

Zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales en la parte alta de la subcuenca hidrográfica de Riofrío y caracterización geomorfológica del cauce en el sector de Puente Rojo en el municipio de Floridablanca, Santander.

Lizeth Natalia García Arenas  
Johan Sebastián Moreno Cárdenas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

*Quiero dedicar este trabajo a Dios por guiarme a lo largo de mi vida y ser la fortaleza en aquellos momentos de dificultad. A mi familia en especial a mi madre y a mi hermana por estar siempre presentes, acompañándome, por el apoyo que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida y por ser el motor que me ha ayudado a superar todos los obstáculos y dificultades que he encontrado en mi camino.*

*A mis amigos por su apoyo y ayuda no solo en la realización de este proyecto sino durante toda mi carrera universitaria, sin su confianza y aliento no hubiera llegado tan lejos. A Sebastián, mi amigo y compañero en nuestro último trabajo juntos, por la confianza y soporte durante todos los obstáculos que enfrentamos juntos durante este proyecto.*

*Finalmente, a la persona más importante, a mi padre Efrén García, por siempre apoyar, confiar y creer en mis sueños, por los consejos, valores y principios que me enseñó durante 23 años y que siempre voy a llevar conmigo, honrándolo cada día.*

**- Natalia García**

*Quiero dedicar este trabajo de grado primeramente a Dios por ser el inspirador, quien me dio fortaleza y sabiduría para enfrentar cada una de las dificultades que se presentaron durante este proceso. A mi familia, en especial a mi mamá por estar siempre presente durante toda mi formación universitaria, por cada uno de sus consejos y apoyo incondicional, por ser la primera en creer en mí, en mis capacidades y en creer que podría culminar con éxito esta etapa universitaria, a mi hermana por ser un ejemplo para mí como profesional, como persona quien ayudó a mi crecimiento integral y junto con mi madre ser ese motor que me impulsó a ser quien soy hoy por hoy.*

*A mis amigos, especialmente Valentina, Alejandro, Laura y Johan, porque siempre han estado ahí, han confiado en mis capacidades y me dieron palabras de aliento cuando las necesité, fueron quienes me impulsaron a persistir y alcanzar este sueño. A Natalia mi amiga y compañera en este, el último trabajo como estudiantes, por el apoyo y la confianza depositados para afrontar de la mejor manera cada uno de los obstáculos que se nos presentaron. Finalmente, a Cristhian quien ha sido la persona más incondicional, quien me ayudó y me apoyó en todo para terminar con éxito este proyecto y por ende esta etapa tan significativa. A todos y cada uno de ustedes muchas gracias por dejar huella en mi vida.*

**- Sebastián Moreno**

### **Agradecimientos**

Agradecemos principalmente a la Universidad Industrial de Santander por acogernos durante estos años de vida universitaria, especialmente a la Escuela de Geología y a todos los miembros que participaron directa e indirectamente en el desarrollo de este proyecto. A todos los que conforman la planta administrativa de la escuela por su constante y pronta ayuda: Cesar Llerena, Rosadilia Carrillo y Martha Blanco. Al director de la escuela Carlos Ríos por su importante aporte a nuestra formación profesional. A todos los docentes que, a lo largo de nuestra trayectoria académica, han contribuido de diferentes formas a nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestro director de tesis, Juan Diego Colegial Gutiérrez nuestro más sincero agradecimiento por darnos la oportunidad de realizar este proyecto, por la confianza depositada en nosotros para llevar a cabo cada una de las actividades propuestas y por creer en nuestras capacidades como profesionales.

Finalmente, a cada uno de nuestros compañeros por acompañarnos en este camino, y haber aportado de alguna forma en nuestro crecimiento personal, llenándonos de recuerdos y vivencias que no se olvidarán.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General .....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Alcance y Limitaciones.....	18
3. Localización .....	20
4. Antecedentes .....	22
5. Marco Teórico.....	24
5.1 Tecnologías de Información Geográfica (TIG) .....	24
5.2 Cuenca Hidrográfica .....	26
5.2.1 Partes de una cuenca hidrográfica.....	26
5.2.2 Tipos de cuencas .....	27
5.3 Morfometría de una cuenca o una subcuenca .....	28
5.3.1 Parámetros asociados a la forma de la cuenca o subcuenca .....	29
5.3.1.1 Área.....	29
5.3.1.2 Perímetro.....	30
5.3.1.3 Longitud.....	30
5.3.1.4 Factor de forma de Horton (Kr) .....	30
5.3.1.5 Relación de Elongación (Re) .....	31
5.3.2 Parámetros asociados a la red hidrográfica.....	31
5.3.2.1 Longitud del cauce principal (Lp).....	31

5.3.2.2 Longitud Total de cauces (Lt).....	31
5.3.2.3 Densidad de Drenajes (Dd).....	31
5.3.2.4 Constante de Estabilidad del río (C).....	32
5.3.2.5 Constante de Torrencialidad (Ct).....	32
5.3.3 Parámetros asociados al relieve .....	32
5.3.3.1 Altura y relieve .....	32
5.3.3.2 Curva Hipsométrica .....	33
5.4 Avenidas Torrenciales .....	34
5.4.1 Flujos de las Avenidas Torrenciales .....	35
5.4.2 Fenómenos causantes de las avenidas torrenciales.....	36
5.4.2.1 Precipitaciones .....	36
5.4.2.2 Deslizamientos Aislados.....	37
5.4.2.3 Represamientos de Agua.....	37
5.4.2.4 Eventos Sísmicos .....	37
5.4.2.5 Acción Antrópica .....	38
6. Marco Geológico .....	39
6.1 Estratigrafía.....	39
6.1.1 Neis de Bucaramanga (PCab) .....	39
6.1.2 Formación Silgará (PDs).....	40
6.1.3 Ortogneis (PCamb) .....	40
6.1.4 Cuarzomonzonita de La Córcova (JRcl).....	40
6.1.5 Formación Girón (Jg).....	41

6.1.6 Depósitos Fluviotorrenciales conos de deyección y terrazas altas y medias (Qtf) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal) .....	41
6.1.6.1 Depósitos Fluviotorrenciales conos de deyección y terrazas altas y medias (Qtf) .....	41
6.1.6.2 Depósitos Aluviales (Qal).....	42
6.2 Geología Estructural .....	43
6.2.1 Marco Tectónico Regional.....	43
6.2.1.1 Falla de Bucaramanga-Santa Marta .....	44
6.2.2 Sistemas de fallas locales presentes en el área de estudio .....	45
6.2.2.1 Falla Riofrio .....	45
6.2.2.2 Falla La Corcova.....	45
6.3 Geomorfología .....	46
7. Metodología .....	49
7.1 Definición del proyecto y Recopilación Bibliográfica .....	50
7.2 Análisis de Datos .....	50
7.3 Caracterización Geomorfológica .....	51
7.4 Generación de mapas temáticos o mapas insumo.....	52
7.4.1 Mapa de Drenajes .....	52
7.4.2 Mapa de Pendientes .....	54
7.4.3 Mapa de Precipitación.....	56
7.4.4 Mapa de Alturas.....	58
7.4.5 Mapa de Morfometría .....	58
7.4.6 Mapa de Subunidades Geomorfológicas .....	59
7.4.7 Mapa de Susceptibilidad por Deslizamiento y Flujo no canalizado .....	65

7.5 Mapa de Zonificación de Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales .....	66
7.6 Análisis y discusión de resultados .....	69
7.7 Redacción del informe final.....	69
8. Análisis y discusión de resultados .....	70
8.1 Mapas temáticos o mapas insumo.....	70
8.1.1 Mapa de Drenajes .....	70
8.1.2 Mapa de Pendientes .....	71
8.1.3 Mapa de Precipitación.....	72
8.1.4 Mapa de Alturas.....	76
8.2. Caracterización Geomorfológica .....	77
8.3. Análisis Morfométrico.....	81
8.3.1 Parámetros asociados a la forma de la Subcuenca.....	82
8.3.2 Parámetros asociados al relieve de la Subcuenca .....	84
8.3.3 Parámetros asociados a la red hidrográfica de la Subcuenca.....	84
8.3.4 Curva Hipsométrica. ....	86
8.4 Mapa de Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales.....	88
8.4.1 Reclasificación de Pendientes.....	94
8.4.2 Reclasificación de Drenajes .....	96
8.4.3 Reclasificación de Precipitación .....	98
8.4.4 Reclasificación de Susceptibilidad por Deslizamiento y Flujo no canalizado .....	100
8.4.5 Reclasificación de Subunidades Geomorfológicas .....	102
8.4.6 Reclasificación de Alturas .....	104
8.4.7 Reclasificación de Morfometría.....	106

9. Conclusiones .....	112
10. Recomendaciones .....	114
Referencias Bibliográficas .....	116

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Características morfométricas de las avenidas torrenciales. modificado de SGC, 2017.</i> .....	35
Tabla 2. <i>Clasificación de pendientes según Van Zuidam (1986).</i> .....	55
Tabla 3. <i>Precipitación multianual promedio de las estaciones más cercanas a la Subcuenca...</i>	56
Tabla 4. <i>Subunidades cartografiadas en el mapa de subunidades geomorfológicas a escala 1:25000</i> .....	60
Tabla 5. <i>Definición y descripción de las subunidades cartografiada para cada uno de los ambientes identificados en la zona de estudio.</i> .....	62
Tabla 6. <i>Parámetros asociados a la forma de la subcuenca Riofrío comprendida por las microcuencas analizadas.</i> .....	82
Tabla 7. <i>Factor de forma según Horton</i> .....	83
Tabla 8. <i>Formas de acuerdo con el índice de compacidad, Benavides, et al., 2009</i> .....	83
Tabla 9. <i>Parámetros de relieve asociados a la subcuenca Riofrío.</i> .....	84
Tabla 10. <i>Parámetros asociados a la red hidrográfica de la subcuenca Riofrío comprendida por las microcuencas analizadas.</i> .....	85
Tabla 11. <i>Valores de densidad de drenajes. Según Maidment, 1993.</i> .....	86

Tabla 12. <i>Índices de Torrencialidad, según Camino 2018 y Méndez, 2015. Tomado del SGC, 2020.</i> .....	86
Tabla 13. <i>Tabulación de los datos obtenidos con el mapa de alturas</i> .....	86
Tabla 14. <i>Criterios y Alternativas de la Matriz AHP</i> .....	88
Tabla 15. <i>Matriz de comparación multicriterio aplicada a los criterios</i> .....	89
Tabla 16. <i>Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Muy Baja.</i> .....	90
Tabla 17. <i>Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Baja.</i> .....	90
Tabla 18. <i>Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Media.</i> .....	91
Tabla 19. <i>Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Alta.</i> .....	91
Tabla 20. <i>Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Muy Alta.</i> .....	92
Tabla 21. <i>Tabla de ponderación de alternativas y criterios.</i> .....	92
Tabla 22. <i>Porcentajes usados en la elaboración del mapa de susceptibilidad.</i> .....	93
Tabla 23. <i>Reclasificación de pendientes.</i> .....	94
Tabla 24. <i>Reclasificación de Drenajes</i> .....	96
Tabla 25. <i>Reclasificación de precipitación.</i> .....	98
Tabla 26. <i>Reclasificación de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado.</i> .....	100
Tabla 27 <i>Reclasificación de subunidades geomorfológicas.</i> .....	102
Tabla 28. <i>Reclasificación de Alturas</i> .....	104
Tabla 29. <i>Reclasificación de Morfometría.</i> .....	106
Tabla 30. <i>Área correspondiente a cada categoría de clasificación de la susceptibilidad de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.</i> .....	108

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Localización área de estudio dentro de la CSRL en la parte alta de la subcuenca de Riofrío.</i> .....	20
Figura 2. Delimitación y localización local de la Subcuenca con límites de los municipios aledaños .....	21
Figura 3. Partes de una cuenca hidrográfica. Modificado de Ordoñez, 2011. ....	27
Figura 4. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión. Modificado de Senciales y Ferre, 1999. ....	33
Figura 5. Partes de un flujo. Modificado de Suarez, 2001. ....	36
Figura 6. Columna estratigráfica de la parte alta de la subcuenca de Riofrío .....	42
Figura 7. Esquema tectónico del departamento de Santander. Tomado de Royero-Clavijo, 2001. ....	43
Figura 8. Mapa geológico de la parte alta de la subcuenca de Riofrío .....	46
Figura 9. Mapa geomorfológico de la parte alta de la subcuenca de Riofrío .....	48
Figura 10. Esquema metodológico .....	49
Figura 11. Comparación de los métodos de clasificación de orden de drenajes. tomado de MasterGis. ....	53
Figura 12. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas consultadas .....	57
Figura 13. Mapa de Subunidades geomorfológicas. Tomado de Ronderos, 2022 .....	59
Figura 14. Mapa de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado. Tomado de Ronderos, 2022. ....	65
Figura 15. Esquema jerárquico AHP, modificado de ALVAREZ, ARQUERO, & MARTÍNEZ, 2000. ....	68

Figura 16. Escala de importancia relativa con la construcción de la matriz de comparación por pares de decisión, Sarmiento (2017).....	69
Figura 17. Mapa de Drenajes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	70
Figura 18. Mapa de Pendientes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	71
Figura 19. Mapa de Precipitación de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	72
Figura 20. Comparación de los métodos de interpolación IDW vs Kriging.....	73
Figura 21. Análisis de la precipitación mensual de los años 2010-2021.....	75
Figura 22. Mapa de Alturas de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	76
Figura 23. Recorrido de la caracterización geomorfológica.....	77
Figura 24. Identificación de la geoforma de llanura de inundación localizada en la estación 2 con coordenadas X:1.110.893 Y:1.273.485.....	78
Figura 25. Identificación de la geoforma de llanura de inundación con vista del cauce en la estación 3 con coordenadas X: 1.110.993 Y:1.273.526.....	79
Figura 26. Identificación de la geoforma a ambos lados del cauce en la estación 8 con coordenadas X:1.110.664 Y:1.273.486.....	80
Figura 27. Mapa de las microcuencas asociadas a la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	81
Figura 28. Curva hipsométrica de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	87
Figura 29. Diagrama estadístico de la reclasificación de pendientes.....	94
Figura 30. Mapa de Reclasificación de pendientes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío...	95
Figura 31. Diagrama estadístico de la reclasificación de drenajes.....	96
Figura 32. Mapa de Reclasificación de drenajes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	97
Figura 33. Diagrama estadístico de la reclasificación de precipitación.....	98

Figura 34. Mapa de Reclasificación de precipitación de la parte alta de la subcuenca de Riofrío. .....	99
Figura 35. Diagrama estadístico de la reclasificación de susceptibilidad por deslizamiento .....	100
Figura 36. Mapa de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado. Tomado de Ronderos, 2022.....	101
Figura 37. Diagrama estadístico de la reclasificación de subunidades geomorfológicas .....	102
Figura 38. Mapa de Reclasificación de subunidades geomorfológicas de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	103
Figura 39. Diagrama estadístico de la reclasificación de alturas .....	104
Figura 40. Mapa de Reclasificación de alturas de la parte alta de la subcuenca de Riofrío. ....	105
Figura 41. Diagrama estadístico de la reclasificación de morfometría.....	106
Figura 42. Mapa de Reclasificación de las microcuencas asociadas a la parte alta de la subcuenca de Riofrío .....	107
Figura 43. Diagrama estadístico de susceptibilidad por avenida torrencial.....	108
Figura 44. Mapa de Susceptibilidad por avenida torrencial en la parte alta de la subcuenca de Riofrío.....	111

## Resumen

**Título:** Zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales en la parte alta de la subcuenca hidrográfica de Riofrío y caracterización geomorfológica del cauce en el sector de Puente Rojo en el municipio de Floridablanca, Santander.\*

**Autores:** García Arenas Lizeth Natalia; Moreno Cárdenas Johan Sebastián \*\*

**Palabras Clave:** Avenida torrencial, Susceptibilidad, Geomorfología.

**Descripción:** Las avenidas torrenciales son crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente; los cuales dependen de las condiciones morfométricas, geomorfológicas, y de los eventos de precipitación. Debido a que las avenidas torrenciales cuentan con un gran potencial destructivo se plantea la realización del estudio de susceptibilidad en la parte alta de la subcuenca de Riofrío ubicada en el municipio de Floridablanca, Santander; debido a que es una de las subcuencas con mayor preocupación por la ocurrencia de las avenidas torrenciales, puesto que ya se ha venido presentado este tipo de eventos en los últimos años.

El proyecto se centra en identificar las áreas susceptibles por avenidas torrenciales a partir de los factores condicionantes que influyen en la parte alta de la subcuenca mediante un mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales. Se llevó a cabo en un área de 46.5 km<sup>2</sup> correspondiendo, en su mayoría al paisaje rural del municipio, en donde se realiza una caracterización geomorfológica hacia el sector de puente rojo, punto estratégico que divide el paisaje rural del paisaje urbano dentro de la subcuenca. Para realizar el mapa se tuvo en cuenta la morfometría de la zona y en el análisis de sensores remotos para producir mapas temáticos o mapas insumo a escala 1:25000. Finalmente, para generar el mapa de zonificación de susceptibilidad por avenida torrencial se ejecuta a partir de los insumos obtenidos basándose en un esquema de categorización cualitativa usando el proceso de jerarquía analítica (AHP).

La susceptibilidad por avenida torrencial en la parte alta de la subcuenca de Riofrío se distribuye en cinco categorías, Muy Baja (10.7%), Baja (14.9%), Media (7.7%), Alta (5.8%) y Muy Alta (7.5%), las áreas más susceptibles se concentran en la parte central inferior de la subcuenca, de igual manera, en el área caracterizada se pueden evidenciar una geoforma remanente de llanura de inundación por el cauce concordante con el mapa de subunidades geomorfológicas, lo cual indicaría el paso de posibles avenidas torrenciales que sucedieron en el pasado.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, Geólogo PhD.

### Abstract

**Title:** Susceptibility zoning by torrential avenues in the upper part of the RioFrío hydrographic sub-basin and geomorphological characterization of the channel in the Puente Rojo sector in the municipality of Floridablanca, Santander. \*

**Author(s):** García Arenas Lizeth Natalia; Moreno Cárdenas Johan Sebastián \*\*

**Key Words:** Torrential Avenues, Susceptibility, Geomorphological.

**Description:** Torrential avenues are sudden floods resulting from heavy rainfall that cause rapid increases in the water level of rivers and steep ravines; which depend on morphometric, geomorphological conditions and precipitation events. Due to the fact that torrential avenues have a great destructive potential, a susceptibility study is proposed in the upper part of the Riofrío sub-basin located in the municipality of Floridablanca, Santander; because it is one of the sub-basins with the greatest concern for the occurrence of torrential floods, since this type of event has already been presented in recent years.

The project focuses on identifying the areas susceptible to torrential avenues based on the conditioning factors that influence the upper part of the sub-basin through a zoning map of susceptibility to torrential avenues. It was carried out in an area of 46.5 km<sup>2</sup>, corresponding mostly to the rural landscape of the municipality, where a geomorphological characterization was carried out towards the Puente Rojo sector, a strategic point that divides the rural landscape from the urban landscape within the sub-basin. To make the map, the morphometry of the area and the analysis of remote sensors were taken into account to produce thematic maps or input maps at a scale of 1:25,000. Finally, to generate the zoning map of susceptibility by torrential avenues, it is executed from the inputs obtained based on a qualitative categorization scheme using the Analytic Hierarchy Process (AHP).

The susceptibility due to torrential avenues in the upper part of the Riofrío sub-basin is distributed in five categories, Very Low (10.7%), Low (14.9%), Medium (7.7%), High (5.8%) and Very High (7.5%). The most susceptible areas are concentrated in the lower central part of the sub-basin, in the same way, in the characterized area, a remnant geoform of a flood plain can be evidenced by the channel concordant with the map of geomorphological subunits, which would indicate the passage of possible torrential avenues that happened in the past.

---

\* Undergraduate Thesis

\*\* Physicochemical Engineering College. Geology Department. Director: Ph.D. Juan Diego Colegial Gutiérrez.

## Introducción

Una avenida torrencial o torrencialidad es un fenómeno natural que está definido como “el aumento del caudal en un cauce con volúmenes excepcionales, en el cual, el fluido además de agua contiene una mezcla de escombros compuesta por suelo, roca y material vegetal.” (USGS, 1984); otra definición se basa en que las avenidas torrenciales son crecidas extraordinarias producto de copiosas precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente (Gemma, 2007); estos fenómenos dependen de las condiciones geomorfológicas, morfométricas y de los eventos de precipitación que se puedan presentar en la cuenca hidrográfica teniendo como consecuencia un aumento de forma brusca los niveles del cauce de esta, produciendo la torrencialidad y a pesar de que su ocurrencia es relativamente baja son de gran interés debido a que, según su naturaleza, cuentan con un gran potencial destructivo causando daños tanto en infraestructura como en pérdidas de ecosistemas, cultivos y por consiguiente, convirtiéndose en un riesgo para la vida de las personas de las zonas más cercanas.

A causa de la expansión urbana, es cada vez mayor el número de asentamientos humanos y/o actividades antrópicas alrededor de las cuencas hidrográficas, lo que supone un aumento en las posibles consecuencias que se generarían, si este fenómeno ocurriese en cercanía de estas comunidades ocasionando grandes impactos sociales y económicos en ellas; aun así, este tipo de eventos no tienen el estudio suficiente en Colombia, a pesar de que su ocurrencia en el país es constante debido a la alta tasa de precipitaciones anuales que se presentan en el territorio nacional y a la geomorfología del mismo, en especial en la zona andina. Aunque se ha venido abordando esta problemática, con más énfasis en los últimos años, sigue existiendo deficiencia en este tipo de

estudios, lo que se traduce en una mayor dificultad a la hora de tratar de forma eficaz la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno.

Con base en lo anterior, se plantea la realización de este estudio en la parte alta de la subcuenca hidrográfica de Riofrío ubicada en el municipio de Floridablanca, Santander; debido a que es una de las subcuencas con mayor preocupación por la ocurrencia de las avenidas torrenciales, puesto que ya se ha venido presentado este tipo de eventos en los últimos años.

Para lograr esto es necesaria la identificación de los factores condicionantes que influyen en la ocurrencia de las avenidas torrenciales como lo son la geomorfología, morfometría, pendientes, alturas, red hídrica, deslizamientos o movimientos en masa, cobertura y la fluctuación en las precipitaciones en esta subcuenca, y de esta manera generar un mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales adaptando el análisis multicriterio AHP en el desarrollo de la metodología planteada para el estudio. En aras de contribuir a los diferentes estudios posteriores que se puedan presentar en la misma zona, con el objetivo de proporcionar desde la academia un análisis preliminar en materia de susceptibilidad para la gestión del riesgo.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Identificar las áreas susceptibles a partir de los factores condicionantes que influyen en la ocurrencia de avenidas torrenciales mediante un mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales en la parte alta de la subcuenca de Riofrío.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Indicar los factores condicionantes (morfometría, geomorfología, pendientes, red hídrica, precipitaciones, alturas y susceptibilidad por deslizamientos y flujo no canalizado) que interactúan en la ocurrencia de una avenida torrencial, mediante diferentes mapas temáticos asociados a cada factor a escala 1:25000.

Identificar las zonas que presentan susceptibilidad a partir de un mapa de zonificación de susceptibilidad por avenida torrencial en la subcuenca alta de Riofrío a escala 1:25000.

Realizar la caracterización geomorfológica e identificar la geoforma asociada a las avenidas torrenciales en el cauce de Riofrío en el sector de Puente Rojo.

## 2. Alcance y Limitaciones

El presente trabajo realizado para la parte alta de la subcuenca de Riofrío en el municipio de Floridablanca se basa en la implementación del análisis multicriterio AHP, con el cual se le asignan pesos a los diferentes criterios seleccionados por los autores que intervienen en las avenidas torrenciales correspondiendo a un mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales, como se está evaluando la susceptibilidad no se estudia a fondo los detonantes de las avenidas torrenciales, debido a que no se cuentan con los recursos suficientes en materia de información y porque si se entra a realizar estos análisis, se estarían evaluando las zonas de amenaza y riesgo en la zona, lo que acarrea la intervención de diferentes áreas del conocimiento para que la evaluación de amenaza y riesgo sea lo más preciso posible. Por tal motivo, es importante poner a consideración las siguientes limitantes:

- Se resalta que en el documento realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2020), acerca de la avenida torrencial ocurrida el 28 de enero de 2020, se afirma que la CDMB ha realizado diferentes informes donde se describen los efectos que han tenido las avenidas torrenciales de los años 1991, 1995, 1997 y 2005, sin embargo, estos informes se encuentran con acceso restringido al público por lo que se convierte en una limitante, y por tal motivo no se pueden mencionar aspectos relevantes a cerca de esos eventos históricos, como el tipo de materiales transportados, la forma en la que se originó el evento o en que época del año se realizó, entre otros.

-De igual manera, durante la consulta bibliografía se pudo evidenciar que para obtener recursos como la cartografía base de la zona, los datos se encuentran restringidos al público, y para acceder a ellos es necesario una evaluación del Ministerio de Defensa en donde se aprueba o se desaprueba la solicitud, debido a que sin eso el IGAC no puede dar el acceso a esa información y por tal motivo no se tuvo acceso a ella.

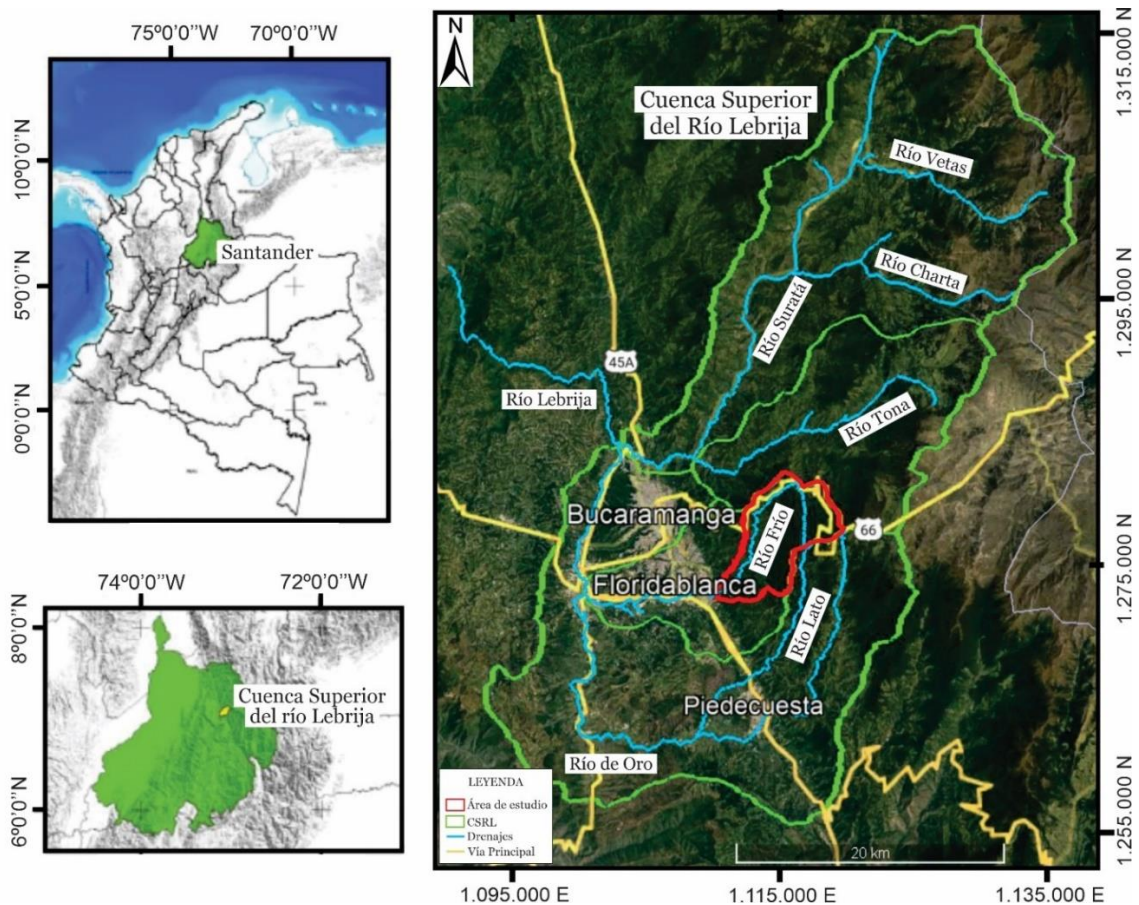
-Una de las limitantes en campo fue el acceso debido a que el sector de Puente Rojo aunque es fácil de llegar, a la hora de transitar por el lecho del cauce aguas arriba y aguas abajo no podían ser distancias muy largas debido a que en la zona se presentan problemas de orden público y por recomendación de la policía, que esporádicamente hace patrullas, era mejor no alejarse mucho del puente, esto a su vez implicó una limitante en las paradas de campo y por ende en el producto final que es la caracterización geomorfológica.

### 3. Localización

El área de estudio está localizada en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, haciendo parte del macizo de Santander, específicamente se encuentra en el municipio de Floridablanca, en el departamento de Santander (ver figura 1), este municipio pertenece a la Cuenca Superior del río Lebrija (CSRL), dentro de este municipio la CSRL se encuentra dividida en dos subcuencas, la de Río de Oro bajo medio y la de Riofrío. Esta última se convierte en el objetivo de estudio ya que es la principal fuente hídrica del municipio de Floridablanca (Quintero & Mora, 2006).

**Figura 1**

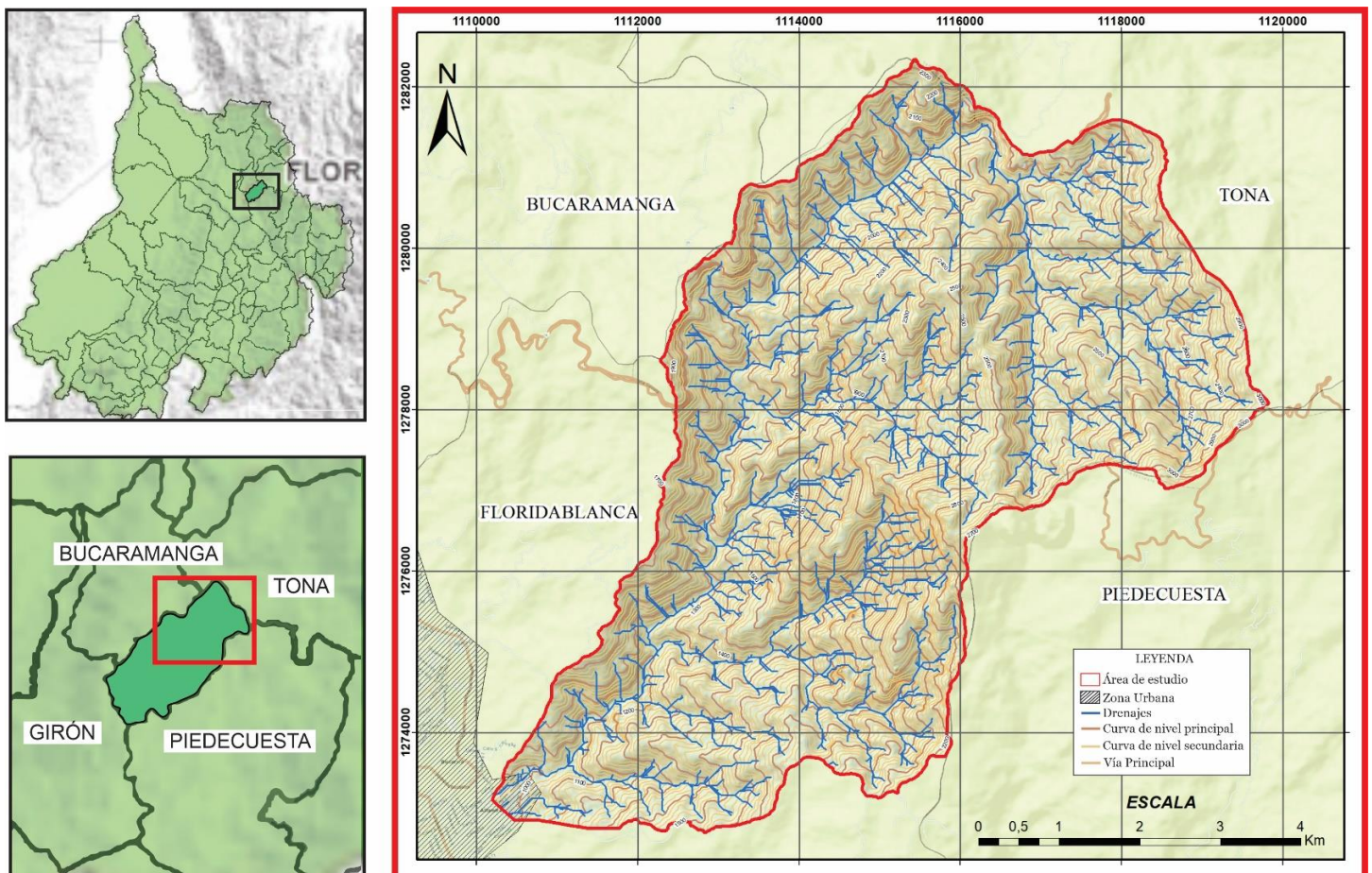
*Localización área de estudio dentro de la CSRL en la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*



Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio se centra en la parte alta de la subcuenca de Riofrío, esta zona se encuentra limitando con el municipio de Bucaramanga al noroeste, con el municipio de Tona al noreste y con el municipio de Piedecuesta al sureste como se muestra en la Figura 2. La zona de estudio abarca un área de 46.5 Km<sup>2</sup>, la cual en su mayoría hace parte de la zona rural del municipio, en ella se destaca el Cerro de la Judía, sitio estratégico por ser punto de recarga hídrica donde nacen varias quebradas y el Riofrío.

**Figura 2**

*Delimitación y localización local de la Subcuenca con límites de los municipios aledaños.*



Observando la delimitación del área de estudio, se muestra que la mayor parte del municipio se encuentra enmarcado por la subcuenca en cuestión, englobando las veredas de Aguablanca, Helechales, Alsacia y una parte pequeña del casco urbano correspondientes a los barrios de Limoncito y Jardines de Limoncito. 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 y otro que corresponde al casco urbano, donde hay una extensa planicie que atraviesa el Riofrío (Ronderos, A., 2022).

#### **4. Antecedentes**

El municipio de Floridablanca en el departamento de Santander ha sido afectado en diferentes ocasiones por avenidas torrenciales, en especial aquellas que se presentan en la subcuenca alta de Riofrío, afectando a la zona urbana y rural del municipio, causando pérdidas económicas y humanas en el municipio.

La CDMB realizó informes donde se describen los efectos que han tenido las avenidas torrenciales ocurridas en los años 1991, 1995, 1997 y 2005. Asimismo, la avenida torrencial más reciente ocurrida en la zona de estudio se dio el 28 de enero de 2020, con titulares en los diferentes medios de comunicación como *“130 familias evacuadas, 100 vehículos y 30 casas afectadas: Saldo de la avalancha en Floridablanca”* (Vanguardia, 2020), Por lo que el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2020), realizó el *“Informe avenida torrencial del 28 de enero de 2020 en la cuenca de Riofrío del municipio de Floridablanca”*, en este informe se identificó que el evento torrencial se produjo principalmente por causa de las altas precipitaciones registradas que

incrementaron el caudal y erosionaron lateralmente las márgenes de los drenajes, transportando material de depósitos torrenciales antiguos, además de algunos movimientos en masa que fueron detonados y aportaron material a las Quebradas Judía Grande y Casiano, con evidencias de posibles represamientos aguas arriba de los drenajes afluentes al Riofrío. El flujo se identificó como un flujo de detritos en la zona alta y media de la subcuenca donde el material transportado comprendió bloques, con tamaños de hasta de 12 m de diámetro, asociados a una matriz de arena y lodo y un segundo flujo de carácter hiperconcentrado en la parte media, hasta llegar a la zona de depósito en el abanico de Floridablanca.

Además, Andrés Felipe Ronderos Chaparro realizó su trabajo de grado optando por el título de geólogo de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander - UIS, donde se realiza un mapa de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado en la subcuenca alta de Riofrio con 4 categorías de susceptibilidad muy alta, alta, media y baja, siendo la categoría alta con mayor porcentaje en la zona (57,22%). El autor también realiza un mapa de subunidades geomorfológicas donde se evidencian 3 ambientes principales dentro de la subcuenca y sus geoformas asociadas.

Igualmente, la Alcaldía de Floridablanca cuenta con el Plan de Ordenamiento Territorial, con vigencia 2018 - 2030, donde se describen aspectos geológicos, geomorfológicos y de usos del suelo del municipio y se identifican zonas en alto riesgo por inestabilidad, movimientos en masa y avenidas torrenciales; dentro del acuerdo del POT se nombra un mapa de amenazas rurales por avenida torrencial, sin embargo, no se encuentra la metodología empleada en la elaboración de este.

## **5. Marco Teórico**

### **5.1 Tecnologías de Información Geográfica (TIG)**

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) están formadas por un conjunto de técnicas y métodos clásicos y modernos en torno a la Cartografía (lectura, interpretación y elaboración de mapas), la Fotointerpretación (de las fotografías verticales aéreas captadas desde los aviones que permiten analizar la evolución de los territorios) o la Teledetección (que proporciona claves para interpretar la información espacial suministrada por los satélites) y los Sistemas de Información Geográfica (programas informáticos de análisis espacial y de elaboración de mapas digitales actuales) (Quirós, 2011).

La complejidad de los problemas que la sociedad actual enfrenta en relación con el ambiente (principalmente la multiplicidad de variables que intervienen) hace necesaria la utilización de las denominadas Geo-tecnologías o Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). La obtención de importantes volúmenes de datos y la integración de la información de forma rápida y confiable para realizar el análisis espacial justifican la mencionada necesidad. En particular, la potencialidad de los SIG está fundada en su capacidad para superponer capas de información de diferentes disciplinas. Incluyen funciones para el manejo de datos espaciales tales como, almacenamiento, visualización, consultas, análisis de datos y modelización. Fattorelli (1999) destaca la potencialidad que presentan los SIG en los estudios hidrológicos y expone casos en los que utilizó dicha tecnología para el tratamiento de la temática ambiental. En cuanto a la observación espacial, Chuvieco (2002) enumera una serie de ventajas para el estudio de las problemáticas ambientales: cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre, perspectiva

panorámica, observación multiescala y multitemporal, información sobre regiones no visibles del espectro, cobertura repetitiva, transmisión inmediata y formato digital (Gentili & Gil, 2009).

Dentro de las TIG se encuentran el DEM que se denomina modelo digital de elevación, el cual es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo ráster con estructura regular. En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos (INEGI, s.f.).

Por otro lado, los SIG o sistemas de información Geográfica, es esencialmente una base de datos espacial, lo que le otorga una cualidad incomparable en el desarrollo de análisis enfocados a resolver problemas reales que afectan el espacio geográfico. Almacena información cartográfica digital, a la cual se anexa una información atributiva organizada mediante tablas. Los datos descriptivos recogidos en las tablas permiten realizar las consultas, análisis, gráficos e informes relativos a los datos espaciales. Dentro de los SIG existen 2 fuentes de datos los de tipo ráster y los de tipo vector. Un SIG ráster se basa en la utilización de capas ráster, que consiste en una malla rectangular de celdillas cuadradas o píxeles. En cada celda hay un número. Este número porta la información necesaria para modelizar un aspecto del medio. Son perfectos para modelizar aspectos del medio muy variables y generalmente cuantitativos y un SIG vectorial utiliza un conjunto de puntos, líneas o polígonos que modelizan un aspecto del medio. Los SIG vectoriales son más adecuados para modelizar aspectos poco variables, generalmente cualitativos (Ingeoexpert, s.f.).

## 5.2 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, en donde sus aguas desaguan en un mismo punto de drenaje ya sea al mar o a un lago endorreico y está delimitada por la divisoria de aguas (Evert, 2010). Está conformada por varias subcuencas o microcuencas que conducen el flujo a un cauce principal, forma una red de drenaje con el agua que se mueve por la superficie y/o el subsuelo de la cuenca constituyendo su sistema fluvial.

### 5.2.1 Partes de una cuenca hidrográfica

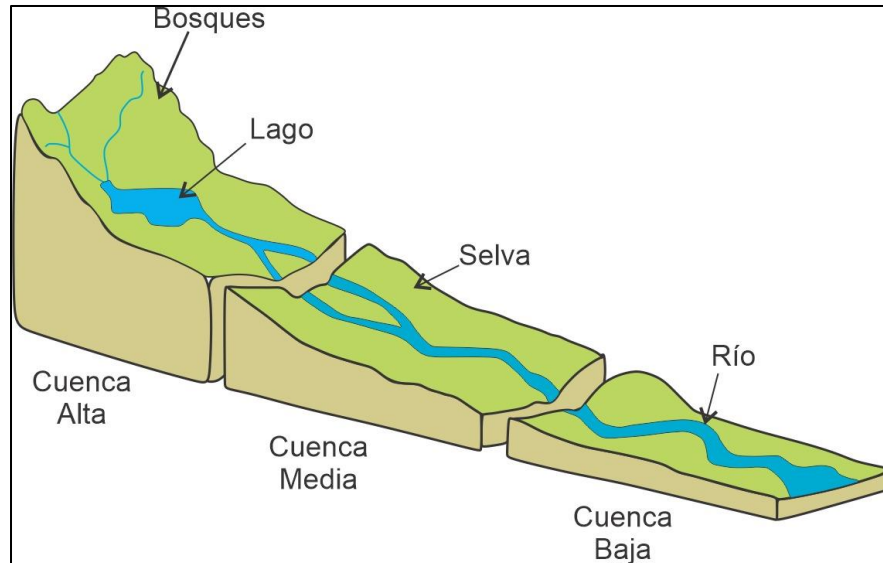
**Cuenca alta:** corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitados en su parte superior por las divisorias de aguas; en esta parte se generan procesos de erosión o remoción en masa, es donde se generan la mayoría de los deslizamientos que aportan sedimentos a las avenidas torrenciales (Ordoñez, 2011).

**Cuenca media:** donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde el río principal mantiene un cauce definido; en esta zona se da el transporte de la avenida torrencial a lo largo del cauce del río o quebrada, añadiendo más materiales a la torrencialidad (Ordoñez, 2011).

**Cuenca baja o zonas transicionales:** donde el río desemboca a ríos mayores a zonas bajas tales como estuarios y humedales; en esta zona se da la deposición final de la avenida torrencial y es donde se puede apreciar el mayor daño causado por el fenómeno (Ordoñez, 2011).

**Figura 3**

*Partes de una cuenca hidrográfica. Modificado de Ordoñez, 2011.*



**Río principal:** es definido como el curso con mayor caudal de agua o bien con mayor longitud, la distinción entre río principal y afluente suele ser arbitraria, aunque la mayoría de las cuencas presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta la divisoria de aguas. Se distinguen tres partes, el curso alto, el medio y el bajo (Ordoñez, 2011).

### **5.2.2 Tipos de cuencas**

De acuerdo con Ordoñez, las cuencas se clasifican, según su tamaño geográfico estas pueden ser cuencas grandes, cuencas medianas, cuencas pequeñas; por su ecosistema, pueden ser cuencas áridas, cuencas tropicales, cuencas frías y cuencas húmedas; por su objetivo, pueden ser hidro energéticas, para agua poblacional, para riego, para navegación, ganaderas y de uso múltiple; por su relieve, pueden ser cuencas planas, cuencas de alta montaña y cuencas accidentadas; y por

ultimo debido a la dirección de la evacuación de las aguas, pueden ser cuencas exorreicas o abiertas, que drenan sus aguas al mar; cuencas endorreicas o cerradas, desembocan en lagos, lagunas o salares que no tienen comunicación fluvial con el mar; y cuencas arreicas, las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de unirse a una red de drenaje.

### **5.3 Morfometría de una cuenca o una subcuenca**

Las características morfométricas corresponden a la aplicación de procedimientos que, a través del estudio de la morfología y geomorfología, caracterizan los rasgos propios de las cuencas y subcuencas hidrográficas en valores numéricos, los cuales permiten comparar en forma exacta una parte de la superficie terrestre con otra. Estos parámetros están relacionados con el régimen hidrológico de una cuenca o subcuenca, ya que es una función compleja de numerosos factores, entre los que predomina el clima y la forma del terreno en el cual se desarrolla el fenómeno. Este análisis es realizado mediante la obtención de índices morfométricos, a partir de la forma de la cuenca, red de drenaje y relieve. Los valores morfométricos son fundamentales para documentar la analogía territorial, para establecer relaciones hidrológicas de generalización y se expresan en valores simples las características de paisajes complejos (Ruiz, 2001).

Con los artículos “Drainage basin characteristics” (1932) y “Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology” (1945), Robert Horton sentó las bases del estudio de las características morfométricas de una cuenca, estos estudios fueron transformándose de análisis cualitativos a estudios cuantitativos a través de los años en especial con las modificaciones realizadas por Arthur Strahler en 1964 a los estudios propuestos anteriormente por Horton (Santander, 2014).

En el 2010, Trujillo et al, publicaron el libro Guía básica para la caracterización morfométrica de las cuencas hidrográficas, en donde se expone de forma clara el cálculo de las características morfométricas de una cuenca, a partir del análisis de la subcuenca Rio Sucio ubicada en el Cauca.

Méndez en el 2015, realizó el estudio Geomorfometría de cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo “El Avila” en el estado del Ávila, Venezuela, y Camino en el 2018 realizó, el Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), en ambos estudios se analizan las diferentes características morfométricas de una cuenca en específico y como estas influyen en la respuesta hidrológica y geomorfológica de la cuenca ante eventos de máxima precipitación.

### ***5.3.1 Parámetros asociados a la forma de la cuenca o subcuenca***

Los factores geológicos, principalmente, son los encargados de moldear la fisiografía de una región y particularmente la forma que tienen las cuencas hidrográficas. Para explicar cuantitativamente la forma de la cuenca, se compara la cuenca con figuras geométricas conocidas como lo son: el círculo, el óvalo, el cuadrado y el rectángulo, y particularmente en los eventos de avenidas máximas condicionan la velocidad del escurrimiento superficial (Lux, 2016).

#### **5.3.1.1 Área**

Se define como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido, directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la

superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa normalmente en Km<sup>2</sup> (Trujillo, 2010).

#### **5.3.1.2 Perímetro**

Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas, se expresa en metros (m) o kilómetros (Km) (Trujillo, 2010).

#### **5.3.1.3 Longitud**

Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (estación de aforo) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (Trujillo, 2010).

#### **5.3.1.4 Factor de forma de Horton (K<sub>r</sub>)**

Es la relación entre el área (A) y el cuadrado de la longitud de la cuenca (L).

$$K_r = \frac{A}{L^2}$$

Estima cuan cuadrada (alargada) puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma (Horton, 1932).

### **5.3.1.5 Relación de Elongación (Re)**

Se define como la relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca (A) y cuyo diámetro sea igual la longitud de la cuenca (L) (Londoño, 2001).

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$$

## **5.3.2 Parámetros asociados a la red hidrográfica**

### **5.3.2.1 Longitud del cauce principal (Lp)**

La longitud del cauce principal corresponde a la longitud total del cuerpo de agua que le da el nombre a la cuenca (López, 2016).

### **5.3.2.2 Longitud Total de cauces (Lt)**

La longitud total del cauce corresponde a la longitud total de todos los cauces que están presentes en la zona de estudio (López, 2016).

### **5.3.2.3 Densidad de Drenajes (Dd)**

La densidad de drenajes refleja la influencia de la geología, topografía, suelos y vegetación en la cuenca hidrográfica, y está relacionado con el tiempo de salida del escurrimiento superficial de la cuenca (Londoño, 2001). Se halla por medio de la relación entre la longitud total de los cauces (Lt) y el área de la cuenca (A).

$$Dd: \frac{Lt}{A}$$

#### **5.3.2.4 Constante de Estabilidad del río (C)**

La constante de estabilidad del río representa la superficie necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables, se halla por medio de la relación entre el área de la cuenca (A) y la longitud del cauce principal (Lp) (López, 2016).

$$C = \frac{A}{\sum Lp}$$

#### **5.3.2.5 Constante de Torrencialidad (Ct)**

La constante de torrencialidad mide el grado de torrencialidad de la cuenca, se halla por medio de la relación entre el número de cauces de primer orden y el área de la cuenca en kilómetros cuadrados (Km<sup>2</sup>) (Méndez, 2015 & Camino, 2018).

$$Ct = \frac{\# \text{ cauces orden 1}}{\text{Área de la cuenca (Km}^2\text{)}}$$

### **5.3.3 Parámetros asociados al relieve**

#### **5.3.3.1 Altura y relieve**

Es uno de los parámetros más determinantes de la oferta hídrica y del movimiento del agua a lo largo de la cuenca. De ella dependen en gran medida la cobertura vegetal, la biota, el clima, el tipo y uso del suelo y otras características fisiográficas de un territorio (Londoño, 2001).

**Cota mayor de la cuenca o subcuenca (CM):** Es la mayor altura a la cual se encuentra la divisoria de la cuenca (msnm.).

**Cota menor de la cuenca o subcuenca (Cm):** Es la cota sobre la cual la cuenca entrega sus aguas a un cauce superior (msnm.).

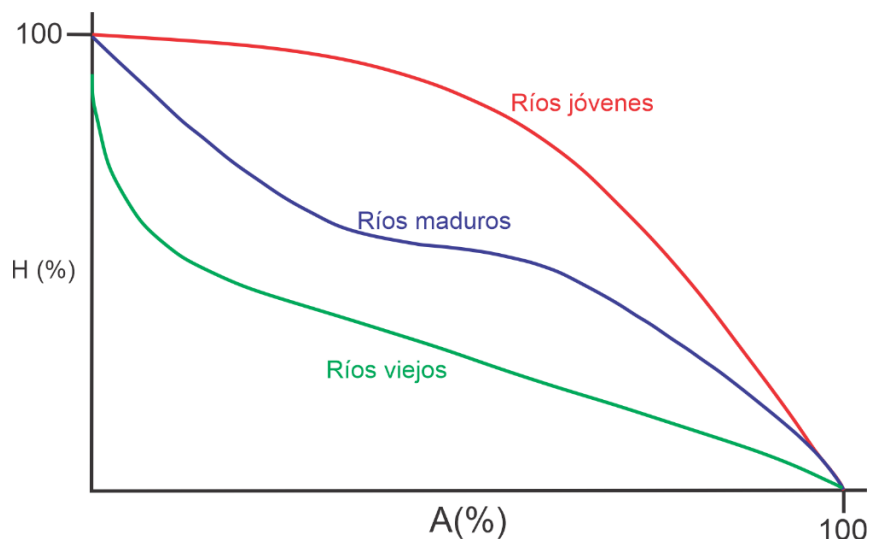
**Elevación promedio del relieve:** Es la elevación promedio de la cuenca referida al nivel del mar.

### 5.3.3.2 Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica permite caracterizar el relieve, obteniéndose a partir de las cotas de altitud y complementado con la estimación de la superficie acumulada por cada cota. La función hipsométrica es una forma objetiva de describir la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su área, en términos generales la curva hipsométrica es la representación gráfica del relieve de una cuenca (Londoño, 2001).

#### Figura 4

Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión. Modificado de Senciales y Ferre, 1999.



La curva superior (curva roja) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva azul) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva verde) es típica de una cuenca sedimentaria (Plata, 2008).

#### **5.4 Avenidas Torrenciales**

El término de avenida torrencial o torrencialidad ha sido aplicado en diferentes disciplinas y por lo tanto posee una gran variedad de significados y definiciones. Según Castillo (2006), una avenida torrencial es un flujo de escombros con poca agua y alta cantidad de rocas, suelo y escombros, que forma una pared de bloques, rocas y lodo húmedo que aparece súbitamente en el fondo de un cañón, que cuando llega a un abanico aluvial arrasa estructuras, vehículos y cubre carreteras y cultivos (Castillo, 2006). De acuerdo con Suarez, 2001, una avenida torrencial es “el fenómeno de erosión en masa que incluye el desprendimiento, transporte y depositación de grandes masas de suelo por acción del agua, estas masas se comportan como un fluido, pero su comportamiento es diferente al de los flujos de sedimentos”. Acosta, 2011, se enfoca en un punto de vista geomorfológico, en donde las avenidas torrenciales son “movimientos en masa caracterizados por el flujo rápido de una mezcla caótica de sólidos y agua que pueden desplazarse a grandes velocidades”.

Adicionalmente de acuerdo con la terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes, las avenidas torrenciales se clasifican como uno de los movimientos en masa más peligrosos debido a sus características de ocurrencia súbita y altas velocidades, además de estar clasificada como una amenaza de origen socio-natural donde se involucran procesos de degradación antrópica, (SNGRD, 2017).

El Servicio Geológico Colombiano en el 2017 identificó las características morfométricas y climáticas distintivas para así diferenciar las avenidas torrenciales de los movimientos de remoción de masa, estas características se exponen a continuación en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Características morfométricas de las avenidas torrenciales. modificado de SGC, 2017.*

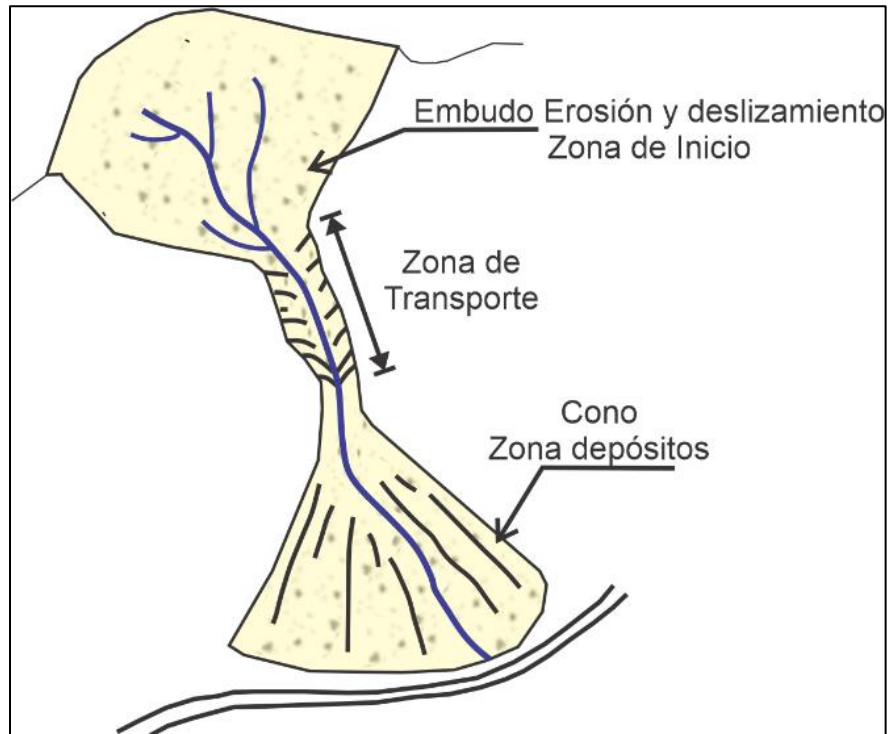
CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
<b>Tamaño</b>	Cuencas pequeñas de 0.3 Km <sup>2</sup> a 150 Km <sup>2</sup>
<b>Forma</b>	Circulares, se definen empleando el índice de Gravellius.
<b>Pendiente</b>	Pendiente media en sus laderas entre 27° y 38°.
<b>Geomorfología</b>	Cañones en forma de v, relieves abruptos, cambios bruscos de pendiente del cauce y evidencias de depósitos de materiales fluvio – torrenciales.
<b>Precipitaciones</b>	De alta intensidad.

#### **5.4.1 Flujos de las Avenidas Torrenciales**

Existen diferentes tipos de flujos torrenciales, esta clasificación depende de las características de la mezcla, la pendiente y la forma del canal, a pesar de sus diferentes tipos, todos los flujos comparten sus partes al descender por una cuenca, estas son la zona de inicio, ubicada en la parte alta de la cuenca; la zona de transporte en su parte media y la zona de depósitos en el abanico y/o planicie (Suarez, 2001).

**Figura 5**

Partes de un flujo. Modificado de Suarez, 2001.



#### **5.4.2 Fenómenos causantes de las avenidas torrenciales**

Las avenidas torrenciales son fenómenos naturales que corresponden a una consecuencia de otros eventos naturales o antrópicos, estos eventos son:

##### **5.4.2.1 Precipitaciones**

Las avenidas torrenciales se pueden dar por el incremento de las precipitaciones, que hace que la cantidad de líquido disponible en la cuenca, que permite la mezcla con los sólidos para el desplazamiento, aumente, en especial si el aumento de las lluvias es intenso. Igualmente, el aumento de las lluvias supone un aumento rápido de la presión de los poros en zonas de suelo inestable, en especial si dichos suelos se encuentran deteriorados en su capacidad de filtración y escurrimiento por la deforestación (Suarez, 2001).

#### **5.4.2.2 Deslizamientos Aislados**

Al producirse un movimiento de remoción de masa de gran magnitud que alcance el cauce de una cuenca hidrográfica de alta pendiente, los materiales aportados por el deslizamiento fluyen por el cauce generando la avenida torrencial, alcanzando velocidades importantes y recorriendo distancias considerables. La magnitud de la torrencialidad es directamente proporcional a la magnitud del deslizamiento inicial y a la morfología de la cuenca; el volumen de este flujo va aumentando a medida que avanza por el canal debido a los materiales que va arrastrando a su paso (Suarez, 2001).

#### **5.4.2.3 Represamientos de Agua**

“Cuando un canal de drenaje, cañada o río es represado por un deslizamiento de tierra se produce una acumulación grande de agua, la cual al desbordarse puede generar una avalancha de grandes proporciones.” (Suarez, 2001). Al romperse la barrera que obstaculiza el flujo normal del canal, aumenta de manera súbita la altura de la mezcla de agua y escombros, el área de desbordamiento, haciendo que una mayor cantidad de material sea aportado a la avenida torrencial, aumentando por consiguiente la velocidad y el daño que este conlleva.

#### **5.4.2.4 Eventos Sísmicos**

Si se presenta un evento sísmico de magnitud considerable y a una profundidad superficial, este genera deslizamientos que pueden llegar hasta el cauce de un río y convertirse en avenidas torrenciales. Las avenidas torrenciales formadas por eventos sísmicos dependen de varias características, entre ellas, la magnitud del sismo, su profundidad, su ocurrencia durante un periodo

de lluvias intensas, la susceptibilidad de las laderas a los deslizamientos y las características morfométricas de la cuenca (Suarez, 2001).

#### **5.4.2.5 Acción Antrópica**

Los inadecuados usos del suelo para ganadería, agricultura y deforestación pueden influir en la inestabilidad del terreno, lo que, combinado con un fuerte periodo de lluvias intensas o con un sismo, generaría un movimiento de remoción y la posterior depositación de estos materiales en la cuenca, generando de esta forma la avenida torrencial.

La deforestación y pérdida de la cobertura vegetal en las laderas, afecta el ciclo del agua, al no haber medios para la absorción del agua, esta se infiltra en el suelo o va generando un lavado sobre la ladera, haciendo inestable el terreno y aumentando el riesgo de movimientos de remoción de masa y por consiguiente una avenida torrencial (Forero *et al.* 2017).

## 6. Marco Geológico

En esta sección se desarrolla el estado del arte del área de interés, con apoyo del cuadrángulo H-12 que comprende las planchas cartográficas 109 y 120 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) a escala 1:100.000 y su respectiva memoria explicativa, en donde se hará una revisión de la geología, las estructuras y las unidades litoestratigráficas encontrada en el área de estudio ubicada en el municipio de Floridablanca, Santander. Así mismo, para el apartado de geomorfología se tiene en cuenta el mapa de Unidades Geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano (SGC) a escala 1:100.000.

### 6.1 Estratigrafía

La zona de estudio presenta gran variedad litológica, se evidencian principalmente rocas metamórficas del Precámbrico y rocas graníticas e intrusivas del Triásico-Jurásico (Mantilla et al., 2012), y en sectores muy locales rocas sedimentarias del cretácico y depósitos Cuaternarios, adicionalmente se presenta una columna estratigráfica generalizada a manera de esquema para entender la temporalidad de cada una de las unidades (ver figura 6).

#### 6.1.1 Neis de Bucaramanga (PCab)

El Neis de Bucaramanga se constituye como la parte basal del Macizo de Santander, se identifican rocas metamórficas de alto grado y origen sedimentario, además estas rocas atestiguan la evolución tectónica del macizo (Ward et al., 1973). El Neis de Bucaramanga aflora en la faja de Bucaramanga hacia el este de la falla del mismo nombre. En esta faja el neis consiste en meta-

pelitas, semi-pelitas y meta-areniscas intercaladas con capas delgadas locales de rocas calcosilicatadas y mármol (Ward et al., 1973).

### **6.1.2 Formación Silgará (PDs)**

La Formación Silgará aflorante en el Macizo de Santander es definida por Ward et al. (1973), como es una secuencia de rocas clásticas metamorfoseadas, presenta litologías metamórficas fundamentalmente metapelíticas, metasemipelitas y en menor proporción por pizarras y filitas calcáreas, las cuales alcanzaron el máximo pico de metamorfismo en la facies Esquistos Verdes.

### **6.1.3 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 (Ronderos, A., 2022).

### **6.1.4 Cuarzomonzonita de La Córcova (JRcl)**

Principalmente se trata de una roca ígnea equigranular con biotita uniformemente diseminada, es gris cuando está fresca pero meteorizada toma tonos gris claro a amarillento debido a la presencia de pátinas de oxidación. En el Macizo de Santander la Cuarzomonzonita La Corcova se observa como dos cuerpos, de forma alargada, con una orientación NS. Estos cuerpos han sido

separados por efectos tectónicos y presentan leves variaciones composicionales, las rocas se encuentran en contacto intrusivo con las unidades Neis de Bucaramanga, Ortogneis de Berlín y la Formación Silgará (Ward et al., 1973).

#### ***6.1.5 Formación Girón (Jg)***

En general, la Fm. Girón hacia la base areniscas conglomeráticas violáceas de grano medio a fino, de composición silícea, hacia la parte media y superior presencia areniscas de grano medio, compactas, silíceas; intercaladas con limolitas violáceas y verdosas. Texturalmente se distingue por ser una arenisca, muy compacta y con baja porosidad (Clavijo, 2001).

#### ***6.1.6 Depósitos Fluviotorrenciales conos de deyección y terrazas altas y medias (Qtf) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal)***

Los depósitos cuaternarios son muy variados en su origen y se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de los valles de los principales ríos y quebradas. En el área de estudio estos se encuentran ubicados en la parte occidental correspondiendo a la zona de la falla de Bucaramanga y en el cauce de Riofrio.

##### **6.1.6.1 Depósitos Fluviotorrenciales conos de deyección y terrazas altas y medias (Qtf)**

Son depósitos de Piedemonte de origen aluviotorrencial y aluviogravitacional, provenientes de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander. Estos depósitos están constituidos por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas de tamaño grava y bloque, principalmente neises y granodioritas, esporádicamente anfibolitas y esquistos en matriz

areno limosa. Se presentan sobre el piedemonte oriental del área metropolitana de Bucaramanga entre el casco urbano de Floridablanca y Piedecuesta (Quintero & Mora, 2006).

**6.1.6.2 Depósitos Aluviales (Qal)**

En el municipio de Floridablanca este nivel se presenta como un depósito de forma alargada, de superficie más o menos plana, donde se ubican los barrios Bucarica y Limoncito. Este nivel se distribuye aguas abajo por el Riofrío. Está compuesto de gravas arenosas y arenas gravosas, de forma angular a subangular, con algunos bloques de roca de Neis y Cuarzomonzonita provenientes del Macizo de Santander. Son depósitos acumulados, por lo general, en la base de escarpes, y provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes, por la acción de la fuerza de gravedad. Estos depósitos se encuentran dispersos relacionados con rocas muy fracturadas del Neis de Bucaramanga (Quintero & Mora, 2006).

**Figura 6**

Columna estratigráfica de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.

EÓN	PERIODO	ÉPOCA	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	COLUMNA	DESCRIPCIÓN
FANEROZOICO	CUATERNARIO	Qal QtF	Depositos Q		Depósitos cuaternarios.
	JURÁSICO	Jg	Formación Girón		Arenisca conglomeratica y conglomerados de color pardo rojizo, limolita parda rojiza.
	TRIÁSICO -JURÁSICO	JTRcl	Cuarzomonzonita la corcova		Cuarzo monzonita biotítica de grano fino
	DEVONICO	PDs	Esquistos de Silgará		Esquistos, filitas, cuarcitas de grano fino, metareniscas, pizarras y filitas calcáreas.
PRE CÁMBRICO	NEO PROTEROZOICO	Pcab Pcabm	Neis de Bucaramanga		Neis

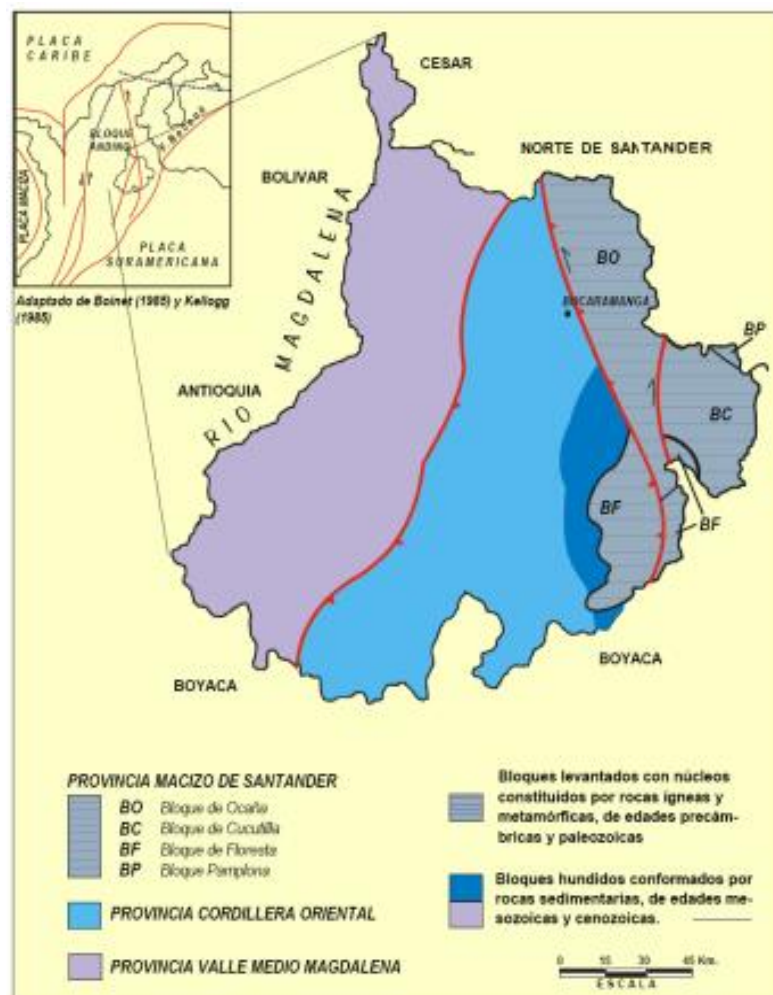
## 6.2 Geología Estructural

### 6.2.1 Marco Tectónico Regional

A escala regional, en la zona central del departamento de Santander se encuentra influenciado por la dinámica en los límites de las placas tectónicas Caribe y suramericana. Royero y Clavijo (2001), subdividen el departamento en tres provincias tectónicas: Valle medio Magdalena, Cordillera Oriental y Macizo de Santander, las cuales se ubican de Occidente a Oriente respectivamente (ver figura 7).

#### Figura 7

*Esquema tectónico del departamento de Santander. Tomado de Royero-Clavijo, 2001.*



Estructuralmente hablando la zona de la subcuenca de Riofrío se encuentra entre las provincias del macizo de Santander y la de la cordillera oriental, y es afectada por la Falla de Bucaramanga, producto de un tectonismo de carácter compresivo regional, resultado del choque entre las placas del Caribe y Suramericana, este movimiento genera desplazamientos rumbo-deslizantes en el Noroeste de Suramérica (Royero y Clavijo, 2001).

#### **6.2.1.1 Falla de Bucaramanga-Santa Marta**

Es el control estructural más prominente del departamento de Santander, al atravesar la región centro-oriental en dirección N20°W hasta la zona occidental de Santa Marta, de donde adapta el nombre. Se compone de fallas de rumbo sinistral (Campbell, 1965; León, 1991; Vargas y Niño 1992; Clavijo et al., 1993), se evidencia en valles lineados la presencia de un lineamiento recto en la mayoría de su topografía junto con un componente vertical importante, según Julivert (1959, 1961), Ward et al., (1973), París y Sarria (1988), Royero (1994), que hace que esta falla se comporte en algunos sectores como inversa y en su extremo meridional aún de cabalgamiento (Boinet, 1985).

La actividad tectónica de la falla se genera posterior a la formación del Neis de Bucaramanga, donde hasta el Mioceno superior, generó un desplazamiento de rumbo sinistral de manera simultánea con la Orogenia Andina. Sin embargo, esta falla presenta eventos de neotectonismo con evidencias como lineamiento, facetas triangulares, lomos de ganchos, drenajes adaptados, laguna de falla, lomo de obturación, generando una afectación en las unidades infra yacentes. Presenta rocas fracturadas y cizalladas localmente, con numerosas superficies de espejos

de falla orientadas en diferentes direcciones junto a lineamientos paralelos a lo largo de la falla principal (Ward et al., 1973).

## ***6.2.2 Sistemas de fallas locales presentes en el área de estudio***

### **6.2.2.1 Falla Riofrío**

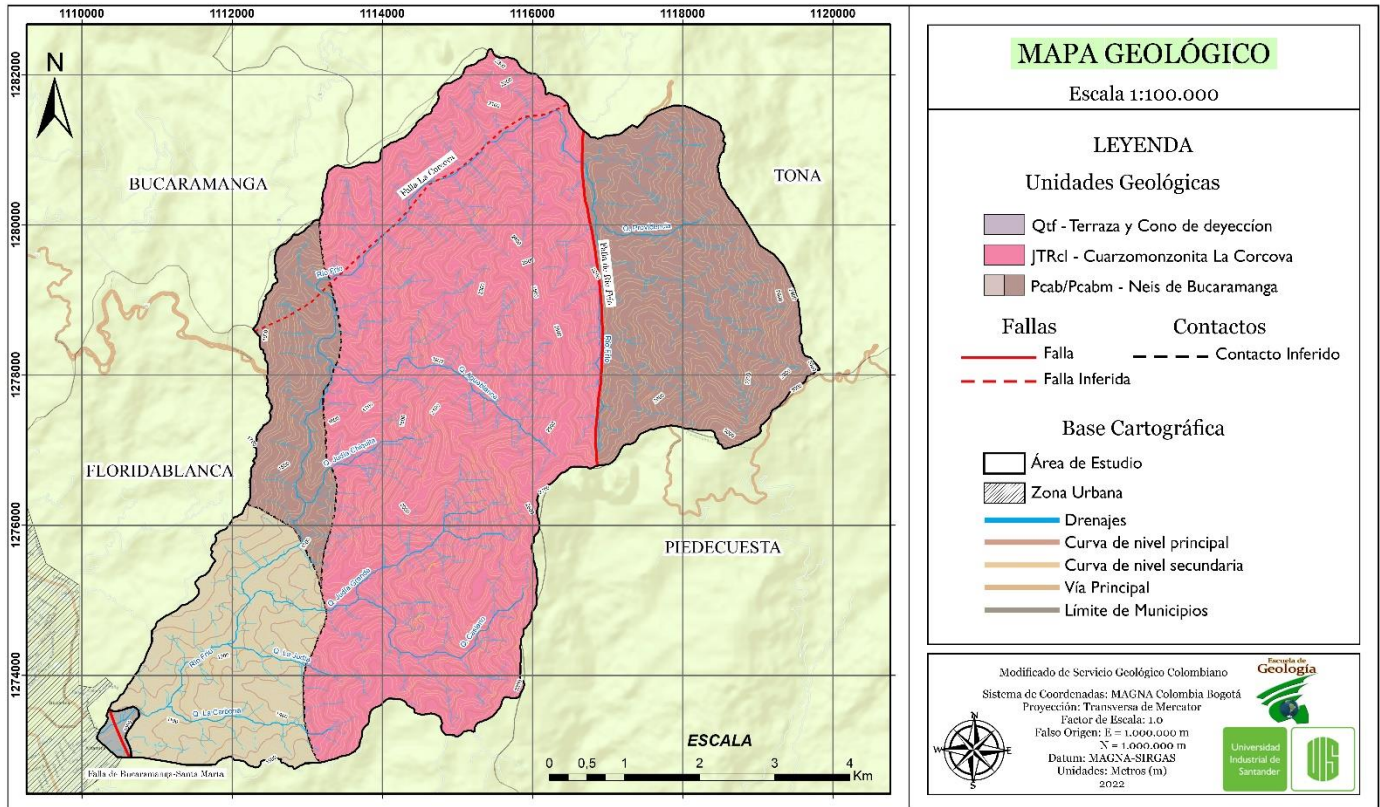
Es una estructura normal con una pequeña componente dextral, de más de 15 km. de longitud, que se une a la Falla del Lato cerca del nacimiento del Río con el mismo nombre. Tiene una dirección aproximada de N5°W, sigue el curso del Río Frío desde su nacimiento, hasta la Corcova, en este sitio las quebradas de la cuenca del río Tona se alinean llevando la dirección de esta falla y continúa con dirección N20°E hasta la Microcuenca del Río Charta, esta falla atraviesa rocas del Neis de Bucaramanga y de la Cuarzomonzonita La Corcova. La falla de Riofrío pone en contacto unidades del Neis de Bucaramanga y de la Cuarzomonzonita La Corcova en la parte oriental de la zona, estrías de falla y roca altamente fracturada pueden verse en la carretera Bucaramanga Cúcuta y en el cauce del Riofrío y sus afluentes, por lo general las estrías de falla de esta roca muestran direcciones promedio de 170/70 (Quintero & Mora, 2006).

### **6.2.2.2 Falla La Corcova**

Según Quintero & Mora (2006) Está definida en la parte norte de la zona, siguiendo el cauce de Riofrío, en la parte sur de la zona se encuentra como lineamiento debido a la dificultad de seguir la falla. La estructura coincide con el cauce de Riofrío hasta la inspección de policía de la Corcova, donde se une a la falla de Riofrío, esta falla fue definida con criterios geomorfológicos y con datos de campo, como estrías de falla con datos 200/65 en promedio con componente sinistral inversa.

**Figura 8**

*Mapa geológico de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*



### 6.3 Geomorfología

La geomorfología es la ciencia (o disciplina) que estudia al relieve terrestre, que es el conjunto de deformaciones de la superficie de la Tierra y los procesos que la originan (UNAM, Instituto de Geografía, 2017). Los rasgos geomorfológicos son importantes en muchos aspectos de manejo ambiental, debido a que desde la geomorfología se puede evaluar y proyectar el comportamiento de los terrenos y su interrelación con obras de infraestructura, enfocado entre otros al análisis hacia las amenazas naturales y Planes de Ordenamiento Territorial (SGC, 2012).

La geomorfología aplicada es una herramienta estratégica para la evaluación de la susceptibilidad del terreno ya que está enfocada hacia la clasificación del relieve para lograr la agrupación de los materiales naturales (rocas y suelos) en unidades con características similares y un origen común, siendo las geoformas la respuesta del terreno al actuar de los agentes erosivos y procesos tectónicos que han dado lugar a unidades denudacionales y morfoestructurales (SGC, 2012).

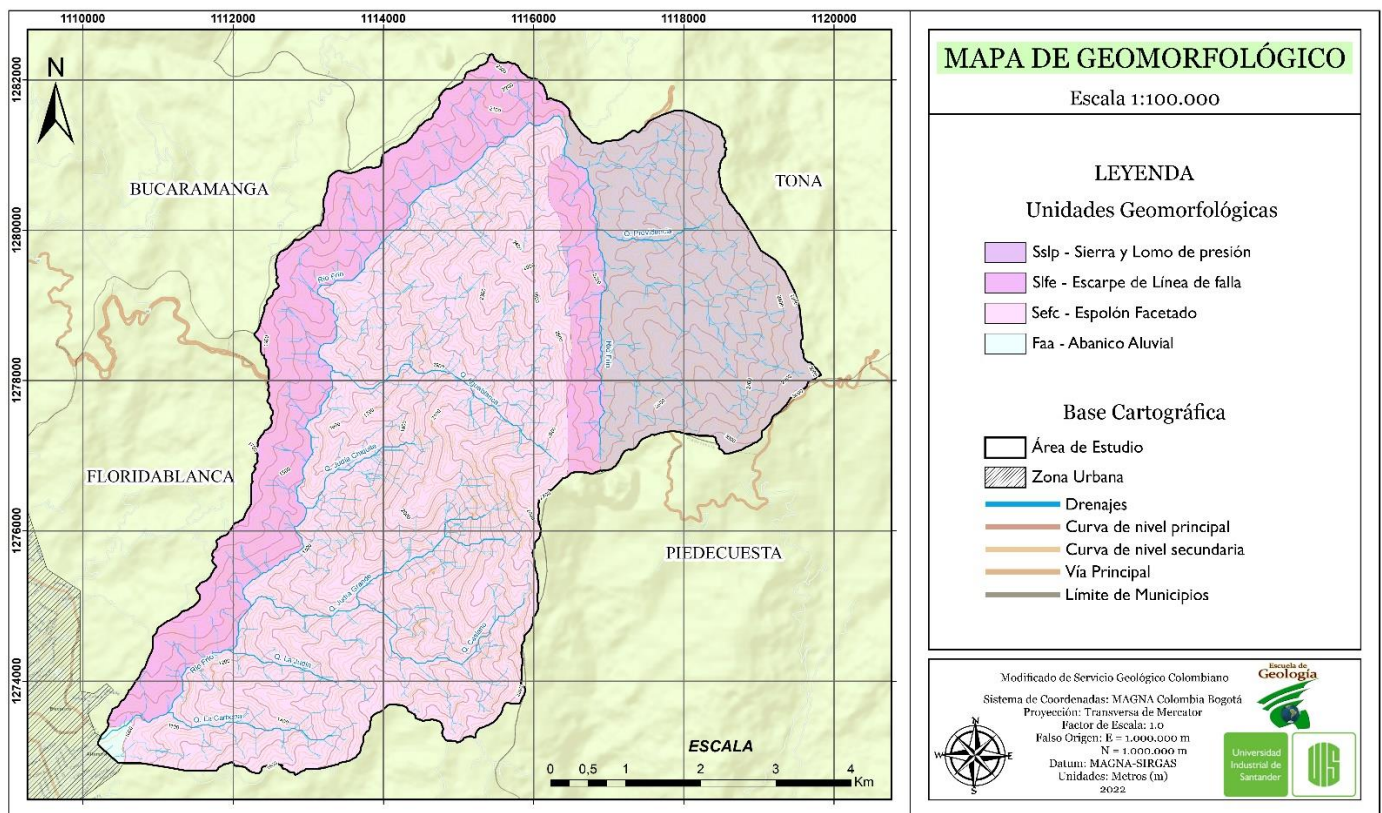
Los mapas geomorfológicos del SGC siguen la Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a la Zonificación de Amenaza, Escala 1:100.000 (SGC, 2012). Dado que para la zona de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Floridablanca los trabajos realizados por el SGC en 2012 se sintetizan en el informe mapa de unidades geomorfológicas de la plancha 120 escala 1:100.000 y la memoria explicativa del mapa geomorfológico Aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 en la plancha 109 Rionegro en el departamento de Santander.

Para el municipio de Floridablanca, según el mapa de Unidades Geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2012) a escala 1:100.000 (ver figura 9), se observa una predominancia de dos tipos de paisaje, el primero es el escenario fluvial donde se encuentra ubicado el casco urbano de Floridablanca y corresponde a un abanico aluvial; el segundo se encuentra ubicado en la parte rural del municipio abarcando en su mayoría el área de estudio, esta corresponde a un escenario estructural, el cual se encuentra representada por las geoformas de Espolón facetado, Escarpe de línea de falla, Sierra y lomo de presión. Es importante mencionar

que a una escala más detallada se reconoce que las geoformas no son del todo de origen estructural, sino que también se ven influenciadas por procesos erosivos naturales.

**Figura 9**

*Mapa geomorfológico de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*



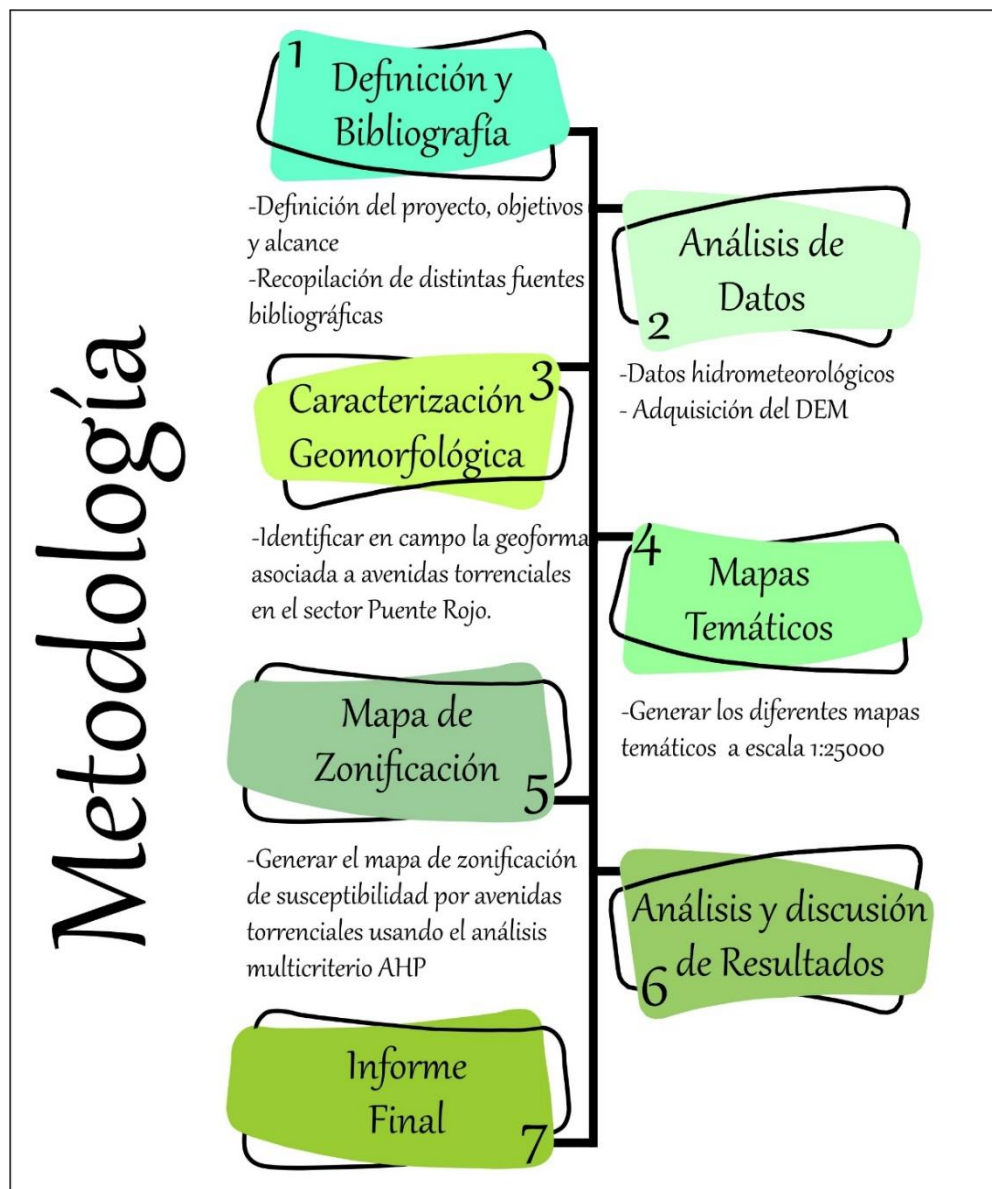
Según Ronderos, A., (2022) a estas geoformas mencionadas con antelación, se les atribuye un origen morfoestructural y las definen como aquellas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente las asociadas a plegamientos y fallamiento, cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural.

## 7. Metodología

La elaboración de este trabajo de grado se llevó a cabo a partir de las siguientes fases metodológicas establecidas con el propósito de generar el cumplimiento de los objetivos planteados.

**Figura 10**

*Esquema metodológico*



### **7.1 Definición del proyecto y Recopilación Bibliográfica**

La fase inicial de este proyecto consistió en determinar los objetivos y el alcance al que se quiso llegar según el área de trabajo seleccionada que es la parte alta de la subcuenca hidrográfica de Riofrío, la cual se encuentra ubicada dentro del municipio de Floridablanca en el departamento de Santander. Para su realización se requirió una recopilación de distintas fuentes bibliográficas con información referente a la temática a ejecutar en la zona de estudio.

### **7.2 Análisis de Datos**

Se realizó la respectiva selección y clasificación de la información meteorológica de las estaciones hidrometeorológicas cercanas al área de estudio suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y demás estudios realizados en la subcuenca; también se realizó la adquisición, por el sensor ALOS-PALSAR en el año 2007, del modelo digital de elevación (DEM) de la página web de la NASA Alaska EarthData a una resolución de 12.5 metros, con el fin de obtener información adicional de la zona de estudio, junto con la realización del cálculo de curva hipsométrica, la cual es una medición de distribución de área por altura en la cuenca lo que permitió conocer el estado de madurez erosional de la misma.

Es preciso resaltar que, en primer lugar, en la página web de la NASA Alaska EarthData se encuentran conjuntos de datos de radar de apertura sintética - SAR (Synthetic Aperture Radar), los datos adquiridos del DEM provienen del satélite Avanzado de Observación Terrestre-1 (ALOS) este satélite fue una misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). Desde 2006 a 2011, el SAR de banda L de PALSAR produjo observaciones detalladas, de día y de noche, en todas las condiciones meteorológicas, ya que este fue uno de los tres instrumentos

del Satélite ALOS, desarrollado para contribuir a los campos de mapeo, observación precisa de la cobertura terrestre regional, monitoreo de desastres y estudio de recursos (ASF, s.f.). En segundo lugar, la resolución del DEM es de 12.5 metros lo cual permitió trabajar a una escala de 1:25000 como se plantea en los objetivos específicos en la elección de la escala para los mapas temáticos o mapas insumo. Según Waldo Tobler en 1987, escribió la siguiente regla para adecuar la escala a trabajar según la resolución del DEM.

$$\text{Resolución del ráster en metros} = \frac{\text{Escala}/1000}{2}$$

Para el caso de este estudio de la parte alta de la subcuenca de Riofrio se usó la escala 1:25000 ya que se adecua a la fórmula planteada por Tobler (1987) y dio como resultado la resolución del DEM adquirido para llevar a cabo el desarrollo del estudio y el posterior cumplimiento de los objetivos propuestos.

$$\text{Resolución del ráster en metros} = \frac{25000/1000}{2} = 12.5$$

### **7.3 Caracterización Geomorfológica**

Se realizó el trabajo de campo pertinente con la finalidad de hacer la caracterización geomorfológica en la zona de Puente Rojo, se seleccionó esta ubicación debido a que se facilita el acceso a esta área ya que se tienen limitantes de acceso en la parte más alta del cauce, también se consideró realizar esta caracterización en la cercanía y trayecto del río que pasa por el casco urbano

del municipio de Floridablanca, pero se encuentran realizando trabajos de canalización del río por lo que se desaparecieron las posibles geoformas asociadas a las avenidas torrenciales.

Así mismo se tienen en cuenta la geoforma indicativa de zonas de depósito de sedimentos de las avenidas torrenciales para caracterizar la zona en cuestión y se busca una relación entre lo que se encuentra en el sector caracterizado con el mapa de subunidades geomorfológicas en cuanto a la geoforma asociada.

#### **7.4 Generación de mapas temáticos o mapas insumo**

La metodología empleada para obtener los diferentes mapas temáticos o insumo se describe a continuación junto con importancia que cada insumo tiene en la generación del mapa de zonificación el cual es el principal objetivo, posteriormente en el capítulo de análisis y discusión de resultados se mostrarán dichos mapas.

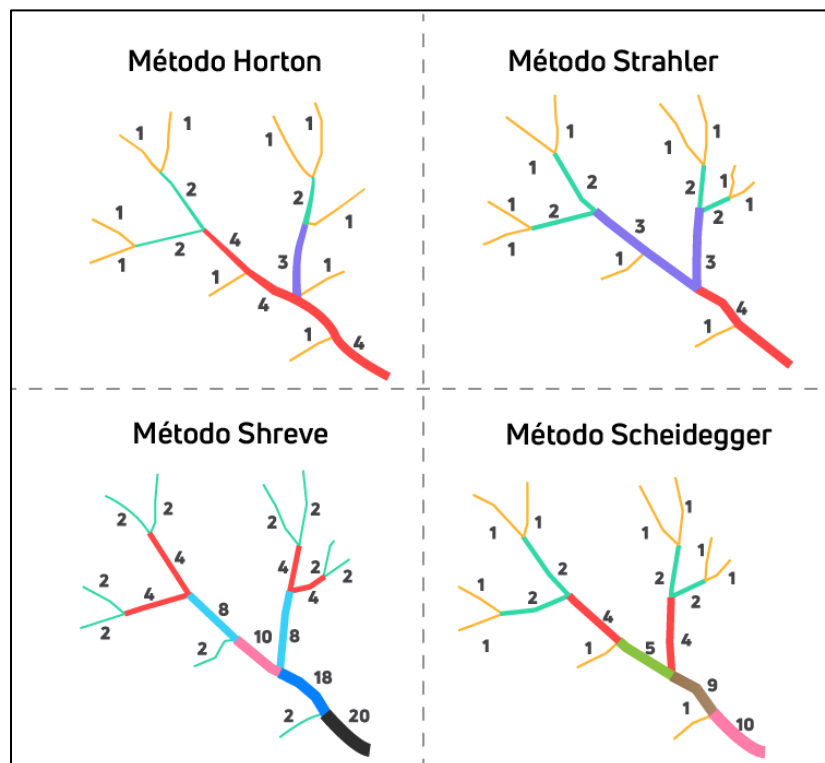
##### ***7.4.1 Mapa de Drenajes***

Para crear la red de drenajes asociados a la subcuenca se realiza por medio de la herramienta SAGA, en el software Qgis, como insumo se necesita el DEM. Para realizar el mapa donde se muestre la red hidrográfica o mapa de drenajes se utilizó el modelo digital de elevación (DEM) de la página web de la NASA Alaska EarthData a una resolución de 12.5 metros, se carga en Qgis ya que este trae dentro de su sistema la aplicación de SAGA, una vez se carga el DEM se aplica una corrección para que el DEM quede sin depresiones y se pueda ejecutar de mejor manera la herramienta “Red de Canales y Cuencas de Drenaje” y cuando esta finaliza se obtiene la capa de drenajes a partir del DEM.

Una vez se tiene la capa de drenajes, por medio del método de Strahler el cual se basa en la jerarquía de los afluentes, cuando en una red hidrográfica tiene tributarios los cuales no tiene vínculos con otros se les asigna el orden 1 o de primer orden, y la intersección de 2 tributarios de 1er orden da origen a tributarios de segundo orden, siendo así que la clasificación aumenta cuando 2 órdenes de la misma jerarquía se intersecan, por lo que si se unen 2 tributarios de diferente jerarquía no crea una nueva clasificación sino que se deja la del orden mayor como lo muestra la figura 11 donde se relacionan los diferentes métodos para obtener los órdenes de drenajes.

**Figura 11**

*Comparación de los métodos de clasificación de orden de drenajes. tomado de MasterGis.*



A criterio de los autores significaría que a la confluencia de 2 órdenes iguales aumenta el orden al siguiente, sin que estos se sumen, cosa que no pasa en los otros métodos en donde van sumando cada uno de los órdenes de los tributarios, por lo que los otros métodos tienen más jerarquía y se hace un poco más complejo difícil a la hora de manejar los datos. Aunque los métodos de Horton (1945) y Strahler (1952) se parecen se elige el de Strahler ya que con Horton existe una segunda fase, en la que se considera que toda corriente ha de tener el mismo orden, desde su comienzo hasta el final. Strahler, por el contrario, admite un aumento de orden, en función del aumento del número de tributarios (Londoño, 2001).

Se escoge este mapa como mapa insumo para la generación del mapa de susceptibilidad por avenida torrencial, debido a que en una avenida torrencial influyen tres factores principales, generación, transporte y depositación, los drenajes de la subcuenca cumplen con el factor de transporte de la avenida torrencial después de su generación en las zonas más altas de la subcuenca.

#### ***7.4.2 Mapa de Pendientes***

La pendiente es la relación que existe entre la distancia horizontal y la altitud entre dos puntos. La pendiente es una manera de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente. El mapa de pendientes es un mapa temático en el cual se identifica la diferencia del gradiente entre dos formas de relieve. Es decir, es una relación entre la distancia horizontal y la altitud entre dos puntos. Se escoge este mapa como insumo en la elaboración del mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales, debido a que las pendientes medias a altas están asociadas a crecientes súbitas, debido a que la subcuenca de Riofrío es una subcuenca de alta montaña, sus pendientes podrían tener una influencia importante

en la generación, transporte y depositación de las avenidas torrenciales, siendo este último factor el correspondiente a las pendientes más bajas que se encuentran en las llanuras de inundación de los drenajes, mientras que para la generación y transporte influirían las pendientes medias a altas.

Para realizar el mapa de pendientes se utilizó el modelo digital de elevación (DEM) de la página web de la NASA Alaska EarthData a una resolución de 12.5 metros, se carga en Qgis, se usa la herramienta “pendiente” y se le da la opción al software que calcule las pendientes en porcentaje y posteriormente se realiza la clasificación de esas pendientes, como se muestra en la tabla 2, en 7 clases según Van Zuidam (1986) en Mora *et al.*, 1992.

**Tabla 2**

*Clasificación de pendientes según Van Zuidam (1986).*

CLASE DE PENDIENTE		TERMINO DESCRIPTIVO
RANGO DE PENDIENTE (°)	RANGO DE PENDIENTE (%)	
0 - 2	0 - 2	Plana o casi a nivel
2 - 4	2 - 7	Suavemente inclinada
4 - 8	7 - 15	Inclinada
8 - 16	15 - 30	Moderadamente abrupta
16 - 35	30 - 70	Abrupta
35 - 55	70 - 140	Muy abrupta
Más de 55	Más de 140	Extremadamente abrupta

### 7.4.3 Mapa de Precipitación

Como parte de los insumos base para la elaboración final del mapa de susceptibilidad, se escoge este criterio como insumo debido a que las lluvias juegan un papel importante en la generación de una avenida torrencial ya que, si hay un incremento de las precipitaciones, hace que aumente la cantidad de líquido disponible en la cuenca, lo cual permite la mezcla con los sólidos para su desplazamiento, en especial si el aumento de las lluvias es intenso.

Es por esto por lo que se usan los datos de precipitación disponibles, obtenidos por las estaciones climáticas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) cercanas a la zona de estudio como se muestra en la figura 12, estos datos son de libre acceso y se encuentran en el portal del instituto.

**Tabla 3**

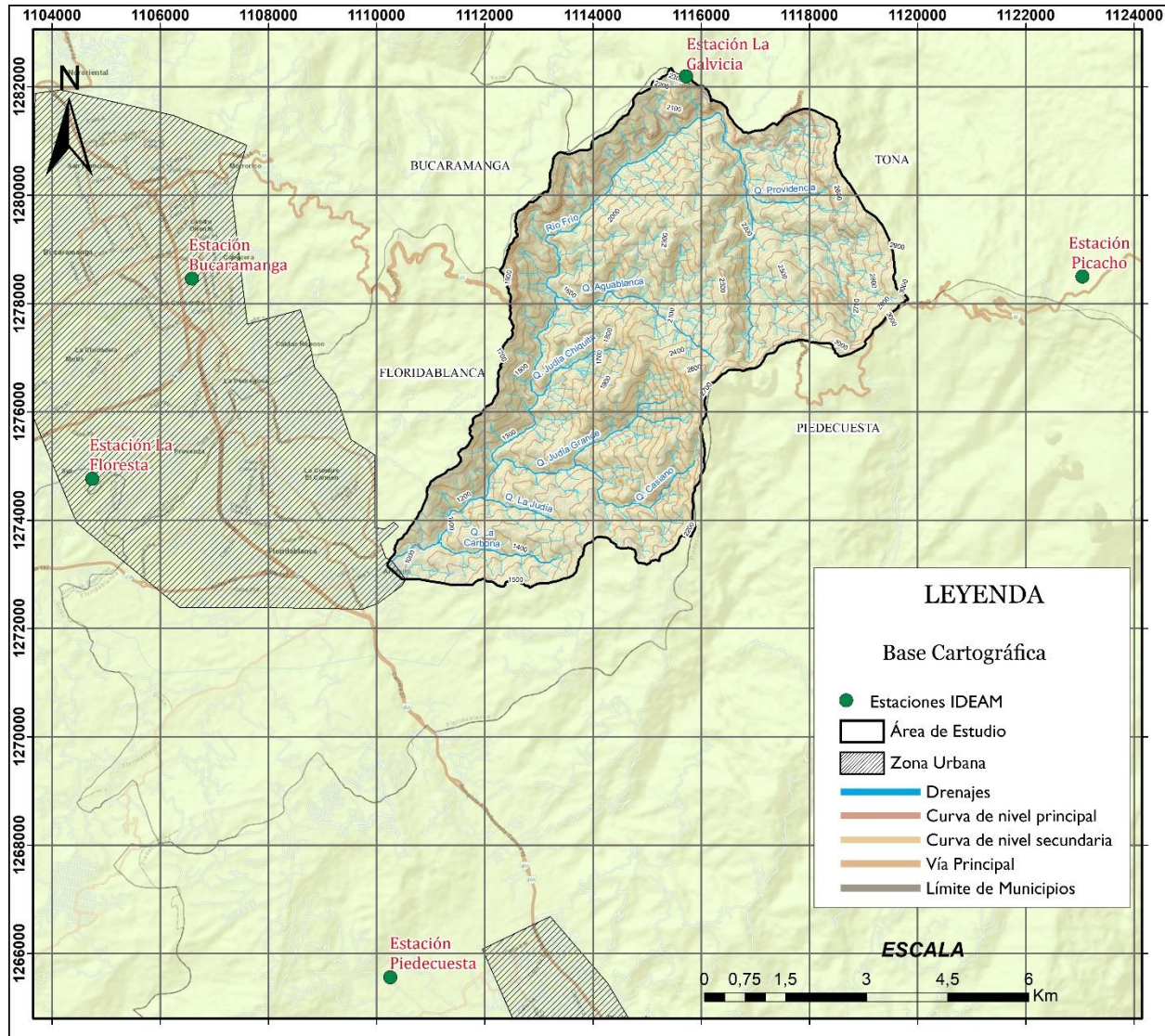
*Precipitación multianual promedio de las estaciones más cercanas a la Subcuenca*

<b>Estación</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Precipitación Multianual Promedio</b>
<b>La Galvicia</b>	1115726	1282235	1794
<b>Bucaramanga</b>	1106527	1278528	1264
<b>La Floresta</b>	1104694	1274837	1209
<b>Picacho</b>	1123101	1278565	1417
<b>Piedecuesta</b>	1110238	1265631	1629

Para la zona de estudio se tomaron los datos de precipitación multianual promedio en un periodo de tiempo comprendido entre enero del año 2010 hasta diciembre del año 2021, las estaciones de las cuales se tomaron los datos de precipitación se encuentran consignadas en la tabla anterior (ver tabla 3).

**Figura 12**

*Mapa de localización de las estaciones meteorológicas consultadas.*



Para la generación del mapa de precipitación de la zona de estudio se importó el Excel con los datos de las estaciones limnimétricas (X, Y, Precipitación en mm), se realizó el display de los datos en Qgis para luego aplicarle el método de interpolación de datos y de esta manera generar el mapa de precipitación de la zona.

#### ***7.4.4 Mapa de Alturas***

El mapa de alturas se tiene en cuenta como insumo debido a que las alturas de la cuenca juegan un papel importante en el transporte y depositación de las avenidas torrenciales a lo largo del cauce de los drenajes. Este mapa se genera a partir de las curvas de nivel de la cuenca, con estas se genera el ráster TIN de alturas y este ráster se convierte en el shapefile (capa vectorial) de las alturas de la cuenca.

#### ***7.4.5 Mapa de Morfometría***

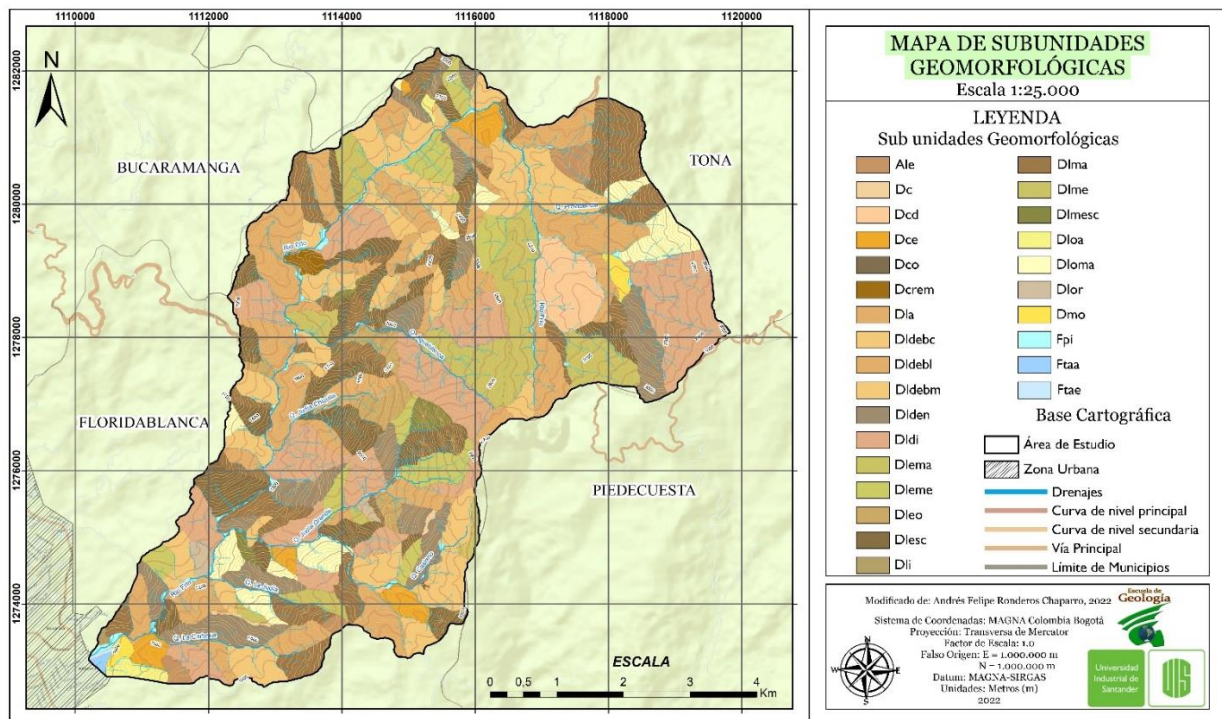
Para realizar el mapa de morfometría se parte del estudio morfométrico que se le realizó a toda la subcuenca, el cual se constituyó desde la morfometría de cada microcuenca que la conforma, las cuales son La Carbona, Riofrio, La Judía, Casiano, Judía Grande, Judía Chiquita y Agua Blanca. Los resultados obtenidos después de aplicar los cálculos que conforman los parámetros morfométricos descritos en el capítulo de marco teórico; se toma como criterio importante para construir este mapa el valor del coeficiente de torrencialidad, debido a que es el valor que demuestra que tan propensas son las microcuencas para generar avenidas torrenciales, y es por esta razón que se toma como parámetro para generar el mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales.

### 7.4.6 Mapa de Subunidades Geomorfológicas

Uno de los insumos usados para la elaboración del mapa de susceptibilidad por avenidas torrenciales es el mapa de subunidades geomorfológicas, debido a que es importante entender las geoformas del terreno para así identificar principalmente zonas susceptibles a transporte y depositación del material. El tipo de análisis que realizó Ronderos (2022) en el apartado de geomorfología tiene un enfoque morfogenético, ya que cada uno de los polígonos delimitados los definió como aquellos que agrupan las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se formaron las geoformas. Aunque, él también tuvo en cuenta aspectos correspondientes a la forma, longitud y altura, los cuales son temas de experticia geomorfológica (ver figura 13).

**Figura 13**

*Mapa de Subunidades geomorfológicas. Tomado de Ronderos, 2022.*



**Tabla 4***Subunidades cartografiadas en el mapa de subunidades geomorfológicas a escala 1:25000*

<b>DENUDACIONAL</b>		
<b>SUBUNIDAD</b>	<b>COD</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>
Cima	Dc	0.06127
Colina denudada	Dcd	1.08335
Cerro denudado	Dce	0.89436
Coluvión	Dco	0.03216
Cerro remanente	Dcrem	0.16502
Ladera abrupta	Dla	2.52566
Lomo denudado bajo de longitud corta	Dldebc	1.23159
Lomo denudado de longitud larga	Dldebl	6.11348
Lomo denudado de longitud media	Dldebm	5.20516
Ladera denudada	Dlden	3.75055
Ladera disectada	Dldi	6.8406
Ladera erosiva muy abrupta	Dlema	2.56878
Ladera erosiva muy escarpada	Dleme	1.92233
Ladera escarpada ondulada	Dleo	0.81155
Ladera escarpada	Dlesc	4.03702
Ladera inclinada	Dli	0.03364
Ladera muy abrupta	Dlma	4.48441
Ladera denudada muy escarpada	Dlme	1.30706
Ladera muy escarpada	Dlmesc	0.36022
Ladera ondulada abrupta	Dloa	0.24317
Ladera ondulada muy abrupta	Dloma	1.71826
Lomo residual	Dlor	0.19761
Montículo denudacional	Dmo	0.26697
<b>TOTAL</b>		<b>45.4691</b>
<b>FLUVIAL</b>		
<b>SUBUNIDAD</b>	<b>COD</b>	<b>ÁREA</b>
Plano o llanura de inundación	Fpi	0.49883
Terraza aluvial alta	Ftaa	0.0518
Escarpe de terraza aluvial	Ftae	0.01985
<b>TOTAL</b>		<b>0.57048</b>
<b>ANTROPICA</b>		
<b>SUBUNIDAD</b>	<b>COD</b>	<b>ÁREA</b>
Ladera explanada	Ale	0.46037

Las 28 subunidades cartografiadas en el trabajo realizado por Ronderos (2022) corresponden a 3 tipos de ambientes: 24 de ellas de tipo denudaciones, 3 de ellas de tipo fluviales con un área de y 1 de tipo antrópica. En la tabla 4 se muestra el área de cada una de esas subunidades evidenciando que en la zona de estudio predominan geoformas de origen denudacional con un área de 45.4691 Km<sup>2</sup>, en segundo lugar se encuentran las geoformas de origen fluvial con un área de 0.57048 Km<sup>2</sup> localizándose principalmente en cercanía al casco urbano del municipio y en la parte superior siguiendo el cauce del Riofrio y en tercer y último lugar se tiene la geoforma correspondiente a Ladera explanada de origen antrópico con un área de 0.46037 Km<sup>2</sup>.

En la tabla 5 se sintetizan la definición y descripción de cada una de las geoformas mostradas en la figura 13, estas definiciones están basadas según Ronderos (2022), quien adaptó la propuesta realizada por el SGC, 2012 a las necesidades de la zona con relación a la escala del mapa 1:25000.

Tabla 5

*Definición y descripción de las subunidades cartografiada para cada uno de los ambientes identificados en la zona de estudio.*

<b>AMBIENTE DENUDACIONAL</b>	
<b>SUBUNIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b><i>Cima (Dc)</i></b>	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.
<b><i>Colina denudada (Dcd)</i></b>	Subunidad propuesta por Ronderos (2022) 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.
<b><i>Cerro denudado (Dce)</i></b>	Subunidad propuesta por Ronderos (2022) dada las características morfométricas de la subunidad 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
<b><i>Coluvión (Dco)</i></b>	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.
<b><i>Cerro remanente (Dcrem)</i></b>	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.
<b><i>Ladera abrupta (Dla)</i></b>	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 en la vereda Aguablanca
<b><i>Lomo angosto (Dlan)</i></b>	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° - 45°). No presentan movimientos en masa debido a su baja pendiente. Esta unidad se encuentra ubicada en la vereda Aguablanca hacia el sector oeste.
<b><i>Lomo denudado bajo de longitud corta (Dldebc)</i></b>	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

<b><i>Lomo desnudo de longitud larga (Dldebl)</i></b>	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
<b><i>Lomo desnudo de longitud media (Dldebm)</i></b>	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
<b><i>Ladera desnuda (Dlden)</i></b>	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 sub-paralelo. 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.
<b><i>Ladera disectada (Dldi)</i></b>	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
<b><i>Ladera erosiva muy abrupta (Dlema)</i></b>	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 sub-paralelo a dendrítico con alta disección. Esta unidad se concentra principalmente en la vereda Aguablanca en su sector norte
<b><i>Ladera erosiva muy escarpada (Dleme)</i></b>	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 sub-paralelo a dendrítico con alta disección. Esta unidad se encuentra concentrada en la parte central de la cuenca, más específicamente hacia en sur de la vereda Helechales y el norte de la vereda Aguablanca
<b><i>Ladera escarpada ondulada (Dleo)</i></b>	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
<b><i>Ladera escarpada (Dlesc)</i></b>	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
<b><i>Ladera inclinada (Dli)</i></b>	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.
<b><i>Ladera muy abrupta (Dlma)</i></b>	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

<b>Ladera desnuda muy escarpada (Dlme)</b>	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 sub-paralelo con alta disección. Esta unidad se encuentra en el sector este de las veredas Aguablanca y Alsacia
<b>Ladera muy escarpada (Dlmes)</b>	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.
<b>Ladera ondulada abrupta (Dloa)</b>	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 sub-dendrítico a sub-paralelo. Esta unidad cuenta con una entidad al extremo norte y otra en el extremo sur de la cuenca.
<b>Ladera ondulada muy abrupta (Dloma)</b>	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 sub-dendrítico a sub-paralelo. 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
<b>Lomo residual (Dlor)</b>	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.
<b>Montículo denudacional (Dmo)</b>	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**

<b>SUBUNIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Plano o llanura de inundación (Fpi)</b>	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 intramontaña. 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 sub-paralelo de mediana densidad, se presentan como superficies estrechas, alargadas y profundas
<b>Terraza aluvial alta (Ftaa)</b>	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.
<b>Escarpe de terraza aluvial (Ftae)</b>	Plano vertical a sub-vertical, 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

#### **AMBIENTE ANTRÓPICO**

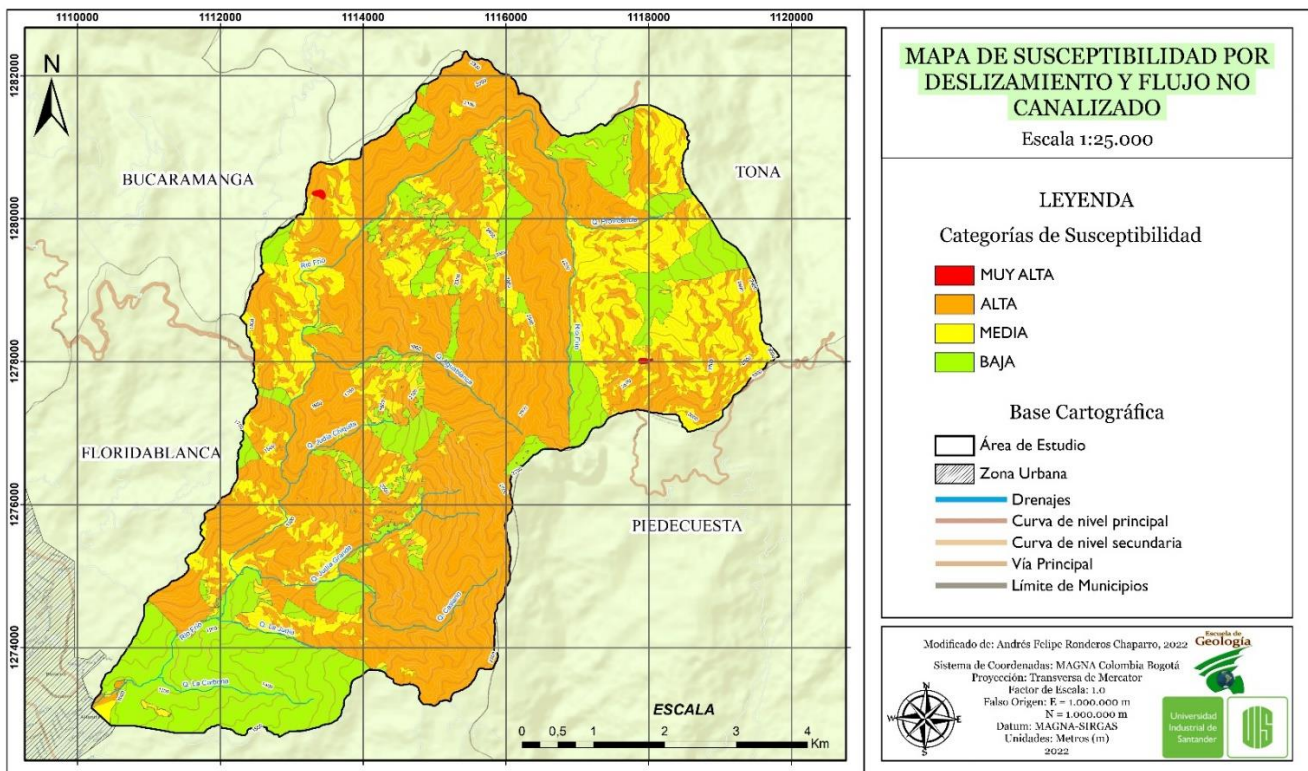
<b>SUBUNIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Ladera explanada (Ale)</b>	Están asociadas a terrenos donde se han realizado cortes de laderas con el fin de adecuar terrenos para viviendas e infraestructuras, las explanaciones se dan con más frecuencia en la zona rural hacia el margen derecho donde se encuentra 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.

#### 7.4.7 Mapa de Susceptibilidad por Deslizamiento y Flujo no canalizado

De los insumos usados para la elaboración del mapa de susceptibilidad por avenidas torrenciales es el mapa resultante del trabajo titulado “Zonificación de la Susceptibilidad por Movimientos Tipo Deslizamiento y Flujo no Canalizado a Escala 1:25000 para la Cuenca del Río Frío, municipio de Floridablanca, Santander.” Mostrado en la figura 14, dicho mapa presenta 4 categorías de susceptibilidad, Muy Alta correspondiendo al 0,54%, Alta correspondiendo al 57,22%, Media correspondiendo al 20,1% y Baja correspondiendo al 22,14% del área total de la zona de estudio.

**Figura 14**

*Mapa de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado. Tomado de Ronderos, 2022.*



Se selecciona este mapa como un insumo debido a que uno de los posibles detonantes de las avenidas torrenciales son los deslizamientos aislados, ya que al producirse un movimiento de remisión de masa de gran magnitud que alcance el cauce de una cuenca hidrográfica de alta pendiente, los materiales aportados por el deslizamiento fluyen por el cauce generando la avenida torrencial. Por lo que al tener la zonificación de la susceptibilidad a estos deslizamientos y flujos no canalizados permitiría identificar zonas de desencadenamiento y si dichas zonas se conectan con la red de drenajes permitiría el desarrollo del fenómeno de la avenida torrencial.

### **7.5 Mapa de Zonificación de Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales**

El mapa de zonificación de susceptibilidad por avenida torrencial se generó a partir de los parámetros obtenidos en las diferentes fases anteriores, dicha zonificación se basó en el desarrollo de un modelo con enfoque heurístico empleando la metodología de análisis multicriterio AHP (Análisis de Procesos Jerárquicos).

La metodología AHP es un método de análisis de decisión de peso jerárquico desarrollado por el investigador Saaty en 1997, es un método de análisis que incorpora los aspectos cuantitativo y cualitativo del pensamiento, el cuantitativo para expresar los juicios de manera concisa mientras que el cualitativo se emplea en la descripción del problema y su jerarquía (Oddershede, Arias, & Cancino, 2007)

Este método tiene un sólido fundamento científico y se ha empleado porque está basado en el establecimiento de una estructura jerárquica que permite trabajar con mucha información y admite la integración de las opiniones y juicios de diferentes expertos en el tema en cuestión.

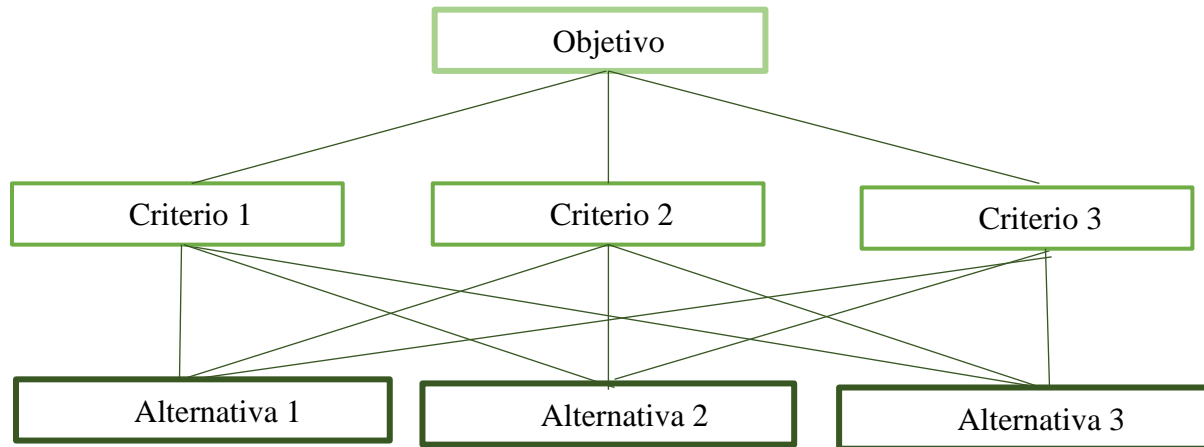
Incorpora los aspectos cualitativos y cuantitativos del pensamiento humano: los cualitativos para describir el problema y su jerarquía, y los cuantitativos para expresar los juicios y preferencias de manera concisa. Considera la consistencia de los juicios emitidos y además tiene soporte de software para hacer los cálculos y el análisis de sensibilidad (Oddershede, Arias, & Cancino, 2007).

Para realizar este análisis se necesita descomponer en partes cada vez más finas el problema y/o situación a tratar, esto con el fin de poder comparar solo un par de elementos en el juicio y evitar mezclar todos los factores desconociendo su relación unos con otros, para esto se hace necesario la jerarquización de todos los aspectos para tener en cuenta en la decisión final (Pérez, 2010).

Para la jerarquización se realiza un esquema genérico o árbol de jerarquías (ver figura 15), mediante el cual se pueden realizar las comparaciones entre criterios y alternativas, evaluando la importancia relativa que tiene un criterio y/o alternativa sobre otro; esta evaluación se desarrolla en matrices que expone a los criterios y alternativas en forma de filas y columnas para su adecuada evaluación.

**Figura 15**

*Esquema jerárquico AHP, modificado de ALVAREZ, ARQUERO, & MARTÍNEZ, 2000.*



La escala de valores para la asignación de ponderaciones es una escala numérica de 17 valores o jerarquías, que va de un valor mínimo de 1/9 (de menos importancia) a 9 (el más importante) (ver figura 16). En la diagonal de la matriz solo se obtendrán valores de 1, así como en los casos en los que dos factores distintos tengan el mismo valor de importancia (Almario, 2021).

Debido a que el análisis AHP es un método cualitativo se pueden cometer errores al momento de realizar la comparación entre criterios y alternativas, por esto se realiza la tasa de consistencia CR para confirmar la coherencia de la matriz realizada, si este valor da menor a 0,10 los pesos son válidos, pero si el resultado es mayor la matriz no presenta consistencia y debe ser modificada (Sarmiento, 2017).

**Figura 16**

*Escala de importancia relativa con la construcción de la matriz de comparación por pares de decisión, Sarmiento (2017).*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extremadamente	Fuertemente		Moderadamente		Ligeramente		Igual	Ligeramente		Moderadamente		Fuertemente		Extremadamente		

**Menos importante****Mas importante****7.6 Análisis y discusión de resultados**

Se buscó realizar una síntesis de todos los análisis e interpretaciones realizadas a lo largo del proyecto para lograr identificar las áreas que presentan mayor susceptibilidad a los factores que influyen en la ocurrencia de avenidas torrenciales en la parte alta de la subcuenca de Riofrío, teniendo como resultado principal el mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales a escala 1:25000, así mismo con la caracterización geomorfológica en el sector de Puente Rojo se quiso señalar la geofoma asociada a las avenidas torrenciales identificada en ese sector, debido a que esta zona se encuentra justo antes de que se haya encausado Riofrío al llegar a la parte urbana del municipio.

**7.7 Redacción del informe final**

Finalmente se sintetizó toda la información recolectada y los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto, señalando dichos resultados y resaltando las conclusiones junto con las recomendaciones que dan lugar al cumplimiento de los objetivos planteados para este estudio.

## 8. Análisis y discusión de resultados

### 8.1 Mapas temáticos o mapas insumo

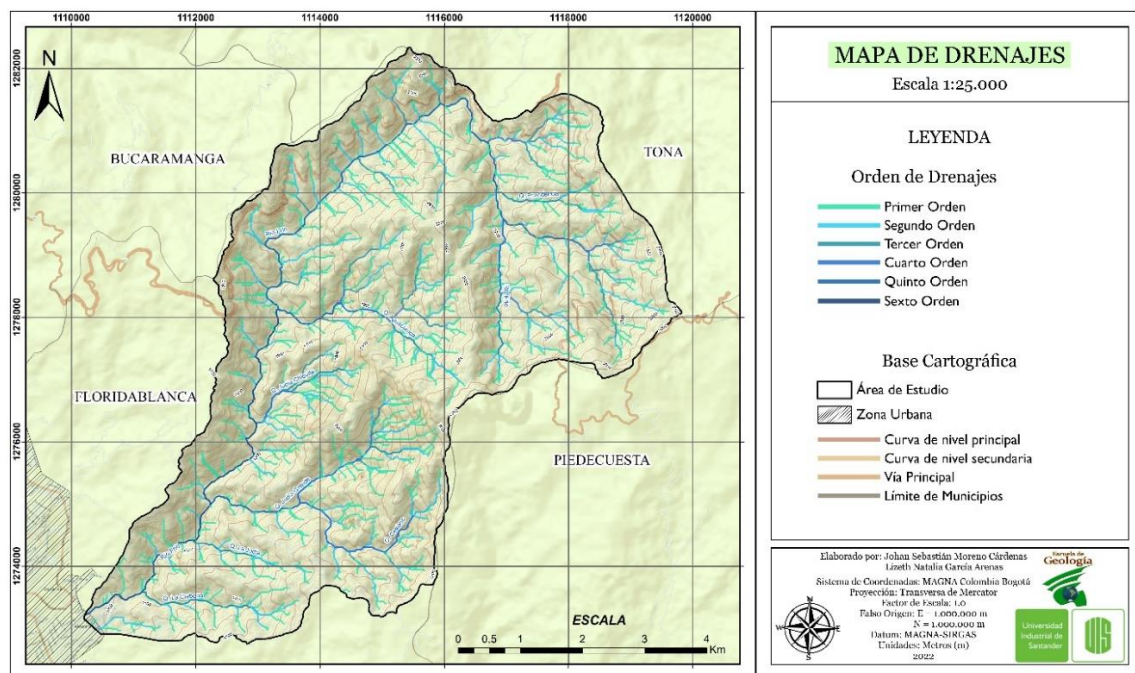
Los mapas temáticos o mapas insumos resultantes de la metodología descrita anteriormente en el capítulo 7 se muestran a continuación.

#### 8.1.1 Mapa de Drenajes

Se observa en la figura 17, los drenajes y el orden de cada uno de los tributarios, el orden mas alto que se tiene dentro de la subcuenca es el orden 6 correspondiendo desde la parte media de la subcuenca al final de la misma por el cauce del Rio, allí es donde se encuentra el maximo de confluencias de los tributarios.

**Figura 17**

*Mapa de Drenajes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*

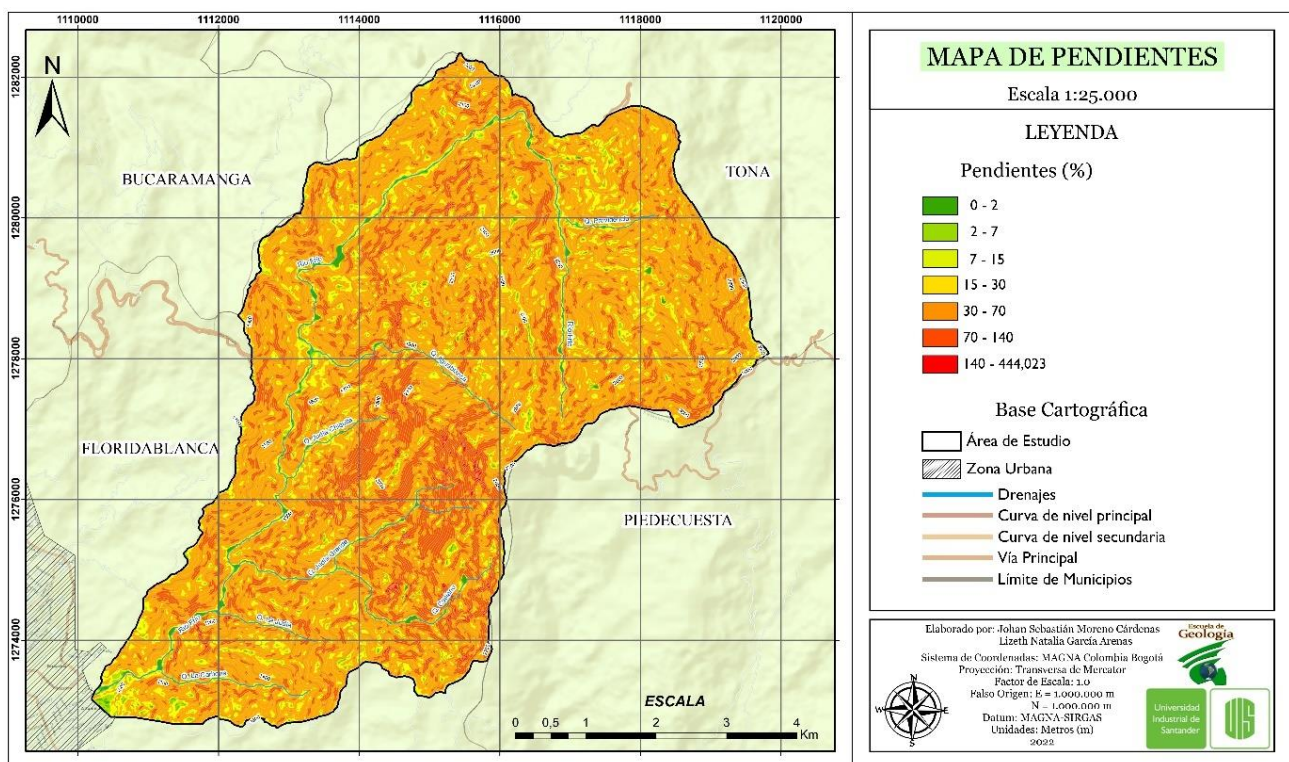


### 8.1.2 Mapa de Pendientes

La clasificación de pendientes se realizó de acuerdo con Van Zuidam (1986) debido a que, en el trabajo realizado por Mora, R. et al. (1992), se usa en la zonificación de susceptibilidad al deslizamiento, y se tiene en cuenta que al producirse un movimiento de remoción de masa de gran magnitud que alcance el cauce de una cuenca hidrográfica de alta pendiente, los materiales aportados por el deslizamiento fluyen por el cauce generando la avenida torrencial, por tal motivo las pendientes se usaron bajo ese criterio (ver figura 18).

**Figura 18**

*Mapa de Pendientes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*

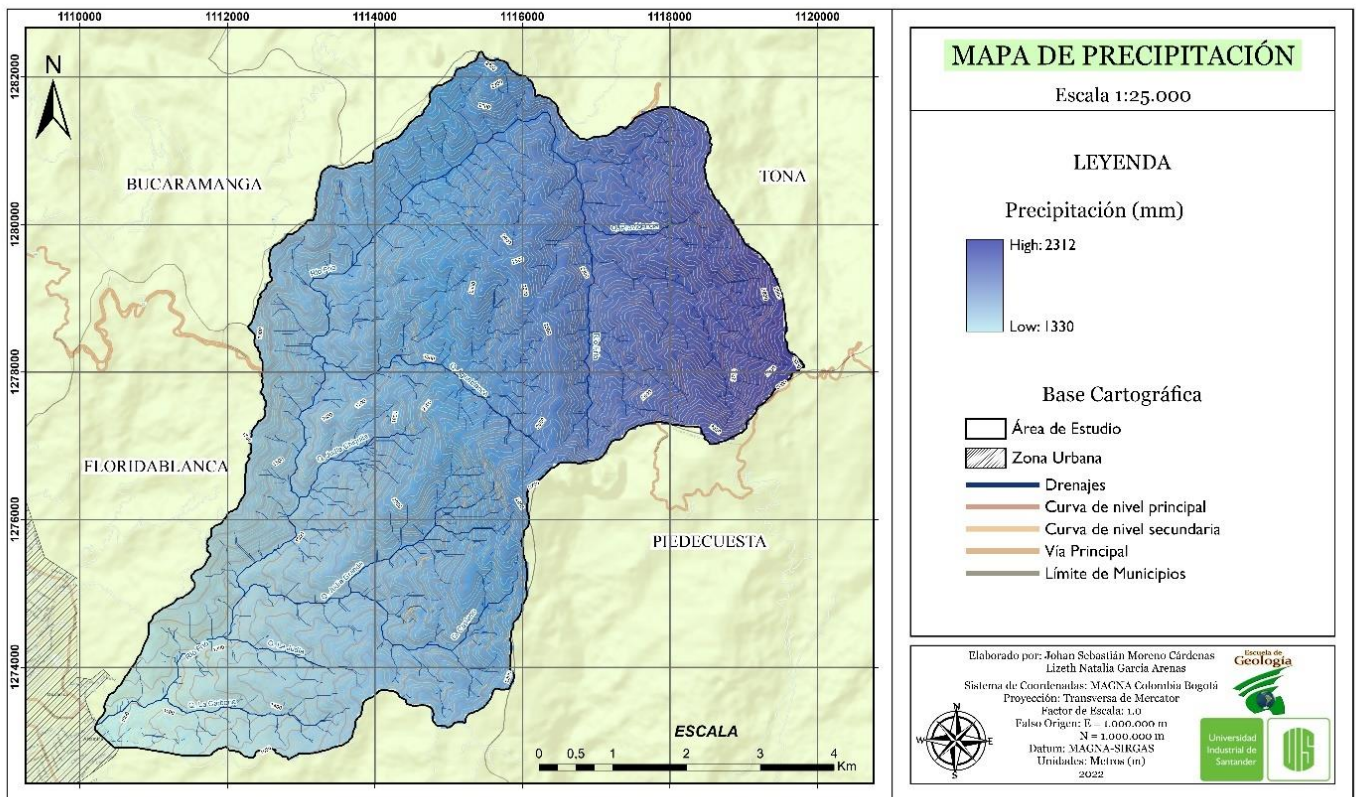


8.1.3 Mapa de Precipitación

En la figura 19 se observa la precipitación en la parte alta de la subcuenca de Riofrío, en donde la zona noroeste que se encuentra próxima al macizo de Santander presenta la mayor concentración de precipitación.

Figura 19

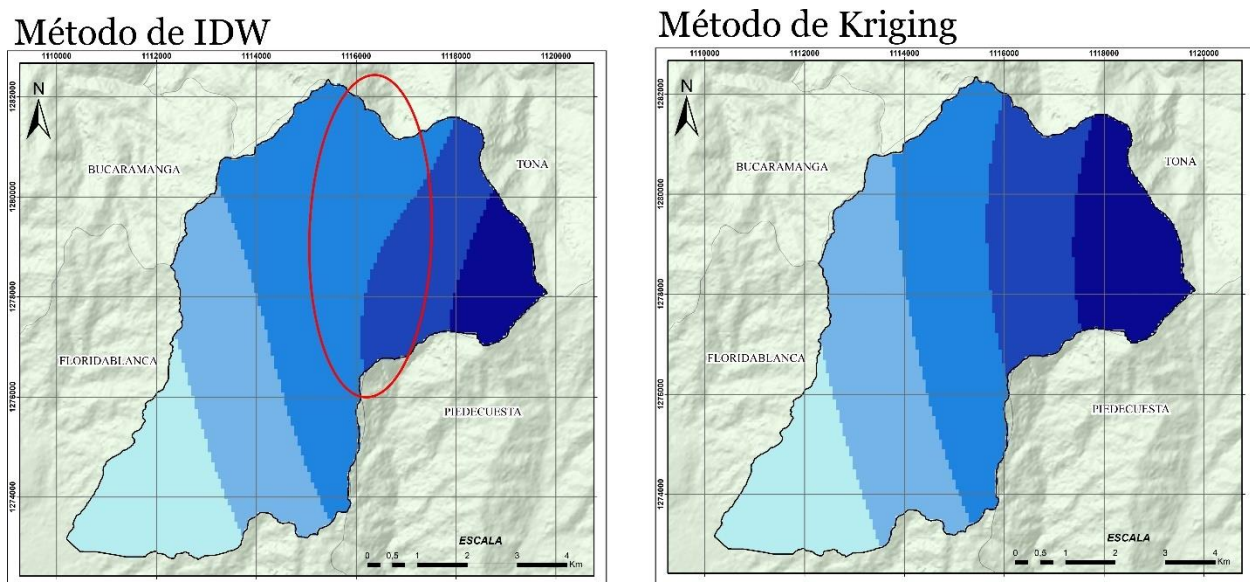
Mapa de Precipitación de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



Se decidió usar para el mapa de precipitación obtenido, el método de Kriging, debido a que es un método de interpolación estadístico, el cual hace una correlación espacial de los datos, al contrario del método de IDW que se basa en el inverso de la distancia lo que significa que asigna pesos en base a la distancia entre los puntos, para el caso de los datos interpolados el método IDW aunque arroja un resultado muy parecido no tiene una distribución tan uniforme como el resultado obtenido por el método de Kriging (ver figura 20).

**Figura 20**

*Comparación de los métodos de interpolación IDW vs Kriging.*



Teniendo en cuenta que la cantidad de datos es pequeña y las estaciones no están tan cerca como sería lo ideal para un estudio más certero de la distribución de la precipitación en la zona de estudio, se decidió no tomar este resultado como un valor tan importante, debido a la calidad de los datos. Esto no quiere decir que la precipitación no sea un factor desencadenante de eventos torrenciales, ya que como se indicó anteriormente en el capítulo 5 del marco teórico es una de las

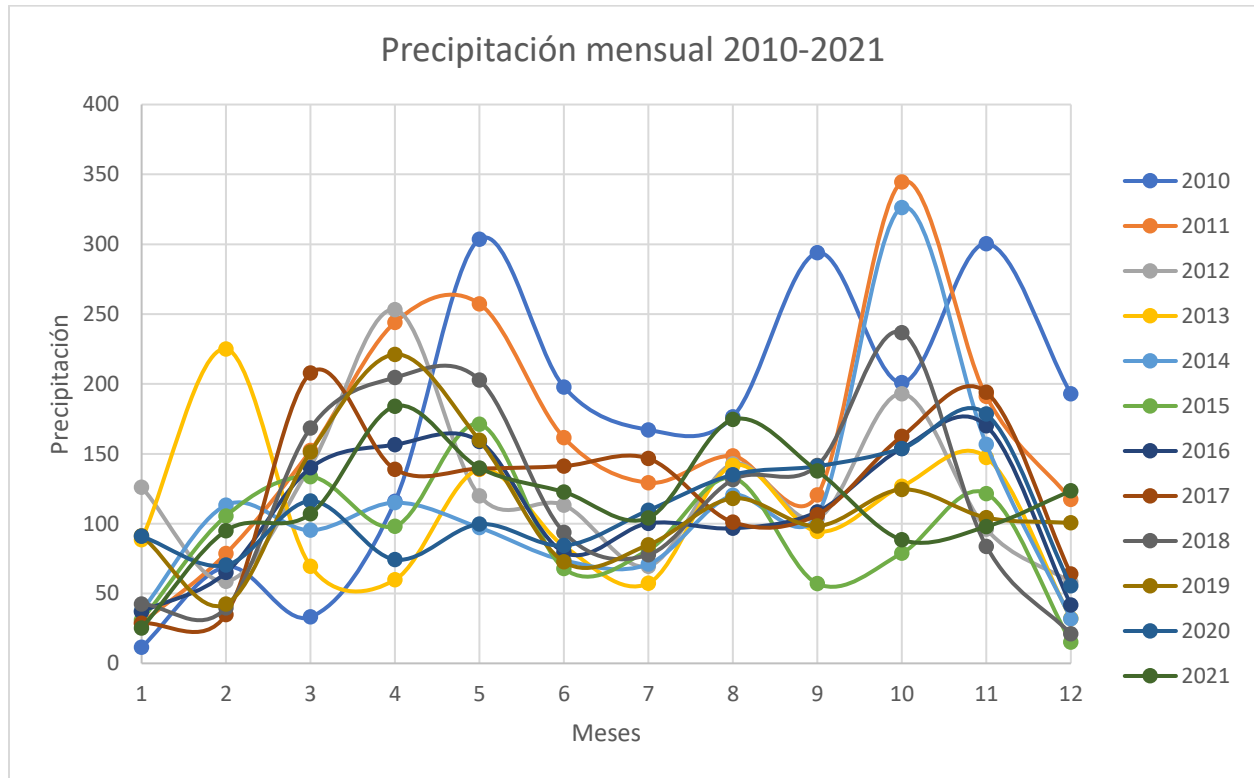
variables detonantes de este fenómeno. Sin embargo, en el modelo para la matriz AHP el factor precipitación se usa principalmente para identificar la distribución de las lluvias.

De acuerdo con un trabajo realizado por Gómez y López en el año 2005 titulado “Estimación de la recarga mensual en la parte alta de la cuenca del río frío por medio de un modelo hidrológico distribuido” se puede afirmar que la zona de estudio es la zona que genera el mayor aporte de recarga a la cuenca del río de oro (34%) manteniendo los volúmenes de almacenamiento de agua. Según el modelado realizado en ese trabajo concluyen los autores que el mayor aporte del caudal total del río proviene de la producción de escorrentía de la subcuenca, dicho aporte lo hace el flujo subterráneo con un 67.39%, seguido del aporte del flujo sub superficial de 29.05% y del flujo superficial 3.11%, con referencia a la infiltración, los autores afirman para la zona de estudio la mayor infiltración se da debido a que las rocas que la conforman presentan condiciones altamente meteorizadas y fracturadas lo cual genera alta permeabilidad secundaria ayudando a la infiltración y por ende al flujo subterráneo.

En concordancia con lo anteriormente expuesto, se hace evidente que gran parte de las precipitaciones ocurrida en la zona se convierten en escorrentía tanto subterránea como superficial y se evidencia que en la zona hay gran almacenamiento de agua. Por esta razón se toma en cuenta el mapa de precipitación resultante como un elemento de distribución de dicha precipitación, sin negar el hecho de que es necesario un estudio más a fondo el cual se pueda introducir al modelo y darle mayor peso a este criterio, ya que la precipitación si es un detonante importante en el evento torrencial.

**Figura 21**

*Análisis de la precipitación mensual de los años 2010-2021*



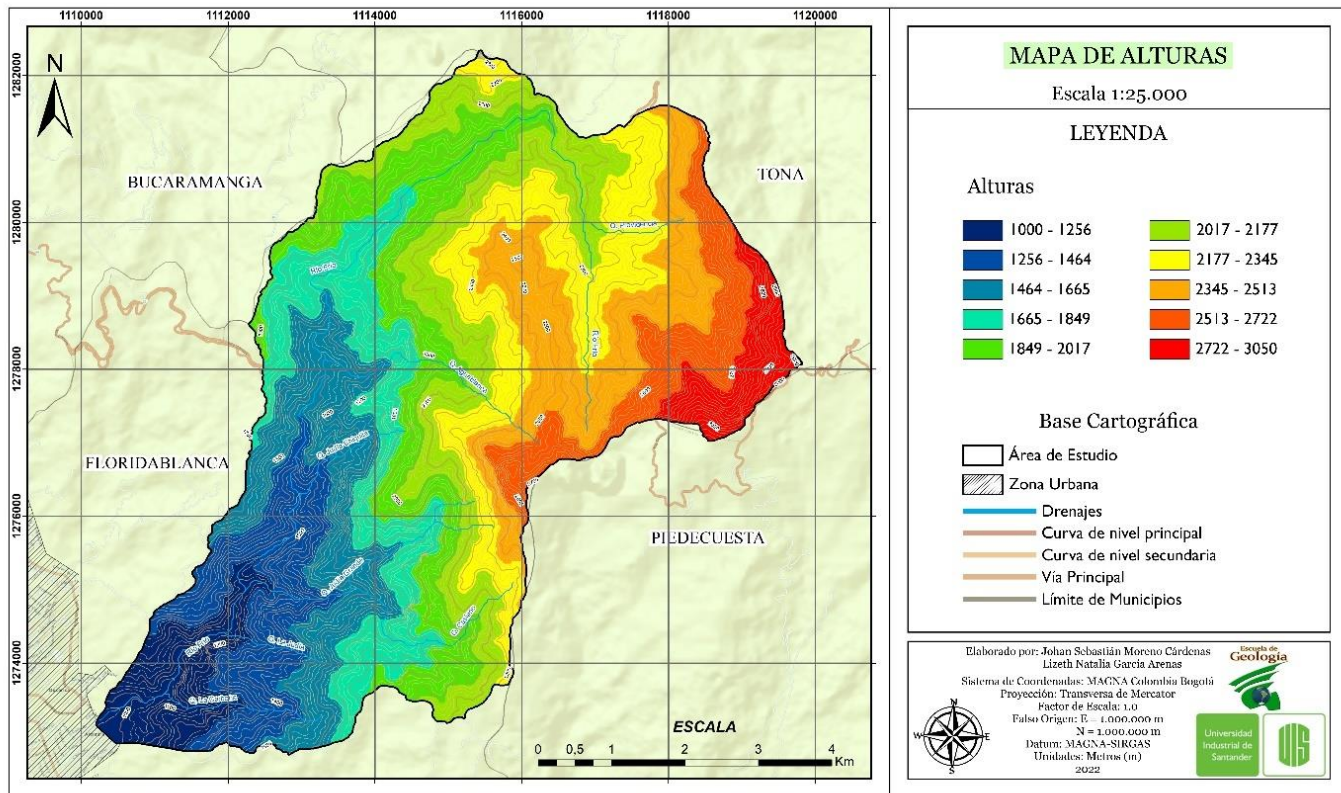
Analizando los datos de precipitación de forma anual, suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), comprendidos desde los años 2010 hasta el 2021, como se puede observar en la figura 21, los meses desde marzo a mayo y de septiembre a noviembre, es especial el mes de octubre, muestran picos de mayor precipitación durante los 12 meses del año en la subcuenca. Cabe resaltar, que no todos los años siguen esta secuencia por lo que hay fluctuaciones altas en otros meses del año, pero en general se ve una tendencia marcada hacia esos meses como los periodos de año más lluviosos, por lo que al ser la precipitación uno de los detonantes de las avenidas torrenciales, es de vital importancia tener un control con los datos recolectados por las estaciones a manera de prevención.

**8.1.4 Mapa de Alturas**

En la figura 22 se observa ilustrativamente como se encuentran distribuidas las alturas en la subcuenca, las tonalidades de color azul corresponden a las alturas más bajas y las de tonalidades rojizas a las alturas más altas, también se identifica un decrecimiento en las alturas en sentido noreste-suroeste, correspondiendo en la parte suroeste con el límite entre la zona rural y la zona urbana y a su vez con el punto de desfogue de la subcuenca.

**Figura 22**

*Mapa de Alturas de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*

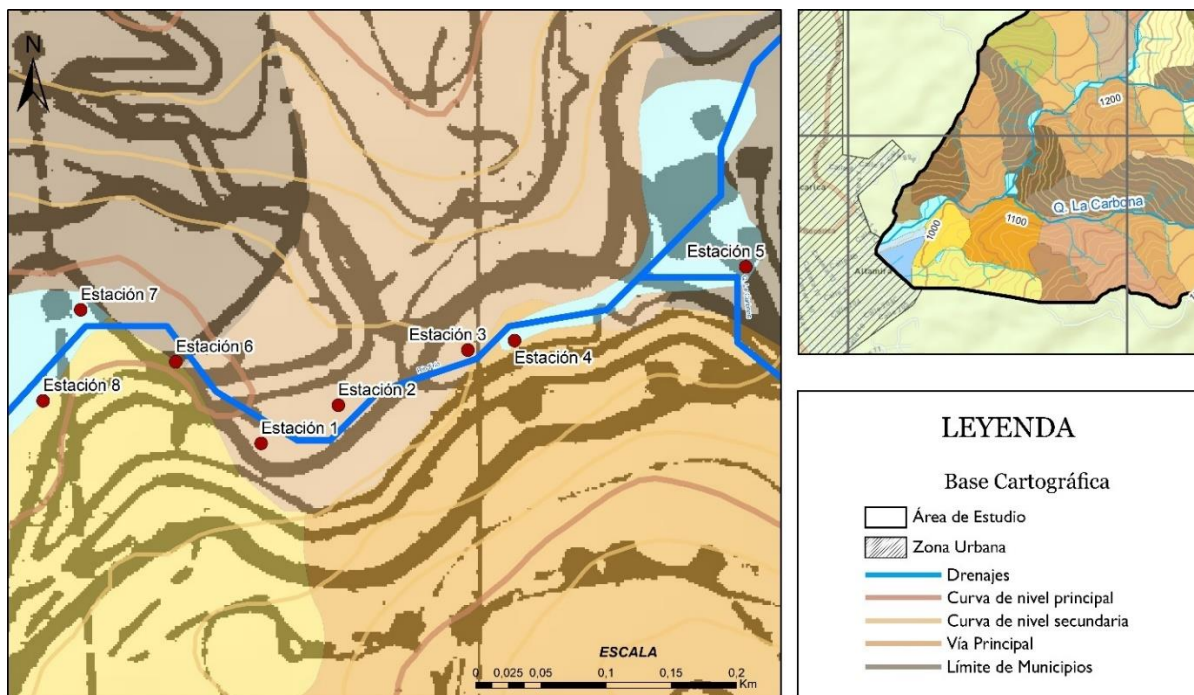


## 8.2. Caracterización Geomorfológica

La zona denominada como Puente Rojo se encuentra ubicada en el sector más cercano al casco urbano del municipio de Floridablanca, Santander, la cual a su vez constituye la parte alta de la subcuenca de Riofrío. La caracterización geomorfológica realizada a este sector abarca 8 paradas de campo tomando como punto de referencia el puente constituyendo así 5 paradas aguas arriba y 3 paradas aguas abajo desde el puente, como se muestra en la figura 23, la cobertura de la zona corresponde a bosque, con una vegetación densa y no se evidenciaron cultivos ni ganadería a sus alrededores. En la figura 23 se toma como base un archivo en formato JPEG de la plancha 120IIB del año 1994 y superpuesto como punto de referencia se tiene el mapa de subunidades geomorfológicas, los drenajes obtenidos a partir del DEM y la ubicación de las estaciones.

**Figura 23**

*Recorrido de la caracterización geomorfológica.*



La geoforma predominante en el área caracterizada es la llanura de inundación, su origen está relacionado con procesos de erosión, transporte y acumulación aluvial; en general los depósitos son principalmente clasto soportados (clastos= 80%, matriz = 20%), los clastos observados corresponden a fragmentos redondeados a subredondeados de tamaños gravas a bloques de granodiorita, neis, y demás litologías presentes aguas arriba de la subcuenca, la matriz se caracteriza por ser arenosa de consistencia firme y tonalidad de amarillo a marrón oscuro. Se localizan principalmente sobre las márgenes del cauce, y además se encuentra vegetación caída (ver figura 24).

#### Figura 24

*Identificación de la geoforma de llanura de inundación localizada en la estación 2 con coordenadas*

*X:1.110.893 Y:1.273.485*



En la figura 25 se tiene se evidencia a mejor detalle la geoforma junto al cauce, este depósito es clasto soportado, tiene unas dimensiones 42 m de largo x 12,4m de ancho constituida por bloques pertenecientes a rocas de la parte alta de la subcuenca ya que corresponden a rocas ígneas (Cuarzomonzonita) y metamórficas (neis) concordantes con la litología presente en ese sector.

### Figura 25

*Identificación de la geoforma de llanura de inundación con vista del cauce en la estación 3 con coordenadas X: 1.110.993 Y:1.273.526*



El grado de meteorización encontrado es moderado, la forma del valle es de tipo V identificando un ambiente fluvial con un patrón de drenaje de tipo dendrítico, se puede afirmar que los 7 depósitos que corresponden a la geoforma de llanura de inundación coinciden con las alturas más bajas de la subcuenca y a su vez se encuentra en las pendientes más bajas.

**Figura 26**

*Identificación de la geoforma a ambos lados del cauce en la estación 8 con coordenadas X:1.110.664*

*Y:1.273.486*



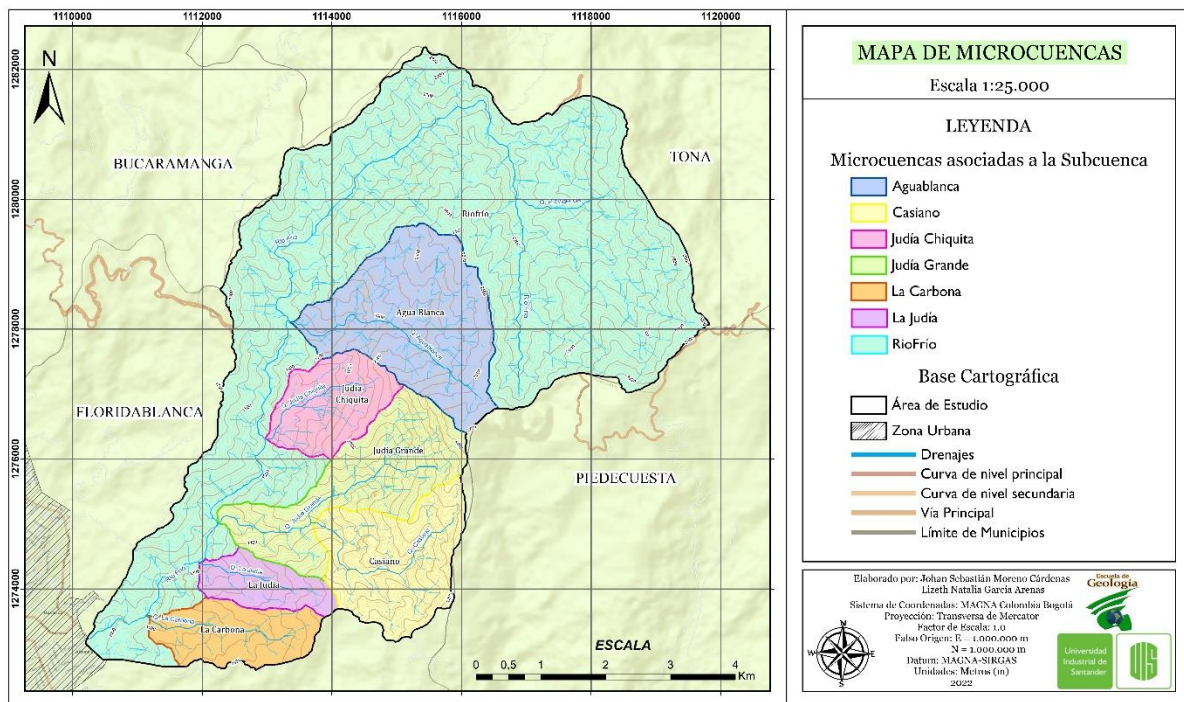
La geoforma identificada anteriormente se encuentra concordantemente con los polígonos identificados en el mapa de subunidades geomorfológicas correspondientes a plano o llanura de inundación (Fpi), cuya delimitación fue realizada por Ronderos, A. 2022 (ver figura 13). Igualmente, La única geoforma relaciona a avenidas torrenciales presente en la zona en donde se realizaron las estaciones de campo, son los 7 depósitos de llanura de inundación, esto indican el paso que han tenido las avenidas torrenciales ocurridas en años anteriores, y del evento acontecido el 28 de enero del 2020.

### 8.3. Análisis Morfométrico

La morfometría es el estudio de las particularidades físicas de una cuenca o subcuenca, y el análisis de las variables lineales, de superficie, de relieve y de drenaje, ayudando a la interpretación de la hidrología particular de cada cuenca y en las definiciones de las futuras estrategias para el manejo de estas (Gaspari, 2012). Por lo anterior es importante definir los parámetros morfométricos particulares de la subcuenca alta de Riofrío. Para este análisis morfométrico, se estudiaron las microcuencas presentes en la parte alta de la subcuenca de Riofrío, estas son La Carbona, Riofrío, La Judía, Casiano, Judía Grande, Judía Chiquita y Agua Blanca (ver figura 27), con el fin de obtener resultados más ajustados a la realidad de la subcuenca.

**Figura 27**

*Mapa de las microcuencas asociadas a la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*



### 8.3.1 Parámetros asociados a la forma de la Subcuenca

Los parámetros asociados a la forma de la subcuenca Riofrío se analizan desde las microcuencas comprendidas por la subcuenca que son: La Carbona, Riofrío, La Judía, Casiano, Judía Grande, Judía Chiquita y Agua Blanca, para la zona de estudio se encuentran sintetizados en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Parámetros asociados a la forma de la subcuenca Riofrío comprendida por las microcuencas analizadas.*

<b>Parámetros asociados a la forma</b>					
	<b>Área (A)</b>	<b>Perímetro (P)</b>	<b>Longitud (L)</b>	<b>Forma de Horton (Kr)</b>	<b>Índice de compacidad (K)</b>
<b>Riofrío</b>	23.9 (Km <sup>2</sup> )	27 (Km)	11.52 (Km)	0.32	1.16
<b>La Carbona</b>	2.09 (Km <sup>2</sup> )	7.05 (Km)	2.69 (Km)	0.29	1.37
<b>La Judía</b>	1.35 (Km <sup>2</sup> )	5.53 (Km)	2.26 (Km)	0.26	1.33
<b>Casiano</b>	3.59 (Km <sup>2</sup> )	8.9 (Km)	2.49 (Km)	0.58	1.32
<b>Judía Grande</b>	7.87 (Km <sup>2</sup> )	13.04 (Km)	3.74 (Km)	0.56	1.30
<b>Judía Chiquita</b>	2.18 (Km <sup>2</sup> )	6.1 (Km)	2.04 (Km)	0.52	1.16
<b>Agua Blanca</b>	5.51 (Km <sup>2</sup> )	10.6 (Km)	3.34 (Km)	0.49	1.26

De acuerdo con el factor de forma de Horton (ver tabla 7), la forma de la microcuenca Riofrío es ligeramente alargada, esto quiere decir que es menos propensa a que se concentre el escurrimiento de una lluvia intensa formando crecidas, mientras que las microcuencas de La Carbona y La Judía son alargadas, significando que son poco propensas a que el escurrimiento se concentre rápidamente, indicando que son poco propensas a una avenida torrencial; y observando los valores de las microcuencas de Casiano, Judía Grande, Judía Chiquita y Agua Blanca son de forma ligeramente ensanchadas, lo que indica que estas microcuencas son más propensas a

desarrollar avenidas torrenciales ya que pueden concentrar más rápido el escurrimiento originado por una lluvia intensa (Londoño, 2001).

**Tabla 7**

*Factor de forma según Horton*

Valores interpretativos del factor de forma de Horton	
Valores Aproximados	Forma
< 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.30	Alargada
0.30 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80 - 1.20	Muy Ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

El índice de compacidad se encuentra en la clase II de la clasificación (ver tabla 8), es decir que las microcuencas, a excepción de Judía Chiquita y Riofrio, de acuerdo con este índice tienen una forma Oval redonda a oval oblonga (Benavides, *et al.*, 2009), indicando que todas presentan peligro de generar una avenida torrencial; en cuanto a las microcuencas de Judía Chiquita y Riofrio, se encuentra en la clase I de la clasificación, presentando una forma casi redonda a oval redonda, es decir estas microcuencas de acuerdo a la clasificación de Gravellius es una microcuenca torrencial peligrosa.

**Tabla 8**

*Formas de acuerdo con el índice de compacidad, Benavides, et al., 2009*

Clase de forma	Índice de compacidad	Forma
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 o más de 2	Oval oblonga a rectangular oblonga

### 8.3.2 *Parámetros asociados al relieve de la Subcuenca*

Las cotas máximas y mínimas se relacionan con la variabilidad climática y ecológica de la zona, en este caso, la variación entre la cota máxima y mínima de la subcuenca de Riofrío es de alrededor de 2050 metros, esto indica que la cantidad de pisos altitudinales es menor y por consiguiente la variabilidad climática, de vegetación y de precipitación es mínima en toda la extensión de la cuenca (ver tabla 9).

**Tabla 9**

*Parámetros de relieve asociados a la subcuenca Riofrío.*

<b>Parámetros de Relieve</b>	
<b>Cota mayor</b>	3050 m.s.n.m
<b>Cota menor</b>	1000 m.s.n.m
<b>Elevación media</b>	2000 m.s.n.m

### 8.3.3 *Parámetros asociados a la red hidrográfica de la Subcuenca*

Los parámetros asociados a la red hidrográfica para las microcuencas que conforman la zona de zona de estudio se encuentran sintetizados en la tabla 10.

En la tabla 10 se muestran los parámetros asociados a la red hidrográfica de la zona de estudio, en esa tabla se muestra el valor resultante del cálculo de la constante de estabilidad del río, da como resultado 4.2 km para la microcuenca conformada por el cauce principal de la zona, al ser un valor alto indica que es permeable con una elevada capacidad de infiltración y densa cobertura vegetal; con respecto a las demás microcuencas se observa que La Carbona y La Judía presentan valores bajos de estabilidad a comparación de las otras, indicando que estas son más inestables llegando a presentar mayor erosión que las demás microcuencas (Schumm, 1956).

**Tabla 10**

*Parámetros asociados a la red hidrográfica de la subcuenca Riofrío comprendida por las microcuencas analizadas.*

<b>Parámetros de la red hidrográfica</b>					
	<b>Longitud del cauce principal (Lp)</b>	<b>Longitud total de cauces (Lt)</b>	<b>Densidad de drenaje (Dd)</b>	<b>Constante de estabilidad de río (C)</b>	<b>Constante de Torrencialidad (Ct)</b>
<b>Riofrío</b>	18.65 (Km)	179.1 (Km)	4.3	4.2	10.4
<b>La Carbona</b>	2.77 (Km)	6.84 (Km)	3.3	0.8	18.4
<b>La Judía</b>	2.1 (Km)	4.6 (Km)	3.4	0.6	17.6
<b>Casiano</b>	3.9 (Km)	10.86 (Km)	3.0	1.4	12.5
<b>Judía Grande</b>	4.45 (Km)	15.9 (Km)	2.0	2.1	9.3
<b>Judía Chiquita</b>	2.3 (Km)	6.71 (Km)	0.3	1.1	15.1
<b>Agua Blanca</b>	3.74 (Km)	11.28 (Km)	0.5	1.7	13.1

Según los rangos de densidad (ver tabla 11) propuestos por Maidment (1993), la única microcuenca que presenta una alta densidad de drenaje es la de Riofrío lo que quiere decir que es una microcuenca altamente drenada teniendo una respuesta optima frente a fuertes precipitaciones, por otro lado, las microcuencas La Carbona, La Judía, Casiano y Judía grande presentan una densidad de drenaje moderada, lo que quiere decir que son microcuencas moderadamente drenadas, por lo que se esperaría que tengan una respuesta relativamente rápida a un evento de precipitación fuerte, evitando crecidas y avenidas torrenciales, a diferencia de las microcuencas Judía Chiquita y Aguablanca que presenta rangos de densidad por lo que son las que tienen una respuesta ineficiente eventos de precipitación fuerte y sean propensas a que se genere avenidas torrenciales.

**Tabla 11**

*Valores de densidad de drenajes. Según Maidment, 1993.*

Rangos de Densidad	Clases
0.1 - 1.8	Baja
1.9 - 3.6	Moderada
3.7 - 5.6	Alta

De acuerdo con los valores de constante de torrencialidad según Camino et al., 2018 y Méndez et al., 2015, expuestos en el informe del Servicio Geológico Colombiano sobre la avenida torrencial ocurrida en el 2020 (ver tabla 12), todas las microcuencas presentarían un comportamiento torrencial, en especial las microcuencas La Judía y La Carbona con valores de 17.6 y 18.4 respectivamente.

**Tabla 12**

*Índices de Torrencialidad, según Camino 2018 y Méndez, 2015. Tomado del SGC, 2020.*

Índices de Coeficiente de Torrencialidad	
Camino et al., 2018	0.76 a 3.85
Méndez et al., 2015	> 16.32

### 8.3.4 Curva Hipsométrica.

Para la realización de la curva hipsométrica se tomaron en cuenta las altitudes que se obtuvieron en el mapa de alturas y con ayuda de la calculadora de campo se computaron las áreas entre las curvas, teniendo el área acumulada, el porcentaje de dicha área y el porcentaje de área acumulada (ver tabla 13), seguido a esto se graficaron estos datos como se observa en la figura 28.

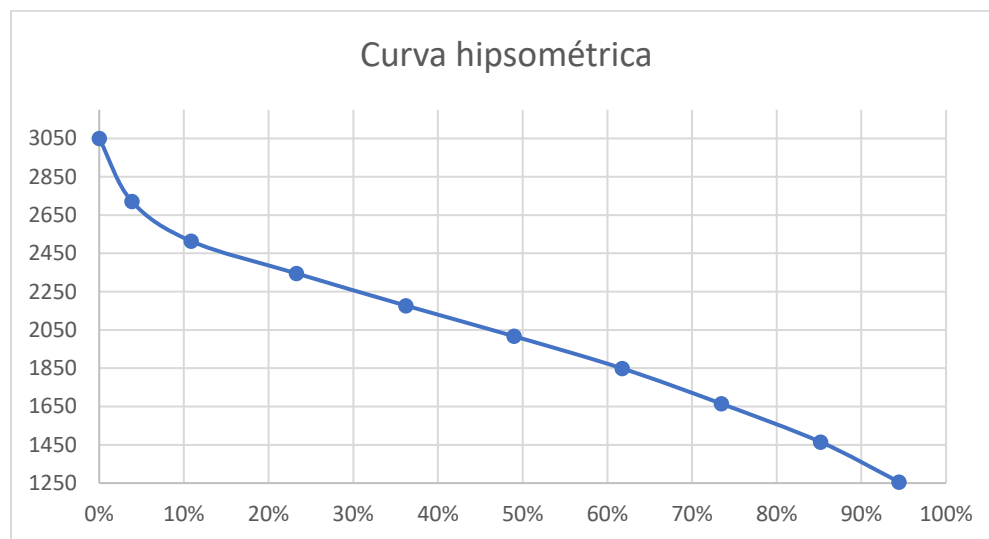
**Tabla 13**

*Tabulación de los datos obtenidos con el mapa de alturas*

Elevación msnm	Área acumulada	% Área	% Área Acumulada
1256	2.58075	5.6%	94%
1464	6.8778	14.8%	85%
1665	12.32415	26.5%	73%
1849	17.75835	38.2%	62%
2017	23.6898	51.0%	49%
2177	29.63025	63.8%	36%
2345	35.634825	76.7%	23%
2513	41.403375	89.1%	11%
2722	44.66475	96.2%	4%
3050	46.451475	100.0%	0%

**Figura 28**

*Curva hipsométrica de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*



La curva hipsométrica que se obtuvo para la subcuenca de Riofrío mostrada en la figura 28 corresponde a un río en estado de equilibrio, es decir es un río maduro, en donde el transporte de agua y sedimentos se encuentra en la misma proporción según la figura 4 en donde se muestra el modelo de curvas hipsométricas realizado por Senciales y Ferre, 1999. Igualmente se puede observar que la pendiente de la gráfica es fuerte en el final hacia las cotas inferiores, lo que indica que la subcuenca es propensa a inundaciones (Londoño, 2001).

#### 8.4 Mapa de Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales

Como se mencionó en el apartado 7.5 *Mapa de zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales* perteneciente al capítulo de Metodología, el mapa de zonificación de susceptibilidad por avenida torrencial se generó a partir de los parámetros obtenidos y en la realización de un análisis jerárquico multicriterio (AHP), con el fin de obtener los pesos para cada variable.

Para realizar la matriz AHP, se determinaron los criterios y las alternativas, siendo estas últimas todas las variables involucradas en el desarrollo, transporte y depositación de una avenida torrencial en una cuenca, mientras que los criterios son los niveles de susceptibilidad escogidos para la calificación del mapa final (ver tabla 14).

**Tabla 14**

*Criterios y Alternativas de la Matriz AHP*

Alternativas	Criterios
Morfometría	Muy Baja
Drenajes	Baja
Pendientes	Media
Alturas	Alta
Subunidades Geomorfológicas	Muy Alta
Susceptibilidad por deslizamiento	
Precipitación	

Luego se procedió a establecer las relaciones entre estas alternativas, debido a que se pueden cometer errores al momento de realizar la ponderación, se calcula la tasa de consistencia “CR”, que es la relación entre el índice de consistencia “CI” y la consistencia aleatoria “CR”.

$$CR = CI/CR$$

En donde,

$$CI = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad y \quad CR = \frac{1.98 * (n - 2)}{n}$$

Nmax: suma de la matriz resultante de multiplicar la matriz multicriterio por el ponderado.

n: número de criterios o alternativas.

Se tuvo en cuenta que, si el CR es menor a 0,10 (10%), la comparación de los pares con los pesos otorgados tiene una buena consistencia y son aceptados para la evaluación multicriterio, si el CR es mayor a 0,10 los valores deben ser modificados (Sarmiento, 2017).

En la tabla 15 se presenta la matriz de comparación multicriterio aplicada a los criterios escogidos anteriormente. La tasa de inconsistencia para esta comparación es de 0.08, aceptable por la metodología AHP.

**Tabla 15**

*Matriz de comparación multicriterio aplicada a los criterios*

Matriz de comparación de criterios						
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Ponderación
Muy Baja	1.00	0.50	0.20	0.14	0.11	0.04
Baja	2.00	1.00	0.33	0.20	0.14	0.06
Media	5.00	3.00	1.00	0.33	0.33	0.15
Alta	7.00	5.00	3.00	1.00	0.33	0.26
Muy Alta	9.00	7.00	5.00	3.00	1.00	0.50

En la tabla 16 se presenta la matriz de comparación multicriterio aplicada a las alternativas escogidas anteriormente, de acuerdo con la evaluación según el criterio “Muy Baja”. La tasa de inconsistencia para esta comparación es de -0.7, aceptable por la metodología AHP.

**Tabla 16**

*Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Muy Baja.*

Criterio: Muy Baja								
	Subunidades	Susceptibilidad por deslizamiento	Precipitación	Alturas	Pendientes	Drenaje	Morfometría	Vector Promedio
Subunidades	1.00	5.00	3.00	5.00	5.00	3.00	0.20	0.20
Susceptibilidad por deslizamiento	0.20	1.00	3.00	5.00	0.33	0.20	0.14	0.07
Precipitación	0.33	0.33	1.00	3.00	0.20	0.33	0.11	0.04
Alturas	0.20	0.20	0.33	1.00	0.20	0.33	0.11	0.03
Pendientes	0.20	3.00	5.00	5.00	1.00	5.00	0.20	0.15
Drenaje	0.33	0.20	3.00	3.00	0.20	1.00	0.14	0.06
Morfometría	5.00	7.00	9.00	9.00	5.00	7.00	1.00	0.45

En la tabla 17 se presenta la matriz de comparación multicriterio aplicada a las alternativas escogidas anteriormente, de acuerdo con la evaluación según el criterio “Baja”. La tasa de inconsistencia para esta comparación es de -0.72, aceptable por la metodología AHP.

**Tabla 17**

*Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Baja.*

Criterio: Baja								
	Subunidades	Susceptibilidad por deslizamiento	Precipitación	Alturas	Pendientes	Drenaje	Morfometría	Vector Promedio
Subunidades	1.00	3.00	5.00	5.00	7.00	5.00	0.33	0.23
Susceptibilidad por deslizamiento	0.33	1.00	5.00	7.00	3.00	5.00	0.33	0.16
Precipitación	0.20	0.20	1.00	3.00	0.33	0.20	0.20	0.04
Alturas	0.20	0.14	0.33	1.00	0.20	0.20	0.11	0.02
Pendientes	0.14	0.33	3.00	5.00	1.00	5.00	0.14	0.10
Drenaje	0.20	0.20	5.00	5.00	3.00	1.00	0.33	0.11
Morfometría	3.00	3.00	5.00	9.00	7.00	3.00	1.00	0.33

En la tabla 18 se presenta la matriz de comparación multicriterio aplicada a las alternativas escogidas anteriormente, de acuerdo con la evaluación según el criterio “Media”. La tasa de inconsistencia para esta comparación es de -0.73, aceptable por la metodología AHP.

**Tabla 18**

*Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Media.*

Criterio: Media								
	Subunidades	Susceptibilidad por deslizamiento	Precipitación	Alturas	Pendientes	Drenaje	Morfometría	Vector Promedio
Subunidades	1.00	5.00	7.00	9.00	5.00	5.00	0.20	0.23
Susceptibilidad por deslizamiento	0.20	1.00	5.00	7.00	0.14	9.00	0.33	0.13
Precipitación	0.14	0.20	1.00	3.00	0.20	0.14	0.14	0.03
Alturas	0.11	0.14	0.33	1.00	0.14	0.14	0.11	0.02
Pendientes	0.20	7.00	5.00	7.00	1.00	5.00	0.20	0.16
Drenaje	0.20	0.11	7.00	7.00	0.20	1.00	0.20	0.08
Morfometría	5.00	3.00	7.00	9.00	5.00	5.00	1.00	0.35

En la tabla 19 se presenta la matriz de comparación multicriterio aplicada a las alternativas escogidas anteriormente, de acuerdo con la evaluación según el criterio “Alta”. La tasa de inconsistencia para esta comparación es de -0.70, aceptable por la metodología AHP.

**Tabla 19**

*Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Alta.*

Criterio: Alta								
	Subunidades	Susceptibilidad por deslizamiento	Precipitación	Alturas	Pendientes	Drenaje	Morfometría	Vector Promedio
Subunidades	1.00	7.00	7.00	7.00	5.00	7.00	0.33	0.28
Susceptibilidad por deslizamiento	0.14	1.00	5.00	7.00	0.20	3.00	0.20	0.09
Precipitación	0.14	0.20	1.00	5.00	0.14	0.14	0.14	0.04
Alturas	0.14	0.14	0.20	1.00	0.20	0.20	0.14	0.02
Pendientes	0.20	5.00	7.00	5.00	1.00	5.00	0.33	0.16
Drenaje	0.14	0.33	7.00	5.00	0.20	1.00	0.20	0.08
Morfometría	3.00	5.00	7.00	7.00	3.00	5.00	1.00	0.32

En la tabla 20 se presenta la matriz de comparación multicriterio aplicada a las alternativas escogidas anteriormente, de acuerdo con la evaluación según el criterio “Muy Alta”. La tasa de inconsistencia para esta comparación es de -0.71, aceptable por la metodología AHP.

**Tabla 20**

*Matriz de comparación multicriterio aplicada a al Criterio Muy Alta.*

Criterio: Muy Alta								
	Subunidades	Susceptibilidad por deslizamiento	Precipitación	Alturas	Pendientes	Drenaje	Morfometría	Vector Promedio
Subunidades	1.00	7.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.20	0.20
Susceptibilidad por deslizamiento	0.14	1.00	3.00	5.00	7.00	7.00	0.14	0.15
Precipitación	0.20	0.33	1.00	3.00	0.20	0.20	0.14	0.04
Alturas	0.20	0.20	0.33	1.00	0.14	0.33	0.11	0.02
Pendientes	0.20	3.00	5.00	7.00	1.00	5.00	0.14	0.13
Drenaje	0.20	0.14	5.00	3.00	0.20	1.00	0.14	0.06
Morfometría	5.00	7.00	7.00	9.00	7.00	7.00	1.00	0.40

Finalmente, en la tabla 21, se muestra el resultado de los pesos finales para cada alternativa, estos pesos se obtuvieron al realizar la suma producto de cada alternativa por el ponderado de cada criterio.

**Tabla 21**

*Tabla de ponderación de alternativas y criterios.*

Criterio / Alternativa	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Pesos
Subunidades	0.20	0.23	0.23	0.28	0.20	0.23
Susceptibilidad por deslizamiento	0.07	0.16	0.13	0.09	0.15	0.13
Precipitación	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04
Alturas	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Pendientes	0.15	0.10	0.16	0.16	0.13	0.14
Drenaje	0.06	0.11	0.08	0.08	0.06	0.07
Morfometría	0.45	0.33	0.35	0.32	0.40	0.37
Ponderación	0.04	0.06	0.15	0.26	0.50	

Luego cada variable fue reclasificada en 5 categorías desde muy bajo hasta muy alto, teniendo en cuenta la incidencia que aportan para la generación de una avenida torrencial, al tener cada variable reclasificada, se unieron en un mapa por medio de la herramienta de álgebra de mapas en Qgis obteniendo finalmente el mapa de susceptibilidad por avenida torrencial para la subcuenca alta de Riofrío de acuerdo con los valores de pesos obtenidos en la matriz anterior.

**Tabla 22**

*Porcentajes usados en la elaboración del mapa de susceptibilidad.*

<b>VARIABLE</b>	<b>PESOS (%)</b>
<b>Morfometría</b>	<b>37%</b>
<b>Subunidades</b>	<b>23%</b>
<b>Pendientes</b>	<b>14%</b>
<b>Susceptibilidad por deslizamiento</b>	<b>13%</b>
<b>Drenaje</b>	<b>7%</b>
<b>Precipitación</b>	<b>4%</b>
<b>Alturas</b>	<b>2%</b>

### 8.4.1 Reclasificación de Pendientes

La reclasificación de las pendientes (ver tabla 23) se hizo tomando como categoría muy alta las pendientes menores a 15%, ya que son las zonas que corresponden con el tránsito del cauce y a su vez con las geoformas de planicie o llanura de inundación y son allí por donde se transporta el material arrastrado, por consiguiente las que se encuentran mayores a 140% el criterio que se le asigna es Muy Baja debido a que es una pendiente mayor no se encuentra tan implicada en el evento como si lo serían las pendientes bajas.

**Tabla 23**

*Reclasificación de pendientes.*

Reclasificación de Pendientes		
Pendientes	Criterio	Área (Km <sup>2</sup> )
>140	Muy Baja	7.25
70 - 140	Baja	17.41
30- 70	Media	20.83
15 - 30	Alta	0.55
2 - 15	Muy Alta	0.41
<b>TOTAL</b>		<b>46.5</b>

**Figura 29**

*Diagrama estadístico de la reclasificación de pendientes.*

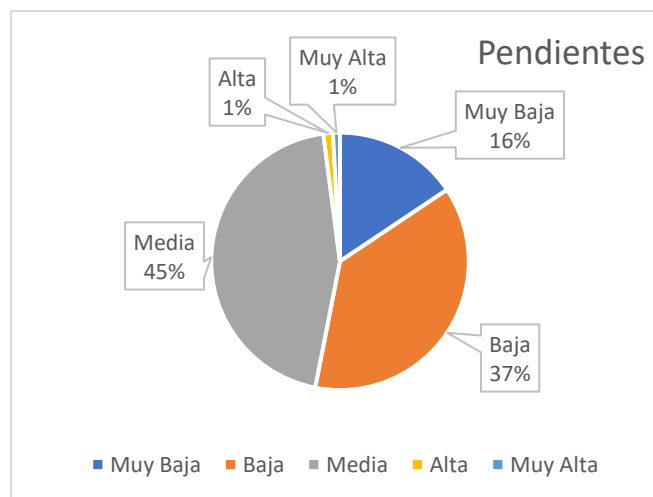
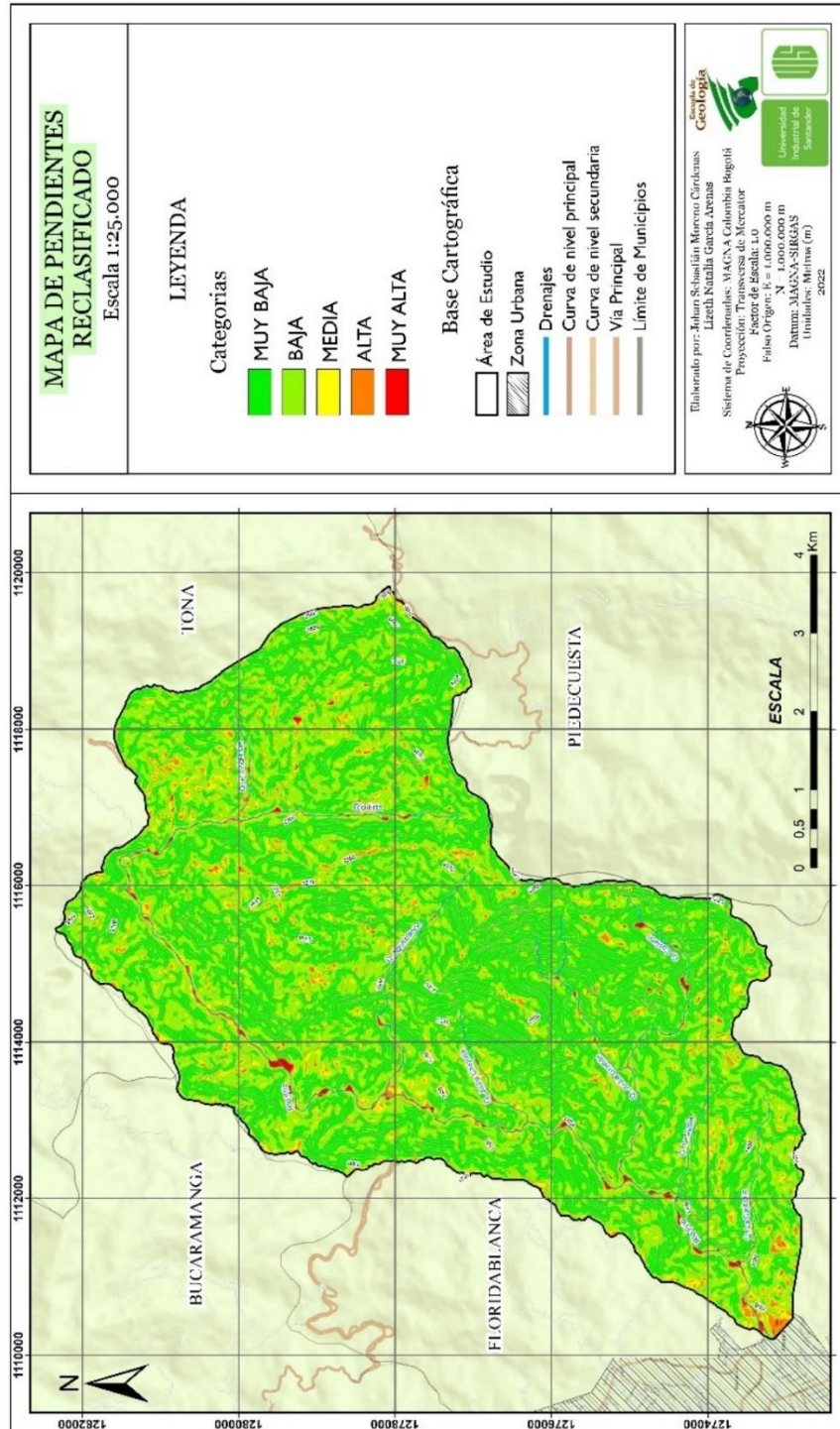


Figura 30

Mapa de Reclasificación de pendientes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



### 8.4.2 Reclasificación de Drenajes

La reclasificación de los drenajes (ver tabla 24) se realizó teniendo en cuenta que los órdenes mayores son los que tienen mayor confluencia de tributarios de “menor orden”, se toman estos con criterio Muy Alto, dado que estos drenajes de orden 5 y 6 transportarían los materiales arrastrados por efecto de la avenida torrencial ya que son el ultimo orden en la red hídrica y son la estancia final en la conexión de los drenajes de la subcuenca; y el criterio Muy Bajo se le asignó a los drenajes de orden 1 ya que son los que no han tenido conexiones con otros tributarios y son los primeros en la conexión de los drenajes.

**Tabla 24**

*Reclasificación de Drenajes*

Reclasificación de Drenajes	
Orden drenajes	Criterio
1	Muy Baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5 - 6	Muy Alta

**Figura 31**

*Diagrama estadístico de la reclasificación de drenajes.*

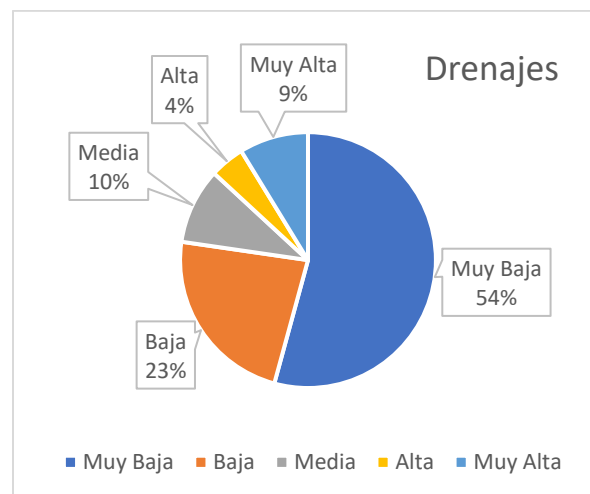
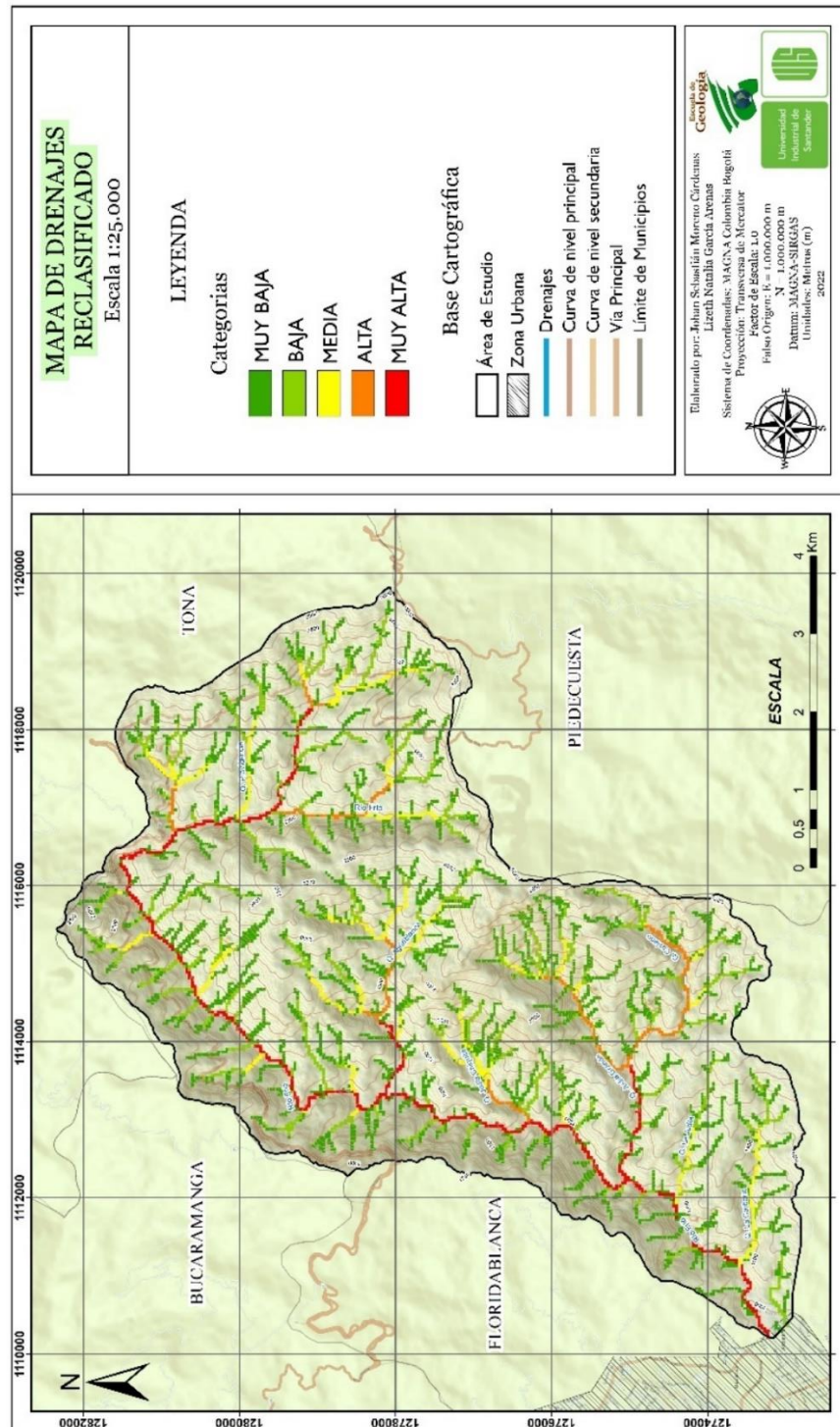


Figura 32

Mapa de Reclasificación de drenajes de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



### 8.4.3 Reclasificación de Precipitación

La reclasificación de la precipitación multianual que se ha presentado en la subcuenca entre los años 2010-2021, se hizo tomando como Muy bajo los valores menores a 1500 mm y Muy Alta los valores superiores a 2100 mm, como se observa en la tabla 25. Esta reclasificación se asignó basándose en la premisa de que, si hay un incremento de las precipitaciones, se permite la mezcla con los sólidos para el desplazamiento, en especial si el aumento de las lluvias es intenso. además, el aumento de las lluvias supone un aumento rápido de la presión de los poros en zonas de suelo inestable (Suarez, 2001), generando un mayor arrastre de material.

**Tabla 25**

*Reclasificación de precipitación.*

Reclasificación de Precipitación		
Precipitación	Criterio	Área (Km <sup>2</sup> )
1300 - 1500	Muy Baja	6.8
1500 - 1700	Baja	11.9
1700 - 1890	Media	12.6
1890 - 2100	Alta	8.4
2100 - 2300	Muy Alta	6.9
<b>TOTAL</b>		<b>46.5</b>

**Figura 33**

*Diagrama estadístico de la reclasificación de precipitación.*

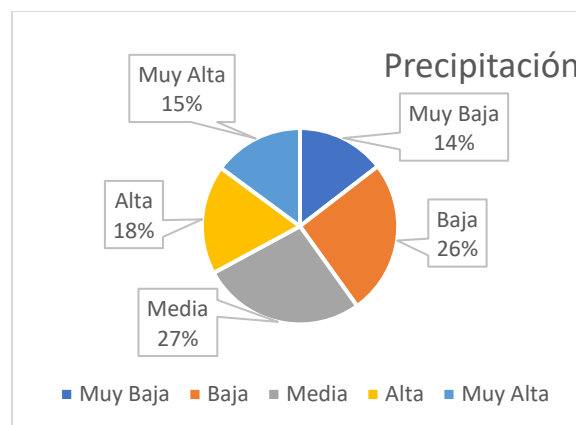
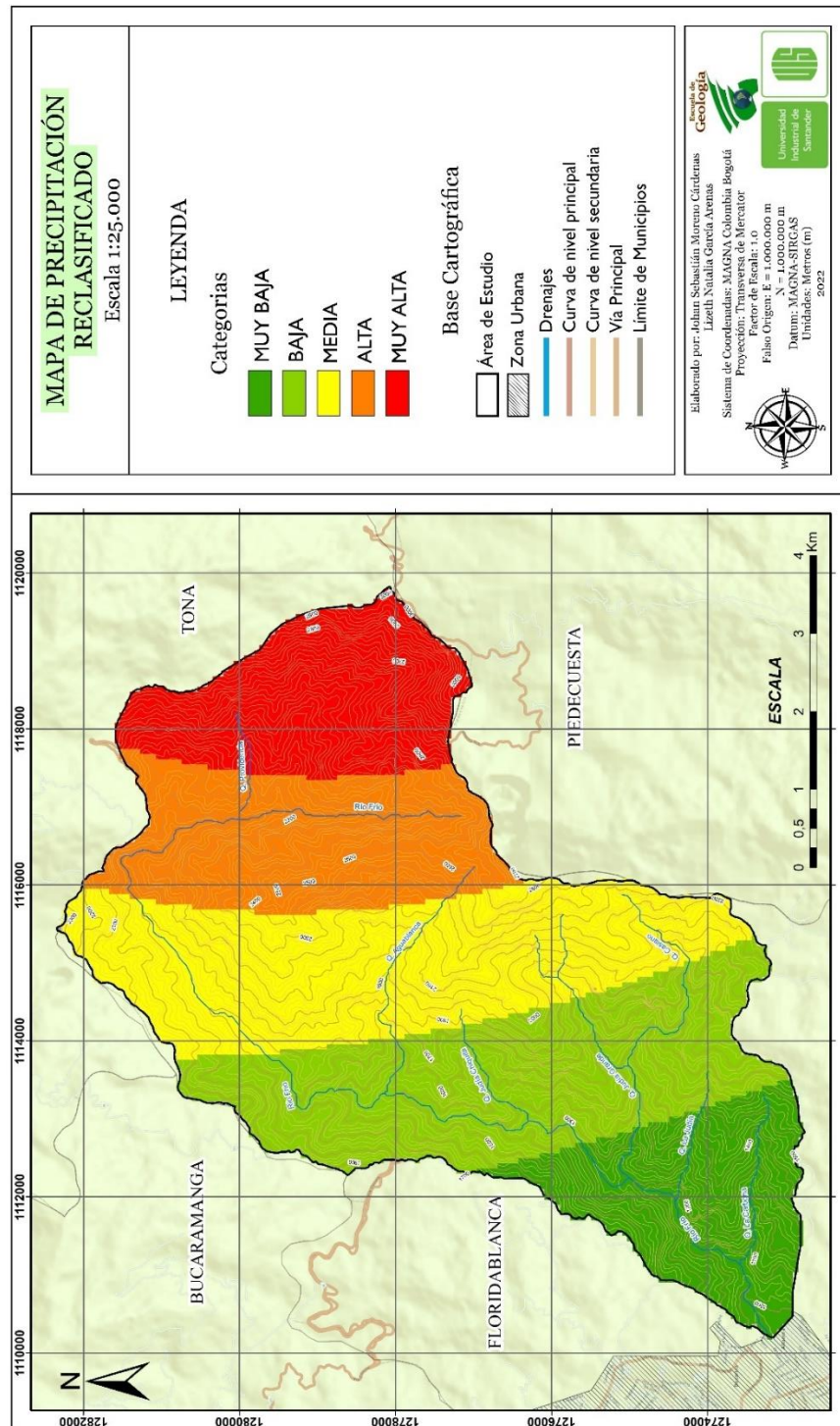


Figura 34

Mapa de Reclasificación de precipitación de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



#### 8.4.4 Reclasificación de Susceptibilidad por Deslizamiento y Flujo no canalizado

Para esta reclasificación se tomaron los mismos valores que Ronderos, A. (2022) tomó para la generación de su mapa de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado.

**Tabla 26**

*Reclasificación de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado.*

Reclasificación de Susceptibilidad por Deslizamiento	
Criterio	Área (Km <sup>2</sup> )
Baja	10.3
Media	8.7
Alta	27.02
Muy Alta	0.5
<b>TOTAL</b>	<b>46.5</b>

**Figura 35**

*Diagrama estadístico de la reclasificación de susceptibilidad por deslizamiento.*

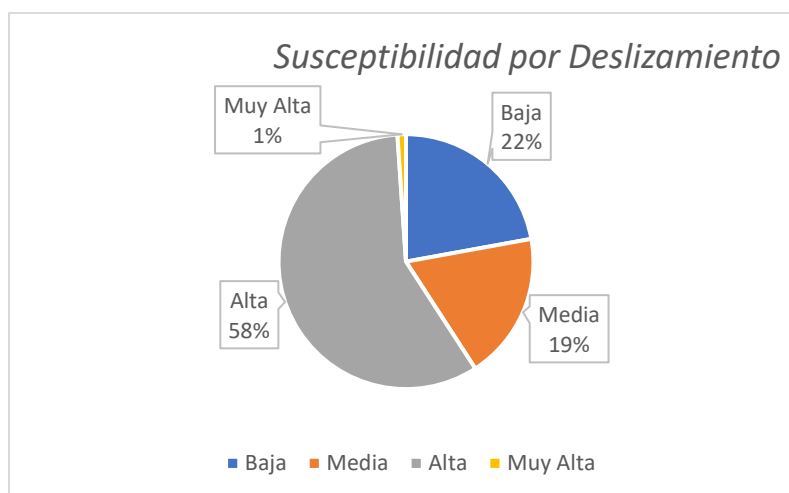
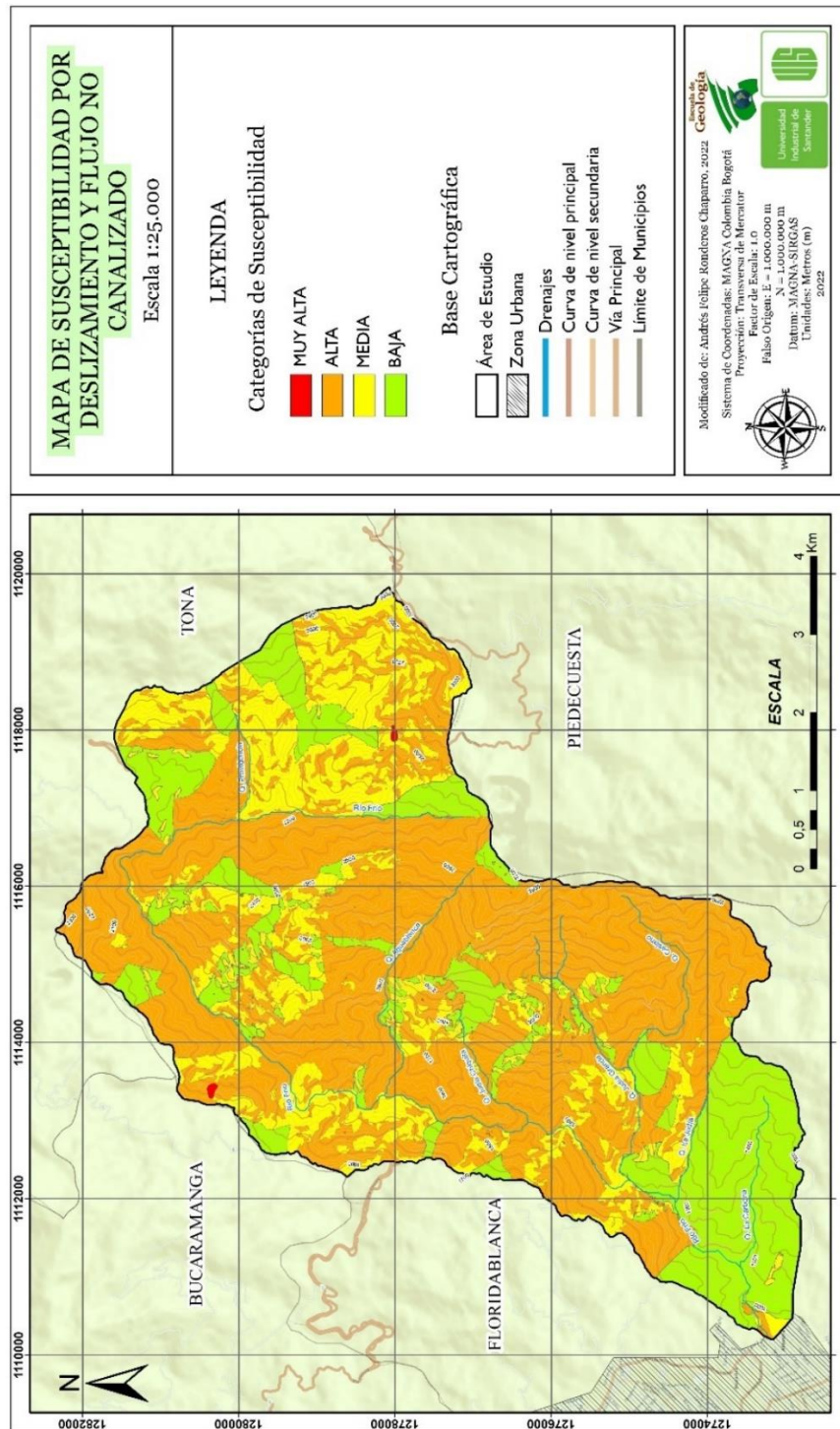


Figura 36

Mapa de susceptibilidad por deslizamiento y flujo no canalizado. Tomado de Ronderos, 2022.



**8.4.5 Reclasificación de Subunidades Geomorfológicas**

Para la reclasificación del mapa de subunidades geomorfológicas, se tuvieron en cuenta las características de estas, a las geoformas de origen fluvial se les asignó una clasificación más alta, debido a el proceso fluvio-torrencial; la mayoría de las geoformas cartografiadas en el área se reclasificaron con una categoría entre media y alta por sus características en cuanto a pendiente y erosión principalmente, dicha clasificación se ilustra en la tabla 27.

**Tabla 27**

*Reclasificación de subunidades geomorfológicas.*

Reclasificación Subunidades		COD	Criterio
COD	Criterio	Dloa	MEDIA
Dc	BAJA	Dloma	MEDIA
Dli	BAJA	Dco	ALTA
Dlor	BAJA	Dla	ALTA
Dmo	BAJA	Dlden	ALTA
Ale	MEDIA	Dldi	ALTA
Dcd	MEDIA	Dlema	ALTA
Dce	MEDIA	Dleo	ALTA
Dcrem	MEDIA	Dleme	ALTA
Dldebc	MEDIA	Dlesc	ALTA
Dldebl	MEDIA	Fpi	MUY ALTA
Dldebm	MEDIA	Ftaa	MUY ALTA
Dlma	MEDIA	Ftae	MUY ALTA
Dlme	MEDIA		
Dlmesc	MEDIA		

**Figura 37**

*Diagrama estadístico de la reclasificación de subunidades geomorfológicas.*

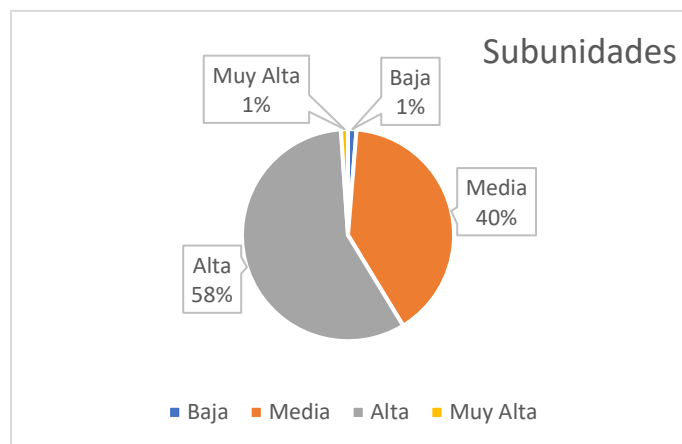
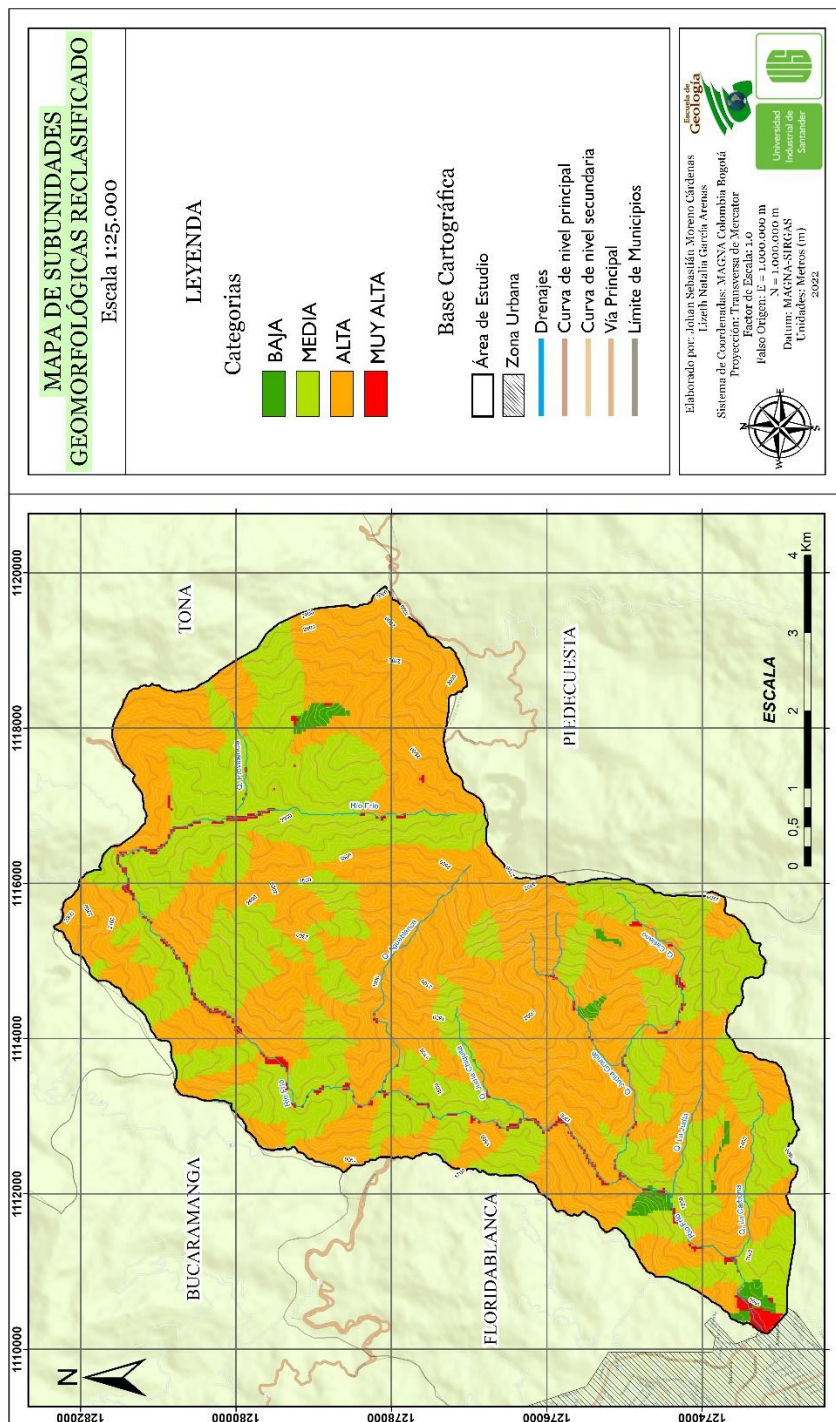


Figura 38

Mapa de Reclasificación de subunidades geomorfológicas de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



#### 8.4.6 Reclasificación de Alturas

La reclasificación de las alturas de la subcuenca se hizo tomando como categoría muy alta las alturas más bajas debido a que estas zonas al tener menor altura presentan una tendencia a que las avenidas torrenciales se propaguen y acumulen, ya que estos eventos vendrían de alturas superiores con velocidades considerables, además la zona urbana corresponde a la zona de desfogue.

**Tabla 28**

*Reclasificación de Alturas*

Reclasificación de Alturas		
Alturas	Criterio	Área (Km <sup>2</sup> )
1000 - 1464	Muy Baja	1.8
1464 - 1849	Baja	9.0
1849 - 2177	Media	17.9
2177 - 2513	Alta	10.9
2513 - 3050	Muy Alta	6.9
<b>TOTAL</b>		<b>46.5</b>

**Figura 39**

*Diagrama estadístico de la reclasificación de alturas.*

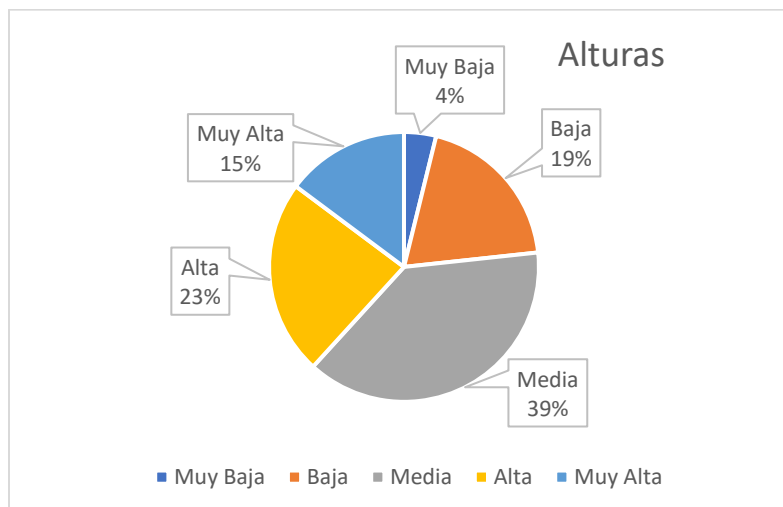
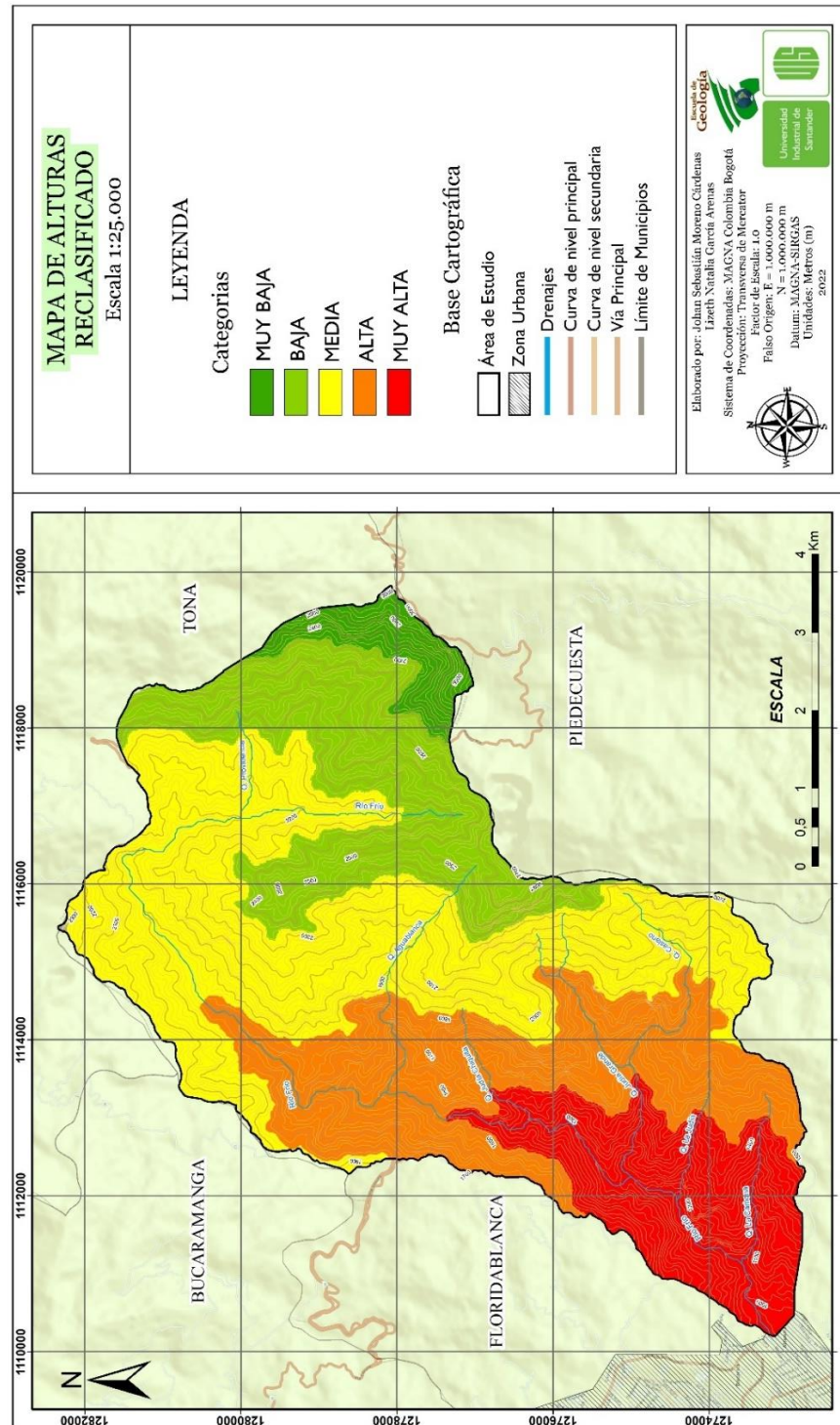


Figura 40

Mapa de Reclasificación de alturas de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



#### 8.4.7 Reclasificación de Morfometría

La reclasificación del mapa de morfometría se realizó teniendo en cuenta el Coeficiente de torrencialidad (Ct) obtenido para cada microcuenca perteneciente a la zona de estudio teniendo solo 3 criterios de clasificación (media, alta y muy alta) debido a que estos resultados de Ct son altos y por ende todas las microcuencas están propensas a que se generen avenidas torrenciales, en especial La Judía, Judía Chiquita, Agua Blanca que están en el criterio Muy Alto.

**Tabla 29**

*Reclasificación de Morfometría*

Reclasificación de morfometría		
Microcuencas	Criterio	Área (Km <sup>2</sup> )
Rio Frio, Judía Grande	Media	31.7
La Carbona, Casiano	Alta	5.8
La Judía, Judía Chiquita, Agua Blanca	Muy Alta	9.0
<b>TOTAL</b>		<b>46.5</b>

**Figura 41**

*Diagrama estadístico de la reclasificación de morfometría.*

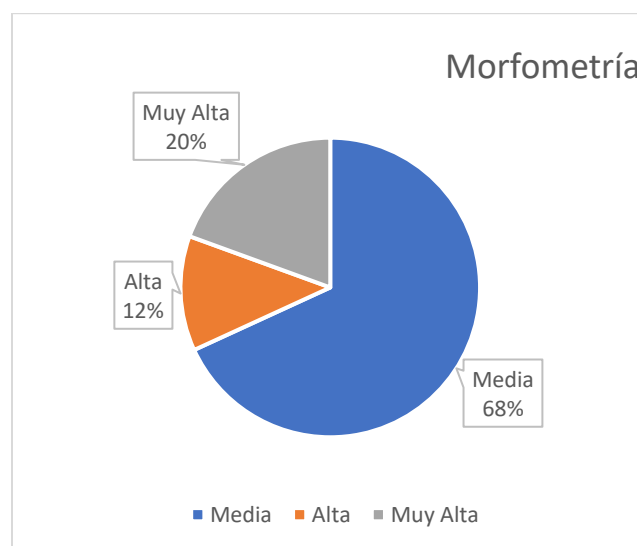
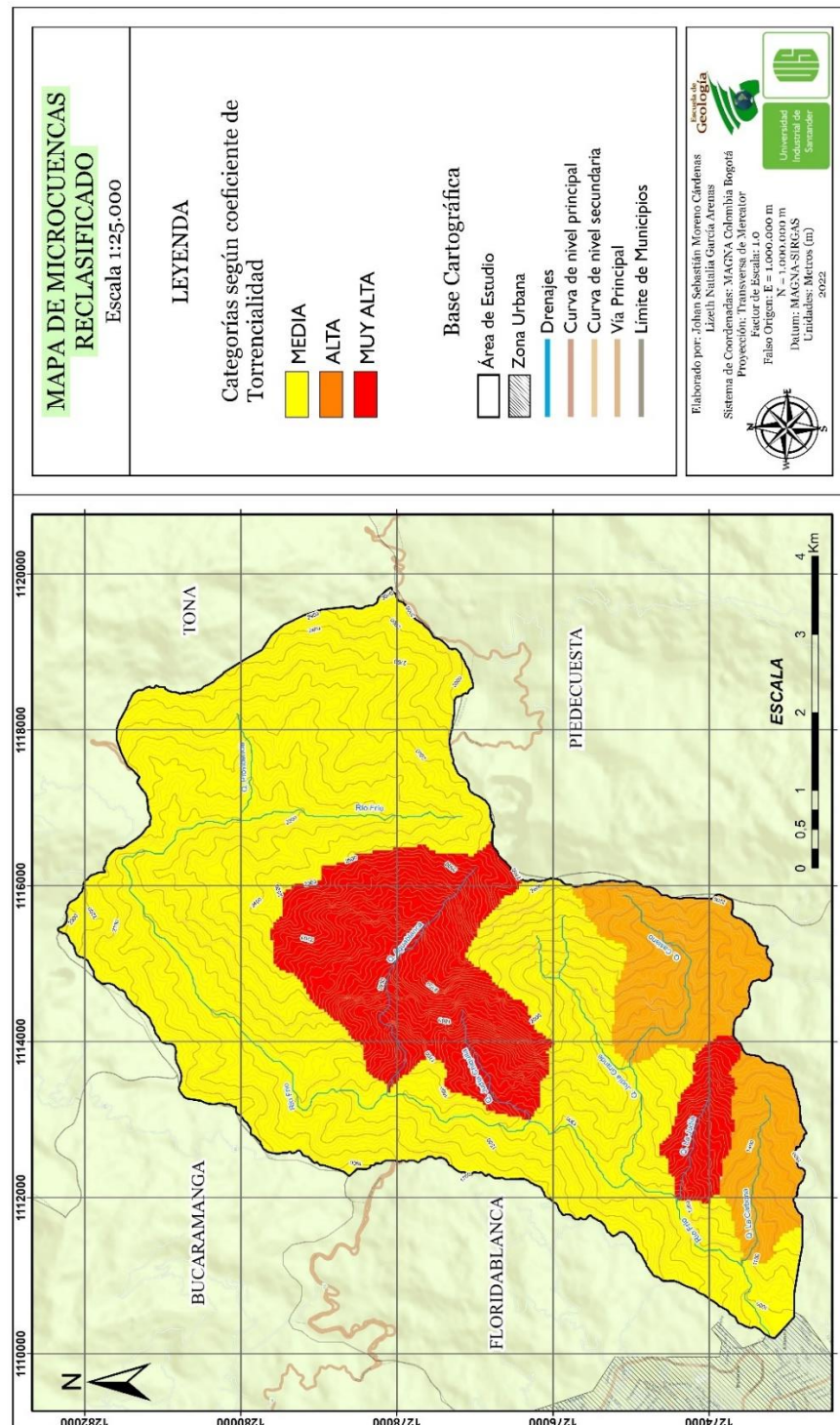


Figura 42

Mapa de Reclasificación de las microcuencas asociadas a la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



Finalmente, al tener todas las variables debidamente reclasificadas se realiza una sumatoria de mapas con la herramienta de “álgebra de mapas” teniendo en cuenta los pesos obtenidos con la matriz realizada en la aplicación del método multicriterio AHP.

$$S = (\text{Capa de Morfometría} * 0,37) + (\text{Capa de Subunidades} * 0,23) + (\text{Capa de Pendientes} * 0,14) + (\text{Capa de Susceptibilidad a Deslizamientos} * 0,13) + (\text{Capa de Drenaje} * 0,07) + (\text{Capa de Precipitaciones} * 0,04) + (\text{Capa de Alturas} * 0,02)$$

En esta operación se halla S que es la susceptibilidad por avenida torrencial la cual multiplica cada mapa por el porcentaje asignado a cada variable, obteniendo el resultado mostrado en la figura 43, en donde se muestran las zonas susceptibles conforme a cada categoría analizada dentro de la subcuenca, también se muestra en la tabla 30 las áreas correspondientes a cada categoría dentro de la zona de estudio.

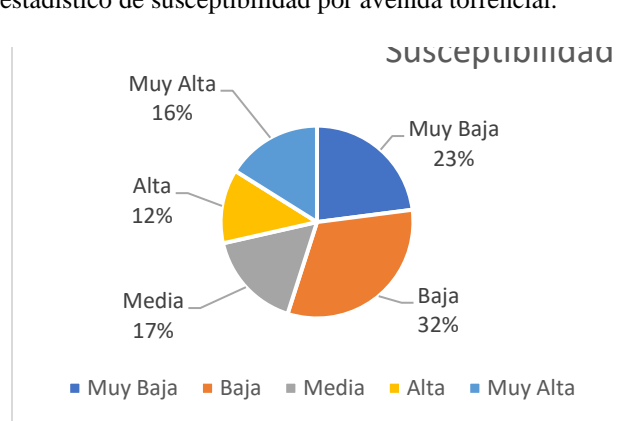
**Tabla 30**

*Área correspondiente a cada categoría de clasificación de la susceptibilidad de la parte alta de la subcuenca de Riofrío.*

Susceptibilidad por avenida torrencial	
Criterio	Área (Km <sup>2</sup> )
Muy Baja	10.7
Baja	14.9
Media	7.7
Alta	5.8
Muy Alta	7.5
<b>TOTAL</b>	<b>46.5</b>

**Figura 43**

Diagrama estadístico de susceptibilidad por avenida torrencial.



En el mapa de susceptibilidad por avenida torrencial en la parte alta de la subcuenca de Riofrio (ver figura 44), se puede observar la distribución que se tiene en las 5 categorías de carácter cualitativo, las cuales son Muy Baja (10.7%), Baja (14.9%), Media (7.7%), Alta (5.8%) y Muy Alta (7.5%) de acuerdo con el diagrama estadístico de la figura 43.

Se puede evidenciar que las áreas más susceptibles se encuentran, en primera instancia por el tránsito del cauce principal (Riofrío) ajustándose a las geoformas del ambiente fluvial identificadas en el mapa de subunidades geomorfológicas, en especial a la geoforma de código Fpi correspondiendo a planicie o llanura de inundación siendo esta indicativa del paso de las avenidas torrenciales, igualmente se encuentran las áreas correspondientes a las microcuencas Aguablanca, Judía Chiquita, La Carbona y La Judía en categoría Muy Alta, esto debido a que las características morfométricas de estas microcuencas las hacen propensas a la generación y transporte de avenidas torrenciales. Sin embargo es importante afirmar que no se encuentra en la categoría Muy alta la media y parte final del cauce de Riofrio pero no se descarta que también se debería poner especial atención debido a que la dirección en la que las microcuencas de categoría alta transportan el material arrastrado durante una avenida torrencial van dirigidas hacia el cauce principal y teniendo en cuenta los valores de las alturas que van en descenso, llevan todo el material hacia el punto de desfogue de la cuenca el cual corresponde a la parte urbana del municipio de Floridablanca.

A pesar de que en el mapa de susceptibilidad la microcuenca Casiano se encuentra categorizada como un nivel bajo-medio de susceptibilidad no quiere decir que esta microcuenca no sea propensa a la generación del evento analizado, ya que en los valores morfométricos la hace altamente propensa, pero debido a los demás factores involucrados en la generación del mapa final

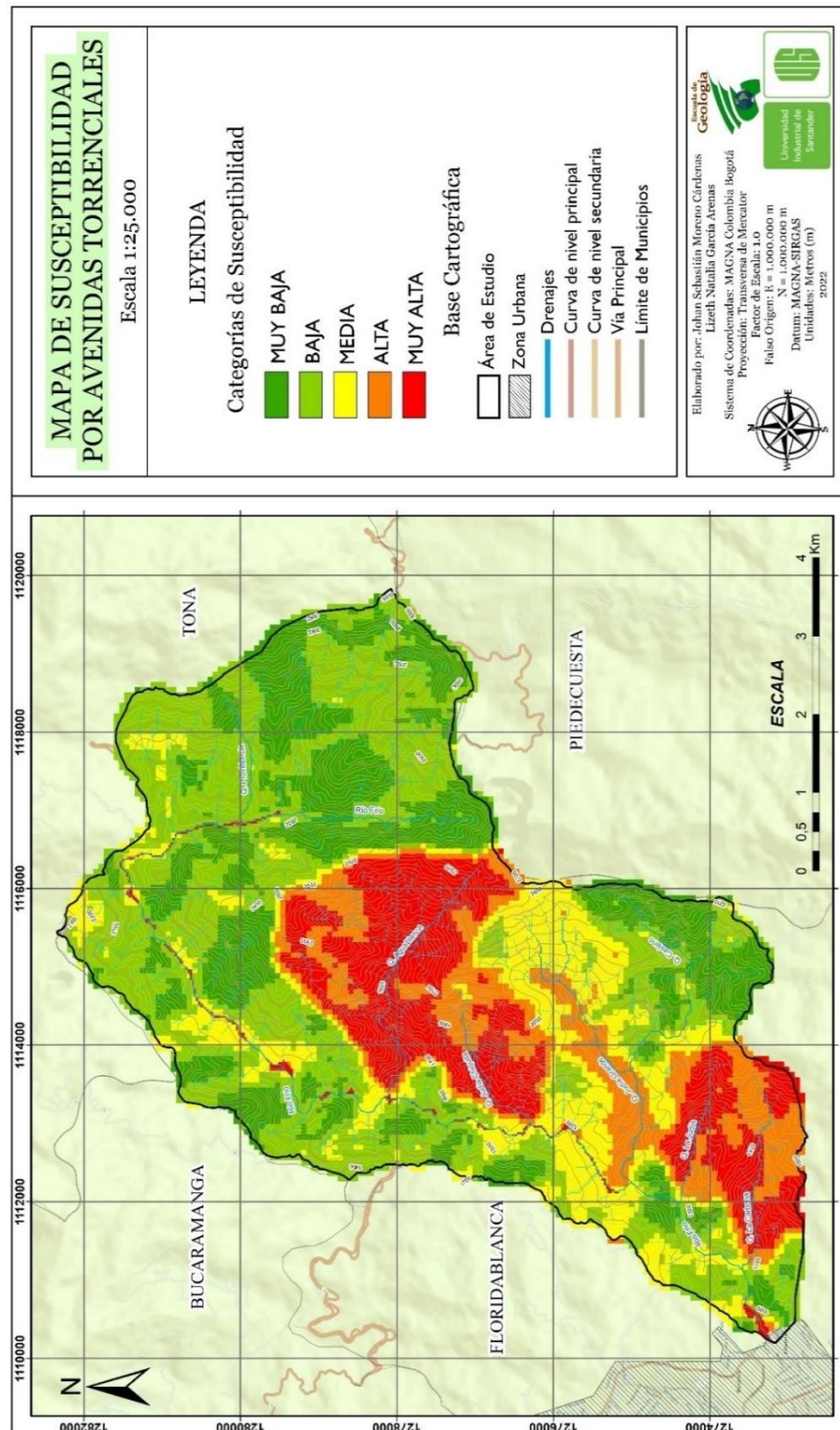
se encuentra en esa categoría. A consideracion de los autores de debe tener especial cuidado en esa zona porque, según el informe del servicio del 28 de enero de 2020, una de las zonas de donde provino el material aportado en el evento torrencial se generaron en esa microcuenca.

Y las zonas de la parte alta de la subcuenca, dieron como resultado tonalidades verdes provenientes de las susceptibilidades mas bajas, correspondiendo a las zonas menos susceptibles de ser afectadas por una avenida torrencial, sin embargo, no se descarta que a lo largo de estas zonas se generen movimientos en masa o deslizamientos que sean encausados por la red de drenajes y terminen desencadenando un evento torrencial en las alturas mas bajas de la subcuenca.

Con referencia al método de validación que indica que el mapa es lógico y se encuentra ajustado a la realidad, se puede evidenciar con el mapa geomorfológico que las geoformas de planicie o llanura de inundación están concordantes a el tránsito del rio principal se ven zonas rojas donde se presenta la mayor susceptibilidad, así mismo las zonas más rojas que se encuentran en la parte sur de la subcuenca corresponden a las microcuencas que tienen un coeficiente de torrencialidad muy alto que son La carbona, La Judía y Aguablanca, seguido de Judía grande que tiene un coeficiente alto, y según el informe de del SGC (2020), se afirma que la microcuenca Judía Grande fue la principal responsable del evento de avenida torrencial ocurrido el 28 de enero de 2020, por ultimo con la aplicación del análisis multicriterio y la evaluación en la tasa de consistencia en cada matriz se puede afirmar que la comparación de los pares tiene una buena consistencia y los pesos son validados para la generación del mapa.

Figura 44

Mapa de Susceptibilidad por avenida torrencial en la parte alta de la subcuenca de Riofrío.



## 9. Conclusiones

Con los resultados obtenidos a lo largo de cada una de las fases metodológicas, se puede interpretar que los factores condicionantes que interactúan en la ocurrencia de una avenida torrencial son la morfometría y drenajes de la subcuenca, la precipitación, las alturas y pendientes la geomorfología de la zona y los diferentes deslizamientos o movimientos en masa que se puedan presentar. En los resultados de morfometría se evidenció que las microcuencas (Riofrío, La Carbona, La Judía, Casiano, Judía grande, Judía chiquita y Agua blanca) que conforman la subcuenca de Riofrío, son propensas a que ocurran avenidas torrenciales, teniendo especial incidencia el coeficiente de torrencialidad que para todas las microcuencas dio un resultado mayor a 9, siendo estos resultados mucho mayores a los expuestos por Camino et al. (2018). Relacionando este resultado con los eventos ocurridos en los últimos años en esta subcuenca, en especial el evento torrencial del 28 de enero del 2020, el cual, de acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano, tuvo su origen en las microcuencas Casiano y Judía grande, mostrando que los cálculos obtenidos de acuerdo con la morfometría están ajustados a la realidad, evidenciando de forma numérica que en la subcuenca de Riofrío si se han generado eventos de avenidas torrenciales.

Por otra parte, con la caracterización geomorfológica realizada en el sector de Puente Rojo se identificó que en las márgenes del cauce se tienen depósitos asociados a la geoforma de llanura de inundación, esta geoforma está relacionada con procesos de erosión, transporte y acumulación aluvial, los depósitos son clasto soportados constituidos por fragmentos redondeados a subredondeados de tamaños grava bloques cuyos tamaños van desde 10 centímetros hasta alcanzar 4 metros, estos bloques pertenecen a rocas de la parte alta de la subcuenca ya que corresponden a

rocas ígneas (Cuarzomonzonita, granodiorita) y metamórficas (neis) concordantes con la litología presente en este sector, lo que evidencia el transporte y depositación de estos bloques a los cuales se les podría atribuir a las avenidas torrenciales que han ocurrido en los últimos años. Asimismo, se asocia esta geoforma encontrada en campo con la geoforma cartografiada en el mapa de subunidades geomorfológica como plano o llanura de inundación (Fpi) siendo esta indicativa del paso de las avenidas torrenciales, mostrada en el mapa de subunidades geomorfológicas a escala 1:25000 cuya relación se ilustra en la figura 23.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad por avenida torrencial en la parte alta de la subcuenca de Riofrio muestra una distribución en 5 categorías de carácter cualitativo, las cuales son Muy Baja (10.7%), Baja (14.9%), Media (7.7%), Alta (5.8%) y Muy Alta (7.5%), Se puede evidenciar que algunas de las áreas más susceptibles se encuentran, por el tránsito del cauce principal ajustándose a las geoformas del ambiente fluvial identificadas en el mapa de subunidades geomorfológicas, en especial a la geoforma de código Fpi correspondiendo a planicie o llanura de inundación. El área comprendida entre las categorías Alta y Muy Alta que no se encuentran concordantes al cauce principal, se ubica en la parte central de la subcuenca en donde se concentran las microcuencas de Aguablanca, Judía Chiquita, La Carbona y La Judía, las cuales presentan un coeficiente de torrencialidad alto y por ende son propensas a que se generen avenidas torrenciales, dado que los tributarios de estas confluyen en el cauce principal (Riofrio) se establece una conexión entre ellas y la parte final de la subcuenca donde se encuentra el punto de desfogue de la misma, aunque en esas zonas no hay una susceptibilidad alta, se le debe prestar atención ya que si el evento torrencial comienza en una de estas microcuencas que son propensas a generar dicho evento, todo el material que se comience a arrastrar a lo largo de esa microcuenca va a parar al

cauce principal, por consiguiente las zonas en color verde de la parte más baja de la subcuenca tendrían que tener una capacidad de respuesta buena a la hora de transportar el material arrastrado, pero si los factores superan la capacidad de respuesta se tendría como consecuencia una avenida torrencial en la parte más baja de la subcuenca.

### **10. Recomendaciones**

Se recomiendan realizar los estudios posteriores a la susceptibilidad como lo son la amenaza y el riesgo con la finalidad de ampliar y mejorar el conocimiento en la subcuenca para realizar un aporte a los planes de ordenamiento territorial y que la administración del municipio tome las acciones que considere pertinentes para la seguridad de los habitantes. Asimismo, es indispensable realizar un trabajo de campo más detallado con un grupo interdisciplinario que de un mayor aporte desde la academia a los diferentes trabajos en materia de susceptibilidad, amenaza y riesgo.

Por lo anterior y las limitantes presentadas, se recomienda que los resultados contenidos en este informe están sujetos a verificación con estudios más detallados y reiterando que este informe al ser preliminar en ningún caso reemplaza la ejecución de actividades de investigación que permitan entender con mayor detalle la problemática tratada.

También es importante tener un control con las precipitaciones por medio de las estaciones del IDEAM ya que como el cambio climático ha alterado los patrones climáticos que se tenían y como se mencionaba en la discusión, en la zona de estudio para los años de 2010 a 2021 no se muestra una tendencia marcada en cuales son los periodos de lluvia con más precipitaciones,

entonces tener presente ese recurso sería de gran ayuda para poder realizar planes de contingencia si fuere necesario, así mismo es importante realizar un estudio hidrogeológico e hidráulico a fondo, para tener una densidad de datos mayor y se pueda alimentar el modelo y los trabajos posteriores debido a que este factor relaciona la rapidez con la que puede transformarse la precipitación en escorrentía superficial, para en consecuencia considerar el aumento súbito del caudal y así se convierta en detonante de una avenida torrencial. Y por último se recomienda contar con más recursos tanto económicos para adquirir insumos de mejor calidad como de acompañamiento de la fuerza pública en las partidas de campo ya que en esta zona es común que se presenten problemas de orden público.

### Referencias Bibliográficas

- Acosta, J. H. C. (2011). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y ambiente*, 14(3), 45-50.
- Área Metropolitana de Bucaramanga (s.f.) Floridablanca. Documentación disponible en: <https://www.amb.gov.co/piedecuesta/>
- Almario Guio, D. (2021). Uso de la metodología AHP (análisis de procesos jerárquicos) para la zonificación de riesgos de la variante Luruaco – arroyo de piedra en los municipios de Luruaco y repelón del departamento del atlántico. Universidad Militar Nueva Granada.
- Álvarez, M., Arquero, A., & Martínez, E. (2000). Empleo del AHP (proceso analítico jerárquico) incorporado en SIG para definir el emplazamiento óptimo de equipamientos universitarios. Madrid.
- ASDF. (s.f.). data set SAR. Alos Palsar. Documento disponible en: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>
- Benavides, V., Tarlé, T., & Galbiatti, J. (2009, 3 diciembre). Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río bobo, departamento de Nariño - Colombia. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 29(3).
- Boinet, T., Bourgois, J., Bellon, H., et Toussaint, J. (1985). Age et repartition du magmatism Premesoziouque des Andes de Colombie. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des Sciences. Serie D, Sciences Naturalles* 300(II): 445-450.
- Camino, M., Bó, J., Cionchi, J., López, A., Del Río, J., & De Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 73-97.

- Castillo, N. (2006). Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Castro Franco, M., García Ramírez, D. Y., & Jiménez López, A. F. (2017). Comparación de técnicas de interpolación espacial de propiedades del suelo en el piedemonte llanero colombiano. *Tecnura*, 21(53), 78–95. <https://doi.org/10.14483/22487638.11658>
- CDMB. (2010). Consorcio estudios Rio Frío. *Estudio de zonificación de amenaza por inundación en la cuenca baja y media del Rio frío (municipio de Floridablanca y Girón), de acuerdo con las especificaciones técnicas establecidas por la C.D.M.B (Nº 1)*.
- Clavijo, J. (1994). Mapa geológico generalizado de Norte de Santander. Escala 1: 250.000. Mapa interno. Bucaramanga. INGEOMINAS.
- Evert, K (2010) *Encyclopedic Dictionary of Landscape and Urban Planning: Multilingual Reference Book in English, Spanish, French and German*.
- Forero Bernal, C.A., Zabala Parra, P.A. y Boada Rodríguez, A. (2017). Análisis espaciotemporal de la incidencia antrópica en la Cuenca del Rio Cauca, en el departamento del Valle, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 22(1), 127-146. doi: 10.19053/01233769.5861.
- García, J. (02 de 2002). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Obtenido de zonificación de amenazas por movimientos en masa y por avenidas torrenciales para el área rural del municipio de Ituango y zonificación de amenazas y riesgos por movimientos en masa y por inundación para el casco urbano y los corregimientos de Santa Rita.
- Gaspari, F. J. (2012). Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG. La Plata Argentina.

- Gentili, Jorge O y Gil, Verónica. (2009). Aplicación de tecnologías de información geográficas (TIG). Universidad Nacional del Sur.
- GIRAL, Y., RUIZ, Y. (2017). Zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales de las cuencas de los ríos Chicamocha, Sogamoso, y Suarez y el modelo hidráulico en el área de confluencia en el departamento de Santander usando SIG escala 1:25000. Tesis de grado. UPTC.
- Gómez, E. & López, C. (2005). Estimación de la recarga mensual en la parte alta de la cuenca del río frío por medio de un modelo hidrológico distribuido. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology Geological Society of America Bulletin. U.S.A.
- IDEAM (s. f.). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. Documentación disponible en <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IGAC (2014). Códigos para los levantamientos de suelo. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia. 92p.
- Ingeoexpert, S.f. Artículo “¿Qué son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y cómo funcionan?”. España.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática – INEGI, s.f. Modelos Digitales de Elevación (MDE) – Descripción. México.
- Julivert, M., (1959). Geología de la vertiente W del Macizo de Santander en el sector de Bucaramanga. Boletín de geología N° 3, 04 de agosto de 1959.
- Kravchenko A. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of American Journal 67:1564-1571.

- Lagares, J. (2020, 20 agosto). *La tragedia de Armero, el pueblo colombiano que se «borró del mapa» tras la erupción de un volcán.* Clarín. [https://www.clarin.com/internacional/tragedia-armero--pueblo-colombiano-borro-mapa-erupcion-volcan\\_0\\_YEbYftWfn.html](https://www.clarin.com/internacional/tragedia-armero--pueblo-colombiano-borro-mapa-erupcion-volcan_0_YEbYftWfn.html)
- Langenheim, R.L. (1959). Preliminary report on the stratigraphy of the Girón Formation in Santander and Boyacá. *Boletín de Geología*, 3, 35-50
- Londoño, C. H. (2001). Cuencas hidrográficas: bases conceptuales-caracterización-planificación-administración. Ibagué.
- López, D. (2016). Estudio morfométrico y cálculo de caudal de creciente en la hacienda pozo rubio por método racional entre caño venado y caño el pescado [Proyecto de Grado en la modalidad de Monografía, para optar por el título de Tecnóloga en Construcciones Civiles.]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Lux Cardona, B. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. New York: Mc Graw Hill.
- Mantilla, L., Bissig, T., Cottle, J. Hart C., (2012). Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). *Journal of South American Earth Sciences* 38 (2012) 1-12.
- Marcos, A. (2017, 2 abril). *Una avalancha deja más de 200 fallecidos en el sur de Colombia.* El País. [https://elpais.com/internacional/2017/04/01/colombia/1491052719\\_307114.html](https://elpais.com/internacional/2017/04/01/colombia/1491052719_307114.html)
- Méndez, W., Carrera, J., & Rivas, L. (2015). Geomorfometría de cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo “El Avila” (Estado Vargas, Venezuela): implicaciones hidromorfodinámicas. *Revista Brasileira de Geomorfología*.

- MORA, J., QUINTERO, C. (2006). Análisis estructural y cartografía geológica de la parte alta de la cuenca de Río Frío, municipio de Floridablanca, orientado a definir un modelo hidrogeológico conceptual Tesis de grado. UIS. Bucaramanga.
- Mora, R. et al. (1992). Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la península de papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson.
- Oddershede, A., Arias, A., & Cancino, H. (2007). Rural development decision support using the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*, 46 (7-8), 1107- 1114.
- Oddershede, A. V. (2010). Selección de sistema de tratamiento de aguas residuales para Localidad de Santa Bárbara usando metodología de decisión multicriterio AHP.
- Ordoñez, J. (2011). Que es una cuenca hidrológica Cartilla técnica.
- Plata, R. (2008). Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos. 10.13140/RG.2.2.10325.47842.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p., 1 CD-ROM.
- QGIS.org, (2022). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Quirós, M. (2011). *Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). Cartografía, Fotointerpretación, Teledetección y SIG*. Ediciones Universidad de Salamanca.
- Racca J.M.G., (1984). Programas para el cálculo en geomorfología cuantitativa. Notas del Instituto Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 77(1-2), 2007. 37 de Fisiografía y Geología B1: 1-12.

- Ronderos, A., (2022). Zonificación de la Susceptibilidad por Movimientos Tipo Deslizamiento y Flujo no Canalizado a Escala 1:25000 para la Cuenca del Río Frío, municipio de Floridablanca, Santander.
- Royero, M., Clavijo, J., (2001). Memoria explicativa del departamento de Santander, Mapa geológico generalizado, Departamento de Santander. Escala 1:400.000. INGEOMINAS.
- Ruiz, J. 2001. Hidrología; evolución y visión sistémica, la morfometría de cuencas como aplicación. UNELLEZ. Barinas – Venezuela.
- Saaty, T. L. (1997). Toma de Decisiones para Líderes: El proceso analítico jerárquico la toma de decisiones en un mundo complejo. (M. Escudey, E. Martínez, & L. Vargas, Trans.) Pittsburgh: RWS Publication
- Santander, A. D., & Barrios, A. M. (2014). Morfometría de Cuencas.
- Sarmiento, P. (2017). Desarrollo y análisis de zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa: uso y evaluación del método heurístico del proceso de análisis jerárquico y comparación de criterios adecuados. Bogotá
- SENCIALES, J.M. y E. Ferre. (1999). Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (provincia de Málaga) en López B. F., C. Conesa y M.A. Romero: Estudios de Geomorfología en España. Actas de la II Reunión Nacional de Geomorfología, Murcia, S.E.G. 365-375 p.
- Schumm, S.A. (1956) Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin.
- SGC. (2012). Informe mapa de unidades geomorfológicas de la plancha 120 escala 1:100.000 departamento de Santander. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25000. 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.
- Smith, D. y Stopp, P. (1978). *The river basin. An introduction to the study of hydrology.* Cambridge University Press. Londres – Inglaterra.
- SNGRD. (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastre y Fenómenos Amenazante. Bogotá, Colombia.: ISBN Digital: 978 – 958 – 56017 – 4 – 1SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Strahler, A. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks.* Mc Graw-Hill. New York - USA.
- Suarez, J. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales* (Vol. 1). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos — Ingeniería de Suelos Ltda.
- Tobler, W., (1987). Tobler, Waldo. 1987. “Measuring Spatial Resolution”, Proceedings, Land Resources Information Systems Conference, Beijing, pp. 12-16.
- Trujillo, A. R., Barroso, F. U., & Escobar, Y. C. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (1st ed.). Universidad del Valle. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1rfsqf5>
- UNAM. (2017). Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- University of Alaska Fairbanks. (2007). ASF DAAC. ©JAXA/METI 2007, Documentación disponible en: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

- Vanguardia. (2020, 28 enero). *130 familias evacuadas, 100 vehículos y 30 casas afectadas: Saldo de la avalancha en Floridablanca*. Vanguardia. Documentación disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/floridablanca/130-familias-evacuadas-100-vehiculos-y-30-casas-afectadas-saldo-de-la-avalancha-en-floridablanca-YA1938753>
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., y Restrepo, H. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico XXI (1-3), 1-132.