

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Título:

Caracterización fotogeológica y de imágenes satelitales de la zona suroccidental de la cuenca de la quebrada Curití, dpto de Santander.

Laura Victoria Díaz Melo, y Jonathan Steven Niño Ríos

Trabajo de grado para optar el título de Geólogo

Directora:

Geóloga Yully Katherine Araque Núñez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Dedicatoria

A mis padres, Hugo, María Victoria y María Eloísa, por siempre estar presentes en cada momento siendo mi soporte, brindándome amor y compañía incondicional.

A mi familia quienes estuvieron presentes, siempre con disposición a colaborar y ayudarme en los momentos más difíciles.

Laura Victoria Díaz Melo.

A mi madre Matilde y a mi tía Teresa por darme los recursos y el aliento para terminar este proceso educativo.

A mis Docentes de Primaria y Secundaria por las enseñanzas impartidas siendo la bases para lograr este título profesional; en especial a la profesoras Lady Díaz (QEPD) y María de la Paz por inculcar la ética profesional.

Jonathan Steven Niño Ríos.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Agradecimientos

Infinitas gracias a la profesora Yully Araque que siempre estuvo presente en cada momento, dispuesta a brindar su ayuda, conocimiento y siendo guía durante la realización de este trabajo.

Al profesor Francisco Velandia quien siempre estuvo dispuesto a brindar su ayuda y orientación en el desarrollo del proyecto como evaluador.

A Sebastián y Juan R. por su apoyo, paciencia colaboración y consejos brindados.

Al Ing. Buendía y a Átala por permitirnos el uso del Laboratorio de análisis petrofísicos del parque tecnológico UIS Guatiguara.

A la Universidad Industrial de Santander, a la escuela Geología y cada uno de los profesores que hicieron parte de nuestra formación profesional.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Tabla de contenido

Introducción.....	18
1. Objetivos.....	19
1.1 Objetivo General.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Localización	21
3. Antecedentes.....	23
4. Contexto geológico.....	29
4.1 Estratigrafía.....	30
4.1.1 Formación Los Santos.....	31
4.1.1.1 Segmento I:.....	32
4.1.1.2 Segmento II:.....	32
4.1.1.3 Segmento V:.....	33
4.1.1.4 Segmento VI.....	33
4.1.2 Formación Rosa Blanca.....	33
4.1.3 Formación Paja.....	34
4.1.4 Formación Tablazo.....	35
4.1.5 Formación Simití.....	35

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

4.1.6 Depósitos Cuaternarios Aluviales.....	36
4.1.7 Depósitos Cuaternarios Coluviales y de Derrubio.....	36
4.2 Geología estructural.....	36
4.2.1 Falla Curití.....	37
4.2.2 Otras estructuras.....	37
5. Justificación.....	38
6. Marco teórico.....	39
6.1 Conceptos importantes.....	39
6.1.2 Karst.....	39
6.1.3 Esfuerzo y deformación.....	41
6.1.4 Deformación Frágil.....	42
6.1.5 Diaclasas.....	43
6.1.6 Fallas.....	46
6.1.7 Ambiente estructural.....	47
6.1.8 Ambiente Fluvial.....	48
6.1.9 Ambiente Denudacional.....	48
6.1.10 Ambiente Antropogénico.....	49
6.1.11 Análisis Estructural.....	49

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

6.1.12 Análisis Geométrico.....	49
6.1.13 Análisis Cinemático.....	51
6.1.14. Análisis de porosidad y permeabilidad.....	51
6.1.14.1 Porosidad:.....	51
6.1.14.2 Permeabilidad:.....	52
7. Metodología.....	52
7.1 Reconocimiento de la zona:.....	53
7.2 Recopilación bibliográfica:.....	53
7.3 Adquisición y procesamiento de Imágenes:.....	54
7.4 Realización de Mapas.....	58
7.5 Control de Campo.....	58
7.6 Análisis de Resultados.....	59
7.7. Redacción del informe final.....	65
8. Resultados.....	66
8.1 Interpretación fotogeológica.....	66
8.1.1 Unidad Fotogeológica 1.....	68
8.1.2. Unidad Fotogeológica 2.....	69
8.1.3. Unidad Fotogeológica 3.....	70

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

8.1.4 Unidad Fotogeológica 4.....	72
8.1.5 Unidad Fotogeológica 5.....	73
8.1.6 Unidad Fotogeológica 6.....	74
8.2 Interpretación estructural	75
8.2.1 Falla de Curití- Las cruces.	76
8.2.2 Falla Cajonera.	76
8.2.3 Falla La Laja.	76
8.2.4 Falla Paloblanco.....	77
8.2.5 Falla Tambor.....	77
8.2.6 Falla Buenos Aires.....	77
8.3 Interpretación geomorfológica.....	80
8.3.1 Subunidades	83
8.3.1.1 Ladera estructural de cuestras (Scle):.....	83
8.3.1.2 Laderas de contrapendiente de cuestra (Sclp):.....	84
8.3.1.3 Laderas escalonadas (Sles):	85
8.3.1.4 Escarpe de línea de falla (Slfp):	86
8.3.1.5 Sierras y lomos de presión (Slp):	87
8.3.1.6 Sierra sinclinal (Ss):.....	88

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

8.3.1.7 Sierras anticlinales (Ssan):	89
8.3.1.8 Laderas de contrapendiente sinclinal (Sscp):.....	90
8.3.1.9 Ladera estructural de sierra homoclinal denudada (Sshle):	92
8.3.1.10 Laderas estructurales sinclinales (Ssle).....	93
8.3.1.11 Cima (Dc):	94
8.3.1.12 Lomas denudadas (Dld):	95
8.3.2. Formas Exokársticas.	96
8.4. Análisis de vegetación.	97
8.5. Análisis de porosidad y permeabilidad.	109
9. Discusión.....	117
10. Conclusiones.....	121
11. Recomendaciones	124
Referencias.....	126

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Índice de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio. En la figura superior se observa el área en un marco regional y en la figura inferior se observa a detalle el área abarcada en este trabajo.	22
Figura 2. Localización de los datos de Ingeominas en el área de estudio.	27
Figura 3. Vista regional de la Mesa de Barichara con distribución geográfica de los puntos de manifestación de acción de aguas subterráneas. Tomado y modificado de INGEOMINAS (2006).	28
Figura 4. Columna generalizada que muestra la sucesión sedimentaria que se ha reportado para la zona. Tomado y adaptado de Pulido (1979)	31
Figura 5. Esquema representativo del sistema kárstico donde se puede observar la remoción, transporte y depositación de material soluble producto de la interacción de aguas que se infiltran en el subsuelo. Tomado de Ford & Williams, 2013	40
Figura 6. Elipse de esfuerzos que representa la magnitud y orientación de los tensores de esfuerzos principales. Tomado de Fossen (2010).	42
Figura 7. Ilustración de la orientación de esfuerzos principales (A) y su relación en el origen de las fracturas formadas por mecanismos de tensión (B) y por mecanismo de cizallamiento (C). Tomado y Modificado de Van der Plujim & Marshak, (2004).	44
Figura 8. (A) Bloque diagrama ilustrativo que muestra las relaciones espaciales entre diaclasas sistemáticas y no sistemáticas (B) Relaciones angulares entre diaclasas angulares y los diferentes nombres que pueden recibir dependiendo del ángulo de diedro. Tomado y Modificado de Van der Plujim & Marshak, (2004).	45

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

- Figura 9. Tres tipos de fallas principales, sus direcciones de esfuerzo y movimiento característico de bloques, P Corresponde a compresión y T a tensión. Figura tomada de Fossen (2010).....47
- Figura 10. Ejemplo de representación gráfica de datos de diaclasa en diagrama de rosas a la izquierda, representación de datos de rumbo y a la derecha datos de buzamiento (Tomado de Bejarano & Navas, 2018).....50
- Figura 11. Metodología usada para la realización de este trabajo de investigación.53
- Figura 12. Fotografías aéreas obtenidas del IGAC, estas cubren el área de trabajo y corresponden al vuelo C-2692 y línea de vuelo No. 757
- Figura 13. Equipo Core Pet Drill Press, Universidad Industrial de Santander. Sede de Guatiguará.....62
- Figura 14. Toma de mediadas de los Plugs con pie de rey, Laboratorios de Petrofísica. Universidad Industrial de Santander. Sede de Guatiguará.....63
- Figura 15. A) Balanza electrónica, con pesos para su calibración B) Medición de peso del plug correspondiente a la muestra D01 07.....64
- Figura 16. A) Equipo Keyphy B) Equipo Core pet, Universidad Industrial de Santander. Sede de Guatiguará.....65
- Figura 17. Mapa generalizado obtenido de la interpretación fotogeológica producto de uso de imágenes satelitales, fotografías aéreas y Google Earth. (Para detalle del mapa fotogeológico ver ANEXO 1).67
- Figura 18. Control de campo de la unidad fotogeológica 1 correspondiente a la llamada

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

- formación Los Santos, donde se observa la predominancia de paquetes de arenisca cuarzosa resistente a la meteorización. Fotografía tomada en Pescaderito, Curití.69
- Figura 19. Control de campo de la Unidad Fotogeológica 2 correspondiente a la Formación Rosa Blanca, en esta se pueden observar las capas muy gruesas de caliza formando laderas suaves y de baja pendiente. Foto tomada en el municipio de Curití.70
- Figura 20. Control de campo de la Unidad Fotogeológica 3 correspondiente a la Formación Paja, en esta se pueden observar el comportamiento de las rocas en campo, formando laderas suaves y onduladas. Foto tomada en la vereda Cuchicute, Curití.71
- Figura 21. Control de campo de la Unidad Fotogeológica 4 correspondiente a la llamada Formación Tablazo donde se observa la predominancia de paquetes resistentes de Caliza con evidencias de disolución. Foto tomada en la vereda Dos Quebradas.73
- Figura 22. Control de campo de la unidad 5 correspondiente a la formación Simití donde se observa predominancia de lodolitas Foto tomada en la vereda dos quebradas.....74
- Figura 23. A) Modelo 3D de zona de estudio B) Modelo con escala de exageración 3:1 en la vertical.....75
- Figura 24. Mapa estructural con Diagramas Rosa de diaclasas generados a partir de la base de datos brindada por el Ingeominas donde se asignaron las posibles direcciones de esfuerzos actuantes en el área, estos datos no son determinantes dado su baja densidad.....79
- Figura 25. Mapa generalizado obtenido de la interpretación fotogeológica producto de uso de imágenes satelitales, fotografías aéreas y Google Earth. Para detalle del mapa fotogeológico ver ANEXO 2.....81

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

- Figura 26. Imagen tomada de Google Earth Pro donde muestra una ladera estructural de cuestras, esta geoforma se destaca por el área que abarca dentro de la zona de estudio y la pendiente considerable que posee.84
- Figura 27. Ladera de contrapendiente de cuestra (Sclp), esta geoforma se destaca por la corta longitud de su ladera y una morfología escarpada. Imagen captada por medio de Google Earth Pro.85
- Figura 28. En esta imagen capturada a través de Google Earth Pro, se pueden apreciar las diferentes irregularidades topográficas de la ladera en forma de escalones que le dan nombre a la geoforma (Sles).86
- Figura 29. En esta imagen capturada a través de Google Earth Pro, se pueden apreciar las diferentes irregularidades topográficas de la ladera en forma de escalones que le dan nombre a la geoforma (Sles).87
- Figura 30. Las sierras y lomos de presión como el mostrado en la imagen se encuentran asociados al trazo de las fallas y generalmente se alienan de forma paralela con dichas estructuras. Imagen obtenida mediante Google Earth Pro.88
- Figura 31. La imagen de Google Earth Pro, muestra una ladera sinclinal, estas geoformas se encuentran asociadas a la presencia de un plegamiento considerable en la parte sur de la zona de estudio.89
- Figura 32. El principal factor morfogenético en el área de estudio es el estructural, lo que se ve reflejado en la presencia de geoformas como la mostrada en la imagen correspondiente a una sierra sinclinal. Captura realizada mediante Google Earth Pro.90

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

- Figura 33. La imagen muestra una ladera de contrapendiente sinclinal la cual se define por ser parte de una estructura mayor en este caso un pliegue de tipo sinclinal en cuyo flanco los estratos se inclinan en sentido opuesto a la pendiente. Imagen obtenida mediante Google Earth Pro.92
- Figura 34. La Ladera estructural de sierra homoclinal denudada presentada en la imagen posee un grado considerable de denudación apreciable en la incisión de los drenajes. Captura obtenida por medio de Google Earth Pro.93
- Figura 35. La imagen tomada de Google Earth Pro muestra una ladera estructural de sierra sinclinal, se caracteriza por ser parte de un pliegue de tipo sinclinal (uno de los flancos internos del pliegue).....94
- Figura 36. Imagen tomada de Google Earth Pro, muestra cima caracterizada por su geometría convexa y de morfología alargada producto de procesos erosivos.....95
- Figura 37. La ladera denuda presentada en la imagen se define principalmente por el desarrollo de suelos debido a procesos de meteorización considerable. Imagen capturada de Google Earth Pro.96
- Figura 38. Imágenes tomadas de climate.data.org representando el climograma de los municipios de San Gil y Curití.99
- Figura 39. Imágenes NDVI obtenidas gracias a la combinación de bandas, el área de trabajo corresponde al recuadro negro y los valores verdes oscuros representan valores de NDVI.100
- Figura 40. Análisis de cambios en NDVI promedio respecto a la formación geológica, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.102

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 41. Análisis de cambios en NDVI máximo respecto a la formación geológica, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.	103
Figura 42. Análisis de cambios en NDVI mínimo respecto a la formación geológica, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.	104
Figura 43. Análisis de cambios en NDVI promedio respecto al tiempo, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.	106
Figura 44. Análisis de cambios en NDVI Máximo respecto al tiempo, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.	107
Figura 45. Análisis de cambios en NDVI mínimo respecto al tiempo, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.	108
Figura 46. Mapa de estaciones de donde se obtuvieron muestras para toma de datos de permeabilidad y porosidad.	116
Figura 47. Mapa Fotogeológico con estaciones de donde se obtuvieron muestras para toma de datos de permeabilidad y porosidad.	120

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Índice de tablas

Tabla 1.Coordenadas de localización del área de estudio, Sistema de referencia Magna Sirgas	21
Tabla 2.Valores designados a las bandas producto de los datos tomados por los sensores OLI & TIRS del satélite LANDSAT 8 (basado en Jeevalakshmi et al., 2016)	55
Tabla 3.Síntesis geomorfológica de los rasgos encontrados en el área de estudio, cabe aclarar que los términos utilizados son basados en Carvajal (2012).	80
Tabla 4. . Valores de permeabilidad y porosidad obtenidos para las tres muestras usando el equipo Keyphi.....	110
Tabla 5.Tabla de medidas de diámetro y longitud de los plugs.....	111
Tabla 6.Tabla de calibración de balanza.....	114
Tabla 7.Peso en gramos de cada uno de los Plugs.....	114
Tabla 8. . Valores de permeabilidad y porosidad obtenidos para las tres muestras usando el equipo Keyphi.....	115

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Resumen

Título: Caracterización fotogeológica y de imágenes satelitales de la zona suroccidental de la cuenca de la quebrada Curití, dpto de Santander.*

Autores: Laura Victoria Díaz Melo**

Jonathan Steven Niño Ríos**

Palabras Clave: Curití, San Gil, Imágenes Satelitales, NDVI, Geomorfología, Porosidad, Permeabilidad.

Descripción:

La Cordillera Oriental es una de las tres cordilleras que hacen parte de la orografía de Colombia, en su flanco occidental se encuentra el municipio de San Gil que hace parte del departamento de Santander. Con el fin de garantizar la disponibilidad del recurso hídrico a sus habitantes es de gran importancia la realización de estudios hidrogeológicos que ayuden a entender mejor los diferentes procesos que hacen parte del ciclo hidrogeológico mediante la integración de las diferentes disciplinas de la geología con énfasis en la geología estructural y la estratigrafía.

La generación y análisis de los resultados obtenidos permitieron establecer que la zona con mayor vegetación en cualquier época del año está en el SE sobre la formación los Santos ya que cuenta con una buena porosidad y permeabilidad, indicando zona reservorio. Mediante datos estructurales de estudios anteriores se pudo entender de mejor manera el comportamiento de las fracturas y a su vez el comportamiento de la escorrentía en la zona. Por otra parte, no se observó el desarrollo de formas exokársticas en el análisis de geoformas en las formaciones Rosa Blanca, Paja y Tablazo en el área de trabajo por lo que probablemente es mayor el desarrollo de formas Endo kársticas, por percolación de aguas facilitada por fallamiento y desclasamiento presente.

*Trabajo de grado

**Facultad de fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Geóloga Yully Katherine Araque Núñez.

Abstract

TITLE: "PHOTO GEOLOGICAL AND SATELLITE IMAGES CHARACTERIZATION OF THE SOUTHWEST AREA OF THE QUEBRADA CURITÍ BASIN, DEPARTMENT OF SANTANDER. "**

Authors: : Laura Victoria Díaz Melo**

Jonathan Steven Niño Ríos**

Keyword: Curití, San Gil, Satellite Images, NDVI, Geomorphology, Porosity, Permeability.

Description:

The Cordillera Oriental is one of the three mountain ranges that are part of the orography of Colombia, on its western flank is the municipality of San Gil, which is part of the department of Santander. To guarantee the availability of water resources to its inhabitants, it is of great importance to carry out hydrogeological studies that help to better understand the different processes that are part of the hydrogeological cycle through the integration of the different disciplines of geology with emphasis on the structural geology and stratigraphy.

The generation and analysis of the results obtained allowed us to establish that the area with the highest vegetation at any time of the year is in the SE on the Los Santos formation, since it has good porosity and permeability, indicating a reservoir zone. Using structural data from previous studies, it was possible to better understand the behavior of the fractures and, in turn, the behavior of the runoff in the area. On the other hand, the development of exokarstic forms was not observed in the analysis of geofoms in the Rosa Blanca, Paja and Tablazo formations in the work area, so the development of Endokarstic forms is probably greater, due to water percolation facilitated by faulting and declassification present.

*Trabajo de grado

**Facultad de fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Geóloga Yully Katherine Araque Núñez.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Introducción.

La Cordillera Oriental es una de las tres cordilleras que hacen parte de la orografía de Colombia, en su flanco occidental se encuentra el municipio de San Gil que hace parte del departamento de Santander. Con el fin de garantizar la disponibilidad del recurso hídrico a sus habitantes es de gran importancia la realización de estudios hidrogeológicos que ayuden a entender mejor los diferentes procesos que hacen parte del ciclo hidrogeológico mediante la integración de las diferentes disciplinas de la geología con énfasis en la geología estructural y la estratigrafía; entregando un producto en escala 1: 10000 con análisis de imágenes, basados en escala 1:25000, partiendo de insumos cartográficos 1: 100000 los cuales se mejoraron por medio del procesamiento SIG.

En el POT de San Gil se reporta un uso inadecuado del suelo que ha generado la sobre explotación y elevados índices de contaminación hídrica, estos factores han contribuido al deterioro sistema ambiental, por lo que es de gran importancia determinar los factores que afectan los sistemas hídricos de la región. La finalidad de este trabajo es aportar al conocimiento geológico e hidrogeológico mediante la interpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas del área suroccidental de la cuenca de la Quebrada Curití y sus zonas aledañas, área de gran importancia ya que es uno de los principales afluentes que surten del recurso hídrico al municipio de San Gil.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

1. Objetivos.

1.1 Objetivo General.

Realizar una caracterización fotogeológica a escala 1:10000 haciendo uso de imágenes LANDSAT 8, ALOS PALSAR y fotografías aéreas, de la zona suroccidental de la cuenta de la quebrada Curití, en base a una descripción y análisis estratigráfico, geomorfológico, estructural e hidrogeológico.

1.2 Objetivos Específicos.

- Proponer las subunidades geomorfológicas (Escala 1:10.000) presentes en el área de estudio mediante la interpretación fotogeológica.
- Establecer la presencia o ausencia de formas exokársticas en la zona de trabajo mediante el análisis fotogeológico detallado.
- Realizar un análisis de datos estructurales de estudios anteriores que permita entender de manera general, el comportamiento del fracturamiento.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

- Realizar análisis de porosidad y permeabilidad de muestras tomadas previamente en zonas de interés, determinar si sus propiedades son favorables como roca reservorio o zona de transporte de aguas subterráneas.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

2. Localización.

En la parte central de la Cordillera Oriental una de las tres cordilleras pertenecientes a los Andes Colombianos, se encuentra el departamento de Santander entre los trazos de los ríos Chicamocha y Suárez (Figura 1), la zona de Guanentá que abarca los municipios de San Gil, Barichara, Curití, Aratoca, Cabrera, entre otros. La cuenca de la quebrada Curití nace al NW del municipio de Curití, en la vereda El Carmen, hasta el NW del municipio de San Gil donde desemboca en el Río Fonce, esta última se eligió área de estudio en el presente trabajo (Figura 1).

Tabla 1.

Coordenadas de localización del área de estudio, Sistema de referencia Magna Sirgas

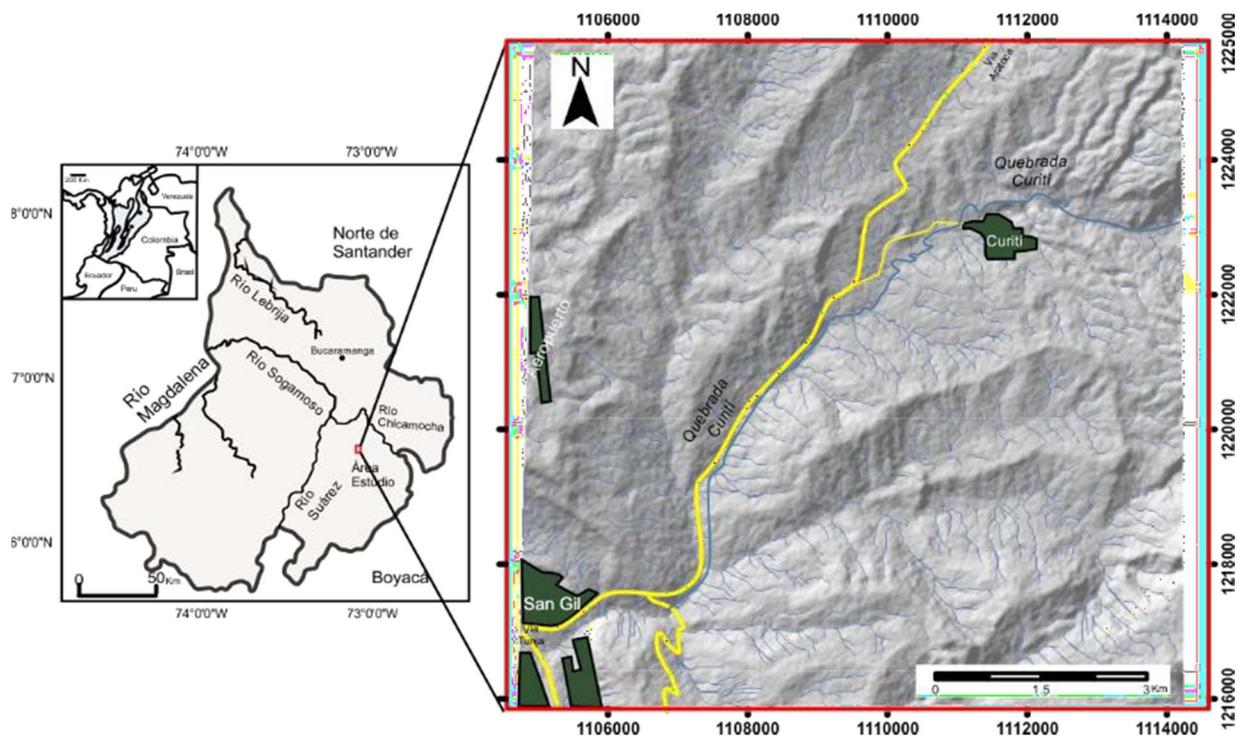
TABLA 1: LÍMITES DEL ÁREA DE ESTUDIO (COORDENADAS PLANAS)		
	ESTE	NORTE
LÍMITE SUPERIOR IZQ	1'105.000 m	1'225.000 m
LÍMITE SUPERIOR DER	1'114.000 m	1'225.000 m
LÍMITE INFERIOR IZQ	1'105.000 m	1'216.000 m
LÍMITE INFERIOR DER	1'114.000 m	1'216.000 m

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Basándose en las planchas topográficas del IGAC, el área de estudio corresponde a las planchas escala 1:10.000 enumeradas como 135-II-D-3, 135-IV-B1 y una pequeña área de la plancha 135-IV-A-2. En cuanto a términos de cartografía geológica a escala 1:100.000 el área de interés se encuentra dentro de la plancha 135 (I 12) del INGEOMINAS ahora conocido como Servicio Geológico Colombiano (SGC) en las zonas E11, E12, D11 y D12. Con las coordenadas de la Tabla 1 y la Figura 1 corresponde a la zona de trabajo.

Figura 1.

Localización del área de estudio. En la figura superior se observa el área en un marco regional y en la figura inferior se observa a detalle el área abarcada en este trabajo.



3. Antecedentes.

Al sur de la ciudad de Bucaramanga, se observan extensas mesetas hasta aproximadamente Vélez, estas fueron formadas por la interacción de procesos tectónicos y denudacionales a lo largo del tiempo geológico. Una de estas es la mesa de Barichara. Que se caracteriza por estar compuesta por varias cuevas, lo que la diferencia de las otras mesetas que tienen la morfología básica plana y tabular como lo son la Mesa de los Santos y Lebrija (Julivert, 1958). Estas mesas han sido focos de estudio de varias disciplinas como lo son la cartografía, estratigrafía, geología estructural, geoquímica, hidrogeología, entre otras. A continuación, se mostrarán los diferentes estudios que se han realizado para la zona y han sido tenidos en cuenta para este trabajo de investigación.

El término de Mesa de Barichara fue introducido por Julivert en el año 1958 donde busca realizar una descripción de las diferentes estructuras encontradas entre Bucaramanga y Vélez. Estas descripciones incluyen una breve síntesis estratigráfica de las rocas Jura-Triásicas y Cretácicas de la zona y una interpretación de la interacción de la tectónica y las rocas para formar la actual configuración de red hidrográfica y del paisaje.

Téllez (1964) realiza una cartografía a escala 1:50.000 del área de la Mesa de Barichara, describiendo rocas metamórficas de edades paleozoicas y rocas sedimentarias de edades Jurásicas, Cretácicas y además de depósitos cuaternarios. Adicionalmente hace anotaciones sobre la geología estructural y como la tectónica controla la sedimentación en tiempos pre- Cretácico.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Pulido (1979) realiza la cartografía geológica a escala 1:100.000 de las planchas 135 - San Gil, con la respectiva memoria explicativa. Esta plancha cubre un área importante de la Cordillera Oriental en el departamento de Santander, donde están formados tres arterias fluviales principales una de ellas el río Fonce que en su parte alta corre hacia el noreste hasta San Gil donde describe una curva para tomar rumbo este-oeste hasta desembocar al Suárez, los ríos Pientá, Guare, Mogoticos, y quebrada Curití, forman la red principal del Fonce.

En 2005 el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la Corporación Autónoma Regional de Santander presentan la publicación titulada “Estudio Semidetallado de Suelos y Capacidad de Uso de la Tierra para la Microcuenca de la quebrada Curití “, esta memoria técnica describe el patrón de distribución y la capacidad de uso y manejo del suelo de la microcuenca de la quebrada Curití.

Castellanos Mejía & Gutiérrez Toledo (2006) realizaron cartografía geológica a escala 1:2500 cuya área de estudio comprende un área de 250 km² de la cual realizaron caracterización estratigráfica y estructural y la mineralogía de arcillas a los niveles arcillosos de la Formación Simití y Formación Paja con fin de definir los parámetros estructurales, litológicos, geomorfológicos que caracterizan el comportamiento de las aguas subterráneas, para una futura elaboración del modelo hidrogeológico de la zona de Barichara.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

INGEOMINAS (2006) publicó el trabajo Mesa de Barichara que hace parte de los tomos de la Colección del Patrimonio Geológico de Colombia, en este trabajo se hace un compilado general de la cartografía geológica, aspectos turísticos, mineros de la zona. Cabe destacar que en este trabajo se reconoce el alto potencial de aguas subterráneas como fuente del recurso para la zona, se resalta las areniscas de la Formación Los Santos como posible reservorio de aguas subterráneas.

Adicionalmente en este mismo trabajo se hace un levantamiento detallado de diferentes cuevas encontradas en la mesa como la son La Cueva del Yeso, La antigua, entre otras. Cabe resaltar la influencia tectónica que hubo en la formación de estas cavidades que tienen en común el ser resultado del proceso de karstificación que se puede encontrar en las rocas calcáreas de las formaciones Rosablanca, Paja y Tablazo. En la Figura 2 que fue tomada y modificada del trabajo del INGEOMINAS se observa la distribución espacial de las manifestaciones de procesos de endokarst en la Mesa de Barichara lo que hace pensar que puede haber más manifestaciones de los mismos procesos que no han sido determinadas por el nivel de detalle de los diferentes trabajos.

En el 2007 se publicó “Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la zona Guanentina tomo II”, que hizo parte del convenio entre la Universidad Industrial de Santander e INGEOMINAS. En este se escogió un área de estudio, al suroeste del Macizo de Santander cubriendo una zona de 500 km², incluyendo municipios como Villanueva, Barichara, Cabrera, Jordán, San Gil y parte rural de los municipios de Aratoca y Curití, debido a que se caracterizan por tener limitaciones del recurso hídrico, situación crítica en las épocas de veranos

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

prolongados e intensos, se realizó el levantamiento de la cartografía geológica e hidrogeológica en escala 1:25000 y se planteó un primer modelo conceptual de almacenamiento y circulación de agua subterránea que integra las diferentes componentes físicas que la constituyen, como son la litología, los rasgos estructurales, los niveles de interés hidrogeológico y zonas de recarga.

Velandia et al., (2007) realizan un procesamiento e interpretación de fotografías aéreas, imágenes de satélite y modelos digitales de terreno con el fin de realizar un análisis estructural de la zona de la mesa de Barichara, en este trabajo los datos confirman un régimen transcúrrente con desplazamiento sinistral que domina de manera regional, pero reportan también que se presentan fallas de cabalgamiento producto de la combinación de regímenes compresivo y transcúrrente.

Morales, (2010) en un estudio perteneciente al convenio entre el INGEOMINAS y la Universidad Industrial de Santander realizó el trabajo “Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander– Cartografía Geológica Mapa Geológico de la Región Central de Santander” en el cual se unifica el área, desde el punto de vista, lito estratigráfico, estructural e hidrogeológico, realizándose la cartografía geológica en escala 1:25000 de la zona correspondiente al área de estudio, en la cual se verificaron y se redefinieron contactos de las unidades de roca existentes, así como la realización de la geología estructural que afecta las diferentes unidades.

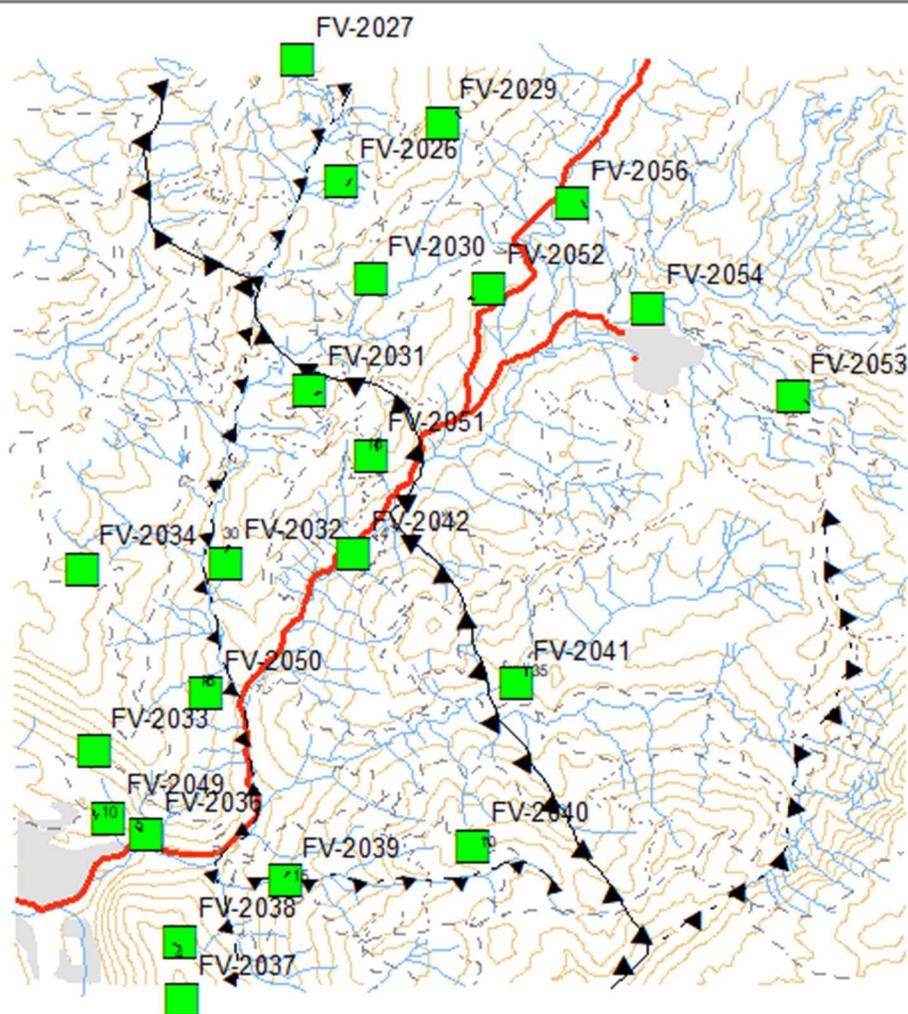
Velandia, (2010) por medio de sensores remotos y trabajo de campo tomando datos estructurales realiza un modelo estructural para el Macizo de Santander, Mesa de los Santos y la Mesa de Barichara, reconociendo para el primero un régimen transcúrrente, con un tensor local

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

NW-SE, para la segunda determina una transcurrencia dextral a lo largo de fallas transversales NW y para la última determina una desconexión de la influencia de la falla Bucaramanga, lo que implica un tensor local E-W.

Figura 2.

Localización de los datos de Ingeominas en el área de estudio.

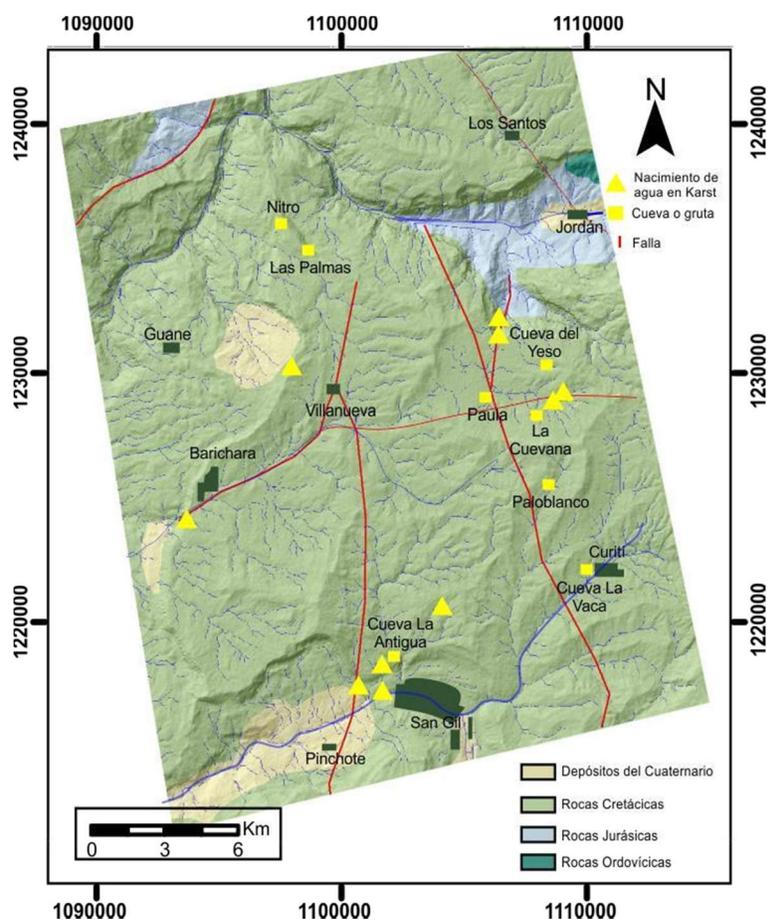


CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

En el año 2018 tomó lugar un convenio entre la UPTC y el Servicio Geológico Colombiano con el fin de determinar y caracterizar ambientes y unidades geomorfológicas que constituyen las bases para estudios de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa a una escala a 1:100.000. En este trabajo se logró determinar la presencia de 3 ambientes geomorfológicos que son los ambientes estructurales, denudacionales y fluviales.

Figura 3.

Vista regional de la Mesa de Barichara con distribución geográfica de los puntos de manifestación de acción de aguas subterráneas. Tomado y modificado de INGEOMINAS (2006).



4. Contexto geológico.

Las rocas más antiguas reportadas para las zonas aledañas al área de interés corresponden a pequeños afloramientos de la Formación Silgará según Ward et al., (1973) y se encuentran aflorando aguas arriba de la quebrada Curití, estas rocas son el producto del evento orogénico Fammatiniano conocido localmente como Quetame-Caparonensis, de edad Ordovícico temprano (Mantilla et al., 2016) .

En el Triásico-Jurásico la separación del supercontinente Pangea debido a esfuerzos transtensionales /tensionales generó un ambiente de cuencas extensionales tipo rift que alcanzaron en algunas zonas una extensión de hasta 150 Km en le Cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena (Sarmiento, 2011), el magmatismo y la formación de rocas volcánicas es típico en las zonas aledañas (Ward et al., 1973; Mojica & Kammer, 1995) durante este periodo de tiempo se depositaron en ambientes continentales las rocas correspondientes a la Formación Girón la cual aflora hacia la zona NW de la quebrada Curití todavía en los alrededores de la zona de estudio. El ingreso gradual de un mar inició por la cuenca de Cundinamarca y de manera progresiva se extendió hacia el NW (Etayo-Serna et al., 1969).

El registro sedimentario fue diverso a lo largo del cretácico inferior con facies asociadas desde ambientes continentales como de ríos meandriformes a ambientes transicionales como costas, estuarios y deltas; hasta ambientes marinos como plataforma interna, media y externa con

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

desarrollo de abanicos submarinos (Cáceres et al., 2003), la cuenca a nivel general evolucionó a sistemas de half-rift, caracterizados por ser asimétricos y de mayor extensión que los generados en el Triásico-Jurásico y cuyo origen ha interpretado como extensión en ambientes de back-arc (Cooper et al., 1995; Sarmiento, 2011) En la zona de la actual Cordillera Oriental se diferenciaron dos subcuencas que corresponden a la Tablazo-Magdalena al occidente y Cocuy al este, separadas por un alto que corresponde al Macizo de Santander y Floresta (Etayo-Serna, 1968) donde la zona de trabajo corresponde a la llamada Tablazo-Magdalena pero cabe aclarar su cercanía al Macizo de Santander.

A finales del Cretácico superior la acreción de diferentes terrenos causó diferentes esfuerzos que marcaron el inicio de la retirada del mar cretácico y consecuente inversión tectónica desarrollada durante el Cenozoico asociada a la orogenia Andina (Cooper et al., 1995; Bayona, et al., 2008) a la cual se le atribuye como la fuente de alto grado de deformación de las rocas, desarrollo de facies continentales con eventos de erosión regionales, es de resaltar que las rocas depositadas durante este periodo no afloran en la zona ya que pudieron no ser depositadas debido a los levantamientos o el registro fue eliminado por la erosión y el tiempo. Para la zona el fracturamiento y basculamiento hacia el occidente sumado a la acción erosiva de los ríos principales dio origen a la zona de mesas y cuevas (Julivert, 1958) en las cuales se incluye el área de estudio, la Mesa de Barichara.

4.1 Estratigrafía.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

A continuación, se muestra una descripción de las generalidades reportadas hasta el momento, de las rocas aflorantes (de las más antiguas a las más recientes) en la zona de trabajo, cabe destacar que la mayoría de las rocas presentes corresponden a rocas del Cretácico inferior (Figura 4).

Figura 4.

Columna generalizada que muestra la sucesión sedimentaria que se ha reportado para la zona.

Tomado y adaptado de Pulido (1979) .

Columna Geológica Generalizada de la Zona				
Basado en Pulido (1979)				
Edad	Espesor	Litología	Formación	Descripción
Cuaternario	<50 m		Depósitos Aluviales y Coluviales	Sedimentos y fragmentos de roca depositados por corrientes fluviales y acción de la gravedad
Albiano inferior a superior	137 m		Formación Simití	Lutitas grises oscuras a amarillentas alternando con lentes de arenisca y ocasionalmente de calizas
Albiano inferior	353 m		Formación Tablazo	Caliza gris arenosa a arcillosa, intercalada con niveles de lutitas grises y margas, ocurrencia de intercalaciones de areniscas de grano fino.
Hauteriviano medio a Aptiano superior	374 m		Formación Paja	Lutitas negras con abundantes concreciones calco-píritosas y altos contenidos de materia orgánica, se encuentra en alternancia con caliza gris y niveles arenisca fina.
Valanginiano a Hauteriviano	59 m		Formación Rosa Blanca	Calizas macizas y margas grises oscuras con intercalaciones de shale gris oscuro
Valanginiano superior	<30 m		Formación Cumbre	Areniscas grano fino de color gris verdoso, por su espesor mínimo no es cartografiable
Berriasiano a Valanginiano	126 m		Formación Los Santos	Areniscas cuarzosas claras de grano medio a grueso con intercalaciones de limolitas grises a pardas. Hacia la base se encuentran niveles de conglomerados o de areniscas conglomeráticas.

4.1.1 Formación Los Santos.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Formación propuesta Según Morales et al. (1958) como “Formación Tambor” por Hedberg (1931) a una sucesión de areniscas que aflora en el cañón del río Lebrija a lo largo del ferrocarril de Bucaramanga a Puerto Wilches, entre los kilómetros 92 y 93, cerca del caserío de El Tambor. Posterior a esto, Cediell (1968) propone redefinir la unidad como Formación Los Santos con localidad en la Mesa de los Santos. En el trabajo realizado por Santana (1986) donde mide de manera detallada a la respectiva formación, determina que en la zona de Curití la dicha formación tiene un espesor de 126 m y afloran los segmentos I, II, V y VI que serán detallados a continuación:

4.1.1.1 Segmento I: Compuesto principalmente por conglomerados, areniscas conglomeráticas y areniscas de grano fino, se caracteriza por un grano decreciente de base a techo. Las areniscas son principalmente de granos de cuarzo con algunos granos de feldespato potásico. Las rocas de este segmento se han interpretado como el producto de abanicos aluviales. Este segmento posee alto potencial hidrogeológico ya que las rocas presentan altas porosidades primarias y buena permeabilidad.

4.1.1.2 Segmento II: Este se encuentra constituido principalmente por areniscas de grano fino, también se encuentran algunas de grano medio y localmente hacia la base grano grueso; la presencia de lodolitas es baja. En cuanto a la composición predomina el cuarzo, aunque se observa la ocurrencia de feldespato potásico Este segmento presenta menor potencial debido a una disminución de la porosidad.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

4.1.1.3 Segmento V: Segmento compuesto por areniscas de grano fino, bien a regularmente calibrado, en cuanto a su composición es principalmente cuarzo y se encuentra feldespato potásico como traza. La forma de las capas es tabular a cuneiforme y con tendencias grano decreciente. Debido al calibrado y su composición, este segmento puede tener un potencial como reservorio moderado.

4.1.1.4 Segmento VI: Este se compone de capas tabulares de areniscas de grano grueso, mediano o fino interestratificados con capas delgadas de lodolitas negras. Composicionalmente predomina el cuarzo y las areniscas se encuentran mal a regularmente calibradas. Potencial de reservorio moderado. Esta Formación yace de manera concordante bajo la Formación Cumbre.

4.1.2 Formación Rosa Blanca.

De acuerdo con Morales et al., (1998) el nombre de la Formación Rosa Blanca fue propuesto por Wheeler en un informe inédito en 1929 derivado del cerro Rosa Blanca, sin embargo, su localidad tipo se reconoce en el Río Sogamoso, de 1 a 1.5 Km arriba de la localidad del Tablazo, está compuesta por calizas macizas, duras grises azulosos fosilíferas con capas de margas, alcanzando un espesor variable de aproximadamente 425m de edad Hauteriviano.

Pulido (1979), reporta para la zona de San Gil, la “Formación Rosablanca”, constituida por una sucesión de calizas grises oscuras a grises azulosas, macizas, duras, fosilíferas con nódulos

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

piritosos los cuales se encuentran en niveles de caliza más arcilloso, se encuentra reposando concordantemente sobre la Formación Cumbre en el Anticlinal de Cerro Negro y en el resto del área se encuentra en contacto inconforme con la Formación Arcabuco, a su vez, infrayace concordantemente a la Formación Paja.

4.1.3 Formación Paja.

Nombre fue propuesto por Wheeler en 1929 a una sucesión de shales negros con laminación delgada ligeramente calcáreos, comúnmente micáceos y arcillosos aflorantes en la quebrada La Paja, de la cual recibe su nombre, en su localidad tipo se reporta un espesor promedio de 625m, su edad es del Barremiano-Aptiano al sur y Aptiano hacia el norte (Morales et al., 1958).

Según Pulido (1979) para la zona de estudio la Formación Paja consiste en una alternancia de shales grises claros a negros con nódulos lutíticos parcialmente calcáreos y areniscas grises a amarillentas, arcillosas y fosilíferas, esta es dividida en dos miembros, Miembro inferior (Kimpa) compuesto por una alternancia de areniscas arcillosas de grano fino y shales negros a amarillentos y Miembro superior (Kip) compuesto por lutitas negras con abundantes concreciones calco- piritosas y delgadas intercalaciones de caliza grisosa; esta suprayace a la Formación Ruitoque; cuando esta unidad se acuña o cambia de facies, se pone en contacto normal con las calizas del Rosablanca. El límite superior con la Formación Tablazo es conforme y bien definido.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

4.1.4 Formación Tablazo.

El nombre de la unidad fue propuesto por Wheeler en 1929 llamó Calizas del Tablazo a las rocas aflorantes en la primera montaña al este del pueblo del Tablazo, departamento de Santander. Esta se compone de calizas macizas, calizas arenosas, arcillolitas y areniscas con un espesor de 150 m, de edad del Aptiano – Albiano inferior. Esta edad fue determinada de acuerdo con su posición estratigráfica.

Para la zona de estudio, Pulido (1979) define que la Formación Tablazo adquiere un carácter más arenoso tanto al norte como al sureste de la localidad tipo y se compone de Caliza gris arenosa a arcillosa, lutita gris y margas e intercalaciones de areniscas de grano fino. Esta descansa concordantemente sobre la Formación Paja e infrayace conformemente a la Formación Simití.

4.1.5 Formación Simití.

Según Morales et al., (1958) el nombre “Simití Shales” fue introducido por Intercol en 1953 para describir una sucesión de arcillolitas de color gris, localmente calcáreas con concreciones que alcanzan un tamaño de 3 metros en su tope, se reporta un espesor de 410 metros en la sección expuesta a lo largo de la orilla sur de la Ciénaga de Simití. La edad reportada para estas rocas es Albiano inferior, medio y superior basada en su registro fósil.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Pulido (1979) reporta que la Formación Simití, también llamada Formación San Gil Superior basado en la nomenclatura de Hubach (1957) se compone de lutitas grises oscuras a amarillentas alternando con lentes de arenisca y ocasionalmente de calizas. Esta formación descansa conformemente sobre la Formación Tablazo e infra yace en concordancia a la Formación Chiquinquirá.

4.1.6 Depósitos Cuaternarios Aluviales.

Hace referencia a sedimentos y fragmentos de roca depositados por corrientes fluviales, en el área se encuentra ubicados por encima del nivel de los cauces de los ríos Sogamoso y Chicamocha. Son depósitos principalmente de llanura de inundación y barras de río.

4.1.7 Depósitos Cuaternarios Coluviales y de Derrubio.

Desarrollados por la acción de la gravedad, generalmente se forman debido a la acumulación de material por desprendimiento de las laderas escarpadas asociadas a la Formación Tablazo, aunque también se pueden dar con la Formación Los Santos.

4.2 Geología estructural.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

A continuación, se presentan las estructuras que se han reconocido en la zona y sus zonas aledañas reportadas en la bibliografía hasta la fecha.

4.2.1 Falla Curití.

Según Pulido (1979): “Esta posee una dirección aproximada N-S, con una longitud cerca a los 45 km a partir de Ocamonte para terminar al este de la localidad de Jordán, sobre el Cañón del Chicamocha, donde presenta características de simple lineamiento. Localmente el plano de falla es de ángulo alto e inclinación hacia el oeste y solo afecta a rocas del Cretácico Inferior”.

4.2.2 Otras estructuras.

En la zona de trabajo se pueden observar diferentes series de pliegues anticlinales y sinclinales con una orientación NW y NE, estos pliegues han sido cartografiados a escala 1:100.000 y 1:25.000 por Pulido (1979) e INGEOMINAS (2007) respectivamente, pero dada la escala de trabajo no fueron nombrados, solo se reconoce que son el producto de un esfuerzo principal con una dirección aproximada E-W.

Reatiga (2008) Reconoce para la zona NE del municipio de Curití, el predominio de fallas de tipo inverso (fallas de cabalgamiento y retrocabalgamiento) y en menor proporción algunas fallas de tipo normal y de desplazamiento lateral.

5. Justificación.

Debido a la escasez de agua para la población del área de Guanentá, El INGEOMINAS en el año 2007 realizó estudios en cartografía, estratigrafía, geología estructural, geomorfología, espeleología, entre otros con el fin de definir prospectos de aguas subterráneas. Gracias a este conglomerado de estudios en colaboración de la Universidad Industrial de Santander, se logró determinar si existían las condiciones y el potencial hidrogeológico en las rocas presentes desde el margen occidental del Macizo de Santander hasta la zona nororiental de Curití. En estos estudios se reconoció el potencial que tenían las rocas sedimentarias del Cretácico inferior y como algunas de estas correspondientes a rocas carbonatadas y siliciclásticas tenían porosidad secundaria producto de procesos de fracturamiento y/o karstificación.

Estos estudios fueron realizados a gran escala, y con el fin de favorecer al conocimiento geológico de la Mesa de Barichara, por medio del presente trabajo con base en un procesamiento de imágenes satelitales y su respectiva interpretación haciendo uso de un Sistema de información Geográfico (ArcGIS) se busca realizar una caracterización geológica que consista en una descripción: estratigráfica, estructural y geomorfológica con el fin de determinar zonas de posible interés hídrico a escala 1:10.000, teniendo en cuenta datos meteorológicos y de laboratorio en el área NW de la cuenca de la quebrada Curití.

6. Marco teórico.

6.1 Conceptos importantes.

6.1.2 *Karst.*

Karst (o carst en castellano) es el término usado por la comunidad científica para rasgos del terreno formados por procesos de disolución en rocas compuestas por material soluble, ya sea calizas, mármoles, dolomitas y margas. Estas rocas compuestas por diferentes minerales como calcita, dolomita, ankerita, magnesita, etc. son susceptibles a remoción, transporte y depósito de sus componentes solubles por el agua superficial que es rica en agentes ácidos producto de la interacción con productos atmosféricos y orgánicos de la corteza, el agua se infiltra por medio de las anisotropías existentes, ya sean fracturas, planos de estratificación, planos de debilidad que gradualmente aumentan en tamaño hasta formar discontinuidades de tamaños mayores. El karst es un sistema complejo en el cual interactúan varios factores como lo son las aguas meteóricas, mezcla de aguas, clima, porosidad, entre otros (Figura 5).

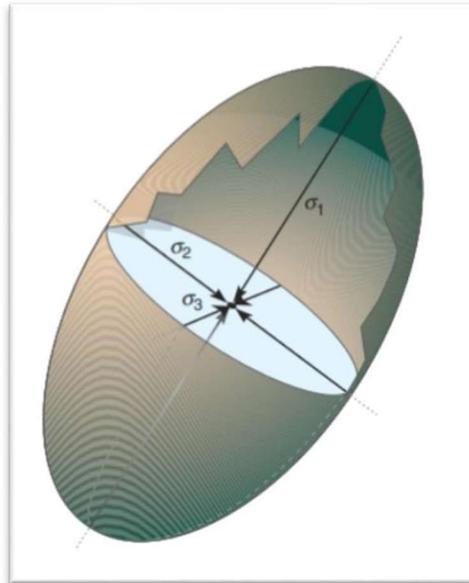
CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

6.1.3 Esfuerzo y deformación

Los esfuerzos se definen como magnitudes vectoriales generalmente oblicuas a un plano, que pueden descomponerse en esfuerzos normales (perpendiculares al plano) y en esfuerzos de cizalla (paralelos al plano) (Fossen, 2010). Los esfuerzos no pueden ser considerados como solo un vector sino deben ser considerados como un campo (infinitos vectores) que actúan sobre un punto en un instante dado, generando una superficie tridimensional conocida como elipse de esfuerzos (Figura 6). Esta elipse se compone de 3 ejes principales y perpendiculares entre sí, definidos como esfuerzos principales (σ) identificándose un esfuerzo mayor o principal (σ_1), uno intermedio (σ_2) y uno menor (σ_3).

Figura 6.

Elipse de esfuerzos que representa la magnitud y orientación de los tensores de esfuerzos principales. Tomado de Fossen (2010).



La deformación se define como el cambio en la longitud o la tasa de cambio de la longitud de una línea dividido entre su longitud inicial (Marrett & Peacock, 1999) Aunque también se puede entender como un cambio en la magnitud de una o varias dimensiones de un cuerpo al ser sometidas a un campo de esfuerzos causando traslación, rotación, dilatación y distorsión (Martínez, 2002).

6.1.4 Deformación Frágil

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

La deformación frágil se define como un cambio permanente que se da en materiales rocosos de la corteza superior con un comportamiento plástico, cuando el esfuerzo aplicado sobre el material excede la resistencia local a la ruptura, genera una deformación continua no recuperable (Fossen, 2010). Las estructuras generadas por este comportamiento son las diaclasas y las fallas. La importancia de analizar estas estructuras de deformación es que son parte crucial en la búsqueda de recursos, ya que estas discontinuidades funcionan como canales o medios de transporte de aguas subterráneas, aguas de infiltración y aguas magmáticas.

6.1.5 Diaclasas

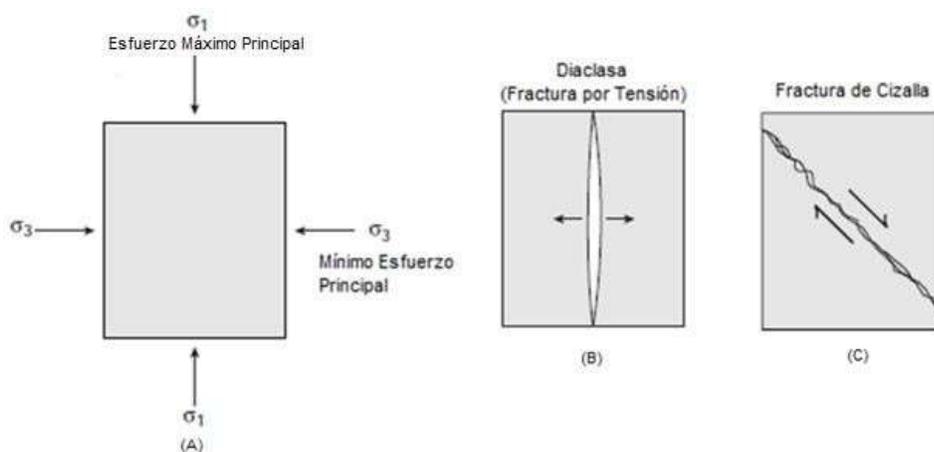
Estas se definen como fracturas planas o sub-planas que se forman de manera paralela al esfuerzo mayor (Figura 7B), las paredes de la roca fracturada se van separando, desarrollando una discontinuidad caracterizada por la reducción o pérdida de cohesión (Fossen, 2010) Estas fracturas pueden ser apreciable a escala micro y macroscópica y puede haber la ausencia o un muy ligero desplazamiento.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 7.

Ilustración de la orientación de esfuerzos principales (A) y su relación en el origen de las fracturas formadas por mecanismos de tensión (B) y por mecanismo de cizallamiento (C).

Tomado y Modificado de Van der Plujim & Marshak, (2004).



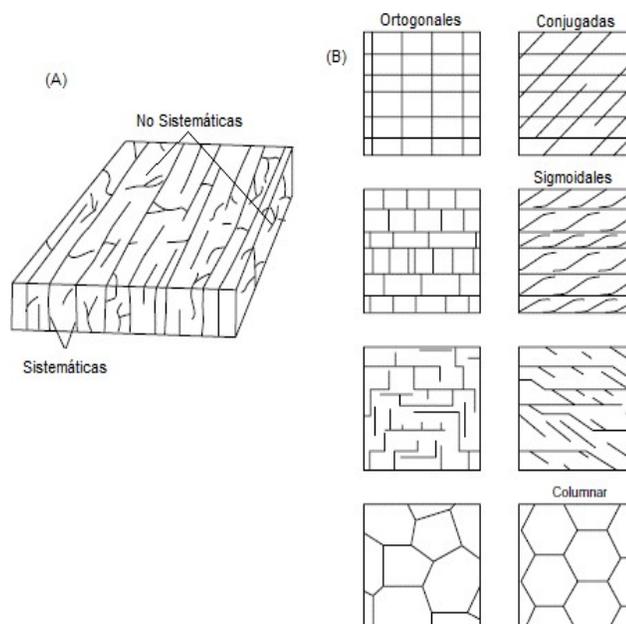
En cuanto a su relación espacial, se presentan en conjuntos o familias planares, paralelas o subparalelas que se conocen como diaclasas sistemáticas que se pueden seguir en un espacio regular y tienden a intersectar con otras familias o de manera contraria pueden ser no sistemáticas que consisten en diaclasas con una distribución espacial irregular, no planas y sin relaciones de paralelismo (Figura 7A).

Las diaclasas sistemáticas así mismo pueden intersectar otros sistemas de diaclasas en ángulos constantes conocidos como ángulo de diedro (Van der Plujim & Marshak, 2004). Cada familia es formada en diferentes etapas temporales y con esfuerzos en direcciones completamente distintas y dependiendo de la relación angular entre las diaclasas reciben diferentes nombres (Figura 7B).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 8.

(A) Bloque diagrama ilustrativo que muestra las relaciones espaciales entre diaclasas sistemáticas y no sistemáticas (B) Relaciones angulares entre diaclasas angulares y los diferentes nombres que pueden recibir dependiendo del ángulo de diedro. Tomado y Modificado de Van der Plujim & Marshak, (2004).



Adicionalmente las diaclasas se pueden confundir con las fracturas de cizalla que son generadas a partir del mecanismo de ruptura de cizalla donde la discontinuidad se forma a un ángulo agudo de la dirección de esfuerzo (Figura 8; Van der Plujim & Marshak, 2004) Si se encuentran los dos tipos de diaclasas se puede asumir que el esfuerzo principal se encuentra en la bisectriz del ángulo agudo formado entre las dos familias de diaclasas.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

6.1.6 Fallas

Las fallas son discontinuidades con un desplazamiento visible producto de cizalla. Las fallas pueden variar su tamaño y desplazamientos, encontrándose a escala microscópica con pequeños desplazamientos, hasta a escala continental, llegando a acomodar deformación. De manera generalizada las fallas se dividen en 3 tipos principales las cuales se pueden identificar porque cumplen la ley de fracturamiento de Anderson y adicionalmente por que poseen una inclinación característica respecto a la horizontal y por cómo se desplazan los bloques uno respecto al otro (Figura 9) y se dividen en:

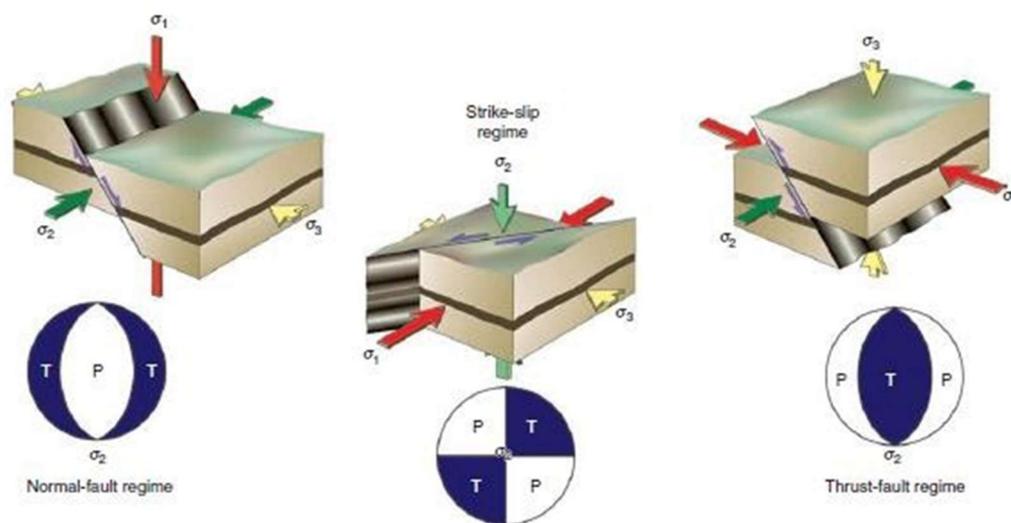
- Fallas Normales: Caracterizadas por un ángulo de inclinación mayor a 45° respecto a la horizontal con un tensor de esfuerzo σ_1 vertical y un movimiento en el que el bloque colgante se hunde a favor del plano de falla sobre el bloque yacente.
- Fallas Inversas (Cabalgamiento): Estas son producto de compresión y se caracterizan por un plano de falla con una inclinación menor a 45° respecto a la horizontal. En estas fallas σ_1 es horizontal y en estas fallas el bloque colgante cabalga o se monta sobre el bloque yacente.
- Fallas de Rumbo: Fallas con un ángulo de inclinación muy alto, generalmente 90° y se caracteriza por un (σ_1) horizontal y donde los bloques se mueven uno respecto al otro de

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

manera horizontal, los movimientos pueden ser dextrales (a favor de las manecillas del reloj) o sinestrales (en contra de las manecillas del reloj)

Figura 9.

Tres tipos de fallas principales, sus direcciones de esfuerzo y movimiento característico de bloques, P Corresponde a compresión y T a tensión. Figura tomada de Fossen (2010)



En base al trabajo realizado por Carvajal (2011) se definieron los siguientes ambientes:

6.1.7 Ambiente estructural

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente las asociadas a plegamientos y fallamientos, cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural al plegamiento de las rocas superiores de la corteza terrestre y que aún conservan rasgos reconocibles de las estructuras originales a pesar de haber sido afectadas en diverso grado por los procesos de denudación.

6.1.8 Ambiente Fluvial.

Las geoformas de origen fluvial están originadas por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y acumulación o sedimentación de materiales en las zonas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación. De esta manera es posible encontrar geoformas aledañas a ríos y quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre.

6.1.9 Ambiente Denudacional.

Son geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

6.1.10 Ambiente Antropogénico.

Corresponde a las formas del terreno productos de la actividad del hombre que modifica la superficie terrestre.

6.1.11 Análisis Estructural.

Es el estudio de la historia de deformación de las estructuras a partir de la aplicación de múltiples metodologías para caracterizar la deformación y las estructuras (Fossen, 2010) este análisis se divide en análisis geométrico, cinemático y dinámico (Van der Plujim & Marshak, 2004; Fossen, 2010).

6.1.12 Análisis Geométrico.

Este consiste en describir las estructuras con localización, orientación geográfica, tamaño y forma. La finalidad de este análisis es entender el proceso deformacional, propiedades de las rocas y direcciones de desplazamiento.

De acuerdo con Fossen (2010), en un análisis geométrico es muy útil la representación de los datos, en general se recurre al uso de mapas geológicos, cortes geológicos, diagramas de rosas,

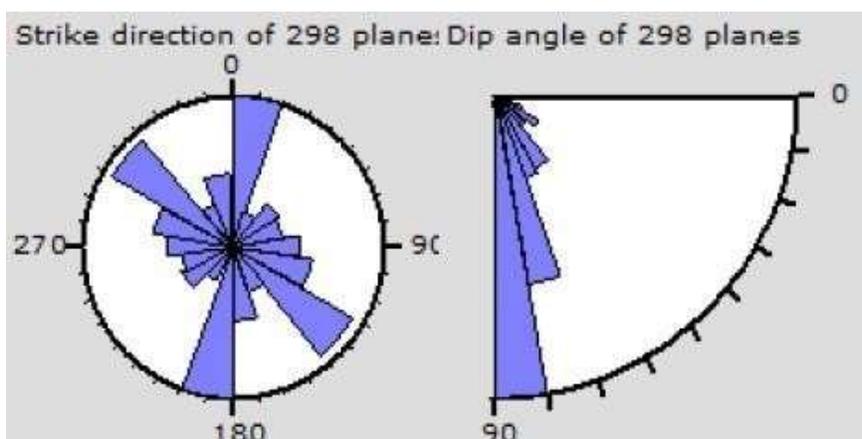
CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

bloques diagramas, datos geofísicos, datos satelitales o proyecciones estereográficas, siendo estas últimas las más utilizadas por su eficiencia a la hora de presentar e interpretar datos.

Los diagramas de rosa son la representación gráfica de las tendencias principales de orientación de los planos y consisten en que los intervalos del rumbo se ubican al margen del círculo y van de 0° a 360° en el sentido de las manecillas del reloj y la cantidad de datos respecto a un rumbo se miden desde el centro que representa el 0 % hacia los extremos que representa el 100% (Figura 10) Las inclinaciones también pueden ser graficadas de la misma manera mostrando en un cuarto de círculo la tendencia principal en el buzamiento en un intervalo de 0° a 90° (Burbank & Anderson, 2001 citado en Bejarano y Navas, 2018) .

Figura 10.

Ejemplo de representación gráfica de datos de diaclasa en diagrama de rosas a la izquierda, representación de datos de rumbo y a la derecha datos de buzamiento (Tomado de Bejarano & Navas, 2018).



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

6.1.13 Análisis Cinemático.

Consiste en la determinación de patrones de movimientos en la roca desde un estado inicial no deformado hasta su estado deformado sin asociar estos movimientos a esfuerzos (Van der Plujim & Marshak, 2004) Para este tipo de análisis se requieren datos especializados que puedan asociarse a los patrones de movimiento que son conocidos como indicadores cinemáticos Análisis Dinámico.

Este se describe como el estudio de patrones de esfuerzos y su relación durante el desarrollo de la estructura a medida que el cuerpo se va deformando (Van der Plujim & Marshak, 2004).

6.1.14. Análisis de porosidad y permeabilidad.

6.1.14.1 Porosidad: Se define como el espacio de suelo que no está ocupado por sólidos y se expresa en porcentajes. Se define también como la porción de suelo que está ocupada por aire y/o por agua. En suelos secos los poros estarán ocupados por aire y en suelos inundados, por agua. Los factores que la determinan son principalmente la textura, estructura y la cantidad de materia orgánica (Donoso, 1992).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

6.1.14.2 Permeabilidad: Permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- La porosidad del material.
- La densidad del fluido considerado, afectado a su vez por la temperatura.
- La presión a la que está sometida el fluido.

Para ser permeable un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez tales deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos a través del material.

7. Metodología.

La metodología utilizada para la realización de este proyecto es enumerada en paso a paso en la Figura 11.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 11.

Metodología usada para la realización de este trabajo de investigación.



7.1 Reconocimiento de la zona:

Delimitación y elección del área de trabajo con su respectiva georreferenciación, delimitando la zona, la cual se realizará teniendo en cuenta el mapa geológico realizado por el Servicio Geológico Colombiano y otros trabajos que puedan proveer información de interés hidrogeológico con el fin de evaluar accesibilidad, posibles rutas a seguir y plan de acción.

7.2 Recopilación bibliográfica:

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Revisión de los trabajos realizados a la zona de interés y zonas aledañas con el fin de recopilar información bibliográfica que sirva como insumo en el reconocimiento del potencial hidrogeológico del área de estudio.

7.3 Adquisición y procesamiento de Imágenes:

Obtención de las imágenes del satélite LANDSAT 8 que corresponde a un satélite que toma imágenes multiespectrales de una resolución espacial de 15 a 30 metros, se descargaron un total de 5 imágenes de la página del Servicio Geológico Estadounidense (USGS) de la página <https://earthexplorer.usgs.gov/> ya que cumplían; 1) tener una buena calidad de la zona de trabajo; 2) poseer la menor cantidad de nubes en la imagen; 3) tener una resolución temporal aproximada de 4 – 6 meses.

A las imágenes LANDSAT se les realizó la corrección atmosférica que es de gran importancia ya que permite reducir el error en la interpretación y procesamiento de imágenes causado por los gases y las partículas que interactúan con las ondas reflejadas por los objetos (Leite et al., 2017) Esta corrección se hizo basada en un algoritmo libre de Python descargado de propiedad de GeosolutionsMx y gracias a este se pudo obtener la reflectancia para los cálculos respectivos. Todas las imágenes fuere posteriormente reproyectadas al elipsoide WGS84.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Las imágenes tomadas por el sensor Operational Land Imager (OLI) conocidas como imágenes multiespectrales LANDSAT contienen información en varias longitudes de onda conocidas como bandas (tabla 2) se realiza combinación de bandas mediante la herramienta Image Analysis en Arcmap 10.5 para producir imágenes en falso color que ayuden a diferenciar o descartar diferentes atributos del terreno como lo pueden ser: la vegetación, zonas de uso urbano, zonas de uso agrícola, salud de vegetación entre otras. Por ejemplo, gracias a la combinación de las bandas 4, 5 que corresponden al rojo e infrarrojo cercano se espera obtener un mapa del Normalized Difference Vegetation Index mejor conocido como (NDVI) que refleja la cantidad y desarrollo de la vegetación en intervalos de -1 a 1 donde -1 indica áreas no vegetadas y 1 áreas con vegetación vigorosa y saludable.

Tabla 2.

Valores designados a las bandas producto de los datos tomados por los sensores OLI & TIRS del satélite LANDSAT 8 (basado en Jeevalakshmi et al., 2016).

Banda Landsat 8	Longitud de onda	Resolución (m)
Sensores OLI & TIRS	(μm)	
Banda 1 – Aerosol	0.43 – 0.45	30
Banda 2 - Azul	0.45 – 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59	30
Banda 4 – Rojo	0.64 – 0.67	30

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

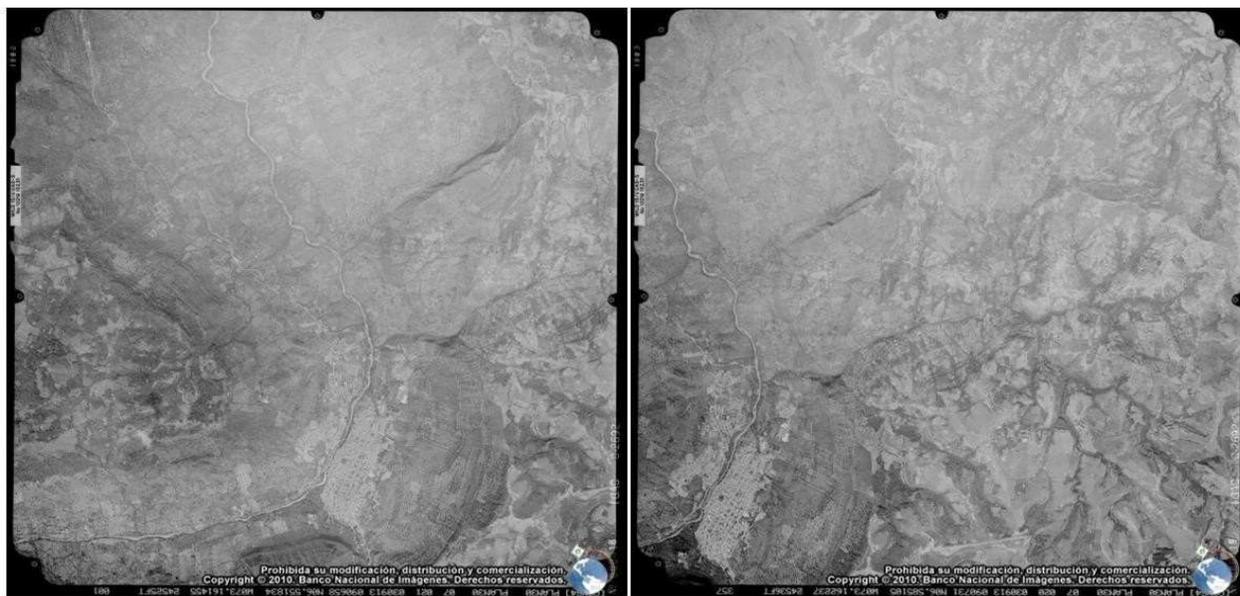
Banda 5 – Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR)	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – Infrarrojo de onda corta 2(SWIR)	2.11 – 2.29	30
Banda 8 - Pancromática	0.50 – 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 – 1.39	30
Banda 10 – Infrarrojo térmico 1	10.6 – 11.2	100
Banda 11 - Infrarrojo térmico 2	11.50 – 12.51	100

Adicionalmente con ayuda de las imágenes satelitales y fotografías aéreas del vuelo C-2692 y línea de vuelo No. 7 (Figura 12) que cubre la zona de trabajo mencionada anteriormente se busca realizar mapas foto geológicos que contengan información sobre la estratigrafía, geología estructural y geomorfología a una escala 1:10.000 mediante el uso del software ArcMap 10.5

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 12.

Fotografías aéreas obtenidas del IGAC, estas cubren el área de trabajo y corresponden al vuelo C-2692 y línea de vuelo No. 7



En cuanto a la interpretación de las fotografías aéreas e imágenes satelitales se procede con lo establecido en el manual de fotogeología de López-Vergara (1971) y las sugerencias del libro “Remote sensing applications to groundwater” de Meijerink et al., 2007.

Para la interpretación geomorfológica se siguen los lineamientos propuestos por Carvajal (2012) que establece un sistema de jerarquización geomorfológica que para este trabajo se establece la determinación de subunidades geomorfológicas (Escala <math><1:25.000</math>).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

7.4 Realización de Mapas.

Haciendo uso de los productos del paso anterior, se procede a la realización de los mapas mediante el uso de ArcGIS en donde se tendrá como resultado un mapa fotogeológico, estructural y geomorfológico a escala 1:10.000 bajo los estándares del Servicio Geológico de Colombia.

7.5 Control de Campo.

Por medio del estudio de la zona se trazarán rutas sobre carretera, con el fin de realizar un control de campo de los mapas realizados, cruzando la mayor parte de curvas de nivel, atravesando drenajes con el fin de observar si estos llevan algún caudal, tomando muestras de cambios de litología aflorantes y determinando posibles nacimientos de agua.

Una vez en campo se llevará a cabo el muestreo en los afloramientos que permitan una toma considerable de muestra y marcación de cambio de litologías. Las estaciones se compondrán de toma de localización, ubicación en mapa, descripción de vegetación, descripción macroscópica del afloramiento, observación de la humedad de la roca y si esta presenta flujo de agua, toma de datos estructurales, toma de muestra, descripción en campo de la roca y muestra; algunas estaciones serán de carácter hídrico por lo cual en estas se procederá a tomar dimensiones del afluente y de realizar pruebas en campo para determinar su caudal.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

La descripción de muestras en campo se realizará basados en la clasificación de Dunham (1962) para rocas calcáreas, que como principal característica utilizara las proporciones entre carbonato microcristalino y granos (principalmente restos fósiles) y Folk (1980) para rocas terrígenas como base para realizar descripciones texturales que dividen las rocas en conglomerados, areniscas y lodolitas. Para determinar el tamaño de los constituyentes se utilizó la escala de Wentworth (1922).

Geological Color Chart (1991) será utilizado para determinar el color de la muestra de una manera estandarizada y que sea entendida por la comunidad geológica; para determinar el espesor de capase basará en lo establecido por Campbell (1967).

Se realizará un registro fotográfico de las características más relevantes observadas con su respectiva escala.

7.6 Análisis de Resultados.

Análisis e interpretación de los resultados obtenidos de la interpretación de las imágenes satelitales y áreas, unificando con los posibles resultados de análisis de porosidad y permeabilidad, para llegar a establecer áreas de posible interés hidrogeológico.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Para el análisis de datos estructurales se hará uso de diagramas de rosa, ya que estos representan de una manera gráfica y muy sencilla de entender las principales tendencias de orientación e inclinación de los planos de fracturas medidos, adicionalmente también muestra las proporciones de datos de manera estadística.

El análisis será realizado a través de software como WinTensor, Faultkin o Stereonet y la idea es determinar si la tendencia de los datos de diaclasas obtenidos de Ingeominas facilitados por el geólogo Francisco Velandia y otros proyectos de grado que han sido tomados en la zona, son la consecuencia del tensor E-W que actúa de manera local o si pueden corresponder a otro tensor local.

El Normalized Difference Vegetation Index o NDVI se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Debido a que la vegetación refleja la luz infrarroja y tiene una baja reflectancia de la banda de luz roja esta combinación sirve para contrastar áreas vegetadas y no vegetadas. Para obtener este índice se debe realizar la siguiente operación de bandas para imágenes Landsat 8.

$$(Banda 5 - Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4)$$

Se espera poder delimitar gracias a esta combinación de bandas las zonas con alta vegetación y su relación con las litologías presentes.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

El Índice NDWI (Gao, 1996) se ha utilizado como una fuerte herramienta en los sensores remotos ya que esta permite ilustrar la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Para obtener este índice usando las imágenes Landsat 8 se debe realizar la siguiente operación de bandas:

$$(Banda\ 3 - Banda\ 6) / (Banda\ 3 + Banda\ 6)$$

Se obtendrán imágenes LANDSAT 8 con una diferencia de 6 meses, una representa temporada de alta precipitación y la otra baja precipitación, con el fin de establecer una relación de las zonas donde la vegetación logre acumular más agua y se mantenga de manera saludable.

Durante estos dos periodos ya que estas zonas pueden representar un alto potencial de reservorios o afloramientos de recurso hídrico (Singhal & Gupta, 2010).

Para los análisis de porosidad y permeabilidad, se seleccionaron 7 muestras de puntos correspondientes principalmente a rocas de tipo arenisca, a las cuales se les extrajo un Plug o núcleo, teniendo en cuenta la orientación en la que fue tomada en el afloramiento, ubicando la base y tope.

Para la obtención de los plugs fue necesario un fluido lubricante (agua común) una broca de aproximadamente 3.5 centímetros de ancho y 10 cm de largo y una cortadora (Figura 13). En esta cortadora se fija la muestra orientada para proceder a taladrarla a velocidad constante con el

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

fluido lubricante, hasta obtener un corte adecuado y representativo de la misma. Este procedimiento se realizó a las 7 muestras, en la cual se varió la velocidad de corte debido a composición de las muestras y longitud de plug o núcleo.

Una vez obtenidos los plugs, pasaron por la perfiladora emparejando ambas caras del cilindro y manteniendo como longitud mínima de 3.5 cm. Fueron marcados y llevados al horno por dos horas y luego al disecador con el fin de retirar cualquier fluido remanente.

Figura 13.

Equipo Core Pet Drill Press, Universidad Industrial de Santander. Sede de Guatiguará.



Se tomaron medidas de longitud y diámetro de cada uno con ayuda de un pie de rey, de cada uno. Se obtuvieron tres medidas de longitud y de diámetro. (Ver figura 14 y Tabla 5).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 14.

Toma de mediadas de los Plugs con pie de rey, Laboratorios de Petrofísica. Universidad Industrial de Santander. Sede de Guatiguará

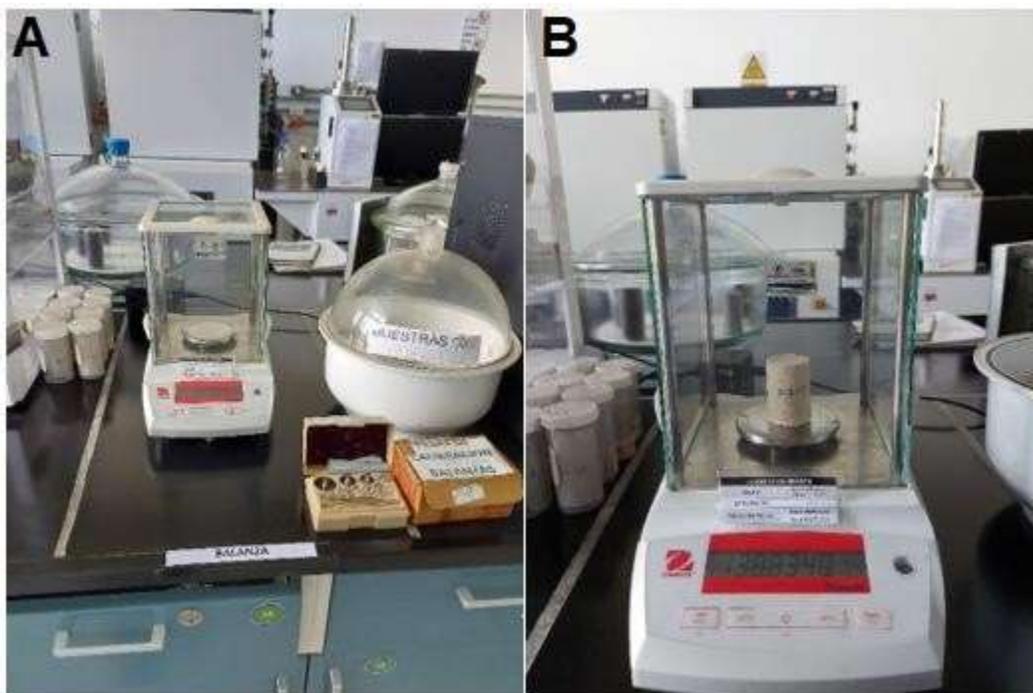


Para la toma del peso de cada muestra se usó una balanza electrónica de precisión (Figura 15). Se realizó la calibración de balanza electrónica usando valores teóricos y experimentales para determinar el porcentaje de error. Los valores registrados se encuentran listados en la Tabla 6. Una vez calibrada la balanza e identificado que el porcentaje de error es aceptable, se procedió a pesar cada uno de los plug registrando el peso en gramos.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 15.

A) Balanza electrónica, con pesos para su calibración B) Medición de peso del plug correspondiente a la muestra D01 07

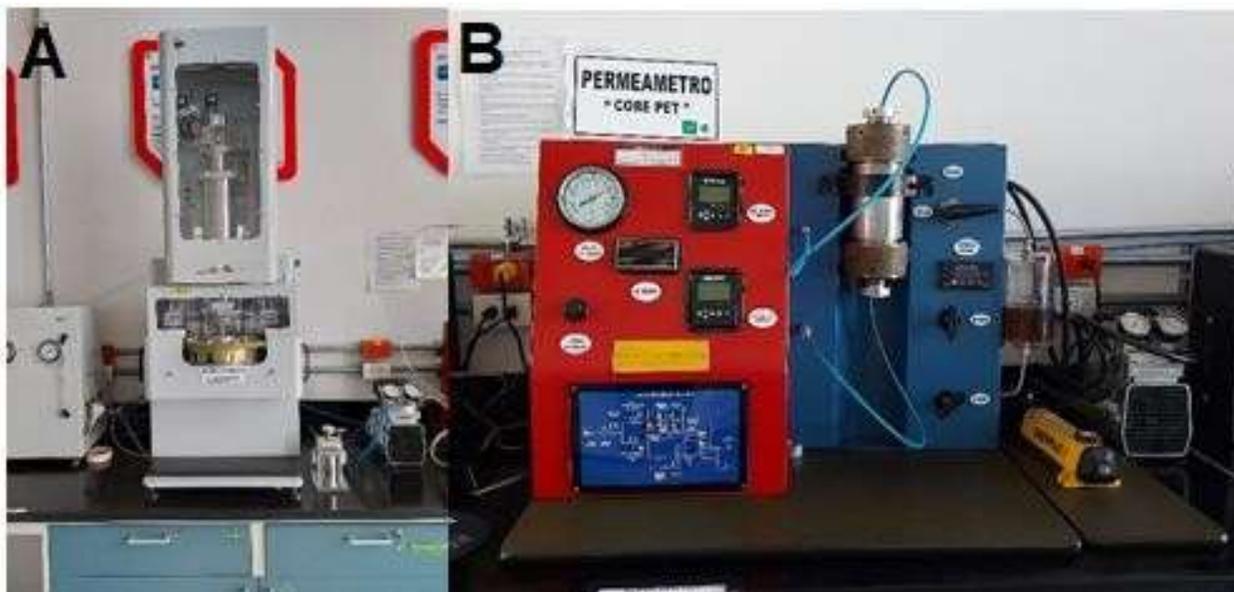


Una vez obtenidas las medidas de peso y diámetro, procedimos a poner los plugs en el equipo Keyphi (Figura 16A) que es un porosímetro que determina la permeabilidad al aire y la porosidad a la presión de confinamiento. En este se ingresan los datos de cada una de las muestras y el equipo de manera automatizada determina los valores de permeabilidad y porosidad.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 16.

A) Equipo Keyphy B) Equipo Core pet, Universidad Industrial de Santander. Sede de Guatiguará



Para la segunda toma de datos, utilizamos el equipo Core Pet (Figura 16B), el cual es un equipo semiautomatizado, donde se tuvo en cuenta los datos obtenidos en el Keyphi ya que el rango de sensibilidad para este equipo está entre los 5000 mD al 0.1 mD por lo que fueron descartadas las muestras con menor permeabilidad y solo fueron medidas 3 muestras.

7.7. Redacción del informe final.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Paso final del proyecto en el que se integra y sintetiza los resultados obtenidos y se realiza la respectiva discusión de los resultados comparándolos con los datos preexistentes de la zona. Este informe resumirá la metodología del proyecto, objetivos, resultados y conclusiones.

8. Resultados.

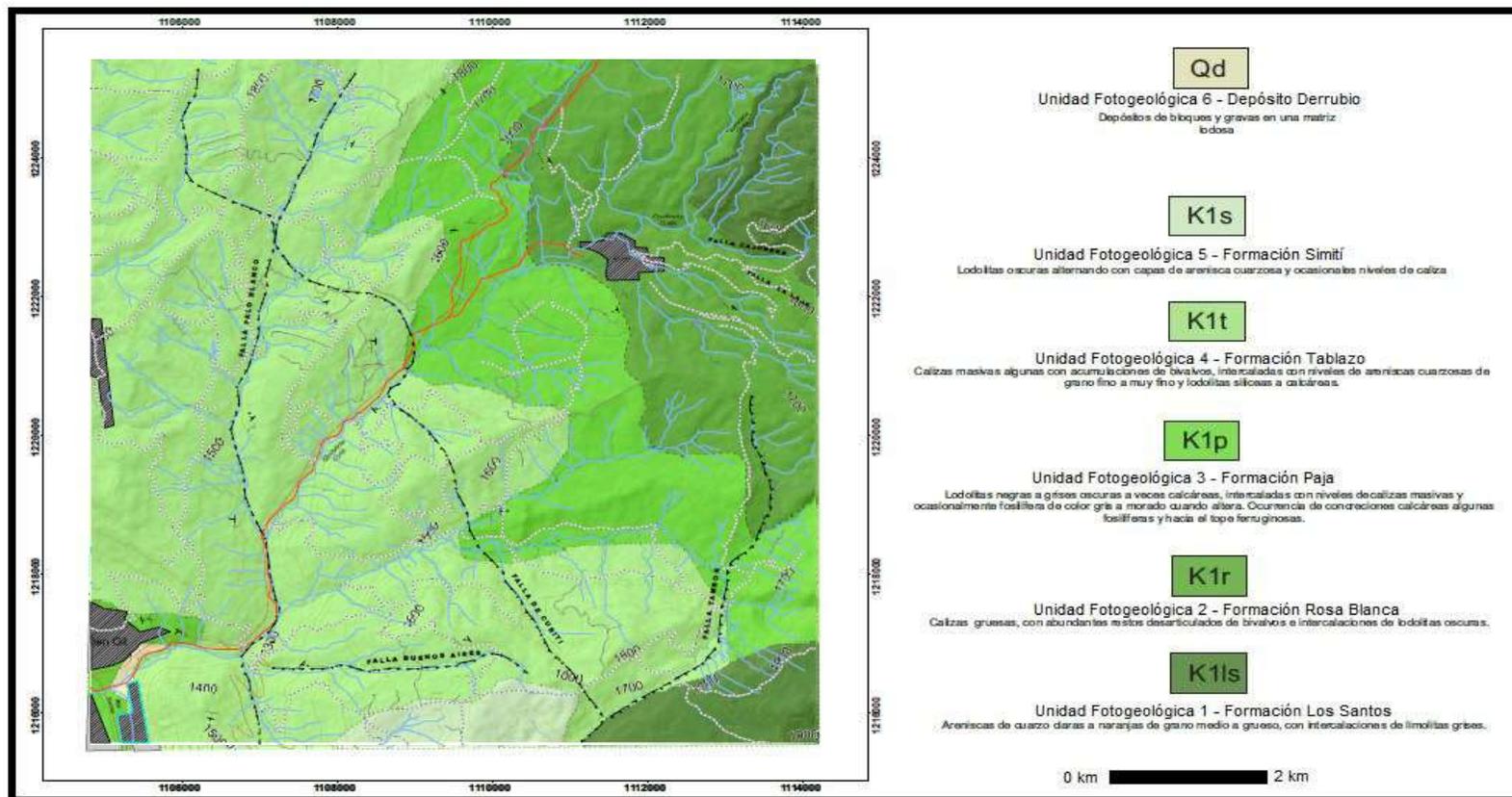
8.1 Interpretación fotogeológica.

Los resultados presentados a continuación corresponden al análisis e interpretación de las Fotografías aérea del vuelo C-2692 y línea de vuelo No. 7 que cubren parcialmente la plancha a escala 1:100.000 No. 135. La fecha de las fotografías corresponde al año 2003 y fue complementada con las imágenes LANDSAT 8 y ALOS PALSAR que por medio de procesamiento en un SIG se lograron obtener mapas de sombras, pendientes, imágenes en falso color que permitieron entender y resaltar ciertas características para diferenciar diferentes grupos litológicos cuyos contactos y características fueron corroborados y mejorados en una salida de control de campo para obtener como producto final un mapa fotogeológico (Figura 17 & ANEXO 1) De manera general se encontró que las rocas afloran en franjas casi paralelas de N – NW a S – SE y cuya posición estratigráfica varía de E a W desde la Formación Los Santos a la Formación Simití.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 17.

Mapa generalizado obtenido de la interpretación fotogeológica producto de uso de imágenes satelitales, fotografías aéreas y Google Earth. (Para detalle del mapa fotogeológico ver ANEXO 1).



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

8.1.1 Unidad Fotogeológica 1.

Corresponde a rocas que forman relieve elevado con perfiles cuya inclinación varía entre 20% – 50 %, el desarrollo de vegetación es bajo, las coloraciones del terreno van de amarillos crema amarillos anaranjados. Cabe resaltar la presencia de algunas cornisas o escarpes que muestran alta competencia, esto se podría asociar a litologías resistentes como areniscas. Su tendencia es a buzarse hacia el noroccidente y en el campo se pudo constatar que la roca corresponde a areniscas de cuarzo con delgados niveles de lodolitas rojizas a grises, estas rocas fueron asociadas a la Formación Los Santos. En afloramiento se distingue por la baja vegetación y desarrollo de paredes de roca resistentes a la meteorización (Figura 18).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 18.

Control de campo de la unidad fotogeológica 1 correspondiente a la llamada formación Los Santos, donde se observa la predominancia de paquetes de arenisca cuarzosa resistente a la meteorización. Fotografía tomada en Pescaderito, Curití.



8.1.2. Unidad Fotogeológica 2.

Las rocas de esta unidad forman perfiles de inclinación entre 10% – 25 %, se caracteriza por desarrollo de laderas suaves con buena vegetación y colores amarillos a blancuzcos. Esta unidad también muestra una tendencia a buzarse hacia el noroccidente y en campo se pudo encontrar que se compone de calizas tipo wackestone y packestone asociadas a la Formación Rosa Blanca, estas rocas son explotadas en toda el área de Curití y su reciente exposición por voladura en las canteras fue un criterio que ayudó a identificarlas y mapearlas con facilidad. Adicionalmente se

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

pudo encontrar que en afloramiento estas rocas forman paredes donde las calizas toman tonalidades marrones cuando se meteorizan y están en bancos gruesos competentes (Figura 19).

Figura 19.

Control de campo de la Unidad Fotogeológica 2 correspondiente a la Formación Rosa Blanca, en esta se pueden observar las capas muy gruesas de caliza formando laderas suaves y de baja pendiente. Foto tomada en el municipio de Curití.



8.1.3. Unidad Fotogeológica 3.

Caracterizada por pendientes suaves, onduladas y de baja inclinación entre 10% – 20 % estas se encuentran altamente vegetadas acorde con la textura fina de sus sedimentos, la coloración del terreno toma tonalidades marrones a grisáceas con tintes violáceos. Adicionalmente muestran

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

cierto escalonamiento consecuencia las intercalaciones de niveles competentes e incompetentes. Esta unidad se pudo asociar a la Formación Paja que se encuentra compuesta por niveles de lodolitas grises intercaladas con niveles de areniscas y calizas fosilíferas ricas en concreciones. A nivel de afloramiento presenta en su mayoría capas poco resistentes lo que hace que su morfología sea suave y ondulada (Figura 20).

Figura 20.

Control de campo de la Unidad Fotogeológica 3 correspondiente a la Formación Paja, en esta se pueden observar el comportamiento de las rocas en campo, formando laderas suaves y onduladas. Foto tomada en la vereda Cuchicute, Curití.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

8.1.4 Unidad Fotogeológica 4.

Esta se destaca por definir pendientes escarpadas, acantilados y laderas poco vegetadas con inclinaciones que varían del 30% – 60%, la unidad se caracteriza por coloraciones amarillentas y un desarrollo de vegetación moderado. Las tendencias de esta formación son de bajos buzamientos (muy cercanos a la horizontal) marcando un fuerte contraste con la formación infrayacente. Esta unidad se relacionó a la Formación Tablazo compuesta por Calizas masivas algunas con acumulaciones de bivalvos, intercaladas con niveles de areniscas cuarzosas de grano fino a muy fino y lodolitas silíceas a calcáreas. A nivel de afloramiento forma paredes de roca competente con abundante vegetación, en algunos niveles de estas rocas se pudieron observar procesos de disolución (Figura 21).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 21.

Control de campo de la Unidad Fotogeológica 4 correspondiente a la llamada Formación Tablazo donde se observa la predominancia de paquetes resistentes de Caliza con evidencias de disolución. Foto tomada en la vereda Dos Quebradas.



8.1.5 Unidad Fotogeológica 5.

Esta unidad es la que tiene menor ocurrencia en el área de estudio y consiste en lomas suaves y onduladas de inclinaciones bajas (10%- 30%) con coloraciones grises a crema, cabe destacar el alto desarrollo de vegetación sobre las rocas de esta unidad. Esta unidad se asignó a la Formación Simití compuesta por lodolitas oscuras alternando con capas de arenisca cuarzosa y ocasionales niveles de caliza. En afloramiento se destaca los niveles poco competentes que forman lomas suaves (Figura 22).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 22.

Control de campo de la unidad 5 correspondiente a la formación Simití donde se observa predominancia de lodolitas Foto tomada en la vereda dos quebradas



8.1.6 Unidad Fotogeológica 6.

Esta unidad consiste en lomas suaves de inclinaciones muy bajas (10% - 15%) con coloraciones grises, se destaca la cercanía a los escarpes de la Formación Tablazo y al río Fonce. Esta unidad se asignó a los depósitos cuaternarios compuestos por sedimento gravoso en matriz lodosa, no se pueden distinguir más depósitos de derrubio por medio de las imágenes obtenidas, sería necesario un control en campo más detallado en las zonas cercanas a los escarpes y drenajes.

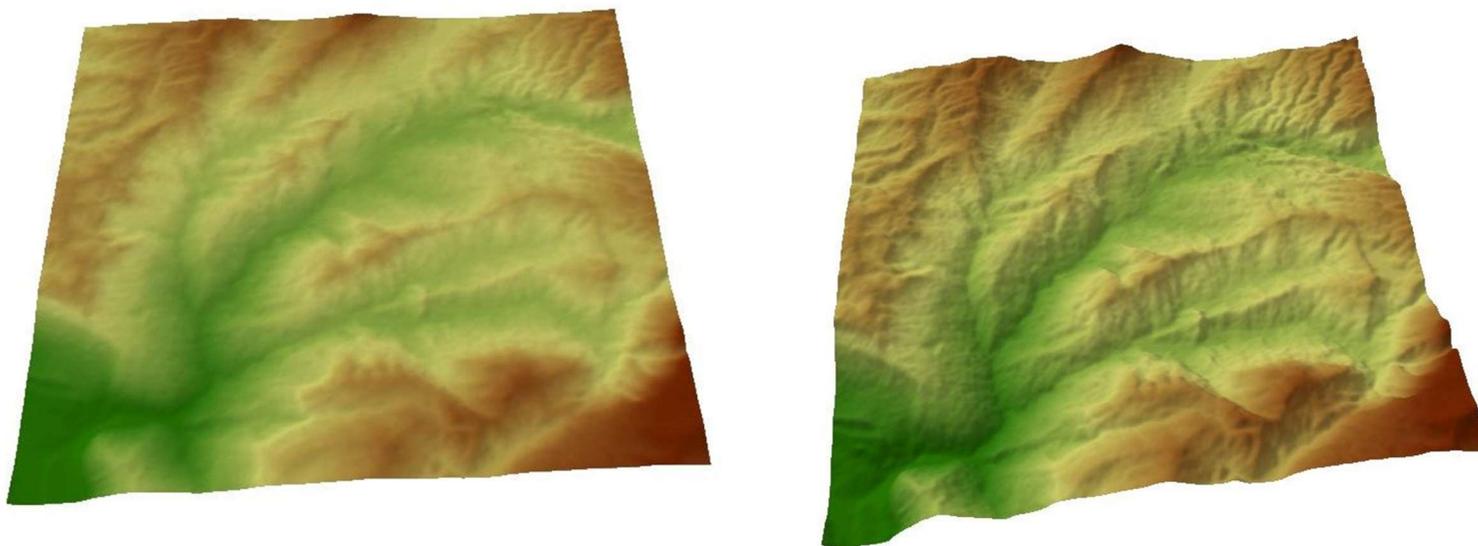
CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

8.2 Interpretación estructural

Para la identificación de fallas principales y secundarias de la zona fue necesario la utilización de imágenes satelitales, fotografías aéreas, Sistema de información Geográfico (ArcGIS 10.5), el respectivo modelo digital del terreno apoyo de Google Earth y arcScene 10.5, con los que se obtuvieron un mapa de sombras y capa de drenajes, para posterior un modelo en 3D de la zona con cierta exageración en la vertical para mejorar las visibilidad de algunos rasgos topográficos. Gracias a esto se complementó el mapa fotogeológico con rasgos estructurales (ANEXO 1).

Figura 23.

A) Modelo 3D de zona de estudio B) Modelo con escala de exageración 3:1 en la vertical.



La principal estructura en el área de estudio corresponde a geformas como laderas estructurales, sierras y lomos de depresión.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

8.2.1 Falla de Curití- Las cruces.

Esta falla se encuentra en dirección de SE-NW como se indicó anteriormente de acuerdo con Pulido (1979), esta falla posee una extensión aproximada de 45 kilómetros, dicha falla solo afecta a rocas sedimentarias del Cretácico inferior y se infiere que su plano de falla es de un ángulo considerablemente alto hacia el oeste, infiriendo que tiene un comportamiento inverso.

Se infieren y se nombran las siguientes fallas:

8.2.2 Falla Cajonera.

Esta falla fue identificada en la parte norte de la zona con una orientación de E-W ubicada sobre la quebrada Curití, se puede observar el cambio de litología y lineamiento de los causes, cambio de pendiente y vegetación.

8.2.3 Falla La Laja.

Esta falla fue identificada en la parte norte de la zona con una orientación de SE- NW que se une con la falla Curití por el cauce de la quebrada Pescaderito el cual muestra una orientación

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

rectilínea y cambio de pendiente, en medio de estas fallas se evidencia relieve topográfico de morfología alomadas lo cual nos indica que está asociado a un fallamiento inverso.

8.2.4 Falla Paloblanco.

Esta falla se encuentra a lo largo de la base de la meseta de Barichara con una orientación de S-N marcando la dirección rectilínea del cauce de la quebrada palo blanca por esta su nombre, muestra un cambio brusco en la pendiente y drenajes semiparalelos.

8.2.5 Falla Tambor.

Esta falla tiene una orientación SW- NE, fue identificada por orientación rectilínea del cauce de la quebrada, sistema de drenajes semiparalelos, cambio en litología y pendiente, se asocia a fallamiento inverso ya que se exponen litologías más antiguas.

8.2.6 Falla Buenos Aires.

Esta falla tiene una orientación W-E se encuentra de manera perpendicular a la falla Paloblanco, se identifica por cambios en la vegetación y escarpes pronunciados.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Otra evidencia del trazado de las fallas corresponde a la presencia de geoformas netamente estructurales como cerros, lomos de presión y escarpes de falla. En la parte sur y sureste del área en estudio se presentan diferentes pliegues tanto sinclinales como anticlinales, geomorfológicamente evidenciados por geoformas como sierras sinclinales y anticlinales, dicho plegamiento es evidencia de la afectación estructural que existe en la zona.

Respecto a los patrones de fracturamiento por medio de análisis de diaclasas los datos (*Anexo 3*) fueron graficados usando el software Stereonet y luego fueron georreferenciadas para poder estudiar su distribución espacial y relaciones entre sí en el área de estudio (Figura 24) A partir de los datos graficados se lograron definir 3 tendencias en los datos.

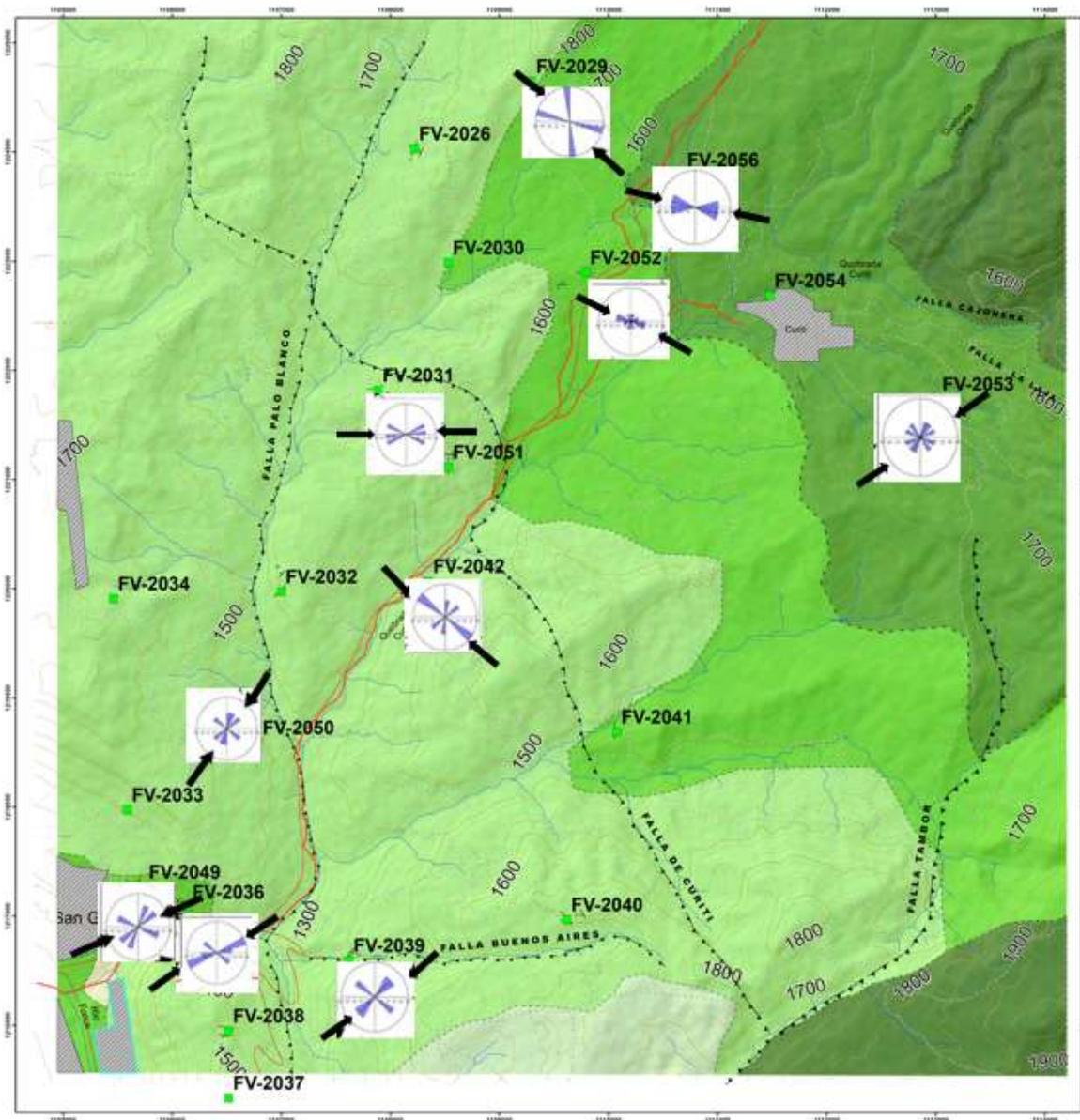
- ENE-WSW: Es el patrón predominante en la zona y se relaciona con la Falla Curití de dirección NE-SW.
- E-W: Esta tendencia se observa predominantemente alejados de las zonas de falla que corresponderían al N y al S del área de estudio.
- NW-SW: Esta tendencia agrupa las diaclasas que se encuentran asociadas a la zona de la falla Curití y se encuentran distribuidas a lo largo de la zona de estudio.

Haciendo uso de este análisis cualitativo, el cual no sería determinante dado su multicriterio y falta de densidad de datos se pudo determinar que la mayoría de las direcciones de esfuerzo corresponden a un sentido E – W. Esto ayuda a entender como de manera general los bloques se mueven uno respecto al otro.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 24.

Mapa estructural con Diagramas Rosa de diaclasas generados a partir de la base de datos brindada por el Ingeominas donde se asignaron las posibles direcciones de esfuerzos actuantes en el área, estos datos no son determinantes dado su baja densidad.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

8.3 Interpretación geomorfológica

Para la identificar las geoformas de la zona fue necesario la utilización de imágenes satelitales, fotografías aéreas, Sistema de información Geográfico (ArcGIS 10.5), el respectivo modelo digital del terreno y apoyo de Google Earth, con los que se obtuvieron un mapa de sombras, se realizaron perfiles topográficos para la delimitación e identificación de cada una de las geoformas presentes, en las que identificaron subunidades y componentes productos de ambientes estructural , denudacional, fluvial y antropogénicos según Carvajal (2012) y como resultado se obtuvo un mapa de geoformas (*Anexo 2* y figura 25) y que son resumidas en la Tabla 3 y explicadas a detalle a continuación.

Tabla 3. *Síntesis geomorfológica de los rasgos encontrados en el área de estudio, cabe aclarar que los términos utilizados son basados en Carvajal (2012).*

Ambiente	Geoformas	Nomenclatura
Antropogénico	Casco Urbano	Auc
Fluvial	Cause aluvial	Fca
Denudacional	Cima	Dc
	Ladera Denudada	Ddl
	Ladera estructural de cuevas	Scle
	Ladera estructural en contra pendiente	Slcp
	Ladera estructural	Sle
	Laderas escalonadas	Sles

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Estructural	Escarpe de línea de falla	Slfp
	Sierras y lomos de presión	Slp
	Sierra Sinclinal	Ss
	Sierras anticlinales	Ssan
	Laderas de contrapendiente sinclinal	Sscp
	Sierra estructural	Sse
	Ladera estructural de sierra homoclinal denudada	Sshle

El principal ambiente morfogenético en la zona de estudio corresponde al ambiente estructural, siendo el agente morfogenético más significativo con presencia de laderas y sierra estructurales.

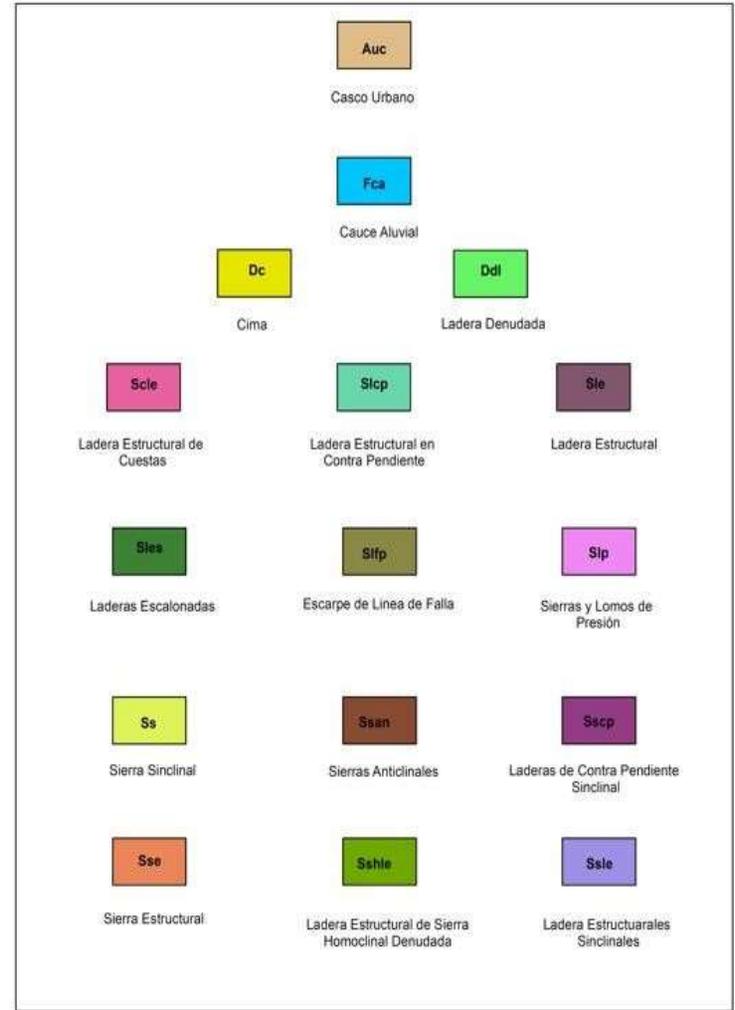
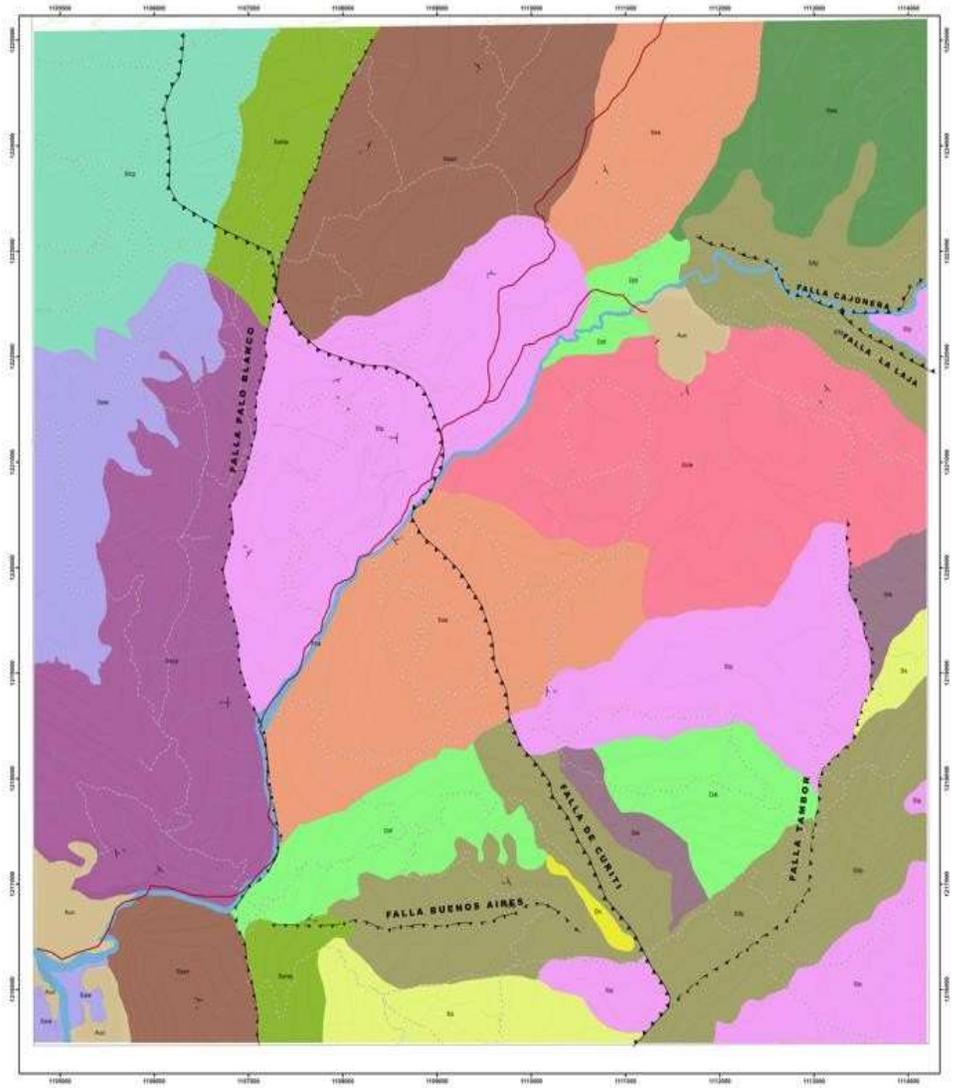
Figura 25.

Mapa generalizado obtenido de la interpretación fotogeológica producto de uso de imágenes satelitales, fotografías aéreas y Google Earth. Para detalle del mapa fotogeológico ver ANEXO

2.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Mapa Geomorfológico



Escala 1: 10.000
 0 0.25 0.45 0.9 1.35 1.8 Kilómetros

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

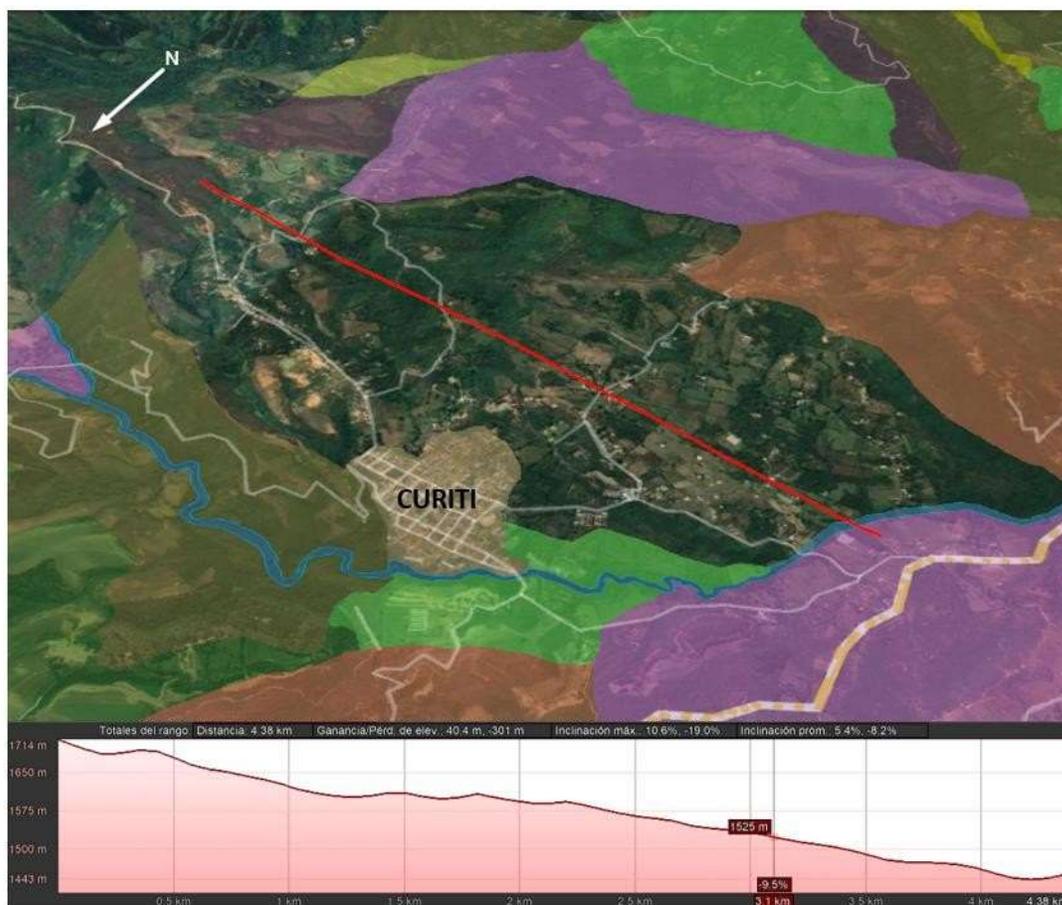
8.3.1 Subunidades

8.3.1.1 Ladera estructural de cuestras (Scle): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología alargada con estratos dispuestos en favor de la pendiente del terreno (5° - 15°), de formas rectas a irregulares y con pendientes inclinadas a muy inclinadas. La cual se encuentra distribuida en la parte Sur del municipio de Curití (Figura 26).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 26.

Imagen tomada de Google Earth Pro donde muestra una ladera estructural de cuestras, esta geoforma se destaca por el área que abarca dentro de la zona de estudio y la pendiente considerable que posee.



8.3.1.2 Laderas de contrapendiente de cuesta (Sc1p): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología alargada con estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, de longitud muy corta a corta, de formas cóncava o convexa y con pendientes escarpadas. Se constituye de intercalaciones de rocas duras a intermedias de origen ígneo o metamórfico, con

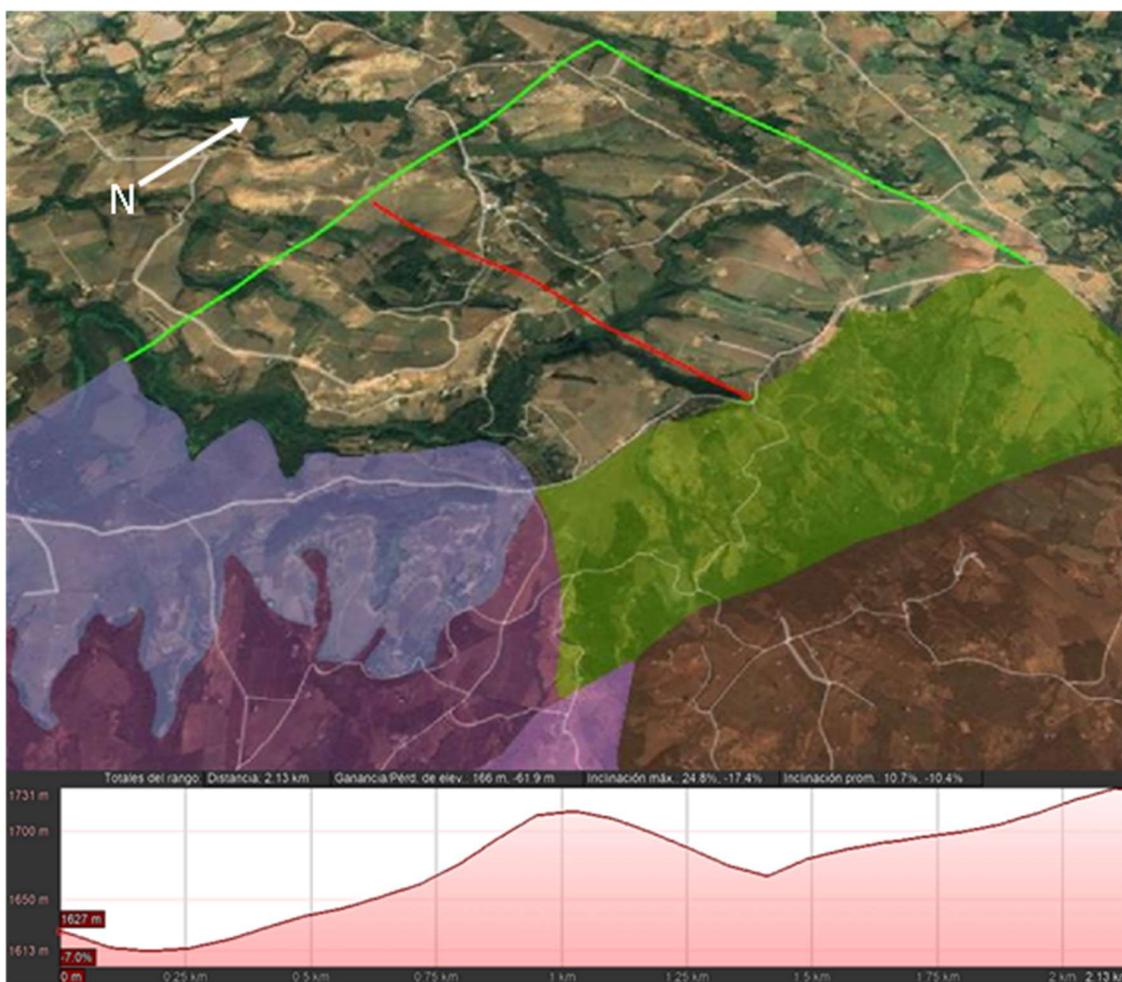
CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

desarrollo de drenaje dendrítico subparalelo localmente denso, como se observa en la esquina superior izquierda de zona (Figura 27) y se encuentra dividido por escarpe de falla.

Figura 27.

Ladera de contrapendiente de cuesta (Scpl), esta geoforma se destaca por la corta longitud de su ladera y una morfología escarpada. Imagen captada por medio de Google Earth Pro.

8.3.1.3 Laderas escalonadas (Sles): Se identifican por presentar un relieve topográfico



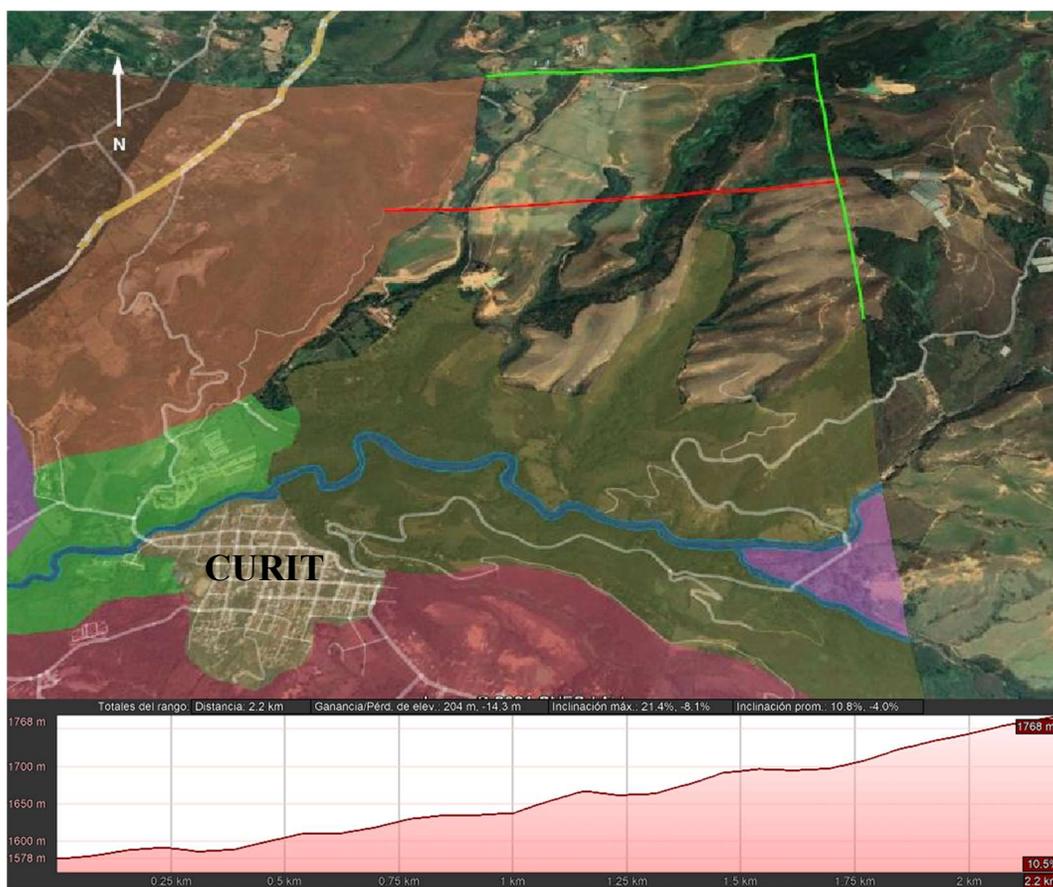
de morfología alargada con estratos en forma de escalón, cuyas pendientes varían entre muy inclinados a escarpados y dispuestos a favor o en contra de la pendiente del terreno, de longitud larga a extremadamente larga, de formas rectas, irregulares a escalonadas, separadas por escarpes

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

abruptos de menor longitud como consecuencia de la incisión de los drenajes o por el fracturamiento perpendicular al buzamiento de los estratos sedimentarios donde se concentran procesos de erosión diferencial (Figura 28).

Figura 28.

En esta imagen capturada a través de Google Earth Pro, se pueden apreciar las diferentes irregularidades topográficas de la ladera en forma de escalones que le dan nombre a la geoforma (Sles).

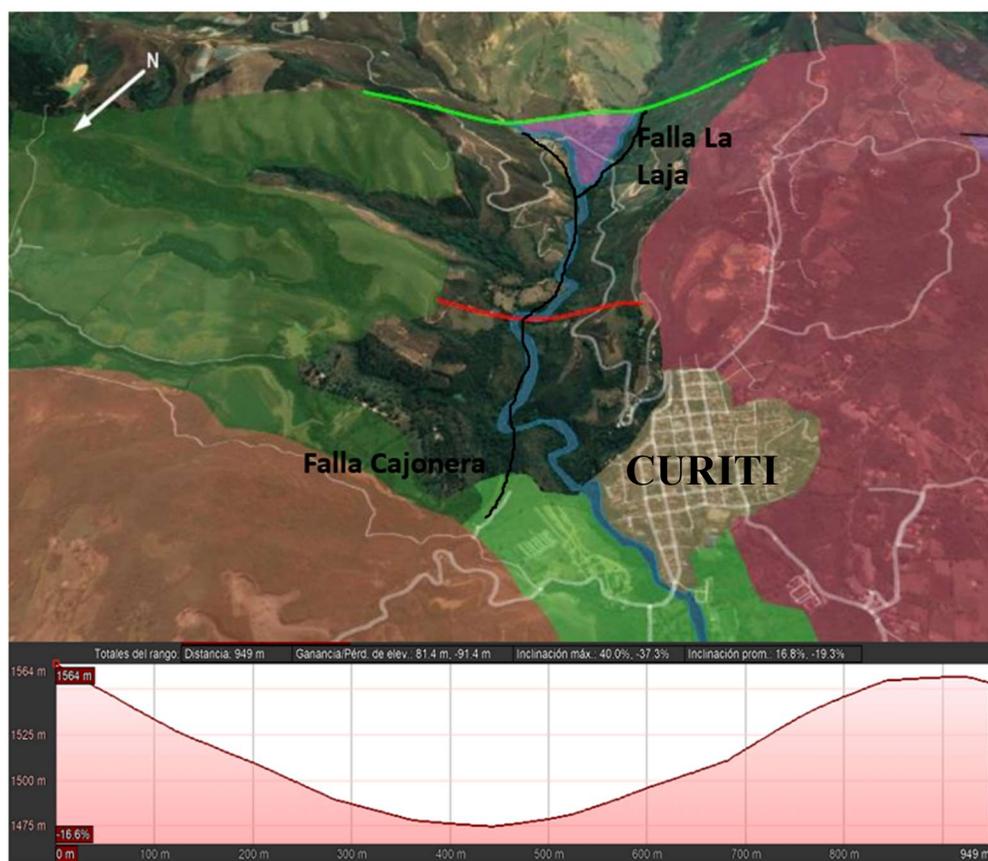


8.3.1.4 Escarpe de línea de falla (Slfp): Escarpe cuya ladera es corta a muy corta, de pendiente abrupta cóncava o convexa, originada por erosión de falla definida ésta, por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas (Figura 29).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q. CURITÍ.

Figura 29.

En esta imagen capturada a través de Google Earth Pro, se pueden apreciar las diferentes irregularidades topográficas de la ladera en forma de escalones que le dan nombre a la geoforma (Sles).

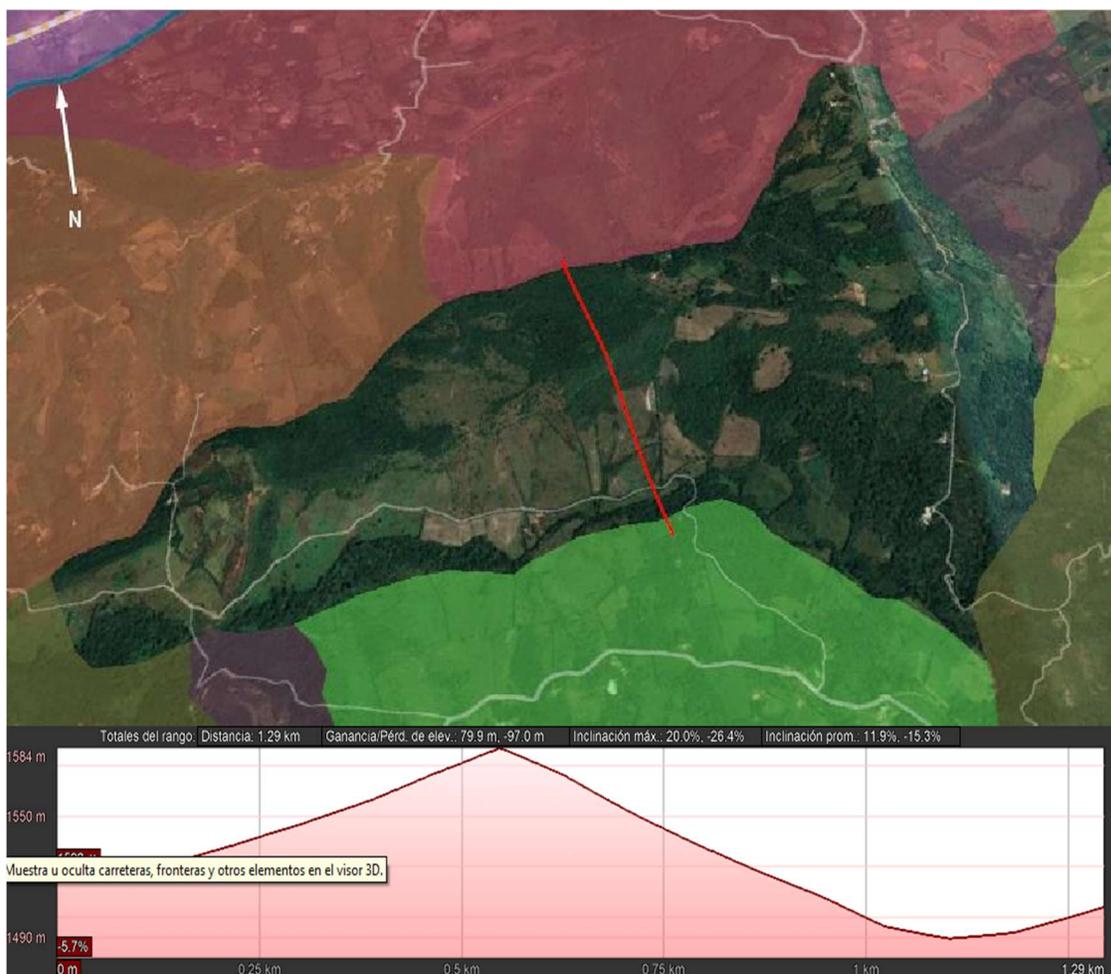


8.3.1.5 Sierras y lomos de presión (Slp): Se identifican por presentar un la localmente curvas, formadas por plegamiento intenso, verticalización de secuencias sedimentarias, asociados a fallamiento inverso, generados en una zona de tras presión de una falla de rumbo o trascurrenté. (Figura 30).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 30.

Las sierras y lomos de presión como el mostrado en la imagen se encuentran asociados al trazo de las fallas y generalmente se alienan de forma paralela con dichas estructuras. Imagen obtenida mediante Google Earth Pro.

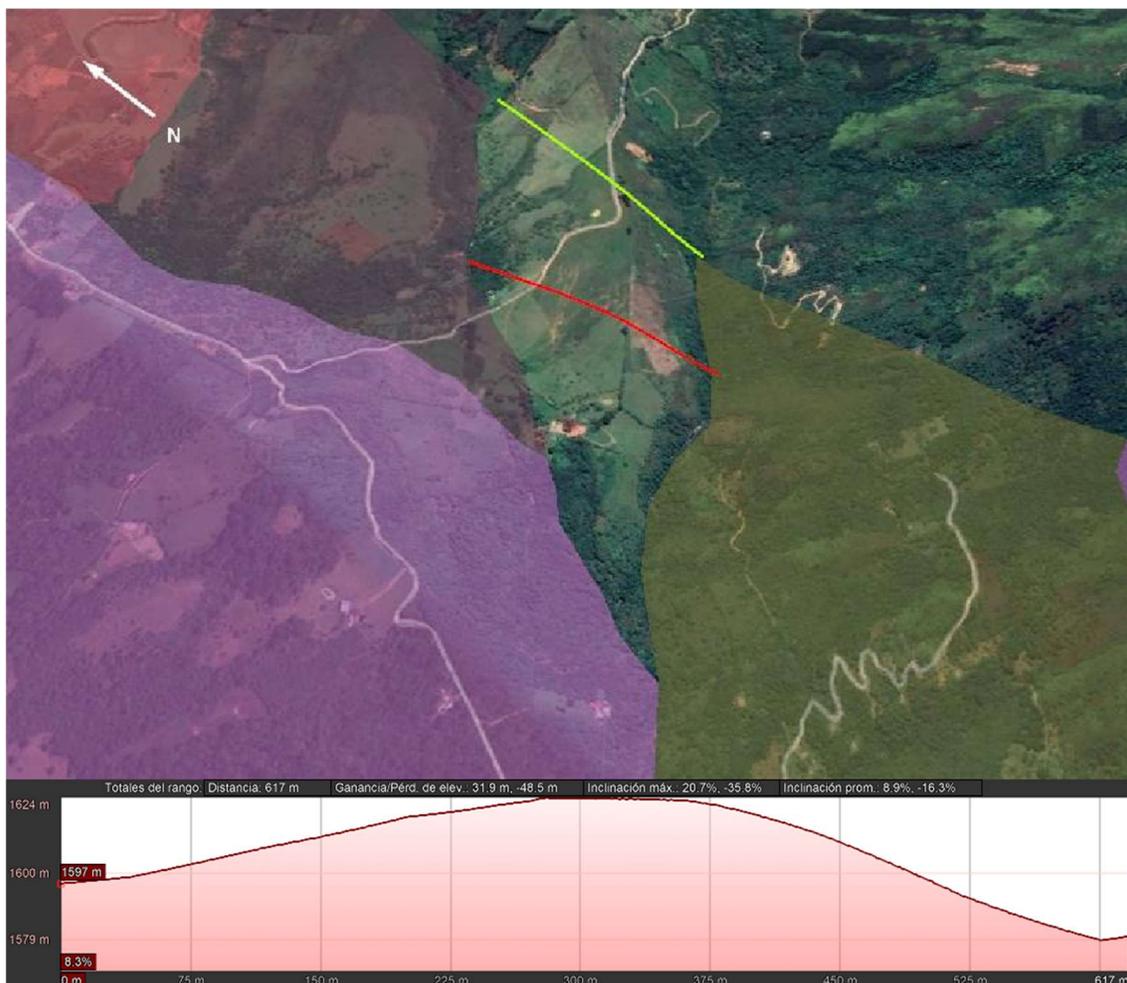


8.3.1.6 Sierra sinclinal (Ss): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología colinada, amplia en forma de artesa elevada formada en el eje de un sinclinal. La disposición actual obedece a procesos denudativos diferenciales que han desmantelado los flancos de la estructura, invirtiendo el relieve original, dejando la artesa como una prominencia topográfica limitada por laderas de contrapendiente (Figura 31).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 31.

La imagen de Google Earth Pro, muestra una ladera sinclinal, estas geoformas se encuentran asociadas a la presencia de un plegamiento considerable en la parte sur de la zona de estudio.



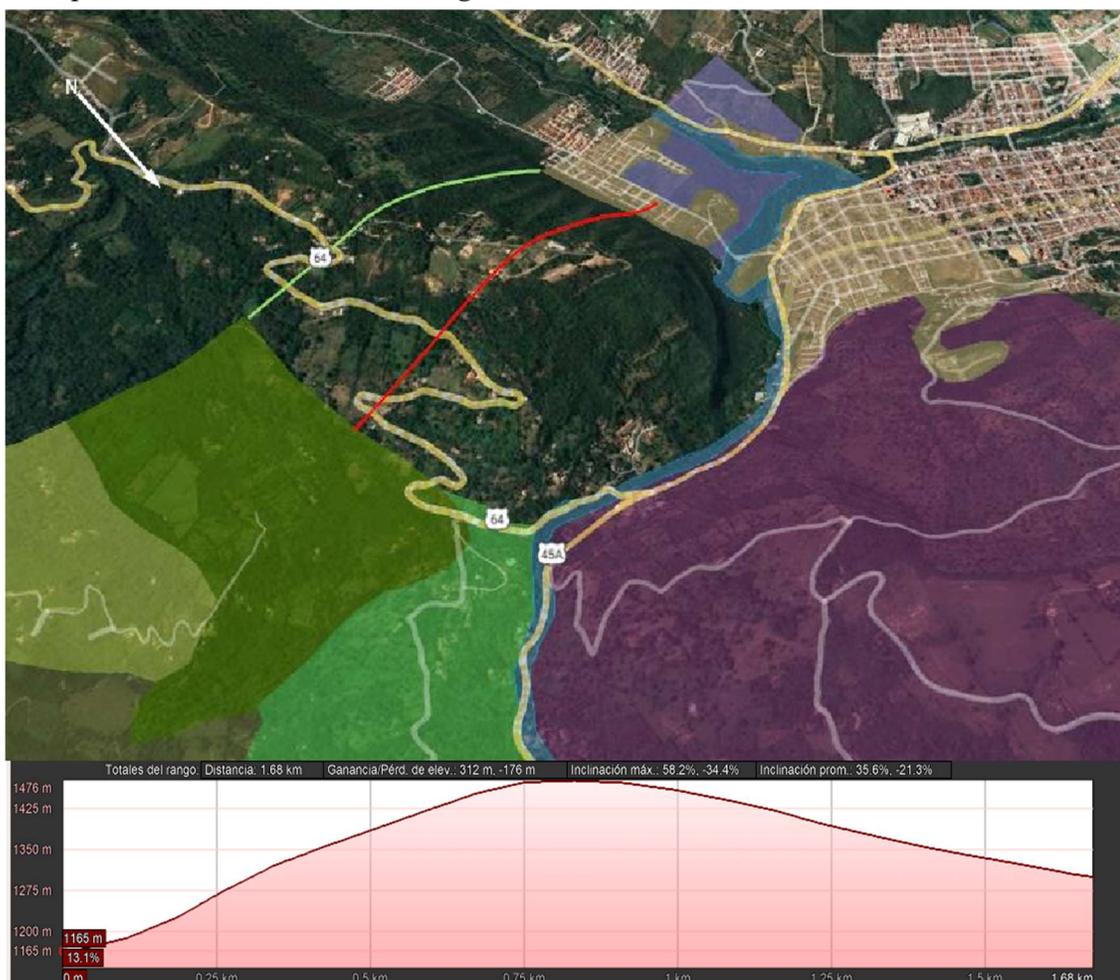
8.3.1.7 Sierras anticlinales (Ssan): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología colinada a alomada de cimas o crestas agudas o redondeadas, que siguen el eje anticlinal formado por el arqueamiento o combadura de los estratos o capas que se inclinan divergentemente a partir de su eje. Conforman laderas estructurales inclinadas a muy abruptas,

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

rectas o convexas y de longitudes largas. Localmente se presentan procesos de carcavamiento (Figura 32).

Figura 32.

El principal factor morfogenético en el área de estudio es el estructural, lo que se ve reflejado en la presencia de geoformas como la mostrada en la imagen correspondiente a una sierra sinclinal. Captura realizada mediante Google Earth Pro.



8.3.1.8 Laderas de contrapendiente sinclinal (Sscp): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología alargadas convexas a irregulares escalonadas con pendientes abruptas a escarpadas definidas por estratos inclinados en contra de la pendiente del terreno, de

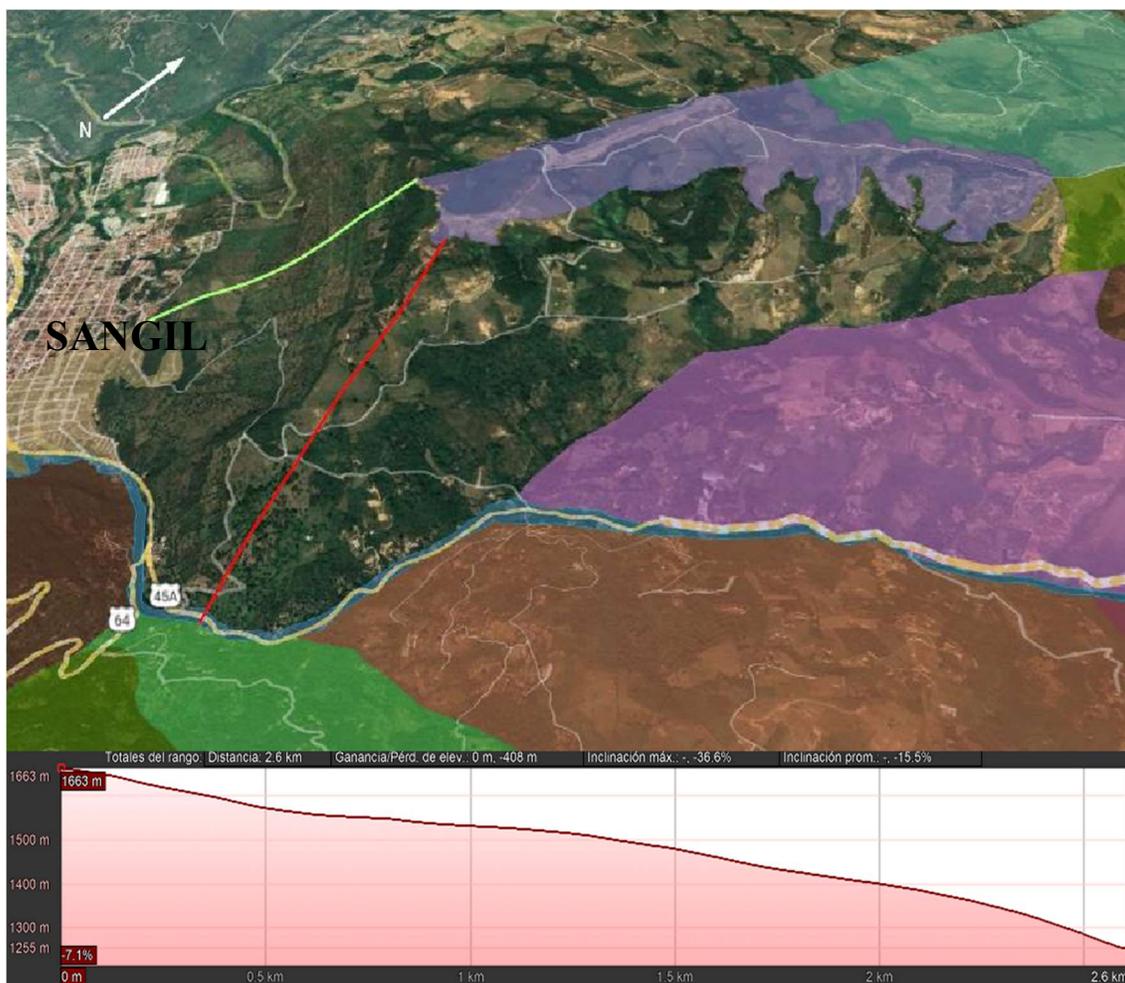
CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

longitudes cortas a moderadamente largas. Intercalaciones de rocas blandas a intermedias, que definen un drenaje subparalelo denso como se muestra no se ve el análisis de los drenajes (Figura 33).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 33.

La imagen muestra una ladera de contrapendiente sinclinal la cual se define por ser parte de una estructura mayor en este caso un pliegue de tipo sinclinal en cuyo flanco los estratos se inclinan en sentido opuesto a la pendiente. Imagen obtenida mediante Google Earth Pro.



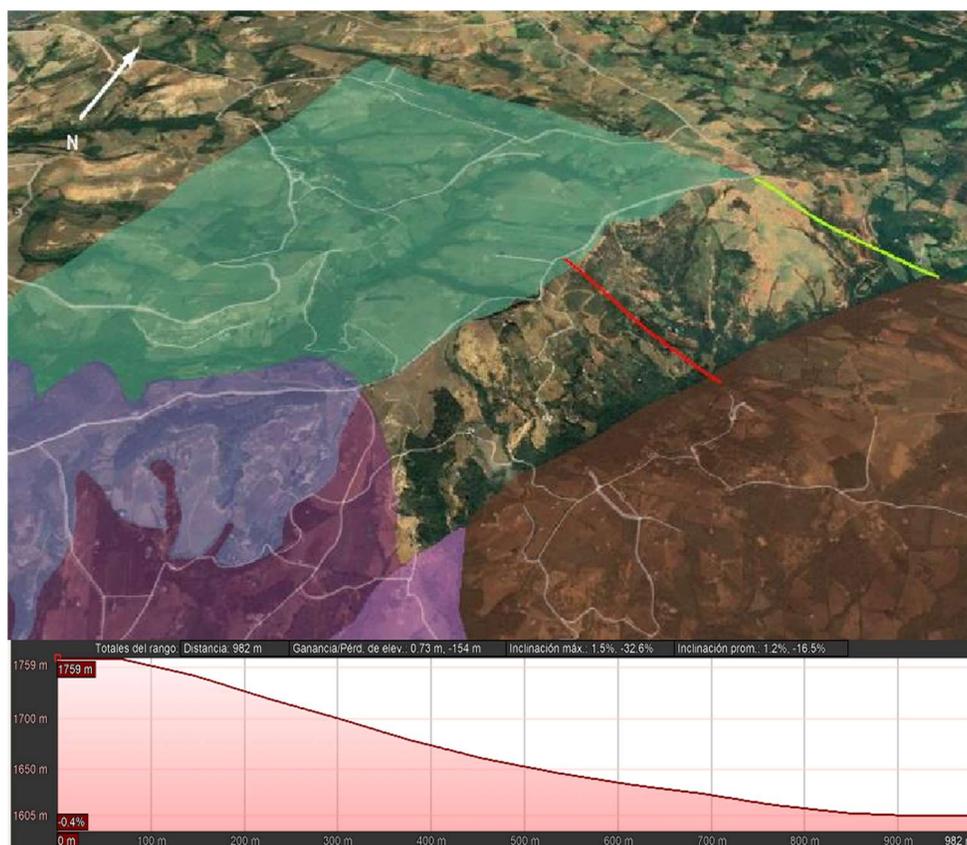
8.3.1.9 Ladera estructural de sierra homoclinal denudada (Sshle): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología alargada convexas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas definidas por la inclinación de los estratos en favor de la pendiente ($> 35^\circ$), de longitud corta a moderada larga de formas rectas. Rocas intermedias a duras con suelos residuales

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

delgados y asociados localmente con procesos denudacionales acentuados y desarrollo de tierras malas a que se refiere exactamente (Figura 34).

Figura 34.

La Ladera estructural de sierra homoclinal denudada presentada en la imagen posee un grado considerable de denudación apreciable en la incisión de los drenajes. Captura obtenida por medio de Google Earth Pro.

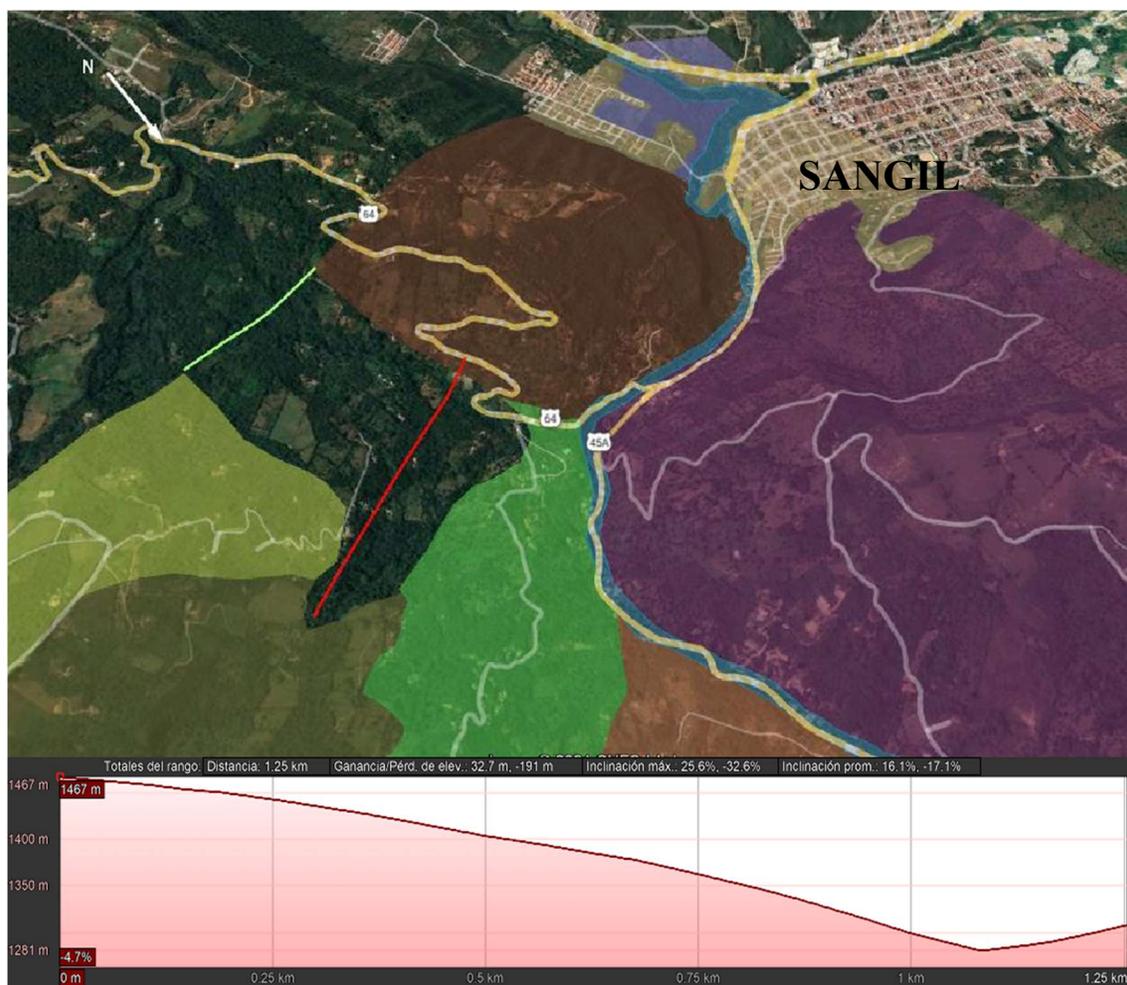


8.3.1.10 Laderas estructurales sinclinales (Ssle): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología alargadas cóncavas y pendientes inclinadas a abruptas definidas por estratos inclinados en favor de la pendiente del terreno, conformando una artesa. Son de longitud corta a moderadamente larga, Rocas blandas a intermedias, donde se desarrolla un drenaje dendrítico subparalelo poco denso asociado con formación de barrancas profundas (Figura 35).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 35.

La imagen tomada de Google Earth Pro muestra una ladera estructural de sierra sinclinal, se caracteriza por ser parte de un pliegue de tipo sinclinal (uno de los flancos internos del pliegue).



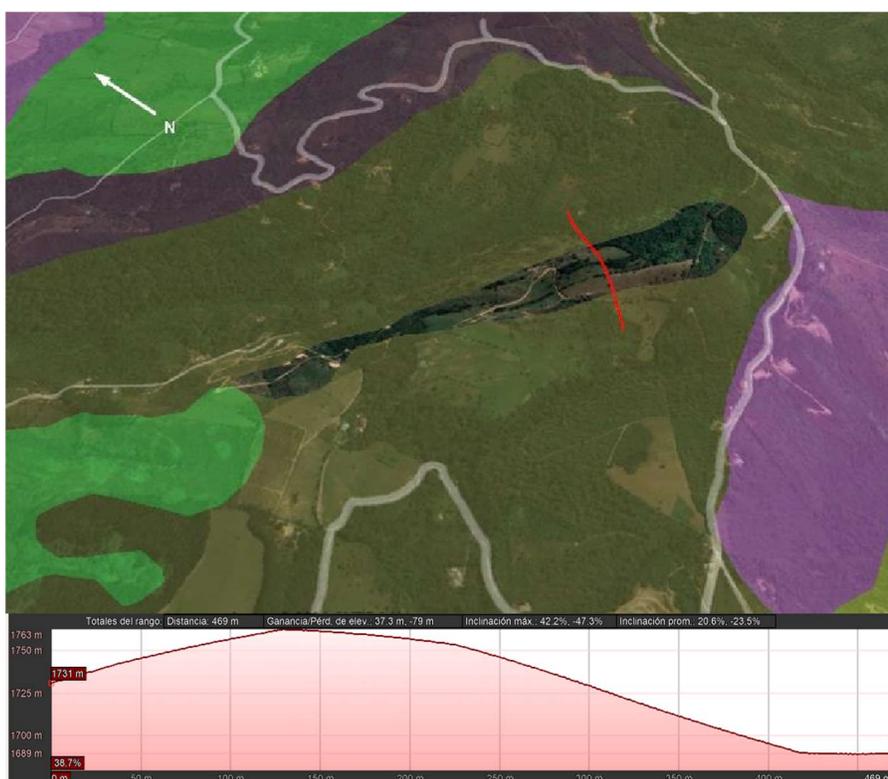
8.3.1.11 Cima (Dc): Cresta de forma convexa plana y amplia, se presentan como franjas alargadas que bordean algunas divisorias de aguas, de pendiente plana a inclinada, con anchos entre 200 a 800 m, limitadas por laderas cuya inclinación puede ser moderada a escarpada. Generadas a partir de procesos meteorización y erosión intensa, sumado a los procesos de origen

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

antrópico. Esta condición de zonas aplanadas ha sido aprovechada para el asentamiento de la población (Figura 36).

Figura 36.

Imagen tomada de Google Earth Pro, muestra cima caracterizada por su geometría convexa y de morfología alargada producto de procesos erosivos.

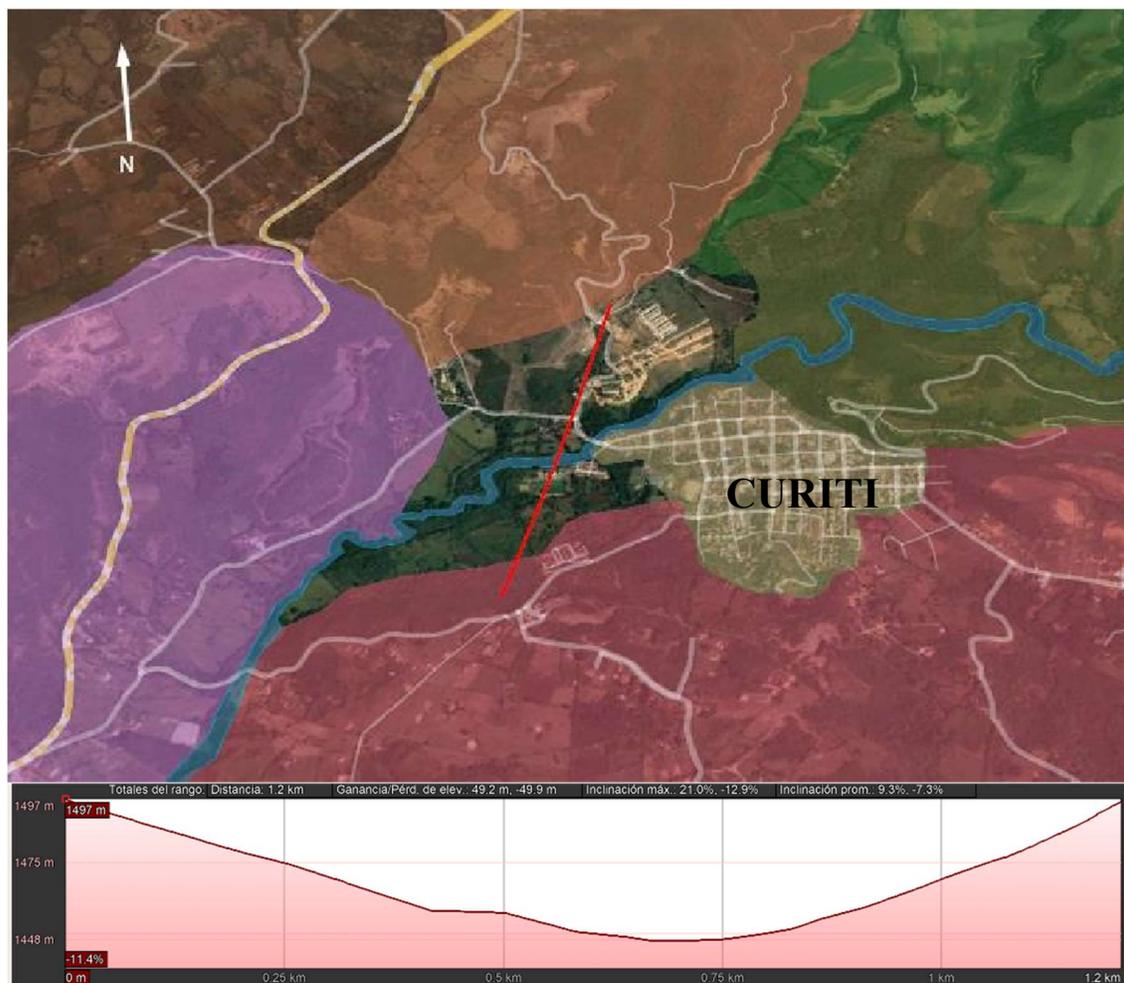


8.3.1.12 Lomas denudadas (Dld): Se identifican por presentar un relieve topográfico de morfología alomada y elongadas con una altura menor de 200 m sobre su nivel de base local, con relieve relativo baja, de laderas cortas a muy cortas, de forma convexa, cuyas pendientes varían entre muy inclinadas a muy abruptas. Su origen está asociado a procesos intensos de meteorización y de erosión diferencial. Estas geoformas se caracterización por presentar movimientos en masa y pilas porque se ve muy verde (Figura 37).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 37.

La ladera desnuda presentada en la imagen se define principalmente por el desarrollo de suelos debido a procesos de meteorización considerable. Imagen capturada de Google Earth Pro.



8.3.2. Formas Exokársticas.

Para el análisis de la geomorfología epikárstica se hizo uso de las fotografías aéreas montadas en el software ArcMap 10.5 con ayuda de google earth. Se inició por identificar las zonas

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

donde se ha reportado el desarrollo de cavernas ya que estas son indicadoras de que la litología es favorable para la formación de estas. Se encontró que la mayoría de las cavernas son desarrolladas en las Formaciones Rosa Blanca y Tablazo y que principalmente se encuentran en la vereda Palo Blanco (N – NW de la población de Curití).

En el caso de este trabajo no se encontró el desarrollo de formas exokársticas como dolinas o karren a escala 1:10.000, esto probablemente a que las zonas donde afloran estas rocas no tienen un alta pendiente que favorezca a la escorrentía y posterior disolución de la roca. En esta área de estudio es probable que sea mayor el desarrollo de formas endokársticas que no han sido descubiertas a formas epikársticas.

8.4. Análisis de vegetación.

La combinación de las bandas rojas (banda 4) y la banda de infrarrojo cercano (banda 5) permitió determinar el NDVI de la zona de trabajo durante intervalos de 6 meses aproximadamente (excluyendo el año 2018) por dificultad en obtención de imágenes que no tuviesen alta nubosidad lo cual dificulta la obtención de datos. Estas imágenes obtenidas (Figura 39) permiten observar la vigorosidad y los cambios en la vegetación durante épocas de alta y baja pluviosidad y su vigorosidad se puede asociar a una presencia de una buena fuente de agua (ya sea en subsuelo o en superficie).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

De las imágenes NDVI (Figura 39) se puede observar de manera consistente que la vegetación sana y saludable se encuentra localizada en la zona SE con valores de NDVI entre 0.6 y 0.8 predominantemente, la vegetación que se corroboró mediante fotografías aéreas y control en campo corresponde a vegetación nativa, arbustos y bosques frondosos que muestran alta vigorosidad y variedad los valores medios (0.6 – 0.470) corresponden a zonas moderadamente vegetadas, estos valores se ven a lo largo de toda la zona de trabajo y se asocian a pequeños cultivos como de tabaco, maíz, café, helechos y vegetación baja, los valores bajos (0.470- 0.230) son valores muy moderados asociados a zonas de praderas con pastos y rastrojo, por último los valores (0.230 - -0.6) corresponden a las zonas de vegetación más baja o nula, que se pudo constatar que corresponden a las zonas urbanas de San Gil, Curití, el Aeropuerto, cuerpos de agua y suelo descubierto.

Cabe resaltar que no fue posible utilizar datos meteorológicos, tales como la pluviosidad ya que las estaciones meteorológicas que actualmente se encuentran reportando, están muy alejadas de la zona de estudio lo cual nos podría generar un margen de error alto debido a la escala que se realizó el trabajo, evidenciándose cambios litológicos y estructurales de donde las estaciones se encuentran ubicadas.

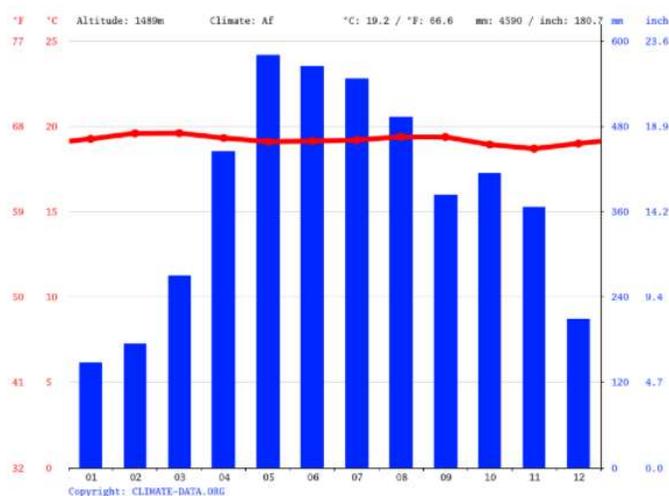
según histograma de climatología (figura 38) se presentan los meses de mayo a septiembre como los meses de mayor lluvias y los meses de diciembre a febrero como los correspondientes a épocas secas, estos datos deben ser tomados con cautela debido a la variabilidad del clima que se presenta en la actualidad donde los tiempos de retorno son modificados debido al cambio climático, por lo cual estos datos deben ser contrastados con datos de estaciones climatográficas, pero debido a que no se encontraron datos de este tipo cerca de la zona no se pudo hacer dicho contraste.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

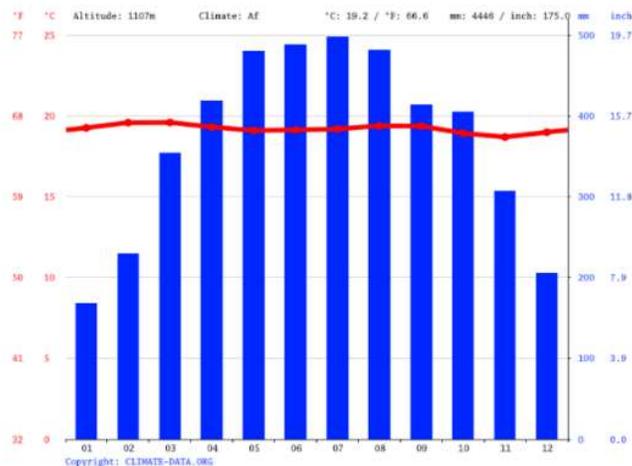
Figura 38.

Imágenes tomadas de climate.data.org representando el climograma de los municipios de San Gil y Curití.

CLIMOGRAMA CURITÍ



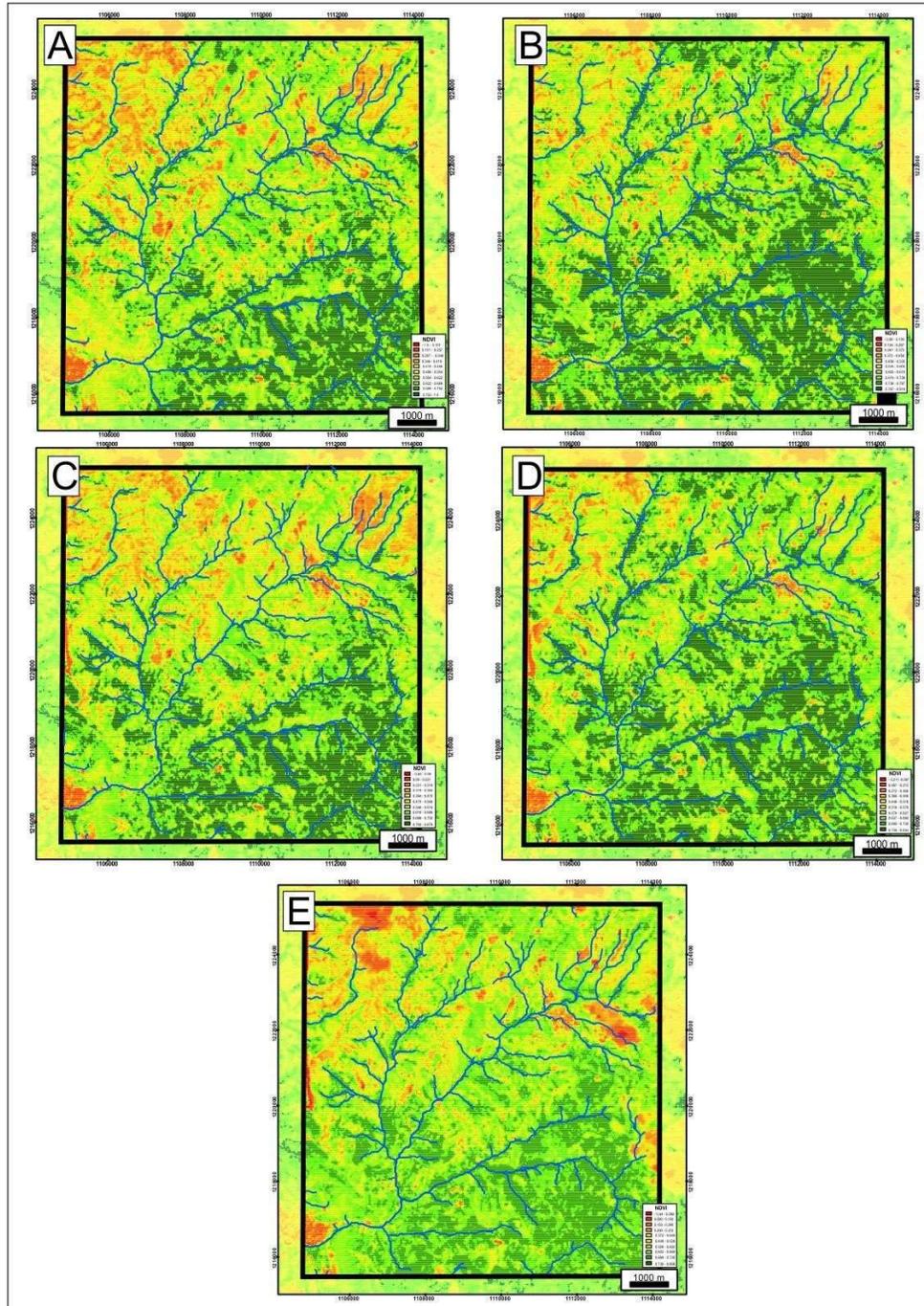
CLIMOGRAMA SAN GIL



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 39.

Imágenes NDVI obtenidas gracias a la combinación de bandas, el área de trabajo corresponde al recuadro negro y los valores verdes oscuros representan valores de NDVI.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

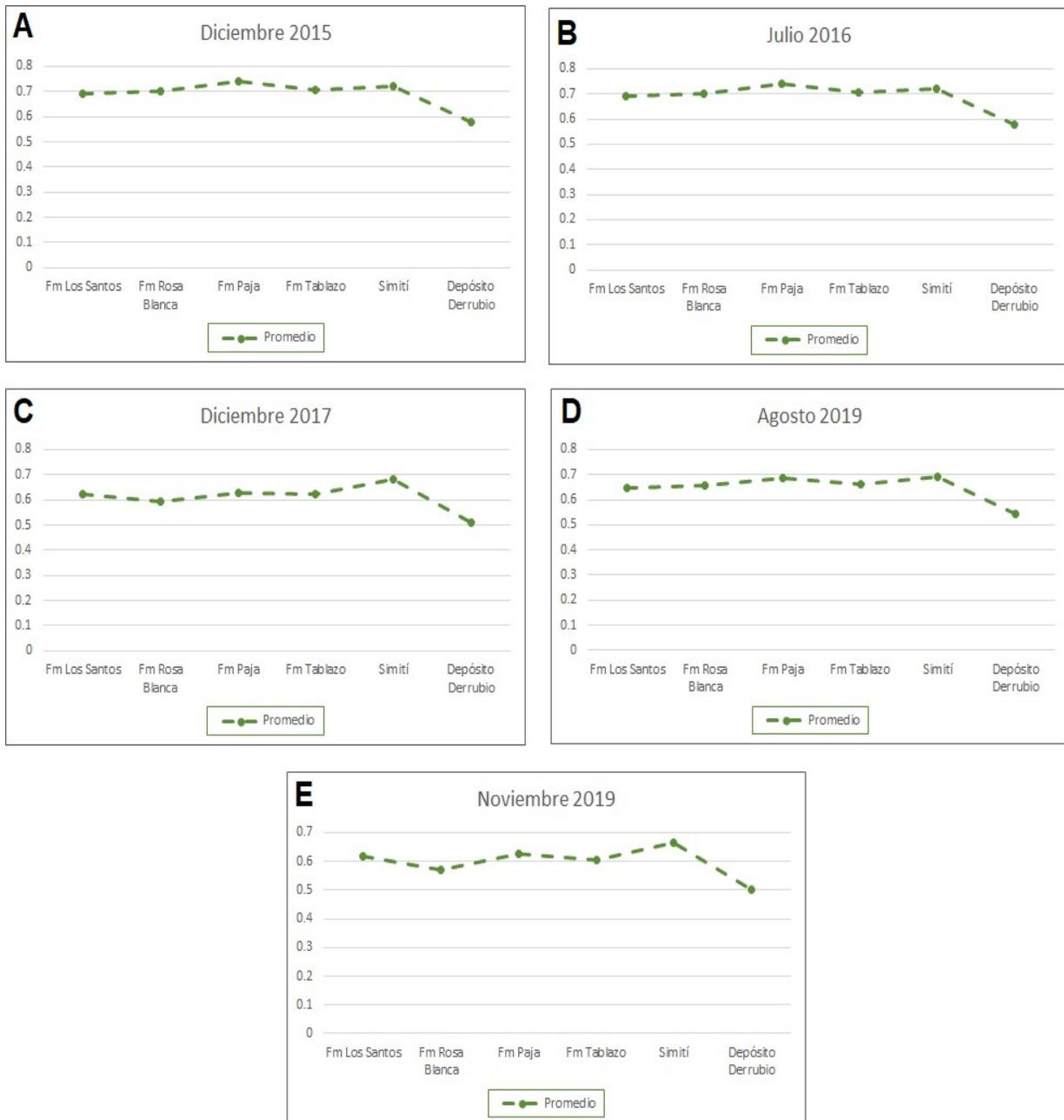
La vegetación saludable tiene mayor densidad en las Formaciones Los Santos, Paja y Tablazo durante periodos de mayor pluviosidad (Finales de año) y tienden a diversificarse en zonas cercanas a drenajes por la facilidad de obtención de recurso hídrico para su subsistencia. Adicionalmente, se observó un mayor desarrollo de la vegetación y una mayor cobertura durante los periodos de mitad de año (Figura 39B; 39D) esta extensión de los dominios vegetales se da sobre las formaciones los Santos, Paja y Tablazo más allá de los drenajes que se generan, lo que puede representar que estas acumulan buena cantidad de recurso hídrico que ayuda al desarrollo de vegetación ya sea en condiciones de menor precipitación (mitad de año).

Un análisis estadístico por medio de la herramienta histograma zonal de Arcgis permitió determinar los valores máximos, promedios y mínimos del NDVI asociado a cada formación (Figura 40 41& 43) donde se puede observar que las tendencias en los cambios de vegetación entre las imágenes a lo largo de los años. Los valores máximos de NDVI (hasta ~ 0.92) que representan la vegetación más saludable en el intervalo de 3 años se encontraron asociados primero a la Formación Tablazo, luego a la formación Paja y por último a la Formación Simití (Figura 41), los valores promedio oscilan entre $0.5 - 0.68$ (Figura 40) y se observa que no presentaron mayor cambio a lo largo de los años (± 0.1) siendo las Formaciones Paja, Tablazo y Simití las que poseen índices mayores. Por último, los valores mínimos del índice NDVI (hasta ~ -0.6) son asociados principalmente a la Formación Rosa Blanca, cabe destacar que en Noviembre del año 2019, la Formación Tablazo también mostró índices muy bajos (~ -0.4) mientras las otras formaciones litológicas se mantuvieron en valores entre $-0.1 - 0$ (Figura 44).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 40.

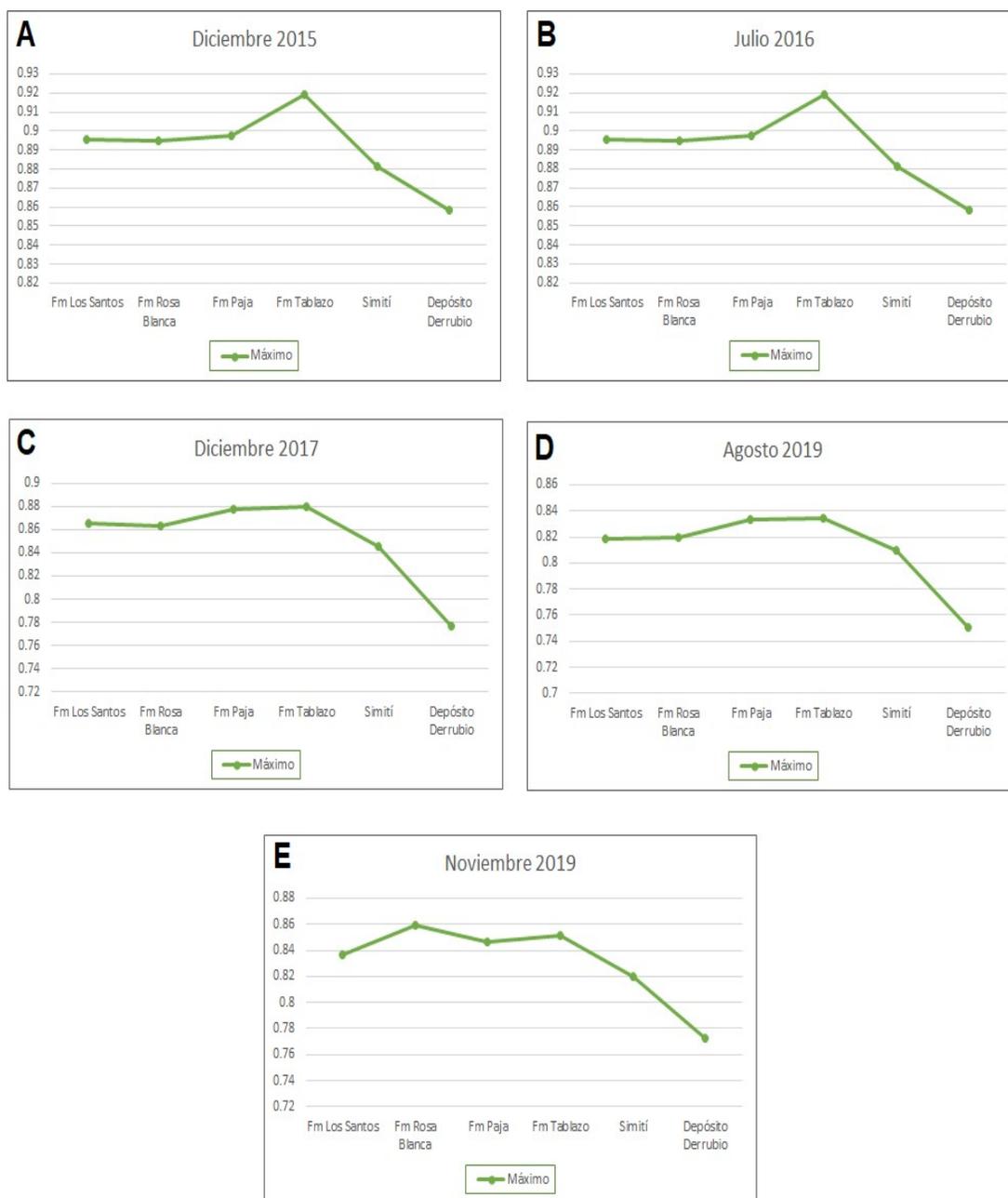
Análisis de cambios en NDVI promedio respecto a la formación geológica, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 41.

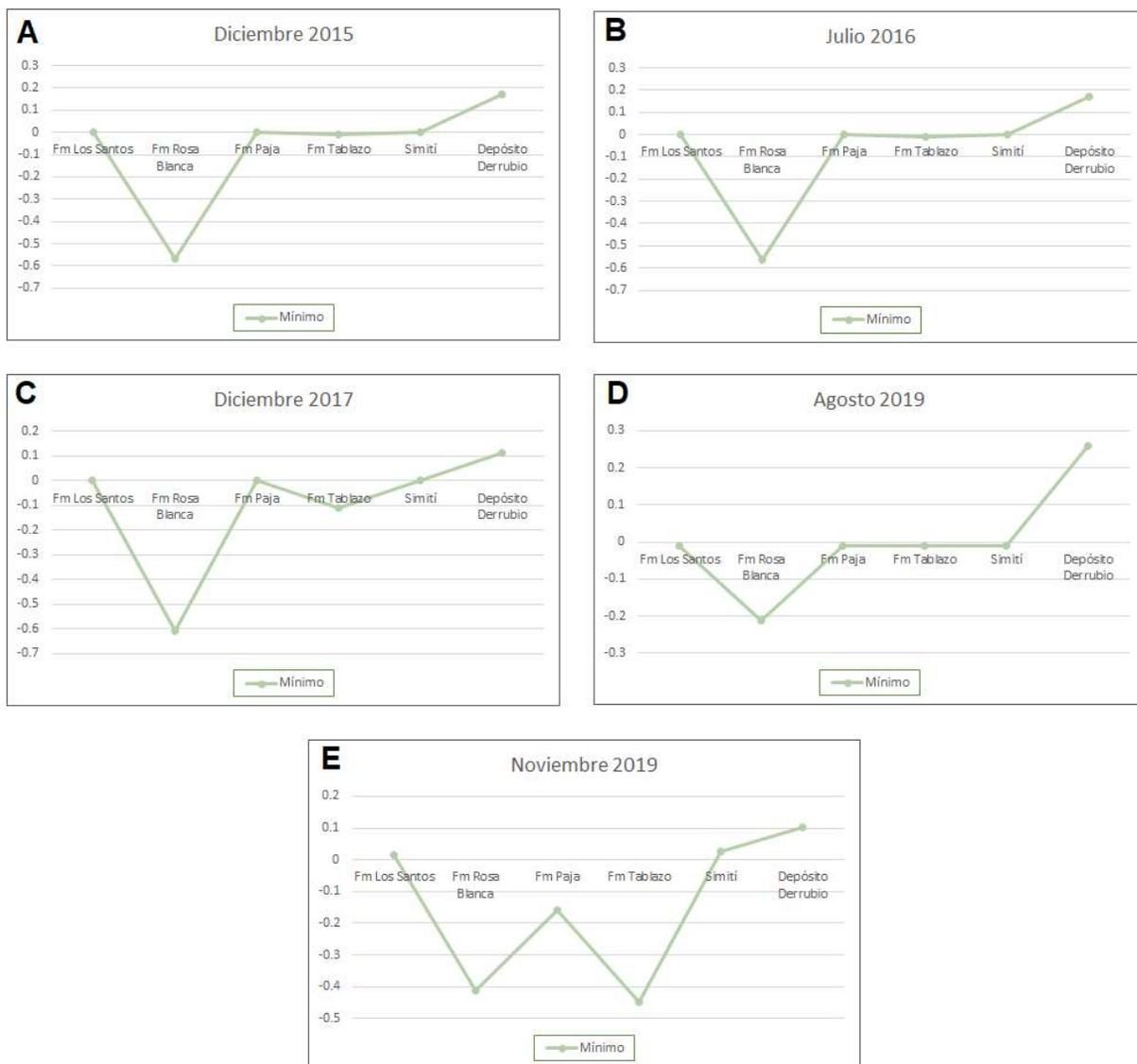
Análisis de cambios en NDVI máximo respecto a la formación geológica, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 42.

Análisis de cambios en NDVI mínimo respecto a la formación geológica, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.



Los valores más bajos de NDVI corresponden a la Formación Rosa Blanca, la posible razón por la que esta presenta los valores más bajos es que en ella se encuentra la población de Curití y zona de canteras donde se explota constantemente material rocoso, por lo que la vegetación tiende

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

a ser muy baja en estas zonas, también la Formación Tablazo alcanza unos valores bajos que se puede asociar a los escarpes donde la vegetación encuentra dificultad para crecer y mantenerse y así mismo algunas construcciones urbanas. De todas las formaciones presentes las que tienden a tener el menor índice de vegetación promedio son los depósitos de derrubio con un NDVI promedio menor a 0.5.

Con la finalidad de observar los cambios del índice a lo largo del tiempo se graficaron los datos por formación a lo largo de los intervalos de tiempo (Figura 43, 44 & 45).

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 43.

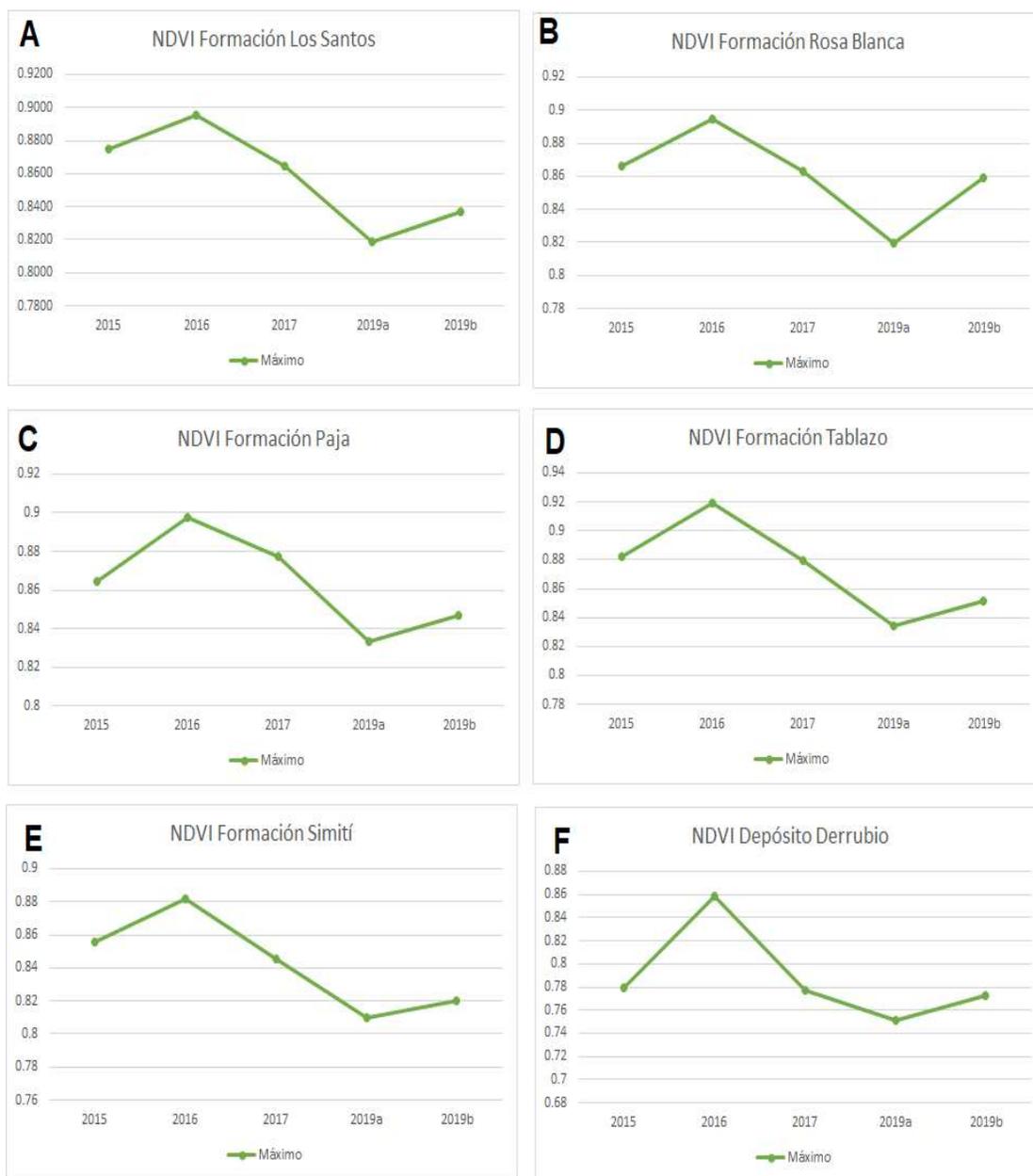
Análisis de cambios en NDVI promedio respecto al tiempo, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.

Figura 44.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Análisis de cambios en NDVI Máximo respecto al tiempo, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 45.

Análisis de cambios en NDVI mínimo respecto al tiempo, los valores estadísticos se obtuvieron usando la herramienta Histograma zonal de ArcMap 10.5. Las gráficas se encuentran organizadas cronológicamente.



CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

En estas gráficas se pudo observar que a medida que pasan los meses los cambios de índices de vegetación siguen las mismas tendencias de aumento o disminución adicionalmente se puede inferir que:

- En el año 2016 se encontraron los mayores valores promedio de vegetación saludable en las formaciones geológicas.
- Desde el 2016 hasta el 2017 se observa disminución de la vegetación saludable y más áreas descubiertas que significan una deforestación en las zonas donde aflora la Formación Rosa Blanca y los depósitos de derrubio.
- Entre el 2017 y el 2019 cabe destacar que, en la Formación Rosa Blanca, Formación Tablazo y Depósitos de derrubio hubo un ligero aumento en los valores mínimos de NDVI esto se interpreta como una posible recuperación de la cobertera vegetal sobre zonas que antes tenían valores bajos (Figura 45C & 45D) pero que igual no será mayor que el máximo del 2016.
- En el año 2019 hubo una disminución en los índices para las formaciones Rosa Blanca, Paja, Tablazo y depósitos de derrubio, significando pérdidas de cobertera vegetal saludable, contrario a las formaciones Los Santos y Simití donde hubo un aumento del índice (Figura 45A & 45E).

8.5. Análisis de porosidad y permeabilidad.

Una vez obtenidos los datos de permeabilidad y porosidad de equipo Keyphi (tabla) y equipo Core Pet (tabla), es posible notar que los valores de mayor permeabilidad se encuentran

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

en la parte sur este correspondiente a la muestra JL 01_07 asociada a la formación los Santos, en cuanto a la porosidad las muestras que presentan mayor porosidad JL 01_07 asociada a la formación los Santos y las muestras JL 02_04_1 y JL 02_04_2 asociado a la formación la Paja miembro inferior que corresponde a niveles de arenas.

Los valores de menor permeabilidad y porosidad corresponden a la muestra J02_05 y J01_05 correspondiente a la formación Rosa blanca donde principalmente se encuentran calizas.

Estos valores y ubicación de las muestras se pueden evidenciar sobre el mapa fotogeológico en la figura. 47

Tabla 4.

Valores de permeabilidad y porosidad obtenidos para las tres muestras usando el equipo Keyphi.

ID - MUESTRA	ρ_g (g/cc)	ϕ (%)	k_{∞} (mD)
D01-07	2.59	7.51%	1.549
D01-11	2.69	2.34%	0
D02-02	2.66	6.08%	0.006
D02-04	2.67	10.70%	0.091
D02-05	2.71	1.85%	0
D02-06	2.68	6.58%	0.01

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

D02-08	2.96	10.97%	0.57
--------	------	--------	------

Tabla 5.

Tabla de medidas de diámetro y longitud de los plugs

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

# de medidas	D01-07		D01-11		D02-02		D02-04	
	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)
1	36.70	54.52	37.00	48.39	37.01	45.51	37.04	46.91
2	36.77	54.50	37.02	48.63	37.09	45.44	37.12	46.99
3	37.02	54.31	36.99	48.54	37.03	45.39	36.90	47.00
Promedio (mm)	36.83	54.44	37.00	48.52	37.04	45.44	37.02	46.96
Promedio (cm)	3.68	5.40	3.70	4.85	3.70	4.54	3.70	4.96

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

# de medidas	D02-05		D02_06		D02_08	
	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	diámetro (mm)	Longitud (mm)	diámetro (mm)	Longitud (mm)
1	37.03	55.98	37.05	37.58	37.08	37.08
2	37.03	56.06	37.08	38.04	36.94	36.92
3	37.01	55.95	37.00	38.17	36.86	36.92
Promedio (mm)	37.02	55.99	37.04	37.93	36.96	36.97
Promedio (cm)	3.70	5.59	3.70	3.79	3.68	3.69

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Tabla 6.

Tabla de calibración de balanza

Teórico	Experimental	% error
100gr	99.9967 gr	0.0033
50gr	49.9984 gr	0.0032

Tabla 7.

Peso en gramos de cada uno de los Plugs.

Muestra	Peso (gr)
D01-07	138.8341
D01-11	137.323
D02-02	122.3492
D02-04	120.3398
D02-05	160.3891
D02-06	102.3386
D02-08	104.6422

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Tabla 8.

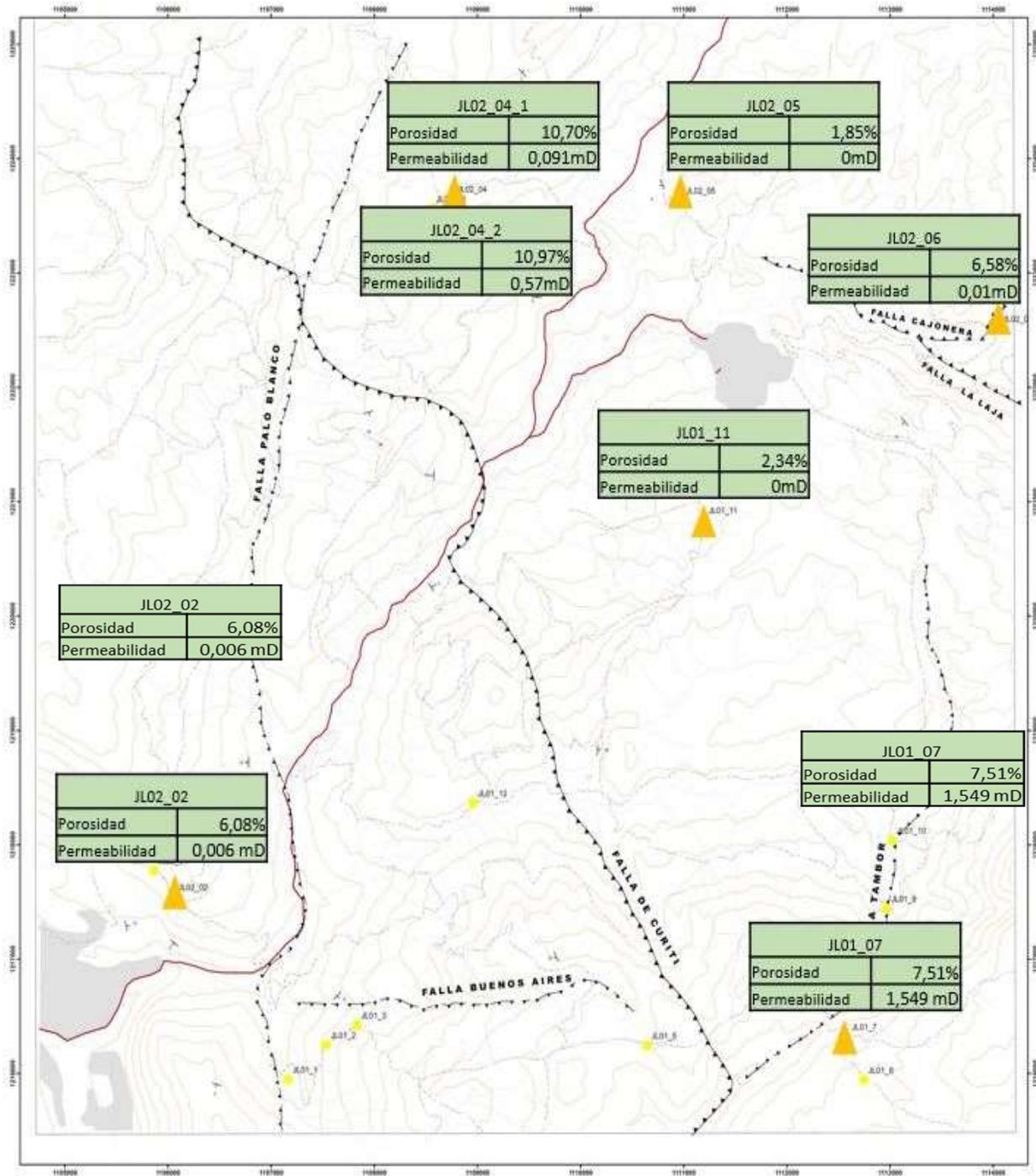
Valores de permeabilidad y porosidad obtenidos para las tres muestras usando el equipo Keyphi

# de medidas	D01_07	D02_04	D02_08
	Permeabilidad	Permeabilidad	Permeabilidad
1	1.981121	0.450877	1.067474
2	2.005835	0.374837	1.148099
3	2.001103	0.467609	1.180278
Promedio (mD)	1.996020	0.431108	1.131950

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 46.

Mapa de estaciones de donde se obtuvieron muestras para toma de datos de permeabilidad y porosidad.



9. Discusión

Por medio de los datos obtenidos en este trabajo se pudo determinar para el área de estudio que las Formación que sirve como prospecto de reservorio de aguas subterráneas es la formación los santos en niveles de areniscas blancas de espesor aproximados de 2 a 3 metros aflorando en la zona sur- este en la vereda puente tierra, en menor medida los niveles de arenisca de la formación paja que presentan un nivel de porosidad acto, pero su permeabilidad es baja.

Gracias al uso de las fotografías aéreas, imágenes satelitales y Google earth se lograron determinar subunidades geomorfológicas donde se encontró que la mayoría de estas obedecen a un origen estructural, donde se destacan geoformas como: laderas estructurales, sierras estructurales y lomos de presión. Estas generalmente se relacionan con los trazos de las fallas Paloblanco, Cajonera, Buenos Aires, Tambor, la Laja.

Adicionalmente al realizar el análisis general de las diaclasas en la zona de trabajo se pudo determinar una posible dirección de esfuerzo que corresponde a una dirección E-W, la cual debe ser verificada en posteriores trabajos, siendo los datos más representativos a lo largo del área de estudio. Se encontró que en la zona de falla donde interactúan las fallas Curití y Paloblanco los datos se encuentran más dispersos, esto se puede deber a diferentes campos de esfuerzos actuando en diferentes tiempos y que generaron las disposiciones de las diferentes diaclasas medidas y sus

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

distribuciones espaciales. La tendencia a la dirección de esfuerzo cualitativa E-W en la cual se utilizó multicriterios y dada su baja densidad poblacional de datos esta no sería concluyente.

Debido a las restricciones en la obtención de datos en campo y dado que los datos recibidos correspondían netamente a datos de diaclasas, el análisis en el presente trabajo es cualitativo de carácter no determinante y debe ser complementado con otros estudios que sean estadísticamente precisos y aceptados como por ejemplo análisis poblacional de fallas el cual permite determinar un tensor de esfuerzo y/o paleo-esfuerzos que contribuyen a entender la historia de deformación en el área de estudio lo cual sería de gran utilidad para la delimitación de zonas con fracturas abiertas que sirvan como corredores de agua.

En base a los resultados de laboratorio obtenidos se pudo encontrar que las rocas con mejores porosidades corresponden a la Formación los Santos en su nivel I, y el nivel de arenas de la Formación paja en su miembro inferior de esto se puede decir que la porosidad está controlada en el área por las diferentes características físicas y químicas de la roca, tamaño de grano, calibrado y grado de alteración de la roca; La permeabilidad está posiblemente controlada por la tectónica de la zona, aumentando en las cercanía de las zonas de falla donde la roca es intensamente fracturada y la porosidad.

Se puede asociar los niveles altos presentados en el NDVI que muestran una buena calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación con zonas donde se guarda suficiente humedad para el sostenimiento de una buena vegetación mostrando un cambio insignificante en las

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

máximos y mínimos, siendo la unidad los santos y Simití las que presentan menor variación, las zonas adyacentes a las fallas inferidas se muestran con buen desarrollo de vegetación sin importar su estratigrafía indicando una percolación de aguas por infiltraciones generadas por el fracturamiento generado por las fallas.

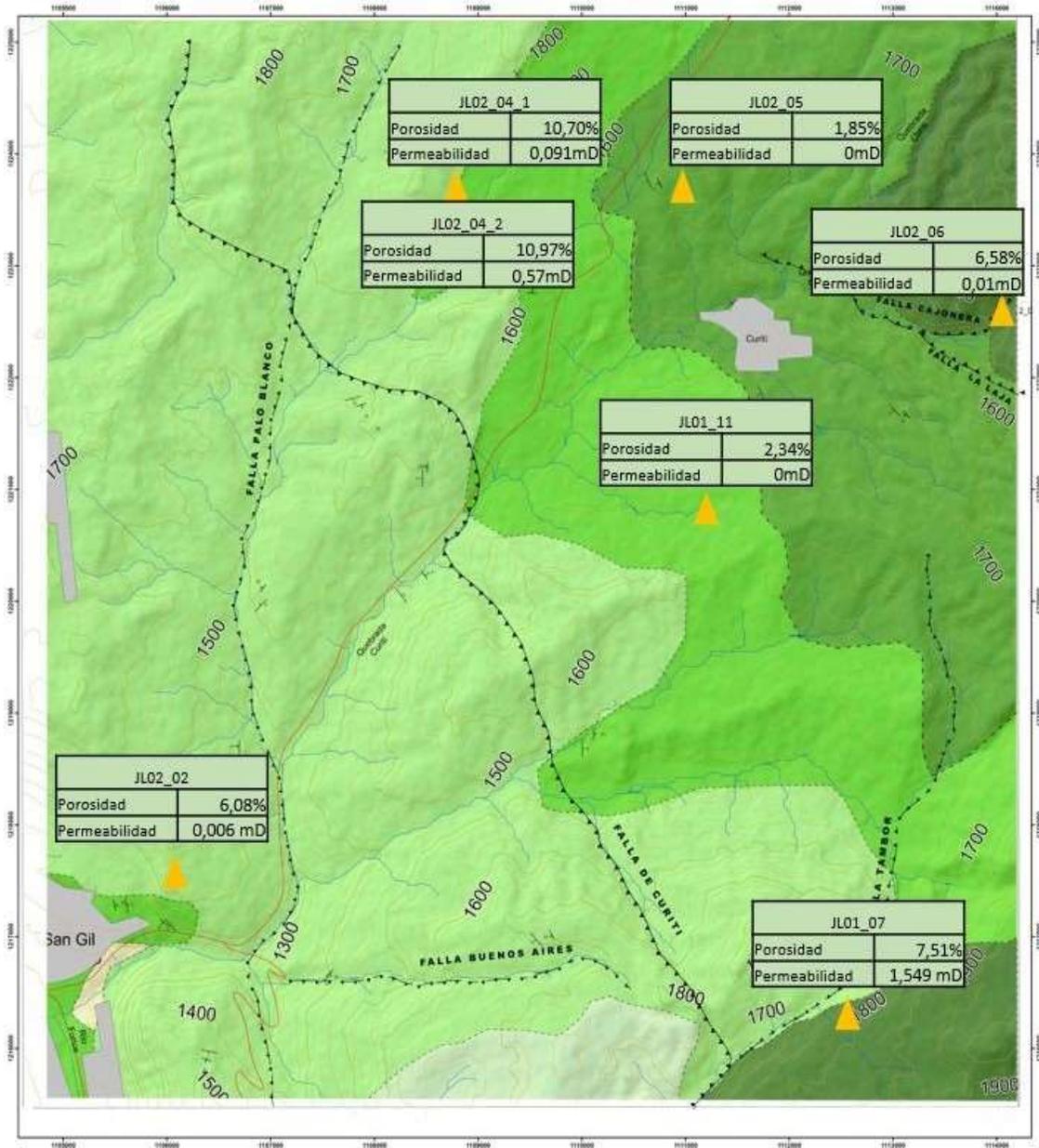
La formación Paja en su miembro inferior presenta la mejor porosidad pero una baja permeabilidad esto debido a la meteorización permitiendo aumentar las cavidades al disolver la matriz arcillo-lodosa por lo cual al mismo tiempo se disminuye la permeabilidad al concentrar dichas arcillas, caso similar se encuentra en la roca aflorante en la formación los Santos al este de la zona la cual presenta una buena porosidad debido a su calibración y textura pero la permeabilidad se ve afectada por disoluciones de óxidos de hierro.

Se evidencia que el buzamiento de las laderas identificadas en la zona de estudio posee un componente importante en el momento de la acumulación y retención de agua, ya que dependiente de este puede permitir que la zona sea de acumulación o drenaje de las aguas lluvias, lo cual no permite un flujo constante y una variabilidad de vegetación durante en las diferentes épocas del año. Como se puede evidenciar que en la zona NE se identificó una ladera escalonada cuyo buzamiento se encuentra hacia el oeste, lo cual no permite una acumulación de agua siendo una zona de drenaje que sirve como afluente de la zona Curití.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Figura 47.

Mapa Fotogeológico con estaciones de donde se obtuvieron muestras para toma de datos de permeabilidad y porosidad.



10. Conclusiones

1. Haciendo uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales se pudo determinar que en el área de trabajo hay 6 unidades fotogeológicas que pudieron ser identificadas en campo y nombradas basando en trabajos previos dadas sus características; formación Los Santos correlacionada con las muestras JI02_06 ; JI 01_07 caracterizadas por granos de arena fina a media con feldespatos potásicos y trazas de cuarzo lo cual concuerda con lo descrito por Cediel , identificando el nivel I en la parte sur- este de la zona de trabajo, formación Rosa Blanca correlacionada con la muestra JL02_05 descrita como caliza fosilífera gris concordando con lo descrito por Pulido, formación Paja correlacionada con la muestra JL02_04_01,02 descrita como una arenisca amarillenta de grano fino para el Miembro inferior (Kimpa) y la muestra JL01_11 como una caliza grisácea de poco espesor para el Miembro superior (Kip) lo cual concuerda con lo descrito en Pulido , formación Tablazo correlacionada con el control de campo de las estaciones JI01_02,03,04,12 ; JL02_01,02,03 en las cuales se observan calizas y lutitas grises a negras y la muestra analizada en laboratorio JL02_02 de un nivel de arenisca en medio de una capa de calizas lo cual concuerda con lo descrito por Pulido, formación Simití con control en campo por la estación JL01_05 en la cual se describen lutitas grises y amarillentas con lentes de arena concordando con lo descrito en Pulido y Depósitos de derrubio caracterizados por medio satelital.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

2. Se establecieron 4 ambientes morfogenéticos: estructural, denudacional, fluvial y antropogénico. El estructural es el que predomina en el área de trabajo (más del 60% del área) con geoformas como laderas estructurales, laderas escalonadas, sierras estructurales entre otras estas caracterizadas por medio satelital con ayuda de perfil topográfico de google earth, permitiendo inferir y nombrar nuevas fallas como lo son la falla Cajonera , la Laja , Buenos Aires , Tambor y Paloblanco de las cuales se infieren de carácter inverso con componente de rumbo; estas fallas permiten una porosidad secundaria y un aumento de la permeabilidad facilitando la percolación de aguas mostrando unos valores anormales de NDVI cercanos a la zona de fallamiento de todas las fallas mencionadas anteriormente.

3. No se observó el desarrollo de formas exokársticas en el análisis de geoformas en las formaciones Rosa Blanca, Paja y Tablazo en el área de trabajo por lo que probablemente es mayor el desarrollo de formas endokársticas, por percolación de aguas facilitada por fallamiento y diaclasamiento presentado, proporcionando un medio para la disolución de carbonatos en las calizas presentes en dichas formaciones con lo cual se explicaría la formación de la cueva de la vaca en el municipio de Curití, mostrando una mayor probabilidad de desarrollo de formas endokársticas en la zona cercana a fallamiento que cuenten con un recurso hídrico superficial permanente.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

4. Por medio de la combinación de las bandas 4 y 5 de imágenes LANDSAT-7 se pudo obtener una visión general de los cambios en el estado de la vegetación en un intervalo de 4 años, se observó que las zonas de índices NDVI más altos (hasta 0.92) que son indicativos de una vegetación vigorosa corresponden a las formaciones Los Santos y Simití. mostrando un claro potencial de reservorio de aguas percoladas por la escorrentía o lluvias; En particular, las Formaciones Rosablanca y Tablazo presentan los índices más bajos (hasta - 0.42) que se puede relacionar con la fuerte explotación de caliza en la zona de Curití y a la creciente urbanización de zonas pobladas como San Gil y Curití, como el afloramiento de arenas arcillosas cuya meteorización genera suelos arcillosos impidiendo una fácil percolación; al igual se observa un alto índice en las zonas circundantes a las afluentes hídricas quebrada Curití, Palo blanca y Cuchicute las cuales presentan permeabilidad secundaria por las fallas Curití, Paloblanco y tambor indicando un reservorio superficial por infiltración de aguas, permitiendo un mayor desarrollo vegetal.

5. Se determina como zona de reservorio de aguas subterráneas la formación los Santos en su nivel I de donde se obtuvo una porosidad de 7,51% y una permeabilidad de 1, 55 mD , los demás niveles aflorantes en la zona NE presentan una porosidad favorable de 6 % pero dado su baja permeabilidad de 0,01 mD se descartan como reservorios de aguas, la baja permeabilidad se adjudica al relleno de algunos poros por fluidos de óxidos de hierro que se pueden observan en las muestras; la formación Paja en su miembro inferior cuyo potencial hidrogeológico se había señalado anteriormente ,cuenta con una porosidad del 10 ,8 % en promedio ,mayor a la de la formación los

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

Santos; mostrando una permeabilidad desde 0,091 a 0,5 incluso en zonas cercanas a fallamiento por lo cual se descarta el potencial de reservorio de aguas, principalmente la permeabilidad se ve afectada por su matriz lodosa impidiendo que las aguas lluvias se percolen y generando solo un reservorio momentáneo en épocas de lluvias como se pudo observar en los índices NDVI; la formación Tablazo podría presentar un bajo nivel de reservorio de aguas si se ve afectada beneficiada por permeabilidad secundaria en los niveles o capas de areniscas dada su porosidad de 6 % y su permeabilidad de 0,006 estando afectada por el paso de fluidos calcáreos provenientes de las capas de calizas que se encuentran en su techo; la formación Rosablanca se descarta como reservorio de aguas primario, por su permeabilidad nula de 0 mD no se descartan reservorios de tipo kárstico por infiltración de aguas en diaclasamiento.

11. Recomendaciones

1. Realizar una toma sistemática y de mayor densidad de datos estructurales para con estos realizar análisis de fracturas determinando patrones de fracturamiento, esfuerzos, densidades de fracturas para determinar posibles canales de movimiento.
2. Utilizar diferentes índices de morfometría de índice.
3. Geofísica para cavidades subterráneas.
4. Muestreo sistemático de las formaciones que dieron mejores porosidades y permeabilidades.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

5. Levantamiento de columna estratigráfica de la formación los santos en la zona sureste sobre la formación los Santos.
6. Realización de afloros hidrogeológicos.

Referencias.

BAYONA, G., CORTES, M., JARAMILLO, C., OJEDA, G., ARISTIZABAL, J., AND REYES-HARKER, A. (2008) An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 120: 1171-1197.

BEJARANO, D., & NAVAS, A. (2018). Análisis estructural de los patrones de fracturamiento y su relación con el flujo de aguas subterráneas en inmediaciones del municipio de Toná, Macizo de Santander. Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander.

BÖGLI, A. (1980). Karst hydrology and physical speleology. *Karst Hydrology and Physical Speleology*.

CAMPBELL, C. (1967). Lamina, laminaset, bed, and bedset. *Sedimentology*, 8, 7– 26.

CARVAJAL, H., (2011). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Servicio Geológico Colombiano.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

CARVAJAL, J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO.

CASTELLANOS MEJIA, J. A., & GUTIERREZ TOLEDO, D. (2006). Cartografía Geológica Y Caracterización Estratigráfica, De La Zona Comprendida Entre Los Municipio De San Gil Villanueva Y Aratoca (Departamento De Santander), Con Fines Hidrogeológicos (Doctoral dissertation, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Geologia).

DUNHAM, R. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional textures. In: W.E. Ham (Ed.). Classification Of Carbonate Rocks. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem, 1, 108 – 121.

ETAYO-SERNA, F. (1968): El Sistema Cretáceo en la Región de Villa de Leyva y Zonas Próximas. - GEOLOGÍA COLOMBIANA, NO. 5, P. 5 - 74, BOGOTÁ.

FOLK, R.L. (1980) Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company, Austin, 184p.

FOSSEN, H. (2010). Structural Geology. Cambridge University Pres, New York, 463 p.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

FORD, D., & WILLIAMS, P. D. (2013). Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons. 578 p

GAO, B. C. (1996). NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote sensing of environment, 58(3), 257-266.

HUBACH, E. (1957). Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia:(enumeración regional, de más reciente a más antiguo) (Vol. 12). Ministerio de Minas y Petróleos, Instituto Geológico Nacional

INGEOMINAS. (2007). Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la zona Guanentina, Tomo II. Proyecto de investigación geológica e Hidrogeológica en la región central del Departamento de Santander en convenio con Universidad Industrial de Santander. Acuerdo específico 002/05. 1 –194.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE SANTANDER. (2005) Estudio Semidetallado de Suelos y Capacidad de Uso de la Tierra para la Microcuenca de la quebrada Curití. IGAC – CAS. 223p

JEEVALAKSHMI, D., REDDY, S. N., & MANIKIAM, B. (2016, April). Land cover classification based on NDVI using LANDSAT8 time series: a case study Tirupati region. In 2016

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP) (pp. 1332-1335).
IEEE.

JULIVERT, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia SA). Boletín de Geología.

LEITE, A. P., SANTOS, G. R., & SANTOS, J. É. O. (2017). Análise temporal dos índices de vegetação NDVI e SAVI na Estação Experimental de Itatinga utilizando imagens Landsat 8. Revista brasileira de energías renováveis, 6(4), 606-623

LOPEZ-VERGARA, M. L. (1971). Manual de fotogeología. Madrid: Servicio de Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear.

MANTILLA-FIGUEROA, L. C., GARCÍA-RAMÍREZ, C. A., & VALENCIA, V. A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. Boletín de Geologia, 38(1).

MARRETT, R. & PEACOCK, D. (1999). Strain and Stress. Journal of Structural Geology, 1057-1063.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

MARTINEZ, J. (2002). Geología estructural y Dinámica global. Departamento de geología de la Universidad de Salamanca.

MEIJERINK, A. M., BANNERT, D., BATELAAN, O., LUBCZYNSKI, M. W., & POINTET, T. (2007). Remote sensing applications to groundwater (p. 312). Paris: Unesco.

MOJICA, J. & KAMMER, A. (1995): Eventos Jurásicos en Colombia.- Geol. Colombiana. 19: 165-172.

MORALES, L. G., Colombian petroleum Industry. (1958) General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia, in Weeks, L. G., ed., Habitat of Oil: A Symposium: Tulsa, AAPG, p. 641-695.

MORALES, C. (2010). Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander— Cartografía Geológica Mapa Geológico de la región central de Santander. Bogotá

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

PULIDO, O. (1979). Geología de las planchas 135 San Gil y 151 Charalá; Departamento de Santander. Ingeominas, Informe 1802. Boletín Geológico No. 23 2: 39-78. Bogotá D.C (PDF) Caracterización sedimentológica y bioestratigráfica del contacto entre las formaciones Rosablanca y Paja en la Mesa de Barichara, Santander.

REATIGA, G. (2008). Cartografía geológica 1:25000 de Noreste de Curití. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

SANTANA, J, (1986) Estratigrafía, facies y ambiente de depósito de la Formación Tambor en las localidades de Curití, Charta y Matanza, Santander. Tesis Pregrado. Universidad Nacional de Colombia.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO, UNIVERSIDAD PEDAGAGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA (2018). Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimiento en masa escala 1:100.000 plancha 150-Cimitarra.

SINGHAL, B. B. S., & GUPTA, R. P. (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer Science & Business Media.

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLOGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

TELLEZ, N. (1964): Geología de la mesa de Barichara- Boletín de Geología, UIS, N. 18, p. 12-21, 2 fig. Bucaramanga.

VAN DER PLUJIM, B. & MARSHAK, S. (2004). Earth Structure: An introduction to structural geology and tectonics. Second edition. Norton & Company. United states of America, 656 p.pytho

VELANDIA, F. & ROJAS, N. (2006) Mesa de Barichara. INGEOMINAS Colección Patrimonio Geológico de Colombia., 1-44.

VELANDIA, F., SILVA, G., MORALES, C., OSORIO, J. (2007). Análisis cinemático de la región central del Departamento de Santander. Memorias. XI Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga

VELANDIA, F. (2010). Análisis de fracturas para exploración de aguas subterráneas en el centro de Santander. INGEOMINAS. Hidrogeología para la gestión del recurso Hídrico, Universidad de Antioquia.

WARD, D. E., GOLDSMITH, R., JIMENO, A., CRUZ, J., RESTREPO, H., & GÓMEZ, E. (1973). Mapa Geológico de Colombia Cuadrángulo H-12, Bucaramanga

CARACTERIZACIÓN FOTOGEOLÓGICA ZONA S-O Q.CURITÍ.

WENTWORTH, C. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*.30, 377- 392.