivel de estructura aún conserva una foliación visible y en cuanto a su composición priman los bloques donde sobresalen fenocristales de cuarzo y plagioclasa con presencia de biotita o muscovita. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) se obtuvo un grado de meteorización III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente descompuesta. La resistencia a la compresión uniaxial estimada mediante índices de campo se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponder a una roca moderadamente dura. Se observan además ventanas muy

locales donde la calidad de la roca es regular, sin embargo, no se toma como una UGS debido a una mínima área cartografiada. Se encuentra hacia los extremos del área de estudio, hacia el oeste de la vereda Helechales y Aguablanca y también hacia el oriente de esta última (Figura 27).

Figura 27. Fotografías de Rocas de Calidad Mala del Neis de Bucaramanga (*Rmnb*)



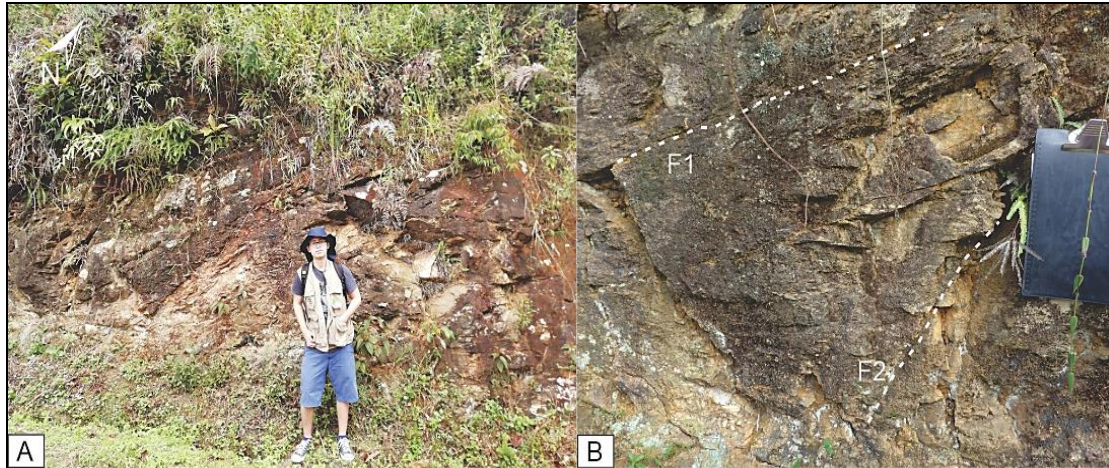
Nota: donde A) ilustra a escala de afloramiento y B) una muestra de mano donde se puede ver la foliación

*Roca de calidad muy mala de la cuarzomonzonita la Corcova (*Rmmcmc*):* Esta unidad se recoge y describe a partir de datos secundarios como fragmentos de roca y sectores muy locales de material encontrados en los polígonos contiguos, por lo tanto se hace la aclaración de que las características aquí descritas no provienen de un afloramiento de este tipo de roca. Esta unidad presenta un GSI de 10 – 40, a nivel composicional esta unidad es muy similar macroscópicamente a su semejante de mayor calidad la Roca de calidad mala del neis de Bucaramanga, sin embargo, debido a lo observado mediante fotointerpretación se presume que existe un mayor fracturamiento de los cristales, así como un menor tamaño. Por las características anteriores y, se clasifica como macizo de calidad muy mala (Tipo VIII). Por

último, de acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) se obtiene un grado de meteorización IV, lo cual permite clasificarla como roca altamente meteorizada o saprolito grueso. Se encuentra hacía el sur de la vereda Aguablanca y el norte de la vereda Alsacia.

Roca da calidad muy mala del neis de Bucaramanga (Rmmnb): Para esta unidad se estimó un índice geológico de resistencia $GSI = 0 - 20$, caracterizándose por una estructura desintegrada debido al alto fracturamiento y especialmente a la combinación de fragmentos tanto redondeados como angulares relleno el macizo fracturado, debido a esto se clasifica como macizo de calidad muy mala (Tipo VII). Presenta discontinuidades abiertas en dos direcciones con una baja persistencia, su relleno se compone principalmente de una matriz arcillosa y a nivel macroscópico solo se logran identificar cristales de cuarzo y feldespatos. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) se obtiene un grado III a IV, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente descompuesta a saprolito grueso. La resistencia a la compresión uniaxial estimada mediante índices de campo se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponden a una roca moderadamente dura. Se encuentra hacía el suroccidente de la vereda Aguablanca y entre el oeste de esta última y la vereda Guarumales (Figura 28).

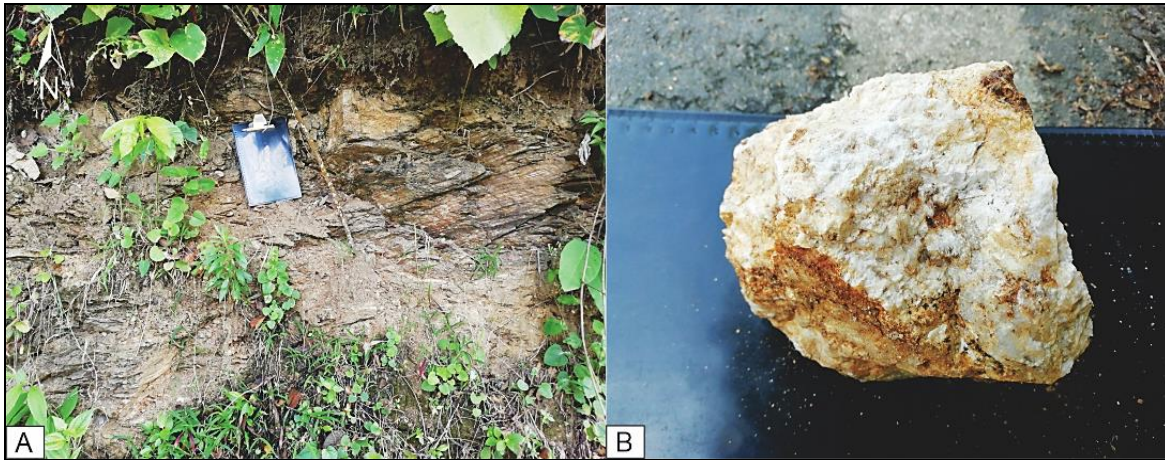
Figura 28. Fotografías de Rocas de Calidad muy Mala del Neis de Bucaramanga (Rmmnb)



Nota: donde en A) se observa a escala de afloramiento y en B) se muestra a escala detallada dos familias de diaclasas F1 y F2

Roca de calidad muy mala del ortoneis de Bucaramanga (Rmmonb): Esta unidad se recoge y describe mediante datos secundarios encontrados en polígonos contiguos, por lo tanto se hace la aclaración de que las características aquí descritas no provienen de un afloramiento de este tipo de roca. La unidad tiene características similares a la roca de calidad mala del neis de Bucaramanga (Rcmmnb), diferenciándose de este en la cantidad de cristales de biotita y muscovita encontrados, los cuales además de ser más numerosos, son más grandes, sin embargo, la roca en la que se encuentran suele estar altamente fracturada y el grado de meteorización es mucho mayor por lo que su calidad también es menor. Se encuentra hacia el suroccidente de las veredas Alsacia y Casiano, en la parte más baja del río frío para la cuenca (Figura 29).

Figura 29. Fotografías de Rocas de Calidad muy Mala del Ortoneis de Bucaramanga (*Rmmonb*)

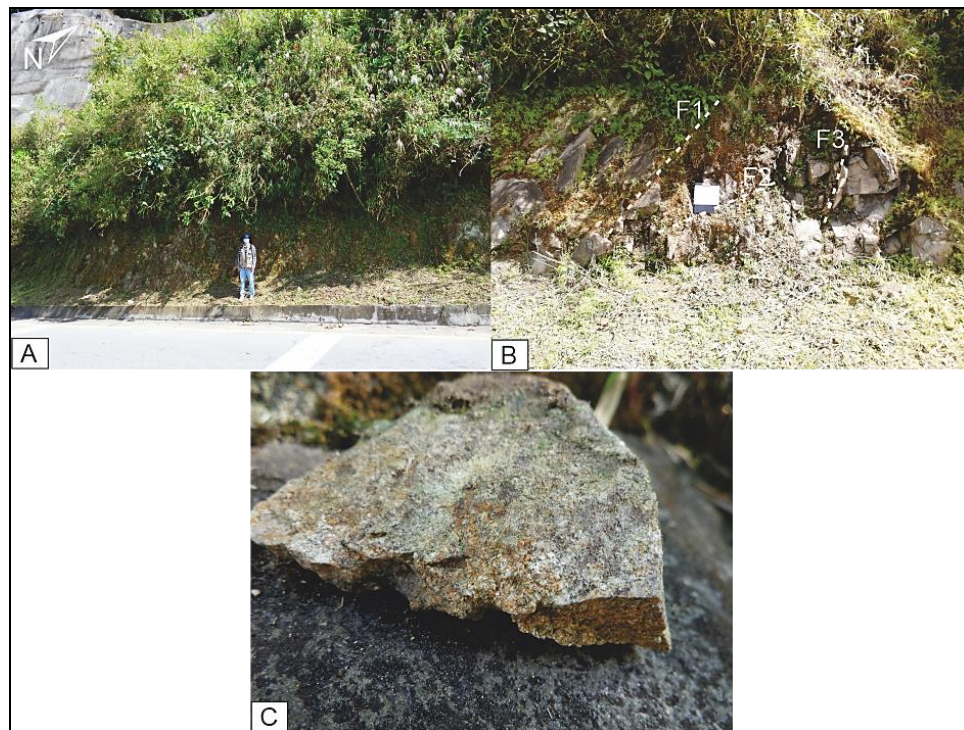


Nota: donde en A) se muestra a escala de afloramiento y en B) se observa a escala de muestra de mano distinguiéndose algunos cristales minerales característicos de este material

Roca de calidad regular de la cuarzomonzonita la corcova (Rrcmc): Para esta unidad se estimó un índice geológico de resistencia $GSI = 40 - 60$, caracterizándose por una estructura blocosa a muy blocosa debido a la angularidad de los bloques, las 3 familias de diaclasas (N200, N270 y N172) que presenta y a la leve presencia de una deformación más plástica típica de una estructura blocosa/alterada, debido a esto se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo IV – V). Presenta discontinuidades amplias con una persistencia de media a baja dentro de las cuales se aprecia un nivel arcilloso cerrado (<2 cm). En la roca fresca solo se aprecian algunos cristales de tamaño medio de cuarzo y feldespato. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) se obtiene un grado de meteorización de II a III, lo cual permite clasificarla como una roca débilmente descompuesta a moderadamente descompuesta. Por último, su resistencia a la compresión uniaxial estimada mediante índices de campo se encuentra en el rango entre 100 – 250 Mpa, que corresponder a una roca muy dura. Como observación se tiene que el muestreo pertenece a una ventana local encontrada en la unidad contigua “Roca de mala calidad de la

cuarzomonzonita la corcova”, esto debido a que el material que predomina es de mala calidad, pero aumenta hacia el noreste, zona con mayor dificultad de acceso. Se encuentra hacia el norte de las veredas Helechales y Aguablanca (Figura 30).

Figura 30. *Fotografías de Rocas de Calidad Regular de la Cuarzomonzonita la Corcova (Rrcmc)*

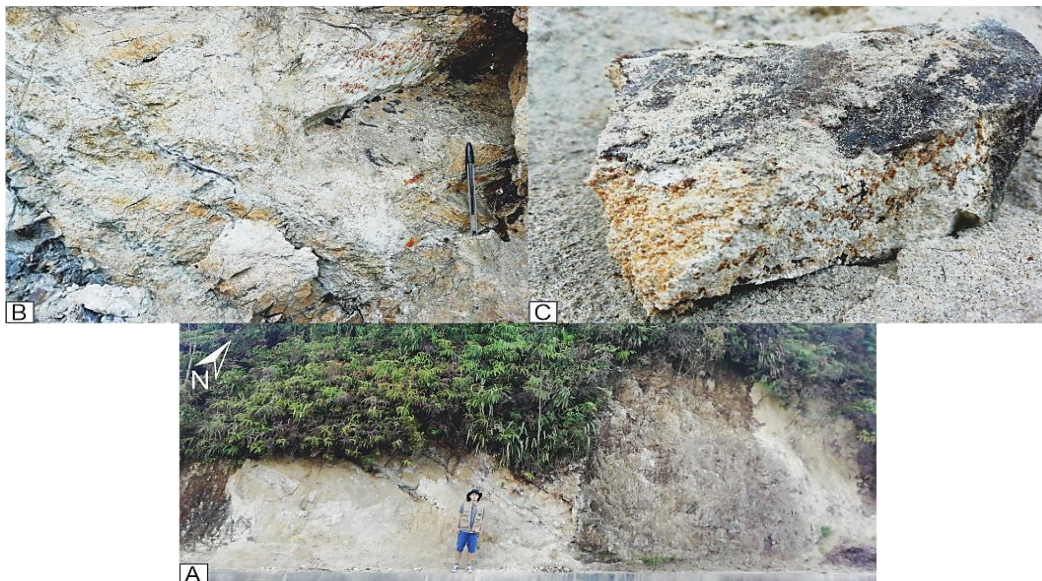


Nota: donde en A) se observa a escala de afloramiento, en B) se observan a escala detallada señalando las familias de diaclasas F1, F2 y F3; y en C) se observa la roca como muestra de mano

Unidades de suelo: Se identificaron las siguientes unidades de suelo teniendo en cuenta las características de los mismos mencionados en la guía metodológica, entre las cuales destacan aspectos como estructura, textura, forma, tamaño, estado de la metoerización, entre otras:

Suelo residual de la cuarzomonzonita la Corcova (Srcmc): Suelo originado a partir de la desintegración física producto de la acción mecánica antrópica y descomposición química producto de la escorrentía superficial y acción vegetal. Su estructura es matriz-soportada (matriz = 70%, clastos = 30%) pobremente seleccionada. Las rocas que lo componen presentan formas irregulares y subangulares. No presenta gradación, se observan tamaños de arenas medias (0,42 mm) a arenas gruesas (<4mm) con un estado de meteorización alto. La matriz presenta colores blancos a grisáceos con sectores pardos y se presenta principalmente húmeda, ligeramente plástica y con una consistencia media. Por último, se encuentran algunas estructuras como fisuras y grietas a lo largo de sus 4 metros de espesor. Este material se encuentra distribuido a lo largo de la zona central del área de estudio, teniendo presencia en casi todas las veredas a excepción de Casiano y Guarumales (Figura 31).

Figura 31. Fotografías del Suelo Residual de la Cuarzomonzonita la Corcova (Srcmc)

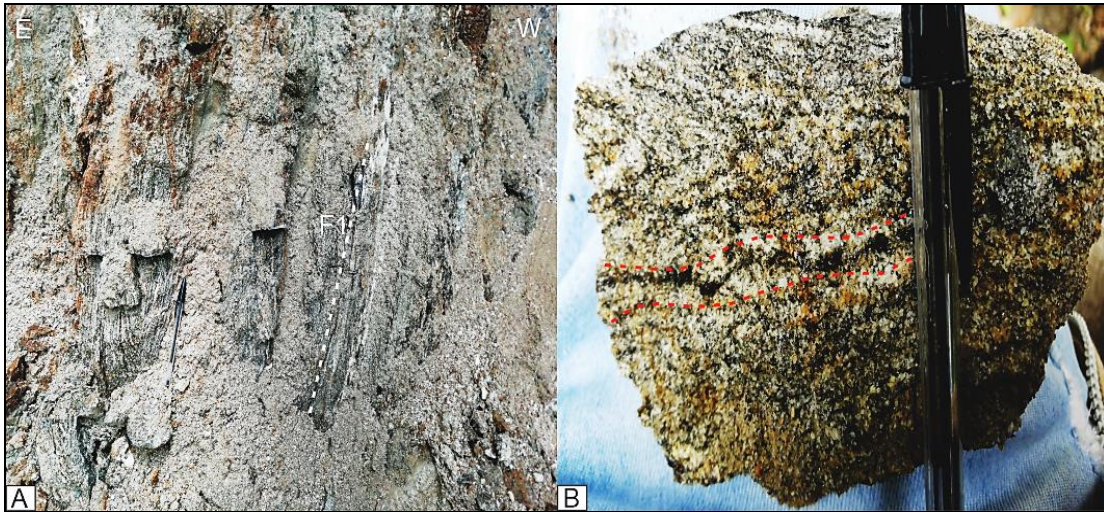


Nota: donde en A) Se observan a escala de afloramiento, en B) Se observan a mayor detalle y en C) se observa una muestra de mano

Suelo residual de los esquistos del silgara (Sres): Esta unidad se recoge mediante foto interpretación y observación en campo, sin embargo, no se encuentran afloramientos sin vegetación donde se vea claramente la composición del suelo formado, esto sumado al tamaño de la UGS, no permiten una toma de datos directa. El espesor medio de los afloramientos es de 3 metros, es principalmente matriz soportado (matriz = 85%, clastos 15%) moderadamente seleccionado. No presenta gradación y la matriz es principalmente arcillosa y húmeda. Por último, se ve ligeramente como estructura heredada la esquistosidad de los esquistos, sumado a los lineamientos observados a escala 1:25.000 durante la fotointerpretación. Esta unidad se encuentra únicamente hacia el este de la vereda Guarumales.

Suelo residual del ortoneis del Bucaramanga (Sronb): Suelo originado a partir de la descomposición química causada por la vegetación que crece sobre y dentro del mismo suelo, además de la acción de escorrentía superficial. Su estructura es intermedia (matriz = 40%, clastos = 60%) moderadamente seleccionada. Las rocas que lo componen presentan formas tabulares y alargadas ligeramente en dirección de la foliación e irregulares hacia la parte más meteorizada. Presenta una gradación normal hacia la base debido a la meteorización, se observan tamaños de arenas gruesas (2 – 4 mm) con un estado de meteorización alto. Los colores presentes tanto en la matriz como en la roca son pardos y grisáceos. La condición de la matriz es húmeda, ligeramente plástica y de consistencia media hacia el techo y alta a muy alta hacia la base. Se encuentra ocupando gran parte de la vereda Casiano (Figura 32).

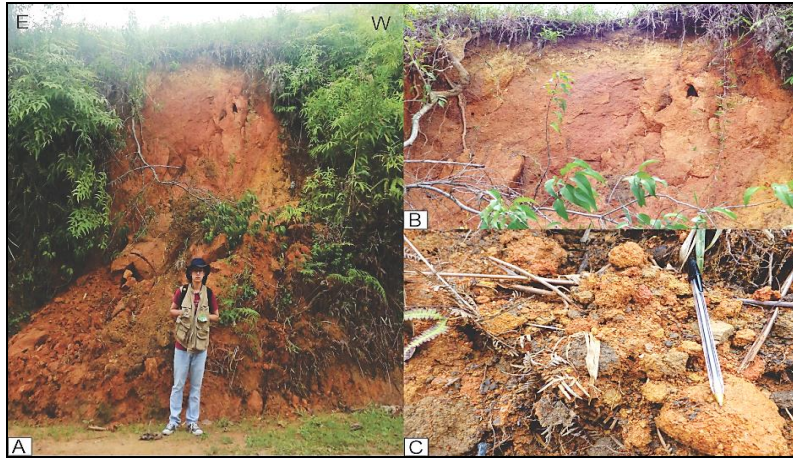
Figura 32. Fotografías del Suelo Residual del Ortoneis del Bucaramanga (Sronb)



Nota: donde en A) se muestra a detalle el afloramiento y parte de la foliación remanente y en B) se observa a tamaño de muestra de mano la foliación y el contenido mineral de la roca

Suelo residual del neis de Bucaramanga (Srnbn): Suelo originado a partir de la descomposición química causada por la vegetación y principalmente por la acumulación de agua producto de la alta pluviosidad y la escorrentía superficial. Su estructura es matriz soportada (matriz = 95%, clastos = 5%) bien seleccionada. Se encuentran clastos formando parte de la matriz con formas esféricas y bien redondeadas. No presenta gradación, se observan una granulometría fina con tamaños de limos-arcillas ($<0,075\text{mm}$) con un estado de meteorización muy alto y con un color predominantemente naranja oscuro. La matriz se encuentra en una condición mojada, muy plástica y de consistencia muy blanda. Por último, hay pequeños rastros de estructuras heredadas como foliación en los pocos bloques de mayor tamaño diseminados en la matriz a lo largo de sus 9 metros de espesor. Se encuentra hacia la parte oeste de la vereda Casiano y muy cerca al casco urbano de Floridablanca (Figura 33).

Figura 33. Fotografía Del suelo Residual del Neis de Bucaramanga (Srnrb)



Nota: donde en A) se observa a escala de afloramiento, en B) Se observa a detalle el escarpe del micro deslizamiento y en C) el suelo residual a detalle del que se compone el depósito (neis degradado)

Suelo transportado aluvial (Stal): Esta unidad se relaciona directamente con el material transportado por el Río Frío, más específicamente el material encontrado en el lecho y la llanura de inundación, esto debido a que las dimensiones del río en su cauce alto el cual abarca la zona de estudio, no es del todo cartografiable a la escala de trabajo. Para este tipo de unidades se analizaron depósitos no consolidados cercanos al lecho del río, estos tienen una estructura intermedia (matriz = 60%, clastos = 40%), con clastos de composición heterogénea, al igual que sus formas que varían desde angulosas hasta redondeadas abarcando intermedios entre ambos extremos, pobremente seleccionados con tamaños que van desde arenas medias (2 mm) hasta bloques (>5 m). La matriz es de colores pardos a verdes grisáceos, ligeramente plástica a plástica, muy mojada a mojada y compacidad débil (suelta). Se encuentra a lo largo del trayecto del Río Frío, el cual atraviesa todas las veredas (Figura 34).

Figura 34. Fotografía del Suelo Transportado Aluvial (Stal) donde se Observan parte de sus Características a lo Largo del Cauce Alto del Río Frío



Suelo transportado aluvial de terraza (Stat): Este tipo de suelo está relacionado con procesos de transporte, acumulación, incisión y erosión de corrientes, cada vez más comunes en el río frío a medida que se aleja de la parte más alta de su cauce. Tiene una morfología elongada con una pendiente suave a intermedia y se dispone de manera paralela al cauce del río especialmente hacía su margen izquierdo donde por sectores fue intervenido antropicamente. Corresponde a suelo consolidado con un espesor promedio de 3 m, de estructura intermedia a clasto-soportada, compuesto de fragmentos de composición heterogénea, de forma redondeada, esférica e irregular y subangular, con tamaños que van desde gravas finas (5 – 19 mm) a bloques (>5 m). La matriz es de colores pardos a verduzcos, húmeda a mojada y compacidad moderada. Se encuentre a lo largo del trayecto del Río Frío, el cual atraviesa todas las veredas (Figura 35).

Figura 35. Fotografía del Suelo Transportado Aluvial de Terraza (Stat)



Nota. donde se observa como la llanura de inundación empieza a tomar una pendiente cada vez más inclinada en proceso a convertirse en un escarpe

Suelo transportado de coluvión (Stco): Corresponde a depósitos de suelo que se desarrollan a partir de la ocurrencia de movimientos en masa en el área de estudio. (no debemos generalizar). Para este tipo de suelo no se tiene un acercamiento directo en campo del material debido a la poca accesibilidad, sin embargo, se tiene registros de varios depósitos de movimientos en masa cercanos a los grandes depósitos, estos, aunque de un menor tamaño (no cartografiable). Presentan estructura matriz soportada a intermedia con partículas de diferente tamaño (Desde arena gruesa de 4 mm hasta bloques de 1m), de formas irregulares a tabulares, angulares a subangulares con baja esfericidad, sin gradación y pobremente seleccionados, por último, su estado de meteorización es alto y su espesor es variable, entre los 5 – 10 m al igual que su longitud que van desde los 70 m a más de 300 m. Se encuentra al occidente y al oriente de las veredas Aguablanca y Alsacia respectivamente.

7.1.2.3 Capa de Variables Geométricas. Como se mencionó anteriormente, esta capa se ocupa específicamente del componente morfométrico, generando los insumos a partir del MDE, dentro de estos se tiene la curvatura y pendiente, este último, fundamental para el análisis geomorfológico. A continuación, se explicará en qué consisten estas variables y qué tratamiento se les dio para generar los mapas finales:

Pendientes: La guía define las pendientes como “el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyo valor se expresa en grados de 0 a 90”. Además, explica la importancia de esta variable relacionada con la distribución de agua en la ladera y las tensiones de corte en los materiales.

Para el mapa de pendientes se utilizaron 7 rangos de reclasificación, propuestos por Carvajal en 2012, los cuales se enfocan en una distribución más regular de los rangos hasta los 20° y amplía un poco el mismo a intervalos de 10° después de este valor, ajustándose así mejor a la ocurrencia de movimientos en masa que en otras propuestas de clasificación de rangos como la de Zuidam de 1986 que propone utilizar la guía, en donde los intervalos van hasta 55° y su distribución después de los 16° aumenta a 20° por rango, lo no se ajusta bien a la distribución de movimientos a la hora de buscar una tendencia clara.

Curvatura: Según la guía, este mapa “puede obtenerse como una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM y permite determinar el grado de Concavidad/Convexidad mediante el radio de curvatura de una celda según un plano vertical”. Para la reclasificación de esta variable se tienen en cuenta valores positivos y negativos, además de su cercanía al 0, donde

los valores positivos indican que una superficie es lateralmente convexa, los negativos que es lateralmente concava y un valor cercano a 0 que la superficie es lineal.

7.2 Análisis de Susceptibilidad por Movimientos en Masa

El análisis de susceptibilidad aplicado a las condiciones y limitaciones del proyecto donde los movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo se recomienda se tomo el método estadístico bivariado de pesos de evidencia, WofE, por sus siglas en inglés. Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza el procesamiento para la generación del mapa a partir de las capas que se generaron a lo largo del proyecto y por último, se realiza una zonificación de la susceptibilidad para el área de estudio según las categorías registradas.

7.2.1 Susceptibilidad por Movimientos en Masa Tipo Deslizamiento y Tipo Flujo (Método Estadístico Bivariado WofE)

Unidad de análisis: Se define como el área que agrupa el conjunto de condiciones comunes que difieren de las unidades adyacentes (SGC, 2017). De acuerdo con esto, se define como unidad de análisis el pixel, ya que este permite asignarle atributos cualitativos y cuantitativos y favorecen el manejo de la información en un entorno SIG. Para el caso de estudio actual, se usa un modelo digital de elevaciones (MDE) con un pixel de resolución de 12,5m x 12,5m, adquirido por el sensor ALOS-PALSAR en el año 2007 y facilitado por la página de la universidad de Alaska Fairbanks, Alaska Satellite Facility (University of Alaska Fairbanks, 2007).

Alistamiento de la información: De acuerdo con SGC (2017), se realizó el acondicionamiento de las capas temáticas a ser utilizadas para la aplicación de la metodología de zonificación. Para esto, se analizó la correlación entre los factores condicionantes y la ocurrencia de los movimientos en masa en el área de estudio, lo que permitió el análisis integral de los factores condicionantes y la congruencia temática entre las diferentes capas, antes de ser utilizadas en el análisis de susceptibilidad. Como resultado de dicho análisis, a continuación, se explican los ajustes realizados a las capas temáticas como actividad previa a la aplicación del método estadístico bivariado en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo:

Para la variable temática de UGS y SGMF, se filtraron las entidades que correspondían a suelo transportado de coluvión (Stco) y coluvión (Dco). En su lugar, se dejó la unidad circundante que representa las condiciones del terreno que en su momento se vieron afectadas por el movimiento en masa. Lo anterior teniendo en cuenta que el método estadístico bivariado asigna pesos de evidencia dependiendo de la cantidad de píxeles de movimientos en masa por cada una de las variables temáticas, en este caso de UGS y SGMF. Al dejar las entidades de Stco y Dco, las cuales coinciden directamente con los movimientos en masa, son estas unidades las que adquieren el mayor peso de evidencia y por lo tanto se incurre en un error sistemático al momento de aplicar el método.

Cada una de las capas temáticas usadas durante la modelación fueron convertidas de entidad tipo vector a ráster con un tamaño de píxel similar al del MDE con el objetivo de hacer el cruce y la extracción de la suma de píxeles para cada variable temática. Para las categorías de cada capa temática que no tienen evidencias de movimientos en masa (sin píxeles), se les asigna

un valor de 1 píxel ya que la ecuación para el cálculo de los pesos de evidencia no acepta valores de 0 píxeles.

En total, para la cuenca del Río frío, se encontró que hay cerca de 293.354 píxeles, mientras que para los movimientos en masa se tiene un total de 1.595 píxeles para el análisis. Para la modelación se usaron las capas de pendientes, curvatura, SGMF, UGS y la variable de agrupamiento.

Variable de agrupamiento: Corresponde a las zonas inestables del municipio en estudio (polígonos del inventario), las cuales han sido establecidas previamente en el IPM y que permiten establecer una relación espacial-estadística con cada uno de los factores condicionantes y la comprobación de las hipótesis de falla (SGC, 2017).

La variable de agrupamiento fue definida considerando el polígono que representa la totalidad de cada movimiento en masa tipo deslizamiento y flujo (es decir, el área de escarpe y el área de depósito). Para los movimientos tipo deslizamiento y flujos representados como punto en el inventario, se realizó un buffer de 25 m para poder incluirlos como área deslizada en la variable de agrupamiento.

De los 107 movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado que fueron registrados en el IPM se tuvieron en cuenta 8 más para la modelación dejando un total definitivo de 115, esto debido a que corresponden a los movimientos tipo punto que no tenían unas dimensiones cartografiables para el IPM, pero para fines del análisis son requeridos.

El área deslizada correspondiente a los movimientos tipo deslizamiento y flujo fue rasterizada para cada movimiento, obteniendo un total de 1.595 píxeles. Del área total deslizada, se escogió aleatoriamente el 70% de ésta, como la muestra para el cálculo de la función de susceptibilidad (83 movimientos que comprenden 1400 píxeles) y el 30% restante (35

movimientos que abarcan 195 píxeles) corresponde a la muestra para la validación de la función de susceptibilidad.

Hipótesis de falla: A partir del análisis de la información secundaria y la fotointerpretación de sensores remotos para la zona rural del municipio de Floridablanca, se planteó una hipótesis de falla preliminar, esta fue replanteada de acuerdo con los análisis realizados durante el control de campo, en función principalmente de los factores condicionantes de Unidades Geológicas Superficiales UGS, pendiente del terreno y Subunidades Geomorfológicas indicativas de inestabilidad. De acuerdo con esto, para los movimientos en masa tipo deslizamientos se plantea que:

Debido a sus características marcadas a nivel morfométrico y morfogenético, se divide el área de estudio en 3 zonas: oriental, central y occidental. La zona central donde se acumulan la mayor cantidad de movimientos en masa posee un índice de relieve relativo mucho mayor que las unidades ubicadas en la zona oriental y la zona occidental por lo que esto podría guardar una relación tectónica marcada por algún mecanismo estructural.

Los movimientos en masa tienden a concentrarse hacia la zona central del área de estudio y a su vez guardan una estrecha relación con las pendientes $>45^\circ$, esta tendencia a su vez guarda relación con la geología de la zona, debido a que la mayor parte central corresponde a materiales ígneos de diferente calidad.

La mayor cantidad de geoformas en el área de estudio hacen parte del ambiente denudativo, la gran mayoría de estas siendo laderas o lomos de diferentes tipos que podrían, dependiendo del material, propiciar movimientos en masa.

Las unidades geológicas superficiales presentes en la cuenca generalmente tienen una calidad mala a muy mala en sectores donde se encuentra habitando la población o vías principales y secundarias según las observaciones de campo. Pese a que no hay antecedentes recientes de eventos más que en la vía Bucaramanga-Pamplona, esta ocurrencia puede indicar que movimientos en masa pueden ocurrir en sitios poblados con características iguales en la cuenca.

Factores condicionantes y pesos de evidencia: Se realizó la modelación combinando los factores condicionantes seleccionados para explicar de la manera más congruente las condiciones reales del terreno y establecer cuáles son o serán las causas de la ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado en el área de estudio.

Para el cálculo de los pesos se realizó el alistamiento de la información de cada capa temática y definió la variable de agrupamiento, luego de esto se rasterizó para combinarla con cada una de las capas ráster de los factores condicionantes y análisis se hiciera en términos de píxeles. La relación entre los movimientos en masa y factores condicionantes que se obtiene como producto de dicha combinación se muestra mediante las tablas

Tabla

a

la

Tabla donde se encuentran información como las categorías de cada variable, cantidad de pixeles con movimientos en masa por categoría (MM), porcentaje de movimientos en masa por cada categoría (%MM), número de pixeles correspondiente a cada clase (CAT), porcentaje de cada clase (%CAT), las relaciones del movimiento en masa con el factor condicionante (N1,N2,N3 y N4) y por ultimo, los pesos de evidencia positivos, negativos y finales W_{i+} , W_{i-} y W_f respectivamente.

Tabla 6. Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (Verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos Dentro de la Variable de Pendientes.

Rango De pendientes	MM	% MM	CAT PEND	% CAT	N1	N2	N3	N4	wi+	wi-	wf
0-5	9	0,6%	2818	1,0%	9	1.390	2.809	289.747	-0,4005	0,0032	-0,4037
6-10	31	2,2%	10205	3,5%	31	1.368	10.174	282.382	-0,4507	0,0130	-0,4637
11-15	40	2,9%	20125	6,8%	40	1.359	20.085	272.471	-0,8760	0,0421	-0,9181
16-20	71	5,1%	37071	12,6%	71	1.328	37.000	255.556	-0,9131	0,0831	-0,9962
21-30	384	27,4%	118163	40,2%	384	1.015	117.77	174.777	-0,3830	0,1943	-0,5773
31-45	681	48,7%	96465	32,8%	681	718	95.784	196.772	0,3966	-0,2704	0,6670
>45	183	13,1%	9108	3,1%	183	1.216	8.925	283.631	1,4558	-0,1092	1,5650

Tabla 7. Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos dentro de la Variable SGMF.

SGMF	MM	% MM	CAT GMF	% CAT	N1	N2	N3	N4	wi+	wi-	wf
Dlma	109	8,0%	28370	10,7%	109	1.262	28.261	235.703	-0,2976	0,0304	-0,3280
Dloma	1	0,1%	10855	4,1%	1	1.370	10.854	253.110	-4,0320	0,0413	-4,0733
Dldebl	93	6,8%	38596	14,5%	93	1.278	38.503	225.461	-0,7656	0,0874	-0,8530
Dce	45	3,3%	5646	2,1%	45	1.326	5.601	258.363	0,4362	-0,0119	0,4482
Dldebm	245	17,9%	32872	12,4%	245	1.126	32.627	231.337	0,3686	-0,0649	0,4336
Dlden	60	4,4%	23662	8,9%	60	1.311	23.602	240.362	-0,7145	0,0489	-0,7634
Dldi	122	8,9%	43173	16,3%	122	1.249	43.051	220.913	-0,6058	0,0848	-0,6907
Ftaa	1	0,1%	330	0,1%	1	1.370	329	263.635	-0,5358	0,0005	-0,5363
Dla	4	0,3%	15924	6,0%	4	1.367	15.920	248.044	-3,0288	0,0593	-3,0880
Dlesc	120	8,8%	25485	9,6%	120	1.251	25.365	238.599	-0,0934	0,0094	-0,1028
Dmo	1	0,1%	1679	0,6%	1	1.370	1.678	262.286	-2,1651	0,0056	-2,1707
Dloa	1	0,1%	1533	0,6%	1	1.370	1.532	262.432	-2,0741	0,0051	-2,0791
Dlema	84	6,1%	16239	6,1%	84	1.287	16.155	247.809	0,0011	-0,0001	0,0012
Dldebc	61	4,4%	7763	2,9%	61	1.310	7.702	256.262	0,4219	-0,0159	0,4378
Dcrem	1	0,1%	1041	0,4%	1	1.370	1.040	262.924	-1,6867	0,0032	-1,6899
Dleme	267	19,5%	12167	4,6%	267	1.104	11.900	252.064	1,4632	-0,1705	1,6337

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

90

SGMF	MM	% MM	CAT GMF	% CAT	N1	N2	N3	N4	wi+	wi-	wf
Dlme	156	11,4%	8254	3,1%	156	1.215	8.098	255.866	1,3108	-0,0896	1,4004
Dlmesc	1	0,1%	2267	0,9%	1	1.370	2.266	261.698	-2,4655	0,0079	-2,4734
Dcd	27	2,0%	6843	2,6%	27	1.344	6.816	257.148	-0,2709	0,0063	-0,2772
Fpi	5	0,4%	1247	0,5%	5	1.366	1.242	262.722	-0,2548	0,0011	-0,2558
Ftae	1	0,1%	124	0,0%	1	1.370	123	263.841	0,4481	-0,0003	0,4484
Ale	1	0,1%	2911	1,1%	1	1.370	2.910	261.054	-2,7156	0,0104	-2,7260
Dc	1	0,1%	386	0,1%	1	1.370	385	263.579	-0,6930	0,0007	-0,6937
Dli	1	0,1%	219	0,1%	1	1.370	218	263.746	-0,1242	0,0001	-0,1243
Dleo	1	0,1%	5126	1,9%	1	1.370	5.125	258.839	-3,2816	0,0189	-3,3005
Dlor	1	0,1%	1242	0,5%	1	1.370	1.241	262.723	-1,8634	0,0040	-1,8674

Tabla 8. Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos dentro de la Variable UGS.

UGS	MM	% MM	CAT UGS	% CAT	N1	N2	N3	N4	wi+	wi-	wf
Sres	25	1,78%	10247	3,5%	25	1.378	10.222	282.329	-0,6734	0,0176	-0,6910
Srcmc	520	37,06%	69064	23,5%	520	883	68.544	224.007	0,4586	-0,1961	0,6547
Rrcmc	67	4,78%	36463	12,4%	67	1.336	36.396	256.155	-0,9575	0,0839	-1,0414
Srnrb	1	0,07%	1889	0,6%	1	1.402	1.888	290.663	-2,2032	0,0058	-2,2090
Stat	1	0,07%	330	0,1%	1	1.402	329	292.222	-0,4560	0,0004	-0,4564
Stal	5	0,36%	1371	0,5%	5	1.398	1.366	291.185	-0,2702	0,0011	-0,2713
Rmcmc	112	7,98%	21817	7,4%	112	1.291	21.705	270.846	0,0732	-0,0061	0,0793
Rmnb	221	15,75%	44029	15,0%	221	1.182	43.808	248.743	0,0506	-0,0092	0,0598
Sronb	1	0,07%	22083	7,5%	1	1.402	22.082	270.469	-4,6625	0,0778	-4,7403
Rmmonb	1	0,07%	4460	1,5%	1	1.402	4.459	288.092	-3,0627	0,0146	-3,0773
Rmmnb	162	11,55%	50390	17,1%	162	1.241	50.228	242.323	-0,3967	0,0657	-0,4624
Rmmcmc	287	20,46%	31811	10,8%	287	1.116	31.524	261.027	0,6410	-0,1148	0,7559

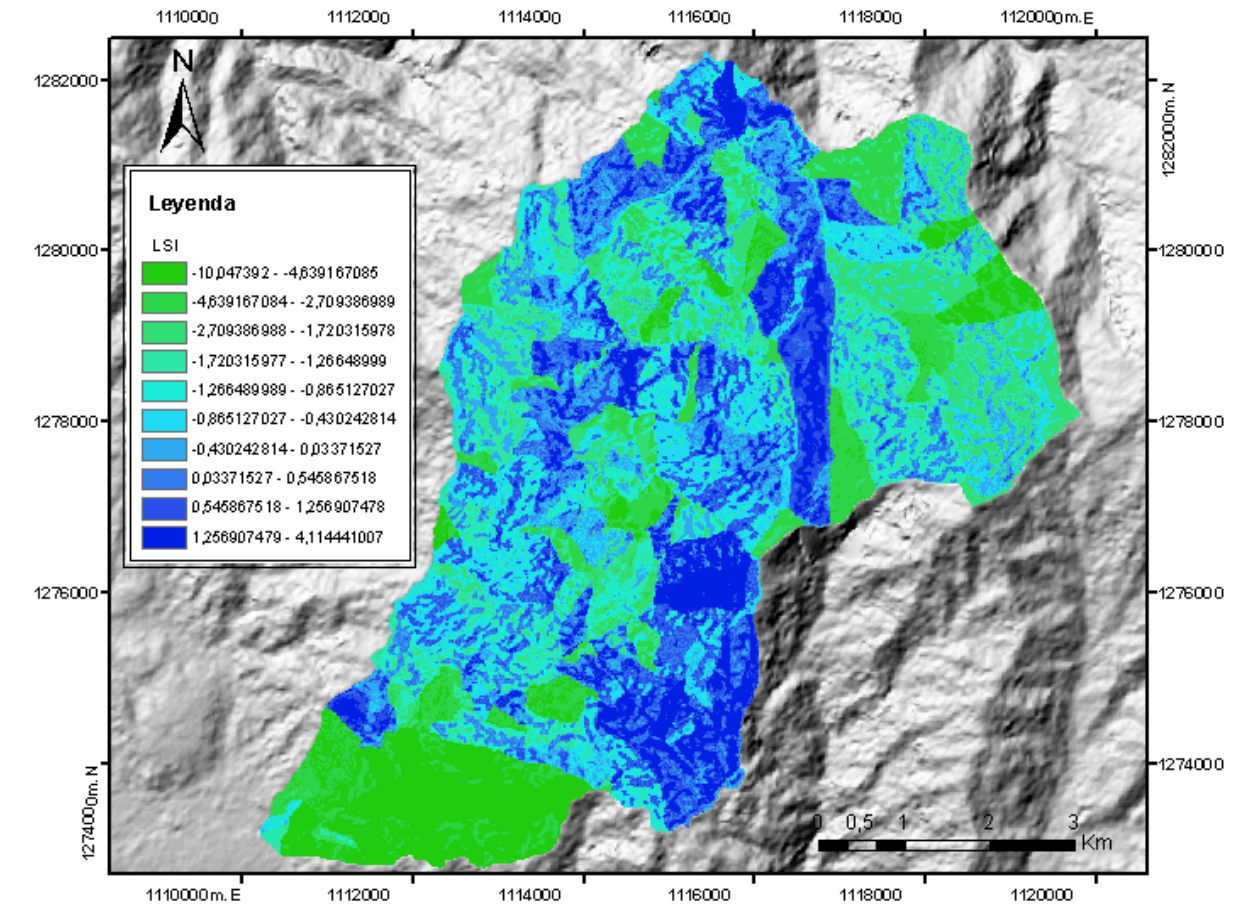
Tabla 9. Listado de los Pesos de Evidencia donde se Señala (verde) los Pesos Estadísticamente más Significativos dentro de la Variable Curvatura.

Rango	MM	% MM	CAT CURV	% CAT	N1	N2	N3	N4	wi+	wi-	wf
Cóncava	491	35,1%	92781	31,6%	491	908	92.290	200.266	0,1067	-0,0533	0,1599
Plana	442	31,6%	108507	36,9%	442	957	108.065	184.491	-0,1563	0,0813	-0,2376
Convexa	466	33,3%	92667	31,5%	466	933	92.201	200.355	0,0554	-0,0265	0,0819

Cálculo de la función susceptibilidad (LSI): Obtenidos los pesos para cada una de las capas temáticas (Pendientes, Curvatura, UGS, y SGMF), se calcula la susceptibilidad final mediante la suma algebraica de las capas temáticas. Este cálculo tiene como objetivo obtener la función final del LSI (Landslide Susceptibility Index, LSI), por sus siglas en inglés), cuya expresión es la siguiente (SGC, 2017):

$$LSI = Wf(\text{Pendientes}) + Wf(\text{Curvatura}) + Wf(\text{UGS}) + Wf(\text{Cob-Uso}) + Wf(\text{Relieve})$$

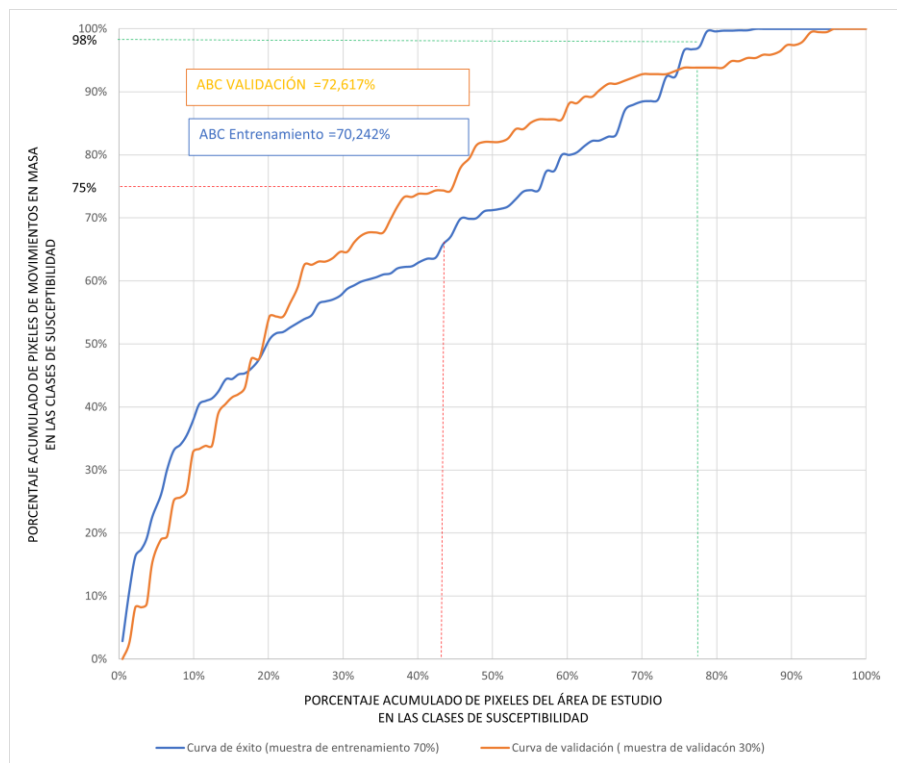
Como resultado, se obtuvo el mapa de LSI para la cuenca del Río Frío (Figura 36). Los valores positivos de tonos azules representan las zonas con una susceptibilidad alta a la ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamiento o flujo no canalizado. Por otro lado, las zonas con valores negativos de tonos más verdes representan sectores con una baja susceptibilidad a la ocurrencia de este tipo de movimientos en masa de acuerdo con el IPM y la variable de agrupamiento usada como insumo para la modelación.

Figura 36. Mapa de Landslide Susceptibility Index (LSI) para la cuenca del Río Frío

Curva de éxito del modelo y validación: El ajuste de la función se calculó a partir de una curva de éxito, que mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa del inventario. Para esto se ordenaron los valores del LSI resultante, se separaron en 100 rangos de percentiles y se relacionaron a través de un cruce con la muestra de entrenamiento usada para el cálculo de la función de susceptibilidad (70% de la variable de agrupamiento). Esta curva se elaboró considerando el área de modelación de la susceptibilidad (4658 ha) y el área total de los movimientos en masa considerados en el análisis (25,42 ha) (Figura 37).

De acuerdo con SGC (2017) el área bajo la curva (ABC) de éxito se puede interpretar como la capacidad de la función para representar la susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa. En este caso el ABC de la curva de éxito fue de 70,24%, indicando un ajuste suficiente del modelo a los datos del inventario de movimientos en masa, con lo que se podría deducir que las causas planteadas como hipótesis de falla son explicadas por la función calculada. Con base en el mismo rango de percentiles en 100 categorías usados para la construcción de la curva de éxito, se calculó el porcentaje de área deslizada en cada rango con la muestra de validación (30% restante de la variable de agrupamiento) y se obtuvo la curva de validación de la zona de estudio, la cual arrojó un resultado del 72,67% (Figura 37).

Figura 37. Curva de Validación y Éxito para el Modelo de Susceptibilidad por Deslizamientos y Flujos no Canalizados



Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado: Para esta etapa se aplicaron los criterios propuestos por el SGC (2017) para obtener la categorización del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo:

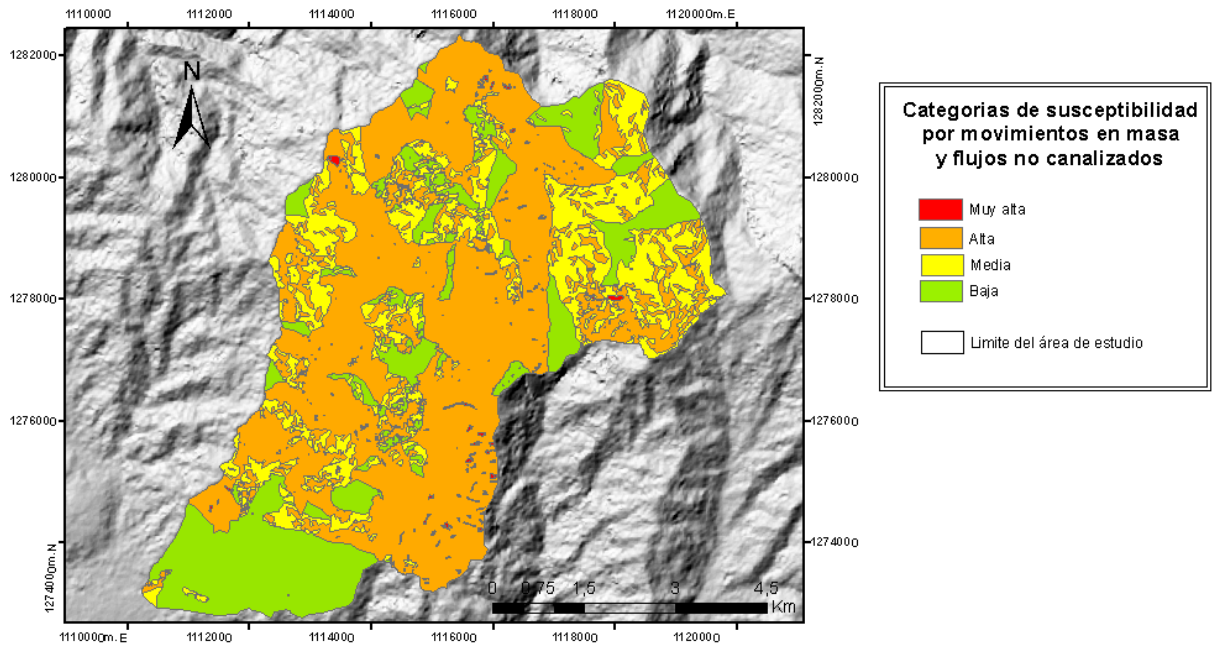
Susceptibilidad Alta: contiene más del 75% de todos los movimientos en masa, en color naranja ámbar.

Susceptibilidad Media: contiene máximo un 25% de todos los movimientos en masa, en color amarillo.

Susceptibilidad Baja: contiene menos del 2% de todos los movimientos en masa, en color verde.

De esta manera se obtuvo el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento, el cual se muestra en la Figura 38. Este mapa presenta tres categorías de susceptibilidad: Alta, Media y Baja, cada una de las cuales se describirán a continuación:

Figura 38. Mapa final de Susceptibilidad por Deslizamientos y Flujos no Canalizados Reclasificado en 4 Categorías para la Cuenca del Río Frío



Susceptibilidad Muy Alta

Esta categoría corresponde a los polígonos de movimientos en masa registrados en el IPM. Ocupa un área de 25,42 ha (0,25 km²) que equivale al 0,54% del área de estudio. Se distribuye de manera relativamente homogénea en todas las regiones la cuenca a excepción de las veredas Casiano y Guarumales, y a su vez, presenta una concentración en las veredas Helechales, Alsacia y Agua blanca.

Se presenta únicamente en geformas del ambiente denudacional tales como lomos denudados, laderas denudadas, laderas erosivas y laderas muy abruptas a escarpadas.

Los movimientos en masa que componen esta categoría se relacionan con UGS de suelo transportado y roca de muy mala calidad de la cuarzo monzonita la corcova y en menor proporción de los tres, roca de mala calidad del neis de Bucaramanga.

Las UGS de tipo neis de Bucaramanga que presentan un mayor fracturamiento y diaclasamiento en el bloque central de la zona de estudio son especialmente susceptibles a meteorización lo cual sumado al alto índice de relieve relativo que se maneja en la zona y las pendientes que generalmente escarpadas a muy escarpadas, lo cual favorece la generación de procesos tipo flujo no canalizado.

Además de lo anterior, un aumento en la exposición de las capas de suelo y roca muy fracturada de calidad mala a muy mala a la erosión pluvial puede ocasionar un aumento en el transporte de material por escorrentía, agravando los procesos denudativos en zonas ya susceptibles a los movimientos en masa.

Susceptibilidad Alta

Corresponde al 57,22% del área de estudio, lo que equivale a 2665,38 ha (26,65 km²). Hay un predominio claro de esta categoría hacia el centro y el oeste, albergando especialmente la mayor cantidad de flujos de ladera y deslizamientos que las demás categorías al igual que posee la concentración más alta de pendientes escarpadas, así como especial intervención antrópica hacia el sector occidental, se presenta especialmente en las veredas Alsacia, Helechales donde el índice de relieve relativo es mucho mayor y en menor medida que las anteriores pero igualmente muy presente en la parte occidental de la vereda Agua blanca.

A nivel geomorfológico, la susceptibilidad alta está fuertemente influenciada por geoformas de origen denudacional tales como Lomos denudados bajos, especialmente los de longitud media, laderas erosivas de abruptas a escarpadas y laderas denudadas. En cuanto al tipo de materiales, predominan suelos residuales de tipo ígneo y suelos transportados aluviales, rocas de calidad muy mala tanto del neis de Bucaramanga como de la cuarzo monzonita la corcova y

rocas de calidad mala del neis de Bucaramanga, sin embargo, éstas últimas solo formando parte del bloque central. En esta categoría también predominan procesos intensos de meteorización física y erosión pluvial, además de una tendencia a la formación de suelos debido a la actividad biológica.

Para esta categoría un factor que intensifica los movimientos en masa es la ganadería, esta evidenciada en algunos sectores por caminos de ganado, son extensas y recurrentes en las partes media y baja de las laderas del sector central al margen izquierdo del Río Frío, si bien la intervención antrópica no es muy notable y no se cuentan con las suficientes pruebas para acreditar la inestabilidad de los materiales al pie de las laderas un mecanismo estructural, el pastoreo intensivo acelera los procesos que presuntamente podrían estarse dando allí.

Susceptibilidad Media

Ocupa un área de 936 ha (9,36 km²) que equivale al 20,1% del área total de la cuenca. Esta categoría se distribuye en todas las zonas de la cuenca salvo hacia la vereda Casiano ubicada en el extremo sur, pero hay predominio en las veredas Guarumales y Agua blanca, esta última especialmente en sus sectores oriental y occidental, siempre al margen derecho de Río Frío.

Esta categoría está asociada con pendientes abruptas a moderadamente abruptas, principalmente en zonas poco intervenidas a nivel antrópico y con una alta densidad de vegetación. Geomorfológicamente los Lomos denudado bajos de longitud larga, Laderas abruptas a muy abruptas, Laderas disectadas y Cerros denudados son los más representativos. La UGS presenta suelos residuales de los esquistos del Silgara y rocas de calidad mala a muy mala del neis de Bucaramanga. A pesar de que existe un alto fracturamiento en las rocas de este

material, tanto en los esquistos como en el neis, se observa una permeabilidad pluvial moderada debido a la gran densidad de vegetación que crece incluso entre las grietas de los afloramientos más fracturados, esto ultimo ayudando a mitigar los efectos de la erosion superficial.

Susceptibilidad Baja

Corresponde al 22,14% del área de estudio, lo cual equivale a 1031,1 ha (10,3 km²). Se distribuye en diferentes zonas, pero está principalmente en la vereda Guarumales y Casiano, llegando a ocupar casi el 100% de esta ultima. Esta categoría está relacionada con pendientes muy inclinadas a abruptas y suavemente inclinadas que es donde se acumula el mayor porcentaje de este rango. Geomorfológicamente se relaciona con laderas onduladas, abruptas, muy abruptas y explanadas. Desde un punto de vista de las UGS, los materiales que corresponden a esta categoría de susceptibilidad son los suelos residuales del neis de Bucaramanga y el ortoneis de Bucaramanga, ambos en todas las calidades reportadas. A pesar de estos materiales tienen una tendencia natural a fracturarse debido a su foliacion, forman laderas con indices relativos de relieve más bajos que la cuarzon monzonita la corcova, por lo que suelen situarse más construcciones y explanaciones de ladera que mitigan ligeramente los procesos naturales de erosion y meteorizacion.

8. Conclusiones

Esta investigación permite conocer con mayor detalle las características geológicas, geomorfológicas e incluso ambientales que presenta la cuenca del Río Frío y a rasgos algo más generales la zona rural del municipio de Floridablanca.

En la zona de estudio se identificaron 118 procesos: 76 de tipo deslizamiento, 39 de tipo flujo no canalizado y 3 de tipo caída de los cuales 96 se concentran en solo dos veredas: Alsacia y Agua Blanca, evidenciando un posible problema de inestabilidad.

Los procesos morfodinámicos de la cuenca del Río Frío se explican dadas unas características ambientales naturales que junto con su localización y evolución y han construido una susceptibilidad en la generación de movimientos en masa a lo largo de su territorio. Estas condiciones son:

La evolución del paisaje (Geomorfología) en la cuenca del Río es producto principalmente de procesos denudativos continuos que se han ido intensificando con el pasar del tiempo, para muestra de esto están principalmente grandes laderas suavizadas y disectadas por quebradas y escorrentía superficial que han degradado la roca dejando formas más redondeadas o incisivas en el paisaje, que a su vez son indicativos de una constante acumulación de material poco consolidado que se puede convertir en un futuro en un movimiento en masa.

La cantidad de procesos inactivos en la cuenca son propensos a reactivarse. Esta afirmación se sustenta mediante el control de campo, donde una buena parte de los movimientos en masa controlados, que se vieron activos mediante la fotointerpretación, ya no lo están y en su

lugar, otros movimientos que no habían sido tenidos en cuenta mediante fotointerpretación se vieron reactivados luego de una serie de lluvias ocurridas días previos a la campaña de campo.

Respecto a los tipos de material, se concluye que en el territorio existen principalmente dos tipos de rocas, ígneas de la formación cuarzo monzonita la corcova y rocas metamórficas de la formación neis de Bucaramanga, esta último teniendo una variación anfibolítica considerable al punto de ser incluida en este estudio. La mayor cantidad de movimientos en masa se acumula en suelos residuales y rocas de muy mala calidad de la cuarzo monzonita la corcova y en rocas de mala calidad del neis de Bucaramanga.

Los movimientos en masa predominantes en la cuenca son de bajo impacto, muchos de ellos incluso apenas cartografiables a la escala de trabajo, sin embargo, se concentran en ciertas zonas como la vereda Alsacia y Agua blanca en una cantidad considerable, generando una mayor grado de inestabilidad de las laderas y propiciando eventos más frecuentes en intervalos de tiempo menores.

La cuenca está dividida en tres sectores: oriental, central y occidental, en donde existe una marcada diferencia entre sus características que se ve altamente reflejado en la susceptibilidad, como se explico a lo largo del proyecto, haciendo del bloque central aquel que tiene características generadoras de susceptibilidad más marcada.

Las geoformas de tipo ladera erosiva con pendientes mayores a 30° y los lomos denudados bajos de diferentes longitudes debido a sus características geométricas, combinadas con la intensidad de los procesos de motorización física y química que se intensifican en el bloque central, resultan más propensos a desarrollar movimientos en masa.

Los movimientos en masa tienen una tendencia estadística generarse en rocas de calidad muy mala y suelos residuales de materiales ígneos con pendientes pronunciadas a comparación

de materiales metamórficos de calidad mala con pendientes $<45^\circ$, estas características son claramente diferenciables cuando se divide el área de estudio en 3 bloques, 2 de ellos siempre ubicados al margen derecho del Río Frío y en bloque restante al margen izquierdo y es en este último donde la mayor parte de los procesos se dan.

Por último, dadas las anteriores características, en el mapa de susceptibilidad de la cuenca del Río Frío predomina la susceptibilidad alta, seguida por la categoría baja y media. La categoría alta se ubica en terrenos con pendientes de 30 a más de 45° , predominan geoformas también de tipo denuncional como las laderas disectadas sobre rocas de calidad muy mala calidad tanto del neis de Bucaramanga como de la cuarzo monzonita la corcova, así como suelos residuales de la cuarzo monzonita. La categoría baja se ubica en pendientes de entre 0° a un máximo de 20° donde predominan geoformas denudacionales y fluviales como las laderas abruptas o llanuras de inundación sobre rocas del ortoneis de Bucaramanga y rocas de muy mala calidad del neis de Bucaramanga. Por último, con un 20% del área abarcada, la susceptibilidad de categoría media se ubica en laderas con pendientes de 20 a más de 30° donde predominan geoformas denudacionales como cerros denudados sobre rocas de muy mala calidad del neis de Bucaramanga y suelos residuales de los esquistos del Silgará.

9. Recomendaciones

A continuación, se enumeran una serie de recomendaciones cuya implementación son importantes para mejorar el conocimiento en materia de susceptibilidad y amenaza en la zona rural del municipio de Floridablanca:

- Contar con un grupo multidisciplinario e insumos de la mejor calidad para estudios a partir de la escala 25.000, esto se hace indispensable dado que en un análisis más completo se abarcan otras disciplinas que suman al conocimiento geológico en general.
- Realizar un estudio de suelos mediante asesoramiento geotécnico para escalas de mayor detalle al 25.000, esto en busca de conocer cuanto daño podría causar un movimiento en masa en función del estado y características físicas de un material tan propenso a generar problemas de estabilidad en el municipio.
- Abarcar un porcentaje óptimo de cobertura de la zona en la campaña de campo. Se sugiere que entre más detallado sea el proyecto, cada movimiento en masa foto interpretado tenga su respectivo análisis de campo respectivamente siguiendo el planteamiento completo de la guía metodológica.
- Recopilar información foto geológica mediante sensores o satélites privados o de paga, dado que la calidad y el refinamiento de las imágenes es mucho mayor al que se encuentra en sensores públicos y gratuitos al menos para el municipio de Floridablanca, Santander.

Referencias Bibliografía

- Banco Mundial . (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. *Banco Mundial Región de América Latina y El Caribe* , 28 - 32.
- Bathrellos, G. D. (2012). Potential suitability for urban planning and industry development using natural hazard maps and geological–geomorphological parameters. *Environmental earth sciences*, 66(2), 537-548.
- Bonham-Carter, G. F. (1997). Geographical information systems for geoscientists modeling with GIS. *Pergamon Press Inc, Tarrytown, NY, (USA)*.
- Carrara et al. (1995). Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. *Springer Netherlands*, 135-175.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 16 (1 -3), 85p.
- Centro de Modelación Urbana (CMUM). (2007). Informe de geología y geomorfología del sector norte de Bucaramanga.
- Cruden. (1991). A simple Definition of a landslide: Bulletin of the international association of engineering geology. 43 (1), 27 - 29.
- Cruden, & Varnes. (1996). Landslide types and process. *Transportation research board, U.S National academy of sciences, special report*, 247: 36 - 75.
- Diederix et al. (2009). Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la falla de Bucaramanga, Colombia. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 9(2), 18 - 23.

Flentje et al. (2007). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use. *Australian Geomechanics Society*, 13-36.

Hungr et al. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides 11*, 167–194.

Katz, & Brown. (1992). extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. . *Environmental and Societal Impacts Group, National Center for Atmospheric Research*.

Orozco, & Escobar. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, Utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería y Desarrollo*, (23), 104 - 118.

Pardeshi, S., Autade, S., & Pardeshi, S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus 2*, 523.

PMA:GCA. (2007). movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas.

SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000. *Bogotá: Servicio Geológico Colombiano*.

SGC. (2020). Avenida torrencial del 28 de enero de 2020 en la cuenca del Río Frío del municipio de Floridablanca. *Bogotá: Servicio Geológico Colombiano*.

UNDRR. (2015). Plataforma DESINVENTAR, Marco Sendai para la reducción del riesgo a desastres, Colombia.

University of Alaska Fairbanks. (2007). (2014). ASF DAAC. ©JAXA/METI 2007, Url: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

Van Westen. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation*.

Vargas, G., & Niño, A. (1992). Patrones de fracturamiento asociados a la Falla Bucaramanga.

Varnes. (1978). Slope movements, types and process, landslides; analysis and control, transportation research board. *National academy of science, Washington*, spec. rep. 176, 11 - 33.

Ward et al. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín geológico*, 1 - 133.