

Identificación de Ambientes Geomorfológicos y Elaboración de un Mapa de Favorabilidad
para la Percolación de la Zona de la Mesa de Los Santos, Santander

Autores

Margith Lizeth Moreno Sánchez y Karolyne Dayan Silva Otálora

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo PhD. En Ingeniería Geológica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2021

Tabla de contenido

Introducción	13
1 Objetivos	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos	15
2 Localización	16
2.1 Climatología.....	16
3 Marco Geológico y Geomorfológico	21
3.1 Geología.....	26
3.1.1 Paleozoico.....	26
3.1.2 Jurásico.....	28
3.1.3 Cretácico.....	29
3.1.4 Cuaternario.....	30
3.2 Marco estructural regional	30
Falla de Bucaramanga.....	31
Falla del Suárez.....	31
Falla de Los Montes.....	31
Falla de Los Santos	32
Falla La Mojarra	32

Falla El Duende.....	33
3.3 Geomorfología.....	34
4 Área, Zona y Subzona Hidrográfica.....	39
5 Métodos y procedimientos	44
5.1 Elaboración del mapa de pendientes.....	45
5.2 Elaboración del mapa de curvatura.....	46
5.3 Elaboración del mapa morfogenético	47
5.4 Elaboración del mapa de cuencas hidrográficas	48
5.5 Elaboración del mapa de cobertura del suelo	49
5.6 Elaboración del mapa de favorabilidad para la percolación	51
5.7 Perfiles de meteorización.....	55
5.8 Análisis de granulometría	56
5.9 Análisis de Difracción de Rayos X (DRX).....	59
6 Resultados	64
6.1 Mapa de pendientes	64
6.2 Mapa de curvatura	66
6.3 Mapa morfogenético	68
6.3.1 Geoformas de Ambiente Denudacional.....	71
6.3.2 Geoformas de Ambiente Estructural	80
6.3.3 Geoformas de Ambiente Fluvial	84

6.3.4 Geoformas de ambiente antropogénico	86
6.4 Mapa de cuencas hidrológicas	87
6.5 Mapa de cobertura del suelo	91
6.6 Mapa de Favorabilidad para la Percolación.....	99
6.7 Análisis granulométrico.....	105
6.7.1 Formación Los Santos	105
6.7.2 Formación Rosa Blanca.....	108
6.7.3 Formación Paja.....	112
6.8 Análisis de difracción de rayos X (DRX)	113
7 Discusión.....	124
8 Conclusiones	126
9 Recomendaciones.....	129
Referencias.....	130

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de localización de la zona de estudio	17
Figura 2 Mapa de precipitación media total anual.....	19
Figura 3 Mapa de temperatura media anual.....	20
Figura 4 Ubicación de la zona de estudio en el Esquema de Regiones Fisiográficas de Santander	23
Figura 5 Ubicación de la zona de estudio en el Esquema Tectónico de Santander	24
Figura 6 Ubicación de la zona de estudio en el Esquema Estructural de Santander	25
Figura 7 Mapa geológico de la zona de estudio.....	27
Figura 8 Panorámica donde se observa el trazo de la falla Los Santos	32
Figura 9 Falla La Mojarra	33
Figura 10 Trazo de la Falla El Duende	34
Figura 11 Esquema de Jerarquización geomorfológica	36
Figura 12 Localización de la zona de estudio en el mapa geomorfoestructural de Colombia.....	37
Figura 13 Localización de la zona de estudio en el mapa de provincias geomorfológicas de Colombia.....	38
Figura 14 Zonificación hidrográfica de Colombia.....	41
Figura 15 Área hidrográfica Magdalena-Cauca.....	42
Figura 16 Red hidrográfica del departamento de Santander.....	43
Figura 17 Diagrama de flujo de procedimientos y métodos	44
Figura 18 Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente	46
Figura 19 Cuencas hidrográficas de la zona de estudio	48
Figura 20 Etapas del proceso de meteorización.....	55

Figura 21 Clasificación del perfil de suelo residual.....	56
Figura 22 Vibrador mecánico de tamizaje	58
Figura 23 Tamices granulométricos.....	58
Figura 24 Mapa de pendientes de la zona de estudio.....	65
Figura 25 Mapa de curvatura de la zona de estudio.....	67
Figura 26 Mapa morfogenético de la zona de estudio	70
Figura 27 Cono de talus (Dct) y escarpe de erosión mayor (Deem), ubicados al NW de la zona de estudio.....	71
Figura 28 Escarpe de erosión menor (Deeme) ubicado hacía el SE de la zona de estudio	72
Figura 29 Ladera ondulada (Dlo) ubicada en la Vereda El Espinal	73
Figura 30 Laderas erosivas (Del).....	74
Figura 31 Loma denudada de longitud larga (Dldl) localizada hacia el NE de la zona de estudio	75
Figura 32 Lomeríos muy disectados (Dlmd), ubicados hacia el SE de la zona de estudio	76
Figura 33 Lomos denudados en la Vereda El Sumidero.....	77
Figura 34 Lomo denudado moderado de longitud larga (Dldeml)	78
Figura 35 Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo)	79
Figura 36 Planicie colinada denudada (Dpcd).....	80
Figura 37 Meseta estructural (Sm) de Los Santos	81
Figura 38 Escarpe de meseta estructural (Sme) en la Mesa de Los Santos	81
Figura 39 Espolones facetados.....	82
Figura 40 Laderas estructurales de cuesta (Scle) de la Mesa de Los Santos	83
Figura 41 Ladera de contrapendiente de cuesta (Sclc)	84

Figura 42 Cauce aluvial (Fca) y barra puntual (Fbp) al SE de la zona de estudio.....	85
Figura 43 Planicie de inundación (Fpi) ubicada SE de la zona de estudio	86
Figura 44 Embalse (Aemb) localizado hacia el E del área de estudio	87
Figura 45 Mapa de cuencas hidrológicas de la zona de estudio	90
Figura 46 Mapa de cobertura del suelo de la zona de estudio	98
Figura 47 Mapa de valores de Pendientes para el mapa de favorabilidad para la percolación.....	99
Figura 48 Mapa de valores de Curvatura para el mapa de favorabilidad para la percolación	100
Figura 49 Mapa de valores de Geología para el mapa de favorabilidad para la percolación	100
Figura 50 Mapa de valores de Densidad de drenaje para el mapa de favorabilidad para la percolación.....	101
Figura 51 Mapa de valores de Cobertura del suelo para el mapa de favorabilidad para la percolación	101
Figura 52 Mapa de favorabilidad para la percolación con ponderaciones iguales para cada factor	103
Figura 53 Mapa final de favorabilidad para la percolación	104
Figura 54 Curva granulométrica correspondiente a la muestra FNS – 120 – 026 – 001 de la Formación Los Santos.....	107
Figura 55 Curva granulométrica correspondiente a la muestra JCS – 120 – 017 – 002 de la Formación Los Santos.....	108
Figura 56 Curva granulométrica correspondiente a la muestra 1 de la Formación Rosa Blanca	110
Figura 57 Curva granulométrica correspondiente a la muestra 2 de la Formación Rosa Blanca	111
Figura 58 Curva granulométrica correspondiente a la muestra de la Formación Paja	113

Figura 59 Correlación columna estratigráfica – mineralogía de arcillas, sección de la Vereda La Navarra.....	116
Figura 60 Correlación columna estratigráfica - mineralogía de arcillas, sección El Carrizal	117
Figura 61 Correlación columna estratigráfica - mineralogía de arcillas, sección La Punta	118
Figura 62 Correlación columna estratigráfica - mineralogía de arcillas, sección El Calicho.....	119
Figura 63 Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda La Navarra.....	120
Figura 64 Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda La Punta	121
Figura 65 Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda Carrizal.....	122
Figura 66 Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda El Calicho	123

Lista de tablas

Tabla 1 Rangos de pendiente	45
Tabla 2 Rangos de valores de curvatura	46
Tabla 3 Clasificación de cuencas de acuerdo con el Dd.....	49
Tabla 4 Clases de cobertura del suelo identificadas en la zona de estudio.....	50
Tabla 5 Valores de clasificación del factor geología	51
Tabla 6 Valores de clasificación del factor pendiente	52
Tabla 7 Valores de clasificación del factor cobertura del suelo	52
Tabla 8 Valores de clasificación del factor curvatura.....	53
Tabla 9 Valores de clasificación del factor densidad de drenaje	53
Tabla 10 Porcentaje asignado a los factores evaluados	54
Tabla 11 Clasificación de minerales arcillosos.....	61
Tabla 12 Espaciados relevantes para la identificación de minerales de arcilla y algunos minerales accesorios.....	62
Tabla 13 Unidades Geomorfológicas de la zona de estudio	68
Tabla 14 Valores determinados para cada microcuenca identificada.....	88
Tabla 15 Datos de peso y porcentajes de la muestra FNS – 120 – 026 – 001 analizada de la Formación Los Santos, Vereda La Navarra.....	105
Tabla 16 Datos de peso y porcentajes de la muestra JCS – 120 – 017 – 002 analizada de la Formación Los Santos, Vereda La Navarra.....	106
Tabla 17 Datos de peso y porcentajes de la muestra 1 analizada de la Formación Rosa Blanca	109
Tabla 18 Datos de peso y porcentajes de la muestra 2 (Vereda El Espinal) analizada de la Formación Rosa Blanca	109

Tabla 19 Datos de peso y porcentajes de la muestra analizada de la Formación Paja 112

Resumen

Título: Identificación de Ambientes Geomorfológicos y Elaboración de un Mapa de Favorabilidad para la Percolación de la Zona de la Mesa de Los Santos, Santander*

Autores: Margith Lizeth Moreno Sánchez**

Karolyne Dayan Silva Otálora**

Palabras clave: Morfogénesis, morfometría, percolación, suelos, municipio de Los Santos, Colombia.

Descripción:

Este informe de pasantía de investigación es un aporte de síntesis y de cartografía temática del proyecto de investigación "Estudio Integral del Agua en la Mesa de Los Santos", el cual cuenta con el respaldo del grupo de investigación en geología básica y aplicada (GIGBA). Dicho proyecto se fundamenta en el hecho que, durante años, La Mesa de Los Santos (Santander) se ha visto afectada por dificultades asociadas a la escasez de agua, por lo cual se han llevado a cabo diferentes investigaciones que, sin embargo, no han planteado una solución definitiva del problema. Por esta razón, el aporte de este proyecto es en los aspectos de morfogénesis y, en lo relacionado con la percolación del agua en el subsuelo; ofreciendo datos que permitan evaluar el funcionamiento del sistema hídrico de la zona. Para ello se generaron insumos tales como los mapas de pendientes, curvatura del terreno, cuencas hidrológicas, cobertura del suelo y unidades morfogenéticas, a partir del procesamiento y análisis de los cuales se obtuvo un mapa de favorabilidad para la percolación, con base en el cual se determina que las zonas poco inclinadas, asociadas a la meseta estructural, presentan mayor favorabilidad para la percolación, mientras que los escarpes y laderas presentan una favorabilidad baja. Así mismo, mediante la recopilación y revisión bibliográfica de estudios previos realizados en la zona, sobre granulometría y difracción de rayos X (DRX), se establecieron los tipos de minerales arcillosos más abundantes, los cuales corresponden, en primer lugar, a la illita, seguida por la caolinita.

*Trabajo de grado.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Juan Diego Colegial Gutierrez.

Abstract

Title: Identification of Geomorphological Environments and Preparation of a Favorability Map for Percolation of the Mesa de Los Santos Area, Santander*

Authors: Margith Lizeth Moreno Sánchez**

Karolyne Dayan Silva Otálora**

Key words: Morphogenesis, morphometry, percolation, soils, municipality of Los Santos, Colombia.

Description:

This research internship report is a contribution of synthesis and thematic cartography of the research project "Estudio Integral del Agua en la Mesa de Los Santos", which is supported by the research group in basic and applied geology (GIGBA). This project is based on the fact that, for years, La Mesa de Los Santos (Santander) has been affected by difficulties associated with water shortage, for which different investigations have been carried out, however, they have not provided a definitive solution to the problem. For this reason, the contribution of this project is in the aspects of morphogenesis and, in what is related to water percolation in the subsoil; offering data that allow evaluating the functioning of the hydrologic system in the area. For this purpose, inputs such as slope, terrain curvature, hydrological basins, soil cover, and morphogenetic units maps were generated, from the processing and analysis of which a percolation favorability map was obtained, based on which it is determined that the slightly sloping areas, associated with the structural plateau, present greater favorability for percolation, while the escarpments and hillsides present a low favorability. Likewise, through the compilation and bibliographic review of previous studies carried out in the area, on granulometry and X-ray diffraction (XRD), the most abundant types of clay minerals were established, which correspond, in the first place, to illite, followed by kaolinite.

*Bachelor Thesis.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Juan Diego Colegial Gutierrez.

Introducción

El sector de la Mesa de Los Santos, en Santander, ha sido históricamente aquejado por problemas de desabastecimiento de agua potable, hasta el momento, no se ha encontrado una solución definitiva para garantizar la disponibilidad de este recurso. Las principales causas que han ocasionado la deficiencia en la cobertura y el abastecimiento del servicio público de agua en la zona son: en primer lugar, las causas ambientales, concretamente, los limitantes geográficos que no permiten acceder eficientemente a las fuentes hídricas superficiales, en segundo lugar, las deficiencias técnicas de infraestructura en la red de distribución local, en tercer lugar, la ineficiencia de las administraciones municipales en la gestión integral del recurso hídrico (Cárdenas, L., 2019), y finalmente, las causas antrópicas del déficit hídrico, por ejemplo, el desperdicio del agua y la no conservación de los ecosistemas locales (Noticias Caracol, 2018).

Dadas las problemáticas relacionadas con la escasez de agua potable en el sector de la Mesa de Los Santos, surge la necesidad de estimar la disponibilidad de este recurso, a partir de lo cual nace el proyecto denominado “Estudio Integral del Agua en la Mesa de Los Santos”, cuyo objetivo es analizar el funcionamiento del sistema hídrico, y evaluar la vulnerabilidad intrínseca y el uso histórico del agua como herramienta para la gestión integral del recurso, abarcando diferentes aspectos del conocimiento geológico, geográfico y sociológico.

Con base en lo previamente comentado, se da pie para la realización de la pasantía de investigación, cuyos resultados son presentados en este informe con el fin de identificar ambientes geomorfológicos y determinar las zonas que permitan la percolación del agua. Cabe anotar que, debido a la emergencia sanitaria a causa de la pandemia, la modalidad de trabajo de grado inicialmente fue de investigación, estatus que tuvo que ser cambiado a pasantía de investigación, debido a las restricciones para la realización de actividades de campo.

Como resultado, se presentan aportes al conocimiento en materia de geomorfología, suelos e hidrología, mediante la entrega de mapas temáticos correspondientes a unidades morfogénicas, pendientes, curvatura de la superficie, cobertura del suelo y microcuencas; los cuales servirán como insumos para la generación del mapa final de favorabilidad para la percolación del agua en la zona.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Identificar ambientes geomorfológicos y determinar las zonas más idóneas que permitan la percolación del agua mediante la elaboración de un mapa de favorabilidad en la Mesa de Los Santos, Santander.

1.2 Objetivos específicos

- Elaborar un mapa morfogenético a escala 1:25.000, por medio de la cartografía fotogeológica y el análisis de modelos digitales de elevación e imágenes satelitales, donde se representen las unidades geomorfológicas según su origen.
- Determinar la capacidad de drenaje del terreno, a través de la delimitación de las microcuencas hidrográficas del área de estudio y el análisis de la distribución de la red de drenaje a nivel local, estableciendo índices de densidad de drenaje por cada microcuenca.
- Establecer los sectores más idóneos para la percolación del agua mediante la elaboración de un mapa de favorabilidad construido a partir del análisis de diferentes factores (geología, geomorfología, pendientes, curvatura, cobertura del suelo, densidad de drenajes).
- Describir las propiedades mecánicas (granulometría, permeabilidad, etc.) de los perfiles de meteorización de las unidades litológicas aflorantes, mediante la revisión bibliográfica de investigaciones anteriores realizadas en la zona.
- Identificar la mineralogía de la fracción arcillosa presente en los suelos, mediante la revisión bibliográfica de ensayos de difracción de rayos X (DRX) realizados en la zona previamente, con el fin de asociar dicha composición con sus propiedades químicas y estructurales.

2 Localización

La zona de estudio, que comprende un área de aproximadamente 416 km², se encuentra ubicada alrededor del municipio de Los Santos (**Figura 1;Error! No se le ha dado un nombre al marcador.**), en el sector conocido como La Mesa de Los Santos, al oriente del departamento de Santander, a 62 kilómetros de la ciudad de Bucaramanga. Este municipio pertenece a la Provincia de Soto y está conformado por 15 veredas. Limita al norte con los municipios de Girón y Piedecuesta, al sur con Jordán y Villanueva, al oriente con el municipio de Aratoca y al occidente con Zapatoca.

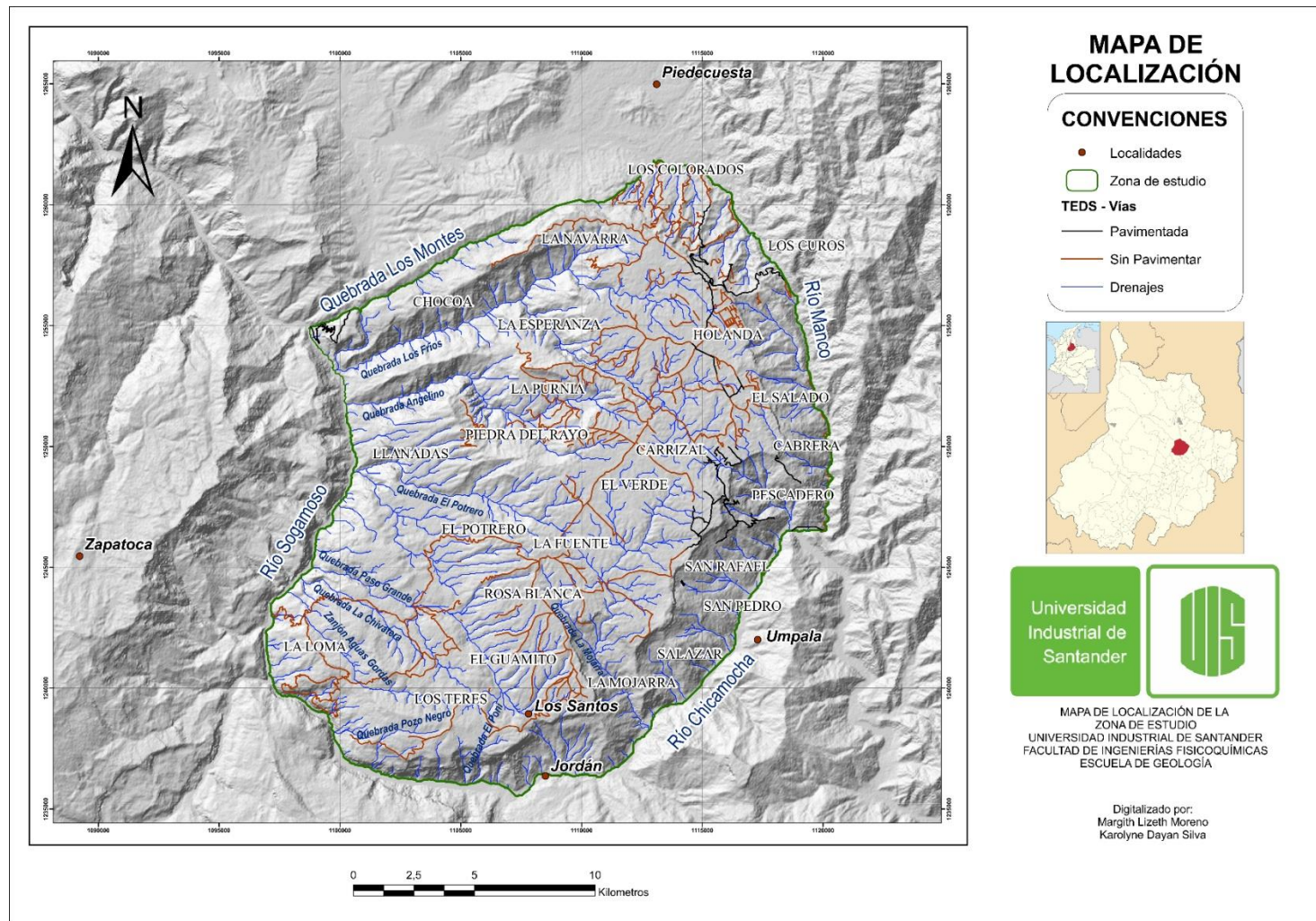
2.1 Climatología

El departamento de Santander presenta diversos climas determinados por varios factores TALES como el relieve, la altitud, la temperatura y la precipitación, los cuales son condicionantes para la génesis de suelos y la cobertura vegetal del terreno.

La zona de estudio, la cual se encuentra localizada hacia el oriente del departamento, presenta altitudes que oscilan desde los 300 hasta los 1827 m.s.n.m. Su precipitación media anual (**Figura 2;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se encuentra en el rango de los 1000-1500 mm, y su temperatura media anual (**Figura 3**) varía entre los 20 y 26 °C.

Figura 1

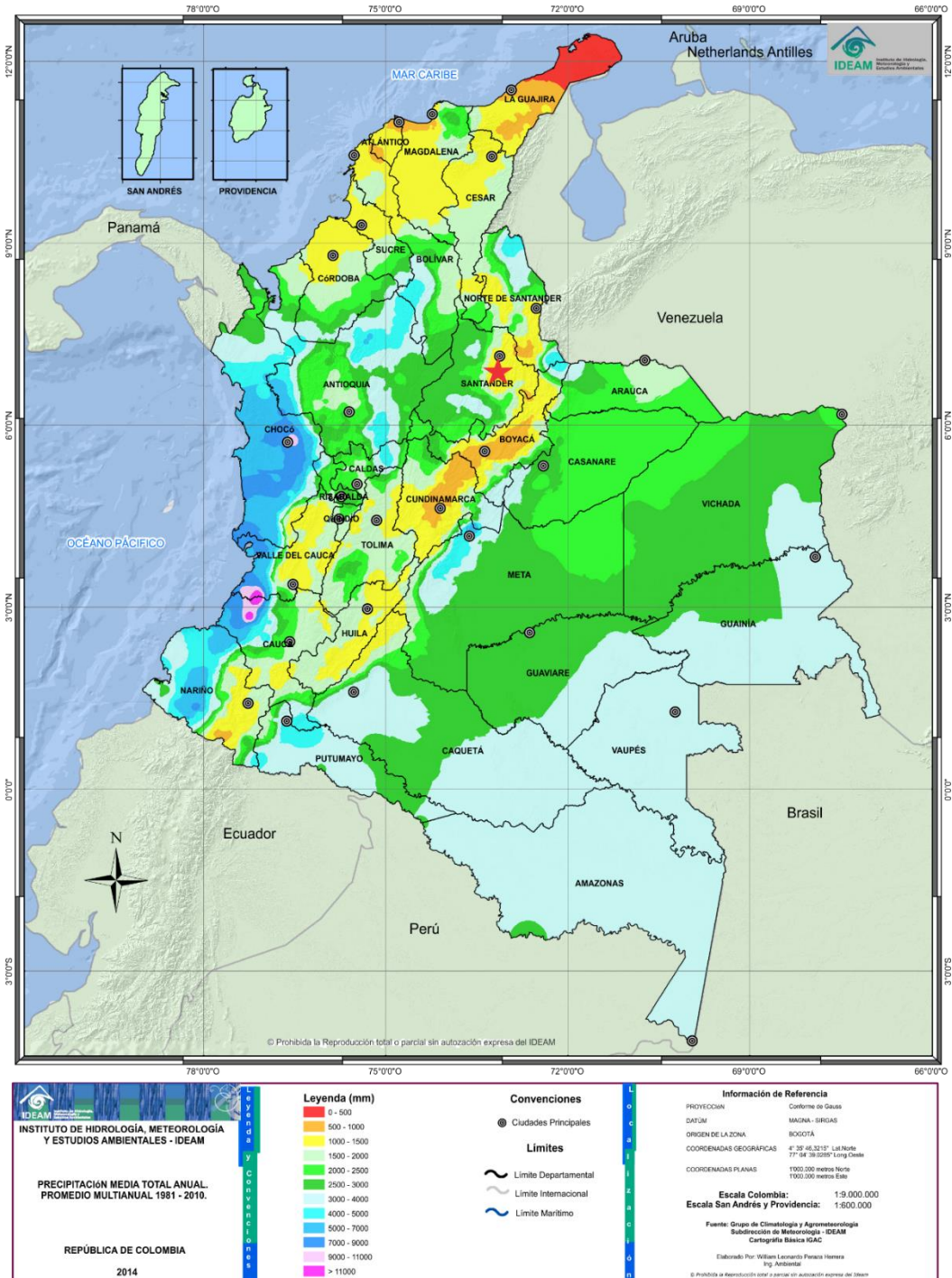
Mapa de localización de la zona de estudio



De acuerdo con el Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Los Santos (2003), la precipitación varía entre los 950 milímetros anuales en la parte sur occidente y mayores a 1.000 milímetros en la parte centro y norte del municipio, disminuyendo ligera y paulatinamente desde el noreste hacia la hoya del río Chicamocha. La distribución de las lluvias a lo largo del año presenta dos temporadas lluviosas y dos secas, con características muy similares al resto de la región Andina colombiana. De igual manera, debido a la variación y heterogeneidad del relieve del municipio las temperaturas medias anuales oscilan entre los 28°C a los 200 m.s.n.m. y los 20°C a los 1.530 m.s.n.m. La temperatura media anual de la cabecera municipal es de 21.3 °C considerando el gradiente medio anual de la temperatura en la zona que es de 0.60°C por cada 100 metros.

Figura 2

Mapa de precipitación media total anual

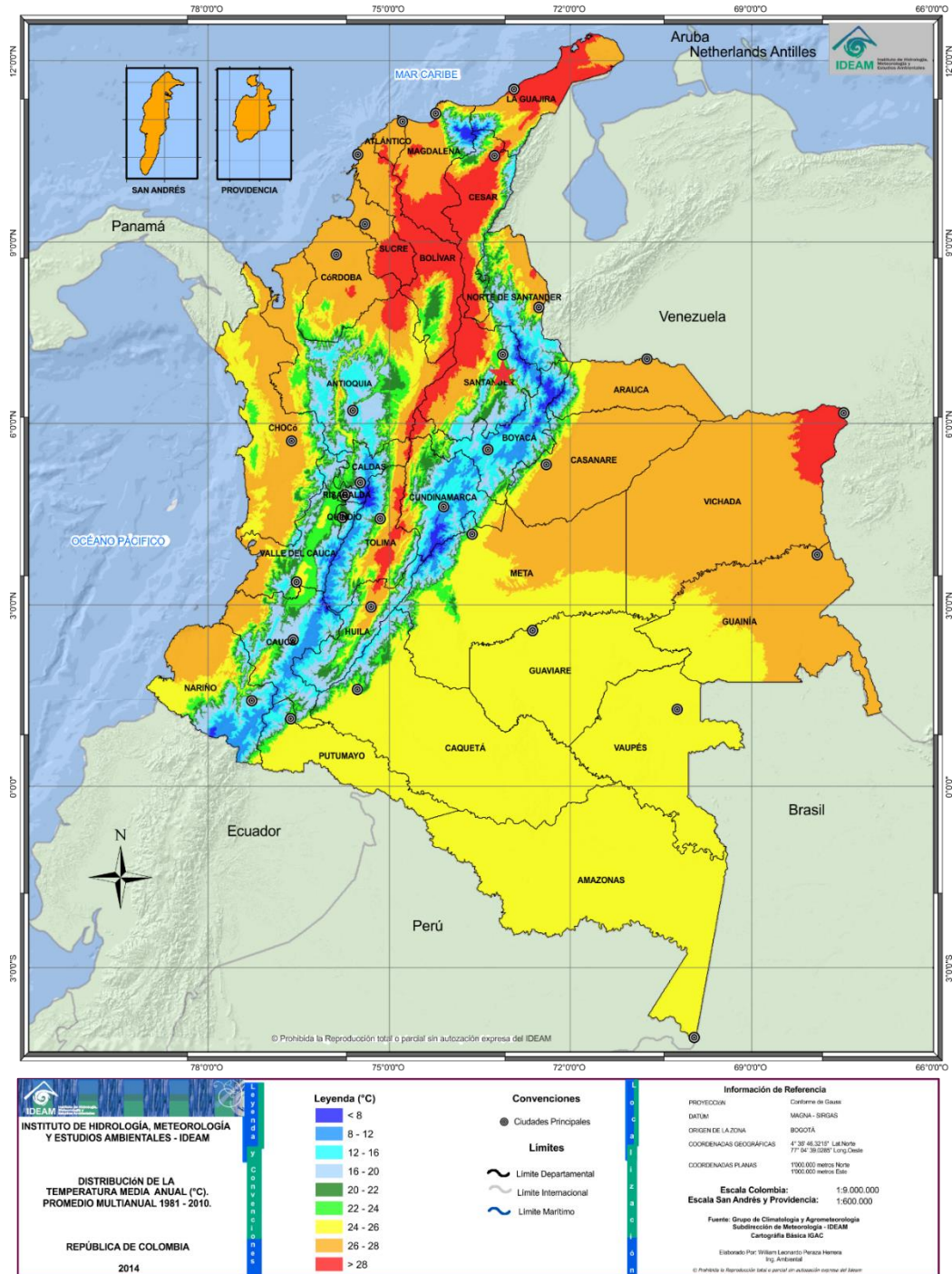


★ Localización de la zona de estudio.

Nota: Adaptado de IDEAM (2014).

Figura 3

Mapa de temperatura media anual



★ Localización de la zona de estudio.

Nota: Adaptado de IDEAM (2014).

3 Marco Geológico y Geomorfológico

El departamento de Santander está representado por dos grandes regiones naturales que son la Cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena (VMM). Si bien es considerado uno de los departamentos más montañosos del país, su relieve presenta contrastes fuertemente marcados (**Figura 4; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); por un lado, se encuentra la Cordillera Oriental, que abarca gran parte del departamento, donde el relieve es montañoso con pendientes escarpadas a moderadas y por el otro, hacia la región occidental, predominan topografías suaves y onduladas. (Royero y Clavijo, 2001).

Además de presentar una configuración geológica compleja, Santander es considerado tectónicamente dinámico. De acuerdo con el esquema tectónico de Santander presentado en la memoria del Mapa Geológico de Santander (Royero y Clavijo, 2001), definen tres provincias a saber (**Figura 5; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**): Provincia Macizo de Santander, conformada por cuatro bloques, caracterizada por bloques levantados con núcleos de rocas cristalinas antiguos; Provincia Cordillera Oriental, en general caracterizada por “pliegues anticlinales y sinclinales amplios, limitados por fallas inversas y de cabalgamiento de direcciones NE y NW con inclinación al oriente”, en esta Provincia se distinguen dos bloques, uno central (el más extenso) y uno oriental; en la parte nororiental del bloque central, se localiza el área de estudio, está conformado por rocas de edades jurásicas y cretácicas y muy cerca del límite tectónico con la Provincia Macizo de Santander, que corresponde con la falla de Bucaramanga (**Figura 6; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); y finalmente, la Provincia Magdalena Medio.

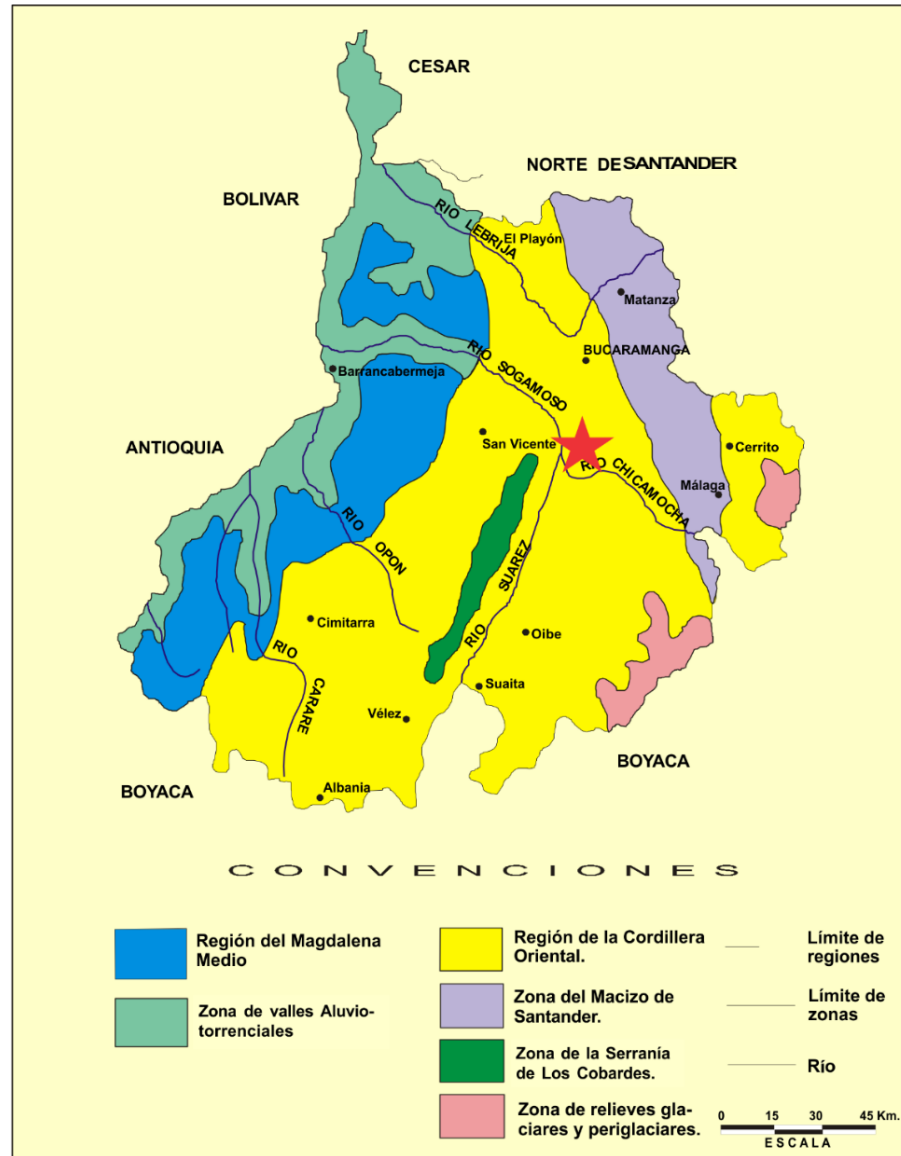
La zona de estudio, ubicada entre la zona fisiográfica de colinas y vertientes medias de la parte occidental de la cordillera oriental, “Región de Mesas y Cuestas” de Julivert et al., (1964), en cercanías de la ciudad de Bucaramanga, se caracteriza por constituir bloques basculados, con

presencia de un nivel rocoso resistente que da morfología de mesa con pendientes suaves y colinas pequeñas hacía la parte central, y laderas con pendientes moderadas a altas hacía los bordes.

Las unidades geológicas que se encuentran en esta región, como se observa en la **Figura 7;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, comprenden rocas del Paleozoico con metamorfismo de grado bajo - medio (Esquistos del Silgará), cuerpos ígneos intrusivos del Jurásico (Granito de Pescadero), rocas sedimentarias del Jurásico (Formaciones Girón y Jordán) y del Cretácico Inferior (Formaciones Los Santos, Rosa Blanca, Paja y Tablazo), y depósitos cuaternarios. Estructuralmente, la Mesa de Los Santos, se encuentra limitada por la Fallas del Suárez al Oeste, la Falla de Bucaramanga al Este, y la Falla Los Montes al Norte.

Figura 4

Ubicación de la zona de estudio en el Esquema de Regiones Fisiográficas de Santander

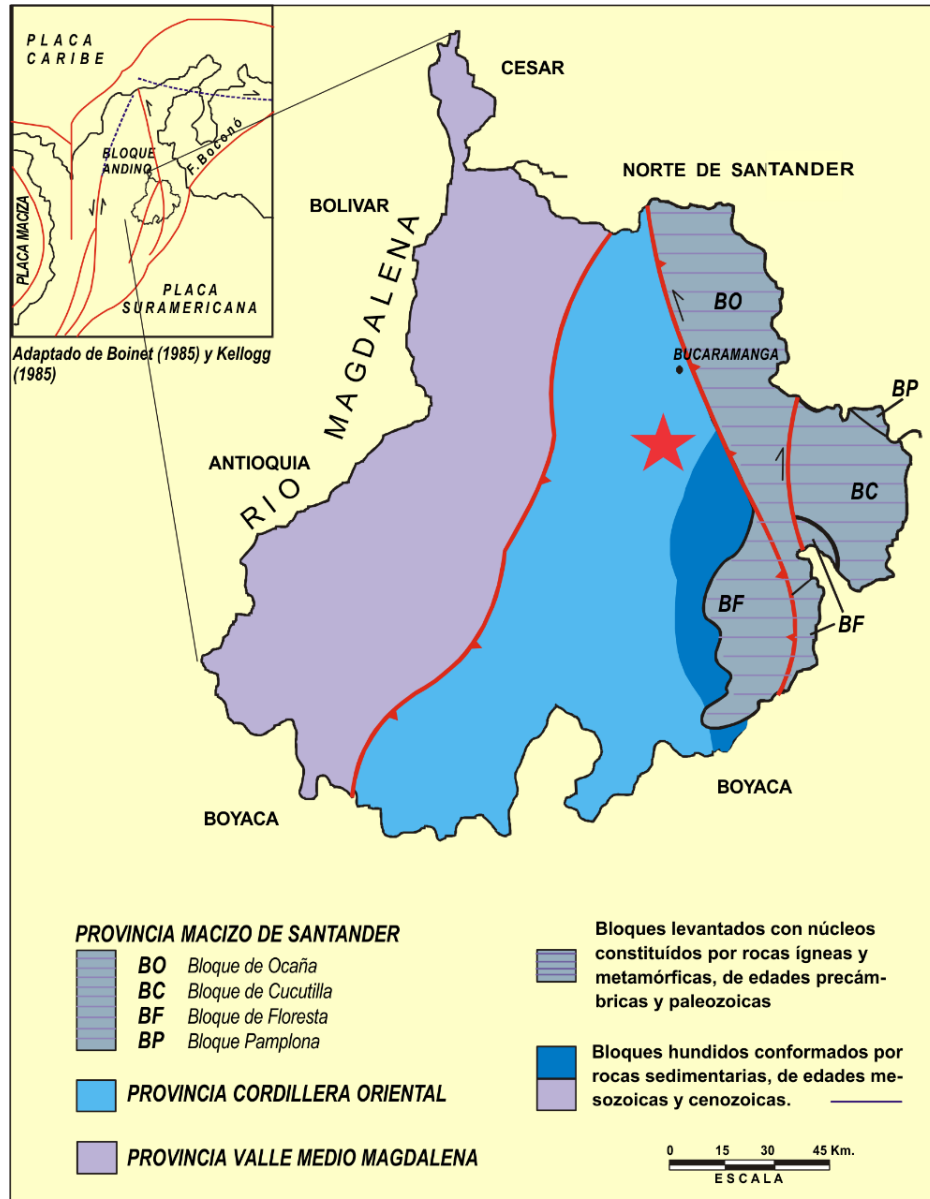


★ Localización de la zona de estudio.

Nota: Tomado y adaptado de Royero y Clavijo (2001).

Figura 5

Ubicación de la zona de estudio en el Esquema Tectónico de Santander

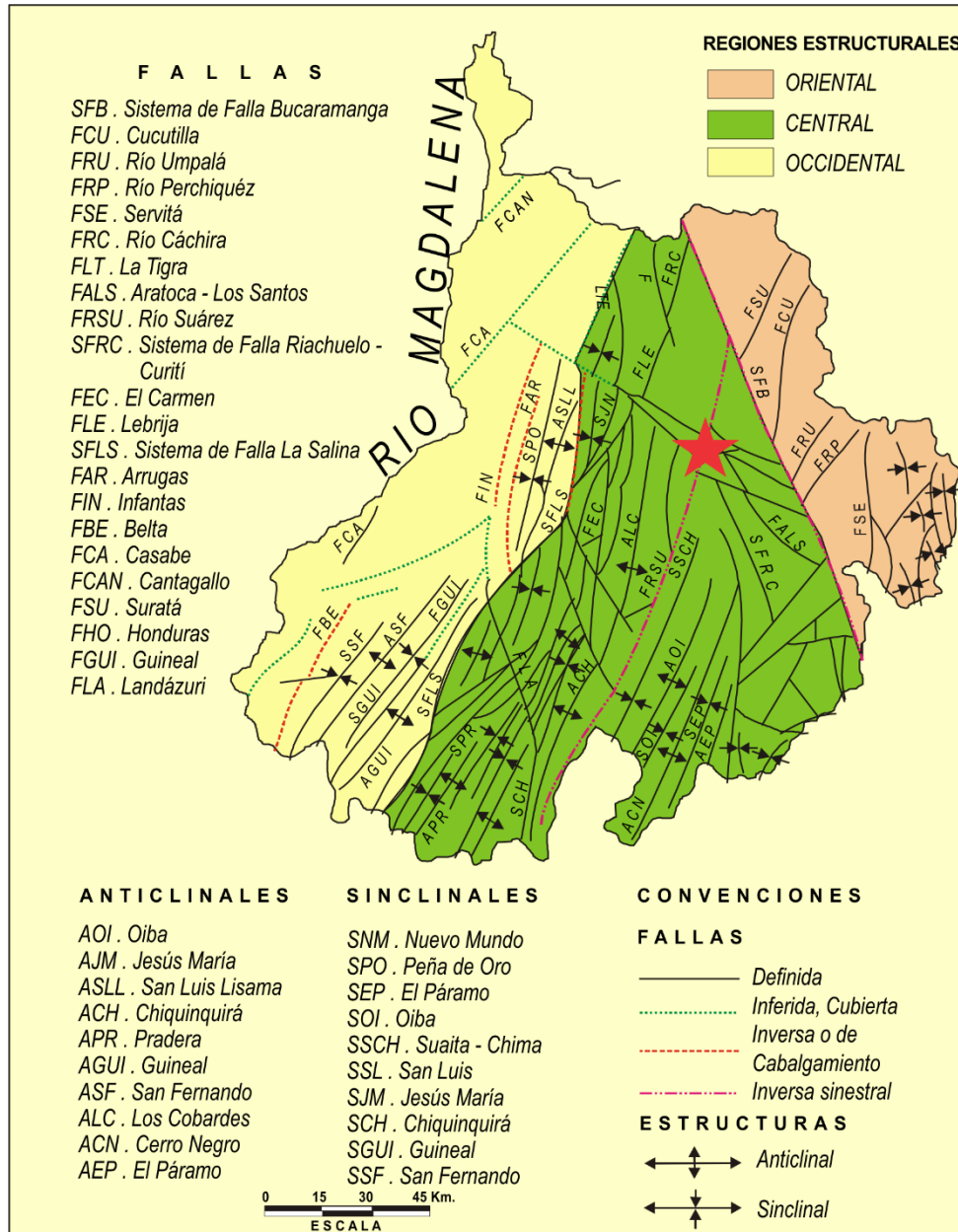


★ Localización de la zona de estudio.

Nota: Tomado y adaptado de Royero y Clavijo (2001).

Figura 6

Ubicación de la zona de estudio en el Esquema Estructural de Santander



★ Localización de la zona de estudio.

Nota: Tomado y adaptado de Royero y Clavijo (2001).

3.1 Geología

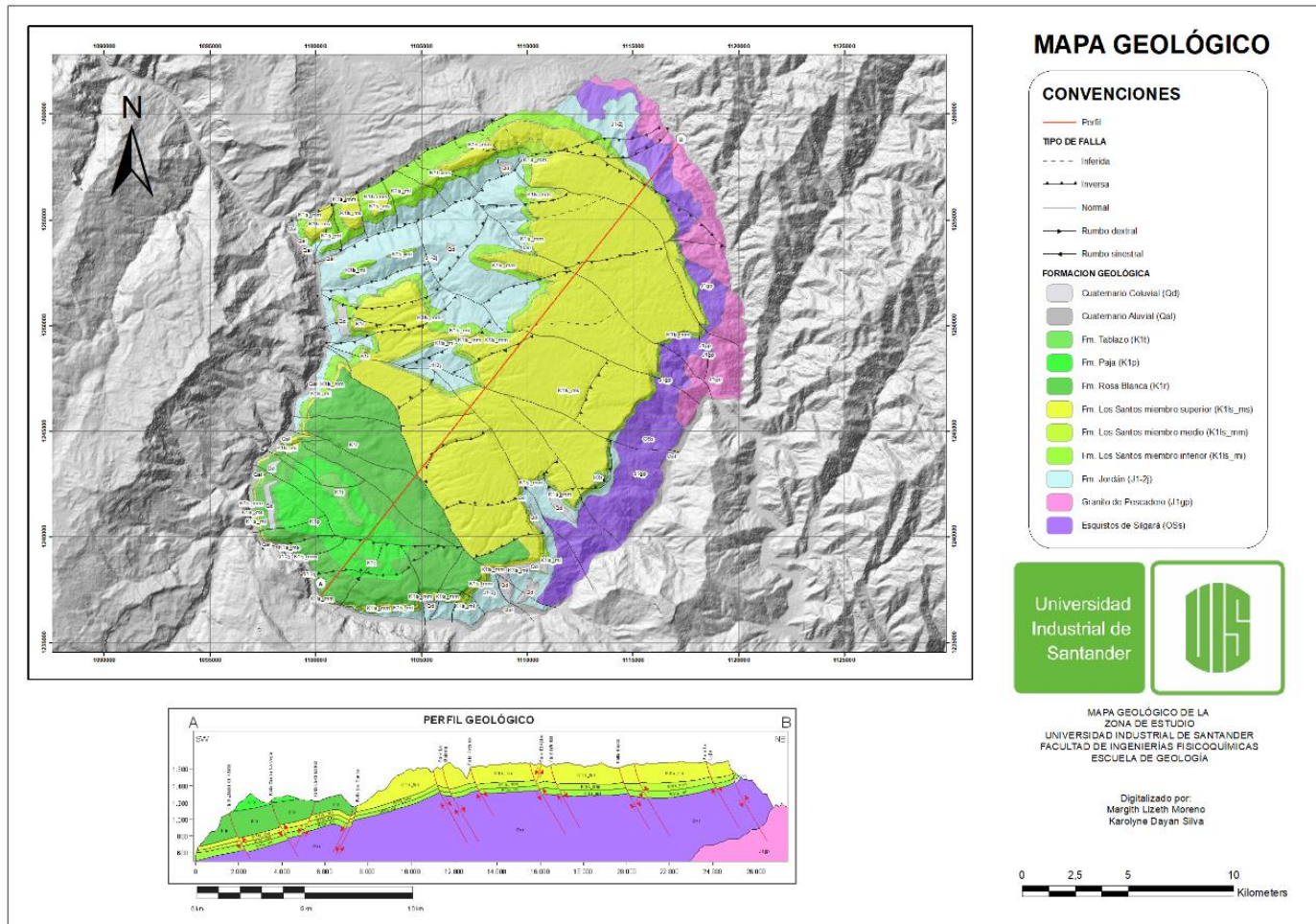
La estratigrafía de la zona está constituida por rocas metamórficas del Paleozoico, cuerpos ígneos intrusivos del Jurásico, rocas sedimentarias del Jurásico y del Cretácico Inferior, y depósitos cuaternarios (**Figura 7;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), que se describen a continuación:

3.1.1 Paleozoico.

Esquistos del Silgará: Secuencia de rocas clásticas metamorizadas de estratificación delgada, constituida por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita. De acuerdo con algunas relaciones estratigráficas, diferencias composicionales y datos estructurales, la Formación Silgará suprayace al Complejo Bucaramanga e infrayace discordantemente a las formaciones El Tibet y Floresta del Devónico (Royero y Clavijo, 2001). Esta unidad, de acuerdo con Díaz, et al. (2009), presenta una porosidad primaria baja y bajo grado de fracturamiento, con una porosidad total de 8 a 10% y una porosidad efectiva del 5%, asociada a los planos de esquistosidad. A la Formación Silgará le han asignado tentativamente una edad del Cámbrico al Ordovícico (Ward, et al. 1973).

Figura 7

Mapa geológico de la zona de estudio



Nota: Cartografía geológica adaptada de INGEOMINAS (2009).

3.1.2 *Jurásico.*

Granito de Pescadero: Corresponde a rocas ígneas de textura porfirítica a fanerítica, de carácter intrusivo con la formación Silgará, algunos diques de grano muy grueso tipo pegmatita y otros de grano muy fino de tipo riolita, de color rosado, compuesto de feldespatos potásicos, cuarzo y biotita; la pegmatita contiene moscovita en láminas grandes. Estas rocas hacen parte del grupo plutónico de Santander y constituyen el basamento ígneo de la Mesa de los Santos. Su edad se estima de 193 ± 6 m.a., de acuerdo con mediciones radiométricas. (Royero y Clavijo, 2001). Esta unidad puede ser dividida en dos zonas según su porosidad; la primera, ubicada hacia el NE del área de estudio, donde se observa alta densidad de fracturas asociadas a procesos tectónicos; y la segunda, ubicada al SE del área, donde la porosidad secundaria es baja (Díaz, et al. 2009).

Formación Jordán: De acuerdo con Royero y Clavijo (2001), está constituida por areniscas gris verdosas, de grano grueso a ligeramente conglomerática, con estratificación cruzada; intercalados se presentan niveles de arcillolitas gris verdosas. En la parte superior se encuentran intercalaciones de limolitas, color marrón rojizo a rojo grisáceo, y areniscas de grano fino en capas medianas. También existen dos capas delgadas de tobas soldadas félsicas. El ambiente de depósito se interpreta como continental vulcanoclástico. La Formación Jordán infrayace en discontinuidad estratigráfica a las formaciones Girón y Los Santos; suprayace concordantemente a la Formación Bocas. Por sus relaciones estratigráficas, se considera de edad Jurásico inferior y medio.

3.1.3 *Cretácico.*

Formación Los Santos: Esta formación se compone de areniscas conglomeráticas, lodolitas rojas-grisáceas y cuarzoareniscas grises amarillentas, con estratificación cruzada en capas tabulares de espesores variables. Suprayace a la formación Girón en discontinuidad estratigráfica, e infrayace concordantemente a la formación Cumbre. A esta formación se le asigna una edad del Berriasiano. (Royero y Clavijo, 2001).

Formación Rosa Blanca: Según Royero y Clavijo (2001), esta unidad está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso, con oolitos, ostrácodos y dolomías; hacia el tope consta de areniscas y lodolitas calcáreas. Hacia la base se le asocia un ambiente con hipersalinidad y tranquilidad en las condiciones de deposición, mientras que al resto de la secuencia se le asocia un medio marino somero en condiciones neríticas. Su contacto es concordante con la suprayacente formación Paja. A esta unidad se le asigna una edad entre el Valanginiano y el Hauteriviano Inferior.

Formación Paja: Esta unidad consta de lutitas y shales gris oscuros a azulosos, fosilíferos con intercalaciones de areniscas gris amarillentas de grano fino, con algunas intercalaciones de shales grises, localmente arenosos, calcáreos, fosilíferos, localmente limosos a arenosos, también con pequeñas intercalaciones de calizas grises, localmente arenosas, fosilíferas. Se asocia con un ambiente de sedimentación de tipo epicontinental. Infrayace concordantemente a la formación Tablazo y es considerada de edad Barremiano Inferior-Aptiano Inferior. (Royero y Clavijo, 2001).

Formación Tablazo: Con base en lo planteado por Royero y Clavijo (2001), esta unidad consiste en una secuencia de calizas gris a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas,

en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de areniscas grises de grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas en capas delgadas. Su ambiente de sedimentación se asocia con condiciones neríticas, poco profundas. Su edad es considerada del Aptiano Superior-Albiano Inferior.

3.1.4 Cuaternario.

Depósitos Aluviales: Los depósitos aluviales, constituidos por limos de la Formación Jordán con cantos y bloques principalmente de la Formación Los Santos, se presentan como terrazas de origen hidrogravitacional a lo largo de los ríos Chicamocha y Sogamoso (Díaz, et al. 2009).

Depósitos Coluviales: Los depósitos de derrubios, constituidos por cantos y bloques principalmente de la Formación Los Santos y depositados sobre limos de la Formación Jordán, se encuentran hacia los escarpes de la Mesa de Los Santos. Estos depósitos tienen extensión reducida y presentan baja permeabilidad (Díaz, et al. 2009).

3.2 Marco estructural regional

Como se mencionó en el Marco Geológico y Geomorfológico, donde se presentó el esquema tectónico de Santander, en la provincia central se encuentra la región de Mesas y Cuestas, hacia el norte de la cual se localiza La Mesa de Los Santos que, de acuerdo con Julivert et al. (1964), presenta una tectónica de fallas y flexiones que genera diferentes bloques basculados; esta unidad morfoestructural presenta múltiples estructuras frágiles y algunas de origen dúctil que controlan

parcialmente los procesos exógenos de la corteza, los cuales han modificado el relieve modelando geoformas características asociadas con los procesos estructurales que se dan en la región.

La falla de Bucaramanga y la falla del Suárez son los rasgos tectónicos más destacados de la zona de estudio, puesto que controlan la dinámica de la región que se manifiesta en la elevación del Macizo de Santander, ubicado al E de la falla de Bucaramanga, y el hundimiento del terreno hacia el W de la misma.

De igual manera, en este sector se encuentran otras fallas menores cuya influencia es más local. A continuación, se resumen las características de las principales fallas relacionadas con el área de estudio con base en diferentes autores:

Falla de Bucaramanga: Es el rasgo estructural más evidente y de gran extensión en la región, presenta una dirección aproximada N20°W y es considerado un sistema de fallas de rumbo con movimiento sinistral; tiene una componente vertical importante que hace que en algunos sectores se comporte como falla inversa, y en su extremo meridional, de cabalgamiento (Royero y Clavijo, 2001).

Falla del Suárez: Esta falla se extiende por aproximadamente 120 [km], su trazo tiene una dirección N20°E y N25°E con inclinación al W y sigue el trazo del río Suárez y el río de Oro. Es considerada una falla inversa de alto ángulo con una componente vertical importante (Royero y Clavijo, 2001).

Falla de Los Montes: Presenta una orientación predominante NE-SW; su trazo sigue el curso de la quebrada Los Montes. Es considerada una falla inversa con buzamiento al noroccidente. Pone en contacto rocas de edad Jurásico correspondientes a la Fm. Girón con rocas del Cretácico.

Falla de Los Santos: Estructura inversa de alto ángulo, con componente sinistral, dirección NW-SE. Se encuentra limitando y representado el cabalgamiento de la formación Los Santos sobre la formación Rosa Blanca. La falla controla el cauce de la quebrada la Santera (Gómez y Cuervo, 2012). (**Figura 8;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 8

Panorámica donde se observa el trazo de la falla Los Santos



Nota: Panorámica del trazo de la falla Los Santos, ubicada al sur del casco urbano del Municipio de Los Santos.

Imagen tomada de INGEOMINAS (2007). Los trazos en la imagen no fueron modificados.

Falla La Mojarra: Es una estructura con componente dextral, controla el cauce de la Quebrada La Mojarra desde su nacimiento hasta el río Chicamocha (**Figura 9;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Tiene una extensión de aproximadamente 9 [km] y se caracteriza por

definir claramente un desplazamiento vertical de las rocas; enfrenta rocas de la base de la Fm. Los Santos con rocas del miembro superior de la misma (INGEOMINAS, 2007).

Figura 9

Falla La Mojarra



Nota: Trazo de la falla La Mojarra. Imagen tomada de INGEOMINAS (2007).

Falla El Duende: Se ubica al E de la falla Los Santos y sigue el curso de la Quebrada Los Fríos (**Figura 10; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El trazo de esta falla se define de acuerdo con criterios geomorfológicos asociados con la saliente de los cerros con litología de las formaciones Los Santos y Jordán, y el cambio en las direcciones de las quebradas (INGEOMINAS, 2007).

Figura 10*Trazo de la Falla El Duende*

Nota: Imagen tomada de INGEOMINAS (2007).

3.3 Geomorfología

La geomorfología, según Carvajal, J. (2012), es la ciencia que trata la descripción y estudio de la génesis, clasificación, procesos y evolución de las formas antiguas y actuales del terreno, y su relación con las estructuras infrayacentes; por lo tanto, es una herramienta fundamental para evaluar y proyectar el comportamiento de los terrenos y su interrelación con las obras de infraestructura.

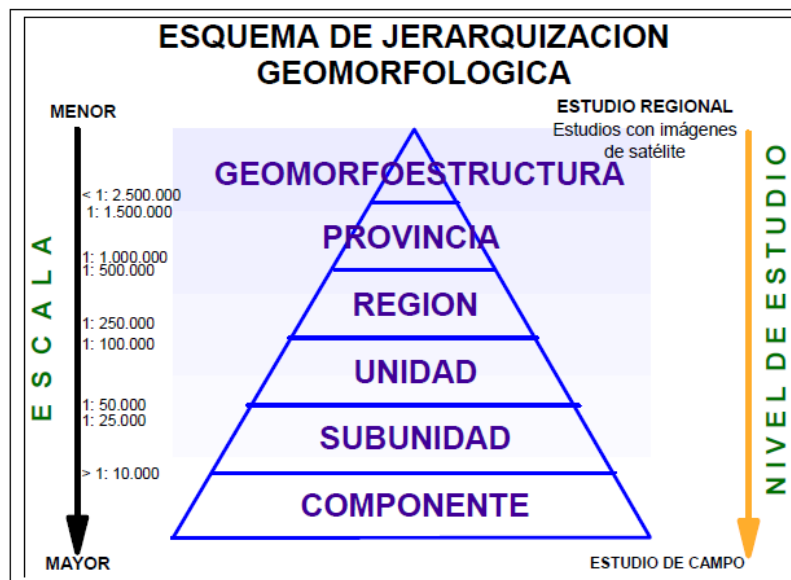
Las geoformas, por definición, son la expresión superficial del terreno, y dependen de los materiales que las constituyen y su disposición estructural, de los procesos que interactúan según el ambiente específico donde se desarrollan, y del tiempo de duración de estos (Carvajal, J. 2012). Lo anterior, permite establecer la siguiente premisa:

$$\text{Geoformas o Paisaje} = \text{Materiales (Litología + Estructuras)} + \text{Procesos} + \text{Tiempo}$$

La cartografía geomorfológica tiene como objetivo proveer información concisa sobre las formas del terreno, su origen, los procesos naturales que han ocurrido y los fenómenos naturales activos (Carvajal, H., et al. 2004). Por esta razón, los mapas geomorfológicos son herramientas que facilitan el estudio del comportamiento de los terrenos en diferentes aplicaciones tales como evaluar posibles amenazas naturales, elaborar Planes de Ordenamiento Territorial, considerar el desarrollo de obras de infraestructura, y establecer zonificaciones geomecánicas, entre otras. (Carvajal, H., et al. 2004).

El ambiente morfogenético, de acuerdo con lo planteado por Carvajal, J. (2012), alude a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas en las cuales se generaron las geoformas. Se determina con base en la interpretación de los procesos geomorfológicos registrados (origen tanto endógeno como exógeno), que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de éstas. Se agrupan de manera general en: Ambiente estructural, volcánico, denudacional, fluvial y lagunar, marino y costero, glacial y periglacial, eólico, kárstico y antropogénico.

Dado que las geoformas están relacionadas con sus procesos genéticos y con la escala a la cual se realiza la cartografía, se requiere establecer una jerarquía geomorfológica (**Figura 11; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), la cual en este caso es tomada como referencia de lo referido por Carvajal, H., et al. (2004).

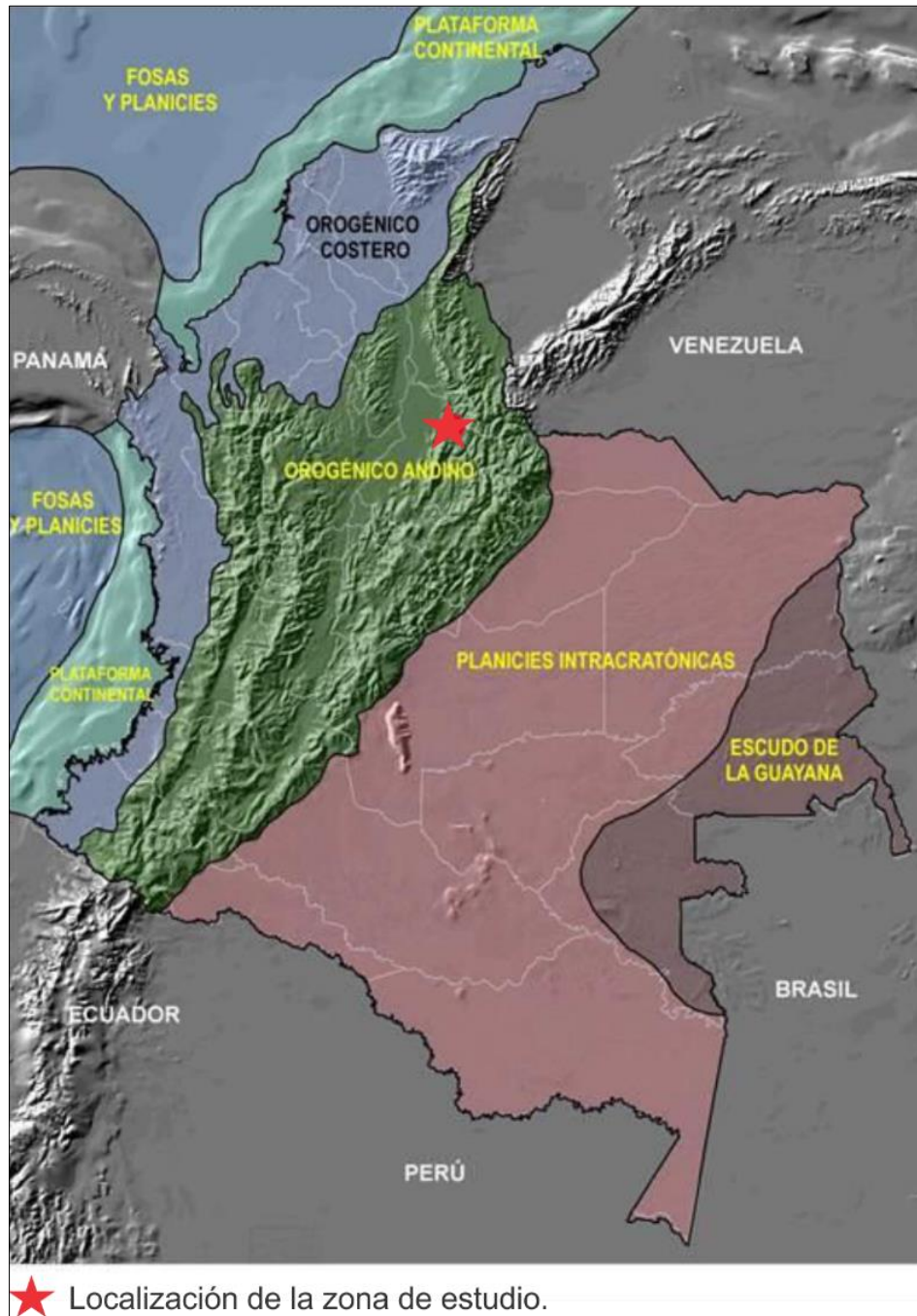
Figura 11*Esquema de Jerarquización geomorfológica*

Nota: Esquema de Jerarquización geomorfológica propuesta por Carvajal, H., et al. (2004).

La zona de estudio, ubicada en el departamento de Santander, hace parte de la región orogénica andina (**Figura 12; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y pertenece a la Provincia Geomorfológica de la Cordillera Oriental (**Figura 13**), la cual se caracteriza por un relieve variable, abarcando diversas geformas desde mesetas estructurales hasta escarpes de erosión muy marcados. De acuerdo con Flórez (2003), los procesos morfogenéticos que dieron origen a este tipo de geformas residuales, como cerros, mesas y serranías, están asociados al levantamiento de formaciones sedimentarias, no plegadas, que se encontraban en depresiones interandinas como el Valle del Magdalena, y que actualmente están afectadas por procesos de disección.

Figura 12

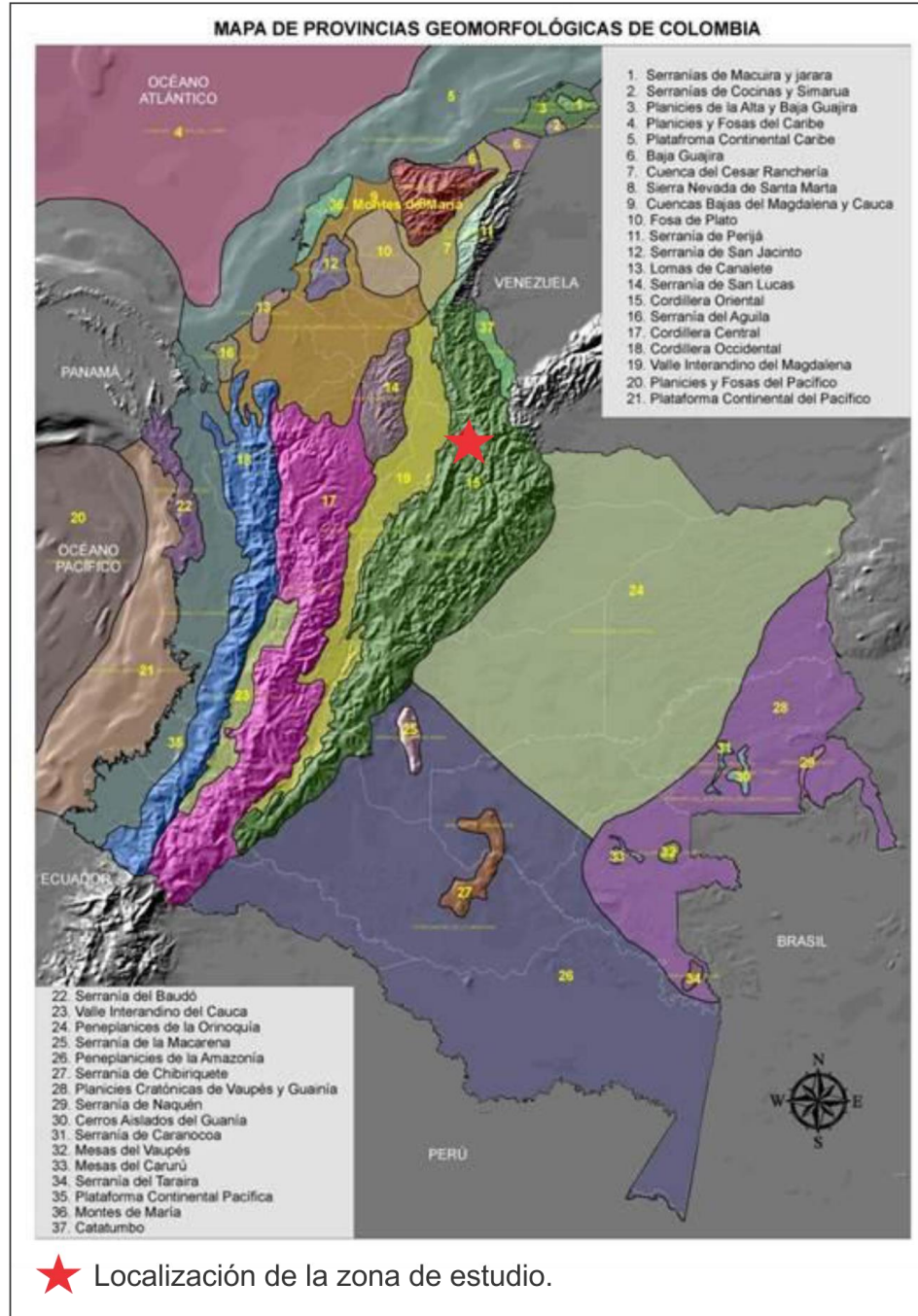
Localización de la zona de estudio en el mapa geomorfoestructural de Colombia



Nota: Tomado y adaptado de Mendivelso (2009).

Figura 13

Localización de la zona de estudio en el mapa de provincias geomorfológicas de Colombia



Nota: Tomado y adaptado de Mendivelso (2009).

4 Área, Zona y Subzona Hidrográfica

Colombia, de acuerdo con la zonificación y codificación hidrográfica se subdivide en 5 áreas hidrográficas (**Figura 14;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), las cuales contienen 40 zonas hidrográficas y en estas a su vez se identifican 311 subzonas hidrográficas. Esta zonificación permite identificar y definir los límites para el modelamiento de escenarios de estado y dinámica de los recursos hídricos, facilita los estudios y cálculos de la disponibilidad, oferta y demanda del recurso, y orienta el diseño de la red de monitoreo nacional de la calidad y cantidad de agua tanto subterránea como superficial (IDEAM, 2013).

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro del área hidrográfica Magdalena-Cauca (**Figura 15**), dentro de la cual hace parte la zona hidrográfica Sogamoso, más específicamente de la subzona hidrográfica del Río Sogamoso.

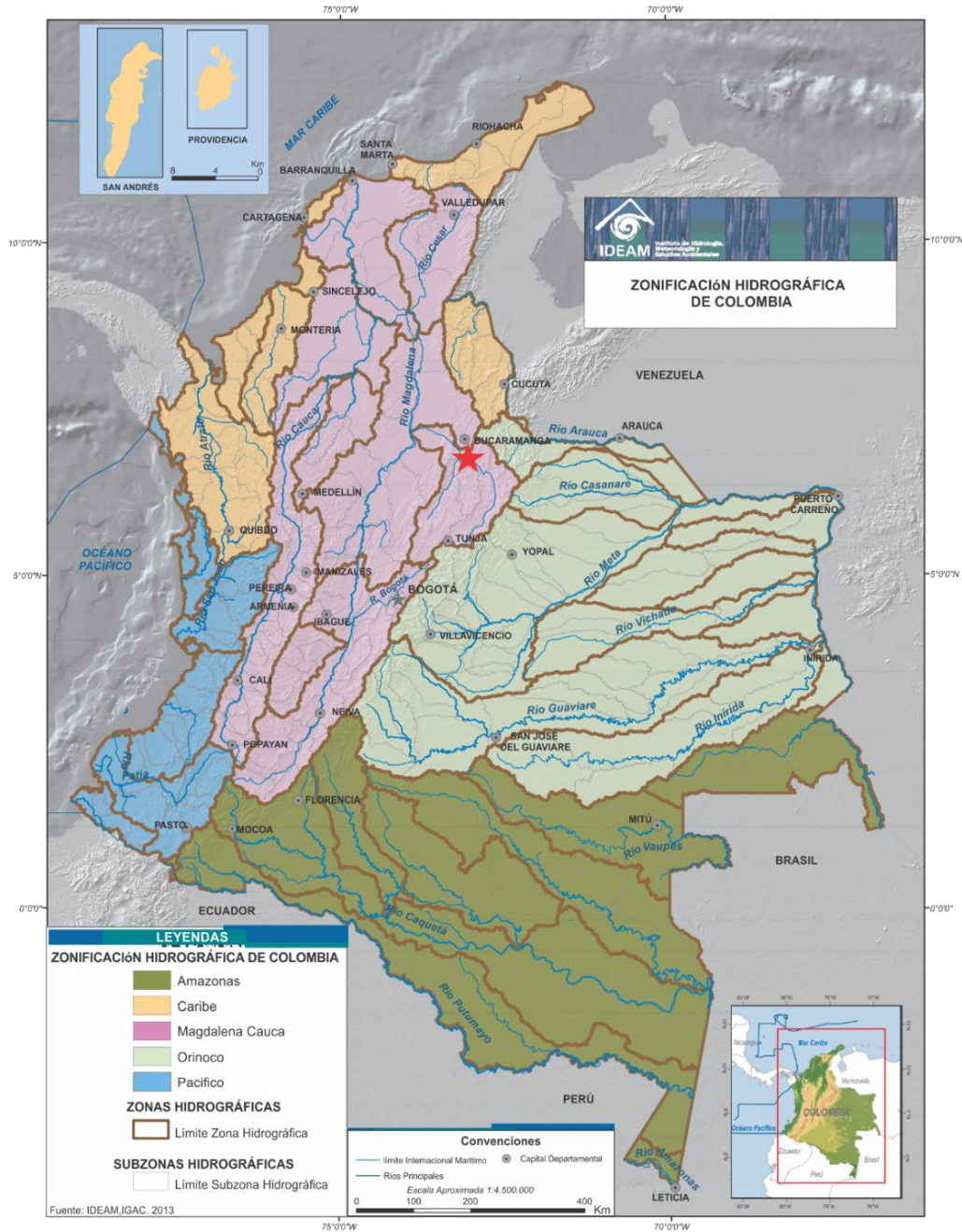
Ahora bien, de acuerdo con el Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Los Santos (2003), los principales cauces que hacen parte de la red hidrográfica de la zona de estudio son el río Chicamocha y el río Sogamoso (**Figura 16;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), los cuales son complementados por afluentes menores que se precipitan por los flancos de la meseta estructural y, debido a la escasa vegetación, han modelado parte de la topografía del sector creando incisiones profundas en ellos.

El río Sogamoso, nace de la confluencia de los ríos Chicamocha y Suárez en el sector de Las Juntas, cerca de los municipios de Villa Nueva, Los Santos y Zapatoca, a una altura de aproximadamente 300 m.s.n.m., y constituye uno de los principales afluentes del río Magdalena. Entre los cauces menores que drenan hacia este río se destacan las quebradas Los Fríos, Los Angelinos, Del Potrero, Santera, Chivatera, y Zanjón de Aguas Gordas (EOT, 2003).

Por otra parte, el río Chicamocha nace en cercanías de Tunja, capital del Departamento de Boyacá, fluye en sentido SW-NE siguiendo aproximadamente la misma dirección de la Cordillera Oriental, hasta su confluencia con el río Suárez para formar el río Sogamoso hacia el N de la zona de estudio, donde su rumbo es S-N (EOT, 2003).

Figura 14

Zonificación hidrográfica de Colombia

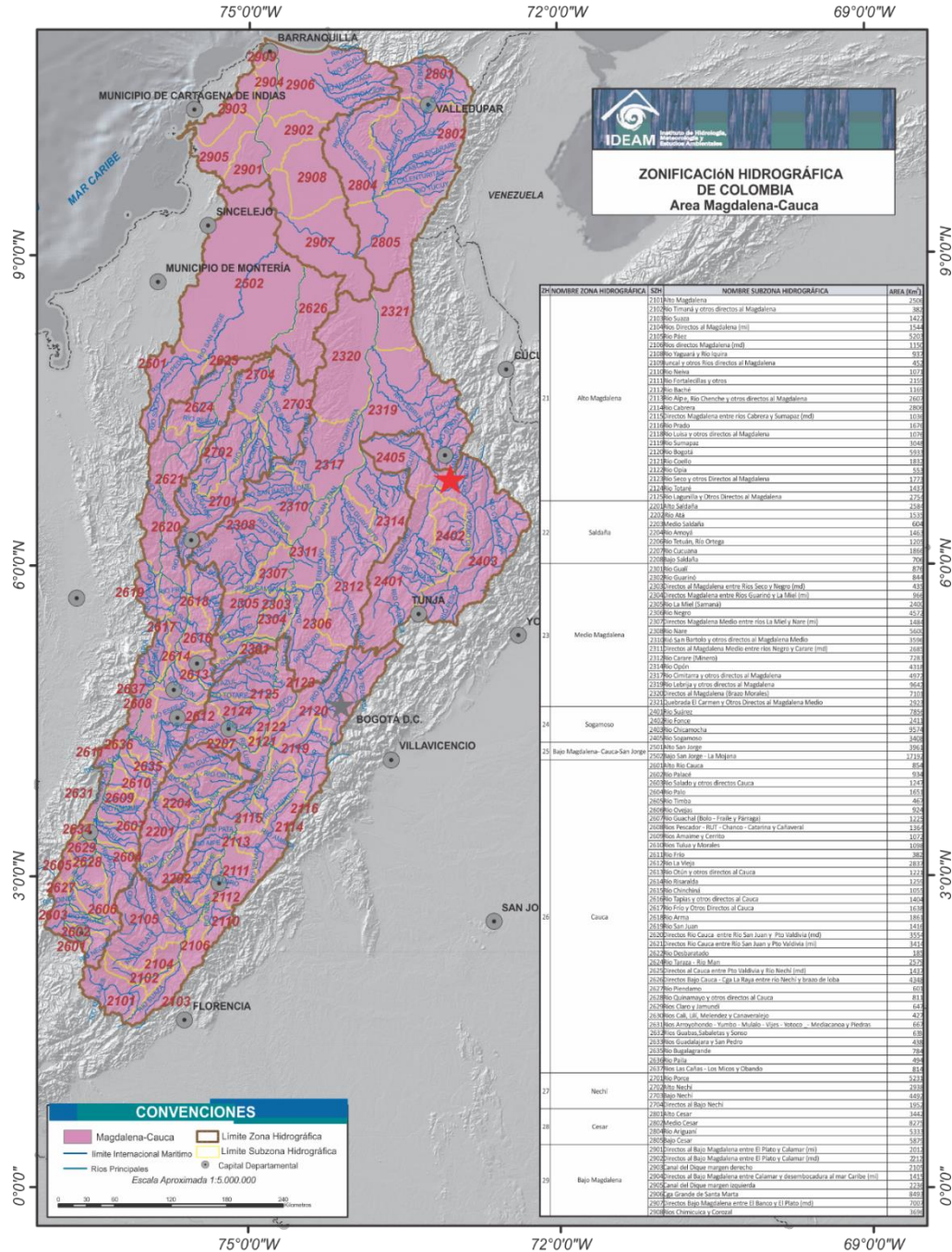


★ Localización de la zona de estudio.

Nota: La zona de estudio se encuentra en el Área hidrográfica Magdalena-Cauca. Imagen modificada de IDEAM (2013).

Figura 15

Área hidrográfica Magdalena-Cauca



★ Localización de la zona de estudio.

Nota: Ubicación del área de estudio en la Zona hidrográfica Sogamoso, Subzona (2405) Río Sogamoso. Imagen modificada de IDEAM (2013).

5 Métodos y procedimientos

Para la elaboración de los productos previstos en la pasantía de investigación, se realizaron una serie de procedimientos en los cuales se aplicaron métodos establecidos que se explican a continuación y se resumen en el siguiente gráfico (**Figura 17;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

Figura 17

Diagrama de flujo de procedimientos y métodos.



5.1 Elaboración del mapa de pendientes

Considerando que la pendiente es un factor importante en la ocurrencia de movimientos en masa e influye también en la distribución de agua en las laderas, se elaboró un mapa de pendientes a partir de un DEM cuya resolución era de 12 [m] por píxel. Para ello se tomaron en cuenta los rangos establecidos en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:25.000 del SGC (2017), expuestos en la Tabla 1. Cabe resaltar que todas las salidas gráficas generadas a lo largo del presente trabajo manejan el sistema de referencia MAGNA SIRGAS con origen en Bogotá y una escala de trabajo 1:25.000.

Tabla 1

Rangos de pendiente

Inclinación (°)	Valor	Procesos característicos y condiciones del terreno
0 - 2	1	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable.
2 - 4	2	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos.
4 - 8	3	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8 - 16	4	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos. Erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos.
16 - 35	5	Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos. Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.
35 - 55	6	Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	7	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudación de escarpe". Susceptible a rodamiento de rocas.

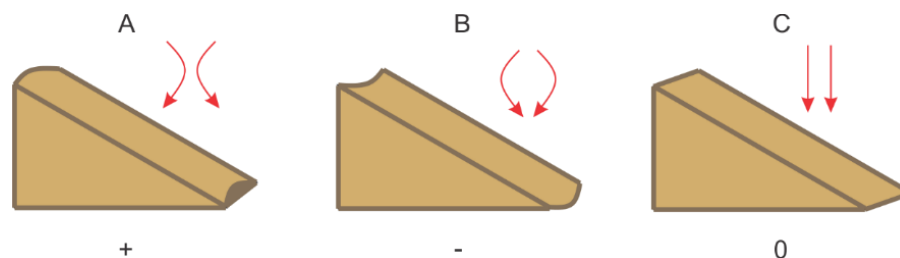
Nota: Adaptado de SGC (2017).

5.2 Elaboración del mapa de curvatura

Se generó un mapa de curvatura de plano a partir del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM) en el software ArcGIS 10.5, dado que esta característica se puede asociar con la convergencia y divergencia de las corrientes de agua sobre la superficie. Un valor positivo indica que la superficie es convexa, mientras que un valor negativo indica que la superficie es cóncava; un valor alrededor de cero indica que la superficie es lineal (**Figura 18; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia el centro de la superficie, mientras que se dispersa en las zonas convexas. Una curvatura cóncava es un condicionante morfológico característico que hace más efectiva la captación de agua de lluvia (SGC, 2017).

Figura 18

Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente



Según lo expuesto anteriormente, los rangos de curvatura tomados para la clasificación del mapa se indican en la Tabla 2 a continuación:

Tabla 2*Rangos de valores de curvatura*

Rango de curvatura	Valor	Característica
< -0.5 (-33,22486 a -0,5)	1	Superficie cóncava. Favorable para la convergencia del flujo de agua.
-0,5 a 0,5	2	Superficie plana.
>0.5 (0,5 – 55)	3	Superficie convexa. Favorable para la dispersión del flujo de agua.

5.3 Elaboración del mapa morfogenético

El análisis geomorfológico de la zona de estudio se realizó teniendo en cuenta el componente morfogenético y, en vista de que la escala de trabajo manejada es 1:25.000, se llegó al nivel de caracterización de subunidad geomorfológica, a través de las siguientes fases:

- a. Se realizó la recopilación de la información bibliográfica de la zona correspondiente a memorias explicativas, informes, planchas geomorfológicas, trabajos de investigación, imágenes satelitales y fotografías aéreas.
- b. Se desarrolló el análisis de la información recolectada a través de la interpretación de las imágenes satelitales y las fotografías aéreas; con ayuda del Modelo Digital de Elevación, tomado del satélite ALOS y sensor de radas PALSAR, el mapa de pendientes de la zona, y el visor 3D del programa Google Earth se realizó la delimitación de las subunidades geomorfológicas. Cabe resaltar que dicha delimitación se realizó con base en lo planteado por Leiva, O. (2012a).
- c. Teniendo en cuenta el mapa geomorfológico a escala 1:100.000 de la plancha 120 del SGC (2015), se realizaron los ajustes pertinentes al mapa preliminar de la zona de estudio.

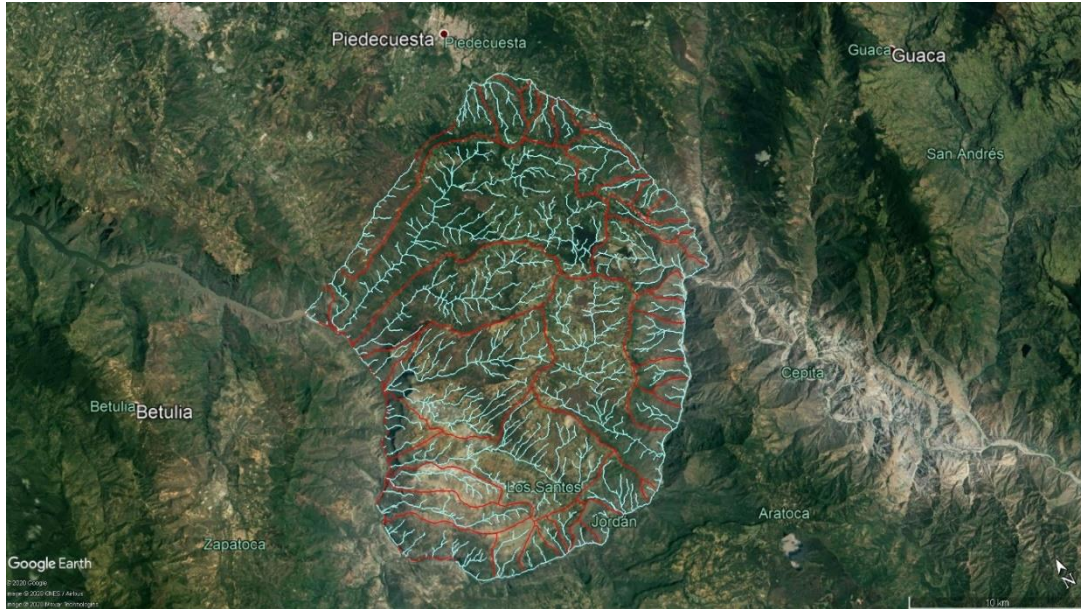
Obtenido el mapa definitivo, se utilizó el software ArcGIS 10.5 para su digitalización y posterior edición.

5.4 Elaboración del mapa de cuencas hidrográficas

Para la elaboración del mapa de cuencas hidrográficas de la zona de estudio se tomó como base el Modelo Digital de Elevación (DEM), a partir del cual se generaron los drenajes en el software ArcGIS 10.5. Con estos elementos, y haciendo uso de la herramienta de Google Earth, se delimitaron dichas cuencas (**Figura 19; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) teniendo en cuenta que, por definición, “una cuenca es el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar” (IDEAM, 2002), y cuyos límites dependen de la divisoria de aguas o cota de máxima altura que divide dos cuencas adyacentes.

Figura 19

Cuencas hidrográficas de la zona de estudio



Nota: Adaptado el 25/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

De igual manera, se determinó el área de cada microcuenca y su índice de densidad de drenaje, éste último (D_d) mediante la fórmula:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde L es la longitud total de los cauces en la cuenca, y A es el área total de la cuenca (Horton, R. E. 1932).

A partir del análisis los valores determinados se definieron las siguientes clases:

Tabla 3*Clasificación de cuencas de acuerdo con el D_d*

D_d [Km/Km ²]	Característica de la cuenca
< 1	Cuencas poco drenadas
1 a 2	Cuencas moderadamente drenadas
> 2	Cuencas bien drenadas

5.5 Elaboración del mapa de cobertura del suelo

Para la construcción del mapa de cobertura del suelo, se descargaron los archivos *shapefile* del Catálogo de Mapas de la página del SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia) (IDEAM, 2014), tomando como base la clasificación realizada en la zona de estudio, y complementando con la información correspondiente a la clase 1.1.2 de Tejido Urbano Discontinuo, la cual fue extraída de la base topográfica de las planchas 1:25.000 del IGAC que abarcan la zona de estudio (1998a, 1998b, 1998c, 1998d, 2014a, 2014b, 2015).

Se identificaron 20 clases de cobertura del suelo, las cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4*Clases de cobertura del suelo identificadas en la zona de estudio*

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
		111 - Tejido urbano continuo
1 - Territorios artificializados	11 - Zonas urbanizadas	112 - Tejido urbano discontinuo
		142 - Instalaciones recreativas

	22 - Cultivos permanentes	221 - Cultivos permanente herbáceos
	23 - Pastos	231 - Pastos limpios 233 - Pastos enmalezados 241 - Mosaico de cultivos
2 - Territorios agrícolas		242 - Mosaico de pastos y cultivos
	24 - Áreas agrícolas heterogéneas	243 - Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales 244 - Mosaico de pastos con espacios naturales 245 - Mosaico de cultivos con espacios naturales
	31 - Bosques	314 - Bosque de galería y ripario 315 - Plantación forestal
3 - Bosques y áreas seminaturales	32 - Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	321 - Herbazal 322 - Arbustal
	33 - Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	323 - Vegetación secundaria o en transición 332 - Afloramientos rocosos 333 - Tierras desnudas y degradadas
5 - Superficies de agua	51 - Aguas continentales	511 - Ríos (50 m) 514 - Cuerpos de agua artificial

5.6 Elaboración del mapa de favorabilidad para la percolación

Para la elaboración del mapa final de favorabilidad para la percolación de la zona de estudio se tomaron en cuenta cinco (5) factores principales: Geología, pendientes, cobertura del suelo, curvatura y densidad de drenajes. Los mapas de valores de cada factor se elaboraron a partir del método heurístico, donde se definieron cinco niveles, en los cuales el valor 1 corresponde a la característica menos favorable para la percolación, y el valor 5 corresponde a la característica más

favorable para la percolación. Así, el valor 1 se clasifica como Muy poco favorable, 2 como Poco favorable, 3 como Moderadamente favorable, 4 como Favorable, y 5 como Muy favorable.

A continuación, se muestra la distribución de los valores asignados a cada capa:

- Geología:

Este factor se clasificó de acuerdo con la Tabla 5.

Tabla 5

Valores de clasificación del factor geología

LITOLOGÍA (Fm.)	VALOR
Depósitos cuaternarios	5
Los Santos	4
Rosa Blanca	3
Paja	2
Tablazo	2
Jordán	1
Granito de Pescadero	1
Esquistos de Silgará	1

- Pendientes:

Este factor se clasificó teniendo en cuenta la *Tabla 6*.

Tabla 6

Valores de clasificación del factor pendiente

PENDIENTE (°)	VALOR
0 a 8	5

8 a 16	3
16 a 35	2
>35	1

- Cobertura del suelo:

Este factor se clasificó con base en la Tabla 7.

Tabla 7

Valores de clasificación del factor cobertura del suelo

COBERTURA	VALOR
111 - Tejido urbano continuo	1
112 - Tejido urbano discontinuo	1
142 - Instalaciones recreativas	1
221 - Cultivos permanentes herbáceos	4
231 - Pastos limpios	4
233 - Pastos enmalezados	4
241 - Mosaico de cultivos	4
242 - Mosaico de pastos y cultivos	4
243 - Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	4
244 - Mosaico de pastos con espacios naturales	4
245 - Mosaico de cultivos con espacios naturales	4
314 - Bosque de galería y ripario	2
315 - Plantación forestal	2
321 - Herbazal	3
322 - Arbustal	3
323 - Vegetación secundaria o en transición	3
332 - Afloramientos rocosos	5
333 - Tierras desnudas y degradadas	5
511 - Ríos (50 m)	1
514 - Cuerpos de agua artificial	1

- Curvatura:

Este factor se clasificó de acuerdo con la Tabla 8.

Tabla 8

Valores de clasificación del factor curvatura

CURVATURA	VALOR
Cóncavo	5
Plano	3
Convexo	1

- Densidad de drenaje:

Este factor se clasificó teniendo en cuenta la Tabla 9.

Tabla 9

Valores de clasificación del factor densidad de drenaje

DENSIDAD DRENAJE	DE VALOR
< 1	5
1 a 2	3
> 2	1

Mediante el procesamiento de los mapas de valores en el software ArcGIS 10.5, se realizaron dos sumas algebraicas ponderadas de todos los factores; la primera, asignándole a cada uno de ellos el mismo peso (20%), y la segunda, atribuyéndole a cada uno de los factores un porcentaje (Tabla 10) de acuerdo con su influencia en el proceso de percolación de agua en el subsuelo según el criterio de las autoras. Esto con el fin de realizar la comparación de los dos mapas y seleccionar el resultado que representara de manera más precisa las condiciones del terreno.

Tabla 10*Porcentaje asignado a los factores evaluados*

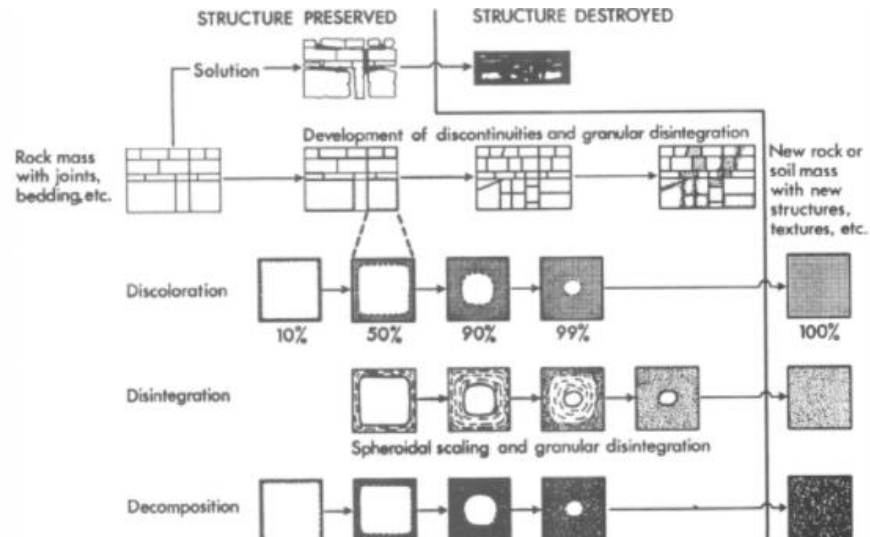
FACTOR	PORCENTAJE (%)
Geología	30
Pendiente	30
Cobertura del suelo	20
Curvatura	10
Densidad de drenaje	10

5.7 Perfiles de meteorización

Los horizontes de suelo se forman producto de la estratificación en capas de materiales con diferentes propiedades como textura, estructura y color, debido a procesos de edafización (**Figura 20; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que actúan desde la superficie, influenciados por factores ecológicos, y pierden su intensidad en función de la profundidad (Barrios, I., 1985).

Figura 20

Etapas del proceso de meteorización

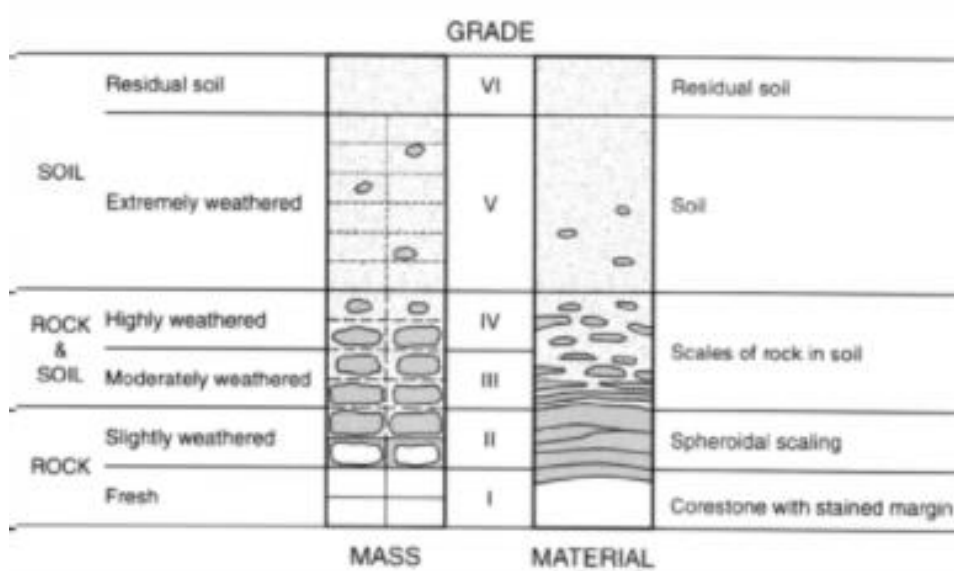


Nota: Tomado de Dearman (1995).

Como resultado de estos procesos se pasa de un material uniforme como es la roca, a un material heterogéneo como es el suelo (Gómez y Cuervo, 2012); esta diferenciación será más notoria cuanto más evolucionados estén los perfiles (**Figura 21; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 21

Clasificación del perfil de suelo residual



Nota: Tomado de Dearman (1995).

5.8 Análisis de granulometría

En el presente trabajo se llevó a cabo la recopilación y revisión bibliográfica de estudios previos realizados en la zona donde se desarrollaron ensayos de granulometría por tamizado, los cuales consisten en construir la curva granulométrica de una muestra, la cual debe ser representativa de la distribución de los tamaños de las partículas. Para ello se hace pasar una muestra, ya sea alterada o inalterada, por mallas o tamices con diferentes aberturas, desde 125 [mm] hasta 0.075 [mm] (malla N°200).

Ahora bien, este ensayo se ejecuta como se explica a continuación:

En primer lugar, se toma una cantidad representativa de muestra, se seca, se disgrega y se pesa en su totalidad. Posteriormente se hace pasar, mediante agitación (**Figura 22;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), por los diferentes tamices (**Figura 23;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), a base de filamentos de acero inoxidable, dispuestos de mayor a menor abertura. Por último, se pesa el material retenido en cada tamiz, y, dado que ya se conoce el peso inicial de la muestra, puede determinarse el porcentaje de material que queda retenido en cada malla.

Con base en estos datos se elabora la curva granulométrica, graficando el porcentaje (en el eje Y) contra el diámetro de la partícula (en el eje X). Cabe aclarar que el “diámetro” corresponde a la abertura en mm del tamiz por el que pasa la partícula. Asimismo, con los datos obtenidos es posible conocer el porcentaje de partículas finas (limos y arcillas), que corresponde al porcentaje que pasa por la malla N°200.

La forma de la curva granulométrica es también un indicador de la distribución de tamaños del suelo; una línea “abatida” indica un suelo con tamaños variados, en cambio una curva “empinada” señala un suelo con predominio de un tamaño (Elizalde, E. Legorreta, H. Zea, C., 2018).

Figura 22

Vibrador mecánico de tamizaje



Nota: Imagen tomada de Gómez y Cuervo (2012).

Figura 23

Tamices granulométricos



Nota: Imagen tomada de INGEOMINAS (2007).

5.9 Análisis de Difracción de Rayos X (DRX)

La Difracción de Rayos X (DRX) es un método de alta tecnología empleado para el análisis de una amplia gama de materiales, y para la determinación de la mineralogía de la fracción fina en una muestra de roca (Universidad de Alicante, s.f.; Universidad Complutense, s.f.). Este se basa en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Los Rayos X, cuyas longitudes de onda son del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas (unidades Angstroms), al ser irradiados sobre la muestra a analizar, se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas (Universidad de Alicante, s.f.).

Se efectuó una búsqueda bibliográfica de estudios previos realizados en la zona, en los cuales se empleó esta técnica para identificar la composición mineralógica de las partículas finas y se seleccionaron los datos oportunos para determinar sus propiedades hidrogeológicas.

Dichas partículas finas, correspondientes principalmente a minerales arcillosos, se clasifican en varios grupos de acuerdo con sus propiedades químicas y estructurales (Tabla 11). Los más comunes se describen a continuación.

- Grupo de la Caolinita: Este grupo incluye los minerales nacrita, dickita, caolinita y halloysita, cuya composición se generaliza como $Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$ (García, C. 1997). Mediante DRX la caolinita, mineral más común de este grupo, se distingue por reflexiones prominentes a 7.16 y 3.57 Angstrom. Por otra parte, sus enlaces de puente de hidrógeno hacen imposible separar las láminas, por lo cual ésta arcilla no es expansiva (INGEOMINAS, 2007).

- Grupo de la Montmorillonita: También conocido como el grupo de las Esmectitas; incluye los minerales montmorillonita, nontronita, beidelita, hectorita y saponita. Se considera que estos se derivan de la pirofilita y el talco (García, C. 1997).
- Grupo de las Micas: Son muy similares a las del grupo de la montmorillonita, e incluye a los minerales moscovita, paragonita, flogopita, margarita, biotita y lepidolita (García, C. 1997).
- Grupo de la Illita: Las illitas son un grupo de minerales dioctaédricos, micáceos, estructuralmente muy similares a la moscovita; poseen mayor contenido de Si, Mg, Fe y H₂O, y menos Al y K en la intercapa que la moscovita. Son el grupo de minerales arcillosos más comunes, dado que se forman por la meteorización de los silicatos (feldespato principalmente), por alteración de otros minerales arcillosos y durante la degradación de la moscovita. No son arcillas expansivas (INGEOMINAS, 2007).
- Grupo de la Clorita: Los minerales de este grupo son considerados como derivados del talco. En las cloritas el espacio intercapa está ocupado por una capa continua de brucita o gibbsita. El espaciado basal es constante independientemente de que se caliente la clorita o se solvate (INGEOMINAS, 2007).
- Grupo de la Vermiculita: Los minerales de este grupo se forman por la alteración de minerales micáceos, su fórmula típica es $Mg_3 (Si_{3-30} Al_{0-70}) O_{10} (OH)_2$; una de sus características importantes es que cuando se calienta repentinamente hasta 500°C, el agua intercapa es expulsada violentamente, causando una expansión de las partículas en 20 a 30 veces su tamaño original. Las vermiculitas así tratadas son altamente porosas y son utilizadas como aisladores térmicos (García, C. 1997).

Tabla 11
Clasificación de minerales arcillosos

CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS				
TIPOS DE ESTRUCTURA	COMPOSICIÓN DE LA INTERCAPA	GRUPOS	SUBGRUPOS	ESPECIES PRINCIPALES
1 : 1	Ausente o vacía	Kanditas	Di: Caolinitas	Caolinita, haloisita, dickita
			Tri: Serpentininitas	Crisotilo, lizardita, antigorita
2 : 1	Ausente o vacía	Talco-Pirofilita	Di: Pirofilitas	Pirofilita
			Tri: Talcos	Talco
	Cationes hidratados o sin agua	Esmectitas	Di: Montmorillonita	Montmorillonita, beidellita
			Tri: Saponitas	Saponita, hectorita, sauconita
	Lámina de hidróxidos	Vermiculitas	Di - Tri: Vermiculitas	Vermiculita
			Micas	Di: Moscovitas
				Tri: Biotitas
		Micas frágiles	Di: Margarita	Margarita
			Tri: Cintonita	Sybertita, Xantofilita
		Cloritas	Di: Sudoitas	Sudoita, cookeita
Di - Tri: Dombasitas	Dombasita			
	Tri: Cloritas	Pininita, clinocloro		

Nota: Adaptado de García, C. (1997).

Ahora bien, los criterios de identificación de minerales arcillosos se basan en el análisis de los máximos de difracción de las reflexiones basales de muestras saturadas con Mg^{2+} secas al aire, saturadas con Mg^{2+} y solvatadas con glicerol (o etilenglicol), saturadas con K^+ y secas al aire, y saturadas con K^+ y calentadas a $550^{\circ}C$ durante varias horas (Justo y Morillo, 1999). En la siguiente tabla (Tabla 12) se muestran los valores de máximos de los espaciados para la identificación de los minerales de arcilla más comunes y algunos minerales accesorios.

Tabla 12

Espaciados relevantes para la identificación de minerales de arcilla y algunos minerales accesorios

MINERAL	ESPACIADO
a. Muestras saturadas con Mg²⁺.	
Clorita	13.6 - 14.7
Vermiculita	14.0 - 15.0
Mica (Illita)	9.9 - 10.1
Talco	9.2 - 9.4
Haloisita	10.1
Metahaolisita	7.2 - 7.5
Caolinita	7.1 - 7.2
Lepidocrosita	6.27
Boehmita	6.11
Gibbsita	4.85
Todos los silicatos laminares	4.4 - 4.6
Yeso	4.27
Goetita	4.18
Cristobalita	4.04
Ilmenita	3.73
Cuarzo	3.34
Feldespatos	3.1 - 3.25
Calcita	3.03
Hematites	2.69
Magnetita	2.53
Silicatos laminares trioctaédricos	1.54
Silicatos laminares dioctaédricos	1.49
b. Muestras saturadas con Mg²⁺ y solvatadas con glicerol:	
Montmorillonita	17.7
Vermiculita	14.4
Clorita	13.6 - 14.7
Haloisita	10.1 - 10.7
Montmorillonita (2° orden)	9.5
Clorita, Vermiculita (2° orden)	7.15
Los demás minerales dan espaciados similares a los que se obtienen en (a)	
c. Muestras saturadas con K⁺, secadas al aire	
Clorita	13.6 - 14.7

Montmorillonita	11.0 - 13.0
Vermiculita	10.0 - 11.0
Metaholisita	7.2 - 7.5
Clorita (2° orden)	7.15
Los demás minerales dan espaciados iguales a los señalados en (a)	
d. Muestras saturadas con K y calentadas a 550°C durante 2 a 3 horas.	
Clorita	13.6 - 14.7
Montmorillonita	9.9 - 10.1
Vermiculita	9.9 - 10.1
Mica (Illita)	9.9 - 10.1
Clorita (2° orden)	7.15

Nota: Adaptado de Justo y Morillo (1999).

6 Resultados

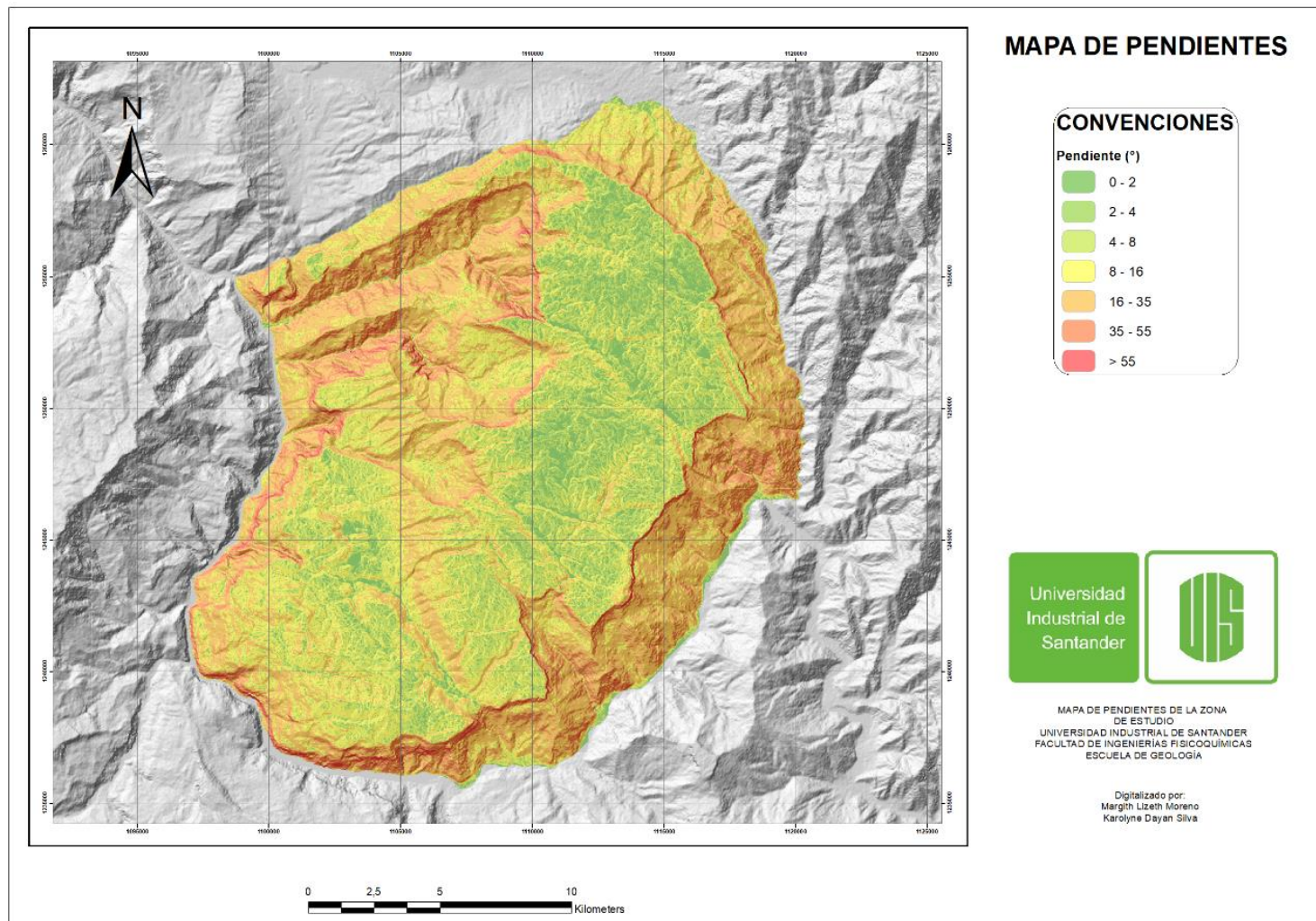
6.1 Mapa de pendientes

Como resultado del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM), se obtuvo el mapa de pendientes de la zona de estudio, el cual se dividió en 7 clases con base en lo planteado por la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa, Escala 1:25.000 del SGC (2017).

Como se observa en la **Figura 24;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la zona de estudio muestra una predominancia de pendientes planas a moderadamente abruptas hacia la parte superior de la meseta estructural, en las veredas Mesitas de San Javier, La Esperanza-El Duende, Holanda, Los Cacaos, Carrizal, El Verde, Majadal Alto, Majadal Bajo, La Fuente, El Tabacal, Rosa Blanca, Las Delicias, El Guamito, Espinal Bajo, Regadero Alto, Paso Chico, Laguna Baja, Los Teres, Garbazal, y parte de las veredas El Pozo, El Diamante, Laguna Alta, La Loma, Regadero Bajo, La Navarra y El Guamo; lo cual, junto con otros factores, como el tipo de suelo y la vegetación, favorecería la concentración e infiltración del agua superficial.

Figura 24

Mapa de pendientes de la zona de estudio



Hacia los bordes de la meseta, incluyendo los límites con los cauces de los ríos Sogamoso y Chicamocha, se presentan laderas y escarpes con fuertes inclinaciones, de moderada a extremadamente abruptas, abarcando las veredas Chocóa, Purnia Nueva, Guaimaro, La Purnia, La Loma Purnia, Piedra del Rayo, Llanadas, La Peña, El Pozo, El Potrero, La Mojarra, El Diamante, Salazar, San Rafael, Pescadero, Cabrera, El Salado, San Pío, San Miguel, El Recreo, El Jasmín, El Volador, y El Guamo. Esta variación en las pendientes promueve el escurrimiento superficial del agua, de manera que tales sectores serán menos propensos a la percolación de dicho recurso.

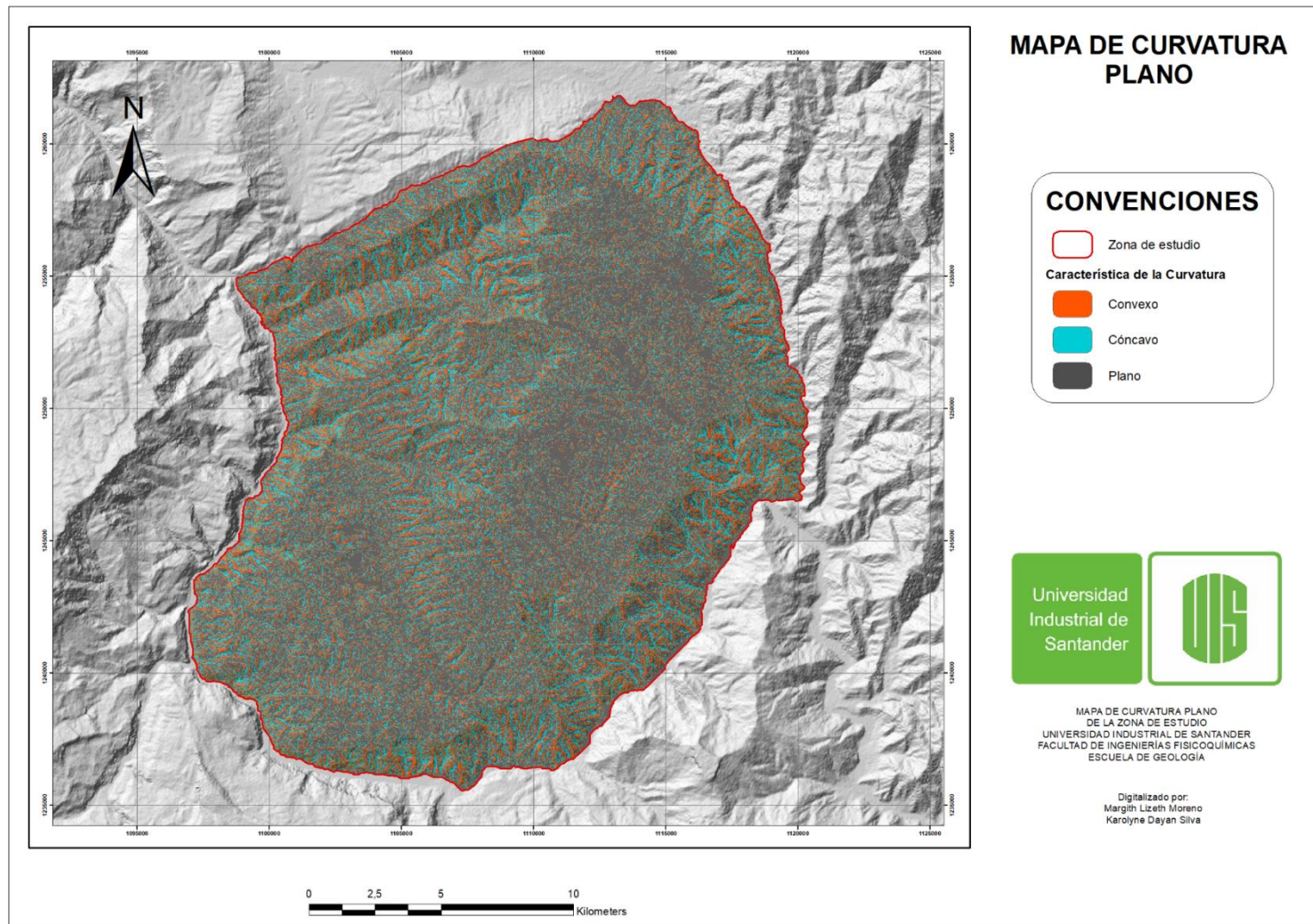
6.2 Mapa de curvatura

Mediante el procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM), se generó el mapa de curvatura de la zona de estudio que se muestra a continuación (**Figura 25;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Como se observa en la **Figura 25;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la parte alta de la Mesa de Los Santos, debido a su morfología suave, predominan las zonas planas que abarcan 56.27% de la zona de estudio, las cuales condicionan parcialmente la infiltración del agua superficial, puesto que en áreas de baja pendiente favorecen el estancamiento del agua, mientras que en las áreas de alta pendiente el escurrimiento de agua en la superficie es mayor. Por otra parte, hacia los bordes de la meseta se observa el contraste entre las zonas cóncavas (21.19%) y convexas (22.53%), las cuales favorecen la concentración o dispersión del agua, respectivamente.

Figura 25

Mapa de curvatura de la zona de estudio



6.3 Mapa morfogenético

El mapa morfogenético de la zona de estudio (**Figura 26; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se realizó teniendo en cuenta diferentes características como la disposición estructural, los procesos activos, la litología y la pendiente del terreno.

Para la representación gráfica de las geoformas se emplearon diferentes colores de acuerdo con el ambiente morfogenético, de modo que, para las geoformas de origen estructural, se utilizaron tonos púrpuras, para las de origen denudativo tonos marrones, para las de origen fluvial tonos azules, y para las de origen antropogénico tonos grises.

A continuación, se presenta una tabla donde se encuentran listadas las geoformas identificadas en la zona de estudio y posteriormente se realiza su descripción de acuerdo con lo expuesto por Leiva, O. (2012a), en el Glosario de Unidades y Subunidades Geomorfológicas. Asimismo, esta descripción se fundamenta en la expresión morfológica y morfométrica del relieve:

Tabla 13

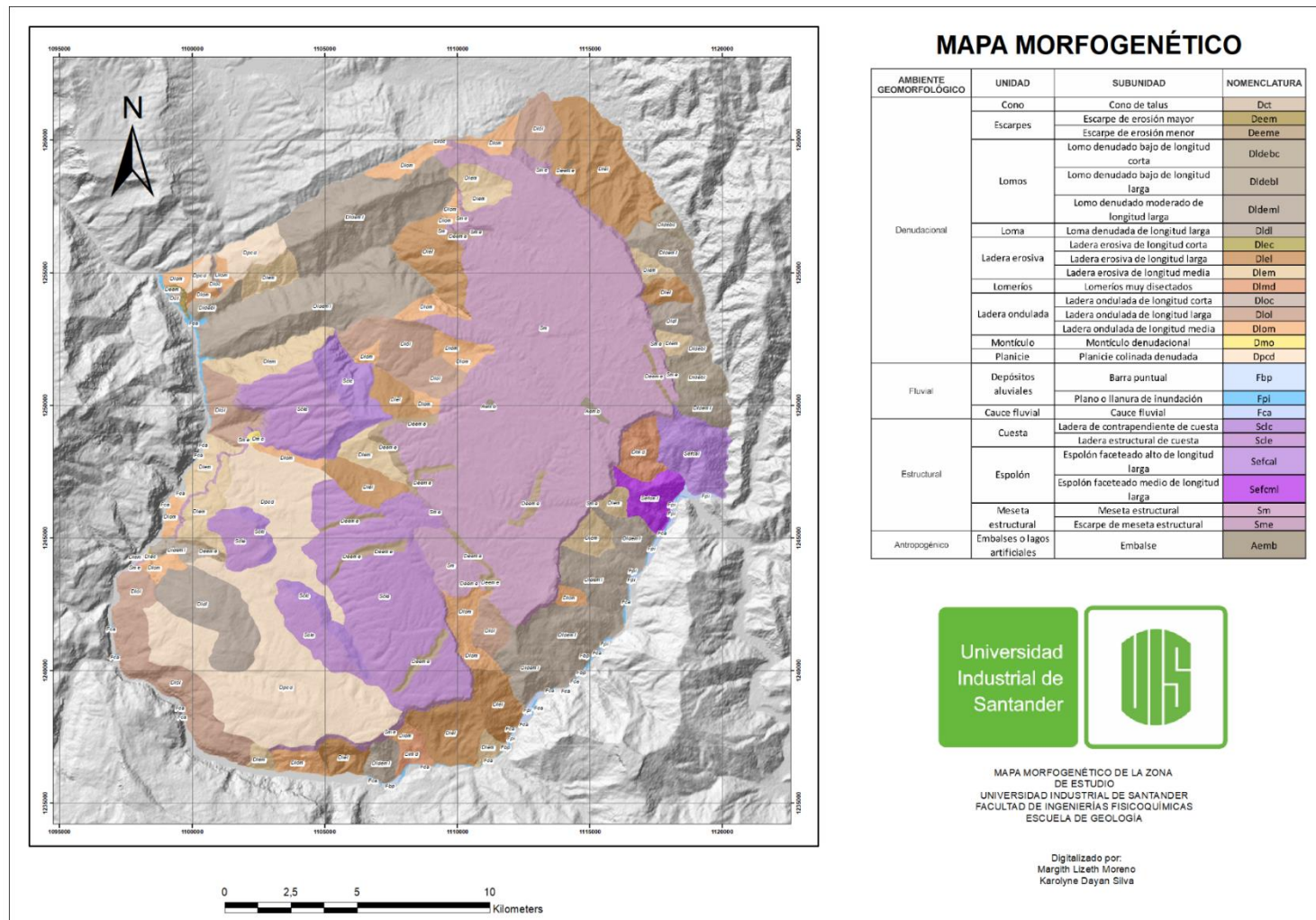
Unidades Geomorfológicas de la zona de estudio

AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD	SUBUNIDAD	NOMENCLATURA
Denudacional	Cono	Cono de talus	Dct
	Escarpes	Escarpe de erosión mayor	Deem
		Escarpe de erosión menor	Deeme
	Lomos	Lomo denudado bajo de longitud corta	Dldebc
		Lomo denudado bajo de longitud larga	Dldebl
		Lomo denudado moderado de longitud larga	Dldeml

Fluvial	Loma	Loma denudada de longitud larga	Dldl	
		Ladera erosiva de longitud corta	Dlec	
	Ladera erosiva	Ladera erosiva de longitud larga	Dlel	
		Ladera erosiva de longitud media	Dlem	
	Lomeríos	Lomeríos muy disectados	Dlmd	
		Ladera ondulada de longitud corta	Dloc	
	Ladera ondulada	Ladera ondulada de longitud larga	Dlol	
		Ladera ondulada de longitud media	Dlom	
	Montículo	Montículo denudacional	Dmo	
	Planicie	Planicie colinada denudada	Dpcd	
	Depósitos aluviales		Barra puntual	Fbp
			Plano o llanura de inundación	Fpi
		Cauce fluvial	Cauce fluvial	Fca
	Cuesta		Ladera de contrapendiente de cuesta	Sclc
		Ladera estructural de cuesta	Scle	
Espolón		Espolón facetado alto de longitud larga	Sefcal	
	Espolón facetado medio de longitud larga	Sefcml		
Estructural	Meseta estructural	Meseta estructural	Sm	
		Escarpe de meseta estructural	Sme	
Antropogénico	Embalses o lagos artificiales	Embalse	Aemb	

Figura 26

Mapa morfo-genético de la zona de estudio



6.3.1 *Geoformas de Ambiente Denudacional*

Cono de talus (Dct): De acuerdo con Leiva, O. (2012a), esta geoforma corresponde a una estructura en forma de cono o lóbulo localizada a la base de los escarpes (

Figura 27

Cono de talus (Dct) y escarpe de erosión mayor (Deem), ubicados al NW de la zona de estudio

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) Se caracteriza por tener un ápice angosto, laderas de longitudes cortas a medias, que varían de convexas a cóncavas hacia la parte distal, y superficies redondeadas en las zonas donde se presenta un cambio en la pendiente. Se generan debido a procesos de acumulación mecánica de bloques y fragmentos angulares que se desprenden de las partes altas de la meseta estructural.

Escarpe de erosión mayor (Deem): Geoforma correspondiente a una ladera abrupta o caída de altura variable, cuyo origen puede estar asociado a causas tectónicas, erosión fluvial, procesos gravitacionales o tectógenos. Su longitud es muy variable, desde menos de 250 m hasta más de 1000 m; y su forma puede ser cóncava, convexa o recta. La pendiente oscila de escarpada a muy escarpada. (Leiva, O., 2012a). (

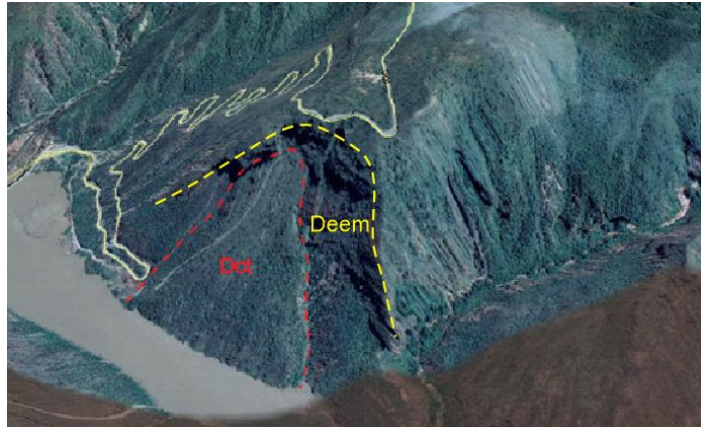
Figura 27

Cono de talus (Dct) y escarpe de erosión mayor (Deem), ubicados al NW de la zona de estudio

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

Figura 27

Cono de talus (Dct) y escarpe de erosión mayor (Deem), ubicados al NW de la zona de estudio



Nota: Adaptado el 21/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

Escarpe de erosión menor (Deeme): Citando a Leiva, O. (2012a), esta geoforma corresponde a una ladera abrupta o caída de longitud corta a larga, cuya forma varía de cóncava a convexa y ocasionalmente recta. Su pendiente característica es escarpada a muy escarpada, y su origen está relacionado con procesos de socavación fluvial lateral o procesos de erosión y movimientos en masa remontantes (**Figura 28; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 28

Escarpe de erosión menor (Deeme) ubicado hacía el SE de la zona de estudio



Nota: Adaptado el 21/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

Ladera ondulada (Dlo): Según Leiva, O. (2012a), esta geoforma se define como una superficie inclinada de morfología alomada o colinada, cuya pendiente varía de inclinada a escarpada. Este tipo de laderas se pueden formar en suelos residuales o depósitos coluviales (**Figura 29;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Para el caso de esta geoforma se subdividieron 3 categorías de acuerdo con la longitud de la ladera, así:

< 250 m – Ladera ondulada de longitud corta (Dloc)

250-1000 m – Ladera ondulada de longitud media (Dlom)

>1000 m – Ladera ondulada de longitud larga (Dlol)

Figura 29

Ladera ondulada (Dlo) ubicada en la Vereda El Espinal



Nota: Geoforma ubicada en cercanías del municipio de Los Santos. Imagen tomada de Leiva, O. (2012b).

Ladera erosiva (Del): Esta geoforma corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de formas planas, cóncavas o convexas. Se puede ver afectada por

procesos erosivos intensos dando origen a cárcavas, surcos o solifluxión, sobre diversos materiales, como suelo o roca (**Figura 30;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o una estructura (Leiva, O. 2012a). Para el caso de esta geoforma se subdividieron 3 categorías de acuerdo con la longitud de la ladera, así:

< 250 m – Ladera erosiva de longitud corta (Dlec)

250-1000 m – Ladera erosiva de longitud media (Dlem)

>1000 m – Ladera erosiva de longitud larga (Dlel)

Figura 30

Laderas erosivas (Del)



Nota: Fotografía panorámica donde se observan laderas erosivas con presencia de surcos y cárcavas. Imagen tomada de Leiva, O. (2012b).

Loma denudada (Dld): Leiva, O. (2012a) describe esta geoforma como una elevación topográfica convexa, de morfología alomada y elongada, con una altura menor de 200 metros sobre

su nivel de base local, cuyas pendientes varían de muy inclinadas a muy abruptas (**Figura 31; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Su formación se relaciona con procesos intensos de meteorización y erosión diferencial, los cuales a su vez pueden generar movimientos en masa. Para el caso de esta geoforma se subdividieron 3 categorías de acuerdo con la longitud del eje principal, así:

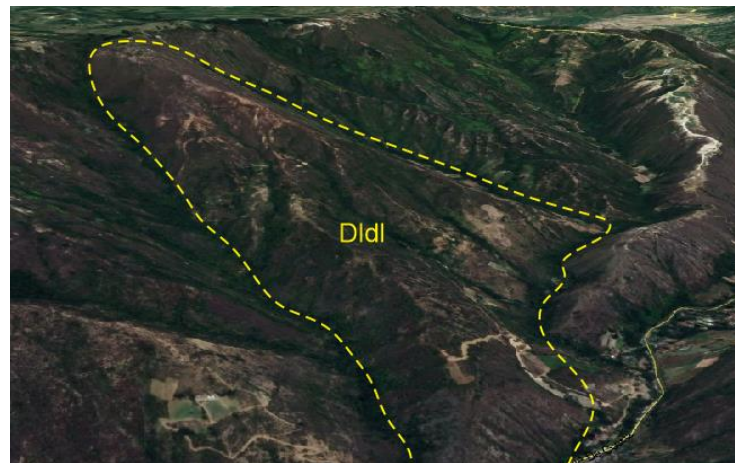
< 250 m – Loma denudada de longitud corta (Dldc)

250-1000 m – Loma denudada de longitud media (Dldm)

>1000 m – Loma denudada de longitud larga (Dldl)

Figura 31

Loma denudada de longitud larga (Dldl) localizada hacia el NE de la zona de estudio



Nota: Adaptado el 21/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

Lomeríos muy disectados (Dlmd): Como plantea Leiva, O. (2012a), estas geoformas corresponden a prominencias topográficas con índice de relieve bajo, de morfología alomada o colinada, de forma cóncava a recta. Se caracterizan por presentar laderas de longitud corta a

moderadamente larga, cimas agudas a redondeadas estrechas, y pendientes que varían de abruptas a escarpadas. Su origen se asocia a procesos denudacionales intensos, que afectan generalmente sus laderas dando lugar a la formación de valles en V debido a la alta disección (**Figura 32;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 32

Lomeríos muy disectados (Dlmd), ubicados hacia el SE de la zona de estudio



Nota: Adaptado el 21/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

Lomo denudado bajo (Dldeb): Esta geoforma corresponde a conjuntos de lomos situados a diferentes alturas, cuyo índice de relieve relativo es menor de 250 m. Presentan una morfología alargada en dirección perpendicular al drenaje principal (**Figura 33;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La forma de la parte superior varía dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca y los procesos erosivos que lo han modelado. (Leiva, O., 2012a). De acuerdo con la longitud del eje principal se divide en 3 clases:

< 250 m – Lomo denudado bajo de longitud corta (DldebC)

250-1000 m – Lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm)

>1000 m – Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl)

Figura 33

Lomos denudados en la Vereda El Sumidero

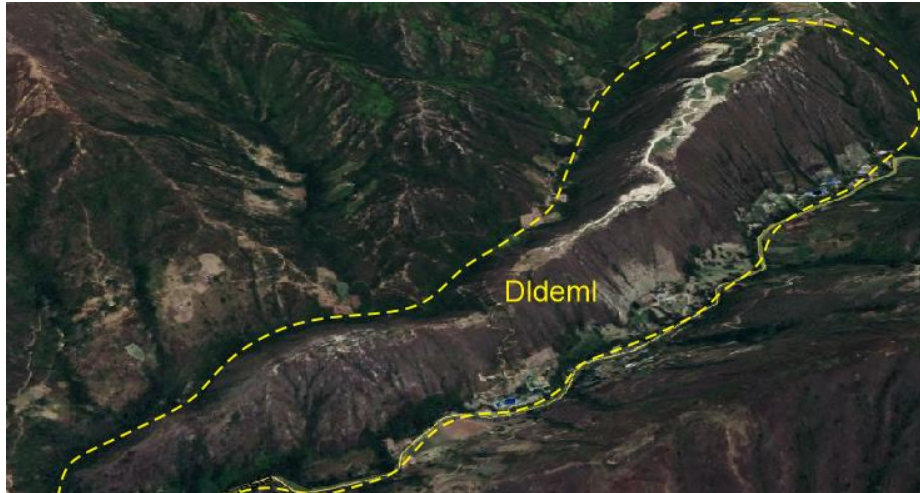


Nota: Imagen tomada de Gómez y Cuervo (2012).

Lomo denudado moderado de longitud larga (Dldeml): Como expresa Leiva, O. (2012a), estas geoformas corresponden a conjuntos de lomos ubicados a diferentes alturas, cuyo índice de relieve relativo varía entre 250 - 1000 m y la longitud de su eje principal es mayor a 1000 m. Su relieve es alargado en dirección perpendicular al drenaje principal. La parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca y los procesos erosivos que lo han modelado (**Figura 34;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 34

Lomo denudado moderado de longitud larga (Dldeml)



Nota: Adaptado el 21/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo): Según Leiva, O. (2012a), esta geoforma corresponde a una elevación del terreno con una altura menor de 50 metros sobre su nivel de base local, y se caracteriza por presentar una morfología colinada, cóncava o convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente. Su origen se asocia a procesos de meteorización y erosión intensa sobre rocas blandas y en sedimentos no consolidados, dispuestos generalmente de manera horizontal a ligeramente inclinados (**Figura 35;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 35

Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo)



Nota: Fotografía panorámica tomada de Leiva, O. (2012b).

Planicie colinada denudada (Dpcd): Leiva, O. (2012a) define esta geoforma como una superficie erosiva suavemente ondulada de paisaje colinado, caracterizada por pendientes muy inclinadas a abruptas, y laderas cortas, rectas a cóncavas, donde predomina el patrón de drenaje dendrítico. Son el resultado de procesos erosivos intensos que afectaron diferencialmente los macizos rocosos fracturados (**Figura 36; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 36*Planicie colinada denudada (Dpcd)*

Nota: Panorámica tomada en dirección norte, donde se observa una planicie colinada denudada. Imagen tomada de Gómez y Cuervo (2012).

6.3.2 Geformas de Ambiente Estructural

Meseta estructural (Sm): Estructura de cima plana limitada por escarpes abruptos a muy abruptos, de longitud muy corta y forma convexa (**Figura 37; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Su origen es relacionado a procesos de erosión diferencial en unidades estratificadas horizontalmente o con inclinaciones menores a 5°. (Leiva, O., 2012a).

Escarpe de meseta (Sme): Como afirma Leiva, O. (2012a), esta geofoma corresponde a un plano vertical a subvertical (**Figura 38; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), cuya longitud varía de corta a moderada, de pendientes inclinadas a escarpadas, y localmente escalonadas. Su origen se asocia a procesos de erosión diferencial y a la disección de los cauces. Se crea debido a la intercalación de unidades duras y blandas dispuestas horizontalmente.

Figura 37

Meseta estructural (Sm) de Los Santos



Nota: Se observa la ligera inclinación de los estratos y los escarpes de meseta producto de la disección de los cauces.

Imagen tomada de Leiva, O. (2012b).

Figura 38

Escarpe de meseta estructural (Sme) en la Mesa de Los Santos



Nota: Escarpe conformado por estratos horizontales de la Formación Rosa Blanca. Imagen tomada de Leiva, O.

(2012b).

Espolón faceteado moderado de longitud larga (Sefcml): De acuerdo con Leiva, O. (2012a), esta geoforma es una prominencia natural colinada, con laderas de pendiente inclinada a abrupta, cuyo relieve relativo varía entre 250 - 1000 m, y la longitud del eje principal es mayor a 1000 m. Surge como resultado del fallamiento inverso y de rumbo que generan truncamientos a manera de facetas triangulares (**Figura 39;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 39

Espolones faceteados



Nota: Imagen tomada de Leiva, O. (2012b).

Espolón faceteado alto de longitud larga (Sefcal): Leiva, O. (2012a) describe esta geoforma como una saliente natural de morfología colinada, con laderas de pendiente inclinada a abrupta. Presenta un relieve relativo mayor a 1000 m, al igual que la longitud de su eje principal. Se origina a causa de procesos de fallamiento inverso y de rumbo que generan truncamientos a manera de facetas triangulares (**Figura 39;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Ladera estructural de cuesta (Scl_e): Superficie con estratos buzando a favor de la pendiente con una inclinación que varía entre 10°- 25°, de longitud larga a extremadamente larga, de forma recta a irregular, con pendientes inclinadas a muy inclinadas, relacionada a una estructura de cuesta. (Leiva, O., 2012a). (**Figura 40;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 40

Laderas estructurales de cuesta (Scl_e) de la Mesa de Los Santos



Nota: Imagen tomada de Leiva, O. (2012b).

Ladera de contrapendiente de cuesta (Scl_c): Como plantea Leiva, O. (2012a), esta geoforma corresponde a una superficie vertical a subvertical, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno; de longitud muy corta a corta, de forma irregular o escalonada, y de pendiente muy escarpada (**Figura 41;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 41

Ladera de contrapendiente de cuesta (Sclc)



Nota: Imagen tomada de Gómez y Cuervo (2012).

6.3.3 Geformas de Ambiente Fluvial

Barra puntual (Fbp): Según Leiva, O. (2012a), esta geoforma presenta una morfología ondulada elongada, en forma de medialuna, compuesta de crestas y artesas curvas de poca altura. Estos cuerpos, que son producto de la acumulación de sedimentos erodados de la parte convexa del cauce, se encuentran en la parte cóncava de los meandros de los ríos (**Figura 42; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Su depósito está constituido por sedimentos generalmente arenosos finos y materiales arcillosos en las artesas.

Figura 42

Cauce aluvial (Fca) y barra puntual (Fbp) al SE de la zona de estudio



Nota: Adaptado el 21/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

Cauce aluvial (Fca): Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes permanentes o temporales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Estos cauces pueden abarcar grandes distancias dependiendo de diferentes condiciones como pendiente, resistencia del fondo, carga de sedimentos y caudal (**Figura 42; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Cuando las corrientes fluyen en planicies o llanuras, los cauces son de tipo meándrico, como producto del cambio repentino de la dirección del flujo. (Leiva, O. 2012a).

Plano o llanura de inundación (Fpi): Leiva, O. (2012a), define esta geoforma como una superficie de relieve plano, bajo, ligeramente ondulado, y eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza (**Figura**

43;Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial.

Figura 43

Planicie de inundación (Fpi) ubicada SE de la zona de estudio



Nota: Adaptado el 30/09/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

6.3.4 *Geoformas de ambiente antropogénico*

Embalses (Aemb): Esta geoforma, de acuerdo con Leiva, O. (2012a), corresponde a una acumulación de agua producida por una obstrucción en el lecho de un río o arroyo que cierra parcial o totalmente su cauce. La obstrucción del cauce puede ocurrir por causas naturales, como el derrumbe de una ladera, o por obras construidas por el hombre para tal fin, como son las represas (Figura 44;Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Figura 44

Embalse (Aemb) localizado hacia el E del área de estudio



Nota: Adaptado el 21/08/2020 de Google Earth. Todos los derechos reservados 2020 por Google.

6.4 Mapa de cuencas hidrológicas

Este mapa se obtuvo como resultado de la delimitación de cuencas hidrológicas explicada con detalle en el capítulo de metodología del presente trabajo. Cada una de las cuencas identificadas se nombró de acuerdo con el drenaje principal al que están asociadas o, en su defecto, con el nombre de la vereda o el caserío más cercano (**Figura 45; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Se definieron en total 28 cuencas (Tabla 14), de las cuales 21 presentan un área entre 1 y 10 [km²] y 7 presentan un área mayor a 10 [km²], siendo la Microcuenca Quebrada Los Fríos la de mayor extensión con un área de 80.94 [km²].

Asimismo, se determinó el índice de densidad de drenaje (D_d) para cada cuenca definida, obteniendo como resultado 2 microcuencas pobremente drenadas, con un D_d menor a 1 [km/km²], 24 microcuencas moderadamente drenadas, con un D_d entre 1 y 2 [km/km²], y 2 microcuencas bien drenadas, con un D_d mayor a 2 [km/km²].

Tabla 14

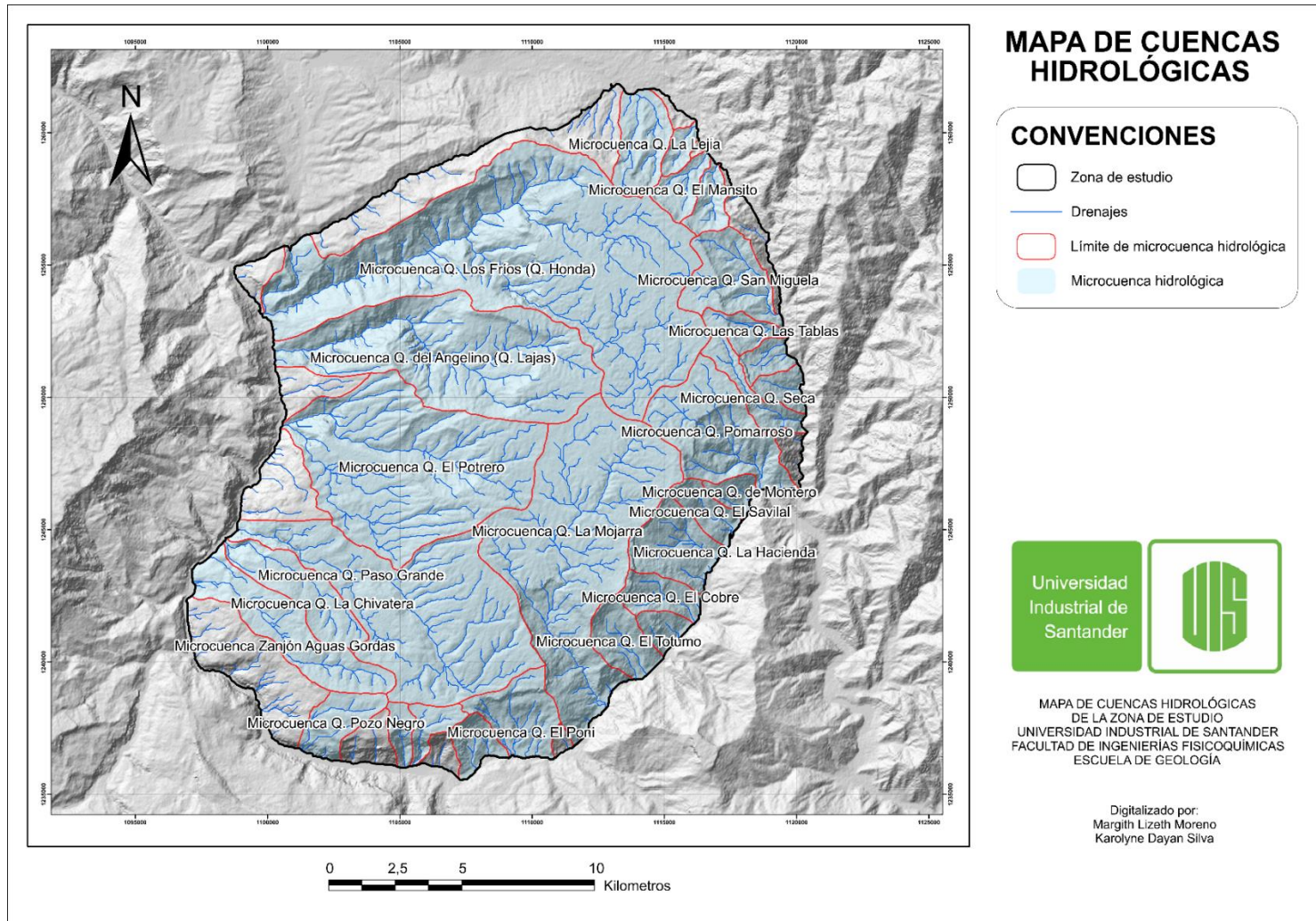
Valores determinados para cada microcuenca identificada

Nombre	Longitud total [Km]	Area [Km²]	D_d [Km/Km²]
Microcuenca V. Cabrera	2,02	2,32	0,871
Microcuenca V. Salazar	2,16	2,17	0,995
Microcuenca V. El Pozo	3,41	3,05	1,118
Microcuenca Q. de Montero	2,24	1,98	1,131
Microcuenca Q. El Totumo	6,62	5,10	1,298
Microcuenca Q. El Savilal	4,39	3,27	1,343
Microcuenca V. El Diamante	2,91	1,97	1,477
Microcuenca Q. La Hacienda	12,00	7,86	1,527
Microcuenca Q. El Mansito	4,73	3,09	1,531
Microcuenca Zanjón Aguas Gordas	20,21	12,94	1,562
Microcuenca Q. Seca	6,52	4,05	1,610
Microcuenca V. El Volador	2,74	1,69	1,621
Microcuenca Q. El Cobre	6,41	3,92	1,635
Microcuenca V. El Salado	3,78	2,30	1,643
Microcuenca Q. San Miguela	14,61	8,88	1,645

Microcuenca Q. Pomarroso	25,57	15,49	1,651
Microcuenca Q. La Chivatera	14,51	8,67	1,674
Microcuenca V. El Recreo	4,90	2,90	1,690
Microcuenca Q. Angelino	65,08	38,43	1,693
Microcuenca Q. La Mojarra	80,38	47,45	1,694
Microcuenca Q. El Poni	4,54	2,58	1,760
Microcuenca Q. Los Fríos	143,33	80,94	1,771
Microcuenca Q. La Lejía	12,66	6,81	1,859
Microcuenca Q. Paso Grande	74,29	39,91	1,861
Microcuenca V. La Peña	14,32	7,48	1,914
Microcuenca Q. Las Tablas	5,54	2,81	1,972
Microcuenca Q. El Potrero	88,31	44,14	2,001
Microcuenca Q. Pozo Negro	15,61	4,97	3,141

Figura 45

Mapa de cuencas hidrológicas de la zona de estudio



6.5 Mapa de cobertura del suelo

Recopilando la información de las planchas del IGAC (1998a, 1998b, 1998c, 1998d, 2014a, 2014b, 2015) y del Catálogo de Mapas del SIAC (IDEAM, 2014), se generó el mapa de cobertura del suelo (**Figura 46; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), partiendo de la clasificación CORINE Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010), que divide las unidades de cobertura en 5 grupos principales (1-Territorios artificializados, 2-Territorios agrícolas, 3-Bosques y áreas seminaturales, 4-Áreas húmedas y 5-Superficies de agua), a partir de los cuales se subdivide empleando una codificación jerárquica en donde cada dígito indica un nivel de detalle mayor.

Se identificaron 20 clases de cobertura, las cuales se exponen en la Tabla 4 y se describen con detalle a continuación:

- Tejido urbano continuo (1.1.1): Con base en lo planteado por el IDEAM (2010), son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a las mismas. Las construcciones, carreteras y superficies de origen antropogénico, representan más del 80% del terreno; mientras que la vegetación y el suelo descubierto abarcan un área reducida del tejido urbano. Cabe resaltar que la superficie de esta unidad debe comprender más de 5 [Ha].
- Tejido urbano discontinuo (1.1.2): Según el IDEAM (2010), son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes; en los cuales, dichas edificaciones, vías e infraestructura cubren la superficie de manera dispersa y discontinua, y el área restante está cubierta por vegetación. En la zona de estudio, esta cobertura se presenta como casas individuales, con

jardín y espacios verdes, infraestructuras vacacionales y recreativas con sus redes viales, edificios y áreas de recreación, e instalaciones de servicios públicos (escuelas, hospitales).

- Instalaciones recreativas (1.4.2): Son los terrenos dedicados a actividades de recreación y esparcimiento tales como camping, deporte, parques de atracción, hipódromos, entre otros. Incluye campos de fútbol e infraestructura asociada, condominios recreativos, fincas y hoteles ubicados en las afueras de las ciudades o a lo largo de las carreteras, y parques dispuestos para el esparcimiento que no están incluidos dentro del tejido urbano (IDEAM, 2010).
- Cultivos permanentes herbáceos (2.2.1): El IDEAM (2010) define esta clase como una cobertura constituida principalmente por cultivos permanentes de tipo herbáceo, tales como caña de azúcar y panelera, plátano, banano y tabaco. Las plantas de hábito herbáceo son aquellas que no poseen tallo leñoso, son verdes y tienen un ciclo vegetativo anual. Dentro de esta categoría se incluyen los cultivos permanentes herbáceos con un área mayor a 25 [Ha], las infraestructuras asociadas que ocupen una superficie menor a 5 [Ha] y los suelos en preparación destinados a esta plantación.
- Pastos limpios (2.3.1): Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor a 70%; la presencia de esta cobertura se debe a que sus prácticas de manejo (limpieza, enclamiento y/o fertilización, etc.) impiden el desarrollo de otras coberturas (IDEAM, 2010). En la zona de estudio esta cobertura comprende pastos limpios con área mayor o igual a 25 ha, cuerpos de agua asociados

(jagüeyes) con área menor a 25 ha, y pastos con presencia esporádica a ocasional de arbustales o árboles.

- Pastos enmalezados (2.3.3): El IDEAM (2010) describe esta cobertura como áreas representadas por tierras con pastos y malezas conformando asociaciones de vegetación secundaria, que se dan como resultado de escasas prácticas de manejo o procesos de abandono. En general, la altura de la vegetación secundaria es menor a 1,5 m.
- Mosaico de cultivos (2.4.1): En esta categoría se incluyen las tierras constituidas por cultivos anuales, temporales o permanentes, en los cuales el tamaño de las parcelas es menor a 25 [Ha] y el patrón de distribución es demasiado confuso para cartografiarlas individualmente. Incluye mezcla de parcelas de cultivos donde ninguno de ellos abarca más del 70% del área total del mosaico, y las infraestructuras asociadas a los mismos, con una superficie menor a 5 [Ha], tales como viviendas rurales, cercas vivas y carreteras (IDEAM, 2010).
- Mosaico de pastos y cultivos (2.4.2): Según la definición del IDEAM (2010), este tipo de cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos y cultivos, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño (inferior a 25 ha) y el patrón de distribución de los lotes es demasiado complejo para representarlos cartográficamente de manera individual.
- Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (2.4.3): Esta clase comprende las superficies del terreno constituidas principalmente por cultivos y pastos en combinación

con espacios naturales. El patrón de distribución de esta unidad es muy complejo y el tamaño de las parcelas no supera 25 [Ha], por lo tanto, no pueden ser cartografiadas individualmente. Las áreas de cultivos y pastos abarcan entre el 30 y 70% de la superficie total. Los espacios naturales están ocupados por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o ripario, vegetación secundaria o en transición, u otras áreas no intervenidas o poco alteradas (IDEAM, 2010).

- Mosaico de pastos con espacios naturales (2.4.4): El IDEAM (2010) describe esta cobertura como una mezcla entre áreas ocupadas por pastos y espacios naturales. En esta unidad, los lotes de pastos cubren un área menor a 25 [Ha] y su disposición es confusa, por lo cual no pueden ser representados individualmente. Las coberturas de pastos representan entre 30 y 70% del total del mosaico. Los espacios naturales están conformados por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o ripario, vegetación secundaria o en transición, u otras áreas que permanecen en estado natural o casi natural.
- Mosaico de cultivos y espacios naturales (2.4.5): Según el IDEAM (2010), corresponde a las superficies constituidas por una combinación de cultivos con espacios naturales, donde el tamaño de las parcelas es muy pequeño y su esquema de distribución es demasiado complejo, por lo que no pueden ser cartografiados de manera individual. Las áreas de cultivos cubren entre el 30 y 70% de la superficie total. Los espacios naturales se encuentran como pequeños parches o relictos, entremezclados con las áreas de cultivos, y están representados por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o ripario, vegetación secundaria o en transición, u otras áreas no intervenidas o poco alteradas.

- Bosque de galería y ripario (3.1.4): Hace referencia a las coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicada en las márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Debido a que este tipo de cobertura se encuentra bordeando los cursos de agua y los drenajes naturales, su amplitud es limitada (IDEAM, 2010).
- Plantación forestal (3.1.5): El IDEAM (2010) define esta unidad como aquellas coberturas compuestas por plantaciones de vegetación arbórea realizadas por actividades antrópicas con fines de manejo forestal. Mediante la plantación y/o la siembra se establecen rodales para la producción de madera (plantaciones comerciales) o de bienes y servicios ambientales (plantaciones protectoras). Incluyen plantaciones con área mayor a 25 [Ha] y las infraestructuras asociadas con área menor a 5 [Ha], tales como campamentos, aserraderos y vías.
- Herbazal (3.2.1): Esta cobertura está constituida por una comunidad vegetal donde predominan los elementos herbáceos desarrollados de manera natural en diferentes densidades y sustratos, conformando una cobertura densa (mayor al 70% de ocupación) o abierta (entre el 30 y 70% de ocupación) (IDEAM, 2010).
- Arbustal (3.2.2): Teniendo en cuenta lo planteado por el IDEAM (2010), esta cobertura comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva, la cual corresponde a plantas perennes, con tallo leñoso y altura entre 0.5 y 5 m, desarrolladas en forma natural en diferentes densidades y sustratos.

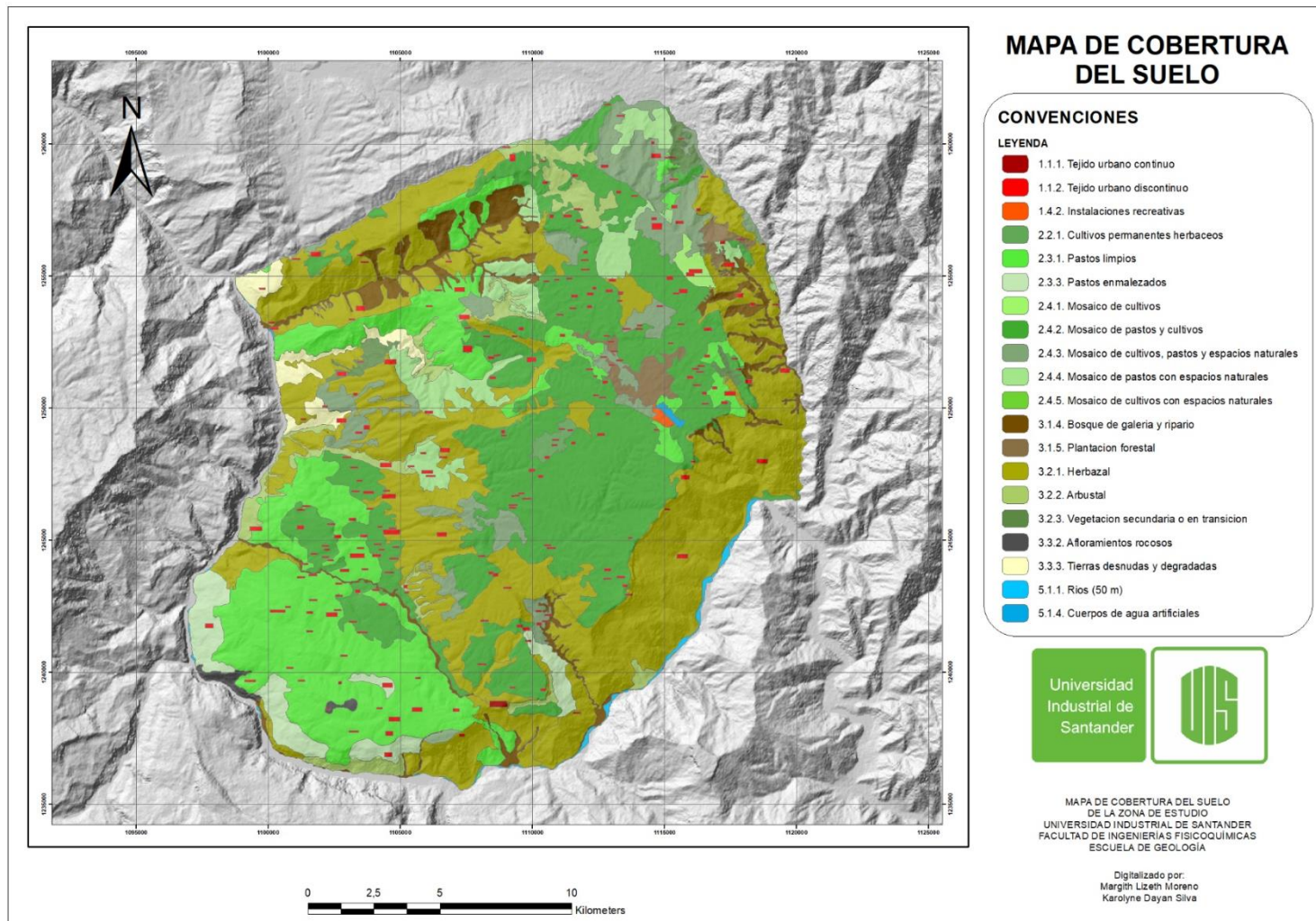
- Vegetación secundaria o en transición (3.2.3): Según el IDEAM (2010), corresponde a aquellas coberturas vegetales “originadas por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria, que puede encontrarse en recuperación, tendiendo al estado original”. Este tipo de cobertura se forma en zonas que fueron despobladas para diferentes fines, áreas agrícolas abandonadas y lugares donde la vegetación natural fue destruida por fenómenos naturales. Cabe destacar que esta vegetación se desarrolla sin haber sido intervenida por el hombre.
- Afloramientos rocosos (3.3.2): Esta unidad abarca las superficies del terreno donde se encuentran las capas de roca aflorando, expuestas a la intemperie, con vegetación escasa o nula, generalmente situadas en laderas abruptas. Se localizan en zonas de alta pendiente donde predominan los sustratos de rocas competentes, asociadas con fallas y deformaciones geológicas (IDEAM, 2010).
- Tierras desnudas y degradadas (3.3.3): El IDEAM (2010) define esta cobertura como superficies desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos de erosión y degradación extrema, tanto naturales como antrópicos, y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas. En la zona de estudio esta cobertura se presenta como zonas semidesérticas, con vegetación seca y ocurrencia de procesos erosivos, áreas de

rocas, cantos rodados o cascajo en laderas empinadas, y suelos cársticos con vegetación gramínea o leñosa con área menor a 25 ha.

- Ríos (5.1.1): De acuerdo con lo planteado por el IDEAM (2010) un río es “una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río”. En esta clase se incluyen los drenajes con un ancho mayor o igual a 50 [m], islotes y playones con área menor a 25 [Ha], y meandros recortados en proceso de sedimentación con un ancho superior a 50 [m].
- Cuerpos de agua artificial (5.1.4): Esta cobertura incluye aquellos cuerpos de agua que fueron hechos por el hombre, generalmente con el fin de producir electricidad o abastecer acueductos, y para prestar otros servicios tales como abastecimiento de agua, riego, control de caudales e inundaciones, y actividades turísticas o recreativas. Incluye el cuerpo de agua y la infraestructura asociada con un área menor a 5 [Ha] (IDEAM, 2010).

Figura 46

Mapa de cobertura del suelo de la zona de estudio



6.6 Mapa de Favorabilidad para la Percolación

De acuerdo con lo descrito anteriormente en el capítulo de metodología, se realizó la reclasificación de los mapas de cada factor analizado, para obtener los mapas de valores que fueron empleados para la elaboración del mapa de favorabilidad final. Estos se muestran a continuación:

Figura 47

Mapa de valores de Pendientes para el mapa de favorabilidad para la percolación

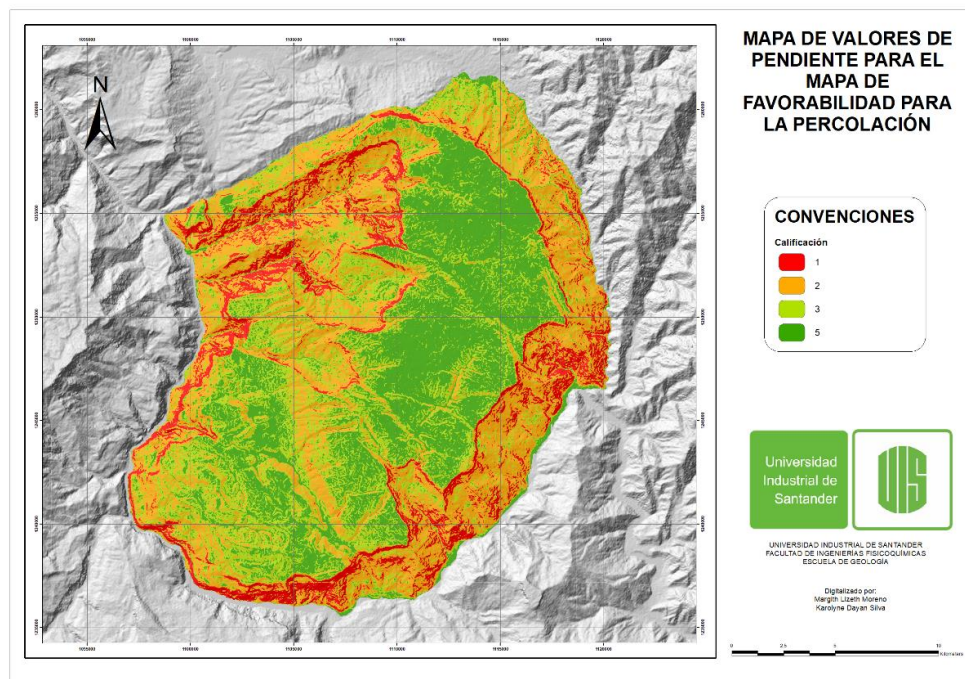


Figura 48

Mapa de valores de Curvatura para el mapa de favorabilidad para la percolación

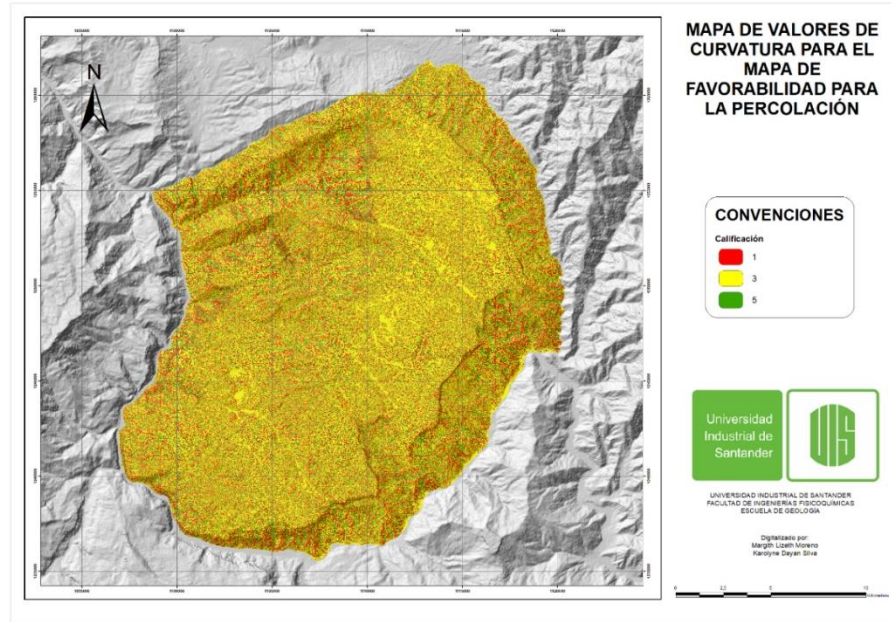


Figura 49

Mapa de valores de Geología para el mapa de favorabilidad para la percolación

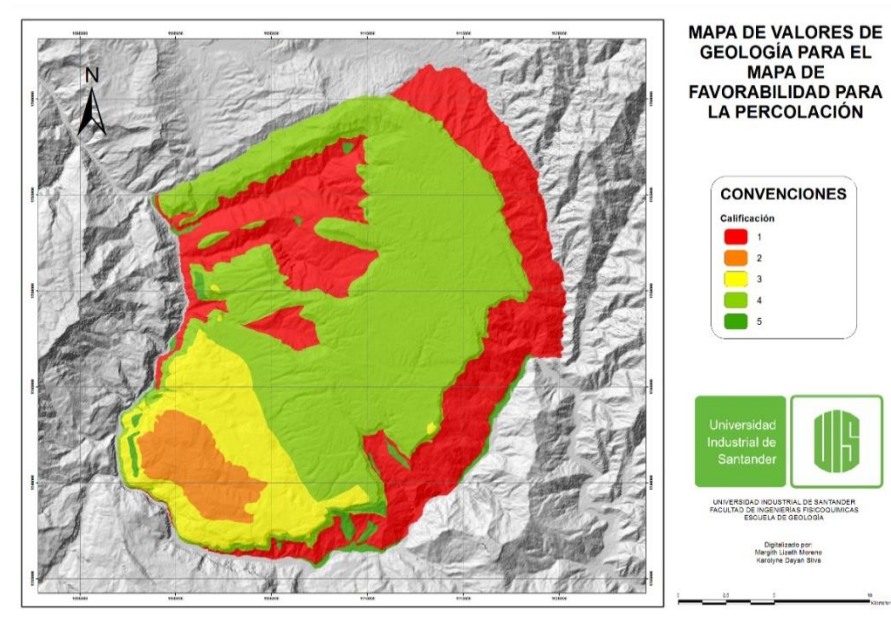


Figura 50

Mapa de valores de Densidad de drenaje para el mapa de favorabilidad para la percolación

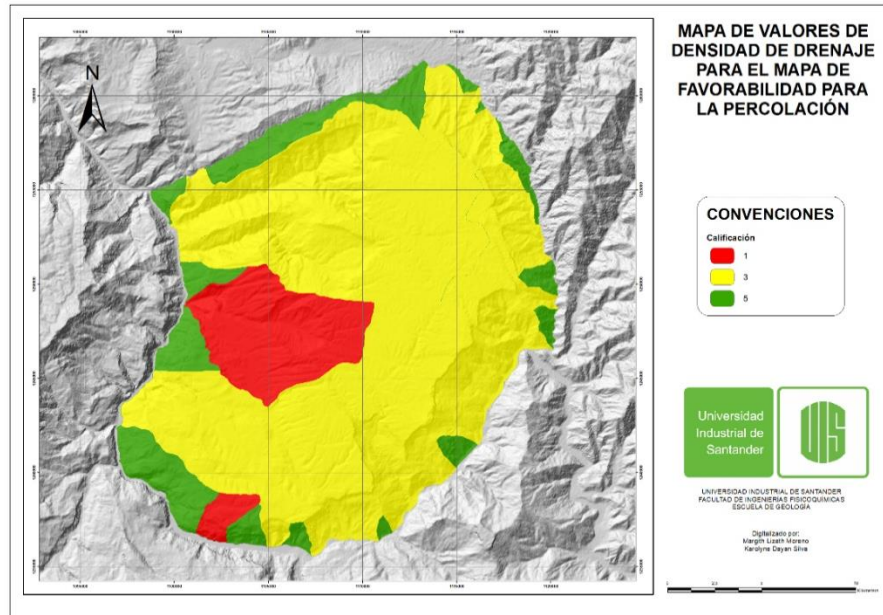
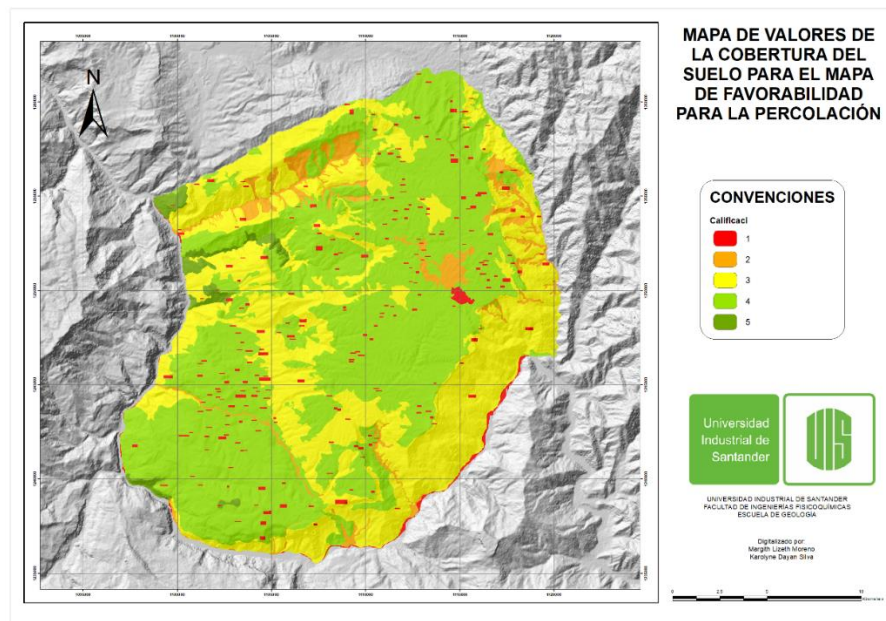


Figura 51

Mapa de valores de Cobertura del suelo para el mapa de favorabilidad para la percolación



A través del procesamiento de los mapas anteriores se obtuvieron como resultados los mapas que se muestran a continuación, donde la **Figura 52;Error! No se encuentra el origen de la referencia.** corresponde al mapa con ponderaciones iguales (20% cada factor), y la **Figura 53;Error! No se encuentra el origen de la referencia.** corresponde al mapa con ponderaciones asignadas a criterio (Tabla 10). Este último se consideró como mapa final, dado que se ajusta con mayor precisión a las características de la zona de estudio, puesto que el mapa con ponderaciones iguales presenta zonas moderadamente favorables y favorables hacia las laderas, en donde se presentan pendientes altas que condicionan en mayor proporción el escurrimiento superficial del agua. Además, en estos sectores aflora principalmente la Fm. Jordán la cual, por su litología, es considerada poco favorable para la percolación; por otra parte, no se observa una distinción entre las formaciones Los Santos y Rosa Blanca, hacia la parte alta de la mesa, que, dada su litología (como se presenta en el mapa de valores), la primera es considerada con una condición favorable, ya que está constituida por intercalaciones de areniscas conglomeráticas, lodolitas y cuarzoareniscas con alto grado de fracturamiento en algunos sectores; y la segunda con una condición moderadamente favorable para la percolación, debido a que se compone de areniscas, calizas y lodolitas calcáreas.

Figura 52

Mapa de favorabilidad para la percolación con ponderaciones iguales para cada factor

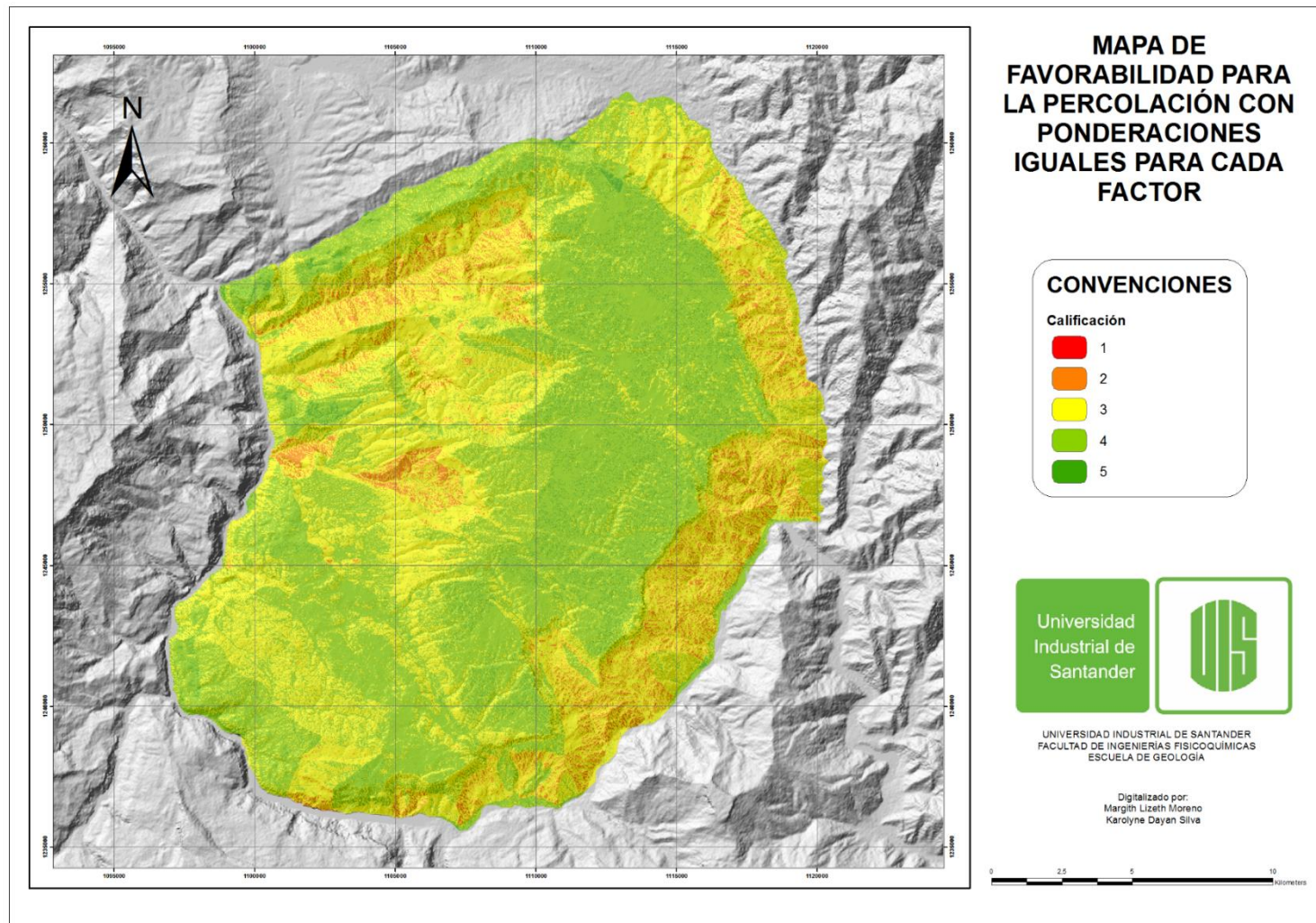
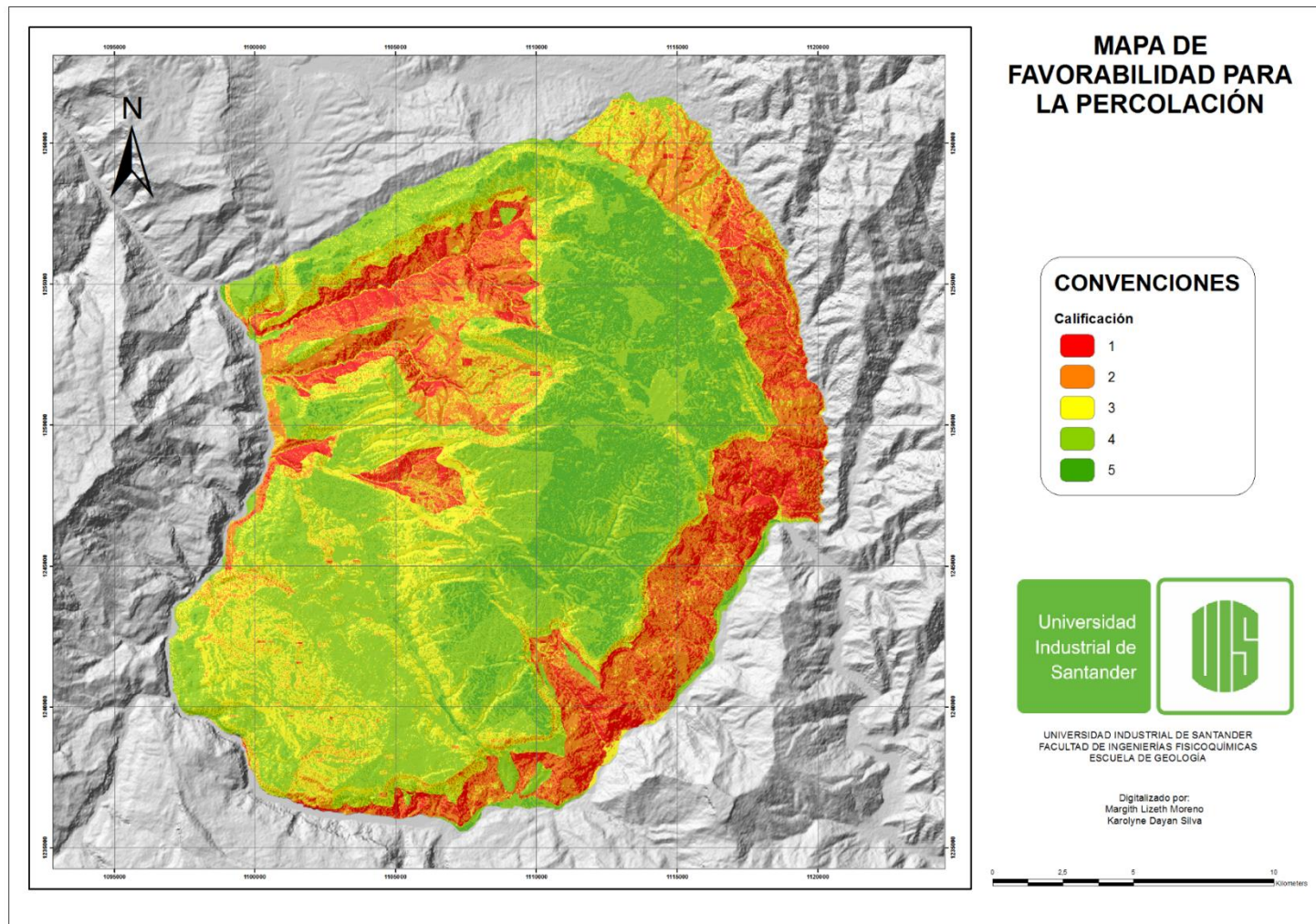


Figura 53

Mapa final de favorabilidad para la percolación



6.7 Análisis granulométrico

Partiendo de los datos de laboratorio recopilados de los estudios anteriores realizados en la zona, se construyeron las curvas granulométricas de las muestras recolectadas en las principales formaciones geológicas que afloran en el área, correspondientes a las formaciones Los Santos, Rosa Blanca y Paja. Esto con el fin de clasificar el tipo de material presente en cada muestra, en función del tamaño de las partículas y su abundancia. Cabe mencionar que las muestras de las formaciones Los Santos y Rosa Blanca se consideran representativas de las litologías que se encuentran hacia el tope de cada formación, sin embargo, para la Fm. Paja, dicha muestra es poco representativa dado que esta unidad es predominantemente lutítica.

6.7.1 Formación Los Santos

Dados los valores registrados en la Tabla 15 correspondientes a la Muestra FNS – 120 – 026 – 001, y la gráfica de la curva granulométrica (**Figura 54; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), este material se clasifica como una arena mal graduada ligeramente limosa.

Tabla 15

Datos de peso y porcentajes de la muestra FNS – 120 – 026 – 001 analizada de la Formación Los Santos, Vereda La Navarra

FAC MALLA [mm]	PESO PARCIAL [gr]	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
2	0,00	0,0000	0,0000	100,0000
0,43	199,70	39,9400	39,9400	60,0600
0,149	217,60	43,5200	83,4600	16,5400
0,074	23,90	4,7800	88,2400	11,7600
FONDO	58,80	11,7600	100,0000	0,0000
TOTAL	500,00	100,0000		

Nota: Adaptado de INGEOMINAS (2007).

Examinando los valores de la Tabla 16 correspondientes a la Muestra JCS – 120 – 017 - 002, y la gráfica de la curva granulométrica (**Figura 55;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), este material se clasifica como una arena limosa.

Tabla 16

Datos de peso y porcentajes de la muestra JCS – 120 – 017 – 002 analizada de la Formación

Los Santos, Vereda La Navarra

FAC MALLA [mm]	PESO PARCIAL [gr]	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
2	66,00	13,2000	13,2000	86,8000
0,43	92,70	18,5400	31,7400	68,2600
0,149	237,20	47,4400	79,1800	20,8200
0,074	22,70	4,5400	83,7200	16,2800
FONDO	81,40	16,2800	100,0000	0,0000
TOTAL	500,00	100,0000		

Nota: Adaptado de INGEOMINAS (2007).

Figura 54

Curva granulométrica correspondiente a la muestra FNS – 120 – 026 – 001 de la Formación

Los Santos

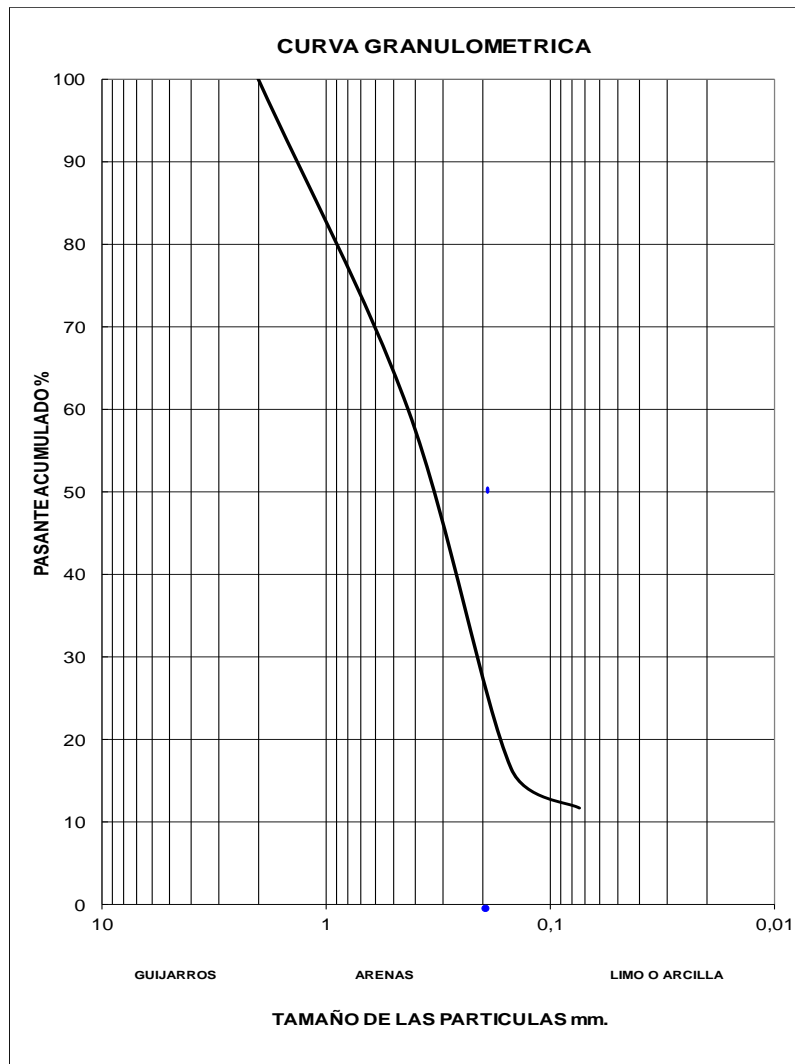
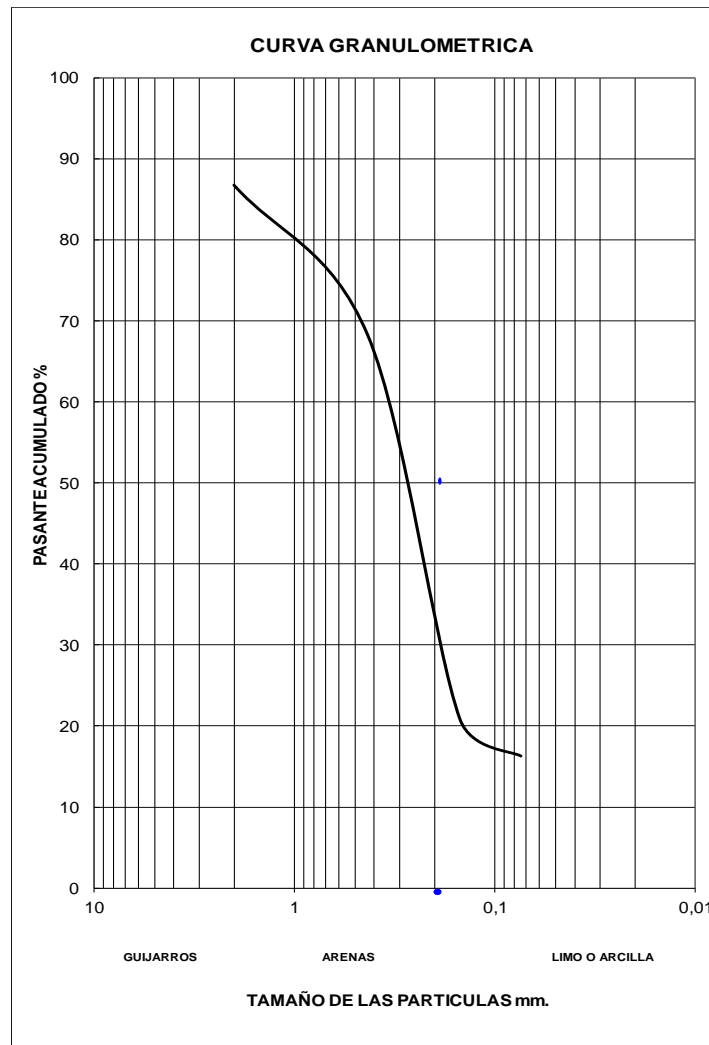


Figura 55

Curva granulométrica correspondiente a la muestra JCS – 120 – 017 – 002 de la Formación Los Santos



6.7.2 Formación Rosa Blanca

Según los valores registrados en la Tabla 17 y considerando la gráfica de la **Figura 56;Error!** No se encuentra el origen de la referencia., esta Muestra 1 corresponde a una arena limosa.

Tabla 17

Datos de peso y porcentajes de la muestra 1 analizada de la Formación Rosa Blanca

FAC MALLA [mm]	PESO PARCIAL [gr]	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
2	886,00	65,6637	65,6637	34,3363
1	55,90	4,1429	69,8066	30,1934
0,6	53,20	3,9428	73,7494	26,2506
0,25	76,60	5,6770	79,4264	20,5736
0,125	143,80	10,6574	90,0837	9,9163
0,063	21,70	1,6082	91,6920	8,3080
FONDO	112,10	8,3080	100,0000	0,0000
TOTAL	1349,30	100,0000		

Nota: Adaptado de Gómez y Cuervo (2012).

Según los valores registrados en la Tabla 18 y considerando la gráfica de la **Figura 57**, esta Muestra 2 se clasifica como una arena mal graduada ligeramente limosa.

Tabla 18

Datos de peso y porcentajes de la muestra 2 (Vereda El Espinal) analizada de la Formación Rosa Blanca

FAC MALLA [mm]	PESO PARCIAL [gr]	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
2	27,00	1,9960	1,9960	98,0040
1	63,80	4,7165	6,7125	93,2875
0,6	81,70	6,0398	12,7523	87,2477
0,25	371,40	27,4562	40,2085	59,7915
0,125	555,20	41,0438	81,2523	18,7477
0,063	69,70	5,1527	86,4050	13,5950
FONDO	183,90	13,5950	100,0000	0,0000
TOTAL	1352,70	100,0000		

Nota: Adaptado de Gómez y Cuervo (2012).

Figura 56

Curva granulométrica correspondiente a la muestra 1 de la Formación Rosa Blanca

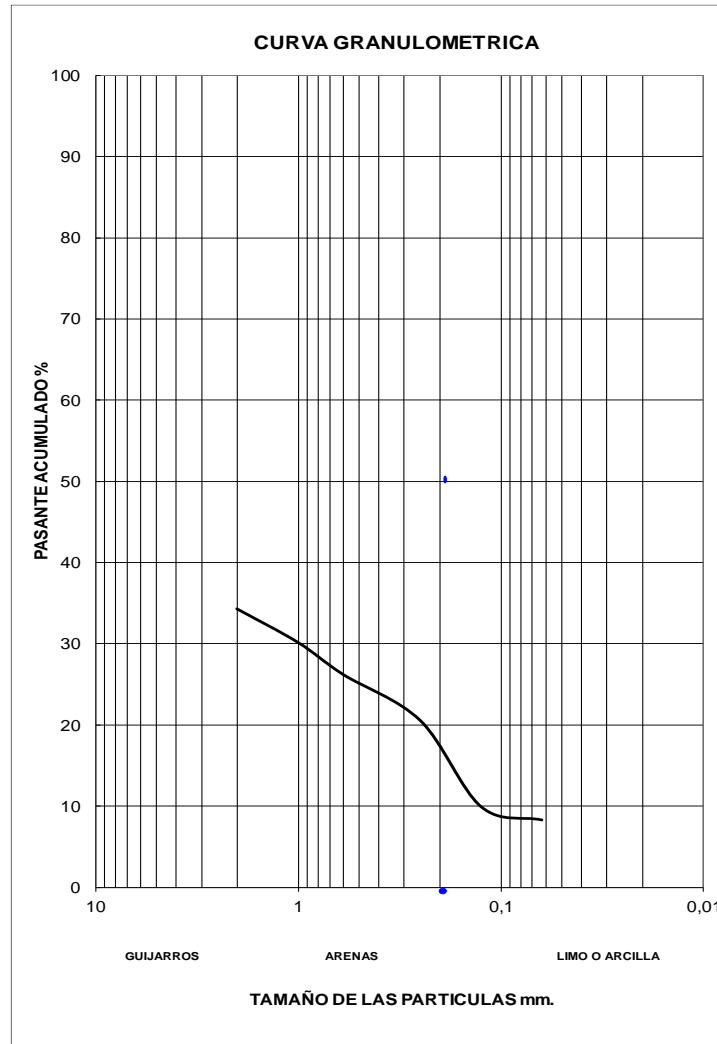
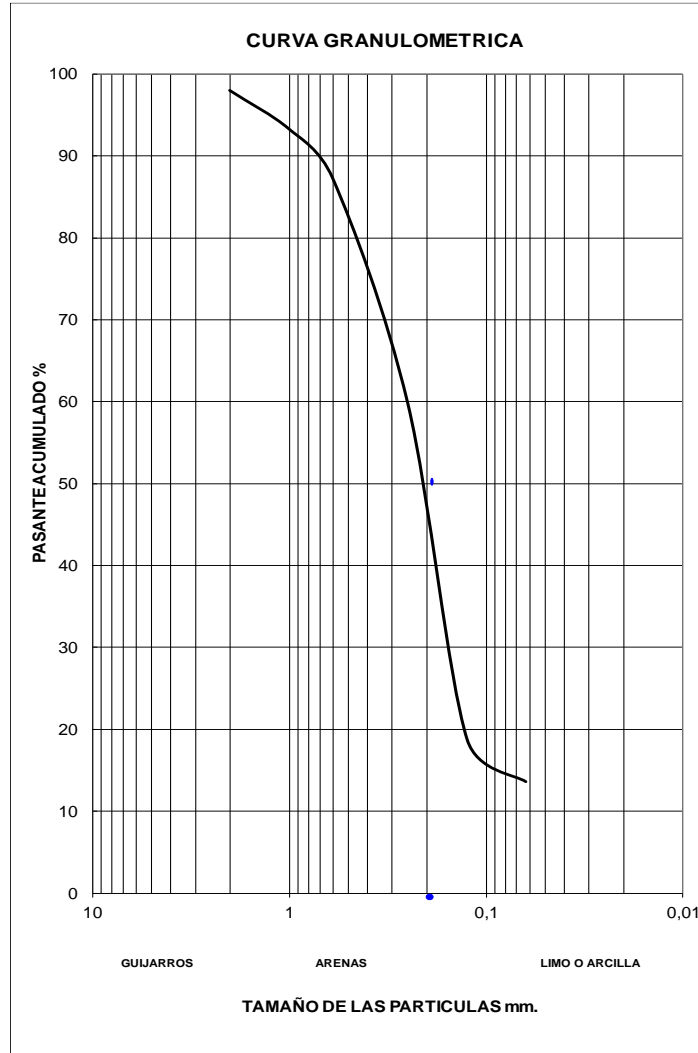


Figura 57

Curva granulométrica correspondiente a la muestra 2 de la Formación Rosa Blanca



6.7.3 Formación Paja

Teniendo en cuenta los valores registrados en la Tabla 19 y con base en la gráfica de la **Figura 58**; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, esta muestra se clasifica como una arena mal graduada limosa.

Tabla 19

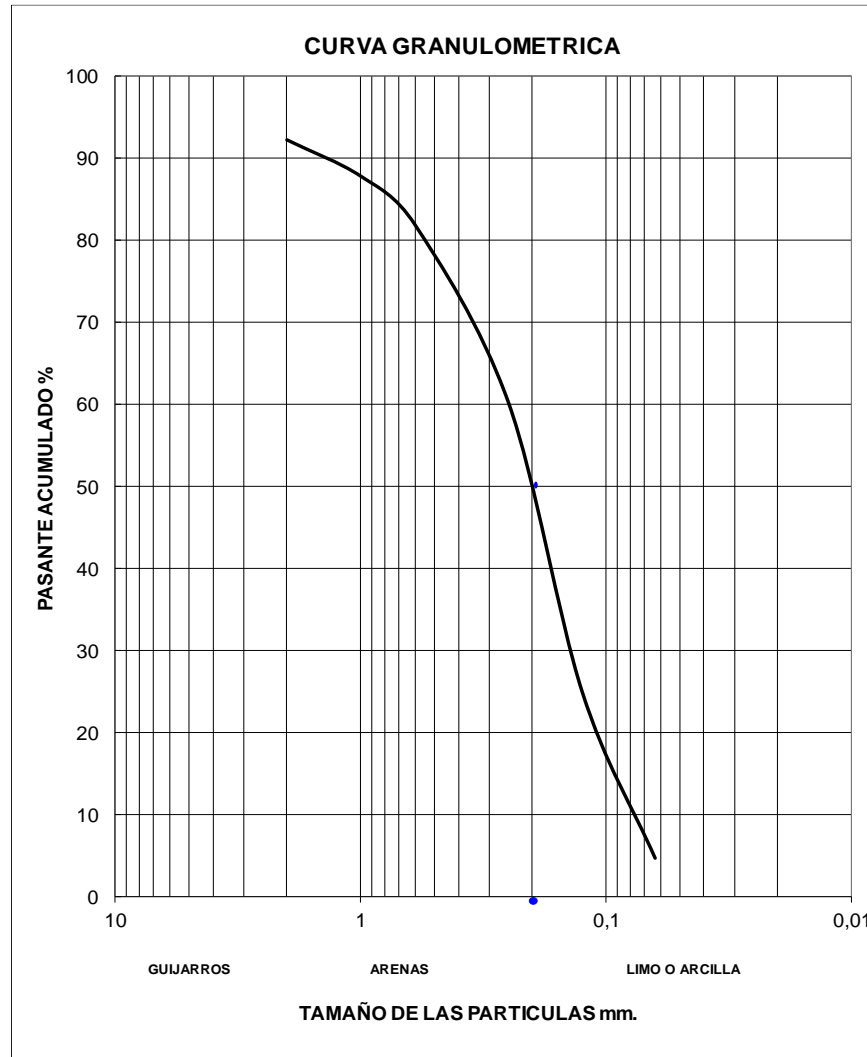
Datos de peso y porcentajes de la muestra analizada de la Formación Paja

FAC MALLA [mm]	PESO PARCIAL [gr]	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
2	299,90	7,7216	7,7216	92,2784
1	171,80	4,4234	12,1450	87,8550
0,6	230,80	5,9425	18,0875	81,9125
0,25	839,40	21,6123	39,6998	60,3002
0,125	1370,60	35,2893	74,9891	25,0109
0,063	788,10	20,2915	95,2805	4,7195
FONDO	183,30	4,7195	100,0000	0,0000
TOTAL	3883,90	100,0000		

Nota: Adaptado de Gómez y Cuervo (2012).

Figura 58

Curva granulométrica correspondiente a la muestra de la Formación Paja



6.8 Análisis de difracción de rayos X (DRX)

Como resultado de la revisión bibliográfica, y debido al impedimento para realizar las campañas de campo y sus correspondientes muestreos, se tomaron en cuenta cuatro (4) secciones estratigráficas realizadas por Melo, L. (2008), sobre la Formación Los Santos, ubicadas de NW a

SE en las veredas La Navarra (**Figura 59;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), La Punta (**Figura 60;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), El Calicho (**Figura 61;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y Carrizal (**Figura 62;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); en las cuales se muestran seis (6) curvas que indican la proporción relativa de los minerales arcillosos simples e interestratificados, y una curva que indica la presencia de minerales amorfos. De igual manera, se presenta una curva de granulometría para cada intervalo de las columnas.

Por otra parte, se observaron los difractogramas (**Figura 63;Error! No se encuentra el origen de la referencia. a Figura 66;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), en los cuales, según Melo, L. (2008), se identificaron los siguientes minerales arcillosos en cada columna: illita tipo 2:1, en todas las muestras, caolinita tipo 1:1, en la mayoría de las muestras, el interestratificado 10 illita-14 caolinita, el interestratificado 10 illita-14 esmectita, en los miembros inferior y medio de la Formación Los Santos; en menor proporción clorita en el miembro inferior, y esmectita tipo 2:1, ocasionalmente en los miembros inferior y superior.

De acuerdo con Melo, L. (2008), la abundancia relativa de los minerales arcillosos corresponde en mayor proporción a la illita con un promedio de 76%, seguida por la caolinita con un promedio de 5-30% incrementando de base a tope. Luego se encuentra el interestratificado 10 illita-14 caolinita con un promedio de 9%, el interestratificado 10 illita-14 esmectita con un promedio de 7%, la clorita con un promedio de 9% (en el miembro inferior de la Formación Los Santos), y finalmente la esmectita con un promedio de 13% en los miembros inferior y medio.

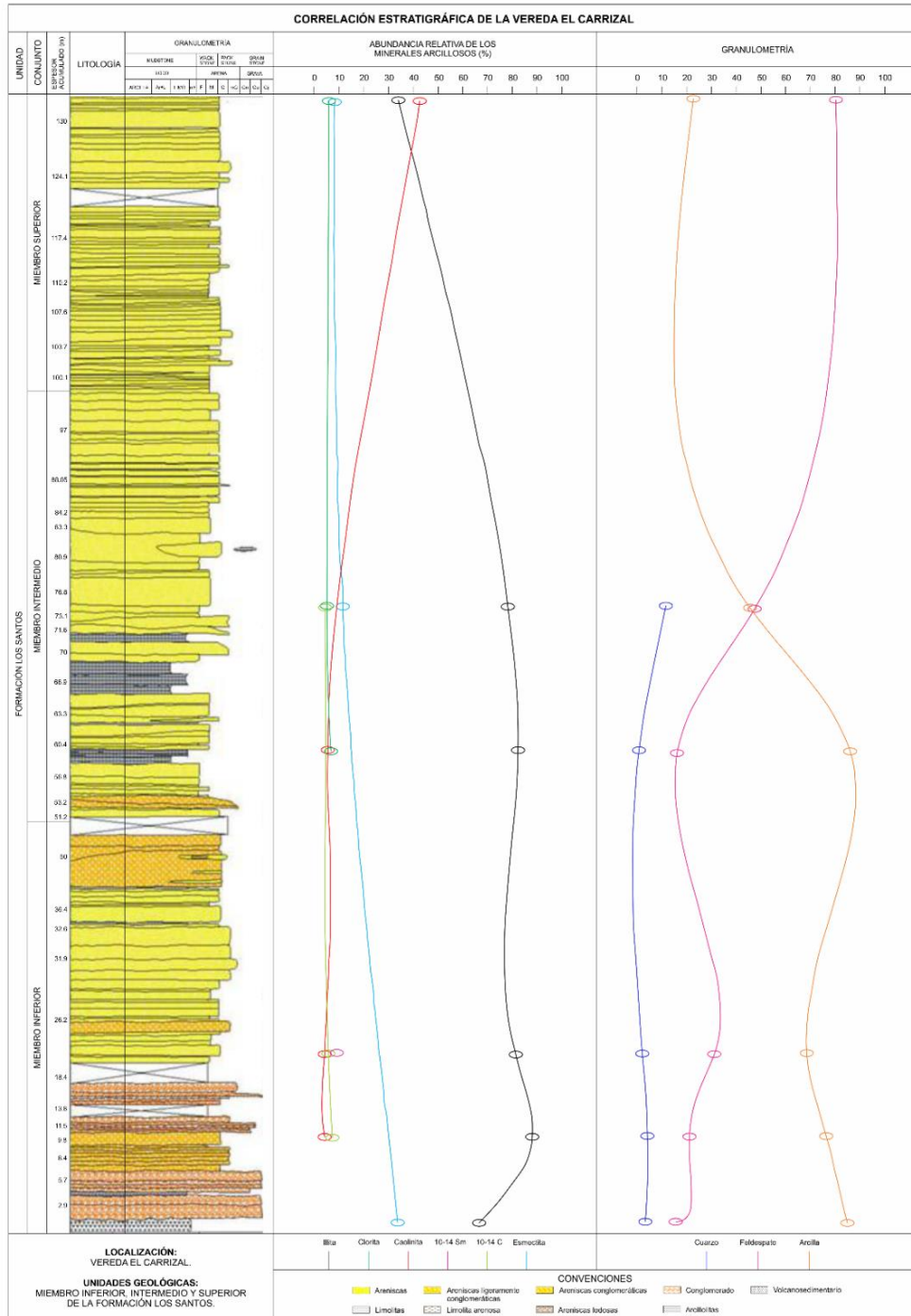
Las características de los minerales arcillosos identificados se describen a continuación con base en lo planteado por Melo, L. (2008):

- Illita: Presente en todas las muestras analizadas; se encuentra mal cristalizada en el miembro inferior de la Formación Los Santos, donde su índice de cristalinidad (I_c) es mayor a 4 [nm], y bien cristalizada en los miembros medio y superior de la misma, donde su I_c es menor a 4 [nm].
- Caolinita: Se encuentra mal cristalizada en los miembros inferior y medio de la formación y bien cristalizada en el miembro superior.
- Esmectita: Se presenta, en general, moderadamente cristalizada.
- Otros: Los demás minerales e interstratificados se encuentran mal cristalizados, lo que se evidencia en la morfología abierta de sus picos.

Asimismo, considerando los resultados del análisis de polvos desorientados (Bulk), se observan valores promedio de 66%, 30% y 4%, para arcillas, arena muy fina (cuarzo) y limo (feldespato), respectivamente.

Figura 60

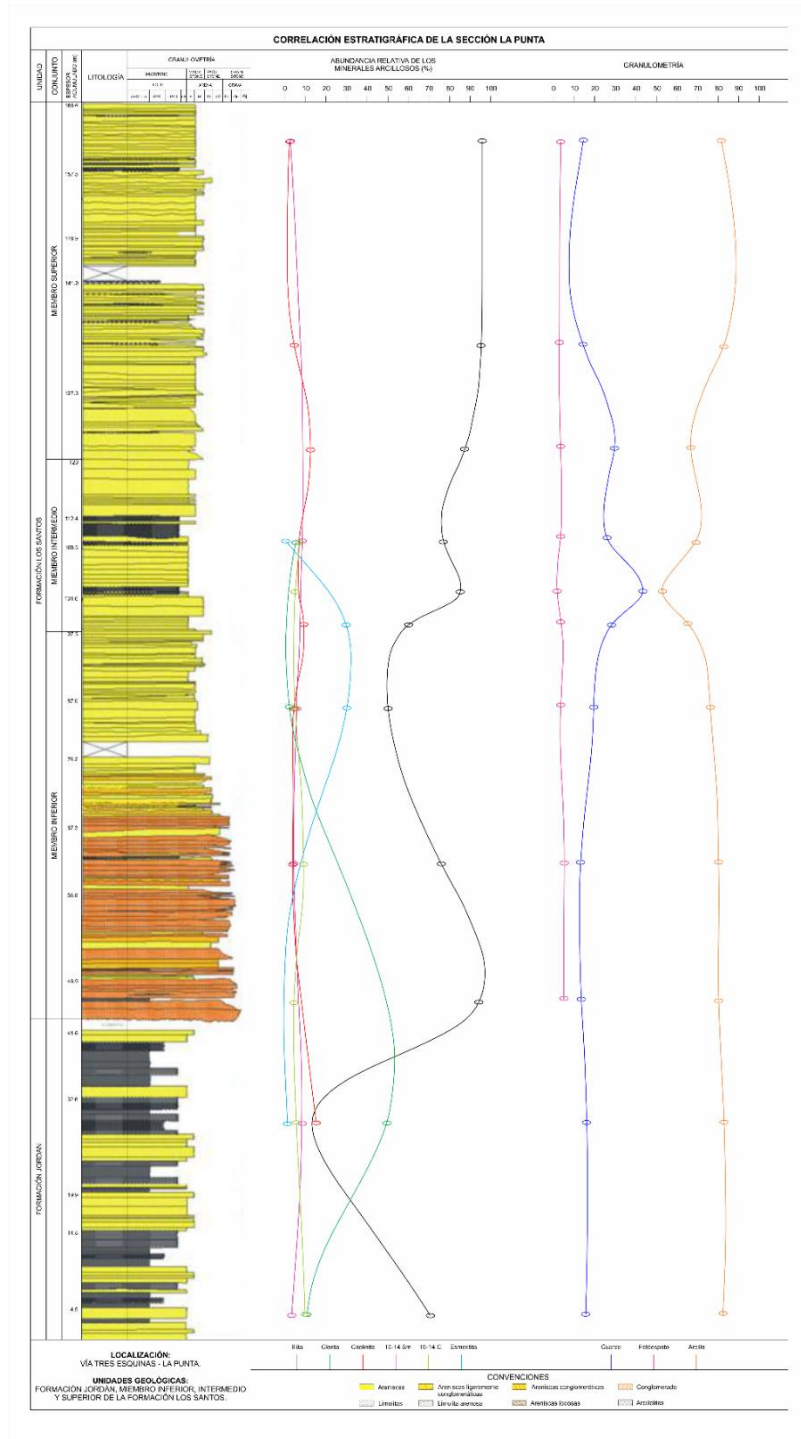
Correlación columna estratigráfica - mineralogía de arcillas, sección El Carrizal



Nota: Adaptado de Melo, L. (2008).

Figura 61

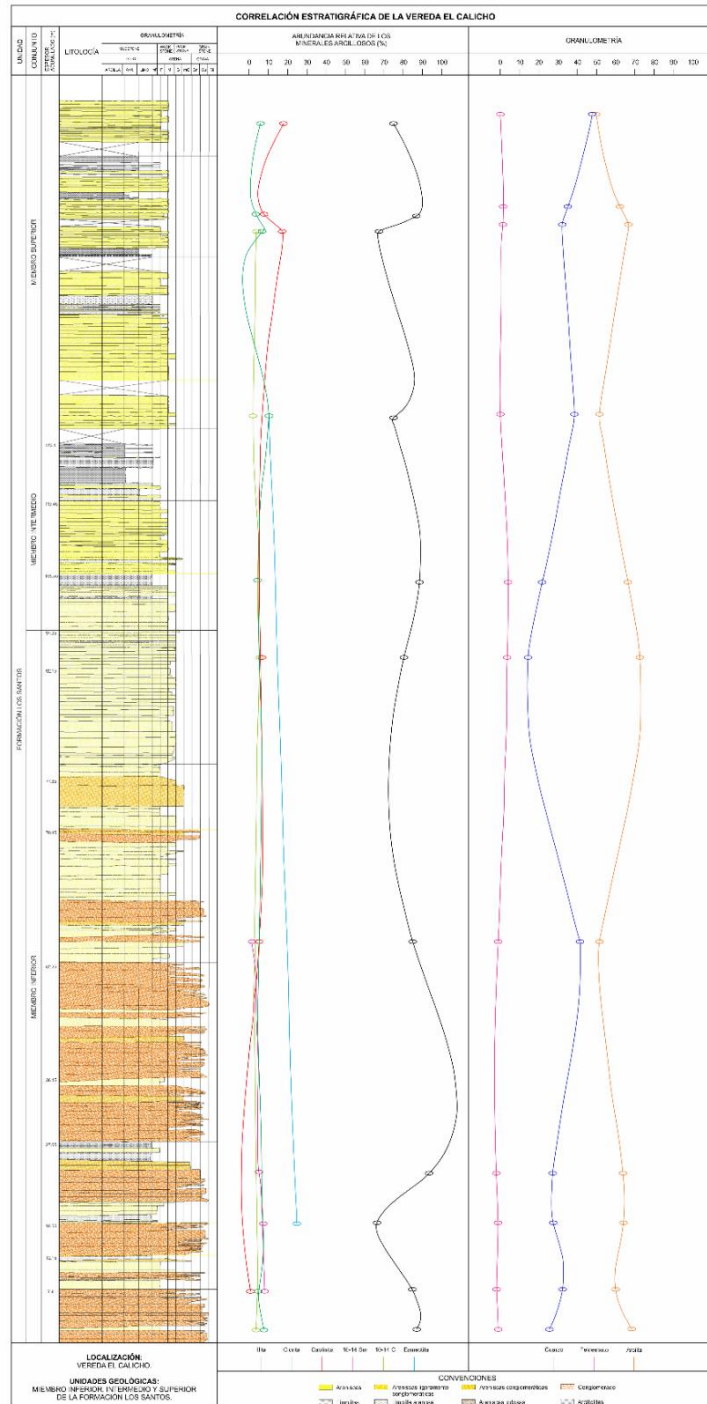
Correlación columna estratigráfica - mineralogía de arcillas, sección La Punta



Nota: Adaptado de Melo, L. (2008).

Figura 62

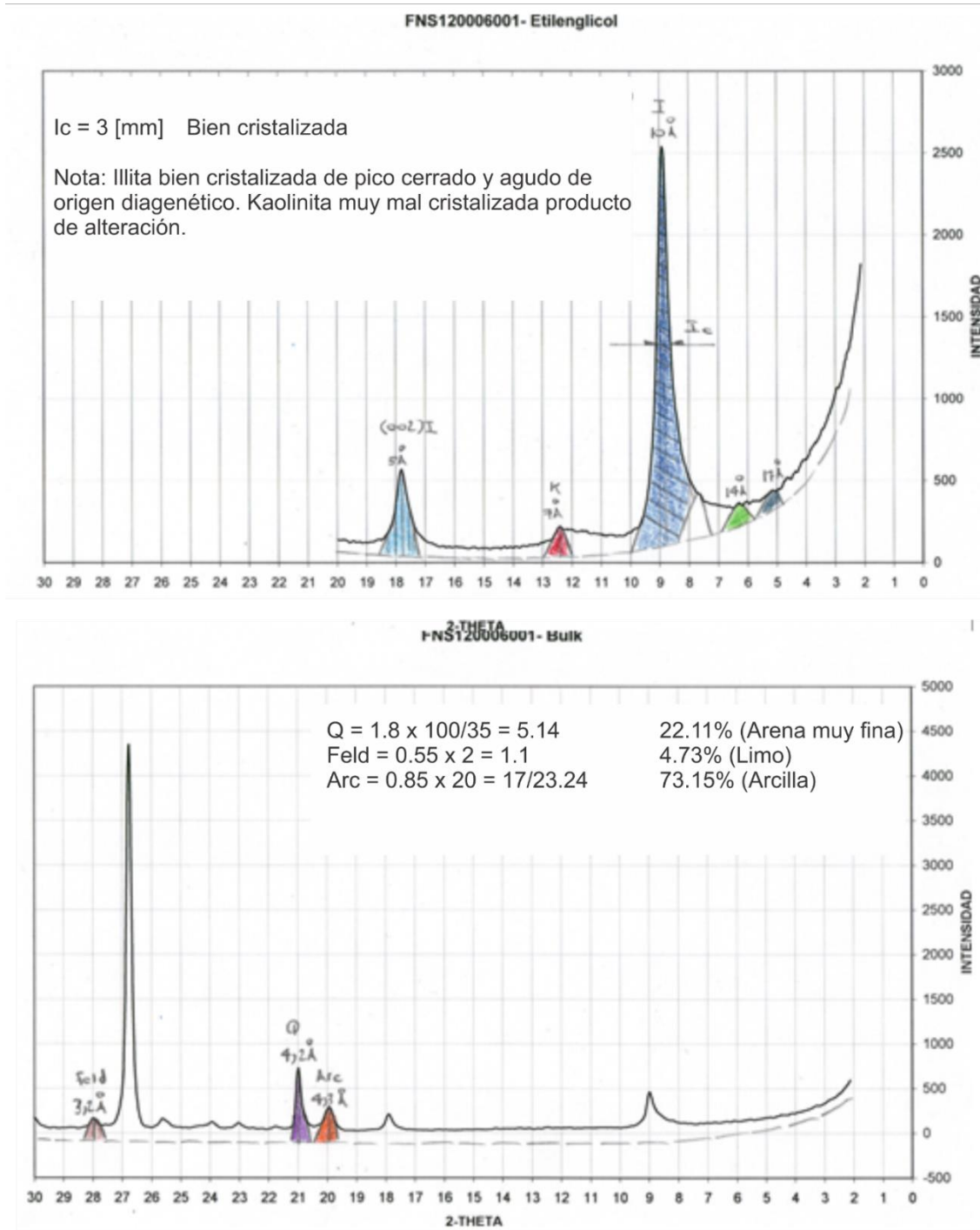
Correlación columna estratigráfica - mineralogía de arcillas, sección El Calicho



Nota: Adaptado de Melo, L. (2008).

Figura 63

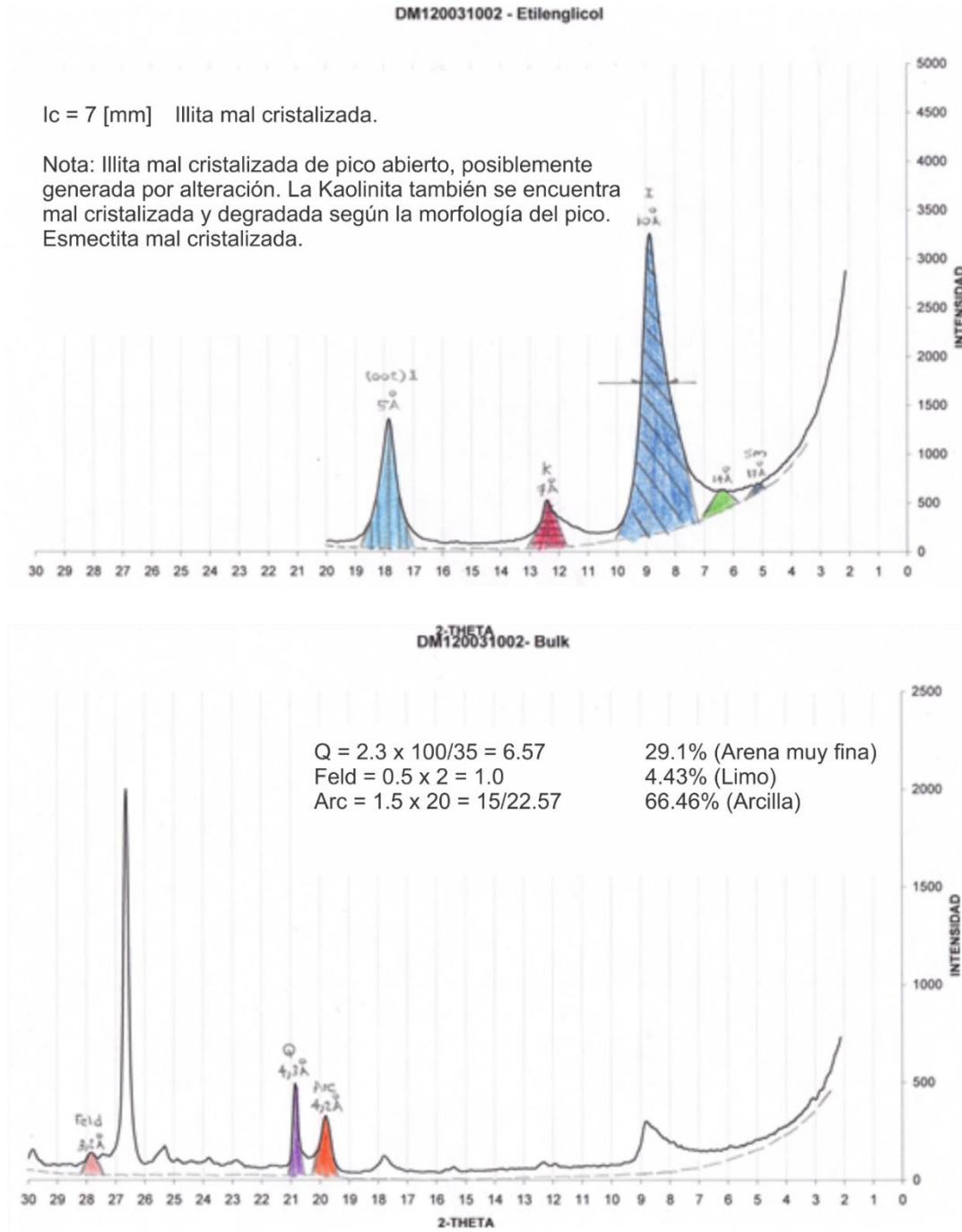
Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda La Navarra



Nota: Adaptado de INGEOMINAS (2007).

Figura 64

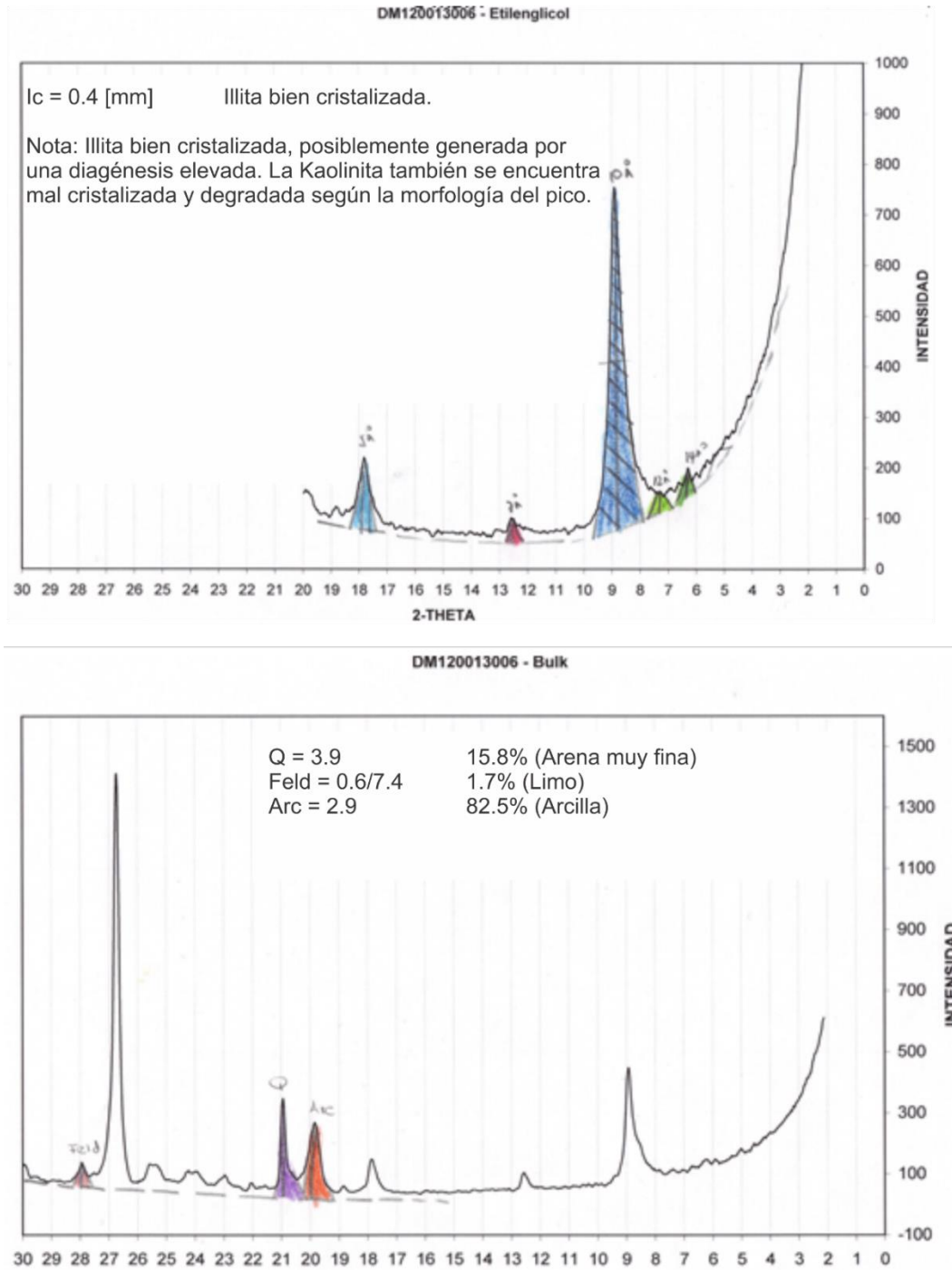
Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda La Punta



Nota: Adaptado de INGEOMINAS (2007).

Figura 65

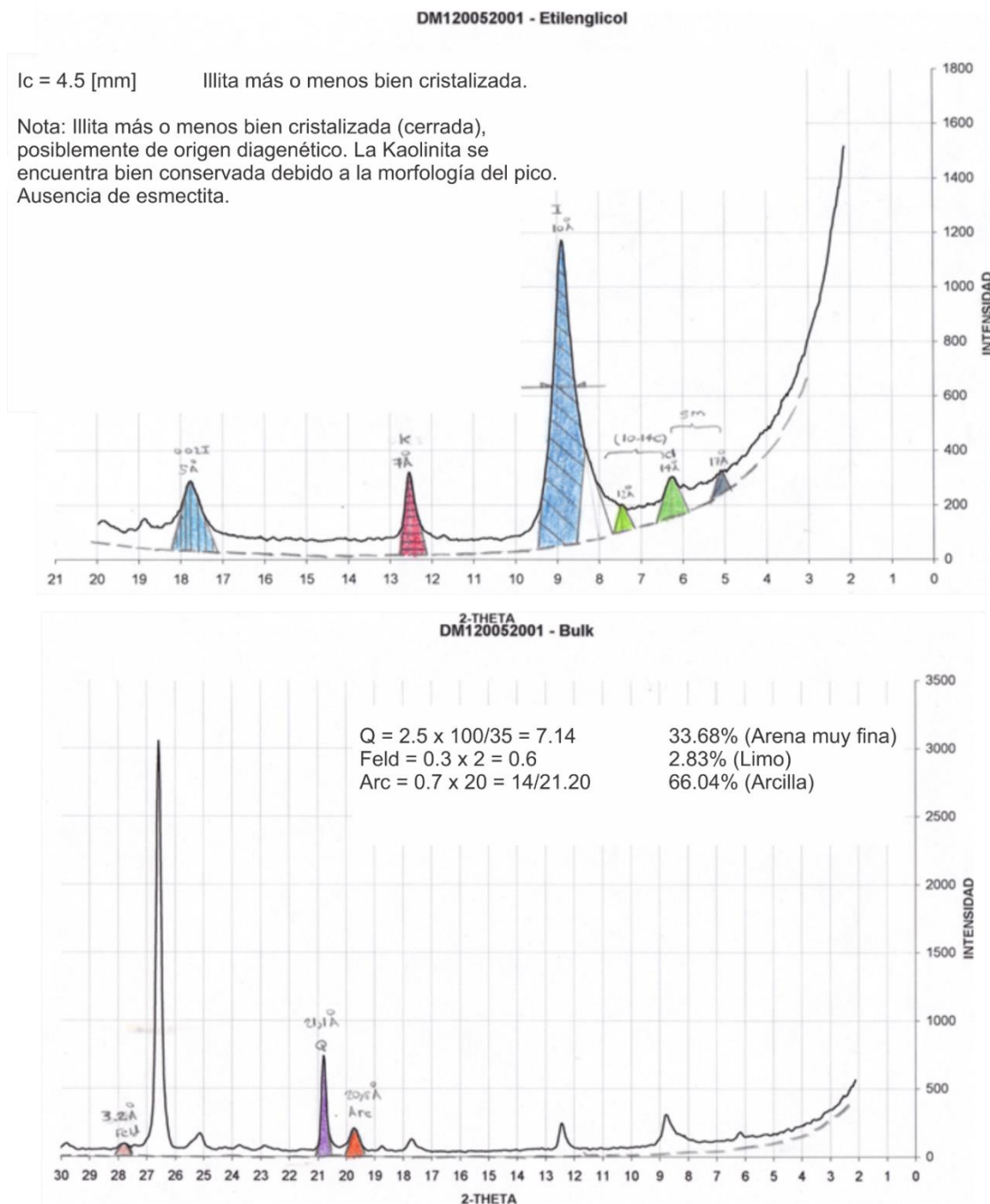
Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda Carrizal



Nota: Adaptado de INGEOMINAS (2007).

Figura 66

Difractogramas obtenidos de una muestra de la Formación Los Santos en la vereda El Calicho



Nota: Adaptado de INGEOMINAS (2007).

7 Discusión

Respecto a la hipótesis se puede afirmar que se cumple, dado que, como se observa en el mapa final de favorabilidad para la percolación, los sectores más adecuados se presentan en las cotas más altas de la Mesa, específicamente hacia el oriente de la zona de estudio, donde aflora la Formación Los Santos, de la cual, debido a que está constituida por intercalaciones de areniscas de grano fino con algunas areniscas de grano grueso cuya porosidad primaria alcanza el 15% en algunos sectores (Díaz, E. et al. 2009), se esperaba que presentara características más favorables para la infiltración del agua. Mientras que, las laderas y escarpes de la zona, teniendo en cuenta el conjunto de factores que presentan, como pendientes altas, que favorecen el escurrimiento superficial, y unidades litológicas con baja porosidad y permeabilidad (Fm. Jordán, Esquistos de Silgará, Granito de Pescadero), constituyen las zonas menos favorables para la percolación.

Por otra parte, los datos de los ensayos de granulometría realizados por INGEOMINAS (2007) sobre la Formación Los Santos indican que las muestras tomadas en esta corresponden a una arena limosa y una arena mal graduada ligeramente limosa; por lo tanto, son consideradas representativas de dicha unidad, ya que se compone principalmente de areniscas conglomeráticas con intercalaciones de areniscas finas, y delgadas capas de limolitas y arcillolitas (Díaz, E. et al. 2009). Sin embargo, los datos de los ensayos granulométricos realizados por Gómez y Cuervo (2012) en las formaciones Rosa Blanca y Paja, indican que las muestras corresponden a una arena limosa y a una arena mal graduada limosa, respectivamente; razón por la cual no son consideradas muestras representativas de las formaciones, puesto que, para el caso de la Fm. Rosa Blanca, esta se constituye principalmente por potentes capas de calizas intercaladas con capas delgadas de limolitas calcáreas (Díaz, E. et al. 2009), mientras que, la Fm. Paja está conformada principalmente

por limolitas intercaladas con algunas capas de areniscas arcillosas y limolitas calcáreas (Díaz, E. et al. 2009).

En lo relacionado con los ensayos de DRX sobre la Formación Los Santos, teniendo en cuenta que la variación de la fracción arcillosa genera cambios en el grado de permeabilidad del material (Melo, L. 2008), y que esto puede afectar sus propiedades hidrogeológicas, los miembros medio e inferior se constituyen como sellos o capas impermeables por su alto contenido arcilloso (Melo, L. 2008); mientras que, el miembro superior, por su parte, presenta niveles de areniscas separados por capas de arcillolitas, en donde se observa una disminución del porcentaje de la fracción arcillosa debido al aumento hasta del 50% de la fracción gruesa (Melo, L. 2008), razón por la cual este miembro puede contener pequeños acuíferos o estar asociado a un acuífero multicapa. Lo anterior concuerda con lo planteado por Díaz, E. et al. (2009), quien expone que los miembros inferior y medio presentan baja porosidad y baja permeabilidad debido a su alto contenido de matriz arcillosa; así mismo, el miembro superior de la formación presenta alta porosidad primaria (15%) asociada a porosidad intergranular y disolución de matriz y líticas, y media porosidad secundaria asociada al fracturamiento (Díaz, E. et al. 2009). Todo esto respalda lo descrito en la hipótesis, la cual plantea que, dentro de la zona de estudio, la Fm. Los Santos podría representar la unidad más favorable para la percolación.

8 Conclusiones

En la zona de estudio las pendientes se clasificaron en 7 categorías, de acuerdo con los rangos establecidos por el SGC (2017), expuestos en la Tabla 1, de las cuales las 3 primeras clases se presentan hacia el tope de la meseta, con porcentajes de 5.09% correspondiente a zonas planas, 6.41% a zonas suavemente inclinadas, 17.43% a zonas inclinadas; mientras que hacia las laderas predominan las clases correspondientes a zonas moderadamente abruptas y abruptas, con porcentajes de 24.62% y 35.18%, respectivamente. Así mismo, hacia los bordes de la meseta prevalecen las zonas muy abruptas, con 10.31%, y extremadamente abruptas, con 0.96% del área de estudio.

En cuanto a la curvatura de la superficie del terreno, debido a su morfología suave, predominan las zonas planas, las cuales favorecen el estancamiento del agua, abarcando 56.27% de la zona de estudio, mientras que, hacia los bordes de la meseta se observa el contraste entre las zonas cóncavas (21.19%) y convexas (22.53%), las cuales favorecen la concentración o dispersión del agua, respectivamente.

Se establecieron 4 ambientes morfogenéticos: denudacional, fluvial, estructural y antropogénico, de los cuales predomina el ambiente denudacional abarcando 57.56% del área total, seguido por el ambiente estructural con un porcentaje del 41.67%, el ambiente fluvial con un porcentaje de 0.67% y el ambiente antropogénico con un porcentaje de 0.10%.

Se identificaron 20 clases de cobertura del suelo dentro de los 5 grupos principales de unidades de cobertura según la leyenda de CORINE LAND COVER, donde la distribución porcentual de cada uno de ellos en la zona corresponde a: 1.63% a los territorios artificializados, 54.68% a los

territorios agrícolas, 43.21% a bosques y áreas seminaturales, 0% a áreas húmedas y 0.48% a superficies de agua.

Se delimitaron en total 28 cuencas en el área de estudio, de las cuales 21 presentan un área entre 1 y 10 [km²] y 7 presentan un área mayor a 10 [km²], siendo la Microcuenca Quebrada Los Fríos la de mayor extensión con un área de 80.94 [km²]. De acuerdo con los valores determinados del índice de drenaje (D_d) para cada cuenca, 2 de ellas se clasificaron como pobremente drenadas, 24 como moderadamente drenadas, y otras 2 como bien drenadas.

Partiendo de la valoración y el análisis de los insumos anteriormente mencionados, se logró determinar que los sectores más favorables para la percolación se encuentran, en su mayoría, hacia el tope y hacia el centro de la meseta estructural, asociados en gran parte a las pendientes bajas y a la Fm. Los Santos; mientras que los sectores con menor favorabilidad para la percolación se encuentran hacia los escarpes y laderas, donde las pendientes del terreno son más altas.

Con respecto a los perfiles de meteorización de las unidades litológicas aflorantes en la zona de estudio, dado que no se encontró información bibliográfica suficiente, ni fue posible llevar a cabo las campañas de campo y sus correspondientes muestreos, no se logró describir con detalle cada uno de los estadios de meteorización con sus respectivas propiedades físicas y mecánicas.

Dados los resultados granulométricos de los ensayos realizados por diversos autores, se tiene que, para la Formación Rosa Blanca, las muestras corresponden a una arena limosa y una arena mal graduada ligeramente limosa; para la Formación Paja, la muestra se clasifica como una arena mal graduada limosa, y para la Formación Los Santos, la muestra corresponde a una arena mal graduada ligeramente limosa.

De acuerdo con los resultados de los análisis de DRX realizados en investigaciones previas, los minerales arcillosos corresponden en su mayoría a la illita, con un promedio de 76%, seguida por la caolinita, con un promedio de 5-30% incrementando de base a tope. Dado que la composición es predominante illítica, con una cristalización moderada a buena, los niveles arcillosos de la Formación Los Santos presentan características plásticas e impermeables a nivel interfoliar.

Con base en la información bibliográfica, el análisis de las columnas estratigráficas de la zona de estudio y los datos de DRX, se deduce que el miembro superior de la Formación Los Santos, dado que presenta intercalaciones de niveles de areniscas y arcillolitas, podría considerarse como un posible acuífero, en este caso, tal vez un acuífero multicapa.

9 Recomendaciones

Debido a la disponibilidad de información, el mapa de cobertura de los suelos presenta una leve inconsistencia, dado que se realizó con base en dos fuentes de información diferentes (SIAC-IDEAM y SGC), cuya escala de trabajo no coincidía; por lo cual, se sugiere emplear insumos más actualizados y que cuenten con el mismo nivel de detalle para obtener resultados más precisos.

Se recomienda realizar la verificación de las unidades geológicas y geomorfológicas por medio de visitas de campo.

Dado que el mapa final es una estimación de la favorabilidad para la percolación en la zona de estudio, está sujeto a mejoras asociadas con la implementación de fuentes de información más detalladas.

Es aconsejable elaborar perfiles de meteorización de las unidades litológicas aflorantes, para construir un registro detallado que complemente la información escasa existente en la actualidad sobre dicho tema en la zona de estudio.

Se sugiere realizar ensayos de difracción de rayos X (DRX) en las formaciones Rosa Blanca y Paja para analizar la composición y cantidad de minerales arcillosos en las mismas, con el fin de asociar dicha composición con sus propiedades químicas y estructurales.

Referencias

- Barrios, I. (1985). La edafología: origen, desarrollo y conceptos. Vasconia. Cuadernos de Geografía e Historia. 95-98p.
- Cárdenas, L. (04/06/2019). Tres años después, Los Santos, Santander, permanece sin agua potable. El Tiempo. Recuperado de: < <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/el-municipio-los-santos-santander-sigue-sin-agua-370856> > Consultado el 21/mayo/2020.
- Carvajal, J. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Bogotá. 83p.
- Carvajal, H. Cortés, R. Romero, F. Montero, J. Calderón, Y. (2004). Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica. INGEOMINAS. Bogotá.
- Dearman, W. R. (1995). Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the BS5930:1981 proposals. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 267-276.
- Díaz, Eliana Jimena. Contreras, Nathalia María. Pinto, Jorge Eduardo. Velandia, Francisco. Morales, Carlos Julio. Hincapie, Gloria. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las Unidades Geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander. Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. Vol. 31. N° 1. 10p.
- Julivert, M. Barrero, J. Navas, G. (1964). Geología de la Mesa de Los Santos. Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander.

- Elizalde, E. Legorreta, H. Zea, C. (2018). Manual de Prácticas de Laboratorio de Comportamiento de Suelos. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Geotecnia. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT). (2003). Municipio de Los Santos. Departamento de Santander. Caracterización Componente Físico-Biótico.
- Flórez, A. (2003). Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de < <https://bit.ly/34VHFgN> >
- Forero, María Camila. Fuentes, María Alejandra. (2015). Contribución en la identificación y caracterización de perfiles de meteorización de rocas cristalinas, expertos al oriente del área de Bucaramanga. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 161p.
- García, C. (1997). Algunos análisis físico-químicos para la identificación de los minerales componentes de una arcilla. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 33p.
- Gómez, J. Cuervo, R. (2012). Estudio geológico enfocado a la caracterización paisajística de la Mesa de Los Santos, Santander, Colombia. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Horton, R. E. (1932). Drainage basin characteristics. Trans. Amer. Geophys. Union. 13pp. 350-361.
- IDEAM. (2002). Decreto No. 1729 DE 2002 – Cuencas hidrográficas.

- IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.
- IDEAM. (2013). Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM. Bogotá, D. C., Colombia.
- IDEAM. (2014). Mapa de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000. Periodo 2010-2012. Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). Catálogo de mapas. Consultado el 01/10/2020. <<http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>>
- IGAC (1998a). Hoja topográfica No. 120IID del Departamento de Santander. Escala 1:25.000.
- IGAC (1998b). Hoja topográfica No. 120IVB del Departamento de Santander. Escala 1:25.000.
- IGAC (1998c). Hoja topográfica No. 120IVD del Departamento de Santander. Escala 1:25.000.
- IGAC (1998d). Hoja topográfica No. 135IIB del Departamento de Santander. Escala 1:25.000.
- IGAC (2014a). Hoja topográfica No. 120IVA del Departamento de Santander. Escala 1:25.000.
- IGAC (2014b). Hoja topográfica No. 135IIA del Departamento de Santander. Escala 1:25.000.
- IGAC (2015). Hoja topográfica No. 120IVC del Departamento de Santander. Escala 1:25.000.
- INGEOMINAS (2007). Investigación Geológica e Hidrogeológica en la Mesa de los Santos y Sector Nordeste de Curití. Memoria Explicativa. Bucaramanga.
- INGEOMINAS (2009). Informe Hidrogeológico de la Mesa de Los Santos. Bogotá.

- Justo, A. y Morillo, E. (1999). Técnicas de Difracción de Rayos X para la Identificación Cualitativa y Cuantitativa de Minerales de la Arcilla. Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla.
- Leiva, O. (2012a). Anexo A. Glosario de Unidades y Subunidades Geomorfológicas. Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. SGC (Servicio Geológico Colombiano).
- Leiva, O. (2012b). Informe Mapa de Unidades Geomorfológicas de la Plancha 120 Escala 1:100.000, Departamento de Santander. INGEOMINAS.
- Leiva, O. (2012c). Memoria Explicativa del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa - Plancha 120. Bucaramanga, Departamento de Santander. INGEOMINAS.
- Melo, L. (2008). Mineralogía de arcillas y estudio microestructural de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos y Sector Nordeste de Curití. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 37p.
- Mendivelso, D. (2009). El sistema ITC para el levantamiento geomorfológico y análisis del terreno (tomado y adoptado como material de apoyo para el curso de movimientos en masa). Documento INGEOMINAS. Páginas 15 – 20. Bogotá.
- Noticias Caracol (03/03/2018). Habitantes de la mesa de Los Santos no solo conviven con temblores, también con la falta de agua. Colombia. Recuperado de: < <https://noticias.caracoltv.com/colombia/habitantes-de-la-mesa-de-los-santos-no-solo-conviven-con-temblores-tambien-con-la-falta-de-agua> > Consultado el 21/mayo/2020.

Royero, J. M., Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander. Memoria Explicativa. INGEOMINAS.

Servicio Geológico Colombiano. (2015). Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa. Plancha 120. Bucaramanga.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000. Bogotá, D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

Universidad de Alicante. (s.f.). Difracción de Rayos X. <
<https://ssti.ua.es/es/instrumentacioncientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html> > Consultado el 24/02/2020.

Universidad Complutense. (s.f.). Madrid. Difracción de Rayos X (DRX). <
<https://www.ucm.es/tecnicasgeologicas/difraccion-de-rayos-x-drx> > Consultado el 24/02/2020.