



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Sedimentología, estratigrafía y geoquímica del Grupo Guadalupe en el área de San Luis de Gaceno (Boyacá, Colombia), como potencial reservorio de arenitas bituminosas**

**Andrés Sebastián Martín Ravelo**

**Universidad Nacional de Colombia**

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá, D.C.

2024



# **Sedimentología, estratigrafía y geoquímica del Grupo Guadalupe en el área de San Luis de Gaceno (Boyacá, Colombia), como potencial reservorio de arenitas bituminosas**

**Andrés Sebastián Martín Ravelo**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencias – Geología**

**Director(a):**  
**PhD. Palinología, Estratigrafía y Sedimentología Gustavo Adolfo Sarmiento Pérez**  
Profesor asociado



Línea de Investigación:  
Sedimentología y Estratigrafía

Grupos de Investigación:  
Proyecto CAB (Contrato 428-15 de 2019 entre Universidad Nacional de Colombia – MinCiencias – Agencia Nacional  
de Hidrocarburos).  
Grupo de Investigación Caracterización Tecnológica de Minerales

**Universidad Nacional de Colombia**  
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias  
Bogotá, D.C., Colombia  
2024



(Dedicatoria o lema)

*Esa extraña sensación, de que todo va a salir mal, de que las mejores decisiones en la vida se toman en caliente y llevan a lograr grandes cosas de la manera más ingeniosa, alocada, excéntrica y meticulosa, solo está destinada para los hombres que viven 3 pasos adelantados a su tiempo*

*Jakob Formann*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Andrés Sebastián Martín Ravelo

Fecha 21/06/2024

## Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi familia, quienes han estado siempre apoyándome durante estos 2 años de maestría y durante mi desarrollo profesional, en cada etapa que he afrontado.

Al Proyecto de investigación CAB y todo su equipo de trabajo (contrato 428-2021 entre Minciencias, y la alianza conformada por la Universidad Nacional de Colombia y la empresa Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda.); el cual financio gran parte del presente proyecto de maestría.

A la Beca Auxiliar Docente (Acuerdo 028 de 2010), con la cual además de asegurar mi permanencia en la universidad, complementé mis estudios de posgrado con labores de docencia en pregrado en las asignaturas de Petrografía Metamórfica, Campo III y Campo VI, así como con el desarrollo de 9 Proyectos de Investigación.

Al profesor Gustavo Sarmiento, por acompañarme durante mi estancia en el posgrado, darme su asesoramiento y consejos que permitieron orientar bien el desarrollo de este proyecto. Igualmente, a mis coequiperos y futuros colegas Kevin Granados y Juan David Vélez, con quienes desarrollé mi Tesis de Maestría en paralelo a sus trabajos de Pregrado en Geología.

A los profesores del departamento de Geociencias Gloria Rodríguez, Fernando Romero, Jimmy Fernández, Ana Elena Concha, Clemencia Gómez, Juan Manuel Moreno y Thomas Cramer, por ser grandes referentes en la docencia y apoyo en momentos difíciles. Igualmente, a los profesores Juan Carlos Molano, Ariel Cadena y Alexander Caneva por ser grandes referentes empresariales y quienes alimentaron mis ansias por emprender y formar solidos equipos de trabajo.

Por último (y no menos importantes), agradezco a mis amigos y colegas que me acompañaron en esta etapa de mi vida: Edwin Gamboa, Andrés Barreto, Carlos Rodríguez, Sofía Cubillos, Valeria Ramírez, Mafe Moreno, Adriana Suarez, Valentina Mora, Diego Agredo, Andrés Hernández, Christian Álvarez, Valentina Saray, Eliana Urrego y Ricardo Gamba. Con ellos aprendí, crecí y monté grandes proyectos; razón por la cual nos espera un futuro brillante y con quienes añoro volver a compartir a lo largo de mi carrera.

## Resumen

### **Sedimentología, estratigrafía y geoquímica del Grupo Guadalupe en el área de San Luis de Gaceno (Boyacá, Colombia), como potencial reservorio de arenitas bituminosas**

En el piedemonte llanero, convergen rocas sedimentarias que comparten similitudes entre las cuencas de los Llanos Orientales y la Cordillera Oriental. Esta Tesis de Maestría estudia una sección estratigráfica del Grupo Guadalupe en San Luis de Gaceno (Boyacá, Colombia), mediante una descripción sedimentológica y estratigráfica detallada, complementada con análisis petrográficos y litogeoquímicos (difracción y fluorescencia de rayos X), para evaluar el potencial de estas rocas en el almacenamiento de arenitas bituminosas y otros hidrocarburos.

Dentro del análisis detallado de facies, se identificaron 7 facies sedimentarias y 9 petrofacies en 13 segmentos descritos, correspondientes a las formaciones Arenitas de San Antonio, Lodolitas de Aguacaliente, y Arenitas de San Luis de Gaceno. Estos estudios explican la evolución de los ambientes sedimentarios, revelando dos etapas regresivas y una transgresiva durante el Campaniano Temprano al Maastrichtiano, manteniéndose como principal área de aporte de sedimentos el escudo de Guyana debido a la presencia de minerales arcillosos heredados (illita y caolinita) de fuentes ígneo-magmáticas y metamórficas, con alto grado de cristalinidad.

A pesar de que las Arenitas de San Antonio y las Arenitas de San Luis de Gaceno muestran un gran potencial para el almacenamiento de hidrocarburos y arenitas bituminosas, este potencial no pudo concretarse debido a las condiciones de bajo grado de diagénesis alcanzadas (eogénesis tardía-mesogénesis temprana), así como una falta de sincronismo en los elementos del sistema petrolífero en el área de San Luis de Gaceno con respecto al de las demás cuencas aledañas. .

**Palabras clave:** Análisis de facies, diagénesis, estratigrafía, litogeoquímica, parasecuencias, roca reservorio sedimentología.

## Abstract

### **Sedimentology, stratigraphy, and geochemistry of Guadalupe Group in San Luis de Gaceno area (Boyacá, Colombia), like potential reservoir of tar sands**

In foothill basin there are sedimentary rocks that share similarities between Eastern Llanos and Eastern Cordillera basins. This Master of Sciences (MSc.) Thesis study a stratigraphic section of Guadalupe Group in San Luis de Gaceno (Boyacá, Colombia), through a sedimentological and detailed stratigraphic description, complemented with petrography and XRD-XRF analysis, to assess the potential of tar sands host and other hydrocarbons.

In the facies analysis conducted, was identified 7 sedimentary facies and 9 petrofacies in 13 described segments, corresponding to San Antonio Sandstones, Aguacaliente Mudstones and San Luis de Gaceno Sandstones formations. These studies explain the evolution of sedimentary environments, revealing two regressive stages and one transgressive stage during the Early Campanian to Maastrichtian, maintaining the Guyana Shield as the main area of sediment source due to the presence of clay minerals inherited (illite and kaolinite) from igneous and metamorphic rocks, with a high degree of crystallinity.

Although the San Antonio Arenites and the San Luis de Gaceno Arenites show great potential for the storage of hydrocarbons and bituminous arenites, this potential could not be realized due to the low-grade diagenesis conditions reached (late eogenesis-early mesogenesis). as well as the lack of synchronism in the elements of the petroleum system, in San Luis de Gaceno area respect to the surrounding basins.

**Keywords:** Facies analysis, diagenesis, stratigraphy, lithochemisrty, parasequences, reservoir rock sedimentology.

# Contenido

|                                                                                            | Pág.         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Resumen .....</b>                                                                       | <b>IX</b>    |
| <b>Lista de figuras .....</b>                                                              | <b>XIII</b>  |
| <b>Lista de tablas .....</b>                                                               | <b>XXII</b>  |
| <b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>                                               | <b>XXIII</b> |
| <b>Introducción.....</b>                                                                   | <b>1</b>     |
| <b>Objetivos .....</b>                                                                     | <b>3</b>     |
| Objetivo General .....                                                                     | 3            |
| Objetivos Específicos.....                                                                 | 3            |
| <b>1. Generalidades y contexto geológico .....</b>                                         | <b>5</b>     |
| 1.1 Generalidades.....                                                                     | 5            |
| 1.2 Localización del área de estudio .....                                                 | 6            |
| 1.3 Antecedentes.....                                                                      | 7            |
| 1.4 Geología del Piedemonte Llanero y Cuenca Llanos Orientales.....                        | 10           |
| 1.4.1 Estratigrafía .....                                                                  | 10           |
| 1.4.2 Geología estructural.....                                                            | 13           |
| <b>2. Metodología.....</b>                                                                 | <b>17</b>    |
| 2.1 Planteamiento del Proyecto de Tesis y recopilación bibliográfica .....                 | 17           |
| 2.2 Trabajo de campo .....                                                                 | 18           |
| 2.2.1 Elaboración de columnas estratigráficas .....                                        | 18           |
| 2.2.2 Recolección de muestras .....                                                        | 20           |
| 2.3 Análisis de laboratorio .....                                                          | 21           |
| 2.3.1 Petrografía.....                                                                     | 22           |
| 2.3.2 Difracción de rayos X .....                                                          | 25           |
| 2.3.3 Fluorescencia de rayos X.....                                                        | 29           |
| <b>3. Datos obtenidos y análisis utilizados .....</b>                                      | <b>33</b>    |
| 3.1 Estratigrafía de la sección “Quebrada Aguacaliente” .....                              | 33           |
| 3.1.1 Estratigrafía del Guadalupe Inferior o Formación Arenitas de San Antonio.....        | 35           |
| 3.1.2 Estratigrafía del Guadalupe Medio o Formación Lodolitas de Aguacaliente.....         | 40           |
| 3.1.3 Estratigrafía del Guadalupe Superior o Formación Arenitas de San Luis de Gaceno..... | 46           |
| 3.2 Petrografía .....                                                                      | 49           |
| 3.3 Litogeoquímica .....                                                                   | 50           |

|           |                                                                                                                                                                        |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.1     | Difracción de Rayos X (DRX) .....                                                                                                                                      | 50         |
| 3.3.2     | Fluorescencia de Rayos X (DRX) .....                                                                                                                                   | 55         |
| 3.4       | Facies sedimentarias (estratigrafía y petrofacies).....                                                                                                                | 57         |
| 3.4.1     | Formación Arenitas de San Antonio .....                                                                                                                                | 57         |
| 3.4.2     | Formación Lodolitas de Aguacaliente .....                                                                                                                              | 59         |
| 3.4.3     | Formación Arenitas de San Luis de Gaceno.....                                                                                                                          | 64         |
| <b>4.</b> | <b>Discusión .....</b>                                                                                                                                                 | <b>69</b>  |
| 4.1       | Asociación y modelo de facies.....                                                                                                                                     | 69         |
| 4.2       | Ambiente de formación.....                                                                                                                                             | 76         |
| 4.2.1     | Formación Arenitas de San Antonio .....                                                                                                                                | 77         |
| 4.2.2     | Formación Lodolitas de Aguacaliente .....                                                                                                                              | 80         |
| 4.2.3     | Formación Arenitas de San Luis de Gaceno.....                                                                                                                          | 82         |
| 4.3       | Prospectividad de arenitas bituminosas en lo que respecta a reservorios .....                                                                                          | 83         |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>                                                                                                                            | <b>89</b>  |
| 5.1       | Conclusiones .....                                                                                                                                                     | 89         |
| 5.2       | Recomendaciones .....                                                                                                                                                  | 92         |
| <b>A.</b> | <b>Anexo: Columna estratigráfica Sección Quebrada Aguacaliente (Escala 1:500) .....</b>                                                                                | <b>95</b>  |
| <b>B.</b> | <b>Anexo: Formatos de columna elaborados en campo (Quebrada Aguacaliente).....</b>                                                                                     | <b>97</b>  |
| <b>C.</b> | <b>Anexo: Muestras recolectadas para la Tesis de Maestría .....</b>                                                                                                    | <b>117</b> |
| <b>D.</b> | <b>Anexo: Descripciones petrográficas de la sección “Quebrada Aguacaliente” .....</b>                                                                                  | <b>123</b> |
| <b>E.</b> | <b>Anexo: Difractogramas adquiridos e interpretados para las muestras de litogeoquímica seleccionadas de la Quebrada Aguacaliente .....</b>                            | <b>171</b> |
| <b>F.</b> | <b>Anexo: Columna estratigráfica integrada – Sección Quebrada Aguacaliente.....</b>                                                                                    | <b>193</b> |
| <b>G.</b> | <b>Anexo: Diagrama de procesos incidentes en la formación de arenitas como potenciales reservorios de arenita bituminosa, dentro de la Quebrada Aguacaliente .....</b> | <b>195</b> |
|           | <b>Bibliografía .....</b>                                                                                                                                              | <b>199</b> |

## Lista de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Figura 1-1.</b> Localización del área de estudio, correspondiente a la Quebrada Aguacaliente. Tomado de (Molano-Mendoza et al., 2023) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 7    |
| <b>Figura 1-2.</b> Carta de correlación estratigráfica, donde se relaciona edad, unidades aloestratigráficas, estratigrafía de cuencas de referencia (Cordillera área de Bogotá, Cordillera área de Boyacá, Llanos (empleando la nomenclatura definida en Molano-Mendoza et al. (2023) para el Proyecto CAB, Catatumbo y Valle Superior del Magdalena), comparadas con la sucesión estratigráfica del presente proyecto de tesis de maestría (columna resaltada en color verde). Modificado de Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996). .... | 9    |
| <b>Figura 1-3.</b> Zonificación estructural de la plancha 229 Gachalá. En cuadrante negro se encierra el área de estudio, aledaña a la desembocadura de la Quebrada Aguacaliente en el Rio Lengupá. Modificado de Terraza et al.(2013). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 14   |
| <b>Figura 2-1.</b> Actividades de campo realizadas en la sección Quebrada Aguacaliente. En este caso, se observan estructuras sedimentarias, dentro de cuarzoarenitas pertenecientes al tramo de columna “Quebrada Aguacaliente 5”. El mango del martillo apunta hacia el tope, observando además los bastones con base en los cuales se elaboró la columna (intervalos periódicamente medidos, marcados con espray naranja). Tomado de Molano-Mendoza et al. (2023). ....                                                             | 19   |
| <b>Figura 2-2.</b> Actividades de campo realizadas en la sección Quebrada Aguacaliente. En este caso, se observa el bastoneo y recolección de muestras, observando en el recuadro icnofósiles que indican condiciones del ambiente de depósito y polaridad invertida de las capas descritas. Tomado de Molano-Mendoza et al. (2023). ....                                                                                                                                                                                              | 21   |
| <b>Figura 2-3.</b> Componentes de microscopio óptico Zeiss Primotech. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 22   |
| <b>Figura 2-4.</b> Secciones delgadas pulidas (SDP) y testigos de roca impregnados con resina epóxica azul, procedentes de la Quebrada Aguacaliente. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 23   |
| <b>Figura 2-5.</b> Microscopio de luz transmitida y reflejada para análisis petrográfico. Microscopio Olympus AX-31. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 24   |
| <b>Figura 2-6.</b> Difracción de Rayos X. a) Esquema del funcionamiento de un equipo de difracción de rayos; b) Relación entre el ángulo de incidencia y la distancia interplanar es posible generar un difractograma. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023). ....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 26   |
| <b>Figura 2-7.</b> Equipo de difracción D2 Phaser marca Bruker Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 26   |
| <b>Figura 2-8.</b> Etapas del montaje para análisis de DRX siguiendo la metodología de Thorez (1975). a) Montaje de muestras en polvo. b) Muestras en polvo listas para análisis. c) Sedimentación controlada                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| de fracción arcilla en solución acuosa. d) Fracción arcilla decantada (sedimentada) de solución acuosa. e) Muestras orientadas durante proceso de solvatación con etilenglicol. f) Calcinación de muestras.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 27 |
| <b>Figura 2-9.</b> Relación entre minerales de arcilla y ciertos procesos diagenéticos con la temperatura. Tomado de Worden & Burley (2003) y Chima et al. (2018). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 28 |
| <b>Figura 2-10.</b> Disposición laminar en los principales minerales arcillosos presentes en rocas sedimentarias. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 29 |
| <b>Figura 2-11.</b> Fluorescencia de rayos X. a) Esquema del funcionamiento de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X; b) Fenómeno de la fluorescencia de rayos X en un átomo. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 30 |
| <b>Figura 2-12.</b> Montaje empleado para FRX. a) Ensamblaje de copa de polipropileno (blanca) junto a película delgada de Mylar (tira blanca cuadrada); b) Montaje de muestra en copa de polipropileno con Mylar. c) Montaje de muestra en espectrómetro de FRX Malvern PANalytical modelo Epsilon 4. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 31 |
| <b>Figura 2-13.</b> Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de energía dispersa Malvern PANalytical modelo Epsilon 4scascasc. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 31 |
| <b>Figura 3-1.</b> Afloramientos del Segmento A y B. a) Lodolitas negras con patinas rojizas, subtabulares discontinuas. b) Inicio de las arenitas basales del Segmento B, estando el contacto a la izquierda del bastón cero (0). Las líneas rojas punteadas y los números representan el bastón de referencia de los intervalos descritos ascendiendo estratigráficamente por la sección de la Quebrada Aguacaliente (corresponde al Segmento A al final del tramo Aguacaliente 3, mientras que el Segmento B corresponde al inicio del tramo Aguacaliente 4, tal como lo muestra el <b>Anexo B</b> ). La flecha naranja indica la polaridad..... | 34 |
| <b>Figura 3-2.</b> Afloramiento y muestra del Segmento B. La laminación que presentan las rocas es flaser inclinada, teniendo un color blanco amarillento a medida que aumenta en su granulometría la arena. Las líneas punteadas rojas representan el bastón de referencia del tramo descrito (Aguacaliente 4); la flecha naranja indica la polaridad.....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 36 |
| <b>Figura 3-3.</b> Afloramiento del Segmento B. Desde el bastón 21 al bastón 24 se observa un conjunto de capas granocrecientes. Hacia la base la estratificación plana paralela y estratificación masiva en las capas del tope (altamente bioturbadas). Sobre el bastón 24 hacia arriba, el cambio de color a gris oscuro es debido al contacto neto con lodolitas. La flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 37 |
| <b>Figura 3-4.</b> Lodolitas y arenitas del Segmento B. Hacia la base (entre los metros 55,0-56,5; bastones 31 y 32) el color negro corresponde a lodolitas negras intercaladas con capas de limolitas y arenitas de grano fino; estas últimas predominando desde los bastones 33 y 34 (metros 58,0 a 59,5). En el recuadro hay un detalle de la muestra de mano ANB-4044 recolectada en el bastón 34, la cual debe su color verde azulado a la presencia de glauconita. Flecha naranja indica la polaridad.....                                                                                                                                    | 38 |
| <b>Figura 3-5.</b> Arenitas del Segmento D. Se observan oquedades (señalada con la flecha verde, cerca al bastón 56) en el lecho de la quebrada, lo que sugiere erosión de un material friable, con buena madurez textural, en rocas con granulometría más gruesa, mostrada por superficies con morfología marcada y colores naranja-amarillento. Flecha naranja indica la polaridad.....                                                                                                                                                                                                                                                           | 39 |
| <b>Figura 3-6.</b> Arenitas del Segmento E. Se observan oquedades de gran tamaño (cerca a los bastones 75 y 78), acompañadas de surcos en el lecho de la quebrada, mostrando así erosión de un material disgregable. Flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 40 |
| <b>Figura 3-7.</b> Afloramiento y muestra de mano del Segmento E. Se observan alta competencia en las capas gruesas de arenita (razón por la cual forman paredes). La muestra de mano contiene abundantes fragmentos fosfáticos (color naranja). Flecha naranja indica la polaridad.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 41 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 3-8.</b> Cambios en la granulometría y espesor de las capas, lo cual se relaciona con variaciones en la estratificación y laminación de lodolitas y las arenitas del Segmento G. La laminación pasa de ser lenticular en el bastón 4 (de color negro y son más finas), a ondulosa en la base del bastón 5 (donde aumenta el espesor y su color es más grisáceo, homogéneo). Por encima en el bastón 6, el espesor es mayor que en el 5 y tiene un color gris más claro, debido a la laminación flaser con bordes ondulados, pasando a ser de tipo flaser simple por debajo del bastón 7 (colores grises y ocre, en laminas). Por debajo del bastón 6, las capas de arenita no muestran laminación y son masivas debido a la bioturbación. Flecha naranja indica la polaridad, mientras que la numeración de los bastones hace referencia al tramo Aguacaliente 5, descrito en el <b>Anexo B</b> . .... | 42 |
| <b>Figura 3-9.</b> Lodolitas y arcillolitas del Segmento H. Intercaladas con estas rocas de grano muy fino, se encuentran intercalaciones de rocas calcáreas (morfológicamente asemejando escalones), las cuales se caracterizan por su altísima competencia, color gris mate, matriz-soportado y armazón con presencia de fragmentos fosfáticos embebidos. Flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 43 |
| <b>Figura 3-10.</b> Lodolitas y arcillolitas del Segmento H. Entre los bastones 18 y 19, se observan arcillolitas de color negro mate, las cuales son mucho menos competentes que las rocas circundantes, localizándose relativamente cerca de las capas fosilíferas características de este intervalo (bastón 14). Flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 43 |
| <b>Figura 3-11.</b> Arenitas del Segmento I. Se observa el granocrecimiento y aumento del espesor a medida que se asciende estratigráfica, pasando de capas tabulares bien definidas de pocos centímetros de espesor (bastones 30 a 32), hasta formar capas más masivas de varios metros de espesor (bastones 37 a 39). Flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 44 |
| <b>Figura 3-12.</b> Afloramiento del Segmento J. Se observan lodolitas negras fosfáticas en todo el afloramiento, las cuales están intercaladas con capas de arenitas fosfáticas y biomicritas. Flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 45 |
| <b>Figura 3-13.</b> Afloramiento del Segmento K. Se observan arenitas con laminación flaser, las cuales hacia el tope se tornan más masivas y con mayor espesor. Flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 46 |
| <b>Figura 3-14.</b> Afloramiento del Segmento L. Se observan espesas capas de arenitas, con granulometría gruesa, ya que en el bastón 106 se observan cavidades redondas producto de la erosión de materiales bien seleccionados. Desde el bastón 107 en adelante se observa el carácter granodecreciente de las capas de arenita. En la imagen en detalle de la izquierda, se observan los cambios de la laminación, pasando de arenitas muy bioturbadas en la base (pico del martillo), a lodolitas con laminación lenticular, hasta pasar a una capa de arenita con laminación flaser con contactos erosivos, parcialmente bioturbada, con intraclastos, y en contacto erosivo con las lodolitas. Flecha naranja indica la polaridad. La foto en detalle se encuentra en posición normal. ....                                                                                                                | 47 |
| <b>Figura 3-15.</b> Afloramiento del Segmento L. Junto a las arenitas, se observa que encima del bastón 113 hay trazas fósiles, concretamente madrigueras. Flecha naranja indica la polaridad. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 48 |
| <b>Figura 3-16.</b> Muestra de trazas fósiles, concretamente madrigueras, recolectada en el Segmento L, aunque también son reportadas en los segmentos C y K. Por la morfología corresponde a <i>Thalassinoides isp</i> (Seilacher, 2007). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 49 |
| <b>Figura 3-17.</b> Columna estratigráfica generalizada de la Quebrada Aguacaliente, mostrando el índice de cristalinidad de la illita ( $IK \Delta 2\theta$ , en azul cian), variaciones de las fases minerales arcillosas Caolinita (azul oscuro), Illita (verde claro), interestratificado Illita/Esmectita (violeta), Vermiculita (rojo); junto a variaciones composicionales de potasio ( $K_2O$ , en línea naranja) y magnesio ( $MgO$ , línea marrón). .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 51 |
| <b>Figura 3-18.</b> a) Correlación de los datos medidos para los FWHM en muestras naturales orientadas secadas al aire y muestras saturadas con etilenglicol, para la totalidad del Grupo Guadalupe. b)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |

Correlación de los índices de Kübler CIS (estándares de índices de cristalinidad) con valores experimentales. Nótese el alto valor de correlación (0,986). Tomado de Warr & Ferreiro Mählmann (2015) .....54

**Figura 3-19.** a) Correlación de los datos medidos para los FWHM en muestras naturales orientadas secadas al aire y muestras saturadas con etilenglicol, solamente considerando potenciales rocas reservorio (Formaciones Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno)..... 56

**Figura 3-20.** Diagramas ternarios para la Formación Arenitas de San Antonio. a) Textural según Folk (1954). Dentro de círculo naranja las muestras clasificadas dentro de la facies Ampho, dentro de círculo amarillo las muestras clasificadas dentro de la facies Alfl. b) Textural según Nichols (2009). c) Composicional según Folk (1974). ..... 59

**Figura 3-21.** a) Vista general de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4052 (facies LAolce), mostrando mala selección textural (conglomerado arenoso lodoso) debido a la heterogeneidad de los granos. Alrededor de la matriz arenosa hay gránulos y guijos de fragmentos aloquímicos, ya sean fragmentos óseos indiferenciados (FgO) y pellets (Pell). Hacia la base, el color negro rojizo intergranular corresponde a cemento ferruginoso (Cem Fe), mientras que el color beige claro hacia el tope corresponde a cemento silíceo (Cem Si). Polaridad indicada con la flecha de la parte inferior derecha. (PPL, 0,45x). ..... 60

**Figura 3-22.** Vista general del armazón de las rocas de facies Ampho. a) Muestra 229IIC-JDV-ANB-4060 (PPL, 4x). b) Muestra 229IIC-JDV-ANB-4068. En ambas muestras se observa buena porosidad intergranular (marcada por el tensivo azul), así como baja proporción de matriz y cemento (color marrón), aunque en la muestra ANB-4068 aumenta la proporción, aunque no llega a formar laminas continuas. .... 60

**Figura 3-23.** Rocas de facies Alfl. a) y b) Muestra 229IIC-JDV-ANB-4036, donde se observan los granos de cuarzo del armazón (Qz), acompañados de cemento calcáreo (Cem 2) que ocupan la porosidad primaria de la roca (PPL, 4x). c) Vista general del armazón de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4044. En ella, se observa la discontinuidad de las láminas onduladas de arena (compuestas principalmente de cuarzo, limitadas por líneas rojas) y arcillosas (Arc); junto a cemento silíceo (Cem1), diferenciable del cemento calcáreo (Cem2) porque este último muestra un color gris y con cristales mejores formados. La laminación de la roca es cortada por una zona con forma alargada, producto posiblemente de bioturbación (zona limitada por líneas punteadas amarillas) (PPL, 0,10x). d) Foto en detalle de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4044, donde se observa el cemento calcáreo (Cem2), que da armazón a la roca (PPL, 10x). ..... 61

**Figura 3-24.** Diagramas ternarios para la Formación Lodolitas de Aguacaliente. a) Textural según Folk (1954). Dentro de círculo amarillo están las muestras clasificadas dentro de la facies Alfl, dentro de círculo ocre las muestras clasificadas dentro de la facies LAolce, dentro de círculo verde las muestras clasificadas dentro de la facies LAcfo. b) Composicional según Folk (1974). ..... 62

**Figura 3-25.** Fotografías de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4093. a) y b) Cemento calcáreo (Cem), identificado de manera intergranular entre los granos de cuarzo (Qz) y minerales arcillosos indiferenciados (Arc). Debido a que la roca (ANB-4093 B) es de grano muy fino y tiene alto relieve y alta birrefringencia, es necesario reconocerla con lamina compensadora. El cemento calcáreo está asociado a los granos de cuarzo, ocupando vetillas (XPL y compensada con 1λ, 10x). c) Granos de cuarzo (Qz), fragmentos de peces (Fpc), pellets (Pell) y peloides (Pel) que están siendo cementados por esparita (Spa). La roca (ANB-4093A) presenta fracturas (Fr) que son rellenadas por carbonato a modo de vetillas (Vt) (XPL, 5x). d) Intraclasto (Icl), de composición fosfática. En su interior presenta

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| granos de formas redondeadas y algunas ligeramente alargadas (marcadas con líneas punteadas amarillas). (PPL, 10x). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 63 |
| <b>Figura 3-26.. a)</b> Vista general de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4088, observando el tamaño de grano muy fino en la roca, y muy buena selección. Hay laminación subparalela ondulosa (marcada con líneas amarillas), definida por una intercalación entre láminas oscuras (matriz-soportadas) y láminas claras (con predominio de cemento); existiendo zonas donde se hay rizaduras (encerradas con círculo rojo) y lentes de láminas más claras (encerradas con círculo azul) (PPL, 10x). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 64 |
| <b>Figura 3-27.</b> Fotografías de la muestra-229IIC-JDV-ANB-4092. <b>a)</b> Cambios en la laminación, pasando de ondulosa en la base, a flaser en la mitad, a ondulosa en el tope (separadas por líneas amarilla punteadas). Estos cambios de laminación ocurren cíclicamente en toda la muestra (PPL, 5x). <b>b)</b> Vista general del armazón de la roca, donde se observan granos de cuarzo (Qz) intercalados con lodo y cementado con material ferruginoso (Cem 2) (PPL, 5x). <b>c)</b> Granos de cuarzo, acompañados de plagioclasa (Pl) y glauconita (Glt), en un armazón dado por cemento silíceo (Cem 1) (XPL, 5x). <b>d)</b> Laminación ondulosa, donde se observa amalgamiento de las pestañas de lodo, por retrabajamiento del sustrato arenoso. La base de las pestañas de lodo se muestra con línea amarilla punteada (PPL, 5x). .....                                            | 65 |
| <b>Figura 3-28.</b> Diagramas ternarios para la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno. <b>a)</b> Textural según Folk (1954). Dentro de círculo amarillo están las muestras clasificadas dentro de la facies Alfl, dentro de círculo naranja las muestras clasificadas dentro de la facies Ampho. <b>b)</b> Composicional según Folk (1974). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 66 |
| <b>Figura 3-29.</b> Fotografías de muestras de la facies Ampho. <b>a) y b)</b> Muestra ANB-4224, observándose en <b>a)</b> fracturas (Fr) que rompen el armazón de la roca (dentro de líneas amarillas), el cual consta de granos de cuarzo (Qz) y materia orgánica (Mo). También se observa porosidad (rellena por tensivo azul) (PPL, 0,2x); mientras que en <b>b)</b> en la zona de fractura (Fr), se reconoce molienda y disminución del tamaño de grano, formando pseudomatríz. Alrededor hay granos de cuarzo (Qz). con el tamaño original, pero fracturados. (XPL, 5x). <b>c) y d)</b> Armazón de la muestra ANB-4228. En <b>c)</b> el armazón está compuesto por granos de cuarzo, turmalina (Tur) y titanita (Spn), existiendo porosidad primaria (círculo verde) y secundaria (círculo rojo); mientras que en <b>d)</b> , hay cemento de composición silícea (Cem 2) (PPL, 5x). ..... | 66 |
| <b>Figura 3-30.</b> Laminación flaser inclinada de la SDP 229IIC-JDV-ANB-4240. Nótese la interdigitación de láminas arenosas permeables, con muy buena madurez textural y composicional, intercaladas con láminas arcillosas cementadas de color marrón, considerablemente menos porosas y permeables. El tope se encuentra en la parte superior de la fotografía, indicado con flecha roja. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 67 |
| <b>Figura 4-1.</b> Capa subtabular de arenita con trazas fósiles de madrigueras ( <i>Thalassinoides isp.</i> ), reportada cerca al tope de la Formación Chipaque. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 70 |
| <b>Figura 4-2.</b> Fotografía de la SDP 229IIC-JDV-ANB-4088. En amarillo se observan granos de feldespatos, los cuales se encuentran en una roca matriz-soportada con una granulometría muy fina (tamaño limo). El armazón cementado por carbonatos indica que la roca experimentó condiciones de eogénesis-mesogénesis temprana (Worden & Burley, 2003). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 73 |
| <b>Figura 4-3.</b> Difractogramas de muestras procedentes de la Formación Lodolitas de Aguacaliente. Nótese que los interestratificados Ill/Sme se encuentran en altísima proporción en esta muestra, mostrando además bajo grado de illitización. Fases minerales arcillosas: Caolinita (Kln), illita (Ill), interestratificado illita-esmectita (Ill/Sme). <b>a)</b> LAC-044. <b>b)</b> LAC-048. <b>c)</b> LAC-047 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 75 |
| <b>Figura 4-4.</b> Armazón de la SDP 229IIC-JDV-ANB-4237, correspondiente a la parte superior de las Formación Arenitas de San Luis de Gaceno. Se observa el armazón, predominantemente matriz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| soportado, debido a la presencia de minerales arcilla indiferenciados (posiblemente caolinita según lo visto en la <b>Figura 3-17</b> ), en conjunto a cemento ferruginoso y fosfático. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 76  |
| <b>Figura 4-5.</b> Columna estratigráfica generalizada de la sección Quebrada Aguacaliente. En rojo se observa la curva eustática definida, en columnas de colores a la derecha de la curva eustática se observan las facies, presentadas en la <b>Tabla 3-3</b> . ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 78  |
| <b>Figura 4-6.</b> Cambio de facies visto en el tope del Segmento C y base del Segmento D. La somerización progresiva, acompañada de abruptas profundizaciones (pero no hasta alcanzar facies profundas), es lo que caracteriza los Segmentos D y E; y en general a gran parte de la Formación Arenitas de San Antonio. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 79  |
| <b>Figura 4-7.</b> Diagrama de procesos incidentes en la formación de arenitas como potenciales reservorios de arenita bituminosa, dentro de la Quebrada Aguacaliente. Formación Arenitas de San Antonio. ...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 84  |
| <b>Figura 4-8.</b> Diagrama de procesos incidentes en la formación de arenitas como potenciales reservorios de arenita bituminosa, dentro de la Quebrada Aguacaliente. Formaciones Lodolitas de Aguacaliente y Arenitas de San Luis de Gaceno .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 85  |
| <b>Figura 5-1. a) y b)</b> Cemento calcáreo (Cem2), identificado entre los granos de cuarzo monocristalino (Qz1, Qz2) y cuarzo policristalino (Qz3) (PPL y XPL, 20x). <b>c) y d)</b> Granos de glauconita (Glt), acompañados por minerales arcillosos indiferenciados (Arc). También se observa cemento calcáreo (Cem2) y cemento silíceo (Cem1) (PPL y XPL, 20x). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 127 |
| <b>Figura 5-2. a)</b> Matriz (Mx) de la roca, dispuesta de manera intergranular entre los granos de cuarzo (Qz), compuesta da minerales arcillosos sin diferenciar, carbonatos y óxidos (PPL, 10x). <b>b)</b> Materia orgánica (MO) dispuesta en franjas (paralelas a la laminación), ocupando espacios intergranulares entre los granos de cuarzo (PPL, 4x). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 127 |
| <b>Figura 5-3. a)</b> Laminación ondulosa, definida por zonas claras (granos de cuarzo y cemento silíceo (Cem1), junto a cemento calcáreo (Cem2); este último formando texturas esqueléticas a modo de costras) y oscuras (minerales arcillosos (Arc)), delimitadas por líneas rojas punteadas, cortada por bioturbación (trazos amarillos) (PPL, 0,10x). <b>b)</b> Granos de cuarzo (Qz) y glauconita (Glt), con moderado empaquetamiento debido a presencia de cemento calcáreo (Cem2) (XPL, 10x). <b>c)</b> Granos de glauconita (Glt), cuarzo (Qz) y feldespato alcalino (Kfs) con escaso cemento calcáreo (Cem2) en una lámina con mayor empaquetamiento (PPL, 10x). <b>d)</b> Minerales arcilla indiferenciados (Arc), los cuales ocupan parte del armazón de la roca, embebiendo algunos granos retrabajados (PPL, 10x).....                                                                                                                                                                                                                   | 131 |
| <b>Figura 5-4. a)</b> Vista general, mostrando mala selección textural (conglomerado arenoso lodoso) debido a la heterogeneidad de los granos. Alrededor de la matriz arenosa hay gránulos y guijos de fragmentos aloquímicos, ya sean fragmentos óseos indiferenciados (FgO) y pellets (Pell). Hacia la base, el color negro rojizo intergranular corresponde a cemento ferruginoso (Cem Fe), mientras que el color beige claro hacia el tope corresponde a cemento silíceo (Cem Si). Polaridad indicada con la flecha de la parte inferior derecha. (PPL, 0,45x). <b>b) y c)</b> Granos de cuarzo monocristalino con extinción ondulante y recta (Qz 1, Qz 2), así como fragmentos líticos limo-arcillosos de composición mixta (Li 1), en un armazón clastosuportado, embebidos en una matriz de composición terrígena (Mx), hecha de minerales arcillosos indiferenciados y cuarzo, junto a minerales opacos como pirita y óxidos de hierro. Se observan también fracturas que cortan la roca, marcadas por el tensivo azul (PPL y XPL, 10x)..... | 134 |
| <b>Figura 5-5. a)</b> Vista general del armazón (arenita de grano medio), donde predominan los granos subredondeados de cuarzo (Qz) monocristalino y de fosfatos (Php), afectados por fracturamiento, lo cual da lugar a porosidad (Po). Hay cemento indiferenciado de composición fosfática y silícea (Cem) (PPL, 0,45x). <b>b)</b> Desarrollo de cemento de composición fosfática y arcillosa (Cem, casi isotrópico en                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |

XPL); el cual cristaliza entre los granos de cuarzo (Qz) (XPL, 10x). **c) y d)** Granos de cuarzo (Qz) y de composición fosfática, tales como Ooides (Php1), entre los cuales cristalizan minerales arcilla, posiblemente *cacoxenita* (Php2). En los intersticios, se desarrolla porosidad primaria (Po) (XPL y PPL, 20x).....137

**Figura 5-6. a)** Granos de fosfatos (Php), acompañados de cuarzo (Qz) en el armazón. El material fosfático se disuelve y percola en los espacios intergranulares, recrystalizando junto al cemento silíceo (Cem 3), dejando poros primarios parcialmente expuestos (PPL, 5x). **b)** Granos de cuarzo monocristalino (Qz 1) y de fosfato (Php), los cuales están retrabajados y forman porosidad secundaria, que hace permeable la roca (PPL y XPL, 10x). **c) y d)** Cemento silíceo (Cem) de la roca. Este cemento tiene relieve casi nulo (en comparación al fosfático) e isotropía, aunque si contiene fosfatos adquiere un color más oscuro. Al predominar el cemento aumenta el empaquetamiento, reduciendo la porosidad (PPL y XPL, 20x). .....140

**Figura 5-7. a)** Vista general de la roca, observando el armazón clasto-soportado de la roca, observando moderada porosidad permeable. Dentro de círculos verdes se observan los granos de cuarzo aglutinados en torno al cemento ferruginoso (PPL, 3,5x). **b)** Granos de cuarzo (Qz) y turmalina (Tur) formando un armazón tal que, permite la existencia de porosidad primaria (PPL, 10x). **c)** Granos de cuarzo, acompañados de circón (Zrn) y minerales arcilla indiferenciados, ubicados en los intersticios a modo de matriz (Arc). En este campo visual, el armazón lo confiere el cemento ferruginoso, concretamente hematita (Hem), el cual forma nódulos. (PPL, 10x).....143

**Figura 5-8. a)** Fragmentos fósiles de equinodermos (Equ) (espículas y espinas), los cuales están rodeados de micrita (Mi) y fragmentos aloquímicos indiferenciados (Fi) (PPL, 10x). **b)** Fragmento fósil de un bivalvo (Bv), totalmente recrystalizado a calcita, junto a microesparita (McSpa) y fósiles de equinodermos (Equ) (XPL, 5x). **c)** Fragmentos de bivalvos, reemplazados por calcedonia (Chld) (XPL, 5x). **d)** Grano de cuarzo, el cual demuestra que la roca tiene algunos componentes terrígenos, aunque escasos. La matriz (originalmente micrítica) se encuentra totalmente recrystalizada a microesparita (McSpa) (XPL, 20x). .....145

**Figura 5-9. a)** Granos de cuarzo (Qz), circón (Zrn) y óxidos de hierro (FeOx), los cuales están en contacto cóncavoconvexo y muestran alto empaquetamiento. Intersticialmente hay cemento calcáreo (Cem2) (XPL, 20x). **b)** Cemento silíceo (Cem1), dando armazón a los granos de cuarzo monocristalino con extinción recta y ondulante (Qz 1, Qz 2), junto a los granos de moscovita (Ms) y óxidos de hierro (FeOx) (XPL, 10x). **c) y d)** Matriz (Mx2) la cual consta de una mezcla de carbonatos con minerales arcillas (razón por la cual se usa cuña de  $\lambda$ ) para diferenciarla de minerales terrígenos con menor birrefringencia (principalmente cuarzo y glauconita). (XPL y compensada con  $1\lambda$ , 10x). .....148

**Figura 5-10. a)** Vista general, observando el tamaño de grano muy fino en la roca, y muy buena selección. Hay laminación subparalela ondulosa (marcada con líneas amarillas), definida por una intercalación entre láminas oscuras (matriz-soportadas) y láminas claras (con predominio de cemento); existiendo zonas donde se hay rizaduras (encerrada con círculo rojo) y lentes de láminas más claras (encerradas con círculo azul) (PPL, 10x).....149

**Figura 5-11. a) y b)** Cemento calcáreo (Cem), identificado de manera intergranular entre los granos de cuarzo (Qz) y minerales arcillas indiferenciados (Arc). Debido a que la roca es de grano muy fino y tiene (en consecuencia) alto relieve y alta birrefringencia, es necesario reconocerla con lamina compensadora. El cemento calcáreo está asociado a los granos de cuarzo, ocupando vetillas (XPL y compensada con  $1\lambda$ , 10x). **c)** Granos de cuarzo (Qz), fragmentos de peces (Fpc), pellets (Pel) y peloides (Pel) que están siendo cementados por esparita (Spa, vista en **Figura 5-11c**). La roca presenta fracturas (Fr) que son rellenadas por carbonato a modo de vetillas (Vt) (XPL, 5x). **d)** Intraclasto (Icl), de

composición fosfática. En su interior presenta granos de formas redondeadas y algunas ligeramente alargadas (marcadas con líneas punteadas amarillas). (PPL, 10x). ..... 153

**Figura 5-12. a)** Cambios en la laminación, pasando de ondulosa en la base, a flaser en la mitad, a ondulosa en el tope (separadas por líneas amarilla punteadas). Estos cambios de laminación ocurren cíclicamente en toda la muestra (PPL, 5x). **b)** Vista general del armazón de la roca, donde se observan granos de cuarzo (Qz) intercalados con lodo y cementado con material ferruginoso (Cem 2) (PPL, 5x). **c)** Granos de cuarzo, acompañados de plagioclasa (Pl) y glauconita (Glt), en un armazón dado por cemento silíceo (Cem 1) (XPL, 5x). **d)** Laminación ondulosa, donde se observa amalgamamiento de las pestañas de lodo, por retrabajamiento del sustrato arenoso. La base de las pestañas de lodo se muestra con línea amarilla punteada (PPL, 5x). ..... 157

**Figura 5-13. a)** Textura general, mostrando el desarrollo de una zona de fractura (Fr) que rompe el armazón de la roca (delimitada con líneas amarillas), el cual se compone principalmente de granos de cuarzo (Qz) y materia orgánica (Mo). También se observa porosidad (marcada por tensivo azul) (PPL, 0,2x). **b)** Granos de cuarzo monocristalino con extinción ondulante (Qz1) y recta (Qz2), acompañados de materia orgánica (Mo) y cemento calcáreo (Cem), el cual recrystaliza a partir de micrita (Mi) o matriz calcárea (XPL, 10x). **c)** Desarrollo de una zona de fractura (Fr), la cual se reconoce por presentar molienda y disminución del tamaño de grano, formando pseudomatríz. Alrededor se pueden observar granos de cuarzo (Qz) con el tamaño original, pero con fracturas. (XPL, 5x). **d)** Granos de fosfatos (Php), acompañados de glauconita (Glt), cuarzo (Qz) y cemento arcilloso (Cem) intergranular. Nótese la porosidad primaria, parcialmente permeable debido al desarrollo de fracturas. (PPL, 10x). ..... 160

**Figura 5-14. a)** Granos de cuarzo (Qz), definiendo un armazón clastosoportado, debido a la presencia de espacios intergranulares que corresponden a porosidad primaria (círculo verde) y secundaria por fracturas y disolución (círculo rojo). El retrabajamiento de los granos de cuarzo da lugar a pseudomatríz (PsMx) (PPL, 5x). **b)** Imbricación de granos de cuarzo e intraclastos fosfáticos (Icl), entre los cuales hay porosidad primaria (círculo verde) y secundaria (círculo rojo) (PPL, 5x). **c)** Granos de cuarzo, junto a granos detríticos de turmalina (Tur) y titanita (Spn), acompañados de porosidad primaria (círculo verde) y secundaria (círculo rojo). **d)** Granos de cuarzo, con presencia de cemento (Cem 2) que brinda armazón a la roca. (PPL, 5x). ..... 163

**Figura 5-15. a)** Fracturas (Fr) presentes en la roca, las cuales crean porosidad secundaria entre los granos de cuarzo (Qz), donde suele entrar materia orgánica (MO) o bien matriz (Mx) (PPL, 5x). **b)** Pseudomatríz (PsMx) formada por el retrabajamiento de los granos (cuarzo, Qz y minerales arcilla), hasta el punto de que el material se infiltró por las zonas intergranulares y dentro de los granos más grandes. A diferencia de la matriz, la pseudomatríz muestra textura de flujo, estando localizada cerca de fracturas (PPL, 5x). **c)** Matriz (Mx), compuesta de un material más finogranular que los granos de cuarzo aledaños (Qz1, Qz2). Está compuesta de minerales arcilla sin diferenciar que se mezclan con granos de cuarzo de tamaño entre arena muy fina y arena fina. (XPL, 5x). **d)** Grano de fosfato (Php), formando parte del armazón. El fosfato se disuelve y recrystaliza a lo largo de fracturas, llegando a mezclarse con la matriz (Mx). (PPL, 10x). ..... 166

**Figura 5-16. a)** Vista general de la roca, conformada por láminas de arenitas de grano medio (blancas) y arenitas de grano muy fino a limolitas gruesas (marrones, separadas por líneas rojas), compuestas por cuarzo (Qz), matriz de minerales arcillosos indiferenciados (Mx) y algunos granos fosfáticos (Pho). También se observa porosidad (Po) (PPL, 2,5x). **b)** Granos de cuarzo con extinción ondulante (Qz1) y recta (Qz 2), mostrando moderada selección y desarrollo de cemento silíceo (Cem), preservando parte de la porosidad primaria de la roca (Po) (XPL, 10x). **c)** Granos de cuarzo (Qz), acompañados de cemento silíceo (Cem) y de caolinita (Kln), la cual ocupa parte de la porosidad primaria de la roca. (XPL, 10x). **d)**

Granos de cuarzo (Qz), donde parte del armazón lo da la matriz de minerales arcillosos indiferenciados. Así mismo, se observa que el cemento lo conforman óxidos de hierro (FeOx) presente entre algunos de los granos (PPL, 10x).....169

## Lista de tablas

Pág.

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 3-1.</b> Condiciones de enterramiento alcanzadas para la pila sedimentaria. Tomado de Warr & Ferreiro Máhlmann (2015) y Warr & Rice (1994).....                             | 53 |
| <b>Tabla 3-2.</b> Principales zonas de generación de hidrocarburos y valores límites de reflectancia de la vitrinita. Tomado de Allen & Allen (2005) y Moreno & Hincapié (2010)..... | 55 |
| <b>Tabla 3-3.</b> Facies y petrofacies sedimentarias definidas para la sección Quebrada Aguacaliente. ....                                                                           | 58 |

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

| Símbolo      | Término                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BBL          | <i>Barrel of oil</i> – Barril de petróleo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| BBOE         | <i>Billions of barrels of oil equivalent</i> – Billones (inglés) de barriles de petróleo equivalente                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| BOE          | <i>Barrel of oil equivalent</i> – Barriles de petróleo equivalente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| CEOR         | Cinturón Esmeraldífero Oriental                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| DRX          | Difracción de Rayos X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| FRX          | Fluorescencia de Rayos X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ft           | <i>Feet</i> – Pies (unidad de medida)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| FWHM         | <i>Full Width at Half Maximum</i> – Medida del ancho de la mitad del pico                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| HST          | <i>Highstand System Tract</i> – Sistema deposicional de alto nivel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Ill/Sme      | Interestratificado Illita/Esmectita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| LST          | <i>Lowstand System Tract</i> – Sistema deposicional de bajo nivel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| MBBL         | <i>Millions of barrels of oil</i> – Millones de barriles de petróleo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| MBOE         | <i>Millions of barrels of oil equivalent</i> – Millones de barriles de petróleo equivalente                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| MFS          | <i>Maximum Flooding Surface</i> – Superficie de máxima inundación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| MMD          | <i>Millions of dollars</i> – Millones de dólares                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Proyecto CAB | Proyecto de investigación “Caracterización, modelamiento y determinación del potencial de arenas bituminosas (AB) en las cuencas Caguán-Putumayo, Llanos, Cordillera Oriental, Valle Superior del Magdalena y Valle Medio del Magdalena en Colombia, basado en un análisis integral (geológico, estratigráfico, geoquímico, isotópico, espectral, petrofísico, social y financiero)” |
| RS           | <i>Regressive Surface</i> – Superficie regresiva                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| SAGD         | <i>Steam-assisted gravity drainage</i> - Drenaje por gravedad asistido por vapor                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| TST          | <i>Transgressive System Tract</i> – Sistema deposicional transgresivo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| TS           | <i>Transgressive Surface</i> – Superficie transgresiva                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |



## Introducción

La presente tesis de maestría se realizó en el marco del proyecto de investigación “Caracterización, modelamiento y determinación del potencial de arenas bituminosas (AB) en las cuencas Caguán-Putumayo, Llanos, Cordillera Oriental, Valle Superior del Magdalena y Valle Medio del Magdalena en Colombia, basado en un análisis integral (geológico, estratigráfico, geoquímico, isotópico, espectral, petrofísico, social y financiero)”, en adelante Proyecto CAB, desarrollado a partir del contrato 428-2021 entre el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), y la alianza conformada por la Universidad Nacional de Colombia y la empresa Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda. El proyecto de investigación fue financiado con recursos provenientes del Convenio 883-2019, suscrito entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y Minciencias a través del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Fondo Francisco José de Caldas (FFJC).

Las arenitas bituminosas son un recurso ampliamente utilizado en la industria tales como la construcción (Zambrano-Mesa *et al.*, 2020), pero que recientemente ha aumentado su valor estratégico debido a que posee un potencial de utilización como recurso energético (Chilingarian & Yen, 1978; Pohl, 2011; Vita-Mesa, 2022). Al igual que los yacimientos de hidrocarburos convencionales, las arenitas bituminosas comparten algunos de los elementos de los sistemas petrolíferos convencionales, con la excepción de que consiste en un material bituminoso con mayor viscosidad, densidad y con una importante fracción mineral inorgánica que dificulta el refinado de hidrocarburos (petróleo y gas) que contiene (Hein, 2006).

El proyecto de maestría, enmarcado dentro del Proyecto CAB busca no solo caracterizar las arenitas bituminosas para definir técnica y científicamente este recurso en el contexto colombiano, sino entender como ha sido la historia diagenética de las rocas concernientes al reservorio y potenciales generadores de hidrocarburo en el área de estudio localizada en el municipio de San Luis de Gaceno, siendo esta una de las 12 áreas de estudio trabajadas dentro del Proyecto CAB.

Durante su desarrollo, se utilizaron distintas técnicas analíticas tales como la toma de muestras, petrografía, análisis de facies y litogeoquímica (Difracción y Fluorescencia de Rayos X); todas ellas aplicadas a las rocas pertenecientes a la Formación Chipaque y al Grupo Guadalupe aflorantes a lo largo de las Quebradas San Antonio y Aguacaliente en el municipio de San Luis de Gaceno, la cual ya ha sido estudiada por otros autores (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996), tributarias al cauce del río Lengupá. Los análisis fueron efectuados en rocas con potencial de reservorio para almacenar hidrocarburos de acuerdo con las observaciones recolectadas en campo. El municipio de San Luis de Gaceno se ubica sobre el flanco oriental de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos.

Buscando la ocurrencia o no de arenitas bituminosas en el área de San Luis de Gaceno, la tesis se orientó en analizar sedimentológica y geoquímicamente las rocas con potencial para almacenar hidrocarburos en las unidades del Cretácico Superior, concretamente la parte inferior y superior del Grupo Guadalupe debido a que se cuenta con material recolectado y respaldo en estudios previos (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996). En su sección tipo, el Grupo Guadalupe está conformado (de base a tope) por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor & Tierna; las cuales fueron definidas por múltiples autores (Hettner, 1892; Hubach, 1957; Bürgel, 1961; Julivert, 1962; Renzoni, 1962), agrupando dos conjuntos arenosos separados por uno de Plaeners (lodolitas silicificadas o lilitas) que afloran a lo largo de la Sabana de Bogotá y en múltiples secciones de la Cordillera Oriental.

Pasando a las unidades generadoras, estas han sido denominadas como tal por varios autores en el Piedemonte Llanero y la Cuenca Llanos (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996; Guerrero *et al.*, 2000; Guerrero, 2002a; 2002b; Terraza *et al.*, 2013) correspondiendo a la Formación Chipaque (muestreada en su tope, equivalente a la Formación Gachetá definida en la Cuenca Llanos, según lo establecido por Cooper *et al.* (1995)) y la Formación Plaeners (parte media del Grupo Guadalupe). No obstante, el estudio de dichas rocas generadoras debe hacerse con cuidado, ya que durante la fase de campo e interpretación petrográfica no se reconoció la presencia de hidrocarburo, estando el análisis (similar al de las rocas reservorio) orientado a determinar si las condiciones diagenéticas son tales que se dio un gradiente geotérmico que ayudase a la ventana de generación de arenita bituminosa, pero que no se dio como si ocurre en otros puntos de la Cuenca Llanos tal como el área de Lejanías (Molano-Mendoza *et al.*, 2023).

# Objetivos

## Objetivo General

Determinar mediante sedimentología (definición de petrofacies), estratigrafía y litogeoquímica (difracción y fluorescencia de rayos x) los procesos diagenéticos que ocurrieron en las rocas del Grupo Guadalupe aflorantes en el piedemonte llanero (San Luis de Gaceno Boyacá), con el fin de determinar cómo incidió en la formación de potenciales rocas reservorios de arenitas bituminosas.

## Objetivos Específicos

- Elaborar una columna estratigráfica a escala 1:500, acompañada de un análisis de facies de la secuencia estratigráfica de la Quebrada Aguacaliente.
- Definir petrofacies en las potenciales rocas reservorio con la ayuda de petrografía y mineralogía.
- Determinar los principales cambios diagenéticos experimentados por las rocas potencialmente reservorio para arenitas bituminosas, con ayuda de litogeoquímica (difracción y fluorescencia de rayos x)
- Describir los cambios en las condiciones del ambiente de depósito de las arenitas (principalmente cuarzoarenitas), y como esto se relaciona con su capacidad para almacenar hidrocarburos a modo de arenitas bituminosas.



# 1. Generalidades y contexto geológico

## 1.1 Generalidades

Arenitas bituminosas o *tar sands* (como se denomina en inglés) se denominan a los hidrocarburos pesados y extrapesados (es decir, con una gravedad API variable de 6-12°), los cuales se caracterizan por su altísima viscosidad y enriquecimiento en sulfuros (Pohl, 2011). Por lo anterior, dichos yacimientos de hidrocarburos son considerados no convencionales (debido a su incapacidad de fluir a superficie tal como el petróleo almacenado en profundidad y extraído mediante un pozo aprovechando su presión litostática confinante o bien mediante bombeo artificial). Se forman como producto de la degradación del petróleo convencional, perdiendo en consecuencia hidrocarburos livianos e incrementando su viscosidad con un aumento en el contenido de compuestos NSO (Ji et al., 2021), siendo posible determinar su patrón de degradación mediante el uso de biomarcadores (Head et al., 2003). Dichos biomarcadores sugieren que, a temperaturas menores a 80°C, los microorganismos anaeróbicos catabolizan alcanos y producen ácidos orgánicos. Por su volumen y origen biogénico, los depósitos de arenita bituminosa o *tar sands* localizados en Canadá y Rusia conforman las que son probablemente los mayores recursos de hidrocarburos en el mundo (Head et al., 2003), las cuales suman alrededor de 2100 BOE (Demaision, 1977).

Si la degradación del petróleo aumenta, en la arenita bituminosa se formarán asfáltenos y suspensiones coloidales (partículas de asfáltenos, metales y resinas rodeadas de hidrocarburos líquidos remanentes), puede dar lugar a la formación de asfalto natural. El asfalto por su parte es un material sólido, frágil, de color marrón a negro, con fractura concoidea, densidad de 1-1,3 g/cm<sup>3</sup>, punto de fusión entre 100-140°C, y comúnmente mezclado con arcilla y arena en depósitos estratificados (a modo de capas) (Pohl, 2011).

## 1.2 Localización del área de estudio

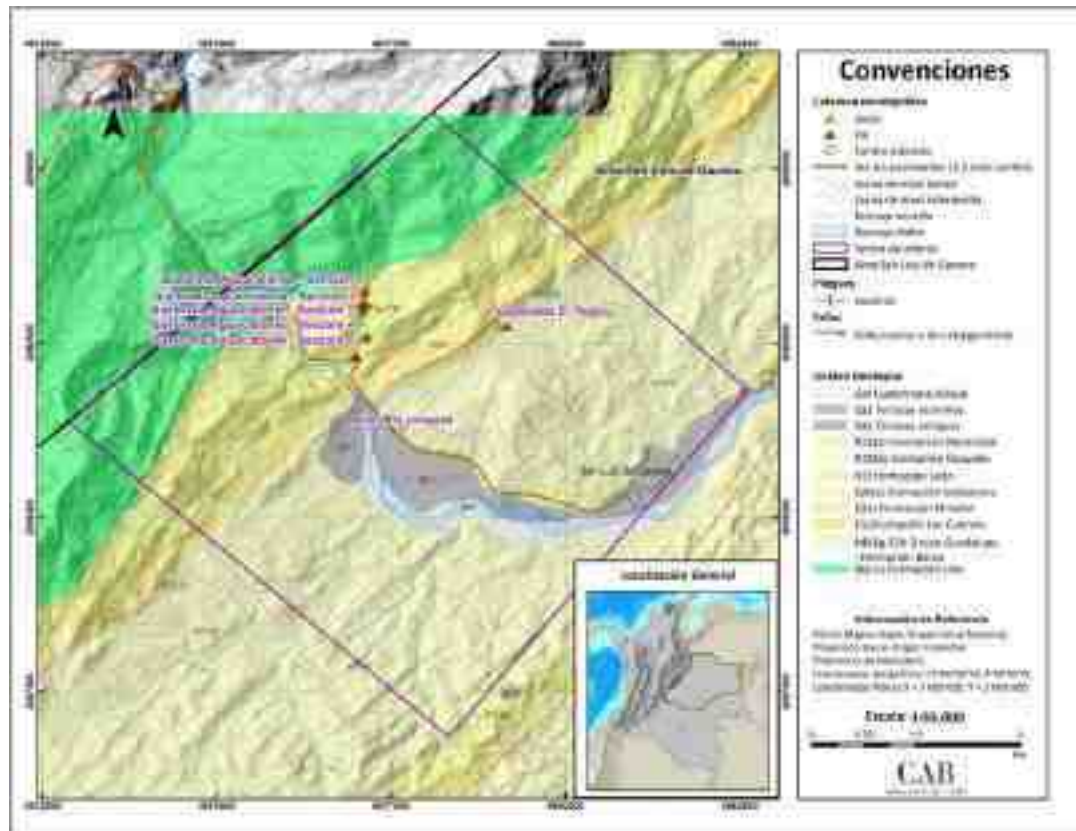
La investigación fue desarrollada en una de las 12 áreas elegidas por el *Proyecto CAB*, concretamente en el área aledaña al municipio de San Luis de Gaceno. Su cabecera municipal se encuentra a 95 km al oriente de Bogotá D.C., en el sur del departamento de Boyacá, cerca al límite departamental de Cundinamarca-Boyacá-Casanare-Meta y de la desembocadura del Río Lengupá en el Río Upía (cuenca del Río Meta, que drena hacia el Río Orinoco). Por su posición geográfica enclavada en el piedemonte llanero (Figura 1-1) del flanco oriental de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, el área de estudio tiene características tanto estructurales como sedimentológicas y estratigráficas similares a 2 cuencas hidrocarburíferas con distinto grado de prospectividad: Llanos y Cordillera (Vargas, 2012; ANTEK S.A, 2014; Araque-Guevara, 2016). El Río Lengupá tiene una dirección de flujo NNW-SSE y luego gira hacia oriente (cerca de la cabecera urbana de San Luis de Gaceno), teniendo múltiples quebradas tributarias. Una de ellas corresponde a la Quebrada Aguacaliente (Figura 1-1), la cual se localiza a 4 km al WNW de la cabecera municipal, fluyendo en dirección Norte-Sur y desarrollando en su valle una sección con afloramientos continuos de las formaciones Une y Chipaque (de color verde en el mapa), así como del Grupo Guadalupe (de color amarillo ocre), antes de desembocar en el río.

La razón por la cual se eligió la Quebrada Aguacaliente como sección de estudio dentro del Proyecto de Tesis es que su dirección de flujo corta el rumbo de las rocas aflorantes, razón por la cual otros autores han descrito una sección estratigráfica bien expuesta y continua para los intereses del *Proyecto CAB* (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996). La quebrada expone unidades del Cretácico Tardío al Paleoceno, las cuales son generadoras y reservorios de hidrocarburos en otros puntos del Piedemonte Llanero y la Cuenca Llanos, como por ejemplo en el área de Lejanías (Martinez, 2003), por lo que además de poderse tomar información sedimentológica, estratigráfica y petrográfica; es idónea para la toma de datos estructurales duros empleables en modelamiento estructural dentro del *Proyecto CAB*. Así mismo, en cuestiones de acceso es relativamente transitable, ya que al no ser un cauce de tan alto orden (a diferencia del río Lengupá) y cercano a varias fincas se facilita la toma de información en campo.

Considerando además el ambiente de depósito y *plays* de los mayores yacimientos de arenitas bituminosas existentes en el mundo (Faja del Orinoco en Venezuela, Athabasca en Canadá, Óblast de Melekess en Rusia), se tienen muchas similitudes con la Cuenca Cretácica Colombiana, ya que los principales reservorios corresponden a deltas y en menor medida sistemas distributarios no marinos, correspondiendo las trampas y reservorios a combinaciones de fallas con truncamientos estratigráficos, presentes en cuencas de antepaís o *foreland* (Demaision, 1977). Una posición estructural similar se tiene en Colombia, concretamente a lo largo del piedemonte llanero, donde el Sistema de Fallas de

Guaicaramo da lugar a este tipo de geometría de cuenca de *foreland* desde el Paleoceno (Guerrero et al., 2000; Bonilla-Ororio et al., 2011).

**Figura 1-1.** Localización del área de estudio, correspondiente a la Quebrada Aguacaliente. Tomado de (Molano-Mendoza et al., 2023)



### 1.3 Antecedentes

Además de las compañías operadoras de exploración y producción de hidrocarburos que han trabajado el Piedemonte Llanero y la Cuenca Llanos, múltiples organizaciones han tenido interés en conocer los recursos y manifestaciones (comerciales o no) de hidrocarburos convencionales presentes en el área de estudio (municipio de San Luis de Gaceno, Boyacá, Colombia). Se enlistan a continuación algunos de estos estudios previos.

Cerca de San Luis de Gaceno (municipio de Medina, Cundinamarca), se perforó con fines exploratorios por Ecopetrol el pozo Coporo-1 en 1996, el cual buscaba probar la existencia de un yacimiento

convencional de petróleo con recursos cercanos a 1,5 BBOE. No obstante, en el escenario más optimista, del campo Coporo solo era posible recobrar 300 MBOE, por lo que el proyecto fue descartado tras haberse invertido 50 MMD en un pozo de cerca de 20.000 ft de profundidad y con altas complejidades operacionales durante su perforación (El Tiempo, 1996; González & Jiménez, 2005), siendo desde entonces un activo y bloque poco atractivo para la industria petrolera.

Simultáneamente, Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) en el piedemonte llanero (área de San Luis de Gaceno) hicieron una descripción estratigráfica detallada del Grupo Guadalupe, encontrando diferencias significativas en las unidades correlativas, proponiendo nuevas unidades geológicas a partir de estratigrafía física, palinología, sedimentología y estratigrafía de secuencias, recolectando muestras impregnadas y localmente con alto contenido de hidrocarburos (con espesores desconocidos). Una carta de correlación que relaciona las unidades trabajadas en este proyecto de tesis con la de estos autores (así como en el Proyecto CAB) se muestra en la **Figura 1-2**.

Posteriormente, la compañía ANTEK S.A (2014), presentó a la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) un inventario de los rezumaderos presentes en las cuencas hidrocarburíferas colombianas, razón por la cual se consideró este bloque dentro de la Cuenca Llanos como de interés para el desarrollo de proyectos de investigación enfocados en determinar el potencial de arenitas bituminosas y otros hidrocarburos no convencionales. Para la ANH, las arenitas bituminosas son manifestaciones en superficie de la existencia de un sistema petrolífero en el subsuelo, reconociéndose en toda la cuenca 13 zonas con presencia de asfaltos y/o arenita bituminosa, en los cuales además de ser ubicados son caracterizados con técnicas bastante similares a las presentadas en el estudio de Gómez-Rojas et al. (2018), es decir tras un proceso de separación del hidrocarburo de la roca que lo contiene y aplicando análisis de petrografía, separación de bitumen, extracción con éter etílico, pirólisis (*Rock-Eval*, *Fischer*), análisis de agua y sedimentos, análisis de cenizas, análisis SARA y cromatografía. Preliminarmente, ANTEK S.A (2014) en el área de San Luis de Gaceno y alrededores no reporta la presencia de arenita bituminosa y rezumaderos de hidrocarburos con alta viscosidad, quedando como alternativa trabajar el área con otros análogos cercanos o en una posición estructural similar tales como la cuenca Caguán-Putumayo o la cuenca de Athabasca en Canadá (Demaision, 1977; Chilingarian & Yen, 1978).

Múltiples trabajos han buscado evaluar la viabilidad de explotar arenas bituminosas en otras partes del mundo y en Colombia (Demaision, 1977; Chilingarian & Yen, 1978; Jiayu & Jianyi, 1999; Dusseault, 2001; Hein, 2006; Gómez-Rojas et al., 2018); por lo que en agosto de 2022 se comenzó a ejecutar el



Como la demanda de petróleo sigue una tendencia al alza (y con ello, sus precios se mantienen altos), en los últimos años el aprovechamiento de hidrocarburos de yacimientos no convencionales se ha vuelto cada vez más atractivo desde un punto de vista económico, destacando entre dichos yacimientos el metano almacenado en mantos de carbón y las arenitas bituminosas (Briceño, 2015; Mariño-Martínez, 2015). Según datos suministrados por la ANH, se estima que solo en la Cuenca Llanos hay 5393 MBBL a modo de reservas recuperables mediante SAGD (un tipo de bombeo artificial de recobro de hidrocarburo extra pesado) o bien 8845 MBBL a modo de reservas recuperables mediante minería (Briceño, 2015; Mariño-Martínez, 2015); por lo que es muy factible que en los próximos años el estudio de potenciales reservorios de yacimientos no convencionales de hidrocarburos sea uno de los principales rubros de inversión de la industria petrolera.

## 1.4 Geología del Piedemonte Llanero y Cuenca Llanos Orientales

El Piedemonte Llanero se localiza en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. Por su posición comparte similitudes estructurales y estratigráficas con la Cuenca Llanos al oriente y la Cuenca Cordillera al occidente, estando limitado al oriente y suroriente por la Falla de Tesalia (ramal occidental), mientras que al occidente y noroccidente se encuentra limitado por la Falla de Lengupá, que yuxtapone rocas cretácicas y cenozoicas sobre basamento. A continuación se presentan los rasgos más importantes, teniendo en cuenta para ello la descripción de las unidades presentada en la plancha 229 – Gachalá del Servicio Geológico Colombiano (Terraza et al., 2013), área dentro de la cual está inscrita el área de estudio de la presente tesis de maestría. La correlación entre las unidades se presenta en la **Figura 1-2**.

### 1.4.1 Estratigrafía

- **Formación Chipaque (K2cp):** Presente en una franja alargada en dirección NE-SW paralela a la Formación Une, estando truncada al sur por la Falla de Tesalia W. Por su litología tiene morfología deprimida, ya que consta de lodolitas, limolitas y en baja proporción arenitas de grano muy fino a grueso, teniendo 565m de espesor en el área de estudio (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996). Según Ulloa & Rodríguez (1979) la Formación Chipaque tiene contactos concordantes con los estratos de cuarzoarenita y conglomerados de la infrayacente Formación Une, así como con el

suprayacente Grupo Guadalupe. Hubach (1957) y Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) le atribuye una edad Cenomaniano superior a Santoniano.

- **Grupo Guadalupe (K2g):** Esta unidad aflora en el bloque colgante de la Falla de Tesalia W, teniendo buena exposición la unidad a lo largo de las Quebradas San Antonio y Aguacaliente dentro de la zona de estudio. Las formaciones que comprenden a este grupo (Plaeners y Labor & Tierna) se encuentran truncadas por dicha falla del piedemonte llanero.

Definida originalmente por Hettner (1892), fue descrito por múltiples autores hasta que Hubach (1957) le atribuyó formalmente el rango de formación. Bürgl (1961) define 3 miembros en el Grupo Guadalupe, compuesta de base a techo por: 1) Plaeners Inferior el cual incluye el Miembro Raizal y el Chert Superior o la Lidita Superior, 2) Miembro Dura, Plaeners Superior y 3) Miembro Tierna (Julivert, 1962), las cuales simultáneamente son denominadas por Renzoni (1962) como formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor & Tierna, esta última escindida en 2 formaciones independientes por Perez & Salazar (1978); todas ellas con secciones tipo diferentes para cada una de las formaciones del Grupo Guadalupe.

De manera complementaria, múltiples autores han propuesto diferentes nomenclaturas para esta misma unidad aflorante en el piedemonte llanero. Ulloa & Rodríguez (1979) proponen el Grupo Palmichal para denominar “una serie de areniscas, lutitas y conglomerados finos”, describiendo en la Quebrada Palmichal (cerca de Villavicencio, Meta) 5 miembros que abarcan la totalidad del Grupo Guadalupe; mientras que Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) proponen nuevos nombres para las formaciones del Guadalupe inferior, medio y superior los siguientes respectivamente: Arenitas de San Antonio, Lodolitas de Aguacaliente y Arenitas de San Luis de Gaceno; teniendo en cuenta que las rocas del área del piedemonte llanero (San Luis de Gaceno) corresponden a cambios laterales de facies de las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor & Tierna definidas en la cordillera oriental, siendo los miembros arenosos con una granulometría más gruesa, mientras que el Guadalupe medio carece de porcelanitas y rocas altamente silicificadas. Por lo anterior, Terraza et al. (2013) considera que existe sinonimia entre todas estas propuestas definidas con posterioridad a las propuestas originales (Hubach, 1957; Julivert, 1962; Perez & Salazar, 1978; Renzoni, 1962).

A continuación, se presentan cada una de las formaciones que fueron trabajadas en el desarrollo de la tesis de maestría. Se mantiene la nomenclatura de Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) debido a que este trabajo parte como línea base, haciendo frecuentes comparaciones con la nomenclatura definida por Perez & Salazar (1978), debido a la necesidad de hacer correlaciones entre los resultados de este proyecto con datos tomados del Proyecto CAB (Molano-Mendoza et al., 2023).

- **Formación Arenitas de San Antonio (K2asa):** Aflora en un bloque con rumbo N30°-40°E, en el bloque colgante de la Falla de Tesalia W, estando con polaridad invertida y siendo paralela a las formaciones Une y Chipaque. Tiene 214,6 m de espesor y se subdivide en 7 segmentos (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996), predominando las arenitas de grano fino a muy grueso, con bioturbación variable que homogeniza el armazón de la roca hasta destruir las estructuras sedimentarias. Algunas capas de arenitas son fosilíferas, habiendo restos de bivalvos, fragmentos fosfáticos, pellets e intraclastos; aunque en la mayor parte del segmento se tienen rocas de composición siliciclástica (principalmente cuarzoarenitas). De igual manera, se encuentran icnofósiles, del icnogénero *Thalassinoides*. Su edad es Santoniano-Campaniano temprano con base en el contenido de palinomorfos (Sarmiento-Pérez & Guerrero, 2000).
- **Formación Lodolitas de Aguacaliente (K2la):** Concordantemente sobre la Formación Arenitas de San Antonio, se encuentra en la misma posición estructural. Consta de una sucesión de 157,5 m de espesor, dividida en 5 segmentos, predominando las lodolitas negras en capas muy gruesas con intercalaciones menores de cuarzoarenitas muy finas y limolitas silíceas. Las arenitas presentes son de carácter fosfático y exhiben rastros de bioturbación. Existen además intercalaciones de bioesparitas y lentes de biomicritas, donde se encuentran restos de gasterópodos, bivalvos, partículas fosfáticas y espinas de peces. Hacia el tope, las capas de arenita son granodecrecientes. Su edad es Campaniano tardío con base en el contenido de palinomorfos (Sarmiento-Pérez & Guerrero, 2000).
- **Formación Arenitas de San Luis de Gaceno (K2asl):** Conformada por una sucesión sedimentaria de 149 m de espesor, la cual se divide en 5 segmentos, en dicha unidad predominan las cuarzoarenitas grano medio a grueso en capas muy gruesas, existiendo algunos restos de bivalvos, bioturbadas, intercaladas con capas medias y gruesas de lodolitas negras. Hacia el tope predominan las capas conglomeráticas, estando apiladas en sets de capas granodecrecientes. Su edad es Maastrichtiano tardío según Sarmiento-Pérez (1992) en el Boquerón de Tausa.
- **Formación Guaduas (K2E1g):** Descrita originalmente por Hettner (1892) en la Sabana de Bogotá, hace referencia a todos los materiales que se encuentran por encima del Grupo Guadalupe. Sarmiento-Pérez (1992) estudia esta unidad en la sección de referencia de Peñas de Boquerón, en la región de Sutatausa, estando limitada en la base y tope por las formaciones Tierna y Cacho respectivamente. Cerca de la zona de estudio aflora en una faja angosta con dirección N30°-40°E

sobre el margen oriental de la Cuchilla de Pacho Nieto (Sabanalarga, Casanare), al otro lado de las fallas de Tesalia W, Tesalia E y Canta Claro-Botijera; mientras que a lo largo de la Quebrada Aguacaliente es posible que aflore sobre la desembocadura de esta en el río Lengupá, estando cubierta (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996), así como a lo largo de las Quebradas Guadualera y La Paz, ambas también en San Luis de Gaceno.

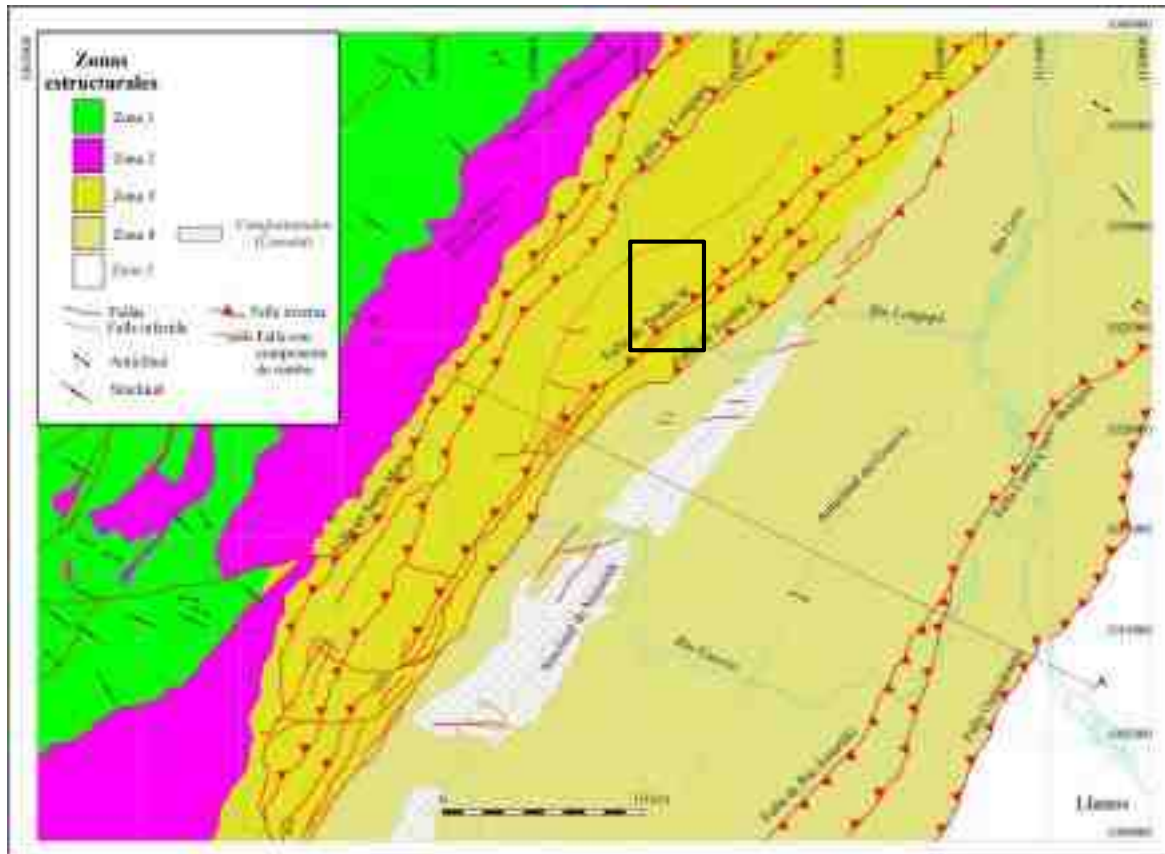
Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) describen una sucesión de 59m de lodolitas grises y carbonosas oscuras alternadas con algunas capas de carbón, en las cuales aparecen muy de vez en cuando capas delgadas a medias de cuarzoarenitas de grano fino. Por su posición estratigráfica y evidencias palinológicas, se correlaciona a esta unidad con la Formación Guaduas aflorante en la región de Sutatausa (Sarmiento-Pérez, 1992; Guerrero, 2002a, 2002b), aunque en el piedemonte llanero existe un faltante estratigráfico de la parte superior (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996).

### 1.4.2 Geología estructural

Siendo las rocas del Grupo Farallones el basamento en el área de estudio, sobre estas se acumulan rocas Cretácicas y Paleógenas, formando estructuras regionales orientadas SW-NE afectadas por fallas inversas de alto ángulo, con vergencia E las cuales hacen parte del sistema de fallas del piedemonte llanero, formando bloques del tipo *pop-up*, dando en consecuencia homoclinales con rocas altamente deformadas y de polaridad invertida (Branquet et al., 2002; Terraza et al., 2013). Se atribuye el alto ángulo de estas fallas inversas a su carácter originalmente normal, el cual sufrió inversión tectónica durante el límite Cretácico-Paleógeno, pasando de una cuenca de trasarco o *backarc* a una cuenca de antepaís o *foreland* (Fabre, 1987; Sarmiento, 2001; Branquet et al., 2002; Guerrero, 2002a). Hacia el oriente de la zona de estudio (entre las fallas de Tesalia E y Canta Claro-Botijera) en contraparte se desarrollan grandes estructuras regionales sinclinales y anticlinales en unidades Paleógenas y Neógenas; mientras que hacia el occidente predominan estructuras basculadas, limitadas por el Anticlinal de Montecristo y otras manifestaciones morfológicas del basamento.

De esta manera y en concordancia al modelamiento estructural sugerido por Terraza et al.(2013) que zonifica la plancha 229, entre la Falla de Santa María y el ramal oriental de la Falla de Tesalia se encuentran unidades volcadas hacia el occidente, concordantes con el rumbo de las fallas principales con vergencia hacia el este (correspondiente a la zona 3, mostrada en color amarillo en la **Figura 1-3**). Agrupa las fallas de Tesalia y Lengupá, poniendo esta última en contacto las rocas del Cretácico Inferior (Grupo Cáqueza) con rocas del Cretácico Superior (Grupo Villeta).

**Figura 1-3.** Zonificación estructural de la plancha 229 Gachalá. En cuadrante negro se encierra el área de estudio, aledaña a la desembocadura de la Quebrada Aguacaliente en el Rio Lengupá. Modificado de Terraza et al.(2013).



Así mismo, la Falla de Tesalia se escinde en varios tramos, conformando así un arreglo anastomosado que se interpreta como parte de un sistema transpresivo (Terraza et al., 2013), el cual además se reactiva y forma un amplio pliegue de propagación de falla (Branquet et al., 2002). Al sur del área de estudio, la Falla de Tesalia se divide en varios ramales, poniendo en contacto las rocas del Grupo Guadalupe (Formación Arenitas de San Antonio) con la yacente Formación Socha Inferior; mientras que un poco más al norte (al occidente de San Luis de Gaceno), la misma Falla de Tesalia corta unidades más recientes y expone como bloque colgante toda la sucesión del Cretácico superior (desde la Formación Une hasta la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno) sobre rocas del Eoceno tardío al Mioceno temprano (Formación San Fernando, equivalente a la Formación Carbonera mencionada por Parra et al. (2009)). Para Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) el bloque colgante abarca hasta la Formación Socha Inferior, estando cada uno de los miembros del Grupo Guadalupe truncados por las capas invertidas de las formaciones Socha Superior y Mirador (equivalente a la Formación Arenisca El Limbo mencionada por Terraza et al. (2013)) del bloque yacente.

La Falla de Santa María es de carácter regional, tiene vergencia SE y pone en contacto rocas de la Formación Bata con rocas de la Formación Lutitas de Macanal, dando lugar a una zona ampliamente deformada con estratos subverticales, inversión en la polaridad y replegamiento. Por su parte, la Falla de Lengupá controla el cauce del río homónimo, es paralela a la Falla de Santa María y al igual que esta, tiene una componente de rumbo dextral, afectando rocas de las formaciones Lutitas de Macanal y Las Juntas, aunque más hacia el oriente la falla yuxtapone la formación Las Juntas con la Formación Une.



## 2. Metodología

Se presenta a continuación cada una de las tareas llevadas a cabo durante el desarrollo de la presente tesis de maestría, enlistadas en orden de temporalidad.

### 2.1 Planteamiento del Proyecto de Tesis y recopilación bibliográfica

Entre los periodos académicos 2022-II y 2023-I (octubre de 2022 a junio de 2023) se cursaron los seminarios de investigación del programa de Maestría en Ciencias – Geología, a la par que se realizaba la vinculación formal del tesista dentro del *Proyecto CAB*. Se escogió el área de San Luis de Gaceno (perteneciente a la Cuenca Llanos, en el piedemonte llanero) debido a que en el área se deseaba evaluar el potencial de arenitas bituminosas desde un punto de vista sedimentológico y estratigráfico. Como producto, se obtuvo la consecuente propuesta de Proyecto de Tesis, avalada por el profesor director y sujeta a correcciones por parte del comité asesor de posgrados y del equipo de coordinación del *Proyecto CAB*.

Dentro de los intereses para desarrollar esta tesis confluyen aspectos teórico-científicos. Se desconocía el potencial del área en lo que respecta a la existencia de arenitas bituminosas, siendo necesaria una discusión referente a los ambientes de depósito de las potenciales rocas reservorio desde un punto de vista sedimentológico y diagenético, que complementara las propuestas de nomenclatura dada a estas unidades por distintos autores (Ulloa & Rodríguez, 1979; Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996; Terraza et al., 2013); proponiéndose en su momento la siguiente pregunta de investigación: *¿Son las formaciones Inferior y Superior del Grupo Guadalupe (Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno) rocas reservorios de arenitas bituminosas?*

Así mismo, dentro del *Proyecto CAB* se requería una tesis de maestría enfocada en la Cuenca Llanos, concretamente en el área de San Luis de Gaceno. Por tal razón, se destinaron recursos para apoyar en salidas de campo y análisis de laboratorio; contando con el apoyo de un profesor director con

experiencia investigativa en el piedemonte llanero; así como la disponibilidad de un estudiante de maestría con experiencia en la evaluación de recursos minerales dentro del área de estudio y con conocimientos de estratigrafía y geología estructural.

## 2.2 Trabajo de campo

Se realizaron 2 comisiones de campo durante el desarrollo del *Proyecto CAB* y la tesis de maestría, durante los meses de mayo de 2023 y febrero de 2024, al área de San Luis de Gaceno, con el objetivo de encontrar arenitas bituminosas y otras rocas asociadas (no bituminosas, tales como rocas sello, rocas generadoras y rocas reservorio), las cuales además debían estar dentro de secciones estratigráficas medibles (en este caso, el cauce de una quebrada tributaria al Río Lengupá con vergencia NNE-SSW). En dichas comisiones de campo, de la Quebrada Aguacaliente se recolectaron 30 muestras de mano, 67 muestras para litogeoquímica. Se describieron 818 metros de sección estratigráficas (de los cuales 166,5 m se encontraban cubiertos). No se apreció contenido alguno o impregnación visible de arenita bituminosa en las muestras pertenecientes a la Quebrada Aguacaliente (también llamada San Antonio aguas arriba).

### 2.2.1 Elaboración de columnas estratigráficas

La columna estratigráfica de la Quebrada Aguacaliente fue descrita a escala 1:200, con el fin de compilar información acerca de la composición litológica, espesores, textura y estructuras sedimentarias presentes, siendo posteriormente redimensionadas a escala 1:500 y 1:1000 para facilitar su visualización e interpretación de ambientes sedimentarios. Por tal motivo, parte de la información de la presente investigación difiere del informe correspondiente al levantamiento estratigráfico de la Cuenca Llanos del *Proyecto CAB* (Molano-Mendoza et al., 2023), ya que para este último, solo se requería una columna estratigráfica generalizada (también redimensionada a partir de los datos recolectados únicamente de la primera comisión de campo) y una interpretación de facies hecha por un equipo de asesores independientes a la tesis de maestría.

El levantamiento estratigráfico se elaboró usando bastón de Jacob de 1,5 m con nivel Abney (**Figura 2-1**), acompañado de brújula Brunton convencional y GPS Garmin 64sx, con error de posicionamiento menor a los 5 m en la horizontal; consignando la información obtenida en formatos de campo diseñados

por el Proyecto CAB a escala 1:200 (**Anexo A**). Para la descripción estratigráfica se utilizaron los siguientes estándares:

- Escala de tamaño de grano según Wentworth (1922).
- Clasificación de espesor de capas o láminas según Reineck & Singh (1980)
- Estructuras sedimentarias modificado de Reineck & Singh (1980).
- Grado de bioperturbación basado en Moore & Scruton (1957).

**Figura 2-1.** Actividades de campo realizadas en la sección Quebrada Aguacaliente. En este caso, se observan estructuras sedimentarias, dentro de cuarzoarenitas pertenecientes al tramo de columna “Quebrada Aguacaliente 5”. El mango del martillo apunta hacia el tope, observando además los bastones con base en los cuales se elaboró la columna (intervalos periódicamente medidos, marcados con espray naranja). Tomado de Molano-Mendoza et al. (2023).



Para la clasificación de las rocas terrígenas en el campo, se tuvo en cuenta la clasificación textural de Folk (1954) como una primera aproximación; en el caso de las rocas calcáreas, se utilizó la clasificación composicional de Folk (1954, 1980) y la clasificación textural de Dunham (1962). Todas las muestras (tanto de mano como para litogeoquímica) fueron ubicadas dentro de la columna de acuerdo con el protocolo de muestreo establecido previamente y marcadas de acuerdo con los estándares establecidos previamente.

Los 818 metros de sección estratigráfica descritos a lo largo de la Quebrada Aguacaliente se hicieron en 9 tramos. La sección estratigráfica abarca la Formación Chipaque (parte media y superior), el Grupo Guadalupe (Formaciones Arenitas de San Antonio, Lodolitas de Aguacaliente y Arenitas de San Luis de Gaceno), y la parte basal de la Formación Guaduas. Los tramos son agrupados de la siguiente manera:

- De base a tope se describieron los tramos denominados “Aguacaliente” (1 al 5) durante la primera comisión de campo, los cuales se encuentran separados entre sí por segmentos de roca parcial o totalmente cubiertos (con espesor de afloramiento no mayor a 10 m). Estos 5 tramos cuentan con coordenadas de inicio y final, siendo posteriormente calculado el espesor de los inter-tramos mediante el método trigonométrico usando ArcMap 10.8® para su visualización. Dichos inter-tramos fueron tomados como cubiertos para el informe de levantamiento estratigráfico del Proyecto CAB (Molano-Mendoza et al., 2023). Entre estos 5 tramos se describieron en total 562,5 m de sección estratigráfica (incluyendo cubiertos).
- En la segunda comisión de campo, se denominaron de base a tope a los segmentos inter-tramos definidos en la primera comisión como “Bellacosa” (1 al 4). Reciben su nombre debido a la mejor exposición que reciben los afloramientos con respecto a la primera comisión, ya que se contó con la posibilidad de describir mayor cantidad de metros estratigráficos adicionales. Se complementaron las descripciones hechas con el trabajo de Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996). Además, se midió con cinta métrica y usando el método de poligonales los espesores reales de los cubiertos inter-tramos que permanecieron sin aflorar. Entre estos 4 tramos se describieron en total 255,5 m de sección estratigráfica (incluyendo cubiertos).

En este trabajo de maestría, se presenta una descripción de una sección estratigráfica de 539 metros de espesor, ya que solo se considera el Grupo Guadalupe, así como el tope y base de las Formaciones Chipaque y Guaduas, respectivamente. La digitalización de las columnas fue hecha con el programa Inkscape®, añadiéndole facies sedimentarias y una curva eustática, elaborada según los criterios definidos por Guerrero & Sarmiento (1996), Bonilla-Osorio et al. (2011) y Gómez et al. (2020).

## 2.2.2 Recolección de muestras

Respecto a las muestras recolectadas (**Anexo B**), se tomaron 30 muestras de mano (entre 4 y 6 kg) para efectuar distintos análisis dentro del Proyecto CAB (petrografía, petrofísica, DRX, FRX, espectroscopía infrarroja, isotopía) a la par que se iba describiendo la columna estratigráfica (**Figura 2-2**). Cada una de las muestras de mano fue enumerada con el consecutivo “229IIC-JDV-Tipo de muestra (AB – Arenita bituminosa; ANB – Arenita no bituminosa; NB – Roca no bituminosa del mismo nivel estratigráfico que roca bituminosa; RSB – Roca sello base de arenita bituminosa ; RST – Roca sello tope de arenita bituminosa)-ID Consecutivo”, siendo el ID Consecutivo correspondiente a una numeración interna definida dentro del Proyecto CAB. Entre tanto, las 67 muestras recolectadas para análisis de litogeoquímica (DRX y FRX, entre 100 y 200 g) fueron tomadas y enumeradas independientemente a

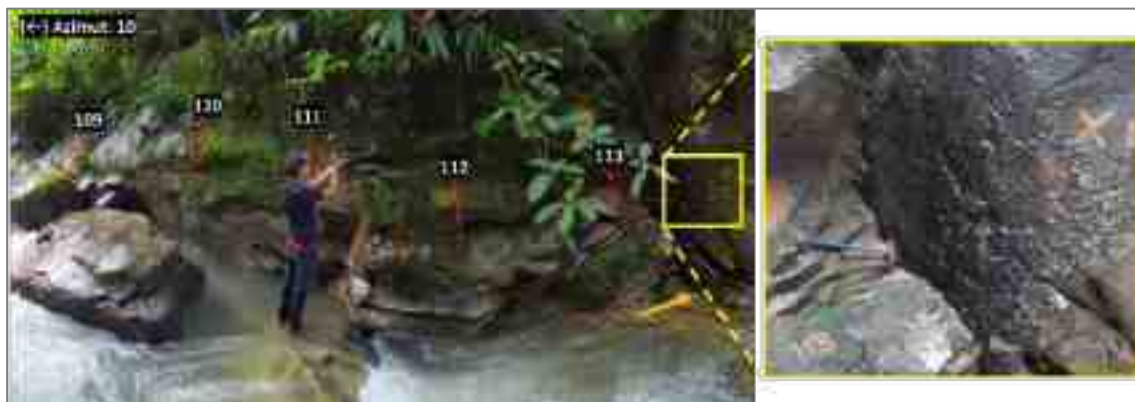
las muestras de mano (o bien, siendo pequeños fragmentos de estas) directamente de la sección estratigráfica descrita. Las muestras recolectadas proceden de la Formación Chipaque y de la totalidad del Grupo Guadalupe (formaciones Arenitas de San Antonio, Lodolitas de Aguacaliente y Arenitas de San Luis de Gaceno), tal como lo indica el **Anexo C**.

Algo que se debe tener en cuenta es que las muestras de litogeoquímica recolectadas corresponden principalmente a lodolitas, arcillolitas y rocas calcáreas; ya que el objetivo de la difracción de rayos x es caracterizar minerales formadores de roca (cuarzo, feldespatos, carbonatos, fosfatos, entre otros) y minerales arcillosos, siguiendo la metodología de Thorez (1975). Por su parte, las muestras recolectadas para petrografía muestran mejor las relaciones texturales y composición, por lo que se tomaron principalmente limolitas, arenitas, arenitas conglomeráticas y rocas calcáreas.

## 2.3 Análisis de laboratorio

A partir de la columna estratigráfica descrita y apoyado de fotografías y muestras recolectadas, se realizaron los distintos análisis de laboratorio, enlistados a continuación. Parte de la metodología acá presentada proviene del Informe de Técnicas Analíticas desarrollado dentro del Proyecto CAB (Guerrero-Higuera et al., 2023)

**Figura 2-2.** Actividades de campo realizadas en la sección Quebrada Aguacaliente. En este caso, se observa el bastoneo y recolección de muestras, observando en el recuadro icnofósiles que indican condiciones del ambiente de depósito y polaridad invertida de las capas descritas. Tomado de Molano-Mendoza et al. (2023).



### 2.3.1 Petrografía

El análisis petrográfico se enfoca en la descripción detallada, clasificación textural y mineralógica de las rocas mediante la observación microscópica de secciones delgadas o láminas. La obtención adecuada de muestras en el campo es fundamental para una interpretación precisa, ya que las observaciones microscópicas están dadas en función al contexto geológico de cada muestra, siendo complementaria a la descripción del ambiente de formación (en el caso de rocas sedimentarias, el ambiente de depósito estudiado durante un levantamiento estratigráfico).

En petrografía sedimentaria, la textural es fundamental para determinar los procesos deposicionales y diagenéticos; examinando la disposición, tamaño y forma de los granos minerales, proporción de cemento y matriz, armazón; todo ello para determinar cualidades en las rocas que permitan caracterizar un reservorio, tales como porosidad, permeabilidad, empaquetamiento, entre otras.

Para poder hacer petrografía, se requiere el uso de un microscopio petrográfico, el cual está compuesto por dispositivos ópticos diseñados para aumentar el tamaño de la imagen. Sus componentes esenciales incluyen la fuente de luz, polarizador, condensador, platina, objetivos, ocular, analizador, lente de Bertrand, ranura accesoria (**Figura 2-3**). Este análisis se desarrolla tanto para minerales traslúcidos como opacos presentes en las secciones delgadas pulidas.

**Figura 2-3.** Componentes de microscopio óptico Zeiss Primotech. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023)



Las rocas fueron preparadas siguiendo los parámetros de Kulkarni (2018). Primero se impregnaron con resina, buscando rellenar totalmente las cavidades y darle cohesión, usando una mezcla que contenía pigmento azul, resina epóxica y otros aditivos, con el fin de facilitar el reconocimiento de la porosidad. Una vez impregnada y endurecida la muestra, se corta hasta obtener un testigo de la sección delgada pulida (SDP), el cual es desbastado y pulido hasta lograr una lámina de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de espesor, con la superficie brillante. Para el *Proyecto CAB* y la tesis de Maestría, se elaboraron 19 SDP procedentes de las 30 muestras de mano recolectadas en campo y referenciadas en el **Anexo C**; siendo elaboradas por la empresa MINERLAB Ltda.<sup>®</sup>. Las SDP elaboradas, junto a sus respectivos testigos, se observan en la **Figura 2-4**.

**Figura 2-4.** Secciones delgadas pulidas (SDP) y testigos de roca impregnados con resina epóxica azul, procedentes de la Quebrada Aguacaliente.



De las 19 SDP, se realizó petrografía en 14 (las correspondientes al Grupo Guadalupe, concretamente de las Formaciones Arenitas de San Antonio, Lodolitas de Aguacaliente y Arenitas de San Luis de Gaceno), usando microscopios Zeiss Primotech (**Figura 2-3**), Olympus CX-31 y Olympus AX-31 (**Figura**

2-5); todos ellos del laboratorio MicroFluid Spectral de la Universidad Nacional de Colombia. Se hizo análisis de luz transmitida y luz reflejada. La clasificación textural y composición se hizo siguiendo las nomenclaturas para rocas terrígenas (Folk et al., 1970; Folk, 1974, 1980), calcáreas (Dunham, 1962; Folk, 1962) y mixtas (Mount, 1985); usando la clasificación granulométrica de Wentworth (1922) para hacer el conteo textural. Se realizó conteo de 300 puntos, toma de fotografías, descripciones y se clasificaron cada una de las 14 SDP (tal como se observa en el **Anexo D**), complementando las interpretaciones diagenéticas con observaciones relevantes acerca de su potencial como reservorio, así como información referente a proveniencia de los sedimentos y cambios en el ambiente deposicional (como se profundiza en el capítulo **4.2 Ambiente de formación**). Así mismo, se consideraron los análisis petrográficos de 7 secciones delgadas, colectadas por Sarmiento-Pérez en excursión de campo en 2023, trabajadas por el estudiante de pregrado Juan David Vélez en su trabajo de grado, el cual profundiza en la definición de petrofacies considerando además características petrofísicas.

**Figura 2-5.** Microscopio de luz transmitida y reflejada para análisis petrográfico. Microscopio Olympus AX-31. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023)



Como complemento, se obtuvieron imágenes escaneadas en 10x de cada una de las SDP trabajadas, con la ayuda de un escáner MetaSystems®, acoplado a un microscopio petrográfico Olympus AX-31. Además de proveer imágenes en luz transmitida y reflejada, se obtuvieron imágenes con epifluorescencia, aprovechando que la intensidad de la fluorescencia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbente (Loera Arroyo, 2016). Por lo tanto, es posible con esta herramienta determinar cuantitativa y cualitativamente el contenido hidrocarburos presente en las rocas, ya que la fluorescencia es un fenómeno que ocurre en los fluoróforos de moléculas orgánicas

aromáticas (Lakowicz, 2006). No obstante, en ninguna de las muestras fue identificada la presencia de hidrocarburos, por lo que su uso fue más complementario a la petrografía.

### 2.3.2 Difracción de rayos X

La difracción es un fenómeno natural que se presenta cuando una onda electromagnética (como los rayos x) interactúa con un cuerpo que presenta una distancia de separación entre planos que se replica regularmente a lo largo de toda su estructura atómica (Moore & Reynolds Jr, 1989). Mediante la ley física de Bragg se establece la relación entre la longitud de onda, el ángulo de incidencia del haz de rayos X y las distancias interplanares de la estructura cristalina que está siendo irradiada (Waseda et al., 2011; **Figura 2-6**). Esta técnica experimental permite la identificación y semicuantificación de las fases minerales que pueden coexistir en una muestra de roca. Este método considera la estructura definida que presentan los minerales y que se replica a lo largo de un plano infinito, con una secuencia de planos de la misma estructura separados por distancias específicas denominadas distancias interplanares.

Al hacer DRX, una muestra es colocada en el centro del instrumento denominado difractómetro de Rayos X, en donde es irradiada por un haz de rayos X. La fuente de los rayos X y el detector se mueven simultáneamente desde un ángulo inicial hasta un ángulo final, los cuales se establecen con antelación (**Figura 2-6**). Estos rayos difractados son registrados como una señal, que representa la intensidad en función de la distancia interplanar y graficados en un difractograma, donde los picos que se observan reflejan la presencia de una estructura atómica, determinando las fases minerales y estimando semi cuantitativamente el porcentaje en peso de cada fase mineral (Waseda et al., 2011).

En la tesis de Maestría, se siguió la metodología propuesta por Thorez (1975) con algunas recomendaciones de Bonilla-Osorio et al. (2011). El procedimiento consiste en realizar cuatro medidas por cada muestra, las cuales se emplean de manera conjunta para la identificación y estimación de la cantidad de cada fase mineral presente. Para ello, se prepararon 30 muestras (principalmente lodolitas, con algunas arenitas con laminación flaser y ondulosa, así como la roca calcárea correspondiente a la muestra ANB-4080; con la metodología descrita a continuación) seleccionadas a partir de las 67 muestras de litogeoquímica referenciadas en el **Anexo C**. 11 de las muestras corresponden a la Formación Chipaque, por lo que solo se consideraran las 19 muestras del Grupo Guadalupe en el desarrollo de esta tesis.

**Figura 2-6.** Difracción de Rayos X. a) Esquema del funcionamiento de un equipo de difracción de rayos; b) Relación entre el ángulo de incidencia y la distancia interplanar es posible generar un difractograma. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023)



Para el análisis de DRX se utilizó el equipo Bruker D2 Phaser con lámpara de cobre y lámina de níquel. El programa donde se llevó a cabo la interpretación de los difractogramas fue el Diffrac.EVA V4.2.1 de Bruker Co. (**Figura 2-7**). Los análisis fueron hechos en el Laboratorio 106A “Caracterización Litogeoquímica” del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, bajo el apoyo y acompañamiento del profesional del Proyecto CAB Carlos Rodríguez.

**Figura 2-7.** Equipo de difracción D2 Phaser marca Bruker Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023)



La primera medida se denomina montaje en polvo desorientado (**Figura 2-8**), donde la muestra se pulverizó en un mortero o un molino planetario, buscando obtener un tamaño menor a  $60\ \mu\text{m}$  sin ninguna orientación preferencial. Las siguientes tres medidas se realizaron en un montaje sobre vidrio termorresistente, donde los minerales se orientan. Para ello se deposita en un recipiente de vidrio parte de la muestra pulverizada junto con agua desionizada. Por medio de sedimentación controlada fue posible separar la fracción fina de tamaños menores a  $2\ \mu\text{m}$  de las partículas más gruesas. De la fracción fina suspendida en agua, se procedió a tomar una alícuota de  $1000\ \mu\text{L}$  con una pipeta y después verterla sobre el vidrio.

A esta muestra orientada se le realizó una medida después de secar de manera natural al aire. Como paso siguiente, se solvata la muestra con etilenglicol por medio de una campana de vacío para nuevamente realizar una medida. Lo anterior se hace con el fin de expandir aquellos minerales con propiedades expansivas. Finalmente se realiza una medida después de calcinar la muestra a  $515\ ^\circ\text{C}$  en una mufla, esto debido a que hay algunos minerales de arcilla de interés que en esta temperatura suelen colapsar sus estructuras cristalinas, característica importante para identificarlos.

**Figura 2-8.** Etapas del montaje para análisis de DRX siguiendo la metodología de Thorez (1975). **a)** Montaje de muestras en polvo. **b)** Muestras en polvo listas para análisis. **c)** Sedimentación controlada de fracción arcilla en solución acuosa. **d)** Fracción arcilla decantada (sedimentada) de solución acuosa. **e)** Muestras orientadas durante proceso de solvatación con etilenglicol. **f)** Calcinación de muestras.



La difracción de rayos X permite caracterizar los minerales de arcilla, muchos de los cuales son indicadores de determinados procesos diagenéticos (Worden & Burley, 2003). Debido a que estos minerales se forman en determinados intervalos de temperatura, hay una relación entre la temperatura que alcanzó la roca y la presencia de estos minerales de arcilla (**Figura 2-9**).

Los minerales de arcilla son filosilicatos que se apilan en laminas producto de una exfoliación basal perfecta. La razón por la cual se estudia este grupo de minerales junto a la petrografía yace en que son uno de los principales constituyentes en las rocas sedimentarias, siendo cerca del 60 % del material que se deposita en una cuenca (Blatt et al., 1980). Las arcillas en las rocas sedimentarias tienen dos orígenes: Detrítico, debido al aporte que representa la erosión; y neoformadas, ya sea por meteorización de las rocas en superficie o durante la diagénesis (Meunier, 2005). En las arenitas, la presencia de determinados minerales de arcilla como caolinita, esmectita, illita y clorita (**Figura 2-10**) está supeditada por variables como la composición del material detrítico, la meteorización *in situ*, el clima y la composición del agua intersticial; sumado a los procesos fisicoquímicos restringidos a la mesogénesis y telogénesis (Worden & Burley, 2003).

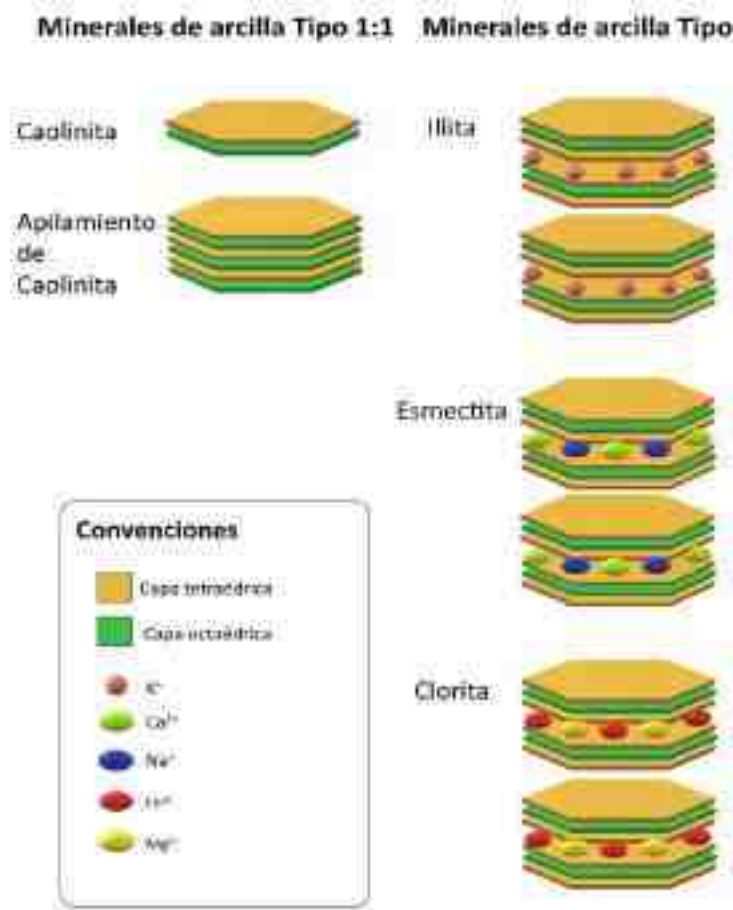
**Figura 2-9.** Relación entre minerales de arcilla y ciertos procesos diagenéticos con la temperatura. Tomado de Worden & Burley (2003) y Chima et al. (2018).



El método de DRX también permite conocer el índice de cristalinidad, definido como el grado de ordenamiento de las moléculas que configuran la estructura cristalina de un mineral, siendo estudiados habitualmente el de la illita y la caolinita (Brime, 1999; Zadvernyuk et al., 2021). Este método empírico requiere medir el ancho en la mitad de la altura del pico (también conocido por las siglas FWHM por

*Full Width at Half Maximum*) en el plano 001 (Amigo et al., 1994; Warr & Rice, 1994). La caolinita al ser estructuralmente estable a los procesos diagenéticos permite ser usada para determinar las posibles fuentes de aporte del sedimento o el medio sedimentario en el que fueron depositadas (Bonilla-Osorio et al., 2011). La determinación del índice de cristalinidad de la caolinita se llevó a cabo en el software Fityk 1.3.1, seleccionándose la función Pseudo-Voigt, pues esta reúne parámetros Gaussianos y Lorentzianos (Di Roccoa & Cruzado, 2012), los cuales son ideales para generar las funciones de campana que equiparen los picos del difractograma.

**Figura 2-10.** Disposición laminar en los principales minerales arcillosos presentes en rocas sedimentarias. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023)



### 2.3.3 Fluorescencia de rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) consiste en irradiar con rayos X (rayos X primarios) una muestra, ocasionando que los electrones de los orbitales internos de cada átomo sean excitados y

posteriormente liberados (**Figura 2-11**). El espacio generado deja al átomo inestable, lo que hace que un electrón de los orbitales exteriores ocupe la vacancia para estabilizarlo. Cuando dicho electrón realiza la transición de un orbital a otro genera unos rayos X secundarios, los cuales poseen una intensidad única por cada elemento, que permite diferenciarlos y determinar su cantidad en la muestra (Craigie, 2018). Esta técnica permite determinar qué elementos se encuentran presentes en la muestra, lo que brinda la posibilidad de cuantificarlos en términos de porcentaje y partes por millón (ppm) (Craigie et al., 2016).

En el presente proyecto, se tomaron aproximadamente 5g de cada una de las 20 muestras pulverizadas en fracción arcilla (proveniente de la preparación de DRX, principalmente lodolitas y algunas arenitas con laminación flaser y ondulosa, además de la muestra calcárea) y se envasaron en copas de polietileno que previamente se habrán ensamblado con una película delgada de Mylar de corte circular con 63,5 mm de diámetro que fungirá como base de la copa para realizar el análisis directamente (**Figura 2-12**; Beckhoff et al., 2006). Una vez montadas cada una de las copas con muestra pulverizada, se ingresan en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X. El Laboratorio de Caracterización Litogeoquímica 106A (lugar donde se realizó el método de FRX simultáneamente a DRX) cuenta con un espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de energía dispersa Malvern PANalytical modelo Epsilon 4 (**Figura 2-13**). El tubo de Rayos X es de plata, y cuenta con una ventana de berilio.

**Figura 2-11.** Fluorescencia de rayos X. a) Esquema del funcionamiento de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X; b) Fenómeno de la fluorescencia de rayos X en un átomo. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023)

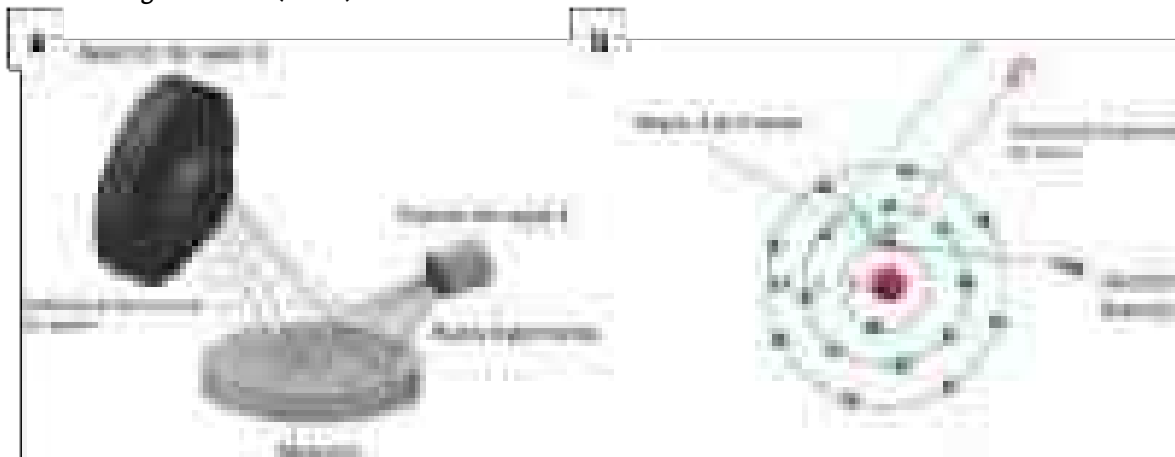


**Figura 2-12.** Montaje empleado para FRX. a) Ensamblaje de copa de polipropileno (blanca) junto a película delgada de Mylar (tira blanca cuadrada); b) Montaje de muestra en copa de polipropileno con Mylar. c) Montaje de muestra en espectrómetro de FRX Malvern PANalytical modelo Epsilon 4.

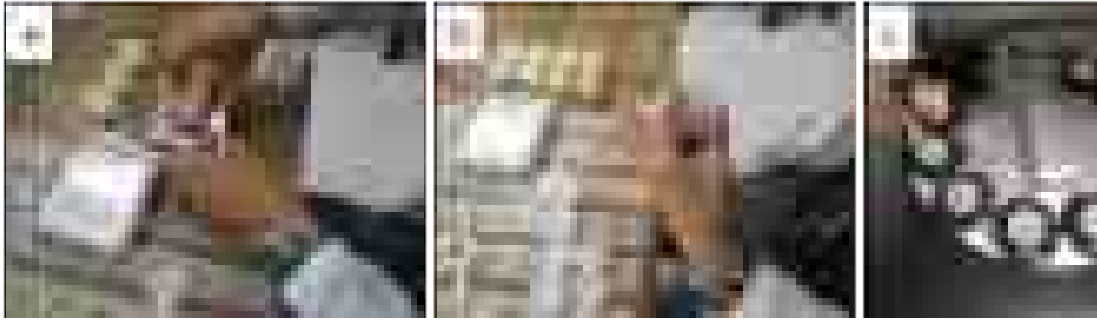
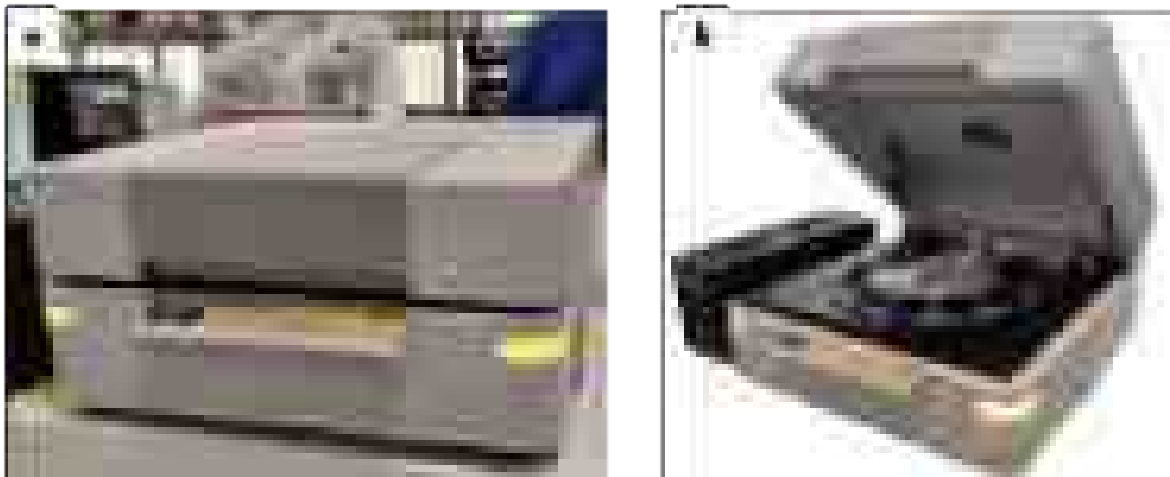


**Figura 2-13.** Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de energía dispersa Malvern PANalytical modelo Epsilon 4scascasc. Tomado de Guerrero-Higuera et al. (2023)



La geoquímica fue adquirida con el fin de reconocer la distribución elemental en la secuencia sedimentaria descrita, de tal manera que se pudiesen identificar elementos sensibles a la variación de las condiciones del ambiente de depósito o proxis geoquímicos, así como su distribución en función a las fases minerales descritas petrográficamente, y mediante difracción de rayos X. Se hizo énfasis en elementos tales como Si, Al, Ca, Fe, P, K, Mg Ti y Mn (cuantificados a modo de óxidos), que están asociados con minerales carbonatados, arcillosos, fosfáticos y siliciclásticos. Estos datos se integraron con las columnas estratigráficas para inferir posibles cambios en la química del ambiente deposicional, proporcionando una imagen más detallada de las condiciones paleoambientales y sus fluctuaciones a lo largo de la secuencia sedimentaria



### 3. Datos obtenidos y análisis utilizados

Una vez finalizada la etapa de campo y laboratorio, se procedió a integrar la información de cada una de las técnicas empleadas, compilándola dentro la descripción detallada de la sección Quebrada Aguacaliente. Una columna estratigráfica descrita a escala 1:200 y graficada a escala 1:500 se presenta en el **Anexo A**. En ella, se muestra una sección de 539 metros de espesor, abarcando desde el tope de la Formación Chipaque, la totalidad del Grupo Guadalupe, y la base de la Formación Guaduas. A partir de la granulometría, textura y composición vista afloramiento y muestras recolectadas, así como la morfología de capas, estructuras sedimentarias y patrón de apilamiento reconocidos en campo (**Anexo B**), fueron descritos trece (13) segmentos de base a tope. De igual manera, fue tomada una descripción del trabajo de Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996), para el Segmento C, debido a intervalos cubiertos, y que eran necesarios considerar para tener un análisis completo.

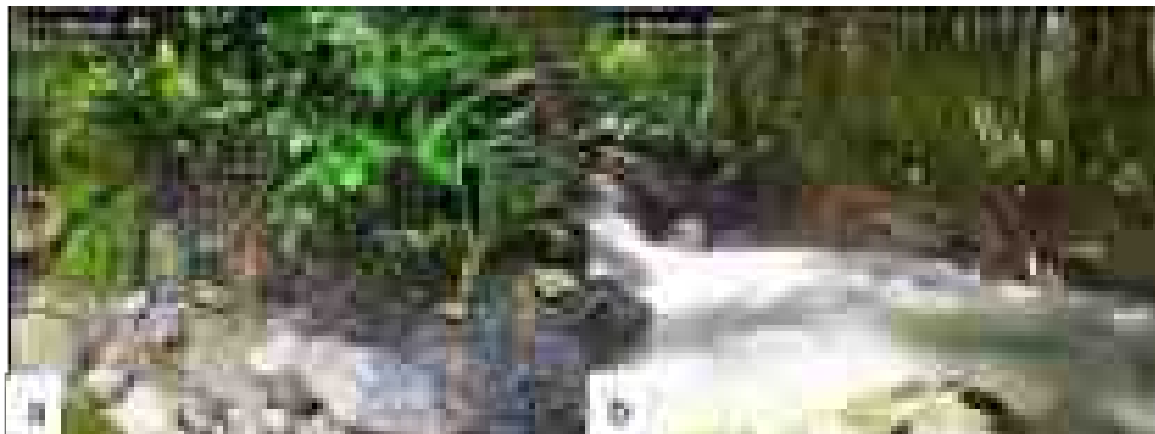
#### 3.1 Estratigrafía de la sección “Quebrada Aguacaliente”

Los segmentos descritos se presentan a continuación, subdividiéndolos en formaciones tal como fueron descritos en campo. El reconocimiento de las formaciones fue posible gracias al conjunto de facies que fueron definidas y se presentan en los capítulos **3.3 Facies sedimentarias (estratigrafía y petrofacies)** y **4.1 Asociación y modelo de facies**), así como comparando espesores con otros trabajos.

- El segmento A corresponde al tope de la Formación Chipaque, teniendo un espesor de 8,60 m.
- Los segmentos B, C, D y E corresponden a la Formación Arenitas de San Antonio (parte inferior del Grupo Guadalupe), teniendo un espesor de 202,00 m.
- Los segmentos F, G, H, I y J corresponden a la Formación Lodolitas de Aguacaliente (parte media del Grupo Guadalupe), teniendo un espesor de 165,10 m.
- Los segmentos K y L corresponden a la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno (parte superior del Grupo Guadalupe), teniendo un espesor de 149,00 m.

- El Segmento M corresponde a la base de la Formación Guaduas, abarcando un espesor descrito 14,30 m.
- **Segmento A:** Abarca desde el metro 0,00 y finaliza en el metro 8,60 (**Anexo A**), correspondiendo a lodolitas negras y grises con laminación lenticular, formando un conjunto de capas no mayores a 10 cm de espesor, subtabulares a tabulares, discontinuas y parcialmente cubiertas. El color negro de las lodolitas se debe al material arcilloso y a la presencia de material carbonoso. También se observa pirita diseminada y partículas fosfáticas, las cuales al alterarse le confieren un color rojizo a la roca (**Figura 3-1a**). A lo largo del segmento se presentan lentes milimétricos de arenita de grano muy fino. Dentro de dichas lodolitas se encuentran concreciones síliceas y fosfáticas.

**Figura 3-1.** Afloramientos del Segmento A y B. **a)** Lodolitas negras con patinas rojizas, subtabulares discontinuas. **b)** Inicio de las arenitas basales del Segmento B, estando el contacto a la izquierda del bastón cero (0). Las líneas rojas punteadas y los números representan el bastón de referencia de los intervalos descritos ascendiendo estratigráficamente por la sección de la Quebrada Aguacaliente (corresponde al Segmento A al final del tramo Aguacaliente 3, mientras que el Segmento B corresponde al inicio del tramo Aguacaliente 4, tal como lo muestra el **Anexo B**). La flecha naranja indica la polaridad.



Estas lodolitas representan el tope de una sucesión de 288,7 m de lodolitas con laminación lenticular de arenitas de grano muy fino a medio, en conjuntos de capas granocrecientes de hasta 5m de espesor, intercaladas con esporádicas capas de rocas calcáreas (mudstone y wackestone); que en conjunto (y como se describirá a continuación), corresponden a la Formación Chipaque en el sentido de Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996). El paquete de lodolitas descrito corresponde al tope de la Formación Chipaque y claramente se diferencia de la base del Grupo Guadalupe

litológica y morfológicamente y es a partir de las cuales se hace el análisis de la información que hace parte de la presente investigación.

Hacia el tope del Segmento A, las lodolitas están en contacto neto erosivo con arenitas de grano muy fino a fino, granocrecientes, las cuales se describen en el Segmento B. No obstante, el contacto se encuentra parcialmente cubierto, pero se reconoce por el notable cambio en la morfología (**Figura 3-1b**).

### 3.1.1 Estratigrafía del Guadalupe Inferior o Formación Arenitas de San Antonio

Los segmentos B, C, D y E descritos a continuación corresponden a la Formación Arenitas de San Antonio (parte inferior del Grupo Guadalupe), teniendo un espesor de 202,00 m. Se diferencia de la infrayacente Formación Chipaque debido a su alta competencia y a que sobresale morfológicamente en el lecho de la Quebrada Aguacaliente, debido al predominio de arenitas que caracteriza a esta unidad y la diferencia de la Formación Lodolitas de Aguacaliente directamente suprayacente.

- **Segmento B:** Inicia en el metro 8,60 y termina en el metro 83,3 del **Anexo A**, constando de 74,70 m de arenitas granocrecientes de grano muy fino a medio, , intercaladas con capas de hasta 1 m de espesor de arenitas medias y capas de lodolitas negras de hasta 2,7 m de espesor. De base a tope, se reconocen 11,35 m de cuarzoarenitas granocrecientes de muy finas a finas, con laminación flaser inclinada y simple (Reineck & Singh, 1980) con bioturbación moderada (**Figura 3-2**). Sobre estas, a partir de un contacto neto, se tienen 4,1 m de lodolitas negras en capas menores a 10 cm, subtabulares discontinuas y con escasos lentes de arenita. Le suprayacen en contacto erosivo, 3 conjuntos de capas de cuarzoarenitas granocrecientes. Dichos conjuntos de capas tienen 20,10 m de espesor y constan de cuarzoarenitas (en ocasiones, limolitas cuarzosas) que comienzan con capas tabulares de hasta 70 cm de arenita de grano fino (**Figura 3-3**), aumentando su espesor y granulometría hasta llegar a grano medio y grueso. Las arenitas presentan laminación flaser (simple y con contactos ondulados, según Reineck & Singh (1980)). El color se torna más ocre amarillento a medida que aumenta su granulometría.

Encima del conjunto de capas granocrecientes le siguen 16,75 m de lodolitas y limolitas negras, intercaladas con capas tabulares de hasta 60 cm de arenita de grano fino, las cuales van paulatinamente aumentando su frecuencia, granulometría y espesor de las capas; formando conjuntos granocrecientes de arenitas de grano medio de 2,3 m de espesor. La laminación de las

arenitas es variable de flaser simple a masiva, cuando aumenta el grado de bioturbación y la granulometría.

**Figura 3-2.** Afloramiento y muestra del Segmento B. La laminación que presentan las rocas es flaser inclinada, teniendo un color blanco amarillento a medida que aumenta en su granulometría la arena. Las líneas punteadas rojas representan el bastón de referencia del tramo descrito (Aguacaliente 4); la flecha naranja indica la polaridad.



Finalmente, ascendiendo estratigráficamente en el tope del segmento, formando 2 conjuntos de capas granocrecientes que varían de limolita cuarzosa de grano grueso hasta cuarzoarenita muy fina a fina, con un espesor de 22,10 m llegando al metro 83,3m de la secuencia. En este último sector, llama la atención que hacia la base (en el bastón 34 del tramo Aguacaliente 4, **Figura 3-4**), las arenitas de grano muy fino son deleznales y tienen una coloración verde azulosa, debido a la presencia de glauconita y moderado empaquetamiento de la roca, tal como se observa en la descripción petrográfica de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4044 procedente de estas capas.

Hacia el tope del Segmento B y entre la base del que posteriormente se denominaría Segmento D en este trabajo, se observó un cubierto de 22 m de espesor, el cual por correlación estratigráfica con la sección levantada por Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996), corresponde al tope del Segmento A descrito por estos autores, teniendo así un espesor de 19,25 m (en este trabajo), y que es descrito de la siguiente manera:

Arenitas de cuarzo de color crema o amarillo grisáceo, de grano fino y muy fino, por sectores glauconítica, en capas muy gruesas y conjuntos de capas de hasta 13 m de espesor. Estos conjuntos están generalmente compuestos por capas delgadas a medias con esporádicas intercalaciones de lodolita de menor espesor o se presentan homogeneizados por intensa bioturbación constituyendo capas muy gruesas (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996, pp.21).

**Figura 3-3.** Afloramiento del Segmento B. Desde el bastón 21 al bastón 24 se observa un conjunto de capas granocrecientes. Hacia la base la estratificación plana paralela y estratificación masiva en las capas del tope (altamente bioturbadas). Sobre el bastón 24 hacia arriba, el cambio de color a gris oscuro es debido al contacto neto con lodolitas. La flecha naranja indica la polaridad.



- **Segmento C:** Abarcando desde los metros 83,30 hasta 109,00 del **Anexo A**; corresponde al tope del Segmento A y la totalidad del Segmento B descritos en el trabajo de Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996), descrito para la Arenitas de San Antonio de estos autores, los cuales la describen como:

21,4 m de lodolita negra en capas muy gruesas y conjuntos de capas de hasta 7,5 m de espesor con algunas intercalaciones de láminas delgadas de limolita blanca o capas delgadas de arenita fina y muy fina de cuarzo. En menor proporción, se encuentran en el segmento capas medias a gruesas y conjuntos de capas de 1,2-2,6 m de espesor, de arenita de cuarzo de grano muy fino a medio. Estas últimas tienen a su vez intercalaciones de lodolita negra en láminas y capas delgadas (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996, pp.21).

La estratificación interna es usualmente plana paralela continua a discontinua, pero en los sectores arenosos las ondulitas están presentes. Los fragmentos y pellets fosfáticos son comunes a abundantes en todo el segmento, apreciándose también intraclastos de hasta

1 mm de diámetro de lodolita y arenita. Hacia el tope del segmento, en la parte superior de un conjunto arcilloso de 7,5 m de espesor se observan icnofósiles en tubos horizontales de 1 cm de diámetro (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996, pp.21).

Durante el trabajo de campo se identificaron los 4,30 m superiores del Segmento C. después del intervalo cubierto de espesor medido y que por correlación estratigráfica corresponde al tope del Segmento A y la totalidad del Segmento B definido por Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) para la Formación Arenitas de San Antonio. Corresponde a arenitas de grano fino, en capas subtabulares de hasta 70 cm de espesor, con alto grado de bioturbación y algunas pestañas de lodo remanentes de la laminación flaser original. En dichas capas se son comunes los fragmentos fosfáticos y madrigueras tabulares horizontales (*Planolites isp. (?)*, *Thalassinoides isp. (?)*).

De esta manera, el Segmento C descrito en este trabajo tiene un espesor total de 25,70 m.

**Figura 3-4.** Lodolitas y arenitas del Segmento B. Hacia la base (entre los metros 55,0-56,5; bastones 31 y 32) el color negro corresponde a lodolitas negras intercaladas con capas de limolitas y arenitas de grano fino; estas últimas predominando desde los bastones 33 y 34 (metros 58,0 a 59,5). En el recuadro hay un detalle de la muestra de mano ANB-4044 recolectada en el bastón 34, la cual debe su color verde azulado a la presencia de glauconita. Flecha naranja indica la polaridad.



- **Segmento D:** Se trata de una sucesión de 57,4 m de espesor, que abarca desde los metros 109,00 a 166,40 de la Sección Quebrada Aguacaliente visto en el **Anexo A**. Consiste en arenitas de grano fino a grueso, en capas gruesas granocrecientes, con laminación flaser simple hacia la base, tornándose masiva a medida que aumenta la granulometría y la bioturbación. Hacia la base, las capas son subtabulares y cambian a cuneiformes a medida que se asciende estratigráficamente dentro del segmento. Composicionalmente contienen cuarzo y fragmentos fosfáticos en altísima

proporción (ver adelante la sección delgada pulida 229IIC-JDV-ANB-4052 proveniente de estas capas).

Algo que llama la atención, y facilita la visualización del carácter granocreciente de las capas, es que se observan oquedades sobre superficies competentes en el lecho de la quebrada (**Figura 3-5**), lo que sugiere que el material se vuelve más friable y espeso a medida que se deposita, es decir que posee alta madurez textural al estar constituido por un armazón clastosoportado.

**Figura 3-5.** Arenitas del Segmento D. Se observan oquedades (señalada con la flecha verde, cerca al bastón 56) en el lecho de la quebrada, lo que sugiere erosión de un material friable, con buena madurez textural, en rocas con granulometría más gruesa, mostrada por superficies con morfología marcada y colores naranja-amarillento. Flecha naranja indica la polaridad.



- **Segmento E:** Descrito desde el metro 166,40 hasta 210,60 en el **Anexo A**, teniendo 44,20 m de espesor, y conformado por un conjunto de capas gruesas y muy gruesas de arenitas de grano medio, granocrecientes a conglomerados, con estratificación masiva debido a la ausencia de estructuras sedimentarias (a excepción de imbricación en los clastos). Al igual que el tope del Segmento D, los conjuntos de capas aumentan de espesor y se tornan más friables debido a una alta madurez textural tal como se observa en las secciones delgadas 4064, 4060 y 4068, ya que aparecen oquedades similares a las vistas en la **Figura 3-5**, aunque con un tamaño y frecuencia mayor (**Figura 3-6**). Contienen abundantes fragmentos fosfáticos (**Figura 3-7**), aunque en general las rocas tienen una composición predominantemente siliciclástica (mucho cuarzo), y el armazón es clastosoportado (con poca matriz). Se diferencia del Segmento D en su granulometría y estructuras sedimentarias, ya que en el segmento infrayacente se desarrolla laminación flaser simple e

inclinada, así como imbricación; mientras que en el Segmento E suprayacente no se observan estructuras sedimentarias físicas, además de que las rocas tienen granulometría más gruesa.

**Figura 3-6.** Arenitas del Segmento E. Se observan oquedades de gran tamaño (cerca a los bastones 75 y 78), acompañadas de surcos en el lecho de la quebrada, mostrando así erosión de un material disgregable. Flecha naranja indica la polaridad.



### 3.1.2 Estratigrafía del Guadalupe Medio o Formación Lodolitas de Aguacaliente

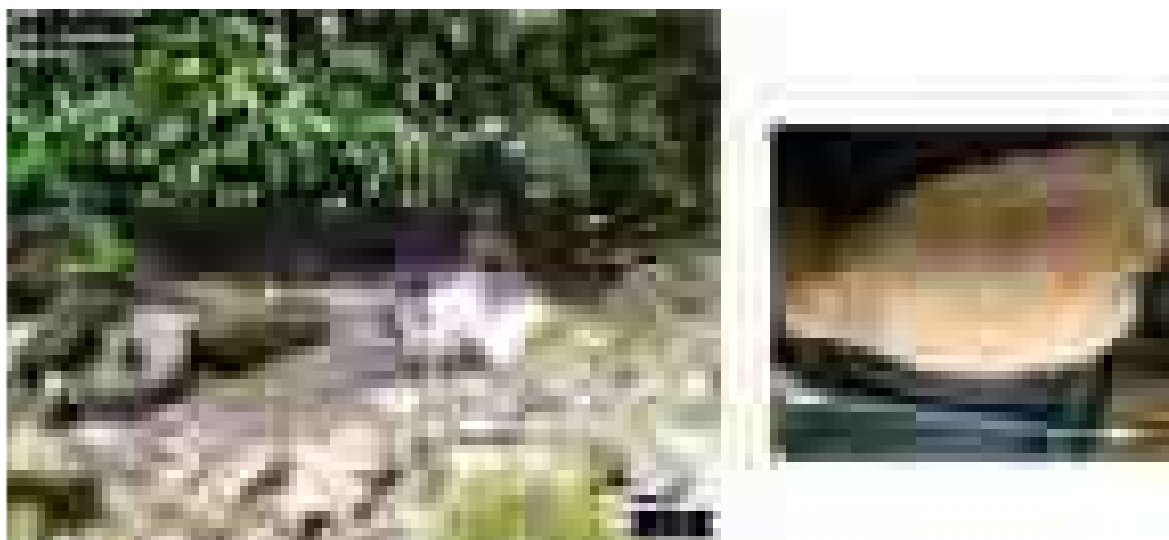
Ascendiendo estratigráficamente, hay un cambio en la morfología de la Quebrada Aguacaliente, pasando a rocas con menor competencia (principalmente lodolitas), que comienzan a predominar en los intervalos F al J (en comparación a los intervalos B, C, D y E más arenosos, anteriormente descritos). Por tal motivo, se trata de las Lodolitas de Aguacaliente, definidas por Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996), describiéndose en este trabajo una unidad de 165,10 m de espesor.

- **Segmento F:** Consiste en 49,55 m de lodolitas negras parcialmente cubiertas (entre los metros 210,60 hasta 260,15 en el **Anexo A**), con laminación lenticular desconectada con lentes delgados de arenita muy fina (Reineck & Singh, 1980); aunque muy escasos. Internamente tienen laminación plano-paralela, formando capas subtabulares a tabulares, aunque bastante discontinuas, conteniendo además concreciones silíceas. A lo largo del segmento, se intercalan con capas

puntuales de arenita de grano fino, tabulares a subtabulares continuas, las cuales en ocasiones forman conjuntos de hasta 3,8 m de espesor, con laminación flaser con contactos ondulados, limitadas por contactos erosivos, las cuales composicionalmente corresponden a cuarzoarenitas, aunque también se encuentran fragmentos fosfáticos recurrentemente, especialmente en las capas de arenitas de mayor espesor.

El almacén de las arenitas es clastosoportado y en general se encuentran poco bioturbadas. Hacia el tope, las intercalaciones de arenitas son más frecuentes y forman conjuntos de capas con laminación ondulosa y con mayor grado de bioturbación y granocrecientes.

**Figura 3-7.** Afloramiento y muestra de mano del Segmento E. Se observan alta competencia en las capas gruesas de arenita (razón por la cual forman paredes). La muestra de mano contiene abundantes fragmentos fosfáticos (color naranja). Flecha naranja indica la polaridad.



- **Segmento G:** Descrito entre los metros 260,15 y 287,30 (**Anexo A**), consta de 27,15 m de lodolitas y arenitas de grano muy fino a fino al igual que el Segmento F, con la salvedad de que las arenitas se presentan en 3 conjuntos de capas subtabulares continuas de hasta 50 cm de espesor. las lodolitas yacen en la base de los conjuntos de capas de arenita en contactos netos y tienen laminación lenticular, que varía desde conectada hasta desconectada con lentes gruesos (Reineck & Singh, 1980). las lodolitas son suprayacidas progresivamente por conjuntos de capas de arenita cada vez con menos láminas de lodo y composicionalmente tienen predominio de cuarzo, aunque también presentan restos de peces y otros fragmentos fosfáticos. Algunas llegan a ser de composición mixta o arenitas aloquímicas, en el sentido de Mount (1985) . Presentan laminación que varía desde ondulosa hasta flaser con contactos ondulados y simple (Reineck & Singh, 1980);

además a medida que va decreciendo el contenido de lodo va aumentando el grado de bioturbación (**Figura 3-8**).

**Figura 3-8.** Cambios en la granulometría y espesor de las capas, lo cual se relaciona con variaciones en la estratificación y laminación de lodolitas y las arenitas del Segmento G. La laminación pasa de ser lenticular en el bastón 4 (de color negro y son más finas), a ondulosa en la base del bastón 5 (donde aumenta el espesor y su color es más grisáceo, homogéneo). Por encima en el bastón 6, el espesor es mayor que en el 5 y tiene un color gris más claro, debido a la laminación flaser con bordes ondulados, pasando a ser de tipo flaser simple por debajo del bastón 7 (colores grises y ocre, en laminas). Por debajo del bastón 6, las capas de arenita no muestran laminación y son masivas debido a la bioturbación. Flecha naranja indica la polaridad, mientras que la numeración de los bastones hace referencia al tramo Aguacaliente 5, descrito en el **Anexo B**.



- **Segmento H:** Consiste en 32,40 m (entre los metros 287,30 y 319,70 en el **Anexo A**) de arcillolitas negras y de lodolitas con laminación lenticular desconectada delgada (en el caso de las lodolitas) en capas tabulares, intercaladas con capas tabulares y subtabulares continuas de rocas calcáreas tipo biomicritas fosilíferas y dispersas (Folk, 1962), las cuales se caracterizan por su alta cementación, color gris mate, y tener espesores netos de hasta 70 cm. Los aloquímicos de las intercalaciones calcáreas, son fragmentos de conchas indiferenciados, restos de bivalvos y equinodermos, así como fragmentos óseos y fosfáticos indiferenciados (**Figura 3-9**). El armazón descrito contiene una matriz de lodo calcáreo recristalizada, según lo visto en la petrografía de la sección delgada pulida 229IIC-JDV-ANB-4080.

Algo que llama la atención en el Segmento H, es que las capas fosilíferas anteriormente descritas, están intercaladas y resaltan morfológicamente en comparación con las lodolitas y arcillolitas circundantes, restringiéndose a un determinado intervalo estratigráfico del Segmento H.

Adicionalmente las arcillolitas carecen completamente de la laminación lenticular y presentan solo una laminación incipiente notoria, siendo de color negro mate (Figura 3-10).

**Figura 3-9.** Lodolitas y arcillolitas del Segmento H. Intercaladas con estas rocas de grano muy fino, se encuentran intercalaciones de rocas calcáreas (morfológicamente asemejando escalones), las cuales se caracterizan por su altísima competencia, color gris mate, matriz-soportado y armazón con presencia de fragmentos fosfáticos embebidos. Flecha naranja indica la polaridad.



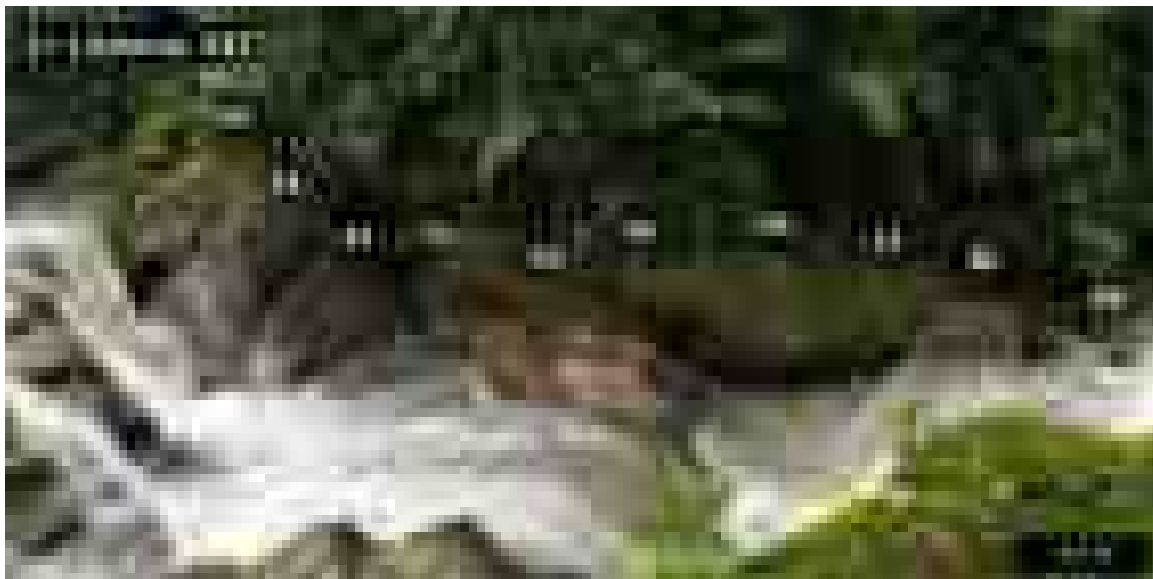
**Figura 3-10.** Lodolitas y arcillolitas del Segmento H. Entre los bastones 18 y 19, se observan arcillolitas de color negro mate, las cuales son mucho menos competentes que las rocas circundantes, localizándose relativamente cerca de las capas fosilíferas características de este intervalo (bastón 14). Flecha naranja indica la polaridad.



- **Segmento I:** Descrito entre los metros 319,70 al 335,35 del **Anexo A**, se trata de 15,65 m de limolitas de grano grueso, granocrecientes hasta arenitas de grano fino. Composicionalmente corresponden a cuarzoarenitas con fragmentos fosfáticos (al igual que los segmentos D y E). Las lodolitas progresivamente van ganando intercalaciones de lentes y láminas onduladas de arenitas hasta predominar la arenita con laminación flaser inclinada y simple hacia el tope (Reineck & Singh, 1980).

Algo que llama la atención de este segmento es que morfológicamente forman capas tabulares continuas, las cuales van aumentando su espesor a medida que aumenta la granulometría, pasando de capas de 5 cm (bien delimitadas por contactos plano-paralelos), hasta formar capas macizas de más de 2 m de espesor, en una sucesión continua que además, va mostrando que el material mejora su selección al desarrollar surcos y oquedades que sugieren erosión de materiales cada vez más friables (es decir, clastosoportados con menor contenido de matriz) (**Figura 3-11**).

**Figura 3-11.** Arenitas del Segmento I. Se observa el granocrecimiento y aumento del espesor a medida que se asciende estratigráfica, pasando de capas tabulares bien definidas de pocos centímetros de espesor (bastones 30 a 32), hasta formar capas más masivas de varios metros de espesor (bastones 37 a 39). Flecha naranja indica la polaridad.



- **Segmento J:** Contiene una sucesión de 40,35 m de espesor (descrita entre los metros 335,35 y 375,70 del **Anexo A**), la cual consta de lodolitas y arcillolitas negras con laminación lenticular delgada desconectada, apiladas en capas subtabulares continuas a discontinuas, muy finas

(menores a 5 cm de espesor), con presencia de fragmentos fosfáticos, concreciones fosfáticas, concreciones silíceas y lentes tabulares de arenita muy fina. Al igual que con los segmentos G y H, aparecen rocas calcáreas y de composición mixta intercaladas a modo de capas tabulares continuas (**Figura 3-12**). En la parte inferior y media del segmento llegan a tener espesores de hasta 70 cm, sin exceder granulométricamente el tamaño arenita fina.

**Figura 3-12.** Afloramiento del Segmento J. Se observan lodolitas negras fosfáticas en todo el afloramiento, las cuales están intercaladas con capas de arenitas fosfáticas y biomicritas. Flecha naranja indica la polaridad.



Las capas tabulares de la parte inferior del Segmento J son calcáreas (biomicritas dispersas a empaquetadas) y mixtas (arenitas aloquímicas), poseen un armazón clastosoportado con moderado a alto empaquetamiento (tal como se observa en la sección delgada pulida 229IIC-JDV-ANB-4093), aunque dicho empaquetamiento disminuye en algunos niveles, especialmente cuando se localiza cerca de contactos erosivos en capas más arenosas que se intercalan entre las lodolitas, debido al retrabajamiento del armazón de la roca (diferente a la bioturbación, ya que no borra la laminación y es oblicua a esta). Estas rocas calcáreas y mixtas se reconocen por su alta competencia, color naranja grisáceo y laminación/estratificación más gruesa que las lodolitas.

Hacia el tope del segmento, comienzan a aparecer cuarzoarenitas, clasto y matriz soportada (debido al contenido variable de matriz, en una roca con moderado empaquetamiento), en conjuntos de capas granocrecientes de hasta 3,35 m de espesor, subtabulares a cuneiformes, con laminación flaser simple, afectadas por la bioturbación que es mayor con el aumento en la

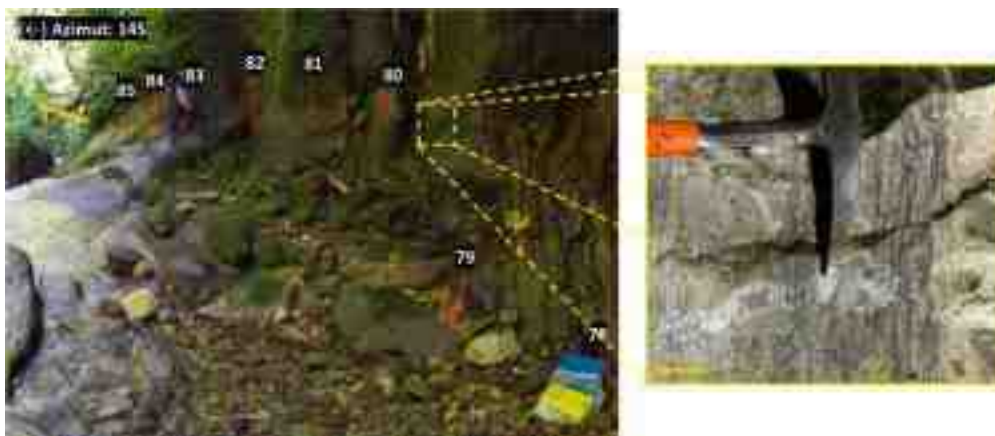
granulometría. Estos conjuntos de capas granocrecientes se tornan cada vez más cíclicos, hasta que el lodo desaparece por completo y aparecen los segmentos K y L, dominados por cuarzoarenitas.

### 3.1.3 Estratigrafía del Guadalupe Superior o Formación Arenitas de San Luis de Gaceno

Nuevamente hacia el tope, hay un cambio en la morfología de la Quebrada Aguacaliente, pasando a rocas con un mayor grado de competencia y que coincide con el trazo de varias cascadas, momento en el cual comienzan a predominar arenitas casi en la totalidad de los segmentos K y L, razón por la cual comienzan a describirse las Arenitas de San Luis de Gaceno, definidas por Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996), y teniendo en este trabajo un espesor de 149,00 m.

- **Segmento K:** Consta de 41,75 m de cuarzoarenitas (entre los metros 375,70 al 417,45 del **Anexo A**), en conjuntos de capas medias y gruesas de hasta 3,7 metros de espesor, granocrecientes, con granulometría que varía desde arena muy fina hasta muy gruesa, con laminación flaser simple a flaser con contactos ondulados en la base (**Figura 3-13**), aunque a medida que se asciende estratigráficamente las capas se van tornando más masivas, debido al incremento en la granulometría y bioturbación.

**Figura 3-13.** Afloramiento del Segmento K. Se observan arenitas con laminación flaser, las cuales hacia el tope se tornan más masivas y con mayor espesor. Flecha naranja indica la polaridad.



Las arenitas internamente se caracterizan por tener alta madurez textural y composicional, ya que corresponden a cuarzoarenitas, con baja proporción de matriz, alto empaquetamiento y ser friables (poco cementadas). Son de color amarillo ocre a blancas, teniendo además partículas fosfáticas y glauconita, que le da un color ligeramente azulado a las muestras de mano. Se reconocen también madrigueras (*Planolites isp. (?)*, *Thalassinoides isp. (?)*) en la base de las capas superiores, tanto en este segmento, como en el suprayacente.

Por encima del Segmento K hay un intervalo cubierto de 42,0 m de espesor (entre los metros 417,45 y 459,45 del **Anexo A**).

- **Segmento L:** Corresponde a un tramo de 65,25 m de espesor (entre los metros 459,45 al 524,70 del **Anexo A**), conformado por arenitas y conglomerados, ordenados en capas granodecrecientes que varían desde gránulo hasta arenita de grano muy fino. Las capas son cuneiformes y canaliformes, gruesas a muy gruesas (espesor variable de 1 a 5 metros), con imbricación de los clastos en la base y desarrollo de laminación inclinada incipiente, ya que el ordenamiento interno de la capa es masivo debido a la granulometría gruesa. No obstante, en la mitad del segmento se describe un conjunto de capas de 50 cm de espesor (**Figura 3-14**), entre las cuales se observan arenitas de grano muy fino con laminación flaser con contactos ondulados, así como lodolitas con laminación lenticular.

**Figura 3-14.** Afloramiento del Segmento L. Se observan espesas capas de arenitas, con granulometría gruesa, ya que en el bastón 106 se observan cavidades redondas producto de la erosión de materiales bien seleccionados. Desde el bastón 107 en adelante se observa el carácter granodecreciente de las capas de arenita. En la imagen en detalle de la izquierda, se observan los cambios de la laminación, pasando de arenitas muy bioturbadas en la base (pico del martillo), a lodolitas con laminación lenticular, hasta pasar a una capa de arenita con laminación flaser con contactos erosivos, parcialmente bioturbada, con intraclastos, y en contacto erosivo con las lodolitas. Flecha naranja indica la polaridad. La foto en detalle se encuentra en posición normal.



Composicionalmente están conformadas por cuarzoarenitas, con madurez textural variable (con mayor o menor contenido de matriz, mala selección y armazón variable entre clasto-matriz soportado). Así mismo, se preservan intraclastos dentro de las capas de arenita (**Figura 3-14**), al igual que madrigueras (**Figura 3-15**) en la base de las capas arenosas, correspondiendo a icnofósiles del icnogénero *Thalassinoides isp.*, según lo reportado por diversos autores (Gámez-Vintaned & Liñán, 1996; Seilacher, 2007) (**Figura 3-16**).

**Figura 3-15.** Afloramiento del Segmento L. Junto a las arenitas, se observa que encima del bastón 113 hay trazas fósiles, concretamente madrigueras. Flecha naranja indica la polaridad.



- **Segmento M:** Corresponde a un tramo de 14,30 m de espesor (entre los metros 524,70 al 539,00 del **Anexo A**), conformado por lodolitas grises con escasos lentes de arenita de grano muy fino a fino, en gran parte cubierta. En campo, se reconoce por formar zonas morfológicamente deprimidas. Los afloramientos actualmente se encuentran cubiertos por los depósitos del Río Lengupá y derrubios sobre la ladera pero resalta la morfología descrita que los diferencia de los fuertes escarpes del Segmento K. Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996), describieron afloramientos discontinuos de lodolitas y mantos de carbón “in situ” por un afluente al Caño la Paz y la Quebrada Guadualera, paralelos a la Quebrada Aguacaliente por lo que dichos autores concluyen que corresponden a la Formación Guaduas, presentando la siguiente descripción:

En el presente trabajo reconocemos como Formación Guaduas a una sucesión de 59 m de lodo litas grises y carbonosas oscuras con fragmentos carbonosos finamente diseminados, que suprayace en contacto neto concordante al Grupo Guadalupe e infrayace en contacto discordante (erosivo no angular) a la Formación Socha Inferior. Dichos autores reconocieron en la Quebrada Guadualera la Formación Guaduas, donde son comunes los

restos de hojas completas por sectores, así como también se encuentran algunas capas de carbón. Ocasionalmente se aprecian intercalaciones de capas delgadas a medias de cuarzoarenitas de grano fino (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996, pp.28-29).

**Figura 3-16.** Muestra de trazas fósiles, concretamente madrigueras, recolectada en el Segmento L, aunque también son reportadas en los segmentos C y K. Por la morfología corresponde a *Thalassinoides isp* (Seilacher, 2007).



### 3.2 Petrografía

A la par con la descripción de los segmentos estratigráficos, se presenta la petrografía hecha a 14 SDP del Grupo Guadalupe aflorante en la Quebrada Aguacaliente, así como 8 SDP trabajadas por otros autores (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996; Sarmiento-Pérez & Guerrero, 2000). En el **Anexo D** se presentan las descripciones petrográficas, mientras que en los **Anexos A, C y E** se relacionan las muestras con su posición estratigráfica. Los consecutivos 4036 al 4068 (6 SDP) corresponden a la Formación Arenitas de San Antonio, las muestras con los consecutivos 4080 al 4093 (4 SDP) pertenecen a la Formación Lodolitas de Aguacaliente, mientras que las muestras con los consecutivos 4224 al 4240 (4 SDP) son de la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno.

Con la integración de la información petrográfica y estratigráfica, fueron definidas petrofacies según los criterios de Gómez et al. (2020), y se presentan en el capítulo **3.4 Facies sedimentarias (estratigrafía y petrofacies)**. En dicho capítulo, se ahonda en los aspectos más relevantes para evaluar la calidad de reservorio de las rocas analizadas (empaquetamiento, proporción de matriz, porosidad, permeabilidad, cementos, entre otros).

### 3.3 Litogeoquímica

Los datos de litogeoquímica se presentan en el **Anexo F**, integrados con la columna estratigráfica para facilitar las observaciones. A continuación, se describen los principales resultados para cada técnica.

#### 3.3.1 Difracción de Rayos X (DRX)

Los difractogramas adquiridos e interpretados siguiendo la metodología de Thorez (1975) se presentan en el **Anexo E**. Con base en la distribución de los datos vista en la columna estratigráfica integrada (**Anexo F**), que además considera la abundancia de minerales mayores reconocidos petrográficamente, se tienen las siguientes observaciones (por formación):

- En la parte basal de la Formación Arenitas de San Antonio, el mineral más abundante es el cuarzo, seguido por minerales arcillosos que en conjunto suman una proporción del 10%, representados por la matriz y pseudomatríz que se encuentra en las rocas. El mineral arcilloso más abundante es caolinita, con valores cercanos al 15%. Estos contrastan con valores mucho más altos que se encuentran en la parte media de la unidad (Segmento D).

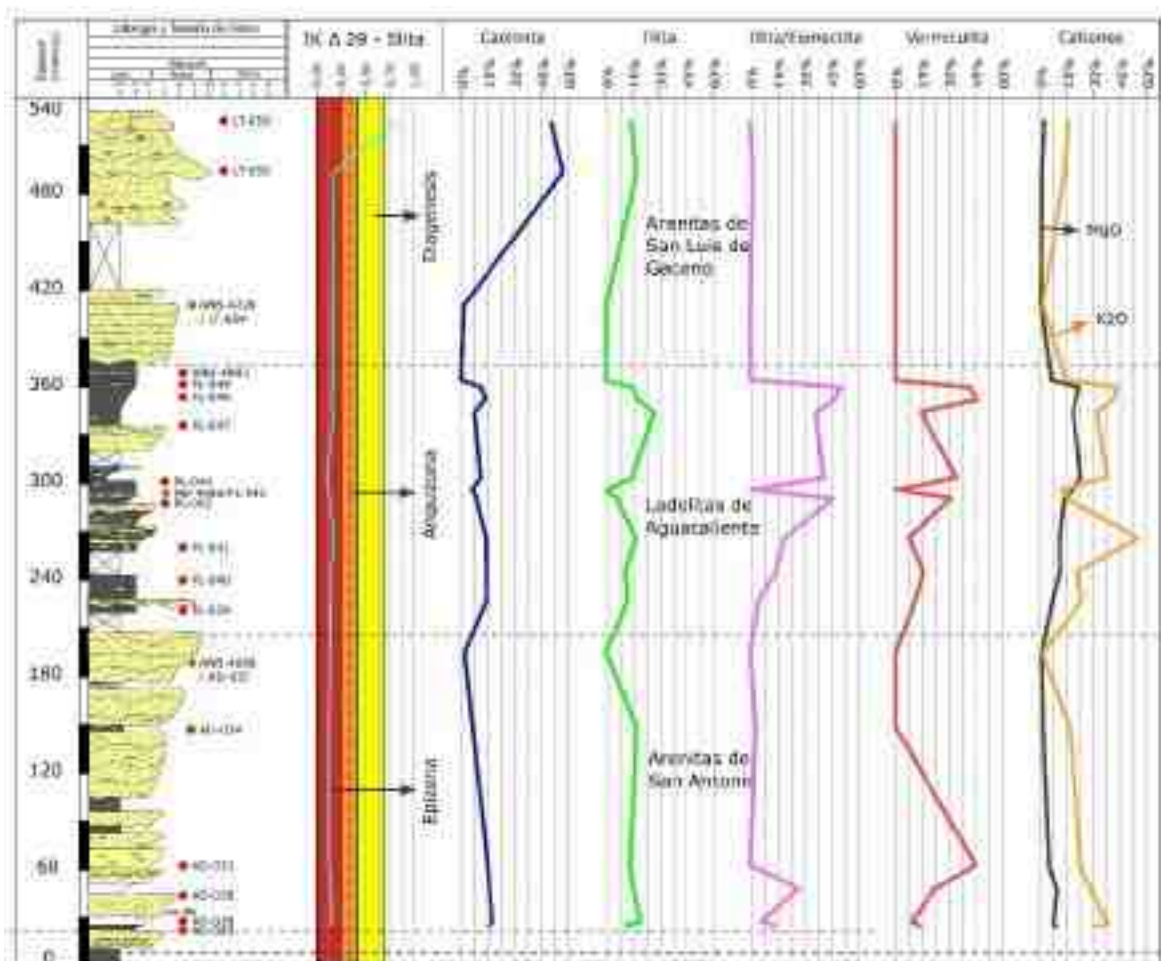
Otros minerales arcillosos presentes son Illita e interestratificados de Illita/Esmectita (Ill/Sme). Hacia la base (entre las muestras AST-025 y AST-026, como se observa en la **Figura 3-17**), ocurre un aumento en la proporción de Illita y una disminución en el contenido de interestratificados, para luego mantener una baja proporción de Illita, mientras que los valores de Ill/Sme oscilan entre altos y bajos.

Otros minerales también presentes en (relativa) alta proporción, son glauconita (entre 2 y 5%) y calcita (8%), ambos en la base de la formación Arenitas de San Antonio.

- En la parte media y superior de la Formación Arenitas de San Antonio el mineral más abundante es el cuarzo, en detrimento al contenido de minerales arcillosos, hasta que estos últimos prácticamente desaparecen de la roca.

Un mineral que aumenta considerablemente su proporción es el fosfato, el cual en DRX muestra un pequeño pico en la muestra ANB-4060/AST-037 (tanto de petrografía como de litogeoquímica), mientras que petrográficamente lo muestra en ANB-4052. La razón por la cual existen estas disparidades entre lo mostrado por petrografía y DRX yace en que la petrografía fue hecha en rocas más arenosas (que está directamente correlacionado a lo mostrado por la columna estratigráfica), mientras que DRX solo toma la parte arcillosa.

**Figura 3-17.** Columna estratigráfica generalizada de la Quebrada Aguacaliente, mostrando el índice de cristalinidad de la illita ( $IK \Delta 2\theta$ , en azul cian), variaciones de las fases minerales arcillosas Caolinita (azul oscuro), Illita (verde claro), interestratificado Illita/Esmeclita (violeta), Vermiculita (rojo); junto a variaciones composicionales de potasio ( $K_2O$ , en línea naranja) y magnesio ( $MgO$ , línea marrón).



Pasando a los minerales arcillosos, comienza una disminución en el contenido de caolinita hacia el tope de las Arenitas de San Antonio con respecto a la base, a medida que se va avanzando hacia la Formación Lodolitas de Aguacaliente. De igual manera, va disminuyendo el contenido de illita e Ill/Sme es constantes con respecto a la base de las arenitas, correlacionándose con una menor disponibilidad de potasio y magnesio hacia el tope de la unidad, directamente proporcional a una sucesión más cuarzosa y con mayor madurez textural como composicional (como lo muestra la petrografía de las SDP ANB-4060, ANB-4064 y ANB-4068).

- Entrando a la Formación Lodolitas de Aguacaliente, se tiene que el mineral más abundante es el cuarzo, aunque hacia la parte media y tope de la unidad aparece carbonato en altísima proporción, debido a la aparición de rocas calcáreas y mixtas (**Anexo F**), lo que coincide con una disminución abrupta del contenido de minerales arcillosos (**Figura 3-17**), aunque en general sigue predominando la sedimentación siliciclástica en esta unidad. Hacia el tope de las Lodolitas de Aguacaliente y base de las Arenitas de San Luis de Gaceno, aparecen fosfatos en alta proporción, los cuales en petrografía se reconocieron como partículas aloquímicas (pellets, intraclastos, fragmentos óseos) que se depositaron en rocas de composición mixta con buena madurez textural y alto contenido de cuarzo. Otro mineral relativamente abundante en la parte media de la Formación Lodolitas de Aguacaliente son los feldespatos, aunque en proporciones no mayores al 10% (**Anexo F**).

Igualmente, en las Lodolitas de Aguacaliente aumenta el contenido de minerales arcillosos en comparación con las Arenitas de San Antonio, ocurriendo un aumento progresivo en el contenido de Illita, interestratificados Ill/Sme (los cuales aumentan considerablemente hasta llegar al tope) y vermiculita en la unidad (solamente interrumpido por los estratos calcáreos muestreados), aunque se observan valores muy bajos de caolinita (**Figura 3-17**).

- Finalmente, en la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno, se observa que el cuarzo es el mineral más abundante (**Anexo F**), acompañado de minerales arcilla (especialmente cerca al tope de la unidad) y fosfatos como partículas aloquímicas. Así mismo, algo que caracteriza a esta unidad y la diferencia de las formaciones Arenitas de San Antonio y Lodolitas de Aguacaliente es que los minerales pesados ultraestables (turmalina, circón, rutilo) se encuentran en mayor proporción, razón por la cual aumenta el contenido de titanio.

Pasando a los minerales arcillosos, el más abundante es caolinita, el cual aumenta su concentración a medida que se asciende estratigráficamente; al igual que illita, aunque este último no aumenta en una proporción tan considerable. Entre tanto, los interestratificados Ill/Sme se encuentran en muy baja proporción. No obstante, se desconoce si el aumento es progresivo, ya que solo fueron colectadas y analizadas 3 muestras en esta formación (ASLG-054 ASLG-055 y ASLG-059)

- En toda la sección descrita a lo largo de la Quebrada Aguacaliente, la presencia de vermiculita tiene una distribución similar a la de los interestratificados Ill/Sme, razón por la cual se considera que es producto de alteración de dicho interestratificado por sustitución catiónica (Moeller-Schnepfe, 1958); concretamente  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Na}^{+}$ , por  $\text{Mg}^{+2}$ , durante procesos de meteorización (Hong et al., 2014) Igualmente, al observar la distribución de  $\text{MgO}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , el potasio está en mayor proporción en las rocas (complementado en que se encontraron minerales máficos solo a modo de trazas en todas las muestras de petrografía), lo que demuestra que durante la diagénesis se favoreció la formación de illita en vez de vermiculita.

Junto a la interpretación de la distribución de los minerales arcilla en la columna, se determinó el índice de cristalinidad de la illita mediante el ploteo de los índices de Kübler calculados siguiendo la metodología empleada por otros autores (Di Roccoa & Cruzado, 2012; Warr & Ferreiro Mählmann, 2015; Rodríguez-Esquivel & Sánchez-Quiñonez, 2021), tal como se observa en las **Figuras 3-31 y 3-32**. La epizona, anquizona y diagénesis se restringe a las condiciones presentadas en la **Tabla 3-1**.

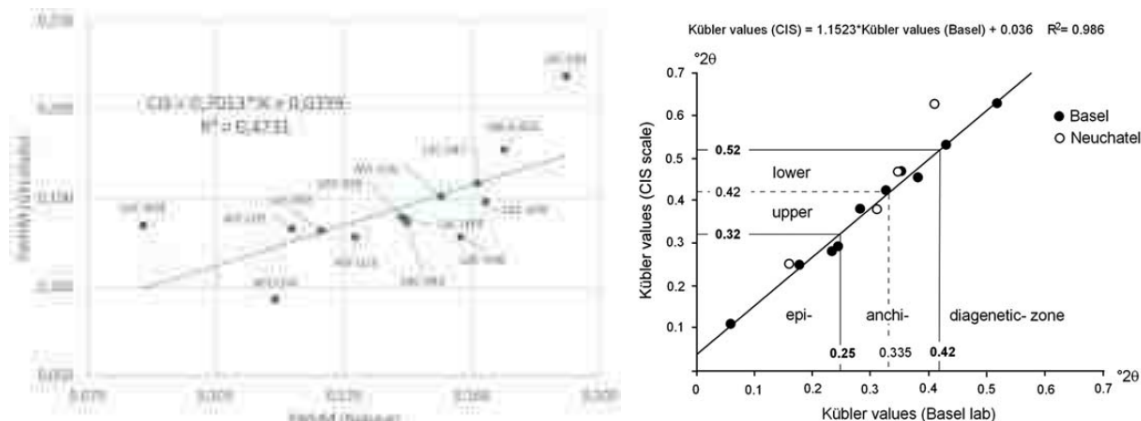
**Tabla 3-1.** Condiciones de enterramiento alcanzadas para la pila sedimentaria. Tomado de Warr & Ferreiro Mählmann (2015) y Warr & Rice (1994)

| Condiciones de enterramiento de la pila sedimentaria | Índice de Kübler | Temperatura alcanzada (°C) |
|------------------------------------------------------|------------------|----------------------------|
| Diagénesis                                           | >0,42            | <200 °C                    |
| Anquizona baja                                       | 0,335-0,42       | 200-250 °C                 |
| Anquizona alta                                       | 0,25-0,335       | 250-300 °C                 |
| Epizona – Bajo grado de metamorfismo                 | <0,25            | >300 °C                    |

En la **Figura 3-18**, se observa una mala correlación del ancho del pico entre las muestras orientadas y glicoladas, con un valor de correlación de 0,4731; mientras que en la columna de litogeoquímica integrada (**Figura 3-17**) presenta valores de cristalinidad de la illita que indican condiciones que abarcan epizona, valores que se deben analizar con cuidado, tal como se explica a continuación en el capítulo de **Discusión**.

Igualmente, para evaluar el grado de diagénesis que afecta las principales rocas reservorio del Grupo Guadalupe, se hizo una correlación del ancho del pico entre las muestras orientadas y glicoladas considerando solamente las muestras de las formaciones Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno, obteniéndose un valor de correlación de 0,9539 (**Figura 3-19**), abarcando nuevamente epizona.

**Figura 3-18.** a) Correlación de los datos medidos para los FWHM en muestras naturales orientadas secadas al aire y muestras saturadas con etilenglicol, para la totalidad del Grupo Guadalupe. b) Correlación de los índices de Kübler CIS (estándares de índices de cristalinidad) con valores experimentales. Nótese el alto valor de correlación (0,986). Tomado de Warr & Ferreiro Máhlmann (2015)



Además, existen otros trabajos realizados en el Grupo Guadalupe que buscan determinar las condiciones de diagénesis alcanzadas en otros puntos de la cuenca Cordillera Oriental, tales como la madurez térmica de la vitrinita ( $R_o$ ), que ha sido ampliamente utilizada para determinar límites de ventana de generación de hidrocarburos. Pedraza-Fracica & Mariño-Martínez (2016) elaboran paleogeotermas a partir de la reflectancia de la vitrinita ( $R_o$ ) en el pozo Tamauka-1 (localizado en Iza, Boyacá), siguiendo la metodología de Barker & Pawlewicz (1994), y apoyándose en datos previamente recolectados (Audemard et al., 2009; Pedraza-Fracica, 2010). Ellos reportan condiciones de

temperatura decrecientes entre 170-120°C, para las formaciones Plaeners y Arenisca Tierna, por lo que se trataría de condiciones por encima de la catagénesis (ventana de generación de petróleo).

Igualmente, Moreno & Hincapié (2010) reportan valores de  $R_0$  de 0,54 y 0,66 para dos muestras de la Formación Plaeners (Grupo Guadalupe), recolectadas a lo largo de la parte axial de la Cordillera Oriental (municipios de Samacá y Cucaita, Boyacá). Dichos valores de reflectancia caen dentro de la ventana de generación de gas y petróleo (Allen & Allen, 2005), tal como se observa en la **Tabla 3-2**.

**Tabla 3-2.** Principales zonas de generación de hidrocarburos y valores límites de reflectancia de la vitrinita. Tomado de Allen & Allen (2005) y Moreno & Hincapié (2010).

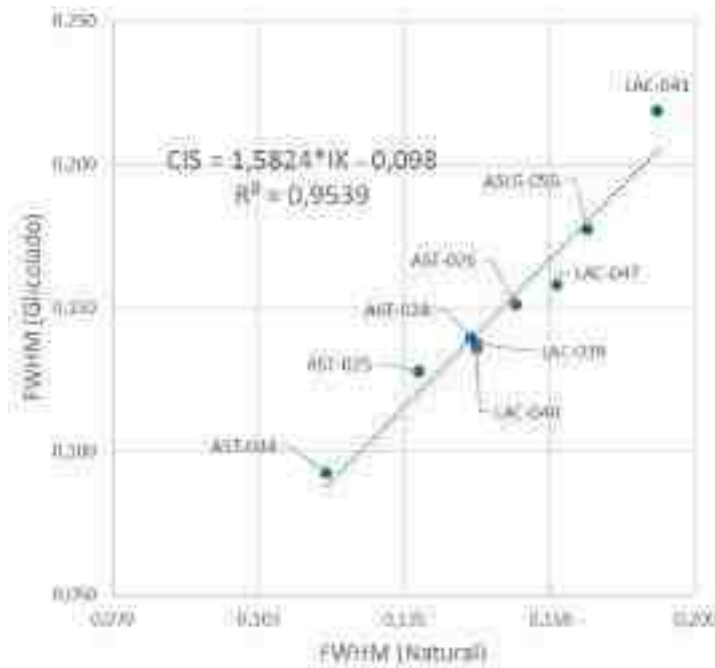
| Valores $R_0$       | Madurez                                                 |
|---------------------|---------------------------------------------------------|
| $R_0 < 0,55$        | Inmaduro                                                |
| $0,55 < R_0 < 0,80$ | Generación de gas y petróleo                            |
| $0,80 < R_0 < 1,00$ | Cracking de petróleo y gas (zona de condensados de gas) |
| $1,00 < R_0 < 2,50$ | Generación de gas seco                                  |

### 3.3.2 Fluorescencia de Rayos X (DRX)

Al igual que la difracción de rayos x, se presentan en la columna estratigráfica integrada (**Anexo F**), que además considera la abundancia de minerales mayores reconocidos petrográficamente, se tienen las siguientes observaciones:

- $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  corresponden a los principales elementos que contienen las rocas, manteniendo la misma proporción que la mostrada por cuarzo, minerales arcilla (caolinita, illita e interestratificados Ill/Sme), carbonatos y fosfatos; respectivamente. La única diferencia significativa que hay entre minerales mayores reconocidos con petrografía, y la composición elemental radica en la parte superior de las Arenitas de San Luis de Gaceno, ya que el contenido de  $\text{SiO}_2$  es significativamente menor al cuarzo reportado, debido a que las muestras de litogeoquímica provienen de estratos más lodosos (donde se incrementa el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

**Figura 3-19.** a) Correlación de los datos medidos para los FWHM en muestras naturales orientadas secadas al aire y muestras saturadas con etilenglicol, solamente considerando potenciales rocas reservorio (Formaciones Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno).



- Por su parte,  $Fe_2O_3$  tiene valores bajos (cerca de o por debajo del 2%) en casi toda la sección estratigráfica, con excepción de algunos segmentos en la base de la Formación Arenitas de San Antonio y en la parte media de las Lodolitas de Aguacaliente. En ambos casos, su presencia coincide con la de glauconita identificada petrográficamente; así como a la presencia de cemento ferruginoso, identificado en las muestras ANB-4052 y ANB-4068 para las Arenitas de San Antonio, y ANB-4092 en las Lodolitas de Aguacaliente.
- De igual manera,  $K_2O$  y  $MgO$  muestran una distribución similar al contenido de interestratificados Ill/Sme, ya que ambas fases minerales asimilan dichos elementos en su estructura cristalina. Algo que llama la atención del  $K_2O$  es la tendencia en reducir su concentración a medida que se asciende estratigráficamente en la parte inferior y media del Grupo Guadalupe (pasando de 0,997% a 0,043% en las Arenitas de San Antonio; 0,76% a 0,469% en las Lodolitas de Aguacaliente), aunque en la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno no se observa esta tendencia.

### 3.4 Facies sedimentarias (estratigrafía y petrofacies)

Una vez analizadas las 14 SDP, es posible integrar la información textural y composicional en los siguientes diagramas ternarios, discriminados por formación y siguiendo la clasificación para rocas terrígenas (Wentworth, 1922; Folk, 1954, 1974, 1980; Folk et al., 1970), debido a su alta proporción al corresponder a 12 de las 14 muestras trabajadas. Con estos diagramas y la descripción estratigráfica, se definieron las facies sedimentarias y petrofacies vistas en la **Tabla 3-3**, las cuales también se presentan en los **Anexos A y F**.

#### 3.4.1 Formación Arenitas de San Antonio

En las Arenitas de San Antonio, las muestras corresponden texturalmente a arenitas (ANB-4064, ANB-4060 y ANB-4068, dentro del Segmento E), y limolitas arenosas (ANB-4036 y ANB-4044, dentro del Segmento B) (**Figura 3-20a**). Una de las muestras (ANB-4052, dentro del Segmento D) corresponde a una arenita conglomerática (**Figura 3-20b**); siendo composicionalmente las 6 clasificadas como cuarzoarenitas (**Figura 3-20c**), destacando que la muestra ANB-4052 tiene fragmentos fosfáticos en alta proporción (33,4%), tal como se observa en la **Figura 3-21**.

Considerando la posición estratigráfica y estructuras sedimentarias descritas, las muestras del segmento B se clasifican dentro de la facies sedimentaria Alfl, las muestras del segmento E se clasifican dentro de la facies sedimentario Ampho, y la muestra del Segmento D pertenece a la facies sedimentaria LAoalce (**Tabla 3-3**).

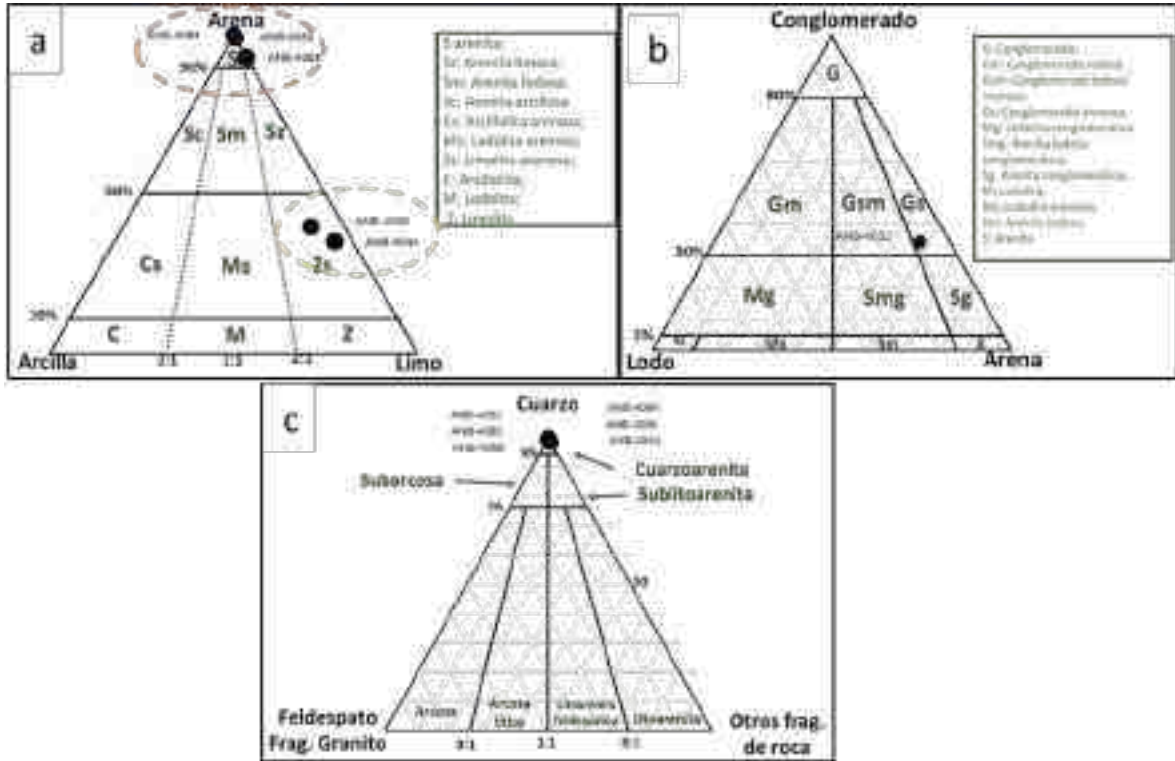
Las muestras agrupadas en la facies Ampho (ANB-4064, ANB-4060 y ANB-4068) tienen buena madurez textural, mostrando buena selección textural, poco a nulo contenido de matriz (aunque variable entre las muestras, tal como se observa en la **Figura 3-22**), y por lo tanto conforma reservorios con buena porosidad primaria (variable de 2,3% hasta 10,7%) y secundaria (hasta 1,2%); entre tanto que las muestras de la facies Alfl (ANB-4036 y ANB-4044) tienen mayor contenido de cemento (entre 23,9-33,2%) y matriz (hasta 9,9%, entre minerales terrígenos microcristalinos y minerales arcillosos), lo cual conlleva a formar rocas prácticamente impermeables y con porosidad nula (**Figura 3-23**).

Por último, la facies LAoalce descrita en las Arenitas de San Antonio y que es representada por una única muestra (ANB-4052, vista en la **Figura 3-21**) tiene mala selección textural, nula porosidad primaria y poca porosidad secundaria (1,40%), moderado contenido de cementos ferruginoso y síliceo (7,2%), y moderado contenido de matriz (5,8%, entre minerales terrígenos microcristalinos y minerales arcillosos indiferenciados)

**Tabla 3-3.** Facies y petrofacies sedimentarias definidas para la sección Quebrada Aguacaliente.

| Facies sedimentaria | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Petrofacies                         | Descripción                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ACgdc               | Capas canaliformes de arenitas de grano medio-grueso a conglomerados de gránulos, dentro de capas gruesas granodecrecientes, clastosoportadas, con moderada a mala selección. Contiene trazas fósiles de madrigueras hacia el tope.                                                              | ACgdc - Masiva                      | Arenitas y conglomerados, con clastos imbricados y laminación masiva, matriz soportados sin estructuras sedimentarias visibles.                                                                                                                        |
| Ampho               | Capas subtabulares discontinuas y canaliformes de arenitas de grano medio a grueso, de espesor medio y gruesas, bien seleccionadas, sin estructuras sedimentarias claramente visibles, con fragmentos fosfáticos, dentro de conjuntos granocrecientes.                                           | Ampho - Clasto soportada            | Arenitas de grano medio, con buena selección textural, poca matriz, moderada a buena porosidad y permeabilidad, con fragmentos fosfáticos.                                                                                                             |
| Alfl                | Capas subtabulares y tabulares discontinuas de arenitas de grano muy fino a medio, con laminación flaser, con diferentes grados de bioturbación, granocrecientes.                                                                                                                                | Alfl - Clasto soportada             | Arenitas con laminación flaser, clasto soportadas, con poco a moderado contenido de lodo, con grados de bioturbación variable.                                                                                                                         |
| LAoalce             | Capas subtabulares y macizas (con grado de continuidad variable) de lodolitas y arenitas con laminación ondulosa, con eventuales capas tabulares de arenitas con intraclastos y fragmentos aloquímicos, con contactos erosivos y microerosivos, formando en ocasiones estructuras tipo hummocky. | Alfl - LAoalce - Matriz soportada   | Arenitas y limolitas con laminación flaser a ondulosa, clasto soportadas, con proporción de matriz variable, con partículas fosfáticas y estructuras de deformación syn-deposicional (estructuras tipo hummocky) , con contactos microerosivos.        |
|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | LAoalce - Clasto soportada          | Cuarzoarenitas y arenitas aloquímicas, con cuarzo y partículas fosfáticas en alta proporción, clasto soportadas, con moderado a alto empaquetamiento, buena selección textural y composicional, cementadas en carbonatos, con contactos microerosivos. |
|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | LAoalce - Matriz soportada granular | Arenita conglomerática, con moderada a mala selección textural. Contiene fragmentos fosfáticos, redondeados, de gran tamaño, imbricados, y con distintos grados de angularidad (transporte), con contactos microerosivos.                              |
| LAcfo               | Capas tabulares y subtabulares delgadas a muy delgadas, continuas, de lodolitas con laminación lenticular, con lentes de arenita de grano muy fino a fino, con presencia de concreciones fosfáticas y silíceas, intercaladas con eventuales capas fosilíferas.                                   | LAcfo - Masiva                      | Lodolitas negras con laminación lenticular, con moderada a buena selección textural. Contiene granos detríticos (cuarzo, feldespatos, minerales ultraestables) y fragmentos aloquímicos en menor proporción.                                           |
| LMtal               | Capas tabulares discontinuas delgadas a muy delgadas, de lodolitas (con matriz terrígena y calcárea), con capas de rocas de composición mixta, compuestas por granos terrígenos y fragmentos aloquímicos (intraclastos fosfáticos, pellets y fragmentos óseos); en                               | LMtal - Matriz soportada            | Lodolitas (terrígenas) y biomicritas fosilíferas a empaquetadas (calcáreas), con abundantes fragmentos aloquímicos y ocasionales granos detríticos (principalmente cuarzo), matriz soportadas.                                                         |
| Lgrpll              | Capas subtabulares discontinuas, muy delgadas, de lodolitas grises, con escasos restos de plantas y lentes de arenita.                                                                                                                                                                           | Lgrpll - Masivas                    | Lodolitas grises, sin estructura sedimentaria visible.                                                                                                                                                                                                 |

**Figura 3-20.** Diagramas ternarios para la Formación Arenitas de San Antonio. a) Textural según Folk (1954). Dentro de círculo naranja las muestras clasificadas dentro de la facies Ampho, dentro de círculo amarillo las muestras clasificadas dentro de la facies Alfl. b) Textural según Nichols (2009). c) Composicional según Folk (1974).



### 3.4.2 Formación Lodolitas de Aguacaliente

En las Lodolitas de Aguacaliente, las muestras corresponden texturalmente a arenitas (ANB-4093A), arenitas lodosas (ANB-4088), lodolitas arenosas (ANB-4092) y arcillolitas (ANB-4093B) (**Figura 3-24a**); además de encontrarse una roca calcárea, específicamente una biomicrita dispersa con bivalvos (ANB-4080). A excepción de la arcillolita y la biomicrita, las demás rocas fueron clasificadas composicionalmente como cuarzarenitas, a excepción de la ANB-4092, que corresponde a una subarcosa (**Figura 3-24b**), además de que la ANB-4092 tiene aloquímicos en alta proporción, siendo una arenita aloquímica (Mount, 1985).

La muestra ANB-4080 se agrupa dentro de la facies sedimentaria LMtal (**Tabla 3-3**), debido a su alto contenido fósil y a localizarse dentro de una intercalación con rocas terrígenas, calcáreas y mixtas de granulometría muy fina, dentro del Segmento H (**Figura 3-9** y **Figura 3-10**) en toda la parte media de

la Formación Lodolitas de Aguacaliente. Por tal motivo, estas rocas son impermeables, además de no contener hidrocarburos.

**Figura 3-21. a)** Vista general de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4052 (facies LAolce), mostrando mala selección textural (conglomerado arenoso lodoso) debido a la heterogeneidad de los granos. Alrededor de la matriz arenosa hay gránulos y guijos de fragmentos aloquímicos, ya sean fragmentos óseos indiferenciados (FgO) y pellets (Pell). Hacia la base, el color negro rojizo intergranular corresponde a cemento ferruginoso (Cem Fe), mientras que el color beige claro hacia el tope corresponde a cemento silíceo (Cem Si). Polaridad indicada con la flecha de la parte inferior derecha. (PPL, 0,45x).

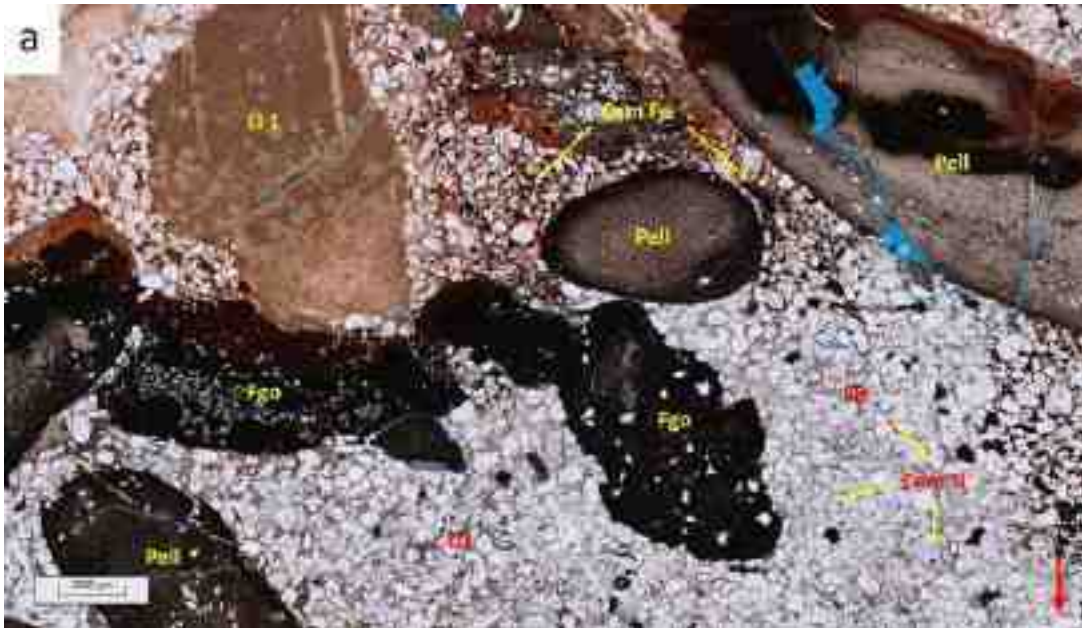


**Figura 3-22.** Vista general del armazón de las rocas de facies Ampho. **a)** Muestra 229IIC-JDV-ANB-4060 (PPL, 4x). **b)** Muestra 229IIC-JDV-ANB-4068. En ambas muestras se observa buena porosidad intergranular (marcada por el tensivo azul), así como baja proporción de matriz y cemento (color marrón), aunque en la muestra ANB-4068 aumenta la proporción, aunque no llega a formar laminas continuas.

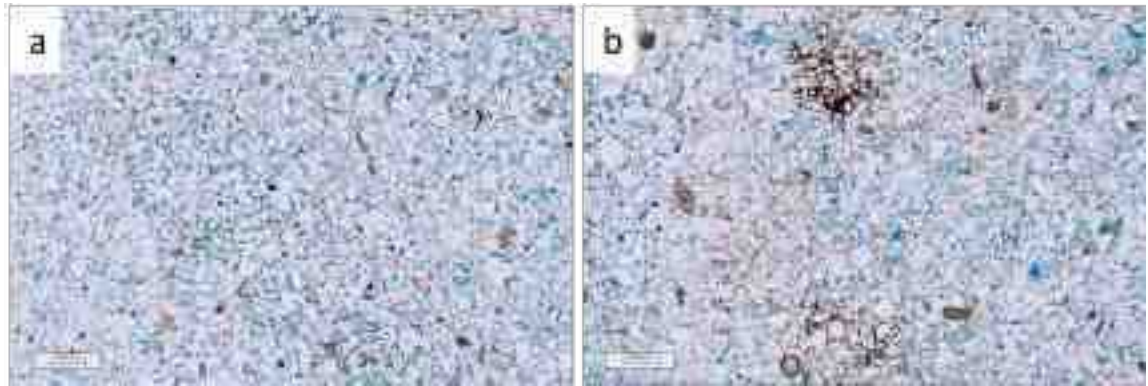
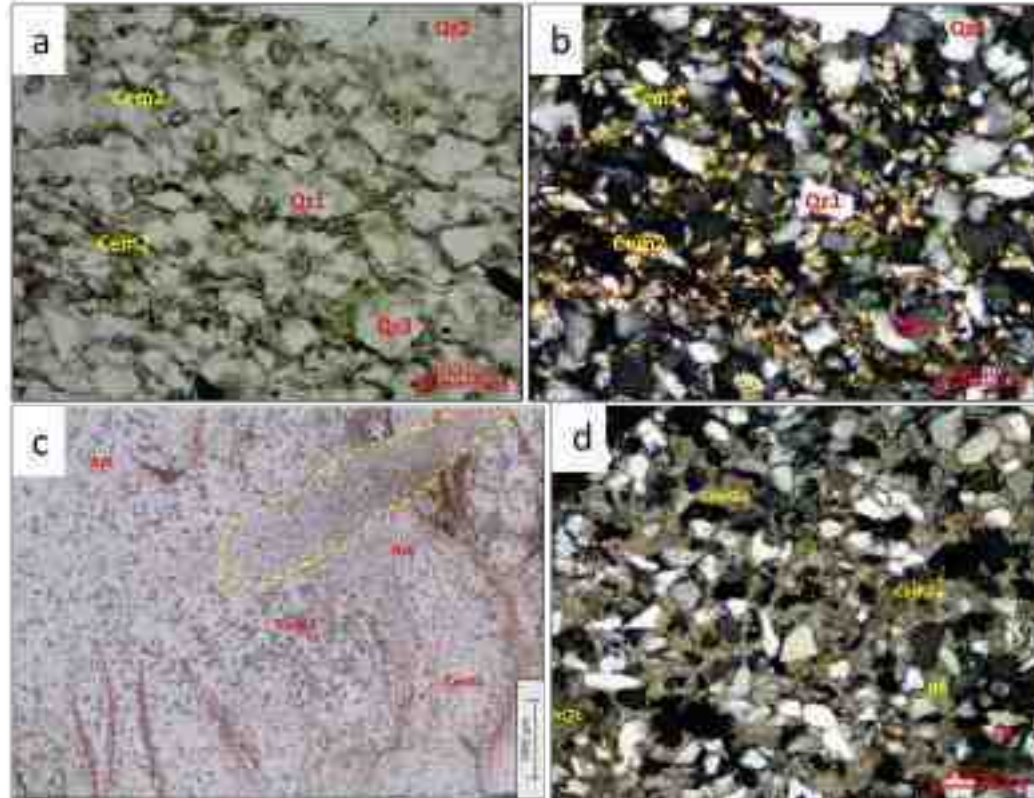
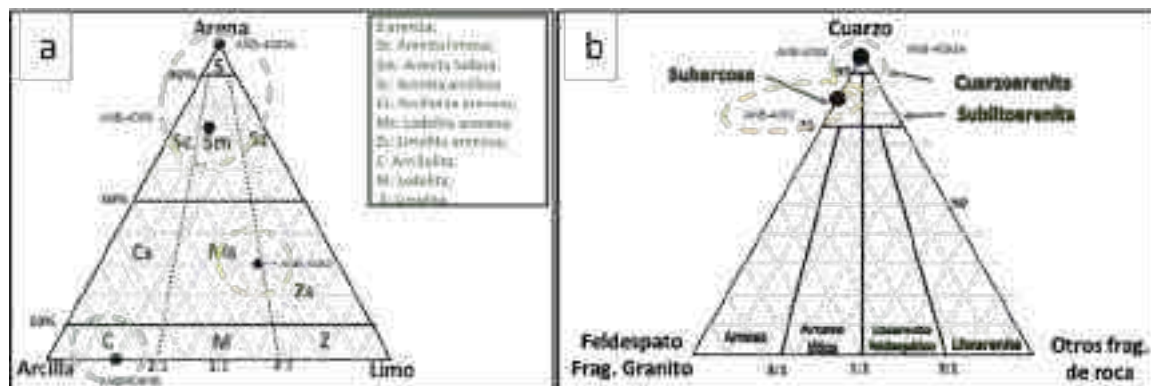


**Figura 3-23.** Rocas de facies Alfl. **a) y b)** Muestra 229IIC-JDV-ANB-4036, donde se observan los granos de cuarzo del armazón (Qz), acompañados de cemento calcáreo (Cem 2) que ocupan la porosidad primaria de la roca (PPL, 4x). **c)** Vista general del armazón de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4044. En ella, se observa la discontinuidad de las láminas ondulosas de arena (compuestas principalmente de cuarzo, limitadas por líneas rojas) y arcillosas (Arc); junto a cemento silíceo (Cem1), diferenciable del cemento calcáreo (Cem2) porque este último muestra un color gris y con cristales mejor formados. La laminación de la roca es cortada por una zona con forma alargada, producto posiblemente de bioturbación (zona limitada por líneas punteadas amarillas) (PPL, 0,10x). **d)** Foto en detalle de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4044, donde se observa el cemento calcáreo (Cem2), que da armazón a la roca (PPL, 10x).



Por su posición estratigráfica (parte media y superior de las Lodolitas de Aguacaliente), las muestras ANB-4088 y ANB-4093A se agrupan dentro de la facies LAolce (**Tabla 3-3**), ya que las arenitas están intercaladas con lodolitas (**Figura 3-25a, b**), a la vez que muestran retrabajamiento y/o alta energía en el ambiente de depósito; tales como armazón clastosoportado con moderado empaquetamiento, buena selección, cementación por carbonatos (que deja contactos flotantes, tal como se observa en la **Figura 3-25c**, teniendo una proporción variable de 9,7% a 22,3%), contactos microerosivos (**Figura 3-25b, c, Figura 5-11**), reconocidos en el contacto entre las muestras ANB-4093A y ANB-4093B) y estructuras tipo hummocky (vistas en la muestra ANB-4088, **Figura 3-26**), debido a la discontinuidad de la laminación. En consecuencia, su porosidad y permeabilidad son prácticamente nulas (0%).

**Figura 3-24.** Diagramas ternarios para la Formación Lodolitas de Aguacaliente. a) Textural según Folk (1954). Dentro de círculo amarillo están las muestras clasificadas dentro de la facies Alfl, dentro de círculo ocre las muestras clasificadas dentro de la facies LAolce, dentro de círculo verde las muestras clasificadas dentro de la facies LAcfo. b) Composicional según Folk (1974).



Dichas lodolitas (entre las que se intercalan las capas de limolitas y arenitas de la facies LAolce) pertenecen a la facies LAcfo (**Tabla 3-3**). Las muestras de esta facies (ANB-4093B) se caracterizan por ser negras, tener laminación lenticular con lentes tabulares muy delgados de arenita muy fina, y contener concreciones (fosfáticas y silíceas). Aunque solo se tomó una muestra de esta facies sedimentaria, esta representa rocas del segmento inferior y medio de la Formación Arenitas de San Antonio, además de estar en casi toda la Formación Lodolitas de Aguacaliente, intercalada con otras facies más arenosas a medida que van cambiando los ambientes y unidades descritas.

Por último, la muestra ANB-4092 se clasifica dentro de la facies Alfl, debido a que se encuentra en la base de un conjunto de capas granocrecientes del tope de las Lodolitas de Aguacaliente, que comenzarán a ser más cíclicas hasta predominar completamente en la parte basal de la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno. No obstante, su granulometría y armazón interno (**Figura 3-27**) es

bastante similar al propuesto para la facies LAolce (**Figura 3-26**), dejándose la facies Alfl con base en el contexto sedimentológico en que se acumularon los sedimentos de este segmento; proponiendo una petrofacies intermedia (**Tabla 3-3**) bastante congruente con la composición química y mineralógica vista en la litogeoquímica (**Anexo F, Figura 3-17**) para las muestras inmediatamente superiores e inferiores al contacto Lodolitas de Aguacaliente – Arenitas de San Luis de Gaceno. Llama la atención que cuenta con escasa porosidad primaria (hasta 2%), aunque también se encuentra moderadamente cementada (14,1%), bastante similares en el amazón a otras muestras de la facies Alfl reconocidas en las Arenitas de San Antonio (**Figura 3-23**).

**Figura 3-25.** Fotografías de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4093. **a) y b)** Cemento calcáreo (Cem), identificado de manera intergranular entre los granos de cuarzo (Qz) y minerales arcillosos indiferenciados (Arc). Debido a que la roca (ANB-4093 B) es de grano muy fino y tiene alto relieve y alta birrefringencia, es necesario reconocerla con lamina compensadora. El cemento calcáreo está asociado a los granos de cuarzo, ocupando vetillas (XPL y compensada con 1λ, 10x). **c)** Granos de cuarzo (Qz), fragmentos de peces (Fpc), pellets (Pel) y peloides (Pel) que están siendo cementados por esparita (Spa). La roca (ANB-4093A) presenta fracturas (Fr) que son rellenadas por carbonato a modo de vetillas (Vt) (XPL, 5x). **d)** Intraclasto (Icl), de composición fosfática. En su interior presenta granos de formas redondeadas y algunas ligeramente alargadas (marcadas con líneas punteadas amarillas). (PPL, 10x).

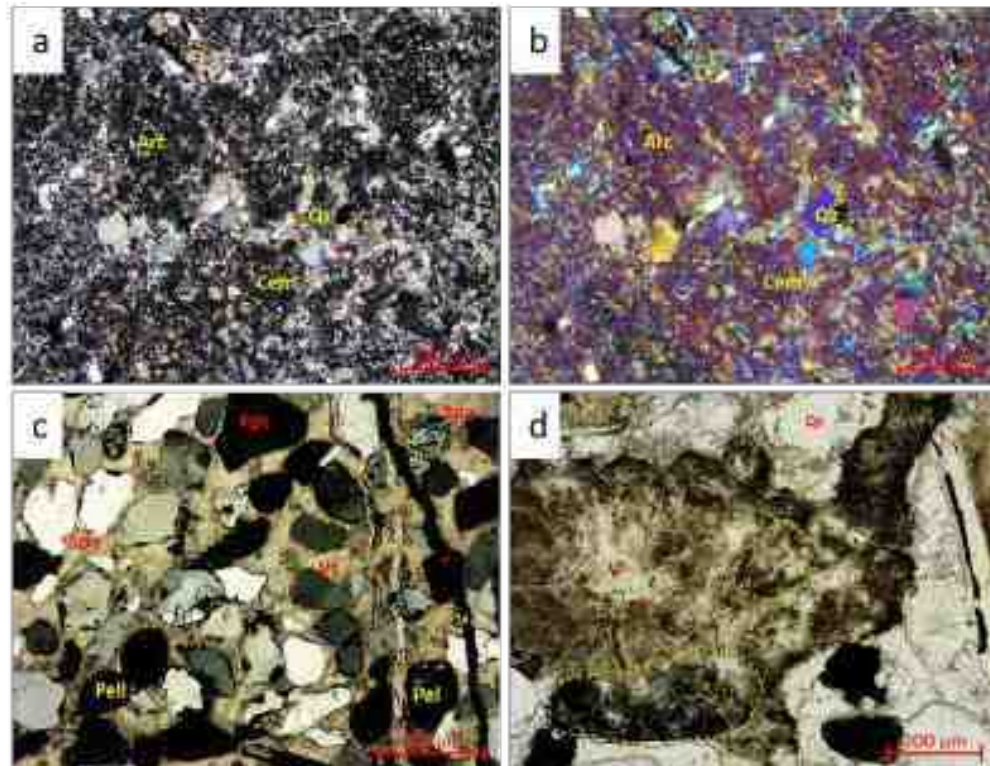


**Figura 3-26.. a)** Vista general de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4088, observando el tamaño de grano muy fino en la roca, y muy buena selección. Hay laminación subparalela ondulosa (marcada con líneas amarillas), definida por una intercalación entre láminas oscuras (matriz-soportadas) y láminas claras (con predominio de cemento); existiendo zonas donde se hay rizaduras (encerradas con círculo rojo) y lentes de láminas más claras (encerradas con círculo azul) (PPL, 10x).



### 3.4.3 Formación Arenitas de San Luis de Gaceno

Pasando a las Arenitas de San Luis de Gaceno, las muestras texturalmente son arenitas (ANB-4224 y ANB-4228), arenitas arcillosas (ANB-4237) y arenitas lodosas (ANB-4240) (**Figura 3-28a**). Composicionalmente se clasifican como cuarzoarenitas (**Figura 3-28b**).

Las muestras ANB-4224 y ANB-4228 se agrupan dentro de la facies sedimentaria Ampho (**Tabla 3-3**), debido a su granulometría gruesa, presencia pellets e intraclastos, armazón clastosoportado, buena porosidad (primaria y secundaria, con valores de hasta 3,9% y 8,7%, respectivamente) y moderado a poco contenido de matriz terrígena (detritica); es decir ser friable debido a su buena madurez textural (**Figura 3-29a, c, d**). Algo que caracteriza a esta facies es su disposición en capas granocrecientes, bastante similares a las capas superiores de la Formación Arenitas de San Antonio. No obstante, a pesar de ser agrupadas dentro de la misma facies, la muestra ANB-4224 posee fracturas y retrabajamiento del armazón, lo cual reduce su porosidad al formar pseudomatríz (**Figura 3-29a, b**).

Entre tanto, las muestras ANB-4237 y ANB-4240 tienen mayor contenido de matriz y son de grano medio, por lo que corresponden a la facies Alfl (**Tabla 3-3**), ya que además conservan laminación flaser, preservada en mayor o menor medida. Algo que llama la atención es que la laminación de las muestras da lugar a interdigitación entre laminas con muy buena porosidad (hasta 15%) y permeabilidad (donde predominan los contactos puntuales), con láminas impermeables (donde hay menor empaquetamiento, mayor contenido de matriz y de cementos), tal como se observa en la **Figura 3-30**.

**Figura 3-27.** Fotografías de la muestra 229IIC-JDV-ANB-4092. **a)** Cambios en la laminación, pasando de ondulosa en la base, a flaser en la mitad, a ondulosa en el tope (separadas por líneas amarilla punteadas). Estos cambios de laminación ocurren cíclicamente en toda la muestra (PPL, 5x). **b)** Vista general del armazón de la roca, donde se observan granos de cuarzo (Qz) intercalados con lodo y cementado con material ferruginoso (Cem 2) (PPL, 5x). **c)** Granos de cuarzo, acompañados de plagioclasa (Pl) y glauconita (Glt), en un armazón dado por cemento silíceo (Cem 1) (XPL, 5x). **d)** Laminación ondulosa, donde se observa amalgamamiento de las pestañas de lodo, por retrabajamiento del sustrato arenoso. La base de las pestañas de lodo se muestra con línea amarilla punteada (PPL, 5x).

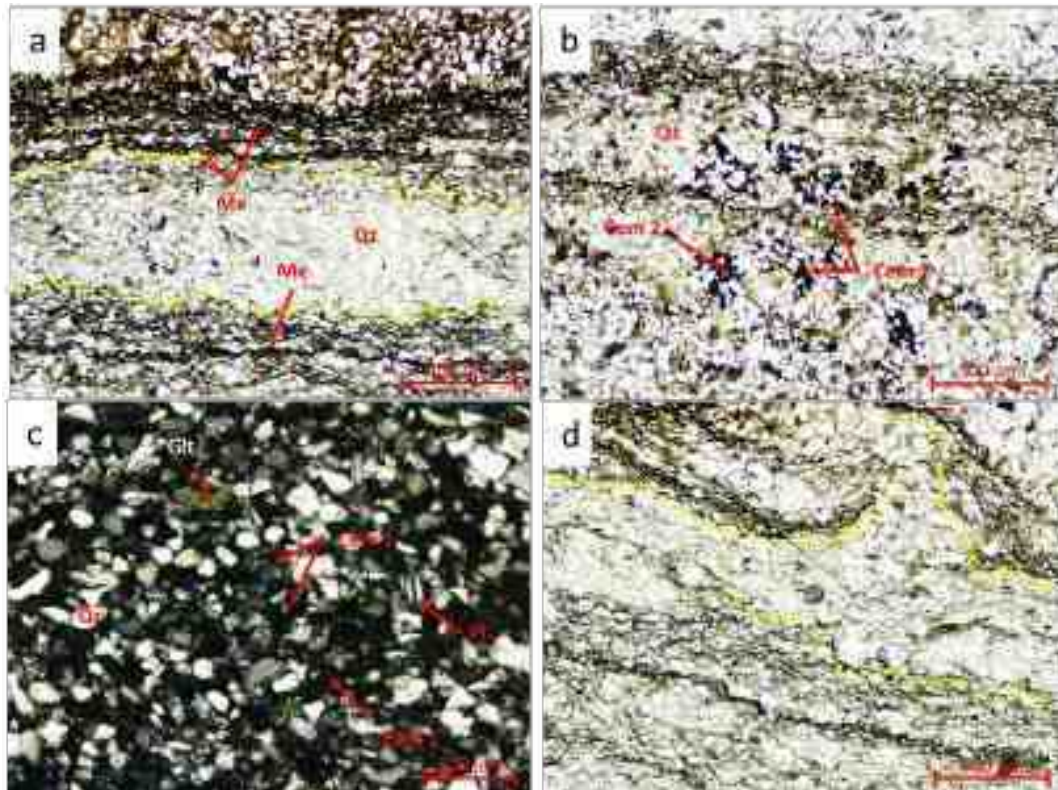
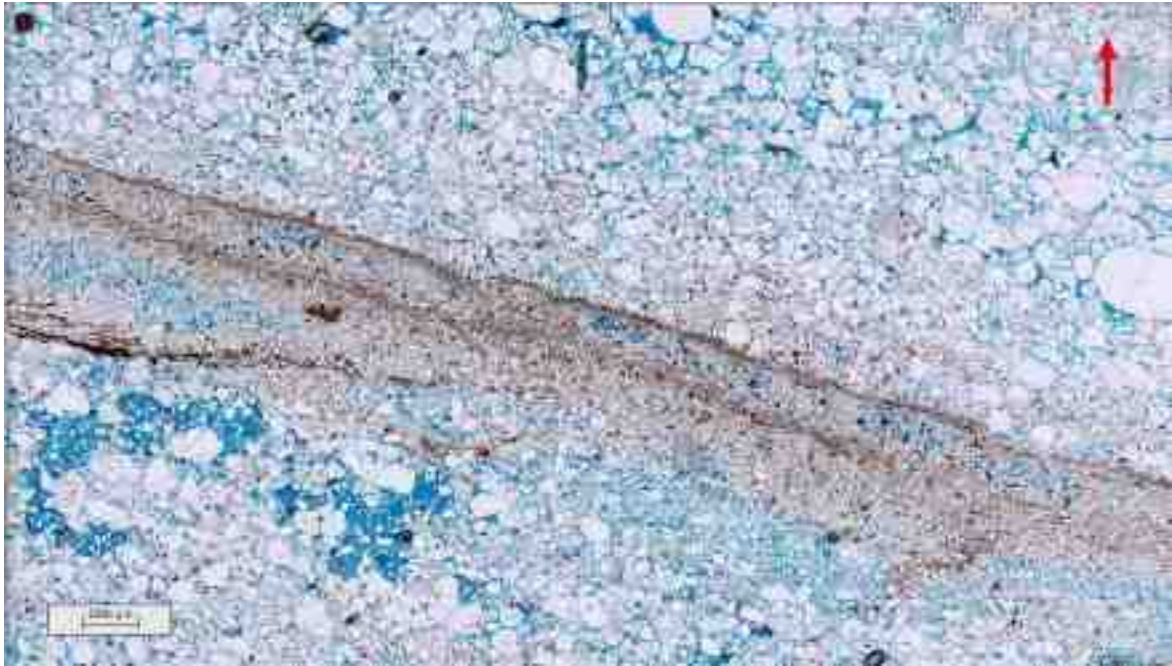




**Figura 3-30.** Laminación flaser inclinada de la SDP 229IIC-JDV-ANB-4240. Nótese la interdigitación de láminas arenosas permeables, con muy buena madurez textural y composicional, intercaladas con láminas arcillosas cementadas de color marrón, considerablemente menos porosas y permeables. El tope se encuentra en la parte superior de la fotografía, indicado con flecha roja.





## 4. Discusión

Con todos los resultados obtenidos, se pueden hacer las siguientes observaciones en lo que respecta al Grupo Guadalupe aflorante en el área de San Luis de Gaceno.

### 4.1 Asociación y modelo de facies

De las 7 facies sedimentarias identificadas y definidas a lo largo de la Quebrada Aguacaliente, en 6 de ellas los minerales más predominantes son cuarzo y minerales arcillosos. Estos minerales probablemente tienen un origen heredado de rocas cristalinas (ígneas y/o metamórficas), o sedimentarias antiguas (paleozoicas o más viejas, donde comienzan a incidir procesos de bajo grado de metamorfismo, tal como lo propone Rodríguez-Esquivel & Sánchez-Quíñonez (2021)); ya que el alto grado de cristalinidad de la illita correspondiente a epizona (e identificado en todas las muestras analizadas (**Figura 3-18**)), no refleja las condiciones de diagénesis alcanzadas por las rocas del Grupo Guadalupe, ya que la petrografía no muestra evidencias de alto grado de diagénesis.

Por su parte, el alto contenido de caolinita como fase mineral arcillosa predominante en las formaciones Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno (estas, con mayor proporción de minerales terrígenas de todo el Grupo Guadalupe), sugiere una ciclicidad entre ambientes de alta y baja energía (este último representado por la Formación Lodolitas de Aguacaliente) (**Figura 3-17**).

La facies LMtal (lodolitas terrígenas y biomicritas fosilíferas a empaquetadas) se encuentran restringidas a la parte media de la Formación Lodolitas de Aguacaliente, lo que indica que la cuenca comienza a profundizarse desde la parte basal del depósito de esta unidad, justificando una progresión a ambientes marinos por el contenido de MnO y MgO encontrado a lo largo de esta unidad.

Igualmente, las condiciones de diagénesis varían entre las tres formaciones, ya que en la base y el tope de la sección Quebrada Aguacaliente hay menor contenido de interestratificados Ill/Sme, directamente

ligado a la disponibilidad de  $K_2O$  y  $MgO$ ; además de que se depositan granulometrías más finas en las Lodolitas de Aguacaliente, por condiciones de menor energía y menor tasa de sedimentación, en comparación con las capas granocrecientes y engrosantes hacia el tope, reportadas en las Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno, conocido como *coarsening-upward trends* en el sentido de Catuneanu et al. (2009). Lo anterior refleja que ocurrió una profundización del ambiente de acumulación, desde la base de Lodolitas de Aguacaliente hasta la parte media de esta unidad (**Figura 3-8**), estando acompañado por una disminución en el grado de bioturbación de organismos excavadores en sustratos blandos (desaparición de *Thalassinoides isp.* en este segmento, reportados en la Formación Chipaque y parte media de la Formación Arenitas de San Antonio, tal como se observa en la **Figura 4-1**) y más acumulación de restos aloquímicos hasta formar capas fosilíferas en la mitad de las Lodolitas de Aguacaliente y mostrar facies LMtal bien espesas.

**Figura 4-1.** Capa subtabular de arenita con trazas fósiles de madrigueras (*Thalassinoides isp.*), reportada cerca al tope de la Formación Chipaque.



Retomando las Arenitas de San Antonio, la presencia de glauconita y calcita en la parte basal de la unidad, acumulados dentro de la facies Alfl de arenitas de grano muy fino a medio, sugiere un aporte tanto siliciclástico como calcáreo para esta parte de la unidad. Ambos son producto de la diagénesis temprana, ya que el primero de ellos se forma autigénicamente a partir de minerales preexistentes como biotitas e incluso pellets fosfáticos (Galán et al., 1989), donde debe haber disponibilidad de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ; mientras que el segundo rellena parcialmente el armazón de la roca formando texturas esqueléticas, teniendo dicha roca moderada proporción de matriz, lo que sugiere condiciones de media energía, pero en una zona que permita la cristalización de carbonatos.

Ahondando en la formación de glauconita, esta puede estar ligada a procesos de formación y acumulación de pellets (Galán et al., 1989), ya que cerca al tope de la Formación Chipaque se reportan capas arenosas con icnofósiles *Thalassinoides isp.*, las cuales para Seilacher (2007) evidencian ambientes marinos de plataforma someros, donde ocurrió formación de pellets.

Todo lo anterior tiene congruencia con la fluorescencia, ya que hay bajos valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (estando el hierro asociado a ambientes marinos) en casi toda la sección estratigráfica, excepto por picos en la base de las Arenitas San Antonio, por lo que habría interacción entre sedimentos y cationes de origen marino ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), y continental ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). También se observa una interdigitación entre facies LAcfo (lodolitas negras) y Alfl (arenitas granocrecientes muy finas a medias), con facies LAolce en capas puntuales tabulares de pequeño espesor.

El cambio en el espesor y estructura interna en la parte media y superior de las Arenitas de San Antonio mostrado por las capas del tipo *coarsening-upward trends*, sugiere un aumento progresivo de la energía y retrabajamiento de sedimentos de origen tanto continental (cuarzo en alta proporción) como marino (restos fosfáticos, en baja proporción, aunque significativa a medida que se va ascendiendo estratigráficamente hasta llegar al contacto con las Lodolitas de Aguacaliente), coincidiendo con el depósito de la facies sedimentaria Ampho (que entre otras cosas tiene buena madurez textural y composicional, armazón clasto-soportado, con muy poco contenido de matriz arcillosa y picos de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

Es posible que la variación composicional de  $\text{K}_2\text{O}$  favorezca la disminución de illita hacia el tope de las Arenitas de San Antonio, ya que a medida que se va profundizando debería ocurrir mayor inserción de potasio para formar illitas (similar a lo descrito por Bonilla-Osorio et al. (2011)), aunque hay que revisar esta información cuidadosamente debido a la baja correlación existente entre el ancho de picos de minerales arcillosos glicolados con respecto a los orientados naturalmente (**Figura 3-18**), conllevando

a que el índice de cristalinidad de la illita refleje una fuente de cristalina rocas cristalina (ígneas y/o metamórficas) o sedimentarias antiguas, mas no neoformadas durante la diagénesis.

Llegando a la Formación Lodolitas de Aguacaliente, ocurre una disminución en el contenido de caolinita desde el tope de las Arenitas de San Antonio, lo que sugiere un mayor tiempo de transporte en el ambiente sedimentario, es decir una fuente de aporte más continentalizada hacia la parte inferior y media de las Arenitas de San Antonio, o bien que las capas de la facies sedimentaria Ampho son muy arenosas y poco arcillosas (ambos argumentos no necesariamente son excluyentes entre sí). En las Arenitas de San Antonio el contenido de illita va disminuyendo, mientras que el de interestratificados Ill/Sme se mantiene constante desde la base, correlacionándose con menor disponibilidad de  $K_2O$  y  $MgO$ , sumado a que la sucesión sedimentaria es más cuarzosa y cuenta con mayor madurez textural y composicional (como se ve en la petrografía de las SDP ANB-4060, ANB-4064 y ANB-4068; **Figuras 3-20, 3-21 y 3-22**), que sugiere que la tasa de sedimentación fue constante, de capas granocrecientes y cada vez más espesas hacia el tope.

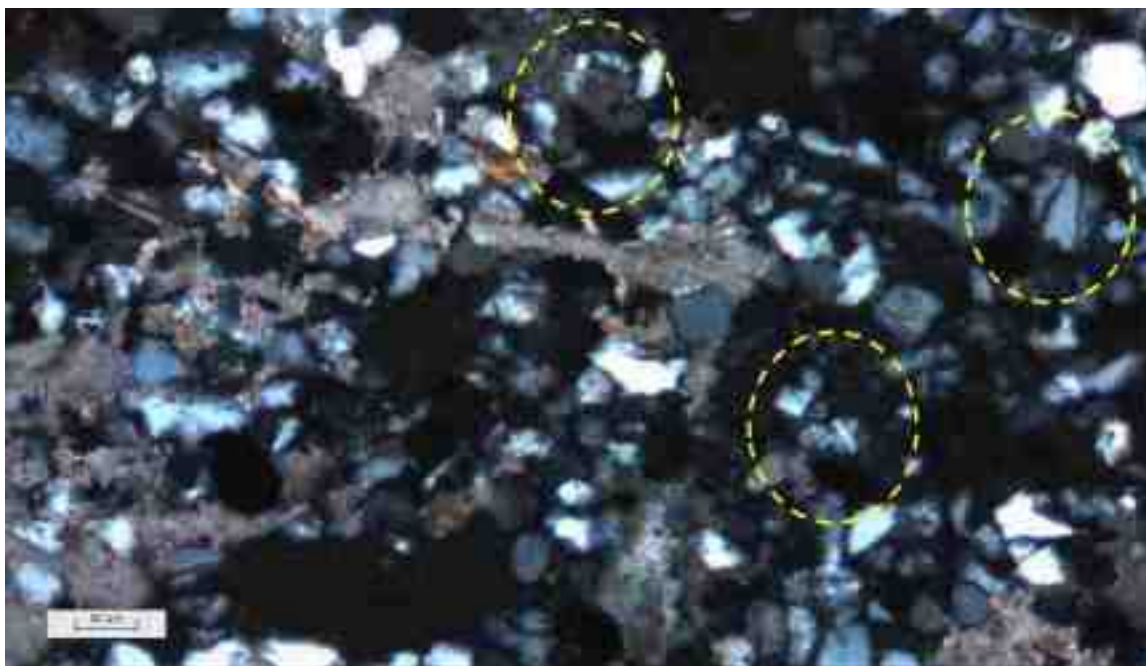
Ya en las Lodolitas de Aguacaliente, ocurre un aumento de minerales arcillosos con respecto a las Arenitas de San Antonio, coincidiendo con un aumento en el contenido de feldespatos y en general, con un aumento significativo en el contenido de potasio, dando como consecuencia que se facilite la disolución y recristalicen minerales arcillosos (Niu et al., 2000), principalmente interestratificados Ill/Sme. El contenido de  $K_2O$  viene reduciéndose en su concentración a medida que se asciende estratigráficamente desde la parte inferior del Grupo Guadalupe, para luego comenzar a aumentar a lo largo de la Formación Lodolitas de Aguacaliente. Destaca también que hacia el tope de las Lodolitas de Aguacaliente aumenta el contenido de  $Fe_2O_3$ , a diferencia de las Arenitas de San Antonio y las Arenitas de San Luis de Gaceno, debido al carácter marino que tiene el ambiente de formación de esta unidad. Cuando los contenidos de  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ , y  $Al_2O_3$  son relativamente altos (tal como ocurre en la base de las Arenitas de San Antonio), es posible afirmar que el ambiente tiene influencia tanto marina como continental, ya que además este trazador geoquímico coincide con la acumulación de glauconita (Galán et al., 1989; Bonilla-Osorio et al., 2011; Ulmer-Scholle et al., 2015).

Los feldespatos encontrados con petrografía y DRX en la parte media de la Formación Lodolitas de Aguacaliente (ANB-4088 y ANB-4093) indican que este material es de origen terrígeno mas no diagenético, a pesar de que se depositaron en un ambiente con menor energía que el de las Arenitas de San Antonio y las Arenitas de San Luis de Gaceno. Para recordar, la parte inferior y superior del Grupo Guadalupe tienen facies sedimentarias predominantemente Alfl, Ampho y ACgdc (arenosas, mejor

seleccionadas, con menor contenido de lodo, clastosoportadas, **Tabla 3-3**) cerca del contacto con las Lodolitas de Aguacaliente; mientras que estas últimas son matriz-soportadas, más lodosas, muestran incidencia de eventos de alta energía esporádicos durante un ciclo sedimentario más tranquilo, llegando al punto de acumular capas con abundantes fragmentos fósiles (es decir, facies sedimentarias LAoalce, LAcfo y LMtal, **Tabla 3-3**).

Por su posición estratigráfica y armazón interno, se puede afirmar que los feldespatos encontrados en la parte media de la Formación Lodolitas de Aguacaliente provienen de la misma fuente que del resto del Grupo Guadalupe, apoyado por la poca variabilidad de los valores del índice de Kübler de la illita (que justifican origen cristalino, ya sea ígneo o metamórfico), y la proporción de caolinita (baja, que sugiere poco transporte) (Ulmer-Scholle et al., 2015), habiéndose transportado en un flujo viscoso que preservó matriz terrígena (**Figura 4-2**), y no fue lo suficientemente energético como para mejorar la madurez textural y granulometría de la roca.

**Figura 4-2.** Fotografía de la SDP 229IIC-JDV-ANB-4088. En amarillo se observan granos de feldespatos, los cuales se encuentran en una roca matriz-soportada con una granulometría muy fina (tamaño limo). El armazón cementado por carbonatos indica que la roca experimentó condiciones de eogénesis-mesogénesis temprana (Worden & Burley, 2003).



La razón por la que se ve favorecida la formación de interestratificados Ill/Sme radica en que los índices de cristalinidad de la illita muestran que se alcanzaron condiciones de epizona (**Figura 3-17**), lo cual

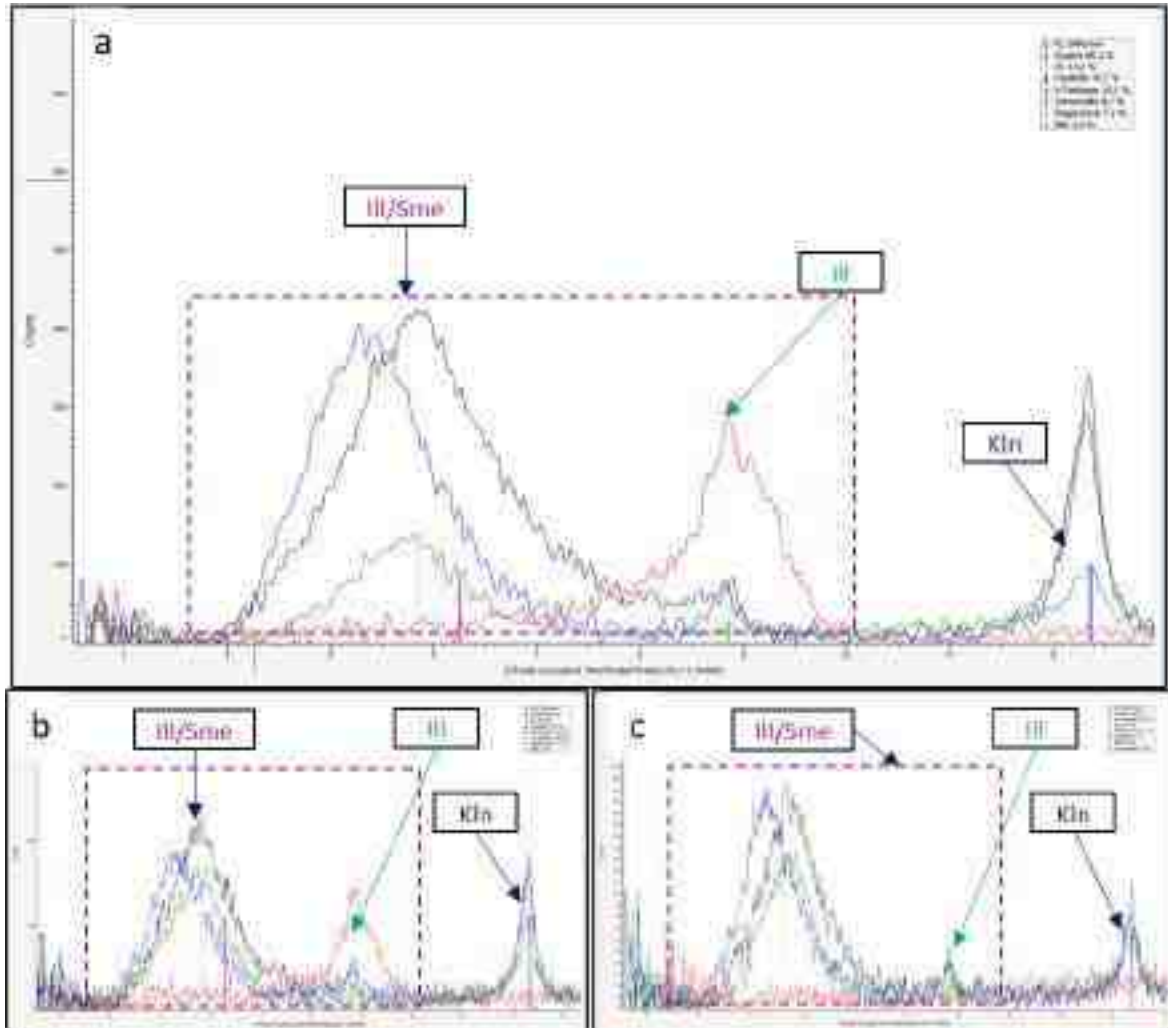
no es coherente con los procesos diagenéticos reconocidos petrográficamente (cementación de carbonatos de tipo extensivo y periférica reemplazando parcialmente los granos), que indican condiciones de eogénesis-mesogénesis temprana (Worden & Burley, 2003), tal como se observa en las **Figuras 3-24, 3-25 y 4-2**.

En la **Figura 3-17** se observa una disminución progresiva en el grado de illitización de los interestratificados Ill/Sme, es decir que aumenta el contenido de Ill/Sme en una proporción mayor al de la illita (**Figura 4-3**), lo cual sugiere menos inserción de potasio en la estructura de los interestratificados para formar illita (Rodríguez-Esquivel & Sánchez-Quíñonez, 2021), correspondiendo a un grado de diagénesis menor al visto en las Arenitas de San Antonio. Esto se corrobora con la descripción sedimentológica y estratigráfica, ya que las estructuras sedimentarias son más fácilmente visibles en las Lodolitas de Aguacaliente en comparación con las otras unidades.

La Formación Arenitas de San Luis de Gaceno se caracteriza por mostrar un aumento en la energía del ambiente deposicional, ocurriendo un retrabajamiento del material previamente depositado, razón por la cual las cuarzoarenitas (de las facies sedimentarias Alfl y Ampho, descritas en la **Tabla 3-3**) a pesar de ser rocas siliciclásticas, tienen alto contenido de fosfatos a la par que se acumulan sedimentos cada vez más siliciclásticos producto de una regresión en la cuenca. La ciclicidad de estas facies vistas en la parte inferior de las Arenitas de San Luis de Gaceno, que se reflejan como conjuntos de capas granocrecientes cada vez más gruesas, del tipo *coarsening-upward trends* (Catuneanu et al., 2009), y progradantes (es decir, que contienentalizan cada vez más, como lo refleja la curva eustática) corresponden a parasecuencias.

En la parte superior de las Arenitas de San Luis de Gaceno, nuevamente aparecen rocas de las facies Alfl (arenitas de grano muy fino a medio, con laminación flaser y grados de bioturbación variable) intercaladas cíclicamente con rocas de facies ACgdc (arenitas de grano grueso a conglomerados). En la **Figura 3-17** se observa que el aumento progresivo de caolinita indica que los sedimentos han pasado por un proceso de transporte más prolongado con respecto a las Lodolitas de Aguacaliente; mientras que el aumento de illita y ausencia de interestratificados Ill/Sme sugiere que no hay suficiente disponibilidad de MgO y K<sub>2</sub>O para formarlos. Se descarta la illitización (sustitución de Ca y Mg por K), ya que no hay estructuras neoformadas debido a que los índices de cristalinidad indican epizona (ASLG-055 con IK=0,163).

**Figura 4-3.** Difractogramas de muestras procedentes de la Formación Lodolitas de Aguacaliente. Nótese que los interestratificados Ill/Sme se encuentran en altísima proporción en esta muestra, mostrando además bajo grado de illitización. Fases minerales arcillosas: Caolinita (Kln), illita (Ill), interestratificado illita-esmectita (Ill/Sme). a) LAC-044. b) LAC-048. c) LAC-047



No obstante, una de las muestras (ASLG-059) tiene índices de cristalinidad correspondientes a diagénesis temprana ( $IK=0,808$ ), siendo la única muestra con el único dato diferente a epizona reportado para toda la Quebrada Aguacaliente (**Figura 3-17**). Así mismo, otro factor que dificulta la neoformación de minerales arcillosos en las Arenitas de San Luis de Gaceno es la alta madurez composicional que tienen las rocas de estos segmentos (concretamente cuarzoarenitas, lo que dificulta la disponibilidad de  $Al_2O_3$  y  $K_2O$  para formar dichos filosilicatos). En cuanto a la diagénesis, petrográficamente se reconoció matriz arcillosa (en proporción  $<1\%$  para la parte basal de las Arenitas de San Luis de Gaceno, concretamente facies Alfl y Ampho; y entre 5-15% para el tope, facies Alfl y ACgdc, tal como se observa en la **Figura 4-4**), compactación y cementación por rellenos arcillosos

(caolinita según lo mostrado petrográficamente y mediante DRX), lo que para (Worden & Burley, 2003) corresponde a la eogénesis tardía.

Complementariamente, el análisis FWHM (entre muestras orientadas naturalmente y glicoladas) y determinación de índices de Kübler de illita realizado exclusivamente en rocas reservorio (Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno), reafirman una proveniencia ígnea o metamórfica para estas rocas, ya que muestran un valor de correlación confiable de 0,9539; tal como lo muestra la **Figura 3-19**. Por lo anterior, no se ven reflejados procesos diagenéticos que superen la mesogénesis temprana (Worden & Burley, 2003).

**Figura 4-4.** Armazón de la SDP 229IIC-JDV-ANB-4237, correspondiente a la parte superior de las Formación Arenitas de San Luis de Gaceno. Se observa el armazón, predominantemente matriz soportado, debido a la presencia de minerales arcilla indiferenciados (posiblemente caolinita según lo visto en la **Figura 3-17**), en conjunto a cemento ferruginoso y fosfático.



## 4.2 Ambiente de formación

Junto a las facies sedimentarias definidas, en los **Anexo A**, y **Anexo F** se dibujaron curvas eustáticas para facilitar la observación de cambios relativos del nivel del mar en la sección estratigráfica. Se

construyó siguiendo la metodología de Dabrio & Polo (1996). Igualmente, los segmentos definidos durante la descripción estratigráfica se agruparon dentro de ambientes sedimentarios, con base en la distribución de facies sedimentarias, petrofacies, parasecuencias/ciclicidad de las capas, y los cambios de nivel del mar; añadiendo superficies regresivas (RS), superficies transgresivas (TS), y superficies de máxima inundación (MFS). Una columna generalizada elaborada a partir del **Anexo A** se observa en la **Figura 4-5**.

#### 4.2.1 Formación Arenitas de San Antonio

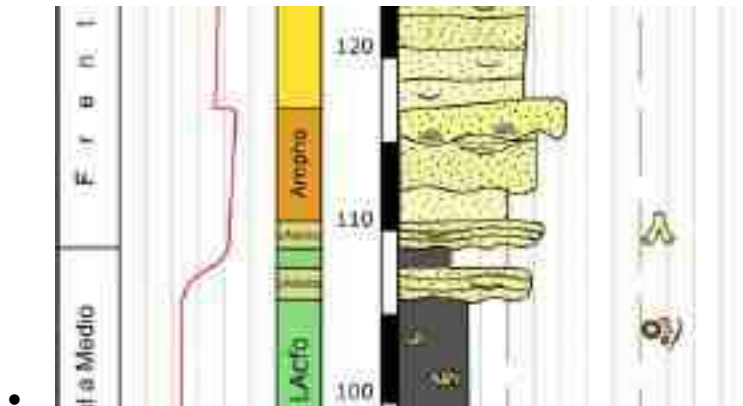
Iniciando con el tope de la Formación Chipaque, y la Formación Arenitas de San Antonio, se tienen las siguientes observaciones:

- El tope de la Formación Chipaque (segmento A) se depositó en mar abierto proximal a distal, ya que contiene predominantemente rocas siliciclásticas de grano fino (lodolitas y arcillolitas negras, parcialmente cubiertas), intercaladas con conjuntos de capas delgadas de arenitas de grano muy fino, no mayores a 5 m de espesor. Una descripción completa de esta unidad la presenta (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996).
- La Formación Arenitas de San Antonio comienza con el Segmento B, el cual fue interpretado como frente costero medio, ya que la sucesión de facies Alfl (arenitas con laminación flaser, clastosoportadas, con matriz variable con espesores de hasta 30 m dentro del segmento) se intercalan cíclicamente con rocas de la facies LAcfo (lodolitas negras con laminación lenticular); formando parasecuencias de capas granocrecientes en la base (progradacionales) y capas masivas (sin cambios granulométricos hacia el tope, es decir agradacionales), donde se presentan cíclicas subidas del nivel del mar que coincide con la profundización de las facies Alfl hacia facies LAcfo. Igualmente, después de profundizar e ir paulatinamente somerizando, se depositan capas (no mayores a 2 m) de facies LAoalce (arenitas y lodolitas con laminación ondulosa), el cual es lo bastante somero para tener bimodalidad en la sedimentación, así como permitir la acumulación de glauconita (Galán et al., 1989; Seilacher, 2007), ya que hay disponibilidad de material fosfático, como se observa en la **Figura 3-4**.
- Pasando al Segmento C, ocurre una pequeña profundización en la cuenca, donde el ambiente deposicional pasa a ser frente costero inferior a medio, debido a una marcada caída del nivel del



- En el Segmento D, el ambiente pasa a ser frente de playa superior, ya que se empiezan a acumular conjuntos de capas progradacionales (granocrecientes), ya que las facies sedimentarias van somerizando rápidamente (en 20 metros de sección, se tiene la sucesión LAcfo-LAolce-LAcfo-LAolce-Ampho-Alfl, como se observa en la **Figura 4-6**), además de que se observa un aporte de material continental (cuarzoarenitas de grano fino a medio, en conjuntos de capas de hasta 5 m de espesor) y marino (fragmentos fosfáticos tales como fragmentos óseos, pellets e intraclastos).

**Figura 4-6.** Cambio de facies visto en el tope del Segmento C y base del Segmento D. La somerización progresiva, acompañada de abruptas profundizaciones (pero no hasta alcanzar facies profundas), es lo que caracteriza los Segmentos D y E; y en general a gran parte de la Formación Arenitas de San Antonio.



- En el tope de las Arenitas de San Antonio, hacia el Segmento E, se llegan a facies de playa, ya que las arenitas son de grano grueso a conglomeráticas, donde además se depositan partículas fosfáticas en alta proporción. La petrografía de las secciones ANB-4060, ANB-4064 y ANB-4068 muestra muy buena madurez textural y composicional, y la sucesión de capas corresponde a parasecuencias primeramente agradacionales (Segmento D y base del Segmento E), para luego tornarse agradacionales.

De esta forma, las Arenitas de San Antonio se depositaron durante una etapa regresiva del nivel del mar (posiblemente Lowstand System Tract o LST en el sentido de Catuneanu et al. (2009)); debido a que se reporta una superficie regresiva (RS) a límite de secuencia hacia la base del Campaniano Temprano, y una superficie transgresiva (TS) que dará lugar a una transgresión durante el Campaniano Tardío (Guerrero, 2002a, 2002b). Varios autores (Perez & Salazar, 1978; Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996; Guerrero et al., 2000; Bonilla-Osorio et al., 2011) le atribuyen una edad de Campaniano Temprano a esta unidad, además de presentar una sucesión de facies similar.

#### 4.2.2 Formación Lodolitas de Aguacaliente

Pasando a las Lodolitas de Aguacaliente, se tienen las siguientes observaciones con respecto al ambiente sedimentario:

- El Segmento F corresponde a mar abierto proximal, ya que lo que más predomina son rocas de la facies LAcfo; es decir lodolitas negras parcialmente cubiertas, con laminación lenticular discontinua, donde los lentes son de arenita muy fina, y son muy escasos. En todo el segmento se acumulan fragmentos fosfáticos y restos de peces, lo que sugiere influencia marina, además de que hay capas tabulares de hasta 3 m de espesor de la facies LAoalce; las cuales están limitadas por superficies erosivas y muestran un armazón más clastosoportado. La presencia de estas arenitas subtabulares de poco espesor dentro de facies marinas (LAcfo y LMtal), la facies a la que pertenecen (LAoalce), y el hecho de tener estructuras tipo hummocky, tanto en este segmento como en todos los superiores de la Formación Lodolitas de Aguacaliente, sugieren que estuvieron influenciadas en mayor o menor medida por tormentas.
- El Segmento G muestra una progresiva somerización, donde comienzan a aparecer arenitas con laminación ondulosa, en conjuntos de capas granocrecientes y con evidencias de bimodalidad y retrabajamiento por bioturbación (LAoalce, **Figura 3-8**). Debido a la persistencia en la bimodalidad de sedimentación (lodo y arena), el ambiente de formación en este punto corresponde a frente costero inferior a mar abierto proximal.
- En el Segmento H, el mar profundiza en gran medida, permitiendo la acumulación de capas calcáreas (biomicritas fosilíferas a empaquetadas, con fragmentos de conchas, restos óseos, pellets e intraclastos), tabulares, de hasta 50 cm de espesor, intercaladas dentro de lodolitas negras con laminación lenticular (escasa) y arcillolitas negras sin estructuras sedimentarias aparentes. Cuando dichas lodolitas se acumulan es cuando en la sección estratigráfica se llega a la superficie de máxima inundación o MFS por sus siglas en inglés Maximum flooding surface (**Figura 4-5**), ya que dichas arcillolitas representan una ausencia prácticamente total de estructuras sedimentarias, reflejando baja energía y condiciones anóxicas por su color negro (**Figura 3-10**); sin mencionar su cercanía con capas fosilíferas que se acumularon durante un periodo de tiempo similar, siendo de alta ciclicidad y reflejando un proceso de acumulación retrogradacional (Catuneanu et al., 2009;

Rivera et al., 2018). En este segmento se reportan los mayores valores de MnO, MgO, K<sub>2</sub>O y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lo que refleja condiciones marinas (alcalinidad) anóxicas, siendo por lo tanto el ambiente de formación un mar abierto distal. De igual manera (y no necesariamente excluyente), la razón por la cual las lodolitas tienen un aspecto macizo puede deberse a procesos de acumulación en masa, persistentes en el tiempo, característico de las condiciones batiales de fondo marino.

- Una vez alcanzada la superficie de máxima inundación (MFS), vista en la **Figura 4-5**, en el Segmento I comienza un conjunto de capas arenosas agradacionales (muy homogéneas, que reflejan aumento en la energía por presencia de laminación ondulosa que progresivamente pasa a flaser y son de tipo *coarsening-upward trends*, lo que indica facies Alfl), tal como se observa en la **Figura 3-11**. Dichas arenitas tienen fragmentos fosfáticos y corresponden a un ambiente de playa distal, tal como lo indica el cambio en la laminación, además del progresivo cambio de morfología de capas tabulares a subtabulares.
- En el Segmento J se tiene una nueva caída en el nivel del mar, ya que las arenitas pasan de tener laminación flaser y ser friables (clasto soportadas, mostrado por oquedades desarrolladas en el lecho del afloramiento, **Figura 3-11**), a ser más lodosas y tener mayor contenido de matriz y cemento. Las arenitas y limolitas no están dispuestas en un conjunto masivo como en el Segmento I, sino que se encuentran a modo de capas métricas discretas que desarrollan estructuras tipo hummocky en muestra de mano y sección delgada (**Figura 3-25**), las cuales según la ciclicidad en que se presentan se le atribuyen a la facies LAoalce, la cual está siendo influenciada por tormentas (razón por la cual la SDP ANB-4093 tiene contacto erosivo como se observa en **Figura 3-27**, y en la parte arenosa hay muy buena selección textural, moderado a alto empaquetamiento y cementación por carbonatos, ya que hay disponibilidad por tratarse de un ambiente marino). Por lo tanto, el ambiente profundiza, tratándose de mar abierto proximal. Algo que llama la atención es que las arenitas hacia el tope se tornan granocrecientes, pero están apiladas en capas masivas de hasta 2 m de espesor; tendencia que continuará hasta entrar y ascender por la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno.

De esta manera, la Formación Lodolitas de Aguacaliente se encuentra limitada de la Formación Arenitas de San Antonio por una superficie transgresiva, debido a que aunque ocurran periodos de profundización (marcado por las facies LMtal y LAcof) y somerización (facies LAoalce y Alfl); la unidad se depositó durante una etapa de subida del nivel del mar, que incidió en la acumulación de sedimentos

en 2 regímenes distintos: el primero de ellos mientras el mar ascendía (profundización de facies, a modo de parasecuencias retrogradacionales que corresponden a los intervalos F, G y H), y luego agradacionales-progradacionales (por la acumulación de capas homogéneas con gran espesor, y luego el inicio de parasecuencias que predominaran en la base de la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno, abarcando los intervalos I y J).

De esta manera, siguiendo a Catuneanu et al. (2009), se tendría un Transgressive System Tract o TST, que abarca la parte inferior de las Lodolitas de Aguacaliente hasta la superficie de máxima inundación (MFS), y un Highstand System Tract o HST, que abarca la parte superior de las Lodolitas de Aguacaliente desde la superficie de máxima inundación hasta el contacto con la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno. Todo lo anterior en concordancia para la edad reportada para los ciclos de transgresión y regresión en esta cuenca, siendo el tope de la secuencia 6 definida por Cooper et al. (1995) y Guerrero (2002a, 2002b).

### 4.2.3 Formación Arenitas de San Luis de Gaceno

Finalmente, se tiene la interpretación de ambientes para los segmentos K y L de la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno. Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) presentan una descripción detallada de la Formación Guaduas en el Caño La Paz, la cual se encuentra en gran medida cubierta y aflorando muy esporádicamente, correspondiendo la parte basal de esta unidad al Segmento H de la columna presentada en los **Anexos A y F**, así como la **Figura 4-5**.

- El Segmento K corresponde a un ambiente de frente de playa proximal, ya que se tienen parasecuencias definidas por conjuntos de capas granocrecientes, que en principio son progradacionales (cambian a facies continentales rápidamente, pasando de facies LAcfo (lodolitas negras) del tope de las Lodolitas de Aguacaliente, a facies Ampho (cuarzoarenitas con muy buena madurez textural y área de aporte continental y marino) y Alfl, durante una regresión forzada ocurrida en el Maastrichtiano temprano, reportada por otros autores (Cooper et al., 1995; Guerrero, 2002a; Bonilla-Osorio et al., 2011). La razón por la que se trata de una zona cercana a la línea de costa radica en la abundancia de fragmentos fosfáticos y madrigueras *Thalassinoides isp.*, lo cual evidencia alta productividad biológica en una zona de plataforma bastante somera (Seilacher, 2007), lo cual además explicaría la ausencia de laminación flaser en la totalidad del conjunto, ya que la bioturbación habría borrado parcial o totalmente las estructuras sedimentarias originales. La difracción de rayos X muestra que la base de la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno tiene

poco aporte de caolinita, lo que refleja un transporte no tan prolongado y un régimen energético moderado a alto, ya que las rocas de facies Ampho no tienen matriz (pero si alto contenido de fosfatos); por lo que un símil actual pueden ser los frentes de playa formados por deriva litoral, que constantemente progradan la línea de costa y retrabajan sedimentos marinos y continentales que son constantemente depositados.

- En el Segmento L, las facies de playa han progradado completamente, hasta conformar un régimen de sedimentación agradacional, en el cual las facies ACgdc (arenitas de grano grueso a conglomerados) y Alfl (arenitas con laminación flaser), se apilan en conjuntos de capas granodecrecientes. Considerando que en este punto las rocas tienen mayor contenido de matriz y muestran imbricación en los granos, se propone un ambiente de playa con canales distributarios, ya que hay aporte de caolinita en alta proporción (lo que sugiere amplio transporte), acompañada de minerales pesados ultraestables, así como el depósito de rocas con muy buena madurez composicional (fosfatos desaparecen, tal como lo muestra la **Figura 3-17**, y la petrografía de las muestras ANB-4237 y ANB-4240). La mineralogía se complementa con la fluorescencia, ya que hay altos contenidos de  $\text{TiO}_2$  asociados al tope de las Arenitas de San Luis de Gaceno. Hay que considerar también la presencia de *Thalassinoides isp.* en la base de las capas de granulometría más fina (**Figura 3-15**), lo cual demuestra que a medida que un canal va perdiendo energía, permite que los organismos excavadores construyan sus madrigueras.

Con base en la interpretación de los segmentos, y juzgando el carácter progradacional y luego agradacional de la acumulación de facies marinas con influencia continental, es posible afirmar que la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno corresponda a parasecuencias depositadas durante un bajo nivel del mar tras una regresión forzada en la base de dicha unidad (hacia el Maastrichtiano temprano), es decir un *Lowstand System Tract* o LST, el cual culmina hacia el tope de las Arenitas cuando comienza el depósito de la Formación Guaduas.

### 4.3 Prospectividad de arenitas bituminosas en lo que respecta a reservorios

Complementando el análisis de facies y la determinación de los ambientes sedimentarios, en la **Figura 4-7** y se resumen los procesos que han incidido en la formación de arenitas dentro de las Arenitas de

San Antonio, las capas arenosas de las Lodolitas de Aguacaliente, y las Arenitas de San Luis de Gaceno, con el fin de determinar su potencial como potenciales reservorios de arenita bituminosa.

Dicho diagrama se interpreta de manera similar a una secuencia paragenética: Las filas representan los procesos geológicos que han ocurrido en las rocas, mientras que las columnas representan la temporalidad de los eventos. Como se trata de una sección estratigráfica con base y tope conocidos y espesor medido, al igual que se conoce la edad mediante palinomorfos (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996), la temporalidad viene representada por los segmentos de las formaciones descritas en los **Anexos A y F**, así como en las **Figuras 4-7 y 4-8**. Las columnas también facilitan la observación de un listado de características propias de cada potencial reservorio.

**Figura 4-7.** Diagrama de procesos incidentes en la formación de arenitas como potenciales reservorios de arenita bituminosa, dentro de la Quebrada Aguacaliente. Formación Arenitas de San Antonio.

| Formación                                     |                                            | Arenitas de San Antonio |                             |            |                       |                       |            |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| Proceso geológico                             |                                            | Segmento trabajado      |                             |            |                       |                       |            |
|                                               |                                            | Arenitas B (base)       | Arenitas B (medio-superior) | Arenitas C | Arenitas D (inferior) | Arenitas D (superior) | Arenitas E |
| System Tract                                  | Lowstand System Tract                      |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Transgressive System Tract                 |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Highstand System Tract                     |                         |                             |            |                       |                       |            |
| Tipo de parasecuencia - Patrón de apilamiento | Progradacional                             |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Retrogradacional                           |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Agradacional                               |                         |                             |            |                       |                       |            |
| Proceso sedimentario principal                | Precipitación química                      |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Flujo laminar - decantación                |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Bimodalidad                                |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Deriva litoral                             |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Canales                                    |                         |                             |            |                       |                       |            |
| Eventos sedimentarios secundarios             | Influencia de tormentas                    |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Bioturbación - retrabajamiento del armazón |                         |                             |            |                       |                       |            |
| Diagénesis                                    | Compactación                               |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Contacto cóncavo-convexo                   |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Contacto suturado                          |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Matriz arcillosa                           |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Cemento de esmectita                       |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Cemento de caolinita                       |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Recristalización                           |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Illitización / Sericitización              |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Cloritización                              |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Muscovitización                            |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Saussuritización                           |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Meteorización                              |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | Migración de hidrocarburos                 |                         |                             |            |                       |                       |            |
| Espesor                                       | <1 m                                       |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | 1-10 m                                     |                         |                             |            |                       |                       |            |
|                                               | >10 m                                      |                         |                             |            |                       |                       |            |

**Figura 4-8.** Diagrama de procesos incidentes en la formación de arenitas como potenciales reservorios de arenita bituminosa, dentro de la Quebrada Aguacaliente. Formaciones Lodolitas de Aguacaliente y Arenitas de San Luis de Gaceno

| Formación                                     |                                            | Lodolitas de Aguacaliente |            |            |            | Arenitas de San Luis de Gaceno |                     |            |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|------------|------------|------------|--------------------------------|---------------------|------------|
| Proceso geológico                             |                                            | Segmento trabajado        |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               |                                            | Arenitas F                | Arenitas G | Arenitas I | Arenitas J | Arenitas K inferior            | Arenitas K superior | Arenitas L |
| System Tract                                  | Lowstand System Tract                      |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Transgressive System Tract                 |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Highstand System Tract                     |                           |            |            |            |                                |                     |            |
| Tipo de parasecuencia - Patrón de apilamiento | Progradacional                             |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Retrogradacional                           |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Agradacional                               |                           |            |            |            |                                |                     |            |
| Proceso sedimentario principal                | Precipitación química                      |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Flujo laminar - decantación                |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Bimodalidad                                |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Deriva litoral                             |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Canales                                    |                           |            |            |            |                                |                     |            |
| Eventos sedimentarios secundarios             | Influencia de tormentas                    |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Bioturbación - retrabajamiento del armazón |                           |            |            |            |                                |                     |            |
| Diagénesis                                    | Compactación                               |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Contacto cóncavo-convexo                   |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Contacto suturado                          |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Matriz arcillosa                           |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Cemento de esmectita                       |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Cemento de caolinita                       |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Recristalización                           |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Illitización / Sericitización              |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Cloritización                              |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Muscovitización                            |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Saussuritización                           |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Meteorización                              |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | Migración de hidrocarburos                 |                           |            |            |            |                                |                     |            |
| Espesor                                       | <1 m                                       |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | 1-10 m                                     |                           |            |            |            |                                |                     |            |
|                                               | >10 m                                      |                           |            |            |            |                                |                     |            |

A pesar de que en el área de estudio (Quebrada Aguacaliente, municipio de San Luis de Gaceno) no se encontraron arenitas bituminosas, es importante evaluar sedimentológica, estratigráfica y geoquímicamente las rocas aflorantes, con el fin de conocer mejor los elementos del sistema petrolífero, acotando en futuros trabajos nuevas técnicas de evaluación que partan de datos duros recolectados durante el desarrollo de esta tesis de Maestría.

En el sentido de Posamentier & Allen (1999), el depósito de los mejores reservorios de hidrocarburos ocurre durante los ciclos sedimentarios de alto nivel o *Highstand System Tract*, ya que es cuando la agradación domina sobre la progradación, lo que da lugar a la formación de parasecuencias muy espesas, granocrecientes hacia el tope y con buena continuidad de facies en la vertical (Catuneanu et al., 2009); además que se depositan justo después de los *Transgressive System Tract*, que es cuando se

alcanzaron las facies marinas profundas y (por lo tanto) condiciones anóxicas para preservar roca generadora, por lo que (dependiendo de la batimetría de la cuenca) existiría continuidad en la vertical y lateral para que hayan rutas permeables que permitan la migración de hidrocarburos una vez se alcancen condiciones de ventana de generación, estimadas en la mesogénesis alta-telogénesis (Gómez et al., 2020).

En el Grupo Guadalupe se tiene este tipo de roca reservorio, ya que las denominadas Arenitas I (**Figura 4-8**) se depositaron directamente después de que el ambiente sedimentario alcanzo la máxima inundación (es decir durante un *HST*) hacia la parte media-superior de la Formación Lodolitas de Aguacaliente, la cual también por efecto de las tormentas retrabajó el almacén de la roca a la par que depositó sucesiones granocrecientes y engrosantes hacia el tope, confiriéndole buena selección textural y porosidad a la roca. Las denominadas Arenitas J también comparten estas características texturales. No obstante, su prolongada influencia debido a las tormentas, y continuos ciclos de profundizaciones-somerizaciones progresivas permitió el depósito de reservorios con muy bajo espesor.

Pasando a otro tipo de reservorio de interés están las Arenitas D y E (tope de la Formación Arenitas de San Antonio), las cuales tienen buena porosidad debido a su alta madurez textural y composicional (entre 5 y 10%), cuentan con poca matriz y cementos, almacén retrabajado (lo que forma fracturas con porosidad secundaria), y gran espesor acumulado (capas mayores a 10 metros), en sucesiones progradantes-gradacionales. No obstante, estas arenitas no tienen permeabilidad con rocas generadoras infrayacentes de la Formación Chipaque dentro del área de estudio, la cual para algunos autores es la mejor roca generadora del piedemonte llanero (Cazier et al., 1995; ANTEK S.A, 2014), ya que entre los segmentos D y E se localizan intercalaciones de facies (LAoalce, LAcfo y Alfl) de los segmentos B y C, que actúan como sellos locales.

Por último, un tercer tipo de reservorios se localizan en las Arenitas K y L, las cuales varían entre sí por la geometría de apilamiento de los estratos (progradacionales en K inferior, gradacionales en los demás), ciclicidad de las facies acumuladas (Arenitas K tienen Alfl y Ampho, mientras que L tiene Alfl y ACgdc) y cambios en la porosidad (Arenitas K con porosidades entre 15-20%, mientras que Arenitas L cuentan con 5-10%). A pesar de estos factores, y de haberse depositado tras una caída del nivel del mar en un *LST*, estas arenitas corresponden al mejor reservorio encontrado y descrito en la sección Quebrada Aguacaliente, debido en gran medida a su espesor y alta madurez textural y composicional; ligada a procesos de evolución de la línea de costa de una frente de playa con deriva litoral, a una playa

con canales distributarios. No obstante, dos de las razones por las cuales no se encuentra arenita bituminosa (o siquiera manifestaciones de hidrocarburo) en estratos del Grupo Guadalupe en el área de San Luis de Gaceno son justificables gracias a los datos compilados en este trabajo.

La primera de ellas es el grado de diagénesis. Todas las rocas trabajadas mediante DRX muestran que se alcanzaron condiciones de eogénesis-mesogénesis (incluyendo las Lodolitas de Aguacaliente, que cuenta con alto contenido de aloquímicos), cuando los hidrocarburos alcanzan la ventana de generación en la mesogénesis tardía-telogénesis, según el tipo de materia orgánica acumulada en el Grupo Guadalupe en otros puntos de la cuenca Llanos (ANTEK S.A, 2014), por lo que la parte media del Grupo Guadalupe no habría alcanzado condiciones de generación en este punto de la cuenca.

La segunda razón obedece a un criterio estructural-estratigráfico. Debido a que la sección descrita se encuentra con polaridad invertida (tal como lo muestran los *Thalassinoides isp.* encontrados en varios intervalos estratigráficos), y que esto se atribuye al levantamiento de la cordillera durante el Paleoceno, siguiendo el trazo de fallas del piedemonte llanero como la Falla de Tesalia (Branquet et al., 2002), no habría sincronismo entre el pico de generación de hidrocarburos reportado para la Formación Chipaque (estimado entre 42-23 Ma, es decir Eoceno Medio-Mioceno Temprano; según Zamora et al. (2008)); y la potencial trampa; ya sea de carácter estructural o estratigráfica.

La trampa estructural no sería efectiva, porque las capas para el momento de generación estarían invertidas, y el petróleo habría migrado percolando la Formación Une o por el trazo de la Falla de Tesalia (que de hecho, yuxtapone un bloque estructural donde se encuentra la sección estratigráfica de este estudio, como se observa en la **Figura 1-3**); mientras que la trampa estratigráfica no sería efectiva porque a pesar de acumularse grandes espesores de arenitas friables en las Arenitas de San Antonio y las Arenitas de San Luis de Gaceno, se interdigitan con facies arcillosas.



## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

El presente trabajo permitió describir con detalle parte de la secuencia estratigráfica aflorante en la Quebrada Aguacaliente, concretamente las formaciones Arenitas de San Antonio, Lodolitas de Aguacaliente y Arenitas de San Luis de Gaceno, que en sentido de Guerrero & Sarmiento-Pérez (1996) corresponden a las unidades del Grupo Guadalupe, definidas en el área de San Luis de Gaceno (piedemonte llanero). De este trabajo se elaboraron 2 columnas estratigráficas (descritas en campo a escala 1:200 y graficadas a escala 1:500 y 1:1000), en las cuales se identificaron 7 facies sedimentarias, que comprenden rocas de composición terrígena, calcárea y mixta.

De base a tope las 3 formaciones (junto al tope de la Formación Chipaque y la base de la Formación Guaduas) fueron caracterizadas en 13 segmentos, los cuales a grandes rasgos muestran variaciones cíclicas de un ambiente marino con influencia continental; identificándose 2 ciclos de caída y un ciclo de subida del nivel del mar que abarcan desde el Campaniano hasta el Maastrichtiano. Se inicia con facies sedimentarias que reflejan un mar abierto proximal a distal (Formación Chipaque, desde el Campaniano Temprano), que van progradando a un frente costero con incidencia de deriva litoral tras un proceso de regresión (Formación Arenitas de San Antonio), acompañado de pequeñas profundizaciones (subidas del nivel del mar, con influencia de tormentas; correspondiendo a cuarzoarenitas y lodolitas negras con laminación variable de lenticular a flaser, matriz soportadas, con aloquímicos y glauconita) a ambientes de mar abierto proximal, alcanzado durante el Campaniano Tardío.

Posteriormente, inicia un ciclo transgresivo (base de las Lodolitas de Aguacaliente), en la cual las facies de frente costero (arenosas y conglomeráticas, clastosoportadas, masivas o con laminación flaser, con alto contenido de partículas fosfáticas, progradacionales del tipo *coarsening-upward trends*) retrogradan rápidamente a facies de mar abierto proximal, alcanzando la máxima inundación durante el Campaniano Tardío y coincidiendo con facies dístales y de mar profundo (arcillolitas negras,

acompañadas de biomicritas fosilíferas a empaquetadas); seguido de un periodo de depositación agradacional hasta alcanzar facies de mar abierto proximal (tope de las Lodolitas de Aguacaliente) influenciado por tormentas.

Por último, cerca de la base de la Formación Arenitas de San Luis de Gaceno (Maastrichtiano Temprano) comienza un nuevo ciclo regresivo, el cual muestra la progradación a ambientes influenciados por deriva litoral (parte basal de las Arenitas de San Luis), tras una regresión forzada (coincidente con espesas parasecuencias de arenitas y conglomerados, con fragmentos fosfáticos, granocrecientes y que con alta ciclicidad, lo que indica rápida continentalización), para luego pasar a una sedimentación agradacional mostrada por facies de playa con canales distributarios (capas granodecrecientes, muy espesas, con influencia marina somera por la preservación de *Thalassinoides isp.*) en la parte superior de las Arenitas de San Luis de Gaceno, en el Maastrichtiano tardío (momento en el cual la cuenca vuelve a profundizar e inicia el depósito de la Formación Guaduas).

Dentro de las facies sedimentarias, fueron definidas 9 petrofacies sedimentarias a partir de la integración de petrografía y análisis de Difracción de Rayos X, de las cuales 4 tienen potencial para ser reservorios de arenita bituminosa y/o hidrocarburos convencionales; siendo Ampho – Clastosoportada y ACgdc – Masiva los mejores reservorios; los cuales tienen porosidades (primaria y por fracturas, permeable) varía entre 15-25%, poco a nulo contenido de matriz arcillosa (menor al 2%), se acumulan en estratos progradales y agradacionales (es decir, tienen mayor continuidad vertical y lateral de facies, dando lugar a buenos espesores permeable o *gross pay* (Tiab & Donaldson, 2016), con espesores compartimentalizados (parasecuencias) de hasta 20 m de espesor), estando localizadas en el tope de las Arenitas de San Antonio y la totalidad de las Arenitas de San Luis de Gaceno.

Otras 2 petrofacies con buen potencial son Alfl – Clastosoportada y Alfl – LAolce – Matriz soportada, las cuales se tienen su mayor espesor en la parte media de las Lodolitas de Aguacaliente, estando también en varios segmentos más; aunque estas tienen mayor proporción de matriz, menor porosidad total (entre 5-10%), grados de bioturbación variables y en ocasiones cementación (por carbonatos, sílice, fosfato y minerales arcillosos); lo que reduce considerablemente la permeabilidad de la roca, además de haberse depositado en condiciones muy variables, lo que restringe su espesor y continuidad. Las otras petrofacies son mucho más impermeables y no poseen la capacidad efectiva de almacenar fluidos, aunque de ellas (LMtal-Matriz soportada) se destaca por haberse depositado en condiciones anóxicas y, por lo tanto, preservar gran cantidad de aloquímicos y materia orgánica, lo que podría corresponder a roca generadora localmente acumulada en la sección Quebrada Aguacaliente.

En cuanto a diagénesis, la petrografía y litogeoquímica demuestran que los procesos ocurridos en las rocas del Grupo Guadalupe en San Luis de Gaceno experimentaron condiciones de eogénesis tardía-mesogénesis temprana, lo cual ayudó a preservar la integridad de las petrofacies anteriormente descritas, pero no favoreció la ventana de generación de hidrocarburos en las Lodolitas de Aguacaliente, requiriéndose para ello condiciones de mesogénesis tardía-telogénesis.

Lo anterior va un poco en contravía con lo presentado por otros autores en lo que respecta a la ventana de generación y paleogeotermas alcanzadas para el Grupo Guadalupe en otros puntos de la Cuenca Cordillera Oriental y Llanos (Pedraza-Fracica, 2010; Pedraza-Fracica & Mariño-Martínez, 2016), donde si se alcanzaron condiciones de catagénesis; por lo que valdría la pena enfocar futuros trabajos en geoquímica de hidrocarburos, siempre y cuando el hidrocarburo se haya generado y/o preservado a partir y dentro de rocas del Grupo Guadalupe, dentro de otras secciones estratigráficas a lo largo del piedemonte llanero, por razones que se presentaran más adelante.

La fluorescencia de rayos X ayudó a comprender la evolución del ambiente sedimentario del Grupo Guadalupe, mostrando valores altos de MnO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para las Lodolitas de Aguacaliente que confirma su carácter marino más profundo, así como altos contenidos de y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las Arenitas de San Antonio (base y tope) y Arenitas de San Luis de Gaceno (base), que es correlacionable con las partículas fosfáticas y de glauconita encontradas en relativa alta proporción (hasta 5%), y que son coherentes con una influencia transicional de los ambientes de depósito, y una temprana diagénesis favorecida por la productividad biológica que se preserva con los restos fosfáticos acumulados y las capas con trazas fósiles de *Thalassinoides isp.* Así mismo, los altos valores de TiO<sub>2</sub> reportados para las Arenitas de San Luis de Gaceno son correlacionables con el alto contenido de minerales pesados ultraestables acumulados, lo que soporta la idea de un ambiente sedimentario maduro con gran transporte y alta energía (canales y playas formadas por deriva litoral), que conlleva a mejor selección y madurez tanto textural como composicional.

Los análisis de difracción de rayos X siguiendo las metodologías propuestas por diversos autores (Thorez, 1975; Amigo et al., 1994; Bonilla-Osorio et al., 2011; Warr & Ferreiro Mählmann, 2015) ayudan a justificar los procesos sedimentarios y el grado de diagénesis experimentado por las rocas del Grupo Guadalupe en el área de San Luis de Gaceno. Valores altos de caolinita en las formaciones Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno son consistentes para ambientes de alta energía y alto transporte de sedimentos; incremento en el contenido de interestratificados Ill/Sme poco

illitizados (a pesar de haber disponibilidad de  $K_2O$  y  $MgO$  en el medio de depósito) en las Lodolitas de Aguacaliente sugieren poco reemplazamiento y por ende diagénesis restringida por debajo de la mesogénesis temprana. No obstante, la proporción de Ill (moderada en las Arenitas de San Antonio, alta en las Lodolitas de Aguacaliente, moderada y progresivamente mayor hacia el tope de las Arenitas de San Luis de Gaceno) no es correlacionable con procesos de illitización ocurridos en la diagénesis, ya que el análisis FWHM demostró que todas ellas fueron formadas en condiciones de epizona (temperaturas mayores a  $300^{\circ}C$ ); y mientras la petrografía no demuestre mayores condiciones de diagénesis experimentadas a mesogénesis temprana ( $120-130^{\circ}C$ ), se atribuye el grado de cristalinidad de la illita al experimentado por la roca fuente de sedimentos (posiblemente rocas ígneas y metamórficas, o incluso rocas sedimentarias antiguas, del escudo de Guyana, como lo proponen Fabre (1983), Cooper et al. (1995) y Rodríguez-Esquivel & Sánchez-Quíñonez (2021)).

Estas razones es lo que explicaría la ausencia de hidrocarburos en el área de San Luis de Gaceno en rocas del Grupo Guadalupe (ya que durante el desarrollo de la presente Tesis y el *Proyecto CAB* fueron encontradas rocas con impregnación de hidrocarburo en las formaciones Mirador y Carbonera, en otras quebradas trabajadas), ya que el grado de diagénesis alcanzado impidió que los estratos calcáreos de las Lodolitas de Aguacaliente pudiesen entrar en ventana de generación, a pesar de existir buenos reservorios representados por las capas progradacionales y aggradacionales de las formaciones Arenitas de San Antonio y Arenitas de San Luis de Gaceno.

Igualmente, como hipótesis a la no acumulación de hidrocarburos convencionales y arenitas bituminosas (por corroborar en futuras investigaciones), está la edad atribuida al levantamiento de la Falla de Tesalia (Paleoceno) que invirtió la polaridad estratigráfica y dejó en contacto permeable la Formación Chipaque (una unidad generadora con mayor potencial que la parte media del Grupo Guadalupe; ampliamente conocida, trabajada y modelada por la industria petrolera) con La Formación Une, considerando que la edad en la que se alcanzó la ventana de generación de hidrocarburos para Chipaque es de 42 Ma (Eoceno Medio), con un pico de generación en 23 Ma (Mioceno Temprano), por lo que no habría sincronismo entre la formación de la trampa y la generación de hidrocarburos; además que a lo largo de dicha falla pudo haber escapado el hidrocarburo.

## 5.2 Recomendaciones

Los resultados presentados en este trabajo podrían mejorarse, si se consideran las siguientes recomendaciones:

- La columna estratigráfica presentada en este trabajo muestra como es la distribución de facies sedimentarias, en consecuencia, a la evolución del ambiente sedimentario. Para comprender mejor la proveniencia de los sedimentos y como son los cambios en las facies que se depositan con alta rítmicidad y ciclicidad (como por ejemplo, las facies LAoalce de las Lodolitas de Aguacaliente, y las parasecuencias reconocidas en las Arenitas de San Antonio y San Luis de Gaceno), debe hacerse un muestreo más sistematizado, orientado solo en determinar composición química y relación entre minerales arcillosos (illitas e interestratificados Ill/Sme), ya que la geoquímica ayuda a visualizar con mayor detalle cambios en elementos tales como  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO$ ,  $P_2O_5$  y  $Fe_2O_3$  sensibles a cambios en el nivel del mar; mientras que las fases minerales ayudarían a discriminar la proveniencia de los sedimentos, ya que se esperarían ver cambios en el grado de cristalinidad de la illita y caolinita (como lo muestra Bonilla-Osorio et al. (2011)).
- Otras secciones de referencia deben describirse en el piedemonte llanero, preferiblemente sobre el cauce de quebradas tributarias que fluyan sobre las mismas unidades trabajadas en este trabajo; con el fin de determinar la naturaleza de las facies sedimentarias descritas (como por ejemplo ACgdcm, correspondientes a canales distributarios; o bien LAoalce, que hace referencia a una zona particular del perfil de playa, pero puede estar influenciado por tormentas) en lo que respecta a continuidad lateral. Esto ayudaría muchísimo a determinar con precisión un marco secuencial más robusto, que ayude a definir la localización de posibles reservorios en superficie, siendo estos datos duros y susceptibles a ser correlacionados con registros de pozo e interpretación sísmica (bastante difícil de adquirir por la topografía y cobertera vegetal, e interpretar, debido a efectos del procesamiento y calidad de la migración (Catuneanu et al., 2009)). Si se confirma la naturaleza de los canales, estos migrarían constantemente por la dinámica en que se desarrollan (Reineck & Singh, 1980) y pueden tener espesor variable en escala de pocos a una decena de metros (invisibles ante la interpretación sísmica), como lo ha demostrado la columna estratigráfica presentada.
- Finalmente, un marco secuencial más robusto ayudaría a definir una superficie de máxima inundación en la cuenca, superficie sobre la cual se debe hacer muestreo con el fin de realizar análisis geoquímicos que evalúen el potencial de generación de hidrocarburos, concretamente para las Lodolitas de Aguacaliente.



**A. Anexo: Columna estratigráfica Sección  
Quebrada Aguacaliente (Escala 1:500)**



**B. Anexo: Formatos de columna  
elaborados en campo (Quebrada  
Aguacaliente)**





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

|                               |                    |                              |              |                     |
|-------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------|---------------------|
| Hoja No. <u>1</u> de <u>1</u> | Nombre de estación | <u>Adm. Aguascalientes 2</u> | Geólogo      | <u>Andrés Muñoz</u> |
| Proyecto                      | <u>CAR-LLQ</u>     | Escala                       | <u>1:200</u> | Fecha               |
|                               |                    |                              |              | <u>01/06/2023</u>   |

[illegible]

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

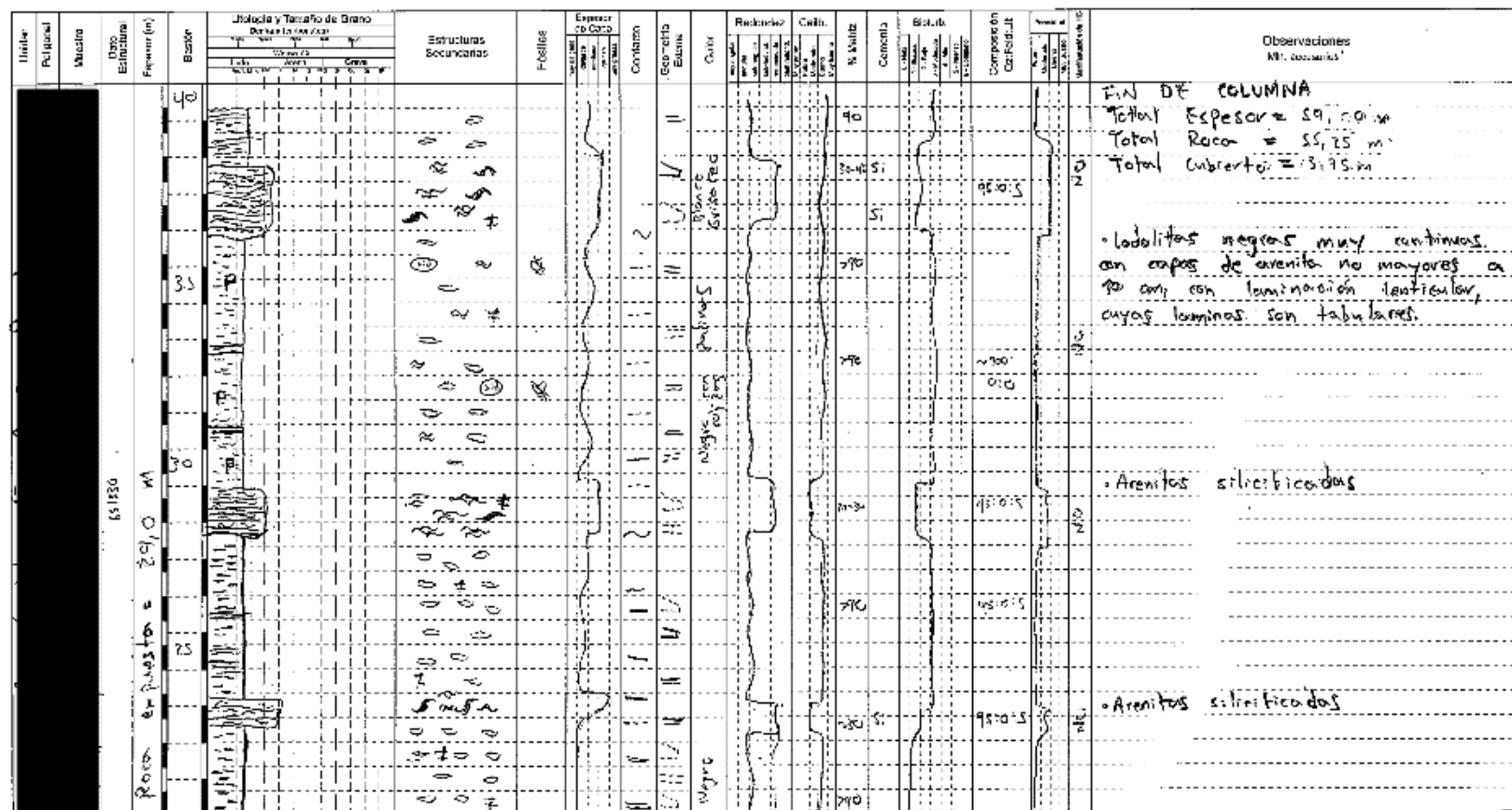
|                 |                   |                |         |               |
|-----------------|-------------------|----------------|---------|---------------|
| Hoja No. 1 de 2 | Nombre de sección | Geo. Apuntes 3 | Geólogo | Andrés Martín |
| Proyecto        | CAB.              | Escala         | 1:200   | Fecha         |
|                 |                   |                |         | 01/06/2023    |

[illegible]

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

|                               |                                               |                                |
|-------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|
| Hoja No. <u>2</u> de <u>2</u> | Nombre de sección <u>Alc. Aguascaltepec 3</u> | Geólogo <u>Alfonso Rosales</u> |
| Proyecto <u>CAB-UG</u>        | Escala <u>1:200</u>                           | Fecha <u>07/06/2023</u>        |





J  
 J

[illegible]





## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

|                 |                   |                     |         |                |            |
|-----------------|-------------------|---------------------|---------|----------------|------------|
| Hoja No. 3 de 6 | Nombre de sección | Qda. Aguacaliente 4 | Geólogo | Andrés Márquez |            |
| Proyecto        | CAB-LLO           | Escala              | 1:200   | Fecha          | 03/06/2023 |



| Unidad | Política | Muestra | Uso | Figura (m) | Espejo | Alcornoque y Tomate de Ginebra | Estructuras Secundarias | Fosiles | Espejo de Capa | Carbón | Quemadura | Color | Sedimentación | Calib. | % Muestra | Comentarios | Notas | Temperatura | Calidad | Presión | Velocidad de flujo | Observaciones |
|--------|----------|---------|-----|------------|--------|--------------------------------|-------------------------|---------|----------------|--------|-----------|-------|---------------|--------|-----------|-------------|-------|-------------|---------|---------|--------------------|---------------|
|        |          |         |     |            | 60     |                                |                         |         |                |        |           |       |               |        |           |             |       |             |         |         |                    |               |
|        |          |         |     |            | 50     |                                |                         |         |                |        |           |       |               |        |           |             |       |             |         |         |                    |               |
|        |          |         |     |            | 40     |                                |                         |         |                |        |           |       |               |        |           |             |       |             |         |         |                    |               |
|        |          |         |     |            | 30     |                                |                         |         |                |        |           |       |               |        |           |             |       |             |         |         |                    |               |
|        |          |         |     |            | 20     |                                |                         |         |                |        |           |       |               |        |           |             |       |             |         |         |                    |               |
|        |          |         |     |            | 10     |                                |                         |         |                |        |           |       |               |        |           |             |       |             |         |         |                    |               |
|        |          |         |     |            | 0      |                                |                         |         |                |        |           |       |               |        |           |             |       |             |         |         |                    |               |

Profundidad = 30,0 m

7/2/23

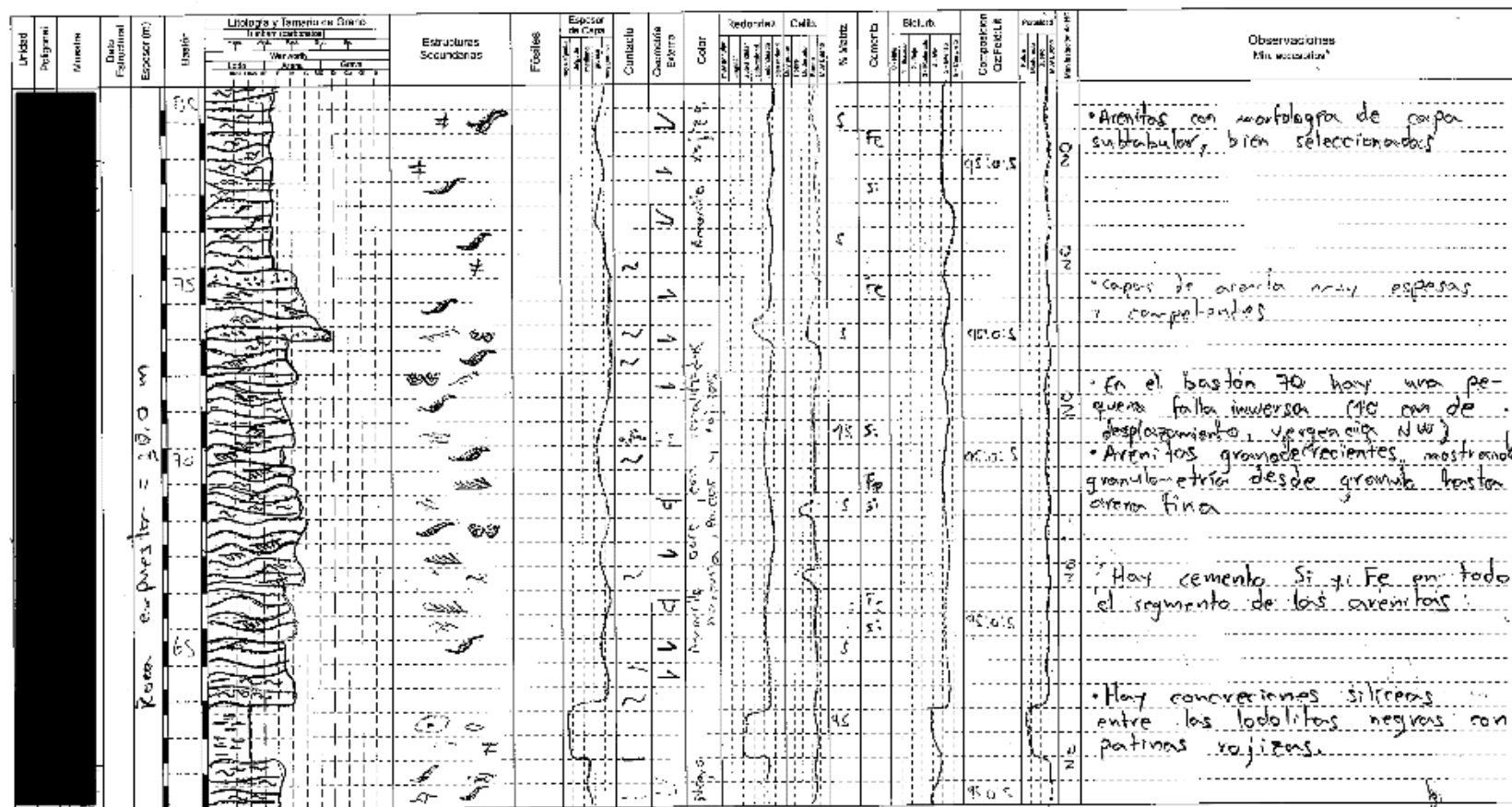
Observaciones:

- Intrusiones arenosas de hasta 50 cm de diámetro
- Capas gruesas y muy gruesas de arena, cuneiformes-canaliformes, algunos con laminación inclinada, pero en general bioturbadas.

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

|                               |                   |                             |             |                     |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------|---------------------|
| Hoja No. <u>4</u> de <u>6</u> | Nombre de sección | <u>Eda. Romancaliente 4</u> | Geólogo     | <u>Andrés Múñiz</u> |
| Proyecto                      | <u>CAR-LO</u>     | Escuela                     | <u>9700</u> | Fecha               |
|                               |                   |                             |             | <u>14/06/2008</u>   |





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

# COLUMNA ESTRATIGRÁFICA



|                         |                                             |                             |
|-------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
| Hoja No. <u>5 de 6</u>  | Nombre de sección <u>Qda Aguacaliente 4</u> | Geólogo <u>Andrés Muñoz</u> |
| Proyecto <u>CAE-LLC</u> | Escala <u>1:200</u>                         | Fecha <u>04/06/2023</u>     |

| Unidad | Poligonal | Verdadero | Distancia | Profundidad (m) | Uso | Uso y Temporalidad | Estructuras Secundarias | Fuente | Exposición | Color | Redondez | Calib. | % Mm | Comento | Base | Compartimiento | Observaciones |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----|--------------------|-------------------------|--------|------------|-------|----------|--------|------|---------|------|----------------|---------------|
|        |           |           |           | 400             |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 350             |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 300             |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 250             |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 200             |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 150             |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 100             |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 50              |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |
|        |           |           |           | 0               |     |                    |                         |        |            |       |          |        |      |         |      |                |               |

la sucesión se torna granocreciente, aumentando considerablemente el espesor, mostrando una no relación estratigráfica.

Arenitas desde grano fino a medio, en capas subtabulares. No muestran tendencia granocreciente o decreciente.

Cubierto, espesor de 3m

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

|                 |                     |                 |         |                  |
|-----------------|---------------------|-----------------|---------|------------------|
| Hoja No. 6 de 6 | Nombre de asociado: | Edm. Aguasiente | Geólogo | Andrés Martín    |
| Proyecto        | CA8-660             | Escala          | 1:200   | Fecha 04/06/2023 |

[illegible]



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

|                         |                                              |                              |
|-------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|
| Hoja No. <u>1 de 3</u>  | Nombre de sección <u>Cda. Aguacaliente S</u> | Geólogo <u>Andrés Martín</u> |
| Proyecto <u>CAB-LLC</u> | Escala <u>1:200</u>                          | Fecha <u>04/06/2023</u>      |



| Unidad | Poligono | Muestra | Dato Primario | Espesor (m) | Resistencia | Relaciones Secundarias | Fósiles | Espesor en Perfil | Corriente | Sección Escala | Color | Redondez | Caliz | % Vuelto | Caracena | Estufo | Corrosión | Corrosión | Corrosión | Observaciones                                                                                                                                                                                                   |
|--------|----------|---------|---------------|-------------|-------------|------------------------|---------|-------------------|-----------|----------------|-------|----------|-------|----------|----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        |          |         |               | 30.0        |             |                        |         |                   |           |                |       |          |       |          |          |        |           |           |           | Hacia el tope predominan las arcillas sobre el limo. Siguen siendo fosforitas.                                                                                                                                  |
|        |          |         |               | 15.0        |             |                        |         |                   |           |                |       |          |       |          |          |        |           |           |           | Hay capas de arenitas muy finas < 15 cm                                                                                                                                                                         |
|        |          |         |               | 10.0        |             |                        |         |                   |           |                |       |          |       |          |          |        |           |           |           | Capas muy delgadas a delgadas de fosforitas, constituidas por pellets, intraclastos y restos de peces. Forma una sucesión espesa. Están alternadas con capas de arenitas de wackestone.                         |
|        |          |         |               | 5.0         |             |                        |         |                   |           |                |       |          |       |          |          |        |           |           |           | Sets de capas de arenitas de grano fino a muy fino, tabulares y subtabulares, con laminación ondulada a flaser y laminación cruzada inclinada y en oncos, intercaladas con lodolitas con laminación tentacular. |

## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

|                               |                   |         |                  |
|-------------------------------|-------------------|---------|------------------|
| Hoja No. <u>7</u> de <u>7</u> | Nombre de sección | Geólogo | Andrés M. F. S.  |
| Proyecto                      | Escala            | 1:200   | Fecha 05/06/2023 |

[illegible]

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

|                               |                   |                     |         |                  |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|---------|------------------|
| Hoja No. <u>3</u> de <u>7</u> | Nombre de sección | Geo. Aguascalientes | Geólogo | Andrés Martínez  |
| Proyecto                      | CAR-ULC           | Escala              | 1:200   | Fecha 05/06/2023 |

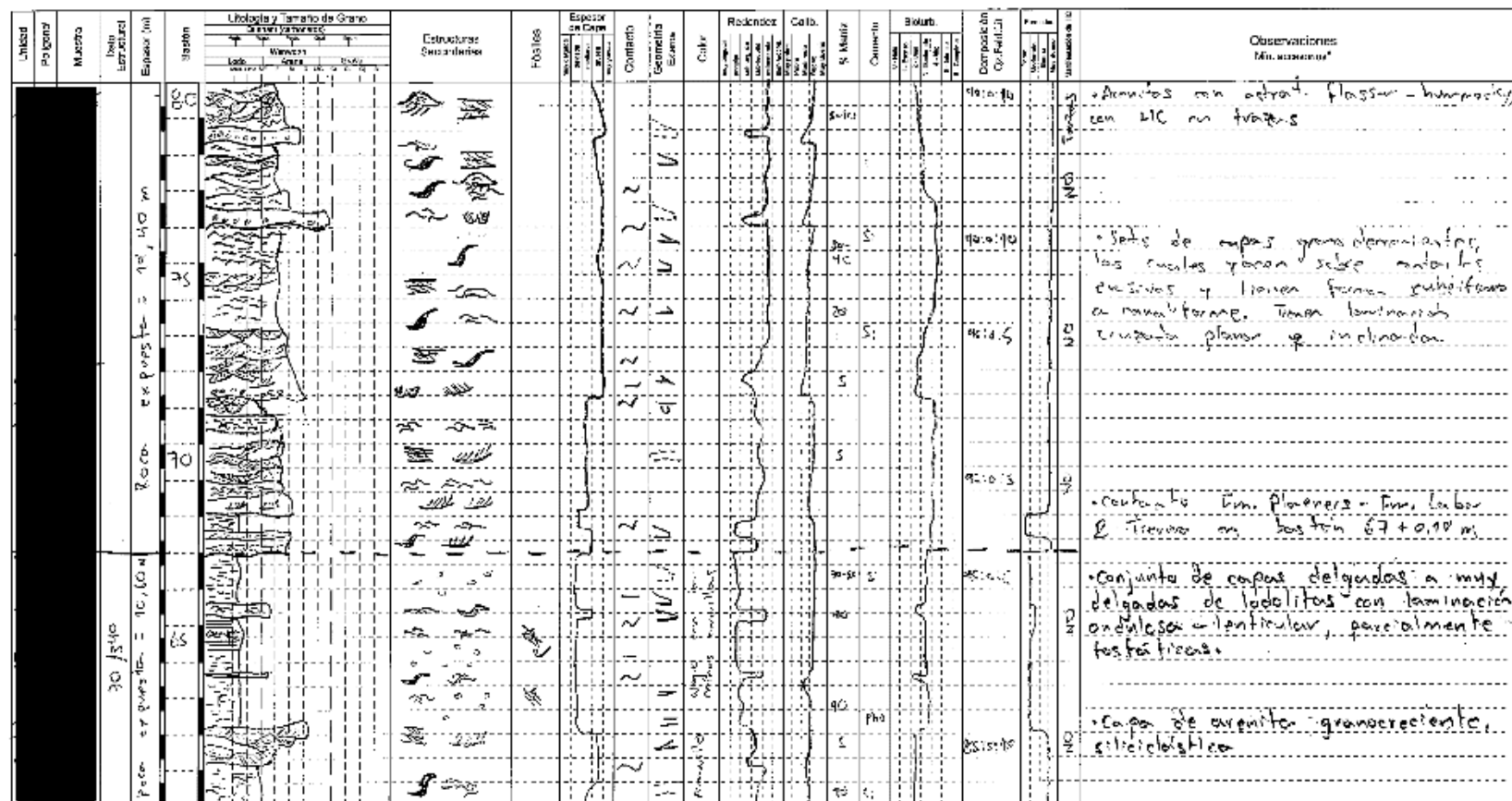
[illegible]



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

|                 |                   |                   |         |                |            |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------|----------------|------------|
| Hoja No. 4 de 7 | Nombre de sección | Red. Diputación 5 | Geólogo | Andrés Márquez |            |
| Proyecto        | CRB-LLC           | Escala            | 1:200   | Fecha          | 26/06/2023 |





UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

|                               |                   |                        |         |                  |
|-------------------------------|-------------------|------------------------|---------|------------------|
| Hoja No. <u>5</u> de <u>7</u> | Nombre de sección | Geo. Agropecuaria 1º 5 | Geólogo | Andrés Martín    |
| Proyecto                      | CA-3 LLO          | Escuela                | 9:00    | Fecha 06/06/2023 |

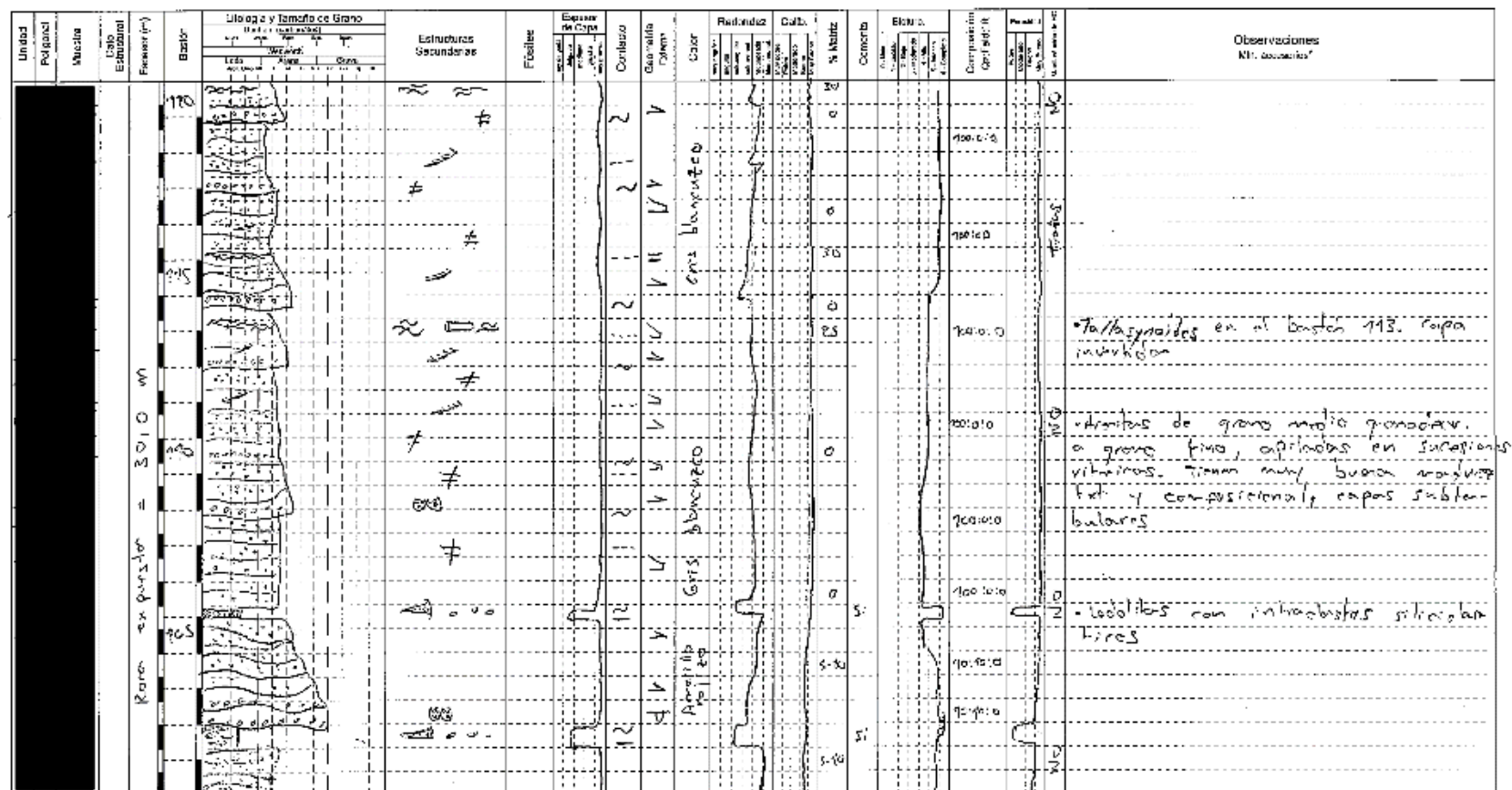
[illegible]



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

|                  |                   |              |         |               |
|------------------|-------------------|--------------|---------|---------------|
| Hoja No. 6 de 7  | Nombre de sección | Geo. Iguaque | Geólogo | Andrés Montón |
| Proyecto CAS-LLO | Escala            | 1:200        | Fecha   | 06/06/2023    |



[illegible]



**C. Anexo: Muestras recolectadas para la  
Tesis de Maestría**



| Columna estratigráfica   |                          |                  |                            |                                             | Unidad litoestratigráfica                                                           | Análisis efectuados |     |     |
|--------------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----|-----|
| Código de Proyecto CAB   | Código de Litogeoquímica | Tramo de Columna | Bastón dentro de tramo (m) | Posición estratigráfica dentro de tramo (m) | Nomenclatura estratigráfica de Proyecto de Tesis (Guerrero & Sarmiento-Pérez, 1996) | Petrografía         | DRX | FRX |
| 229IIC-JDV-ANB-4032      | AST-023                  | Aguacaliente-4   | 3+0.5                      | 5                                           | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     |     |     |
| 229IIC-JDV-ANB-4036      | AST -024                 | Aguacaliente-4   | 6+1                        | 10                                          | Fm Arenitas de San Antonio                                                          | X                   |     |     |
|                          | AST -025                 | Aguacaliente-4   | 10                         | 15                                          | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     | X   | X   |
|                          | AST -026                 | Aguacaliente-4   | 11+0.5                     | 17                                          | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     | X   | X   |
| 229IIC-JDV-ANB-4040      | AST-027                  | Aguacaliente-4   | 16                         | 24                                          | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     |     |     |
|                          | AST-028                  | Aguacaliente-4   | 25                         | 37,5                                        | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     | X   | X   |
| 229IIC-JDV-ANB-4044      | AST-029                  | Aguacaliente-4   | 30+0.5                     | 45,5                                        | Fm Arenitas de San Antonio                                                          | X                   |     |     |
| 229IIC-JDV-ANB-4045      | AST-030                  | Aguacaliente-4   | 33+0.5                     | 50                                          | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     |     |     |
|                          | AST-031                  | Aguacaliente-4   | 35+0.5                     | 52                                          | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     | X   | X   |
| 229IIC-JDV-ANB-4048      | AST-032                  | Aguacaliente-4   | 81                         | 121,5                                       | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     |     |     |
| 229IIC-JDV-ANB-4052-Base | AST-033-B                | Aguacaliente-4   | 90+0.5                     | 135,5                                       | Fm Arenitas de San Antonio                                                          | X                   |     |     |
| 229IIC-JDV-ANB-4052-Tope | AST-033-T                | Aguacaliente-4   | 90+0.5                     | 135,5                                       | Fm Arenitas de San Antonio                                                          | X                   |     |     |
|                          | AST-034                  | Aguacaliente-4   | 91+1                       | 137,5                                       | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     | X   | X   |
| 229IIC-JDV-ANB-4056      | AST-035                  | Aguacaliente-4   | 108                        | 162                                         | Fm Arenitas de San Antonio                                                          |                     |     |     |

|                     |           |                |         |       |                                                                                 |   |   |   |
|---------------------|-----------|----------------|---------|-------|---------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|
| 229IIC-JDV-ANB-4064 | AST-036   | Aguacaliente-4 | 115     | 172,5 | Fm Arenitas de San Antonio                                                      | X |   |   |
| 229IIC-JDV-ANB-4060 | AST-037   | Aguacaliente-4 | 122+0.5 | 183,5 | Fm Arenitas de San Antonio                                                      | X | X | X |
| 229IIC-JDV-ANB-4068 | AST-038   | Aguacaliente-4 | 128+1   | 193   | Fm Arenitas de San Antonio                                                      | X |   |   |
|                     | LAC-039   | Bellacosa-4    | 10      | 15    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
|                     | LAC-040   | Bellacosa-4    | 22      | 33    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
|                     | LAC-041   | Bellacosa-4    | 36      | 54    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
|                     | LAC-042   | Aguacaliente-5 | 9       | 13,5  | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
| 229IIC-JDV-NB-4080  | LAC-043   | Aguacaliente-5 | 12+1    | 19    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    | X | X | X |
|                     | LAC-044   | Aguacaliente-5 | 17+1    | 26,5  | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
| 229IIC-JDV-ANB-4084 | LAC-045   | Aguacaliente-5 | 35+1    | 53,5  | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   |   |   |
| 229IIC-JDV-ANB-4088 | LAC-046   | Aguacaliente-5 | 43+0.5  | 65    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    | X |   |   |
|                     | LAC-047   | Aguacaliente-5 | 45      | 67,5  | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
|                     | LAC-048   | Aguacaliente-5 | 50      | 75    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
|                     | LAC-049   | Aguacaliente-5 | 55      | 82,5  | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    |   | X | X |
| 229IIC-JDV-ANB-4093 | LAC-050   | Aguacaliente-5 | 58      | 87    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    | X | X | X |
| 229IIC-JDV-ANB-4092 | LAC-051   | Aguacaliente-5 | 60      | 90    | Fm Lodolitas de Aguacaliente                                                    | X |   |   |
|                     | LAC-051IR | Aguacaliente-5 | 0       | 0     | Contacto entre Fm Lodolitas de Aguacaliente y Fm Arenitas de San Luis de Gaceno |   | X | X |

|                         |          |                |         |       |                                   |   |   |   |
|-------------------------|----------|----------------|---------|-------|-----------------------------------|---|---|---|
| 229IIC-JDV-<br>ANB-4096 | ASLG-052 | Aguacaliente-5 | 65      | 97,5  | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno |   |   |   |
| 229IIC-JDV-<br>ANB-4224 | ASLG-053 | Aguacaliente-5 | 72+1    | 109   | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno | X |   |   |
| 229IIC-JDV-<br>ANB-4228 | ASLG-054 | Aguacaliente-5 | 82      | 123   | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno | X | X | X |
| 229IIC-JDV-<br>ANB-4232 | ASLG-055 | Aguacaliente-5 | 120+0.5 | 180,5 | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno |   | X | X |
|                         | ASLG-055 | Aguacaliente-5 | 115+1   | 173,5 | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno |   | X | X |
| 229IIC-JDV-<br>ANB-4236 | ASLG-056 | Aguacaliente-5 | 148+1   | 223   | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno |   |   |   |
| 229IIC-JDV-<br>ANB-4237 | ASLG-057 | Aguacaliente-5 | 151+1   | 227,5 | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno | X |   |   |
| 229IIC-JDV-<br>ANB-4240 | ASLG-058 | Aguacaliente-5 | 157     | 235,5 | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno | X |   |   |
|                         | ASLG-059 | Aguacaliente-5 | 157+1   | 236,5 | Fm Arenitas de San Luis de Gaceno |   | X | X |



**D. Anexo: Descripciones petrográficas de la sección “Quebrada Aguacaliente”**

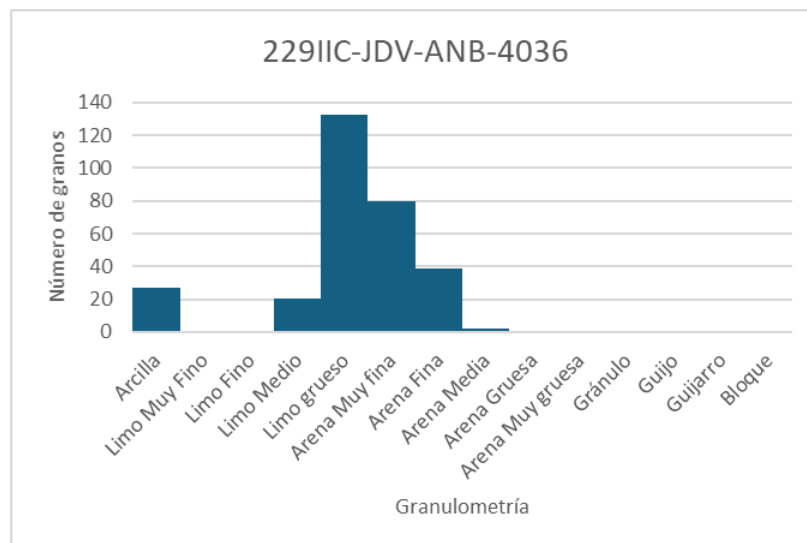


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                       |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4036         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> AST-024              |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                              | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977065 | <b>Norte:</b><br>2092826 | <b>Origen:</b> Único Nacional                         |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                  |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Antonio      |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>19,59 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo               |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 9,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 6,90%                        | 44,20%                            |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 26,50%                       | 12,80%                     | 0,60%                      | 0,00%                        | 0,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954):** Limolita arenosa de grano grueso.

### Conteo composicional

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos |                      |                       | Fragmentos líticos |               |                  |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------|------------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa | Feldespato alcalino  | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos     |
| 43,30%                                 | 10,90%                             | 2,50%          | <0,3%       | <0,3%                | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%            |
| Otros minerales                        |                                    |                |             |                      |                       |                    |               |                  |
| Matriz terrígena                       | Carbonatos indiferenciados         | Glauconita     | Muscovita   | Minerales arcillosos | Fosfatos              | Turmalina          | Opacos        | Materia orgánica |
| 9,10%                                  | 5,00%                              | 1,60%          | 1,60%       | 0,90%                | <0,3%                 | <0,3%              | 1,20%         | <0,3%            |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Porosidad   |                      |                       | Cemento            |               |                  |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides      | Primaria             | Secundaria            | Silíceo            | Calcáreo      | Otro             |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%       | 0,00%                | 0,00%                 | 12,10%             | 11,80%        | 0,00%            |

**Clasificación composicional:** Cuarzoarenita (Folk et al. 1970; Folk, 1974).

### Descripción

Corresponde a una roca de composición siliciclástica, clasificada texturalmente como una limolita arenosa de grano grueso según Folk (1954). Los minerales terrígenos principales son cuarzo (en altísima proporción, casi monomineral en lo que respecta a la composición de granos) de tipo policristalino y monocristalino con extinción recta y ondulante, carbonatos sin diferenciar, glauconita (**Figura 5-1c, d**), muscovita, y minerales arcillas sin diferenciar, con trazas de fosfatos, turmalina, microclina, plagioclasa y feldespato alcalino. Además, se observa hematita, magnetita, óxidos de hierro no identificados y piritita. La matriz intergranular es producto de la mezcla entre minerales arcilla sin diferenciar y carbonatos, con presencia de dos tipos de cemento: silíceo y calcáreo (**Figura 5-1a, b**), siendo este último el de mayor proporción, con zonas de mayor cristalización.

Texturalmente, la roca exhibe una muy buena selección y un buen empaquetamiento, con un tamaño de grano desde limo medio hasta arena fina, lo que indica disminuye su madurez. Los granos tienen una redondez promedio subangular, con una proporción similar de subesféricos, y una esfericidad que varía entre subesférica y subelongada. Están orientados casi paralelamente a la laminación, que macroscópicamente es paralela, a veces ligeramente ondulosa y de tipo flaser (predominio de arena). Las laminaciones son planas-paralelas tangenciales y onduladas, las cuales, hacia la mitad y el tope de la sección, mientras que hacia la base hay laminación flaser debido al mayor contenido de granos de cuarzo.

Las laminaciones claras, con mayor presencia de cemento silíceo, tienen espesores de hasta 2,6 mm, mientras que las oscuras, con más presencia de arcillas, matriz y cemento calcáreo, alcanzan hasta 1,8 mm. La laminación flaser es más fina (espesores menores o iguales a 0,1 mm) y suele tener una granulometría más fina y materia orgánica (**Figura 5-2b**).

### Diagénesis

La roca muestra varios procesos diagenéticos, como oxidación debido a la presencia de óxidos de hierro, magnetita y hematita, cementación silíceo y calcáreo, y formación de sulfuros por la presencia de pirita. La respuesta de la roca en epifluorescencia es baja, por lo que no contiene hidrocarburos.

La alternancia de láminas de limo grueso y arenita fina con arcillolitas, junto al buen empaquetamiento (donde los intersticios están ocupados por cemento y matriz) define una roca con nula porosidad y permeabilidad, en torno al 0% (**Figura 5-2a**). El alto contenido de glauconita fresca sugiere condiciones transicionales del ambiente de depósito, donde había desarrollo de corrientes de moderada energía en flujos laminares, alternados con eventos de baja energía.

### Registro fotográfico

**Figura 5-1. a) y b)** Cemento calcáreo (Cem2), identificado entre los granos de cuarzo monocrystalino (Qz1, Qz2) y cuarzo policristalino (Qz3) (PPL y XPL, 20x). **c) y d)** Granos de glauconita (Glt), acompañados por minerales arcillosos indiferenciados (Arc). También se observa cemento calcáreo (Cem2) y cemento silíceo (Cem1) (PPL y XPL, 20x).

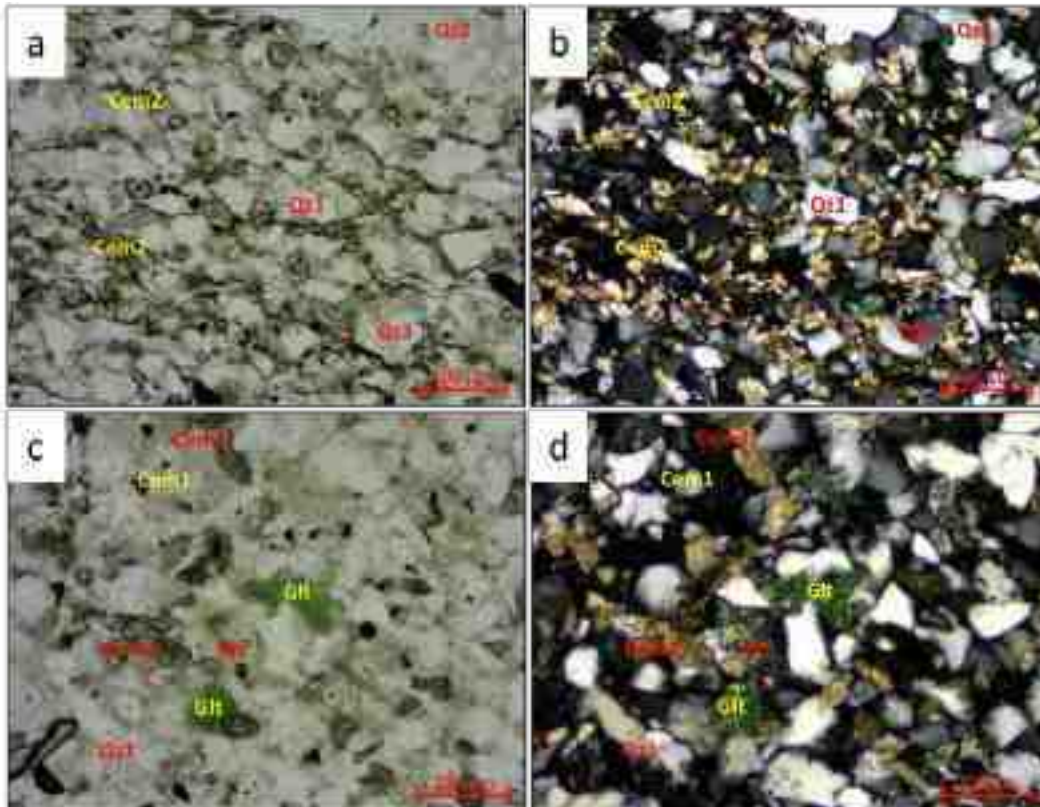
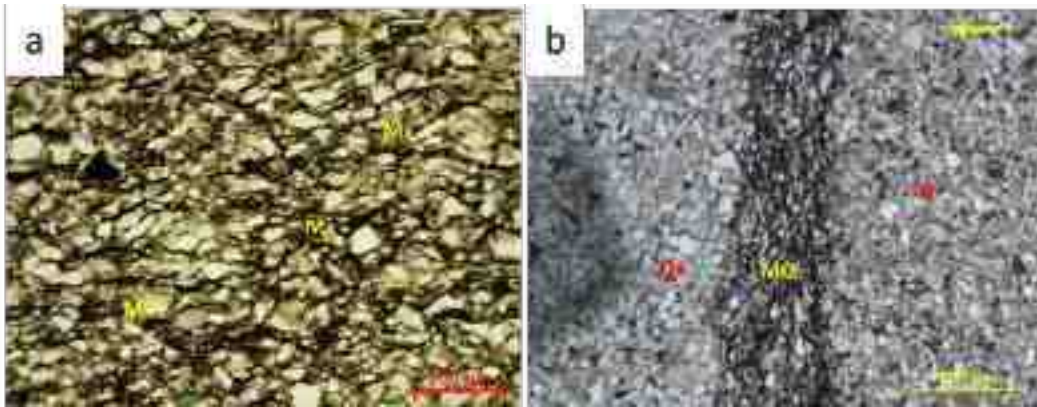


**Figura 5-2. a)** Matriz (Mx) de la roca, dispuesta de manera intergranular entre los granos de cuarzo (Qz), compuesta da minerales arcillosos sin diferenciar, carbonatos y óxidos (PPL,

10x). **b)** Materia orgánica (MO) dispuesta en franjas (paralelas a la laminación), ocupando espacios intergranulares entre los granos de cuarzo (PPL, 4x).

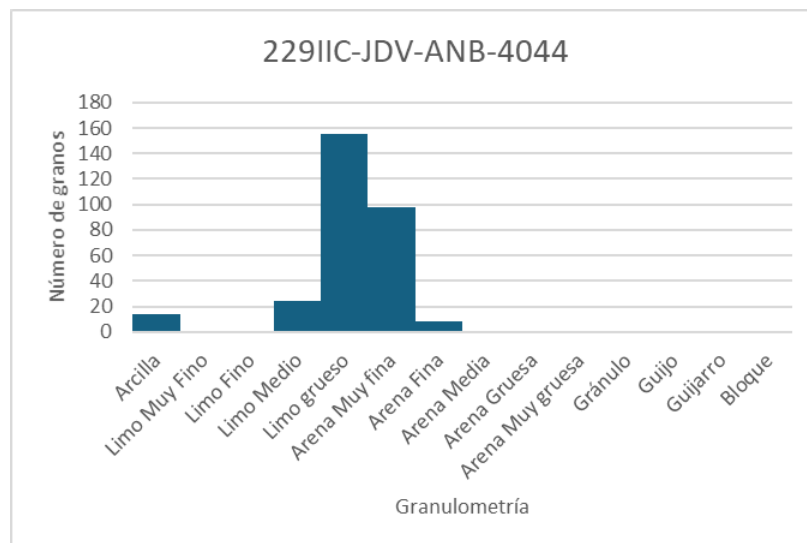


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                       |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4044         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> AST-029              |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                              | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977055 | <b>Norte:</b><br>2092765 | <b>Origen:</b> Único Nacional                         |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                  |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Antonio      |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>54,44 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo               |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 4,80%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 8,20%                        | 51,80%                            |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 32,50%                       | 2,70%                      | 0,00%                      | 0,00%                        | 0,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954):** Limolita arenosa de grano grueso**Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 39,80%                                 | 9,90%                              | 6,00%          | <0,3%       | 0,60%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |             |                     |                       |                    |               |              |
| Minerales arcillosos                   | Glauconita                         | Muscovita      | Circón      | Turmalina           | Fosfatos              | Opacos             |               |              |
| 4,80%                                  | 3,00%                              | 0,90%          | 0,30%       | <0,3%               | <0,3%                 | 1,50%              |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Porosidad   |                     |                       | Cemento            |               |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides      | Primaria            | Secundaria            | Silíceo            | Calcáreo      | Otro         |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%       | 0,00%               | 0,00%                 | 18,10%             | 14,80%        | 0,30%        |

**Clasificación composicional:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

**Descripción**

Corresponde texturalmente a una limolita arenosa de grano grueso según Folk (1954), composicionalmente a una cuarzoarenita (Folk, 1954). Los principales granos terrígenos incluyen cuarzo de tipo policristalino y monocristalino con extinción recta y ondulante, minerales arcilla sin diferenciar, glauconita, moscovita, microclina y circón, con trazas de fosfatos, turmalina, plagioclasa y posiblemente feldespato alcalino (**Figura 5-3b, c**). También se observa hematita, óxidos de hierro no identificados, pirita y goethita.

La roca presenta tres tipos de cemento, siendo el silíceo el de mayor proporción, seguido por el calcáreo (el cual desarrolla una textura esquelética cuando crece alrededor de granos y desarrolla continuidad óptica, formado por recristalización, involucrando además minerales arcilla y óxidos, que le confiere un relieve mucho más alto y pseudopleocroismo), así como cemento ferruginoso en menor proporción (**Figura 5-3b, c**).

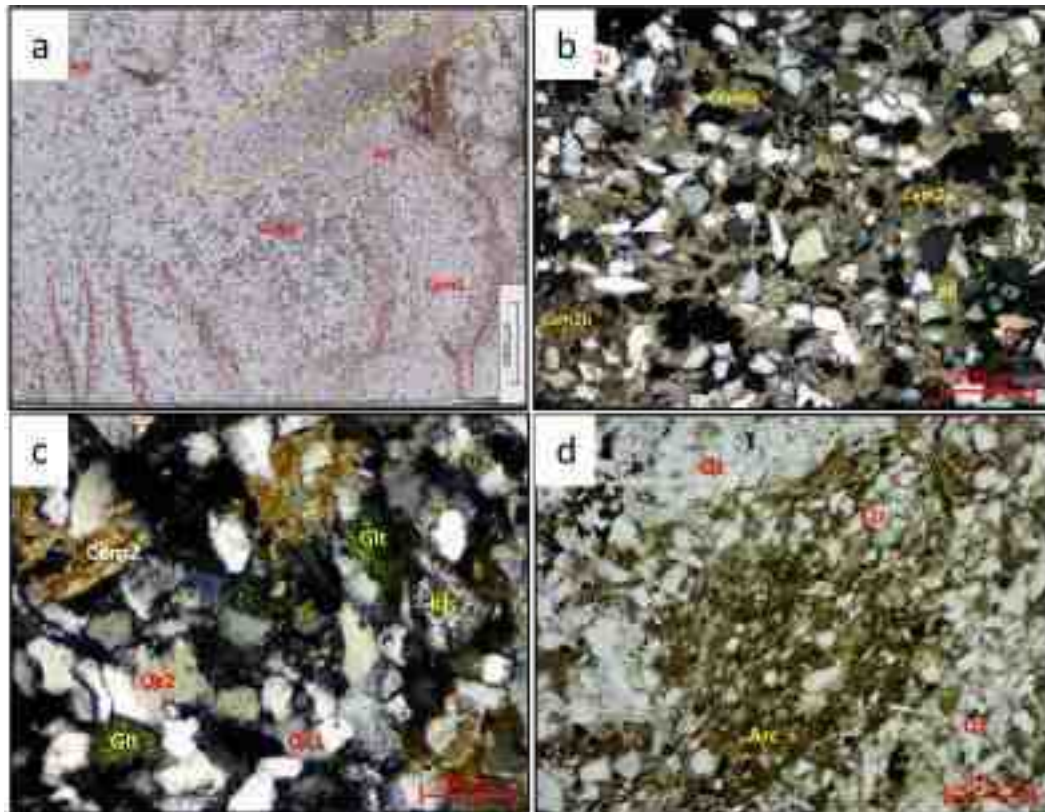
Texturalmente, la roca exhibe buena selección y moderado empaquetamiento, con un tamaño de grano desde limo medio hasta arena fina, lo que reduce su madurez textural (**Figura 5-3d**). La redondez promedio de los granos es subangular, con una proporción similar de subesféricos, y una esfericidad variable entre subesférico y subelongado. Los granos están orientados casi paralelamente a la laminación, que macroscópicamente es ondulosa, aunque se ha perdido en gran parte debido a una intensa bioturbación y otros procesos diagenéticos. Las pocas laminas aún preservadas en la base y el tope son del tipo ondulado (proporción de arena y lodo similar), observándose un intenso retrabajamiento hacia la parte media de la sección, que da lugar a una disminución en el empaquetamiento y posterior recristalización de cementos (**Figura 5-3a**).

**Diagénesis**

Debido a la bioturbación y el alto grado de diagénesis (óxidos opacos y presencia de la glauconita, relacionada a la disponibilidad de pellets fosfáticos) la roca tiene nula porosidad (0%). En cuanto a los procesos diagenéticos, hay óxidos de hierro y hematita que actúan como cemento, al igual que cemento silíceo y calcáreo (por recristalización, hasta formar costras con textura esquelética; **Figura 5-3a, b**) y formación de sulfuros debido a la presencia de pirita. La respuesta de la roca en epifluorescencia es baja, debido a la presencia de fosfatos en la matriz, mas no se relaciona con el contenido (nulo) de hidrocarburos.

### Registro fotográfico

**Figura 5-3. a)** Laminación ondulosa, definida por zonas claras (granos de cuarzo y cemento silíceo (Cem1), junto a cemento calcáreo (Cem2); este último formando texturas esqueléticas a modo de costras) y oscuras (minerales arcillosos (Arc)), delimitadas por líneas rojas punteadas, cortada por bioturbación (trazos amarillos) (PPL, 0, 10x). **b)** Granos de cuarzo (Qz) y glauconita (Glt), con moderado empaquetamiento debido a presencia de cemento calcáreo (Cem2) (XPL, 10x). **c)** Granos de glauconita (Glt), cuarzo (Qz) y feldespato alcalino (Kfs) con escaso cemento calcáreo (Cem2) en una lámina con mayor empaquetamiento (PPL, 10x). **d)** Minerales arcilla indiferenciados (Arc), los cuales ocupan parte del armazón de la roca, embebiendo algunos granos retrabajados (PPL, 10x).

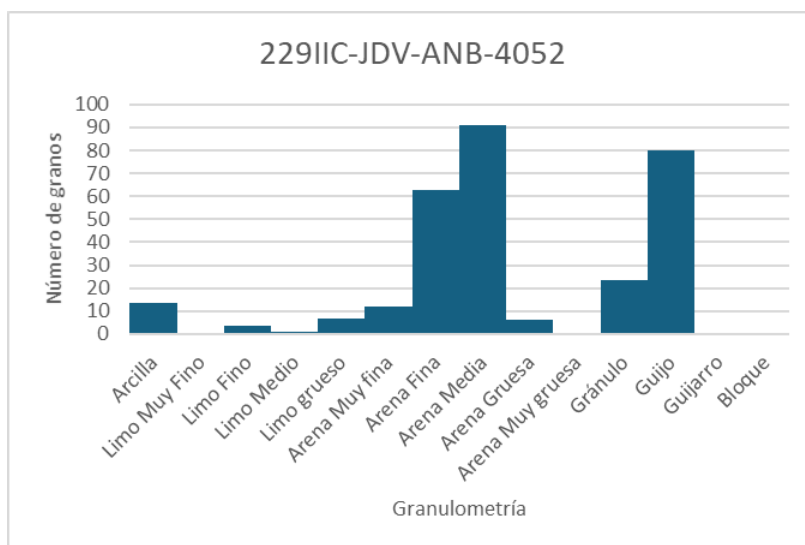


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4052         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> AST-033               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977083 | <b>Norte:</b><br>2092731 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Antonio      |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>145,07 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 4,58%                        | 0,00%                      | 1,15%                      | 0,29%                        | 2,29%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 4,01%                        | 20,92%                     | 30,37%                     | 2,01%                        | 0,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 7,74%                        | 26,65%                     | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Nichols, 2009): Conglomerado arenoso lodoso****Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Igenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 44,00%                                 | 4,90%                              | 0,00%          | 0,00%       | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |             |                     |                       |                    |               |              |
| Matriz terrígena                       | Minerales arcillosos               | Pirita         |             |                     |                       |                    |               |              |
| 3,00%                                  | 2,60%                              | 1,80%          |             |                     |                       |                    |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Porosidad   |                     |                       | Cemento            |               |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides      | Primaria            | Secundaria            | Ferruginoso        | Silíceo       | Otro         |
| <0,3%                                  | 1,70%                              | 33,40%         | 0,00%       | 0,00%               | 1,40%                 | 5,20%              | 2,00%         | 0,00%        |

**Clasificación composicional:** Arenita aloquímica (Mount, 1985), conglomerado oligomítico con matriz de cuarzoarenita.

**Descripción**

Corresponde texturalmente a un conglomerado arenoso lodoso (Folk, 1974), composicionalmente a una arenita aloquímica (Mount, 1985) o un conglomerado oligomítico con matriz de cuarzoarenita, debido a la alta proporción de cuarzo (48,9%) y fragmentos aloquímicos (35,1%). Modalmente, está compuesta por cuarzo (monocristalinos con extinción ondulante y recta), fragmentos aloquímicos (fragmentos óseos indiferenciados, intraclastos y pellets) y otros minerales detríticos como minerales arcillosos indiferenciados a modo de matriz terrígena y pirita (Figura 3 19a).

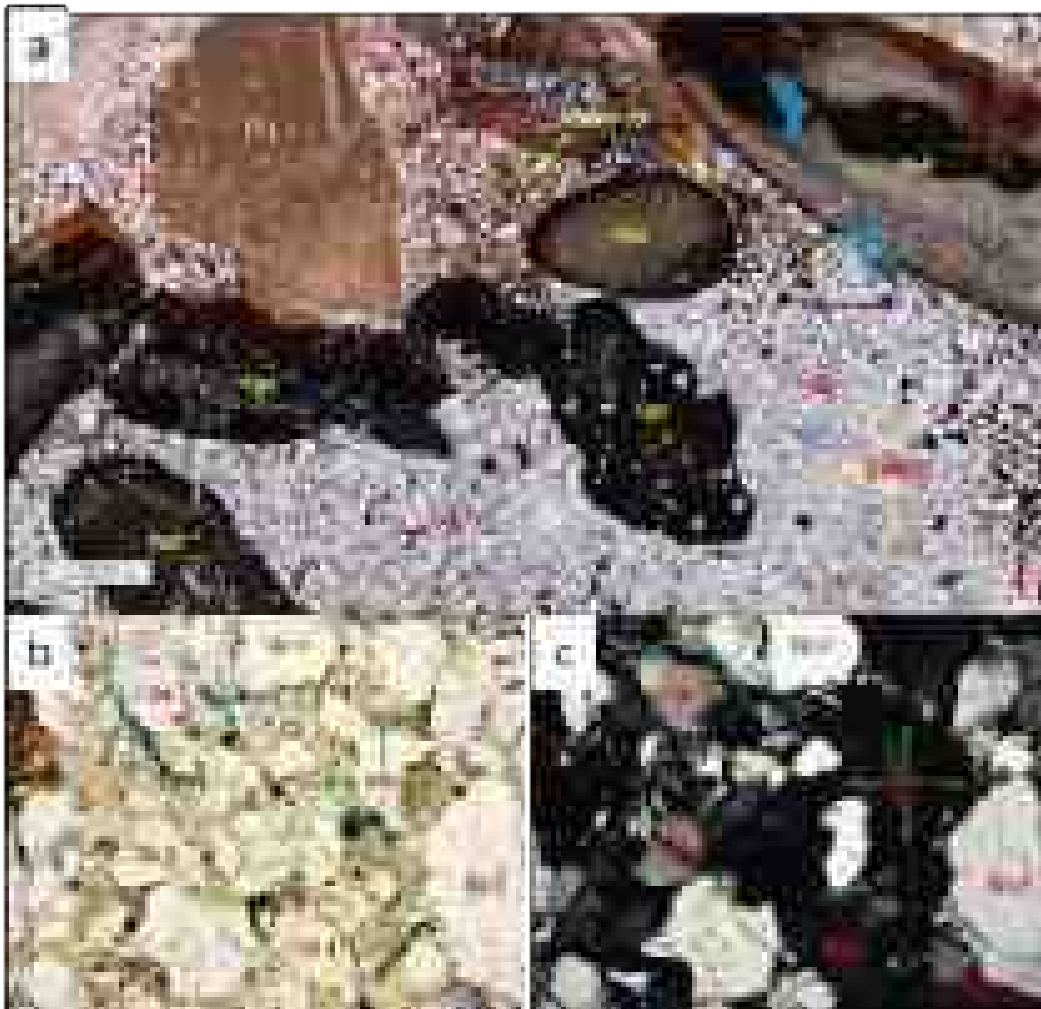
La roca presenta un empaquetamiento moderado (clasto soportado), con cemento ferruginoso hacia la base y silíceo hacia el tope, separando la roca en 2 láminas con color contrastante, pero composición similar. Textural y composicionalmente, es inmadura, con moderada selección (clasto soportada, moderado empaquetamiento, granos subesféricos a subelongados y redondez subangular a subredondeada, con contactos cóncavoconvexos a flotantes; **Figura 5-4a**).

**Diagénesis**

Durante la diagénesis, la roca experimentó compactación (suturando los bordes de los granos de cuarzo), reemplazamiento (de aloquímicos por minerales arcilla), cementación (ferruginosa y silícea) y formación de fracturas (que cortan el armazón y generan porosidad secundaria, aunque pobre del torno del 1,4%; tal como se observa en la **Figura 5-4b, c**). No se observan evidencias de presencia de hidrocarburos en la roca.

**Registro fotográfico**

**Figura 5-4. a)** Vista general, mostrando mala selección textural (conglomerado arenoso lodoso) debido a la heterogeneidad de los granos. Alrededor de la matriz arenosa hay gránulos y guijos de fragmentos aloquímicos, ya sean fragmentos óseos indiferenciados (FgO) y pellets (Pel). Hacia la base, el color negro rojizo intergranular corresponde a cemento ferruginoso (Cem Fe), mientras que el color beige claro hacia el tope corresponde a cemento silíceo (Cem Si). Polaridad indicada con la flecha de la parte inferior derecha. (PPL, 0,45x). **b) y c)** Granos de cuarzo monocristalino con extinción ondulante y recta (Qz 1, Qz 2), así como fragmentos líticos limo-arcillosos de composición mixta (Li 1), en un armazón clastosoportado, embebidos en una matriz de composición terrígena (Mx), hecha de minerales arcillosos indiferenciados y cuarzo, junto a minerales opacos como piritita y óxidos de hierro. Se observan también fracturas que cortan la roca, marcadas por el tensivo azul (PPL y XPL, 10x).

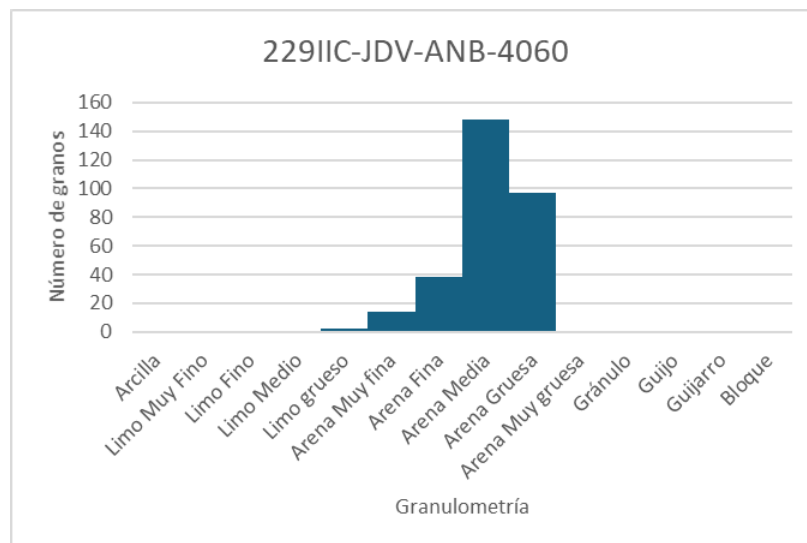


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4060         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> AST-037               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977084 | <b>Norte:</b><br>2092693 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Antonio      |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>193,05 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        | 0,80%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 4,70%                        | 12,80%                     | 49,30%                     | 32,40%                       | 0,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954): Arenita de grano medio****Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos      |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa      | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 48,80%                                 | 33,90%                             | 1,80%          | 0,00%            | 0,60%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |                  |                     |                       |                    |               |              |
| Fosfatos                               | Turmalina                          | Circón         | Óxidos de hierro |                     |                       |                    |               |              |
| 2,10%                                  | <0,3%                              | <0,3%          | <0,3%            |                     |                       |                    |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Porosidad        |                     | Cemento               |                    |               |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides           | Primaria            | Secundaria            | Fosfático          | Arcilloso     | Otro         |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%            | 10,70%              | 0,00%                 | 2,10%              | <0,3%         | 0,00%        |

**Clasificación composicional:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

**Descripción**

Roca clasificada texturalmente como una arenita de grano medio (Folk, 1954) y composicionalmente como cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974). Está conformada por terrígenos como cuarzo monocristalino con extinción fuertemente ondulante, cuarzo monocristalino con extinción recta y cuarzo policristalino, así como fragmentos líticos sedimentarios (posiblemente de chert) y algunos feldespatos potásicos (**Figura 5-5a**). En menor proporción (a modo de trazas) se encuentra circones, turmalinas, minerales arcilla, fosfatos como ooides, y (posiblemente) fosfato cacoxenita (**Figura 5-5c, d**). La roca carece de matriz, pero presenta cementación de fosfatos y óxidos de hierro distribuidos en toda la sección.

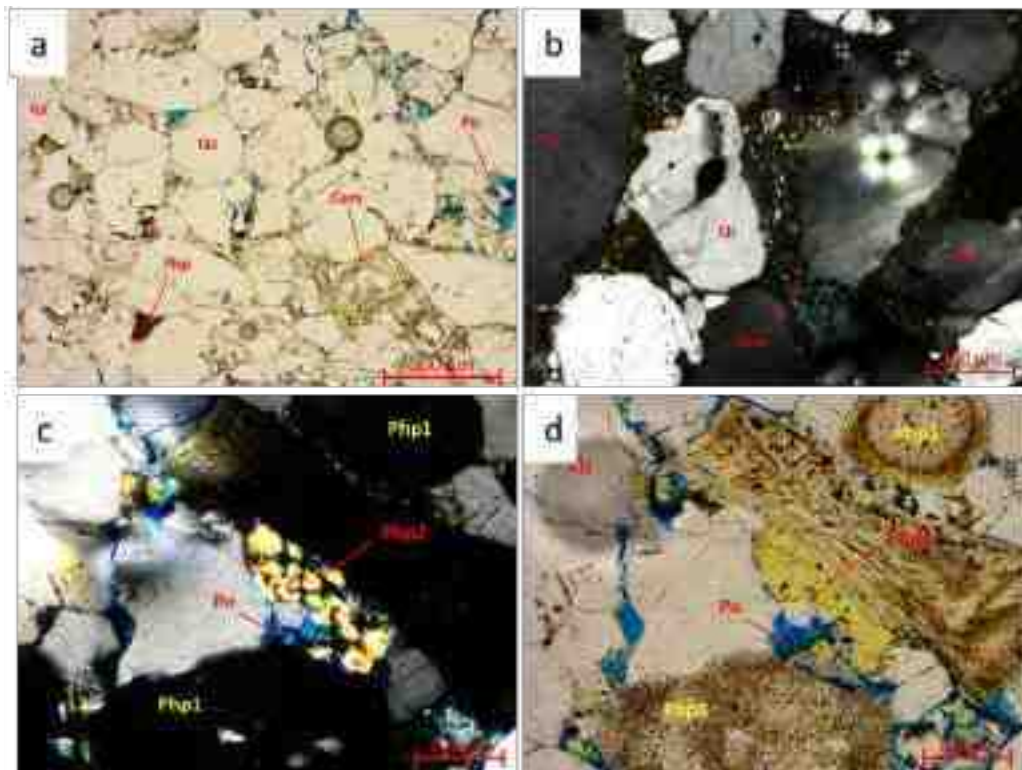
Texturalmente, la roca es una arenita submadura, con granos mayormente subangulares a subredondeados, selección moderada y empaquetamiento medio, lo que da lugar una moderada a buena porosidad primaria (10,7%). Los granos están imbricados y siguen una tendencia inclinada con respecto a la polaridad de la sección, rasgo que se acentúa con un aumento en el predominio de cemento; aunque la laminación no es tan clara ya que no hay pestañas de lodo que acentúan este rasgo.

**Diagénesis**

Diagenéticamente ha experimentado compactación, dando lugar a granos con contactos cóncavoconvexos a longitudinales, desarrollo de microfracturas incipientes, junto con cementación por fosfatos (**Figura 5-5b**); restringiendo de cierta manera la permeabilidad de la roca (**Figura 5-5a**).

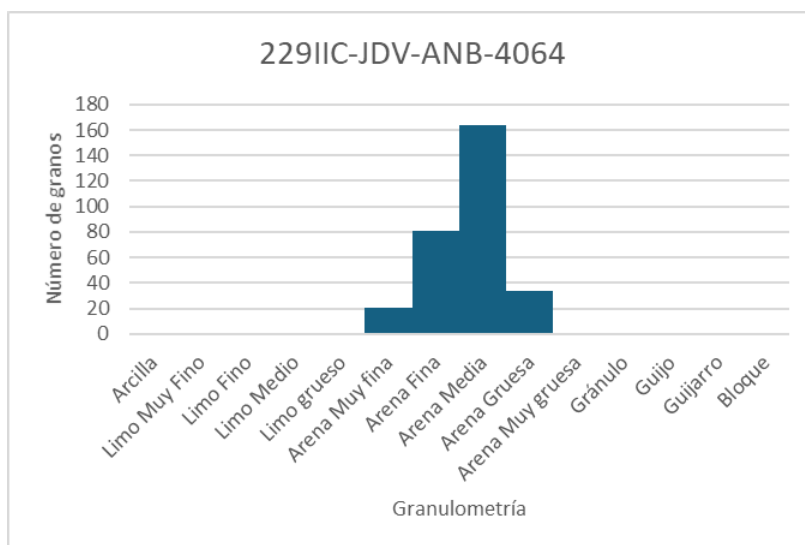
**Registro fotográfico**

**Figura 5-5.** a) Vista general del almacén (arenita de grano medio), donde predominan los granos subredondeados de cuarzo (Qz) monocristalino y de fosfatos (Php), afectados por fracturamiento, lo cual da lugar a porosidad (Po). Hay cemento indiferenciado de composición fosfática y silícea (Cem) (PPL, 0,45x). b) Desarrollo de cemento de composición fosfática y arcillosa (Cem, casi isotrópico en XPL); el cual cristaliza entre los granos de cuarzo (Qz) (XPL, 10x). c) y d) Granos de cuarzo (Qz) y de composición fosfática, tales como Ooides (Php1), entre los cuales cristalizan minerales arcilla, posiblemente *cacoxenita* (Php2). En los intersticios, se desarrolla porosidad primaria (Po) (XPL y PPL, 20x).



**Formato de descripción petrográfica****Información general:**

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4064         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> AST-036               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977069 | <b>Norte:</b><br>2092676 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Antonio      |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>181,50 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

**Conteo textural (absoluto)****Conteo textural (porcentual)**

| Arcilla (< 0,004 mm)            | Limo (0,004-0,063 mm)         |                               |                                 |                                      |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
|                                 | 4 a 7,8 um -<br>Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um -<br>Limo Fino   | 16 a 31 um -<br>Limo Medio      | 31 a 63 um -<br>Limo grueso          |
| 0,00%                           | 0,00%                         | 0,00%                         | 0,00%                           | 0,00%                                |
| Arena (0,063-2 mm)              |                               |                               |                                 |                                      |
| 63 a 125 um -<br>Arena Muy fina | 125 a 250 um -<br>Arena Fina  | 250 a 500 um -<br>Arena Media | 500 a 1000 um -<br>Arena Gruesa | 1000 a 2000 um -<br>Arena Muy gruesa |
| 7,00%                           | 27,10%                        | 54,60%                        | 11,30%                          | 0,00%                                |
| Grava                           |                               |                               |                                 |                                      |
| 2-4 mm Gránulo                  | 4-64 mm Guijo                 | 64-256 mm<br>Guijarro         | >256 mm<br>Bloque               |                                      |
| 0,00%                           | 0,00%                         | 0,00%                         | 0,00%                           |                                      |

**Clasificación textural (Folk, 1954): Arenita de grano medio****Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos          |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa          | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Igenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 29,10%                                 | 42,20%                             | 8,00%          | 0,00%                | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |                      |                     |                       |                    |               |              |
| Fosfatos                               | Turmalina                          | Circón         | Minerales arcillosos | Magnetita           | Hematita              | Pirita             |               |              |
| 2,40%                                  | 0,30%                              | <0,3%          |                      | 0,30%               | 0,30%                 | <0,3%              |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Porosidad            |                     |                       | Cemento            |               |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides               | Primaria            | Secundaria            | Silíceo            | Fosfático     | Otro         |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%                | 4,30%               | 1,20%                 | 10,70%             | 1,20%         | 0,00%        |

**Clasificación composicional:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

**Descripción**

Texturalmente, se clasifica como una arenita de grano medio (Folk, 1954), composicionalmente como una cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974). Los granos terrígenos principales incluyen cuarzo de tipo policristalino y monocristalino con extinción recta y ondulante, fosfatos (ooides, intraclastos y restos óseos) y turmalina (**Figura 5-6a**), con presencia de minerales arcilla sin diferenciar a modo de trazas. También se observa hematita, magnetita y pirita. La matriz intergranular presenta dos tipos de cemento, siendo el silíceo el predominante, seguido por el fosfático. En algunas zonas, el cemento silíceo muestra una coloración distinta, más oscura, debido a la presencia de fosfatos.

Texturalmente, la roca exhibe una selección y un empaquetamiento moderados, con un tamaño de grano que varía desde arena muy fina hasta arena gruesa, lo que indica que la roca es submadura. La redondez promedio de los granos es subredondeada, con una esfericidad que va desde subsférica a subelongada, lo que resulta en una moderada porosidad primaria (4,3%).

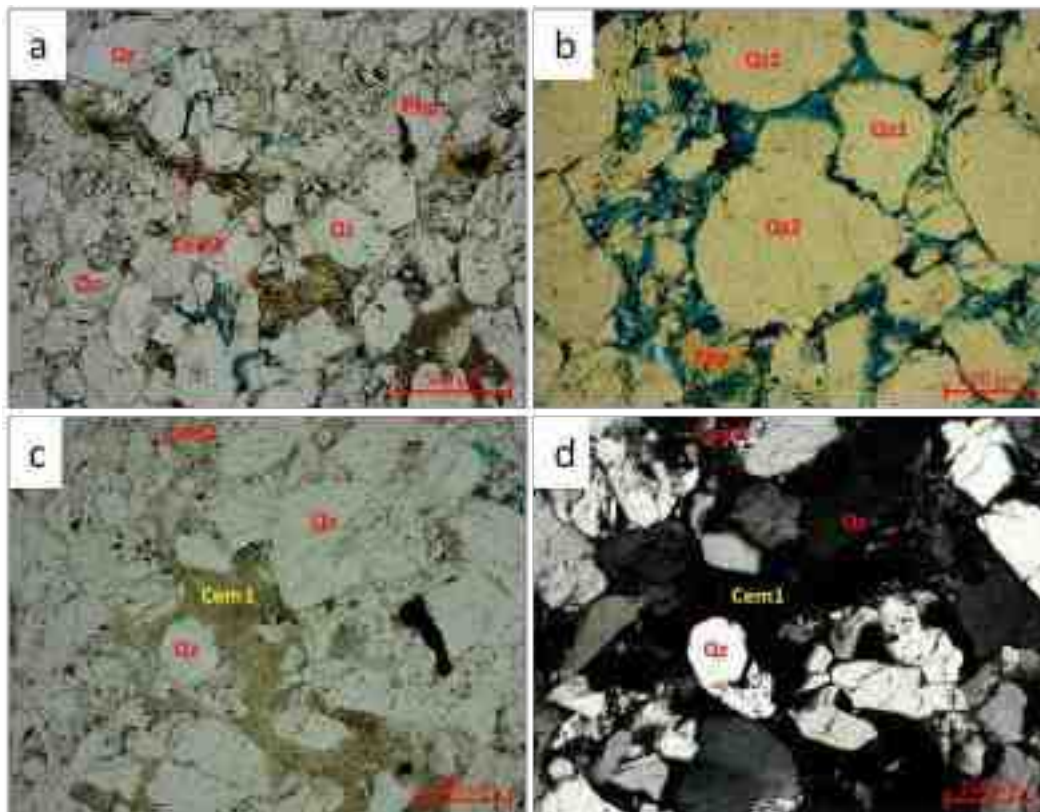
**Diagénesis**

La roca ha experimentado varios procesos diagenéticos, incluyendo la presencia de magnetita y hematita que sugiere oxidación. Se observa cementación silícea (**Figura 5-6a, c, d**) y fosfática, esta última proveniente de los fosfatos presentes en la roca, que a su vez están reemplazando fragmentos fósiles. Los cementos (en conjunto en una proporción del 11,9%) en la roca están parcialmente disueltos, dando lugar a porosidad secundaria (1,2%), la cual es parcialmente permeable al unirse con la porosidad primaria (4,2%) en algunos segmentos de la roca, confiriéndole a la roca porosidad moderada, si se consideran además las fracturas (**Figura 5-6b**). No obstante, la disposición del cemento es bastante irregular en comparación con la muestra ANB-4060, lo cual reduce su calidad como reservorio.

También se evidencia la formación de sulfuros debido a la presencia de pirita. Las fracturas que cortan la laminación re trabajan los granos y el armazón, resultando en texturas mortero (pseudomatríz) que destruyen la porosidad primaria. La roca es clasto soportada, con muy buena madurez composicional. No se observan estructuras sedimentarias deposicionales, pudiendo haber sido destruida por la bioturbación debido a la friabilidad que tiene la roca. Igualmente, no se observa presencia de hidrocarburos.

#### Registro fotográfico

**Figura 5-6.** a) Granos de fosfatos (Php), acompañados de cuarzo (Qz) en el armazón. El material fosfático se disuelve y percola en los espacios intergranulares, recristalizando junto al cemento silíceo (Cem 3), dejando poros primarios parcialmente expuestos (PPL, 5x). b) Granos de cuarzo monocristalino (Qz 1) y de fosfato (Php), los cuales están re trabajados y forman porosidad secundaria, que hace permeable la roca (PPL y XPL, 10x). c) y d) Cemento silíceo (Cem) de la roca. Este cemento tiene relieve casi nulo (en comparación al fosfático) e isotropía, aunque si contiene fosfatos adquiere un color más oscuro. Al predominar el cemento aumenta el empaquetamiento, reduciendo la porosidad (PPL y XPL, 20x).

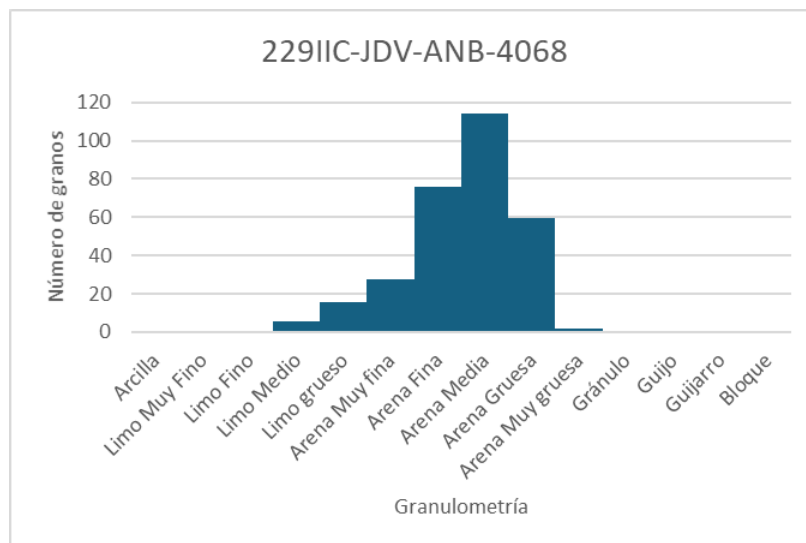


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4068         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> AST-038               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977044 | <b>Norte:</b><br>2092671 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Antonio      |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>202,55 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)            | Limo (0,004-0,063 mm)         |                               |                                 |                                      |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
|                                 | 4 a 7,8 um -<br>Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um -<br>Limo Fino   | 16 a 31 um -<br>Limo Medio      | 31 a 63 um -<br>Limo grueso          |
| 0,00%                           | 0,00%                         | 0,00%                         | 1,80%                           | 5,30%                                |
| Arena (0,063-2 mm)              |                               |                               |                                 |                                      |
| 63 a 125 um -<br>Arena Muy fina | 125 a 250 um -<br>Arena Fina  | 250 a 500 um -<br>Arena Media | 500 a 1000 um -<br>Arena Gruesa | 1000 a 2000 um -<br>Arena Muy gruesa |
| 9,10%                           | 25,40%                        | 38,00%                        | 19,80%                          | 0,60%                                |
| Grava                           |                               |                               |                                 |                                      |
| 2-4 mm Gránulo                  | 4-64 mm Guijo                 | 64-256 mm<br>Guijarro         | >256 mm<br>Bloque               |                                      |
| 0,00%                           | 0,00%                         | 0,00%                         | 0,00%                           |                                      |

**Clasificación textural (Folk, 1954): Arenita de grano medio****Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 78,10%                                 | 14,60%                             | 0,90%          | 0,00%       | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 1,50%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |             |                     |                       |                    |               |              |
| Turmalina                              | Circón                             | Rutilo         |             |                     |                       |                    |               |              |
| <0,3%                                  | <0,3%                              | <0,3%          |             |                     |                       |                    |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Porosidad   |                     |                       | Cemento            |               |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides      | Primaria            | Secundaria            | Ferruginoso        | Arcilloso     | Otro         |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%       | 2,30%               | <0,3%                 | 1,40%              | 1,20%         | 0,00%        |

**Clasificación composicional:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

**Descripción**

Corresponde a una arenita de grano medio (Folk, 1954), composicionalmente a una cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974). Está compuesta principalmente de cuarzo, fragmentos líticos (chert) y fosfatos (pellets e intraclastos) en menor proporción. Además, contiene minerales traza como rutilo, turmalina y circón. La textura está dominada por granos de arena media, seguidos por arena fina (**Figura 5-7a**).

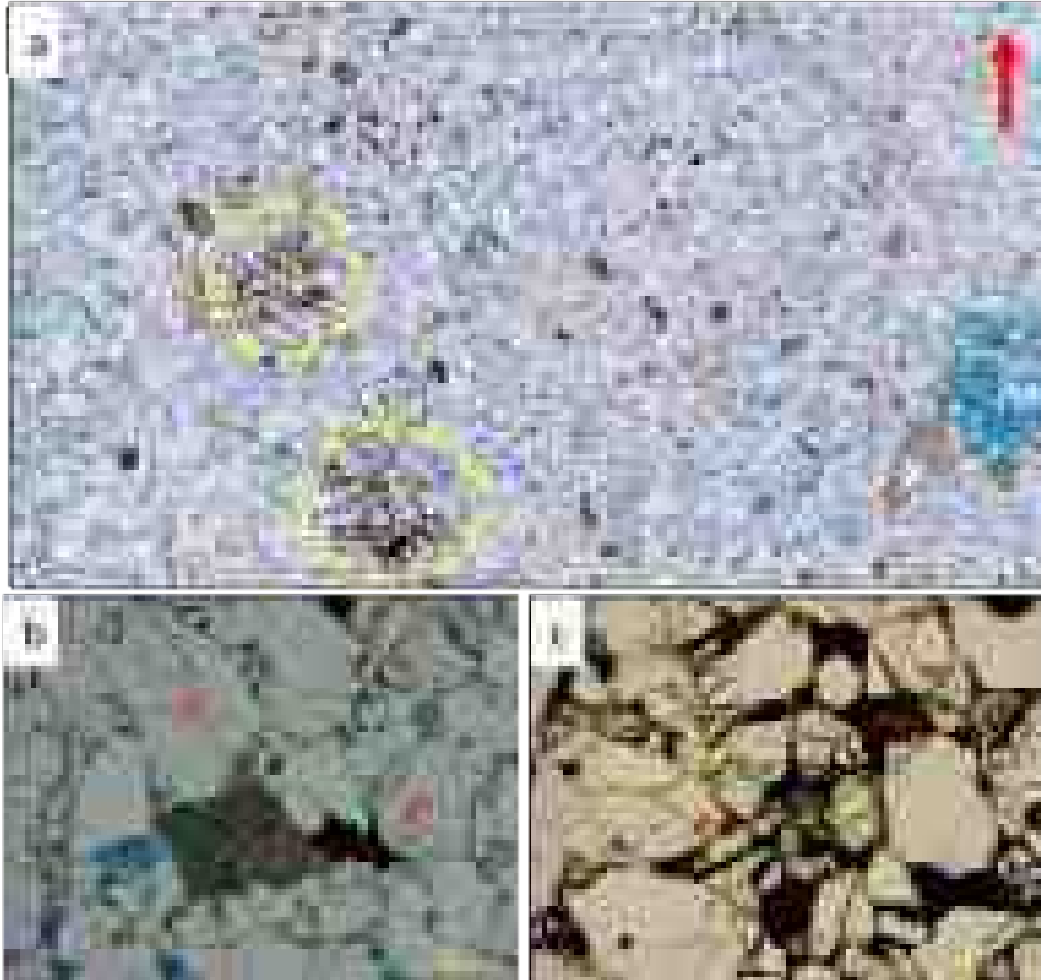
La roca es texturalmente submadura con una selección moderada. Los granos son mayormente subangulares y con baja esfericidad, sin una orientación preferencial, y están empaquetados con alta densidad, evidenciado por la predominancia de contactos longitudinales y la ausencia de matriz.

**Diagénesis**

Producto de la selección y compactación, la roca tiene moderada porosidad (2,3%) de tipo permeable; siendo principalmente de tipo primaria, aunque las fracturas también definen porosidad secundaria (<0,3%, las cuales aumentan su persistencia en algunas zonas de la sección delgada pulida). Durante la diagénesis se forma cemento arcilloso indiferenciado, tratando de ocupar cavidades correspondientes a poros primarios (**Figura 5-7b**). Igualmente, se observan pequeños nódulos de cemento ferruginoso que aglutinan algunos de los granos detríticos (**Figura 5-7a, c**), aunque en general la roca es permeable. No se observa presencia de hidrocarburos.

**Registro fotográfico**

**Figura 5-7. a)** Vista general de la roca, observando el armazón clasto-soportado de la roca, observando moderada porosidad permeable. Dentro de círculos verdes se observan los granos de cuarzo aglutinados en torno al cemento ferruginoso (PPL, 3,5x). **b)** Granos de cuarzo (Qz) y turmalina (Tur) formando un armazón tal que, permite la existencia de porosidad primaria (PPL, 10x). **c)** Granos de cuarzo, acompañados de circón (Zrn) y minerales arcilla indiferenciados, ubicados en los intersticios a modo de matriz (Arc). En este campo visual, el armazón lo confiere el cemento ferruginoso, concretamente hematita (Hem), el cual forma nódulos. (PPL, 10x).



### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4080         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-043               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977066 | <b>Norte:</b><br>2092521 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Lodolitas de Aguacaliente    |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>294,69 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

**Clasificación textural:** Biomicrita dispersa (Folk, 1962), Wackestone (Dunham, 1962).

### Conteo composicional

| Cuarzo                                 |                                    |                    | Feldespatos            |                               |                                              | Fragmentos líticos |                |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|----------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino     | Plagioclasea           | Feldespato alcalino           | Fragmentos graníticos                        | Ígenos             | Sedimentarios  | Metamórficos |
| 0,00%                                  | 0,60%                              | 0,00%              | 0,00%                  | 0,00%                         | 0,00%                                        | 0,00%              | 0,00%          | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                    |                        |                               | Ortoquímicos                                 |                    |                |              |
| Calcedonia                             | Turmalina                          | Fosfatos           | Opacos                 | Materia orgánica              | Micrita                                      | Microesparita      | Pseudoesparita | Esparita     |
| 0,30%                                  | <0,3%                              | <0,3%              | <0,3%                  | 0,30%                         | 17,90%                                       | 63,60%             | 4,80%          | 1,20%        |
| Aloquímicos                            |                                    |                    |                        |                               |                                              | Cemento            |                |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles (Bivalvos) | Fósiles (Equinodermos) | Fósiles (Fragmentos de peces) | Fósiles (Fragmentos fósiles indiferenciados) | Ooides             | Primaria       | Secundaria   |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 5,20%              | 4,90%                  | 0,30%                         | 0,90%                                        | 0,00%              | 0,00%          | 0,00%        |

**Clasificación composicional:** Biomicrita de bivalvos y equinodermos (Folk, 1962).

### Descripción

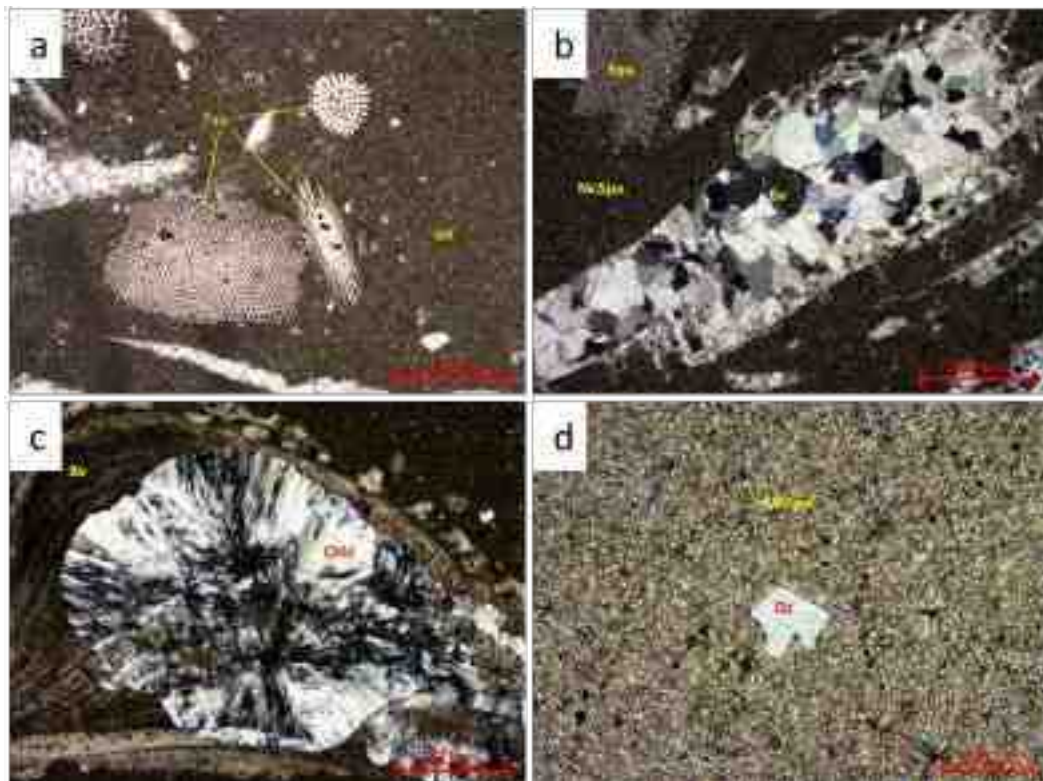
Corresponde a una roca calcárea, clasificada texturalmente como wackestone (Dunham, 1962) y biomicrita dispersa (Folk, 1962). Composicionalmente es una biomicrita de bivalvos (con reemplazamiento a calcita y calcedonia; **Figura 5-8c**) y equinodermos (**Figura 5-8a, b**). Otros aloquímicos presentes son espinas de peces y fragmentos óseos indiferenciados. Todos los aloquímicos se encuentran flotando en una matriz de microesparita principalmente como producto de la recrystalización del lodo calcáreo (micrita) que era el material original de la roca, dicha recrystalización puede llegar a pseudoesparita y esparita (**Figura 5-8d**). Se observan granos terrígenos de cuarzo y turmalina, así como fragmentos fosfáticos y de materia orgánica. Igualmente, en la matriz se observan minerales terrígenos, como cuarzo (siendo lodo terrígeno).

### Diagénesis

Entre los procesos diagenéticos se observa el desarrollo de superficies de disolución o estilolitos perpendiculares a la estratificación. Aunque la roca sea matriz-soportada, esta matriz recrystaliza durante la diagénesis (**Figura 5-8d**), lo que sugiere que fue formada en un ambiente de moderada energía, ya que los aloquímicos están retrabajados, aunque no tan deformados (**Figura 5-8a**), y tienen gran tamaño. Adicionalmente, la roca es bastante competente y es matriz-soportada; pudiendo ser una bioesparita seleccionada (Folk, 1962). No presenta porosidad ni primaria ni secundaria.

### Registro fotográfico

**Figura 5-8.** a) Fragmentos fósiles de equinodermos (Equ) (espículas y espinas), los cuales están rodeados de micrita (Mi) y fragmentos aloquímicos indiferenciados (Fi) (PPL, 10x). b) Fragmento fósil de un bivalvo (Bv), totalmente recrystalizado a calcita, junto a microesparita (McSpa) y fósiles de equinodermos (Equ) (XPL, 5x). c) Fragmentos de bivalvos, reemplazados por calcedonia (Chld) (XPL, 5x). d) Grano de cuarzo, el cual demuestra que la roca tiene algunos componentes terrígenos, aunque escasos. La matriz (originalmente micrítica) se encuentra totalmente recrystalizada a microesparita (McSpa) (XPL, 20x).

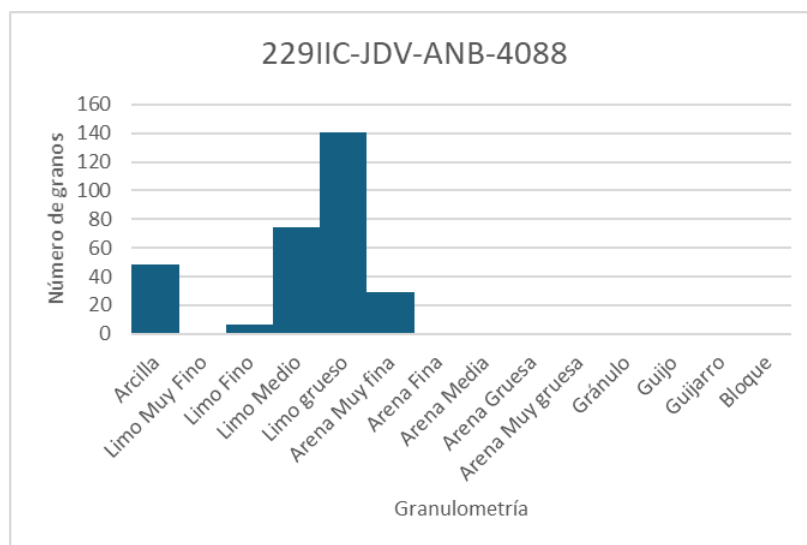


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4088         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-046               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977072 | <b>Norte:</b><br>2092476 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Lodolitas de Aguacaliente    |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>340,13 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)            | Limo (0,004-0,063 mm)         |                               |                                 |                                      |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
|                                 | 4 a 7,8 um -<br>Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um -<br>Limo Fino   | 16 a 31 um -<br>Limo Medio      | 31 a 63 um -<br>Limo grueso          |
| 16,20%                          | 0,00%                         | 2,10%                         | 24,70%                          | 47,00%                               |
| Arena (0,063-2 mm)              |                               |                               |                                 |                                      |
| 63 a 125 um -<br>Arena Muy fina | 125 a 250 um -<br>Arena Fina  | 250 a 500 um -<br>Arena Media | 500 a 1000 um -<br>Arena Gruesa | 1000 a 2000 um -<br>Arena Muy gruesa |
| 9,70%                           | 0,30%                         | 0,00%                         | 0,00%                           | 0,00%                                |
| Grava                           |                               |                               |                                 |                                      |
| 2-4 mm Gránulo                  | 4-64 mm Guijo                 | 64-256 mm<br>Guijarro         | >256 mm<br>Bloque               |                                      |
| 0,00%                           | 0,00%                         | 0,00%                         | 0,00%                           |                                      |

**Clasificación textural (Folk, 1954):** Limolita de grano grueso.

### Conteo composicional

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos |                     |                       | Fragmentos líticos |               |                  |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|------------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Igenos             | Sedimentarios | Metamórficos     |
| 14,30%                                 | 42,10%                             | 0,00%          | 0,30%       | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%            |
| Otros minerales                        |                                    |                |             |                     |                       |                    |               |                  |
| Matriz terrígena                       | Minerales arcillosos               | Muscovita      | Carbonato   | Circón              | Fosfatos              | Glauconita         | Opacos        | Materia orgánica |
| 14,40%                                 | 1,80%                              | 1,20%          | 0,60%       | 0,60%               | 0,30%                 | <0,3%              | 1,20%         | 0,90%            |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Porosidad   |                     |                       | Cemento            |               |                  |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides      | Primaria            | Secundaria            | Calcáreo           | Silíceo       | Otro             |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%       | 0,00%               | 0,00%                 | 17,10%             | 5,20%         | 0,00%            |

**Clasificación composicional:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

### Descripción

Roca terrígena, clasificada texturalmente como una limolita de grano grueso (Folk, 1954), composicionalmente una cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974). Los granos terrígenos principales incluyen cuarzo monocristalino con extinción recta y ondulante, carbonatos sin diferenciar, circón, fosfatos y plagioclasa; y en trazas, glauconita. También se observa magnetita, óxidos de hierro sin identificar y pirita. A nivel intergranular, se diferencian dos tipos de matriz: una compuesta principalmente de minerales arcillosos (que forma pestañas de arcillolita) y otra que es una mezcla de minerales arcillosos y carbonatos (Figura 3 24c, d). Los dos tipos de cemento presentes son calcáreo y silíceo, siendo el primero más predominante, con zonas donde muestra una mayor cristalización (Figura 5-9a); mientras que el segundo recrystaliza a partir de la matriz (Figura 5-9b).

Texturalmente, la roca exhibe muy buena selección y empaquetamiento moderado debido a la matriz, con un rango de tamaño de grano desde limo fino hasta arena muy fina, lo que indica inmadurez. La redondez promedio de los granos es subangular, con una orientación casi paralela a la laminación. Se observa laminación paralela que se vuelve ligeramente ondulosa en algunas zonas (Figura 5-10a).

En la parte media de la roca, la laminación se interrumpe debido a una laminación más caótica, donde aumenta la proporción de pellets, ooides e intraclastos fosfáticos, producto posiblemente de deformación de las ondulitas, ya que aún hay estructuras sedimentarias (laminación que tiende a estar inclinada, por sets), pero se pierde en contraprestación a una roca que más homogénea que la base o el tope (Figura 5-10a). La deformación y cambio en las estructuras sedimentarias sugiere que se trata de laminación hummocky.

### Diagénesis

La roca presenta varios procesos diagenéticos, como oxidación (presencia de óxidos de hierro), cementación de sílice y calcárea en buena proporción (22,3%, tal como se observa en la **Figura 5-9a, b**), y sulfuros (presencia de pirita). Se identifica una fractura prácticamente paralela a la laminación, donde se encontró materia orgánica. La respuesta de la roca en epifluorescencia es baja, por lo que no hay hidrocarburo. Es impermeable, con porosidad nula. El cemento recristaliza a partir de micrita, formando microesparita.

#### Registro fotográfico

**Figura 5-9. a)** Granos de cuarzo (Qz), circón (Zrn) y óxidos de hierro (FeOx), los cuales están en contacto cóncavoconvexo y muestran alto empaquetamiento. Intersticialmente hay cemento calcáreo (Cem2) (XPL, 20x). **b)** Cemento silíceo (Cem1), dando armazón a los granos de cuarzo monocristalino con extinción recta y ondulante (Qz 1, Qz 2), junto a los granos de moscovita (Ms) y óxidos de hierro (FeOx) (XPL, 10x). **c)** y **d)** Matriz (Mx2) la cual consta de una mezcla de carbonatos con minerales arcillas (razón por la cual se usa cuña de  $\lambda$ ) para diferenciarla de minerales terrígenos con menor birrefringencia (principalmente cuarzo y glauconita). (XPL y compensada con  $1\lambda$ , 10x).

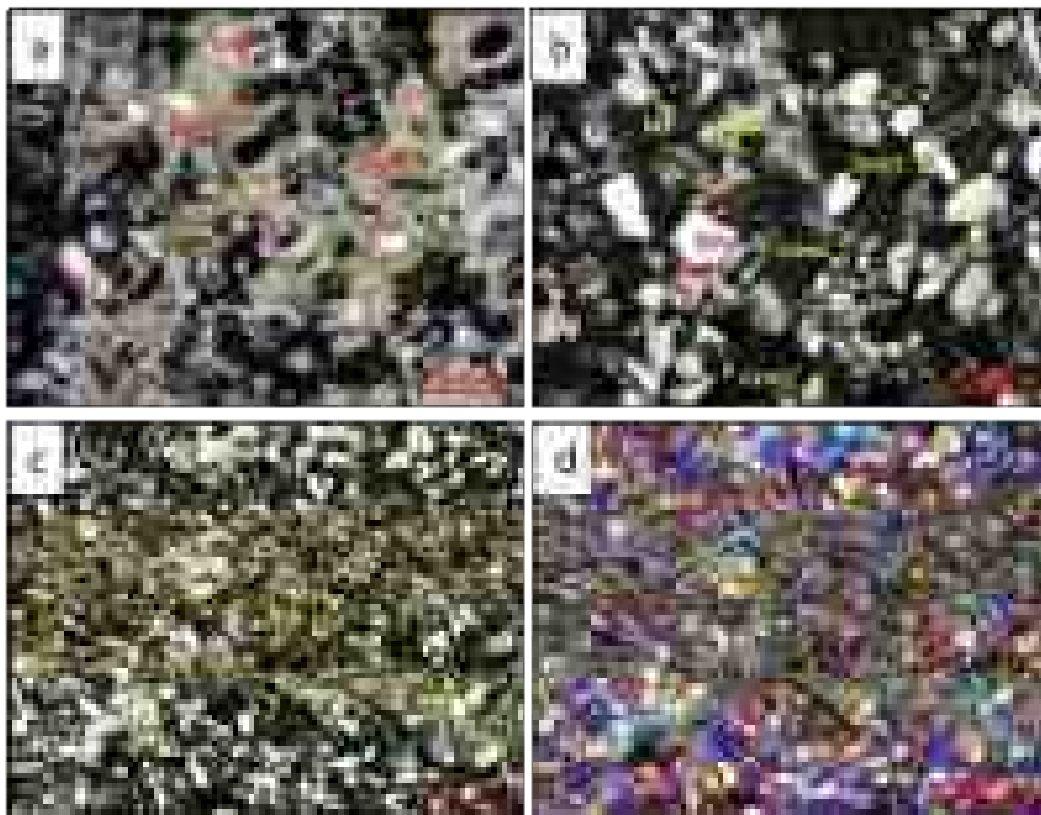


**Figura 5-10. a)** Vista general, observando el tamaño de grano muy fino en la roca, y muy buena selección. Hay laminación subparalela ondulosa (marcada con líneas amarillas), definida por una intercalación entre láminas oscuras (matriz-soportadas) y láminas claras (con predominio de cemento); existiendo zonas donde se hay rizaduras (encerrada con círculo rojo) y lentes de láminas más claras (encerradas con círculo azul) (PPL, 10x).

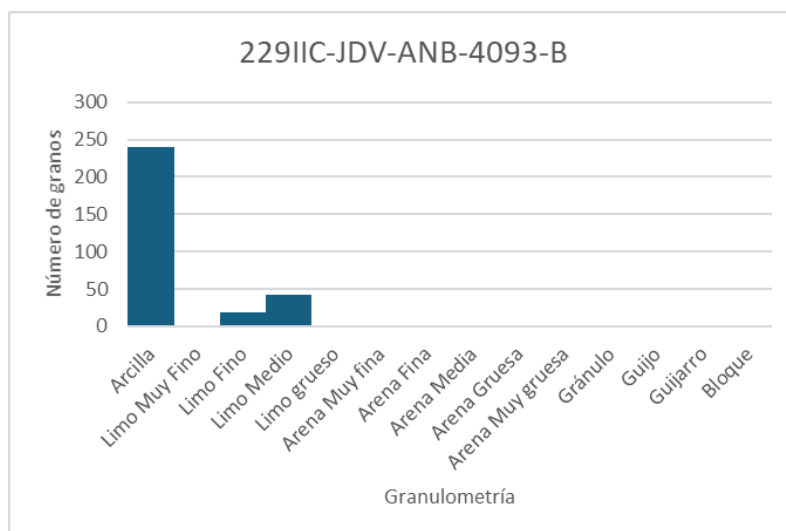
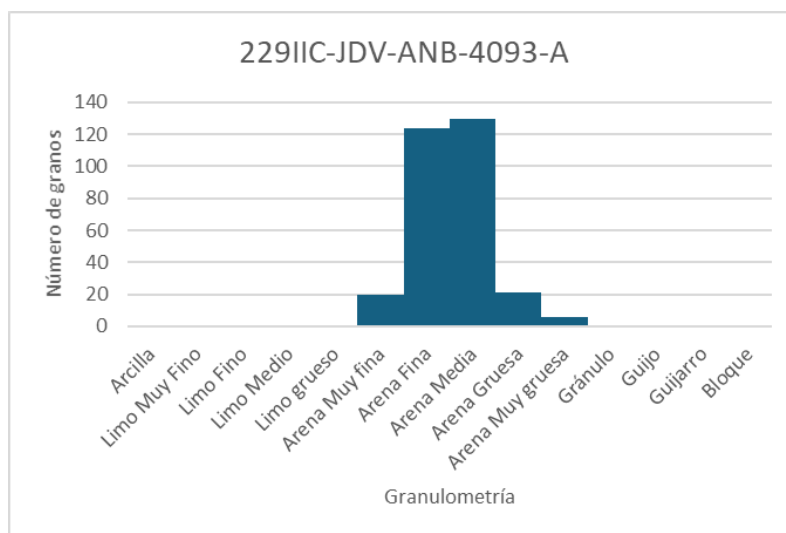


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4093         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-050               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977077 | <b>Norte:</b><br>2092448 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Lodolitas de Aguacaliente    |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>361,98 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



**Conteo textural (porcentual) – 4093-A**

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        | 0,00%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 6,60%                        | 41,20%                     | 43,30%                     | 7,00%                        | 1,90%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Conteo textural (porcentual) – 4093-B**

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 80,00%                       | 0,00%                      | 6,10%                      | 13,90%                       | 0,00%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        | 0,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954):****4093-A (Tope):** Arenita de grano medio**4093-B (Base):** Arcillolita**Conteo composicional – 4093-A**

| Cuarzo                                 |                                    |                               | Feldespatos      |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino                | Plagioclasa      | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 11,30%                                 | 37,70%                             | 0,00%                         | 0,00%            | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,40%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                               |                  |                     |                       |                    |               |              |
| Glauconita                             | Calcedonia                         | Muscovita                     | Matriz terrígena | Pirita              | Magnetita             |                    |               |              |
| <0,3%                                  | <0,3%                              | <0,3%                         | <0,3%            | <0,3%               | <0,3%                 |                    |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                               | Ortoquímicos     |                     | Cemento               |                    | Porosidad     |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles (fragmentos de peces) | Ooides           | Esparita            | Silíceo               | Calcáreo           | Primaria      | Secundaria   |
| 6,60%                                  | 0,40%                              | 8,20%                         | 0,00%            | 25,70%              | 9,70%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |

**Clasificación composicional:** Arenita aloquímica (Mount, 1985).

### Conteo composicional – 4093-B

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos  |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa  | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| <0,3%                                  | 9,20%                              | <0,3%          | <0,3%        | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |              |                     |                       |                    |               |              |
| Minerales arcillosos                   | Carbonatos                         | Circón         |              |                     |                       |                    |               |              |
| 81,50%                                 | 3,10%                              | <0,3%          |              |                     |                       |                    |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Ortoquímicos |                     | Cemento               |                    | Porosidad     |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides       | Esparita            | Calcáreo              | Silíceo            | Primaria      | Secundaria   |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%        | 0,00%               | 6,20%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |

**Clasificación composicional:** Arcillolita.

### Descripción

Proveniente de la Formación Lodolitas de Aguacaliente, consiste en una muestra que contiene 2 litologías diferentes, descritas a continuación de base a tope:

**Base (B):** Roca sedimentaria siliciclástica, clasificada como arcillolita (Folk, 1954), contiene minerales arcilla sin diferenciar (**Figura 5-11a, b**), cuarzo monocristalino con extinción recta, carbonatos sin diferenciar, y trazas de cuarzo monocristalino con extinción ondulante, cuarzo policristalino, circón, plagioclasa y pirita.

Texturalmente, muestra una excelente selección y empaquetamiento, con un rango de tamaño de grano desde arcilla hasta limo medio, lo que sugiere inmadurez. La redondez promedio de los granos es subangular, con una esfericidad en un rango entre subesférica y subelongada.

**Tope (A):** Roca sedimentaria mixta, texturalmente clasificada como una arenita aloquímica (Mount, 1985), y composicionalmente también como cuarzoarenita según Folk et al. (1974). Exhibe una predominancia de granos detríticos terrígenos, incluyendo cuarzo monocristalino con extinción recta y ondulante, y trazas de glauconita, calcedonia y muscovita. Como aloquímicos, contiene fragmentos de peces, pellets, peloides e intraclastos fosfáticos (**Figura 5-11d**), todos con una composición principalmente fosfática.

El cemento se compone mayormente de esparita (**Figura 5-11c**), seguido por cemento silíceo.

Texturalmente su selección es moderada y tiene empaquetamiento deficiente debido al predominio de esparita en el armazón (los contactos de los granos son flotantes y tangenciales, **Figura 5-11c**). El tamaño de grano varía desde arena muy fina hasta arena gruesa para los terrígenos, y desde arena fina hasta arena muy gruesa para los granos aloquímicos, lo que sugiere una alta madurez textural. La redondez promedio de los granos es subredondeada a subangular, con una esfericidad en un rango entre subesférica y subelongada. Aunque la roca está muy cementada, se alcanza a observar una incipiente imbricación o lineamiento entre los granos perpendicular a la polaridad de la muestra reconocida en campo (principalmente los aloquímicos que son alargados), lo que sugiere laminación.

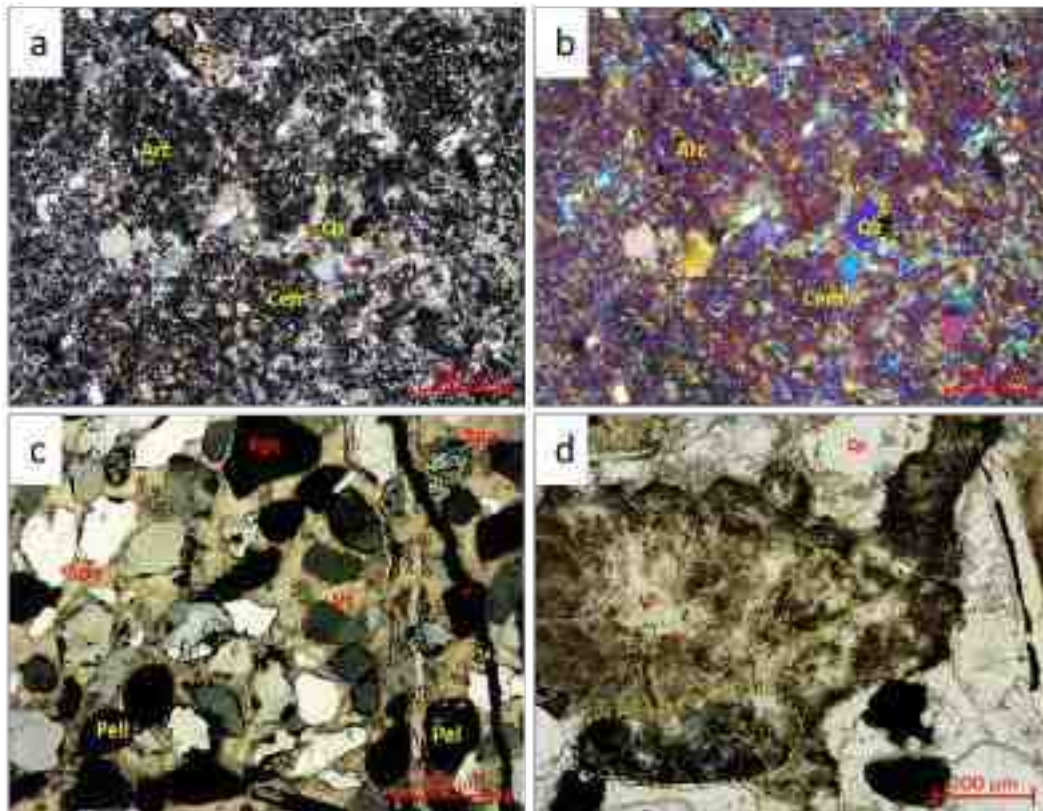
### Diagénesis

En la base (ANB-4093B), los procesos diagenéticos incluyen cementación calcárea, fracturamiento y estilolitos, y presencia de sulfuros debido a la pirita. En epifluorescencia, la respuesta es casi nula, sugiriendo inexistencia de hidrocarburos. La roca carece de porosidad, ya que los espacios intergranulares están ocupados por cemento calcáreo y silíceo (**Figura 5-11a, b**). Se observa hacia el tope un aumento en la energía del ambiente deposicional, así como una mayor preservación de fósiles manteniendo formas angulares.

Entre tanto, hacia el tope (ANB-4093A), la roca exhibe varios procesos diagenéticos, incluyendo oxidación (presencia de magnetita), cementación de sílice y calcárea con esparita, fracturamiento perpendicular al tope, presencia de pirita como sulfuro y sobrecrecimientos en granos de cuarzo con sílice. En epifluorescencia, muestra una respuesta fuerte, especialmente en los aloquímicos, confirmando su composición fosfática; mas no relacionado con la presencia de hidrocarburos, ya que además de trata de una roca impermeable con porosidad nula.

### Registro fotográfico

**Figura 5-11. a) y b)** Cemento calcáreo (Cem), identificado de manera intergranular entre los granos de cuarzo (Qz) y minerales arcillas indiferenciados (Arc). Debido a que la roca es de grano muy fino y tiene (en consecuencia) alto relieve y alta birrefringencia, es necesario reconocerla con lamina compensadora. El cemento calcáreo está asociado a los granos de cuarzo, ocupando vetillas (XPL y compensada con 1λ, 10x). **c)** Granos de cuarzo (Qz), fragmentos de peces (Fpc), pellets (Pell) y peloides (Pel) que están siendo cementados por esparita (Spa, vista en **Figura 5-11c**). La roca presenta fracturas (Fr) que son rellenadas por carbonato a modo de vetillas (Vt) (XPL, 5x). **d)** Intraclasto (Icl), de composición fosfática. En su interior presenta granos de formas redondeadas y algunas ligeramente alargadas (marcadas con líneas punteadas amarillas). (PPL, 10x).

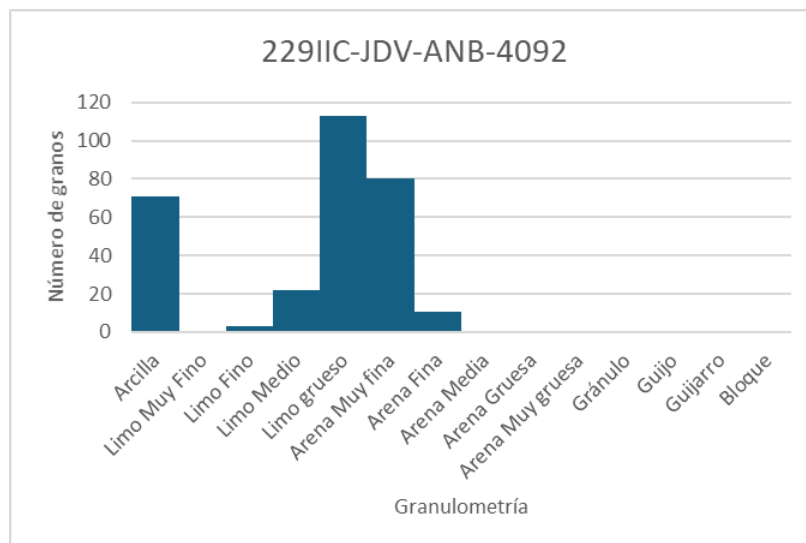


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                |                         |                          |                                                        |                         |
|------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4092         |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-051               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                             | <b>Este:</b><br>4977077 | <b>Norte:</b><br>2092448 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                    |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Lodolitas de Aguacaliente    |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>365,34 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo       |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 23,64%                       | 0,00%                      | 0,96%                      | 7,35%                        | 37,70%                            |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 26,84%                       | 3,51%                      | 0,00%                      | 0,00%                        | 0,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954):** Lodolita arenosa de grano muy fino**Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos  |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasea | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 36,10%                                 | 13,40%                             | 0,30%          | 1,60%        | 7,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |              |                     |                       |                    |               |              |
|                                        | Turmalina                          | Muscovita      | Glaucónita   | Hematita            | Pirita                | Rutilo             |               |              |
| 23,60%                                 | 0,60%                              | 0,30%          | <0,3%        | 1,00%               | <0,3%                 | <0,3%              |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Ortoquímicos |                     | Cemento               |                    | Porosidad     |              |
|                                        | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides       | Esparita            | Ferruginoso           | Silíceo            | Primaria      | Secundaria   |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%        | 0,00%               | 5,80%                 | 8,30%              | 2,00%         | 0,00%        |

**Clasificación:** Sublitoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974), intercalada con lodolitas y arcillolitas.

**Descripción**

Roca clasificada como una lodolita arenosa de grano muy fino (Folk, 1954) en la cual se observa que consta de una intercalación de arenitas de grano muy fino con lodolitas y arcillolitas, las cuales tienen laminación plano-paralela inclinada hacia la base, mientras que hacia el tope es más ondulosa (como se observa en la **Figura 5-12a**). Las láminas arenosas son de composición sublitoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

Está formada por granos de cuarzo (monocristalino con extinción ondulante y recta, compuesto), feldespatos (alcalino y plagioclasea), matriz (que está compuesta de una mezcla indiferenciada de minerales arcilla, fosfatos y óxido de hierro), así como por granos detríticos como turmalina, muscovita y glauconita (**Figura 5-12c**). Se reconocen 2 tipos de cemento: silíceo y ferruginoso, los cuales ocupan parcialmente la porosidad primaria de la roca (**Figura 5-12b, c**), encontrándose en una proporción conjunta del 14,1%. Internamente, las pestañas de lodo muestran amalgamamiento (**Figura 5-12d**), debido al retrabajamiento de láminas arenosas preexistentes, que deforman el sustrato y define la acomodación de dichas pestañas.

**Diagénesis**

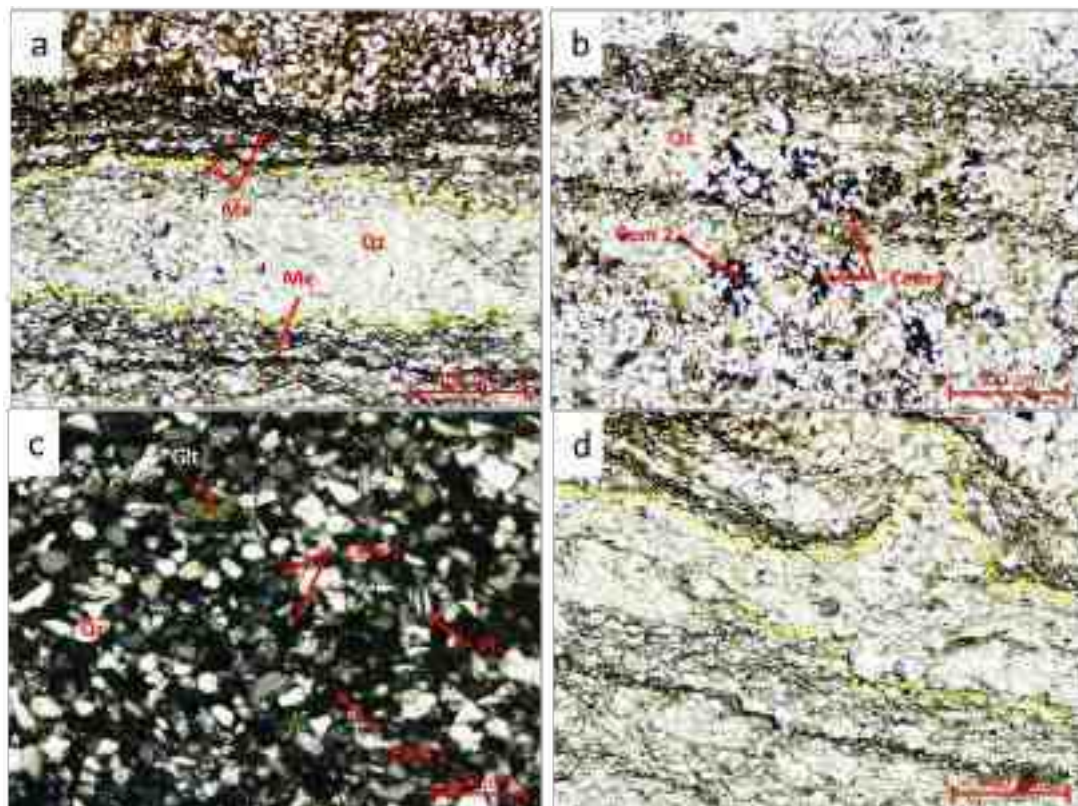
Respecto a los procesos diagenéticos, el que más llama la atención es la bioturbación. De no ser por la muestra de mano y los incipientes granos imbricados no sería posible reconocer estructura sedimentaria alguna. Tanto las láminas claras de limolita y arenita, como las oscuras de lodolita y arcillolita muestran intenso retrabajamiento y color rojizo debido a las patinas de oxidación. No obstante, estas laminillas retrabajadas internamente mantienen su geometría laminar externa, y considerando el pequeño espesor que desarrollan (entre 1 y 5 mm, ya sean claras u oscuras) así como el carácter matriz-soportado predominante,

sugieren que el ambiente de depósito fue de baja energía, ocurriendo episódicos eventos de alta energía (no turbulentos, ya que no hay retrabajamiento del sustrato) que retrabajan las láminas arenosas (**Figura 5-12d**).

Tiene poca porosidad primaria (2%), además de no haberse observado presencia de hidrocarburos, en parte debido al contenido de cementos.

### Registro fotográfico

**Figura 5-12.** **a)** Cambios en la laminación, pasando de ondulosa en la base, a flaser en la mitad, a ondulosa en el tope (separadas por líneas amarilla punteadas). Estos cambios de laminación ocurren cíclicamente en toda la muestra (PPL, 5x). **b)** Vista general del armazón de la roca, donde se observan granos de cuarzo (Qz) intercalados con lodo y cementado con material ferruginoso (Cem 2) (PPL, 5x). **c)** Granos de cuarzo, acompañados de plagioclasa (Pl) y glauconita (Glt), en un armazón dado por cemento silíceo (Cem 1) (XPL, 5x). **d)** Laminación ondulosa, donde se observa amalgamamiento de las pestañas de lodo, por retrabajamiento del sustrato arenoso. La base de las pestañas de lodo se muestra con línea amarilla punteada (PPL, 5x).

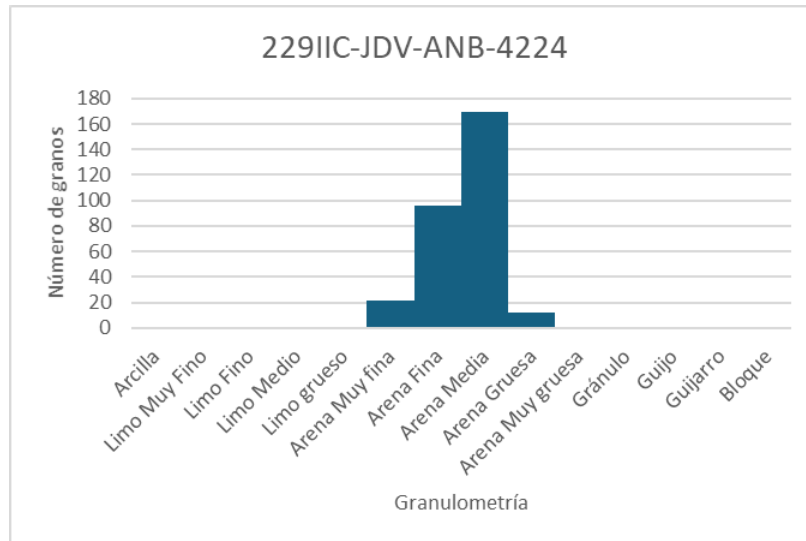


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                  |                         |                          |                                                        |                         |
|--------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4224           |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-053               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida   |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                               | <b>Este:</b><br>4977076 | <b>Norte:</b><br>2092414 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                      |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Luis de Gaceno |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>394,92 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo         |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,40%                        | 0,00%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 7,30%                        | 31,90%                     | 56,40%                     | 4,00%                        | 0,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954):** Arenita de grano medio.

### Conteo composicional

| Cuarzo                                 |                                    |                     | Feldespatos  |                     |                       | Fragmentos líticos |               |                  |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|------------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino      | Plagioclasa  | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Igenos             | Sedimentarios | Metamórficos     |
| 62,20%                                 | 27,60%                             | 0,00%               | 0,00%        | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%            |
| Otros minerales                        |                                    |                     |              |                     |                       |                    |               |                  |
| Fosfatos                               | Pseudomatriz                       | Glauconita          | Circón       | Turmalina           | Epidota               | Matriz             | Opacos        | Materia orgánica |
| 1,20%                                  | 0,30%                              | <0,3%               | <0,3%        | <0,3%               | <0,3%                 | <0,3%              | 0,30%         | 2,20%            |
| Aloquímicos                            |                                    |                     | Ortoquímicos |                     | Cemento               |                    | Porosidad     |                  |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fragmentos de peces | Ooides       | Esparita            | Calcáreo              | Silíceo            | Primaria      | Secundaria       |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%               | 0,00%        | 0,00%               | 4,20%                 | 0,00%              | 2,00%         | 0,00%            |

**Clasificación:** Cuarzoarenita (Folk et al. 1970; Folk, 1974).

### Descripción

La roca se clasifica texturalmente como arenita de grano medio (Folk, 1954) y composicionalmente como cuarzoarenita (Folk et al. 1970; Folk, 1974). Está compuesta principalmente por terrígenos, destacando el cuarzo monocristalino con extinción ondulante, así como también cuarzo monocristalino con extinción recta. Otros componentes presentes en menor cantidad incluyen materia orgánica, fosfatos (pellets) y pseudomatriz (**Figura 5-13a, c, d**). En trazas, se encuentran circones, turmalina, epidota y glauconita. También se tienen como minerales opacos pirita, magnetita y goethita, este último como reemplazo de la magnetita.

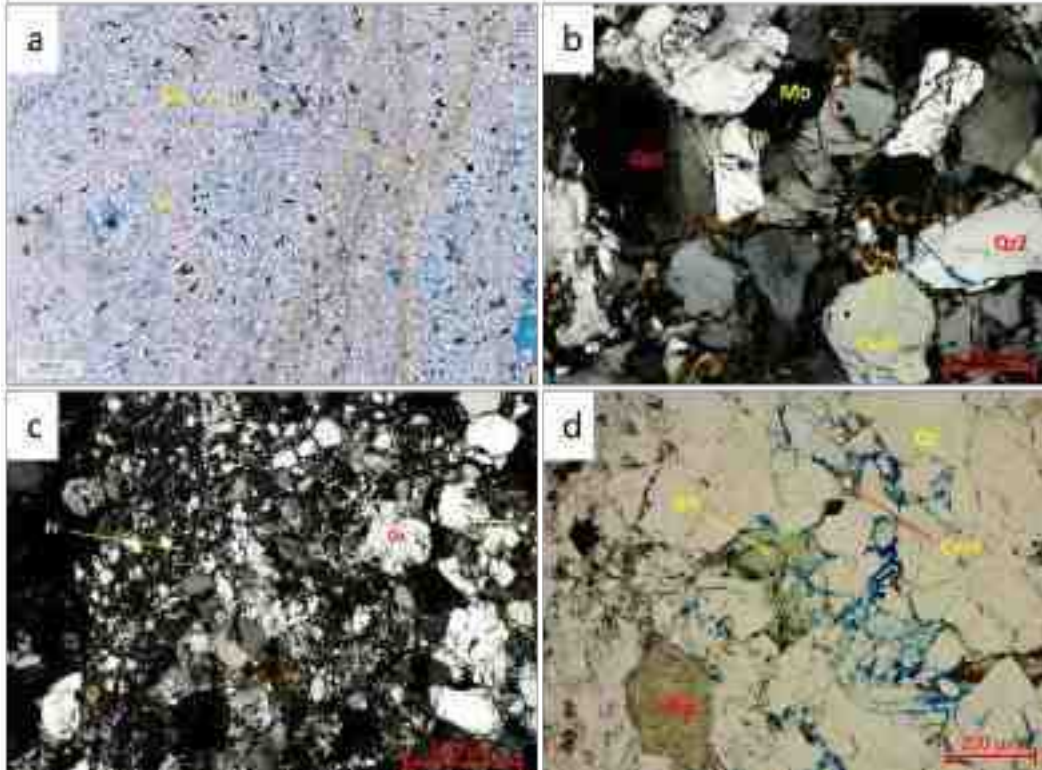
La roca contiene matriz en una proporción muy baja y presenta cementación de carbonato de calcio (4,2%), resultado de la recristalización de micrita a esparita (**Figura 5-13b**). Texturalmente, se clasifica como una arenita submadura, con granos mayormente subangulares, buena selección y alto empaquetamiento, sin mostrar orientación preferencial ni laminación (**Figura 5-13a**).

### Diagénesis

Diagenéticamente, la roca ha experimentado cementación calcárea (**Figura 3 28b**), disolución de granos, recristalización de micrita a esparita, reemplazamiento de material fosfático por materia orgánica y el desarrollo de una zona de falla que alteró su textura (**Figura 5-13a, c**). En promedio, la porosidad primaria es pobre (2%), aunque en algunas partes de la muestra la roca es bien permeable y su porosidad aumenta considerablemente (**Figura 5-13a, d**). Las microfallas han provocado reabajamiento del armazón de la roca, fracturando granos y generando porosidad secundaria, aunque escasa. Las cavidades resultantes son rellenadas por pseudomatriz, desarrollando texturas mortero debido al fracturamiento (**Figura 5-13c**).

**Registro fotográfico**

**Figura 5-13.** a) Textura general, mostrando el desarrollo de una zona de fractura (Fr) que rompe el armazón de la roca (delimitada con líneas amarillas), el cual se compone principalmente de granos de cuarzo (Qz) y materia orgánica (Mo). También se observa porosidad (marcada por tensivo azul) (PPL, 0,2x). b) Granos de cuarzo monocristalino con extinción ondulante (Qz1) y recta (Qz2), acompañados de materia orgánica (Mo) y cemento calcáreo (Cem), el cual recrystaliza a partir de micrita (Mi) o matriz calcárea (XPL, 10x). c) Desarrollo de una zona de fractura (Fr), la cual se reconoce por presentar molienda y disminución del tamaño de grano, formando pseudomatríz. Alrededor se pueden observar granos de cuarzo (Qz) con el tamaño original, pero con fracturas. (XPL, 5x). d) Granos de fosfatos (Php), acompañados de glauconita (Glt), cuarzo (Qz) y cemento arcilloso (Cem) intergranular. Nótese la porosidad primaria, parcialmente permeable debido al desarrollo de fracturas. (PPL, 10x).

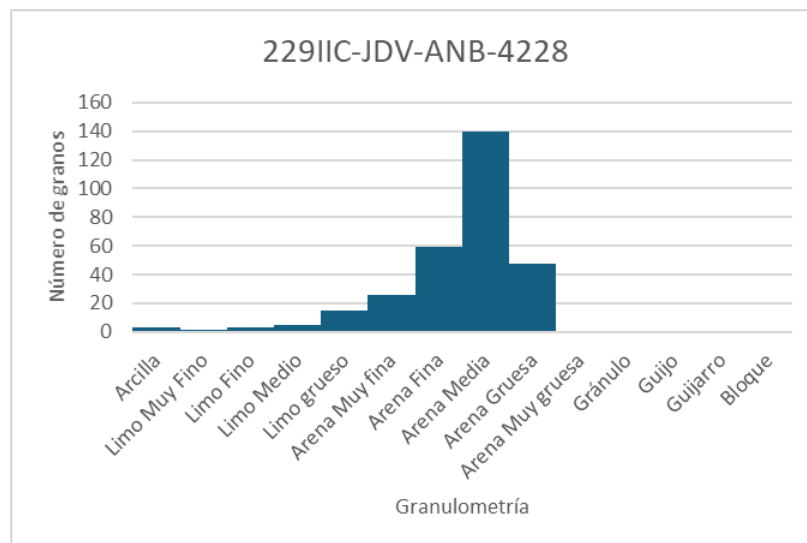


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                  |                         |                          |                                                        |                         |
|--------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4228           |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-054               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida   |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                               | <b>Este:</b><br>4977053 | <b>Norte:</b><br>2092386 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                      |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Luis de Gaceno |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>408,40 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo         |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 0,97%                        | 0,65%                      | 0,97%                      | 1,61%                        | 4,84%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 8,71%                        | 19,68%                     | 46,45%                     | 15,81%                       | 0,32%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954): Arenita de grano medio.****Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                     | Feldespatos  |                     |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino      | Plagioclasa  | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 64,30%                                 | 11,60%                             | 0,00%               | 0,00%        | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%        |
| Otros minerales                        |                                    |                     |              |                     |                       |                    |               |              |
| riz                                    | Circón                             | Turmalina           | Hematita     |                     |                       |                    |               |              |
| 1,00%                                  | 0,70%                              | 0,30%               | 1,30%        |                     |                       |                    |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                     | Ortoquímicos |                     | Cemento               |                    | Porosidad     |              |
| sts                                    | Intraclastos                       | Fragmentos de peces | Ooides       | Esparita            | Calcáreo              | Silíceo            | Primaria      | Secundaria   |
| 2,00%                                  | 0,30%                              | 1,00%               |              |                     | 1,60%                 | 3,30%              | 3,90%         | 8,70%        |

**Clasificación:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

**Descripción**

Roca clasificada texturalmente como una arenita de grano medio (Folk, 1954), composicionalmente como cuarzoarenita (Folk et al. 1970; Folk, 1974).

Texturalmente tiene buena madurez (poca matriz de minerales arcillosos, contactos puntuales intergranulares, armazón clastosoportado), aunque se observa pseudomatríz formada como producto del retrabajamiento de los granos de cuarzo (**Figura 5-14a**). La roca tiene moderado empaquetamiento, además de que se encuentra retrabajado por fracturas (**Figura 5-14b, c**), que permiten la creación de porosidad secundaria a lo largo de la cual percola cemento fosfático (**Figura 5-14a, c**) y siderítico (**Figura 5-14d**). En cuanto a estructuras sedimentarias, se observa laminación incipiente, debido a la imbricación de algunos granos (**Figura 5-14b**). Composicionalmente, el cuarzo se encuentra en altísima proporción (75,9%), habiendo también granos aloquímicos de pellets, fragmentos de peces e intraclastos fosfáticos (**Figura 5-14b**); e igualmente minerales detríticos como circón, turmalina, carbonatos, glauconita, epidota y titanita.

**Diagénesis**

Como procesos diagenéticos, por temporalidad se reconoce fracturamiento, cementación (**Figura 5-14a, c, d**) y disolución de granos; lo cual da lugar a la formación de buena porosidad secundaria (8,8%), que en conjunto a la porosidad primaria (3,9%) y a su buena madurez textural, le confiere friabilidad a la roca. No obstante, no se reconocieron hidrocarburos.

**Registro fotográfico**

**Figura 5-14. a)** Granos de cuarzo (Qz), definiendo un armazón clastosoportado, debido a la presencia de espacios intergranulares que corresponden a porosidad primaria (círculo verde) y secundaria por fracturas y disolución (círculo rojo). El retrabajamiento de los granos de cuarzo da lugar a pseudomatríz (PsMx) (PPL, 5x). **b)** Imbricación de granos de cuarzo e intraclastos fosfáticos (Icl), entre los cuales hay porosidad primaria (círculo verde) y secundaria (círculo rojo) (PPL, 5x). **c)** Granos de cuarzo, junto a granos detríticos de turmalina (Tur) y titanita (Spn), acompañados de porosidad primaria (círculo verde) y secundaria (círculo rojo). **d)** Granos de cuarzo, con presencia de cemento (Cem 2) que brinda armazón a la roca. (PPL, 5x).

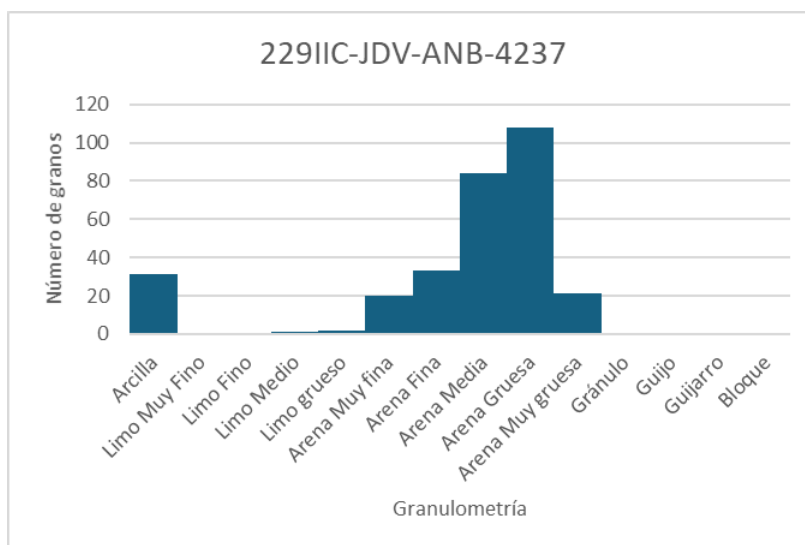


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                  |                         |                          |                                                        |                         |
|--------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4237           |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-057               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida   |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                               | <b>Este:</b><br>4977053 | <b>Norte:</b><br>2092331 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                      |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Luis de Gaceno |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>513,42 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo         |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 10,40%                       | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,30%                        | 0,60%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 6,70%                        | 11,00%                     | 28,00%                     | 36,00%                       | 7,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954):** Arenita arcillosa de grano grueso.

### Conteo composicional

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos  |                     |                       | Fragmentos líticos |               |                  |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------|------------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasa  | Feldespato alcalino | Fragmentos graníticos | Igenos             | Sedimentarios | Metamórficos     |
| 31,50%                                 | 41,00%                             | 0,00%          | 0,00%        | 0,00%               | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | 0,00%            |
| Otros minerales                        |                                    |                |              |                     |                       |                    |               |                  |
| Matriz                                 | Pseudomatríz                       | Caolinita      | Fosfatos     | Circón              | Turmalina             | Magnetita          | Pirita        | Materia orgánica |
| 16,60%                                 | 4,50%                              | 0,90%          | <0,3%        | <0,3%               | <0,3%                 | <0,3%              | <0,3%         | <0,3%            |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Ortoquímicos |                     | Cemento               |                    | Porosidad     |                  |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides       | Esparita            | Ferruginoso           | Silíceo            | Primaria      | Secundaria       |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%        | 0,00%               | 1,50%                 | 0,00%              | 0,00%         | 4,00%            |

**Clasificación:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

### Descripción

Roca de carácter siliciclástico, se clasifica texturalmente como una arenita arcillosa de grano grueso (Folk, 1954), mientras que composicionalmente corresponde a una cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974). Los granos terrígenos principales son cuarzo monocristalino con extinción recta, cuarzo monocristalino con extinción ondulante y caolinita, mientras que en trazas se encuentran fosfatos, circón, turmalina, pirita y magnetita.

A nivel intergranular, se distinguen la matriz y la pseudomatríz (**Figura 5-15a, b, c**). La matriz está compuesta principalmente de minerales arcilla sin diferenciar mezclados con granos de cuarzo de tamaño que varía entre arena muy fina y arena fina. La pseudomatríz es el resultado de la deformación y ruptura de líticos, posiblemente sedimentarios, cuyo material fluyó por algunas zonas intergranulares de la roca (**Figura 5-15b**). La porosidad secundaria (4%) de la roca se debe principalmente al intenso fracturamiento al que está sometida, donde algunos espacios se rellenan con material de la matriz o cemento ferruginoso, siendo además permeable (**Figura 5-15a**).

Texturalmente, la roca presenta buena selección y un empaquetamiento moderado, con un tamaño de grano que va desde arcilla hasta arena muy gruesa. La redondez promedio de los granos es subangular, aunque algunos son subredondeados, y la esfericidad varía entre subesférica y elongada, lo que indica que la roca es madura.

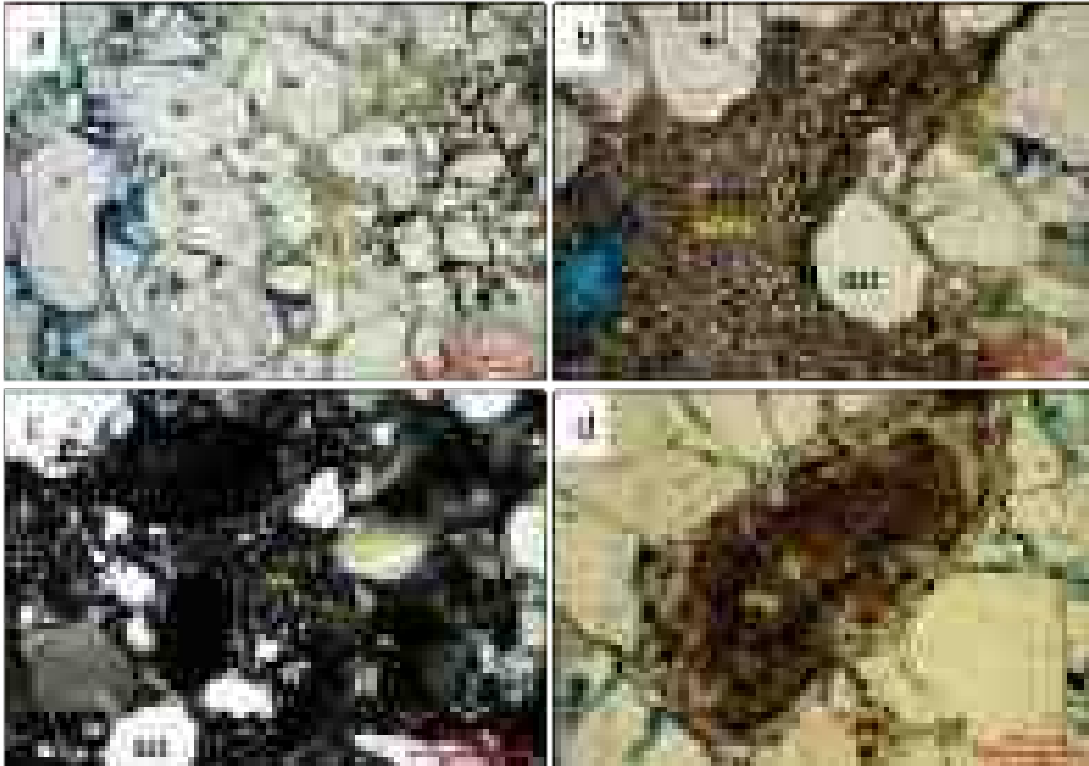
### Diagénesis

Se observa cementación por óxidos de hierro (el cual segrega a partir de minerales de la matriz indiferenciados), presencia de sulfuros debido a la pirita y fracturamiento. La respuesta de la roca en epifluorescencia es casi nula, excepto por los granos de fosfatos encontrados (**Figura 5-15d**). El retrabajamiento se debe posiblemente a la bioturbación, ya

que se pierde la imbricación y la laminación por lineamientos perpendiculares a lo largo de los cuales se retrabajan los granos, con predominio de pseudomatríz lodosa. En la parte media de la muestra, aumenta considerablemente la porosidad y permeabilidad debido a la diferencial percolación del cemento silíceo y ferruginoso, que en ocasiones está parcialmente disuelto, formando porosidad secundaria.

#### Registro fotográfico

**Figura 5-15. a)** Fracturas (Fr) presentes en la roca, las cuales crean porosidad secundaria entre los granos de cuarzo (Qz), donde suele entrar materia orgánica (MO) o bien matriz (Mx) (PPL, 5x). **b)** Pseudomatríz (PsMx) formada por el retrabajamiento de los granos (cuarzo, Qz y minerales arcilla), hasta el punto de que el material se infiltró por las zonas intergranulares y dentro de los granos más grandes. A diferencia de la matriz, la pseudomatríz muestra textura de flujo, estando localizada cerca de fracturas (PPL, 5x). **c)** Matriz (Mx), compuesta de un material más finogranular que los granos de cuarzo aledaños (Qz1, Qz2). Está compuesta de minerales arcilla sin diferenciar que se mezclan con granos de cuarzo de tamaño entre arena muy fina y arena fina. (XPL, 5x). **d)** Grano de fosfato (Php), formando parte del armazón. El fosfato se disuelve y recrystaliza a lo largo de fracturas, llegando a mezclarse con la matriz (Mx). (PPL, 10x).

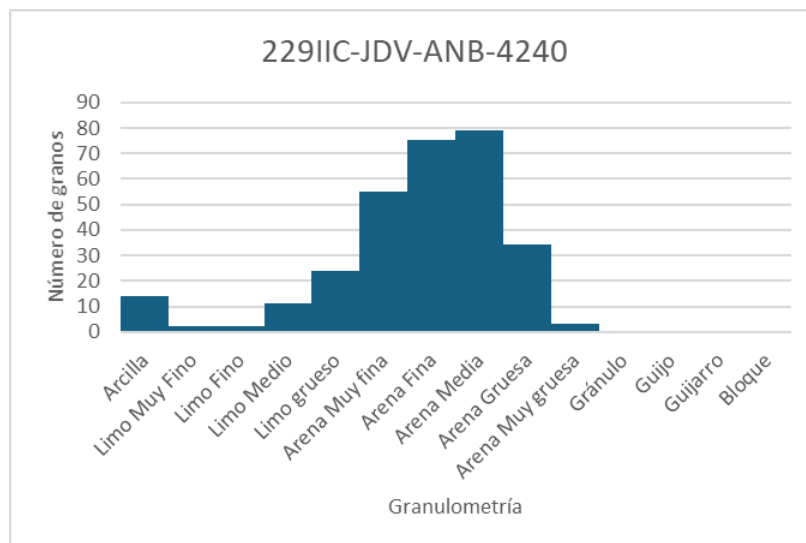


### Formato de descripción petrográfica

#### Información general:

|                                                  |                         |                          |                                                        |                         |
|--------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>No Muestra:</b> 229IIC-JDV-ANB-4240           |                         |                          | <b>Código de litogeoquímica:</b> LAC-058               |                         |
| <b>Tipo de muestra:</b> Sección delgada pulida   |                         |                          | <b>Plancha:</b> 229-II-C                               | <b>Escala:</b> 1:25.000 |
| <b>Coordenadas</b>                               | <b>Este:</b><br>4977040 | <b>Norte:</b><br>2092313 | <b>Origen:</b> Único Nacional                          |                         |
| <b>Departamento:</b> Boyacá                      |                         |                          | <b>Municipio:</b> San Luis de Gaceno                   |                         |
| <b>Formación:</b> Arenitas de San Luis de Gaceno |                         |                          | <b>Posición estratigráfica en columna:</b><br>521,07 m |                         |
| <b>Colector:</b> Andrés S. Martín Ravelo         |                         |                          | <b>Analizó:</b> Andrés S. Martín Ravelo                |                         |

#### Conteo textural (absoluto)



#### Conteo textural (porcentual)

| Arcilla (< 0,004 mm)         | Limo (0,004-0,063 mm)      |                            |                              |                                   |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                              | 4 a 7,8 um - Limo Muy Fino | 7,88 a 16 um - Limo Fino   | 16 a 31 um - Limo Medio      | 31 a 63 um - Limo grueso          |
| 4,70%                        | 0,70%                      | 0,70%                      | 3,70%                        | 8,00%                             |
| Arena (0,063-2 mm)           |                            |                            |                              |                                   |
| 63 a 125 um - Arena Muy fina | 125 a 250 um - Arena Fina  | 250 a 500 um - Arena Media | 500 a 1000 um - Arena Gruesa | 1000 a 2000 um - Arena Muy gruesa |
| 18,30%                       | 25,10%                     | 26,40%                     | 11,40%                       | 1,00%                             |
| Grava                        |                            |                            |                              |                                   |
| 2-4 mm Gránulo               | 4-64 mm Guijo              | 64-256 mm Guijarro         | >256 mm Bloque               |                                   |
| 0,00%                        | 0,00%                      | 0,00%                      | 0,00%                        |                                   |

**Clasificación textural (Folk, 1954): Arenita limosa de grano medio.****Conteo composicional**

| Cuarzo                                 |                                    |                | Feldespatos  |                      |                       | Fragmentos líticos |               |              |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Monocristalino con extinción ondulante | Monocristalino con extinción recta | Policristalino | Plagioclasea | Feldespato alcalino  | Fragmentos graníticos | Ígenos             | Sedimentarios | Metamórficos |
| 45,90%                                 | 36,40%                             | 0,00%          | 0,00%        | 0,00%                | 0,00%                 | 0,00%              | 0,00%         | <0,3%        |
| Otros minerales                        |                                    |                |              |                      |                       |                    |               |              |
| Matriz                                 | Circón                             | Turmalina      | Fosfatos     | Minerales arcillosos | Muscovita             | Óxidos de hierro   |               |              |
| 4,50%                                  | 1,30%                              | <0,3%          | <0,3%        | <0,3%                | <0,3%                 | 0,60%              |               |              |
| Aloquímicos                            |                                    |                | Cemento      |                      |                       | Porosidad          |               |              |
| Pellets                                | Intraclastos                       | Fósiles        | Ooides       | Silíceo              | Ferruginoso           | Caolinitico        | Primaria      | Secundaria   |
| 0,00%                                  | 0,00%                              | 0,00%          | 0,00%        | 1,60%                | 1,00%                 | 0,30%              | 7,80%         | 0,60%        |

**Clasificación:** Cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974).

**Descripción**

Corresponde a una arenita limosa de grano medio (Folk, 1954), mientras que composicionalmente es una cuarzoarenita (Folk et al., 1970; Folk, 1974). Está compuesta principalmente por granos terrígenos, destacando el cuarzo monocristalino con extinción ondulosa y cuarzo monocristalino con extinción recta (**Figura 5-16a, b**). En trazas, se encuentran circones, turmalinas, moscovitas, arcillas, fosfatos y muy pocos fragmentos líticos metamórficos, probablemente cuarcitas (reconocidos por su extinción fuertemente ondulante y bordes suturados). Como minerales opacos hay óxidos de hierro indiferenciados.

La roca posee matriz distribuida en algunas láminas (**Figura 5-16a**), junto con cementación silícea, de caolinita (**Figura 5-16c**) y ferruginosa (**Figura 5-16d**). Texturalmente, se trata de una arenita inmadura con granos mayormente subangulares a subredondeados, una selección muy pobre, empaquetamiento moderado y orientación preferencial. Presenta una laminación muy definida, compuesta por ocho láminas, de base a tope (**Figura 5-16a**).

Las láminas incluyen una de arena media (clasto-soportada) con concentración de minerales pesados, seguida por una de matriz-soportada con bioturbación. Continúan láminas de arena media (clasto-soportada) con bioturbación, una de arena fina, otra de arenisca lodosa y arcillosa, una con gradación de gruesa a fina con presencia de fosfatos, una de arenisca lodosa o arcillosa con laminación interna, y finalmente una de cuarzoarenita mal seleccionada en contacto con una arenita lodosa.

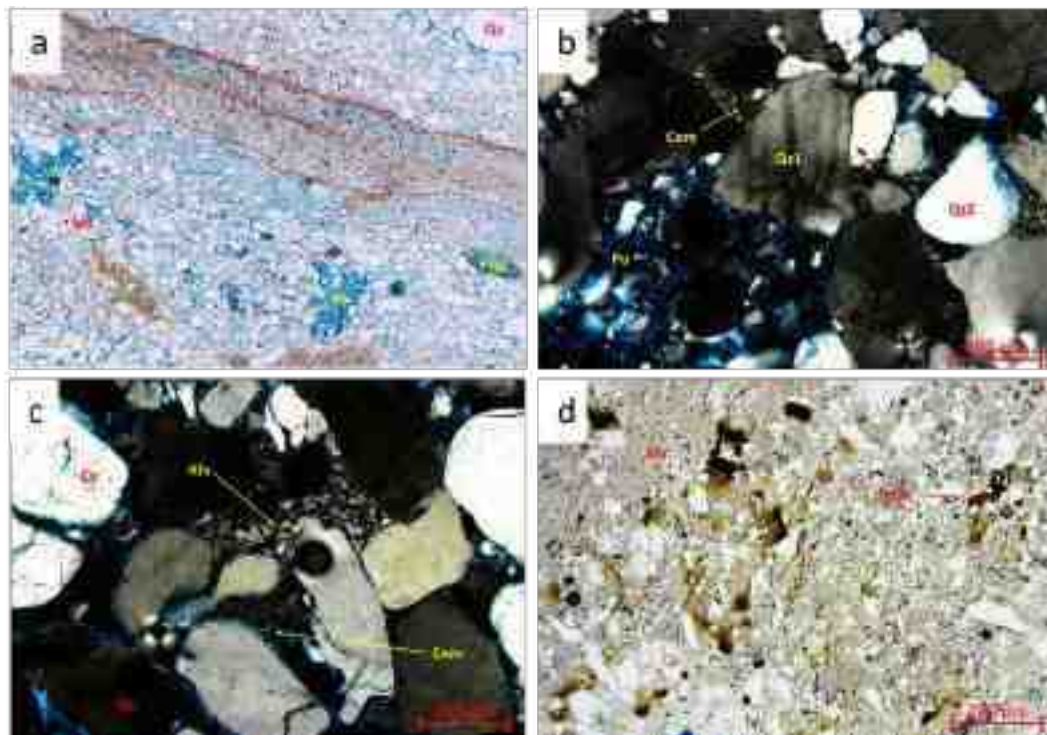
**Diagénesis**

Diagenéticamente, la roca experimentó disolución de granos de fosfato, cementación de tipo silícea y carbonatos (**Figura 5-16b, c**) y bioturbación en las láminas más finas, alterando

las estructuras primarias. Hacia el tope, las arenitas muestran una imbricación bien desarrollada y menor empaquetamiento en comparación con las de la base, con mayor contenido de matriz y menor porosidad primaria (en total, la roca cuenta con 7,6%, en comparación al 0,6% de secundaria). El contacto entre las láminas friables de la base y las más onduladas hacia el tope no es neto, sino progresivo, con la aparición gradual de láminas de grano fino matriz-soportada y lodolita, con mayor frecuencia de laminación flaser/ondulosa.

### Registro fotográfico

**Figura 5-16. a)** Vista general de la roca, conformada por láminas de arenitas de grano medio (blancas) y arenitas de grano muy fino a limolitas gruesas (marrones, separadas por líneas rojas), compuestas por cuarzo (Qz), matriz de minerales arcillosos indiferenciados (Mx) y algunos granos fosfáticos (Pho). También se observa porosidad (Po) (PPL, 2,5x). **b)** Granos de cuarzo con extinción ondulante (Qz1) y recta (Qz 2), mostrando moderada selección y desarrollo de cemento silíceo (Cem), preservando parte de la porosidad primaria de la roca (Po) (XPL, 10x). **c)** Granos de cuarzo (Qz), acompañados de cemento silíceo (Cem) y de caolinita (Kln), la cual ocupa parte de la porosidad primaria de la roca. (XPL, 10x). **d)** Granos de cuarzo (Qz), donde parte del armazón lo da la matriz de minerales arcillosos indiferenciados. Así mismo, se observa que el cemento lo conforman óxidos de hierro (FeOx) presente entre algunos de los granos (PPL, 10x).

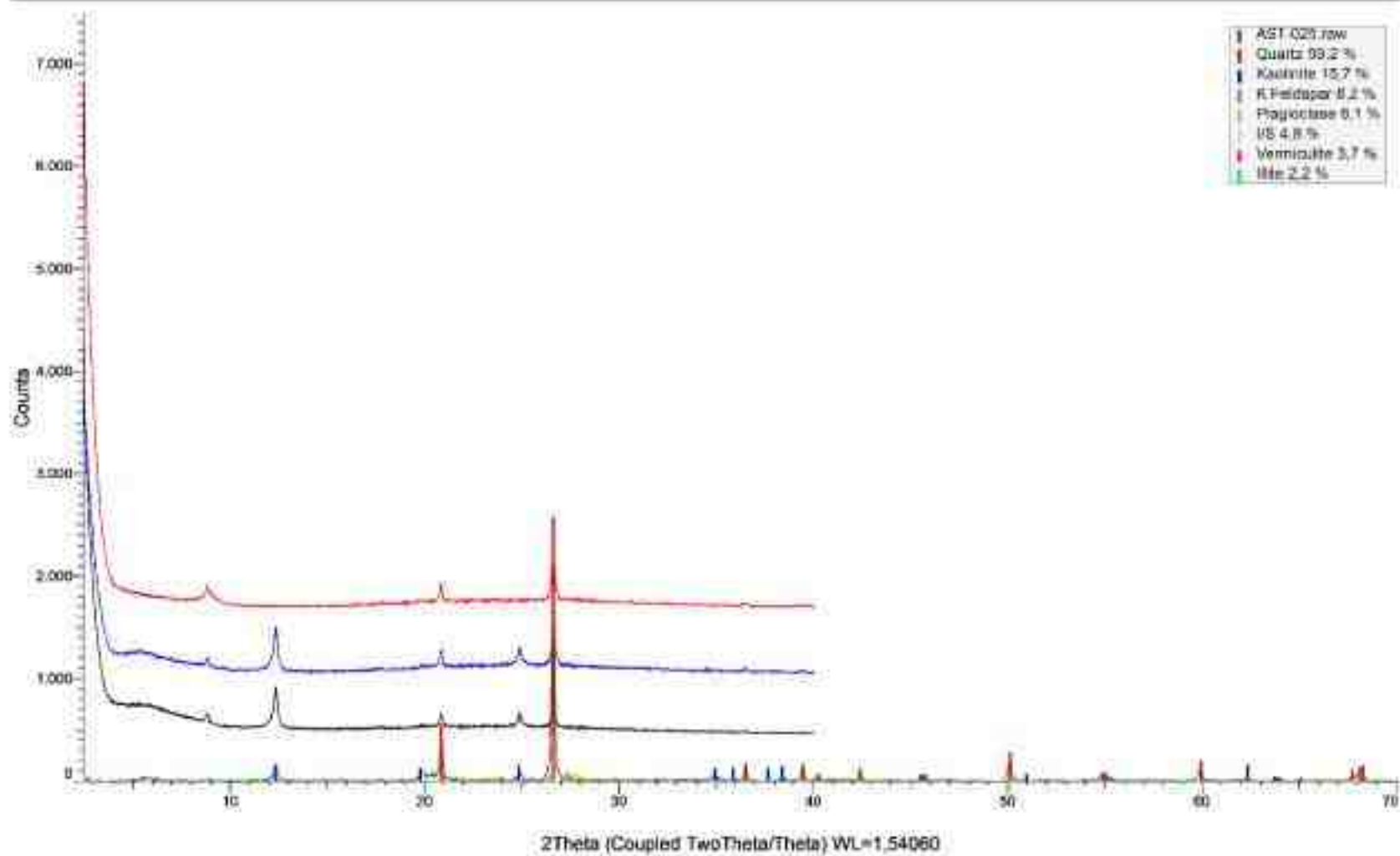




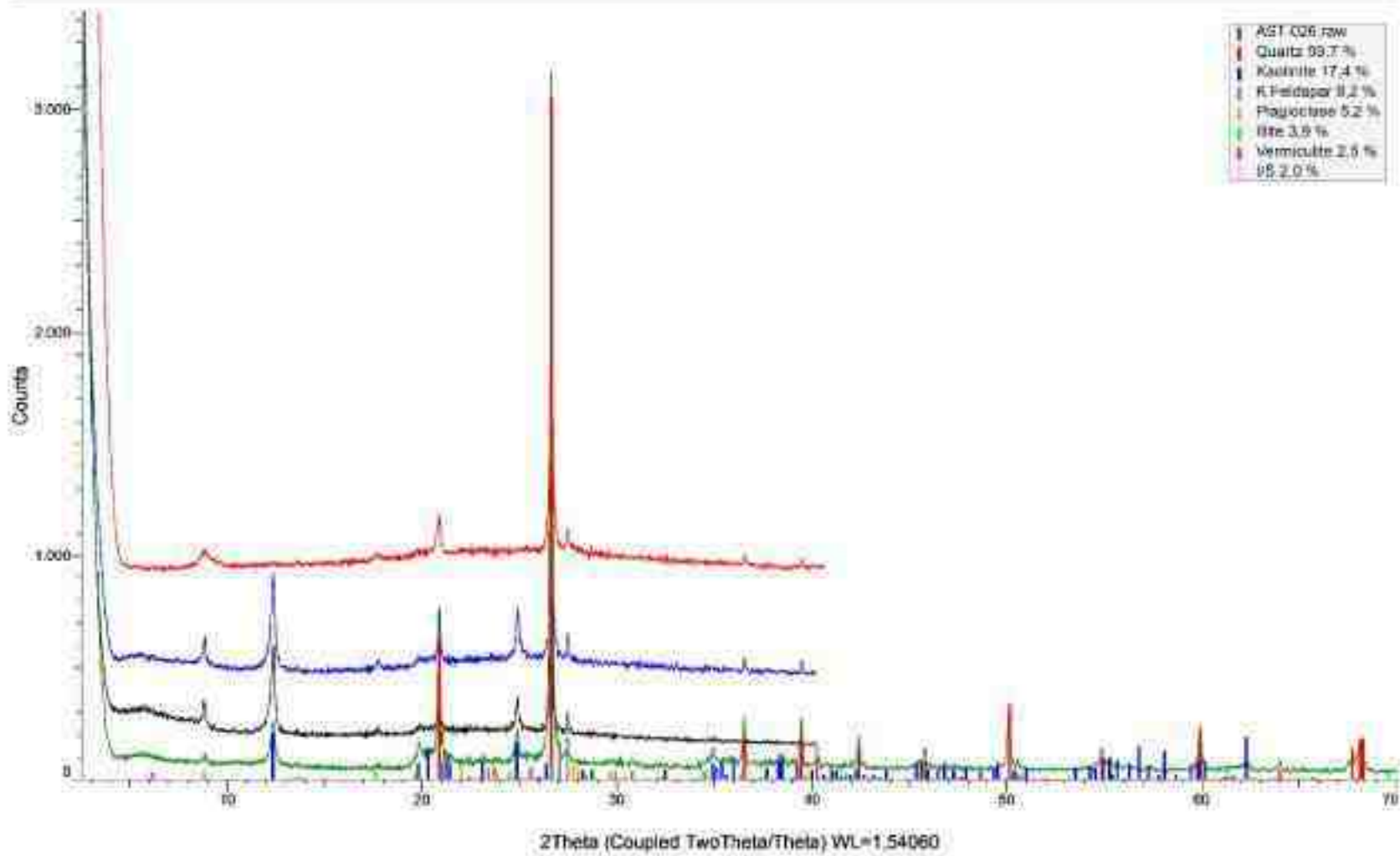
## **E. Anexo: Difractogramas adquiridos e interpretados para las muestras de litogeoquímica seleccionadas de la Quebrada Aguacaliente**



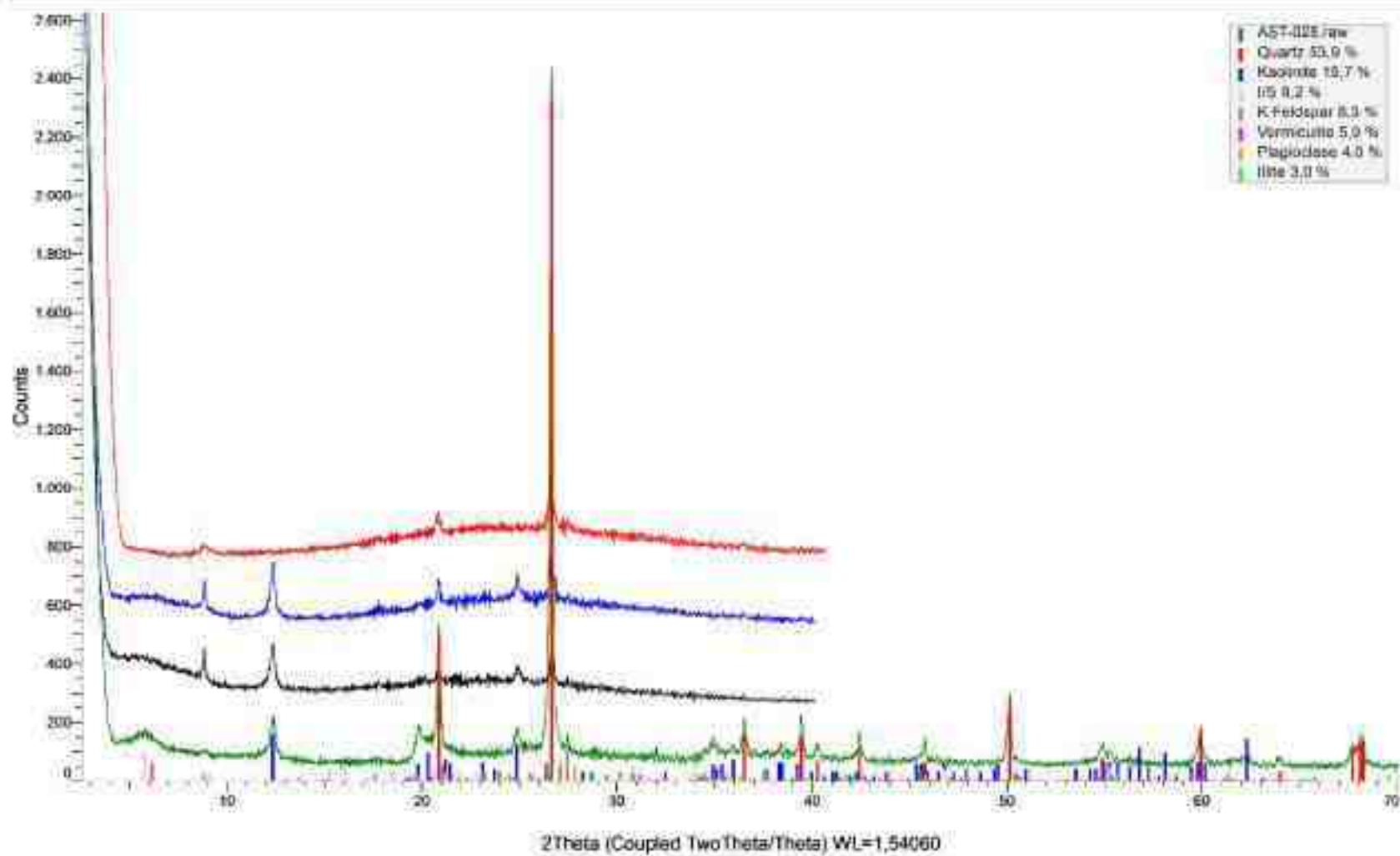
AST-025



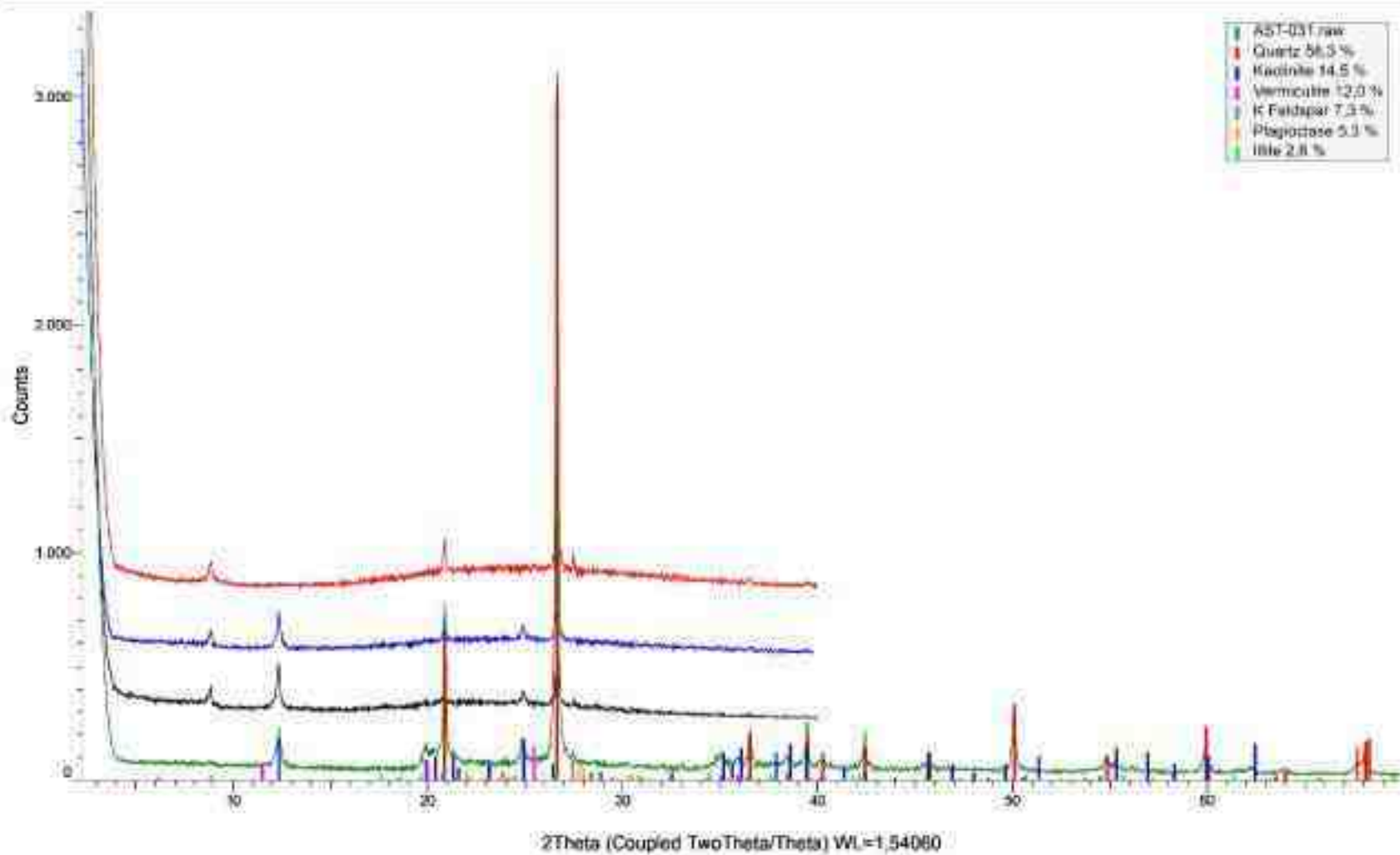
AST-026



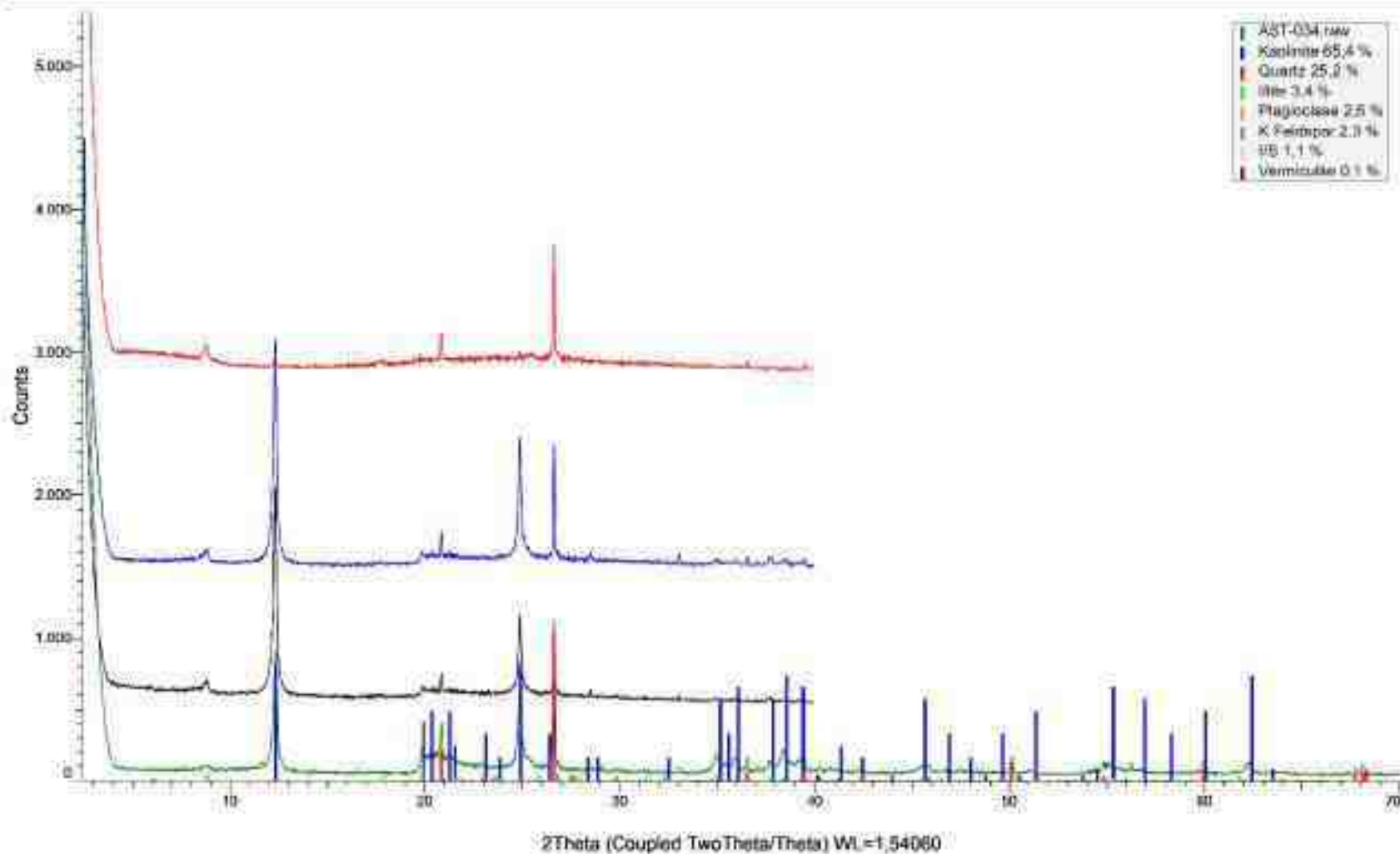
AST-028



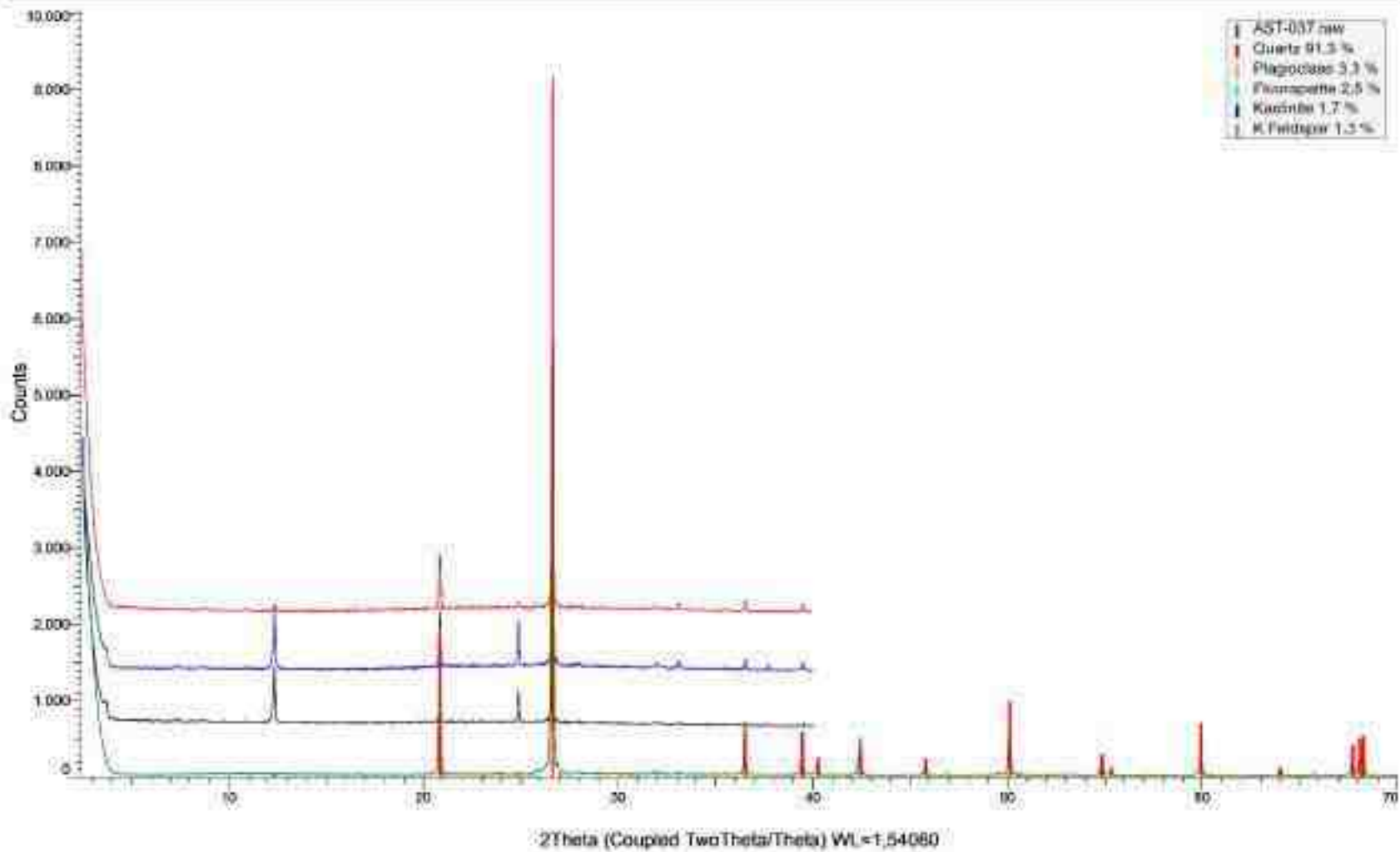
AST-031

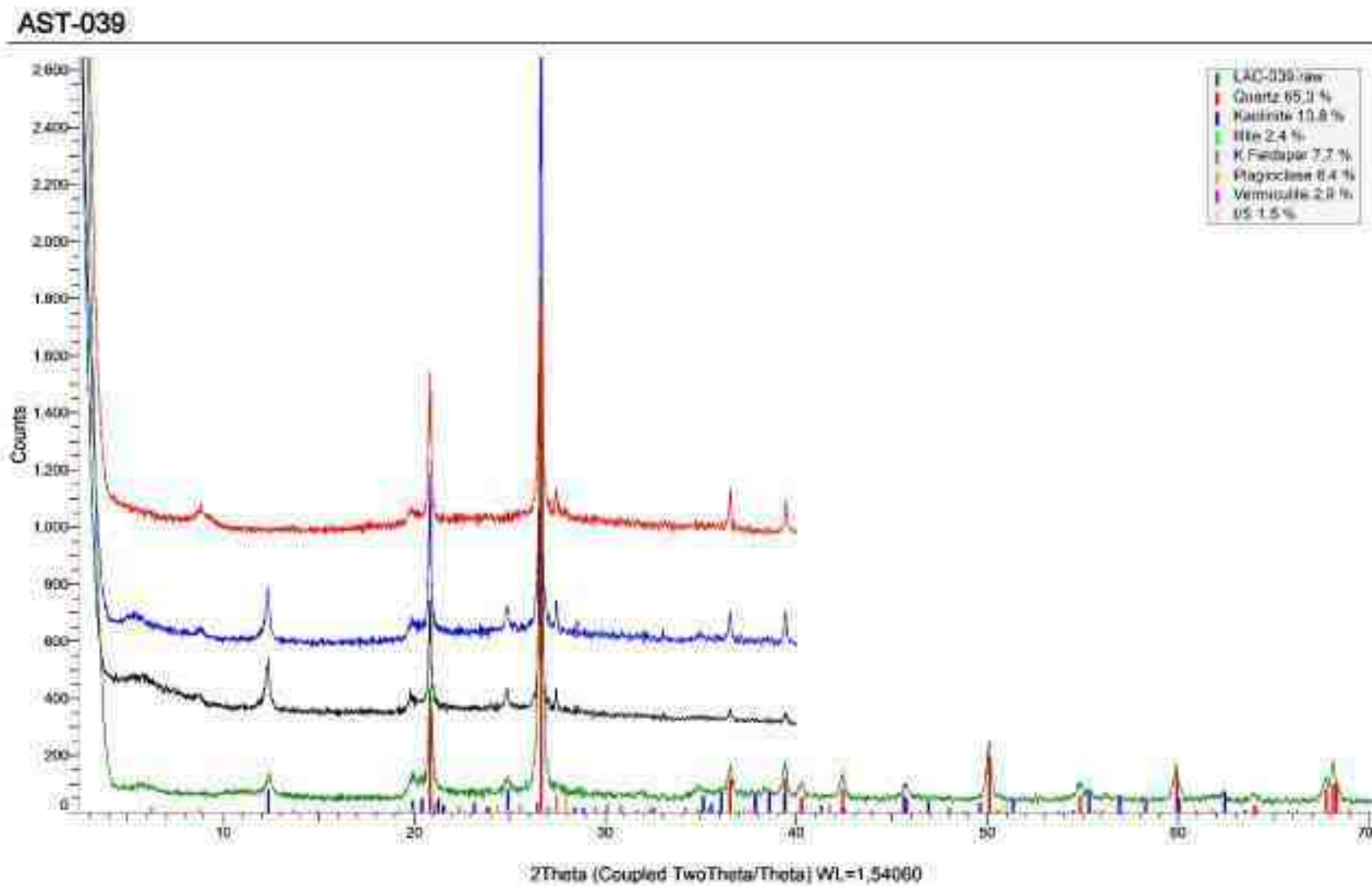


AST-034

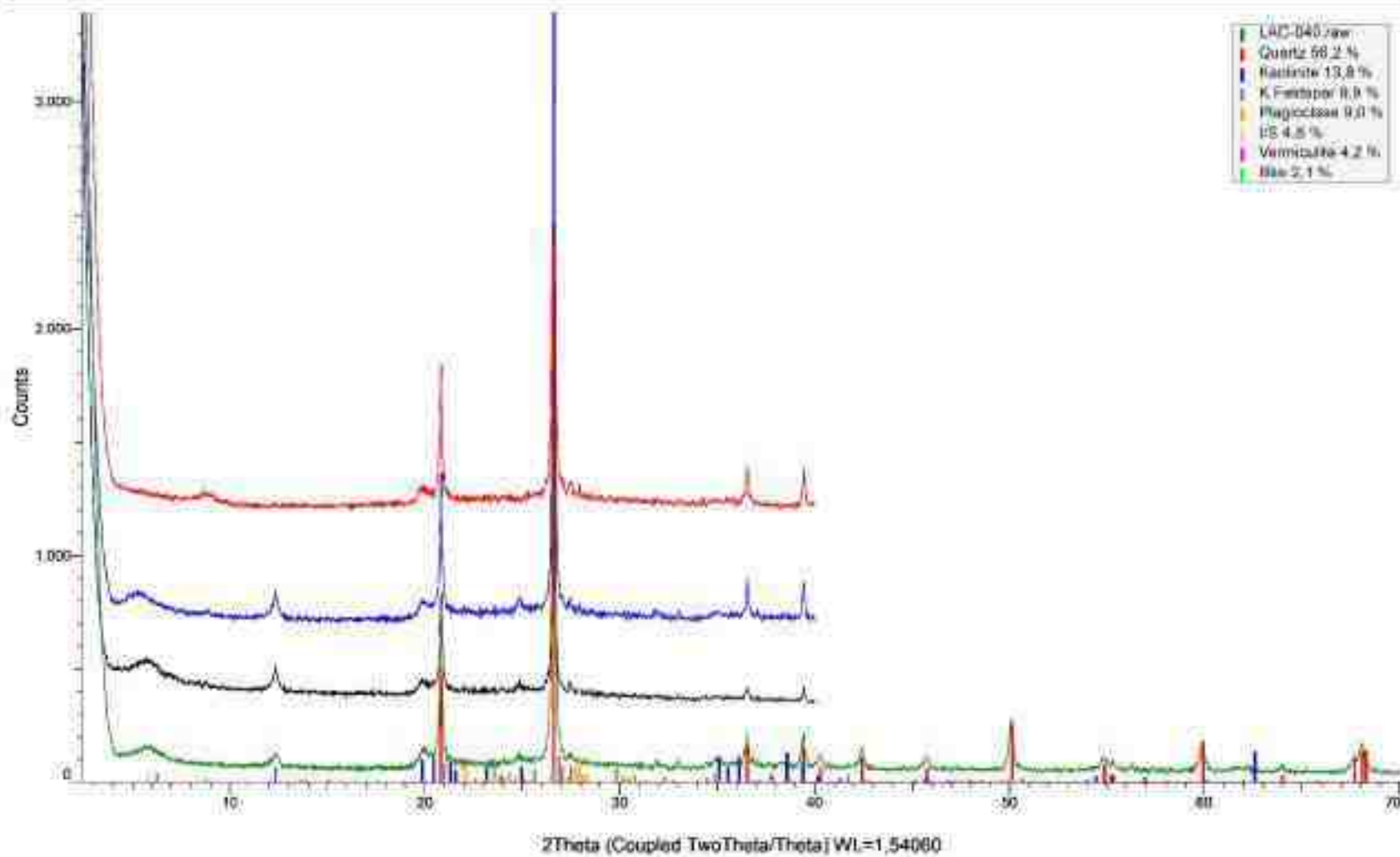


AST-037

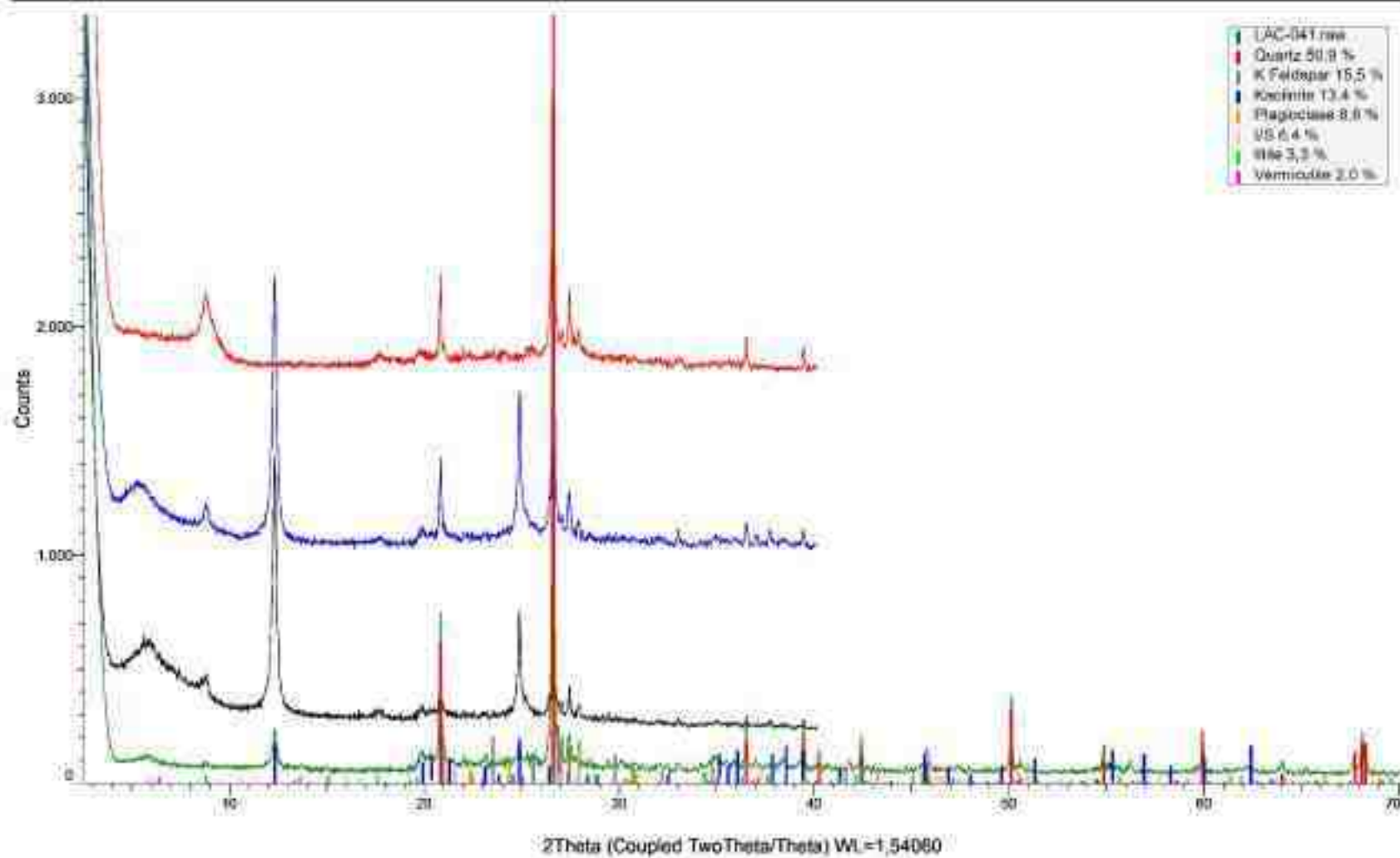




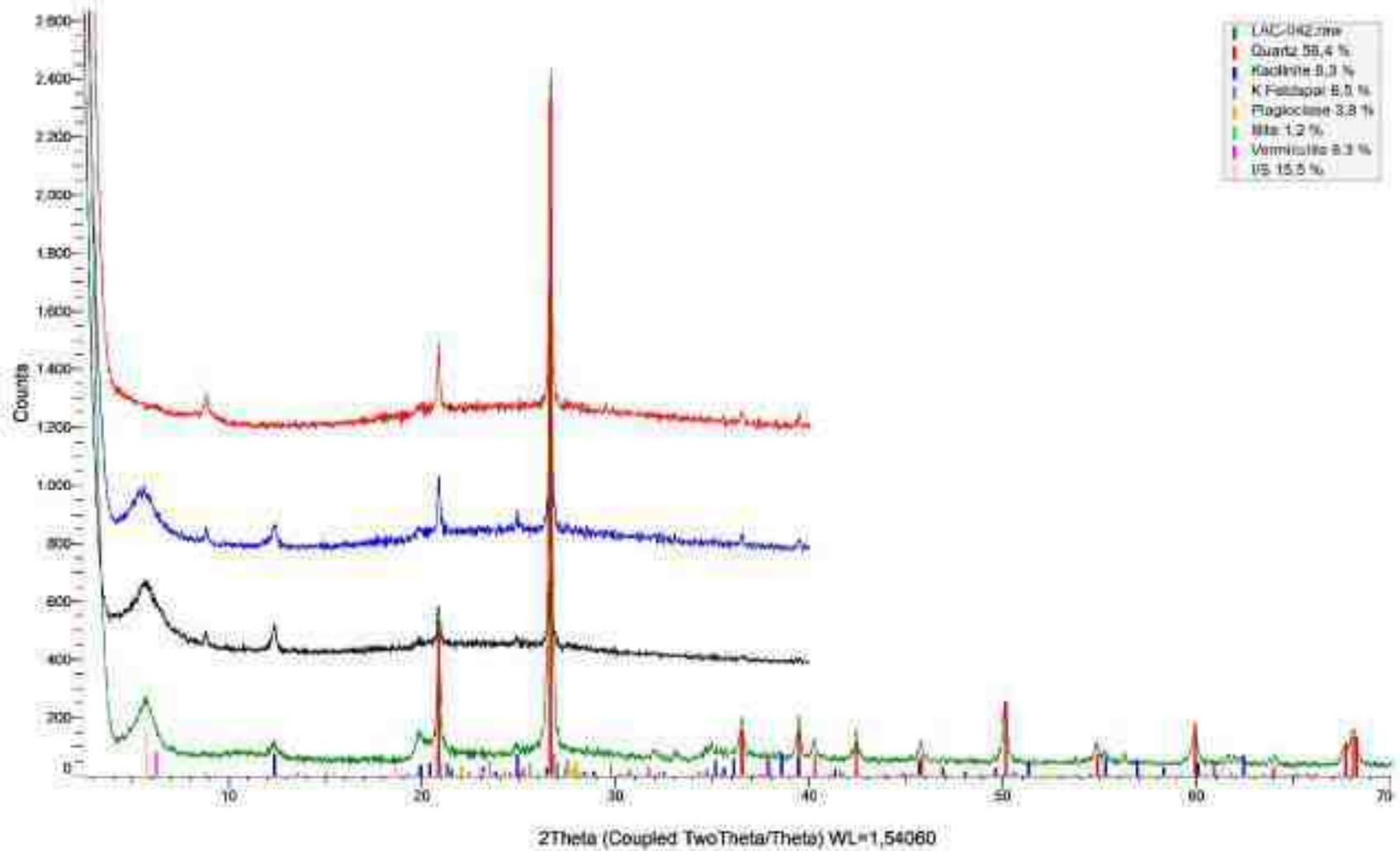
LAC-040



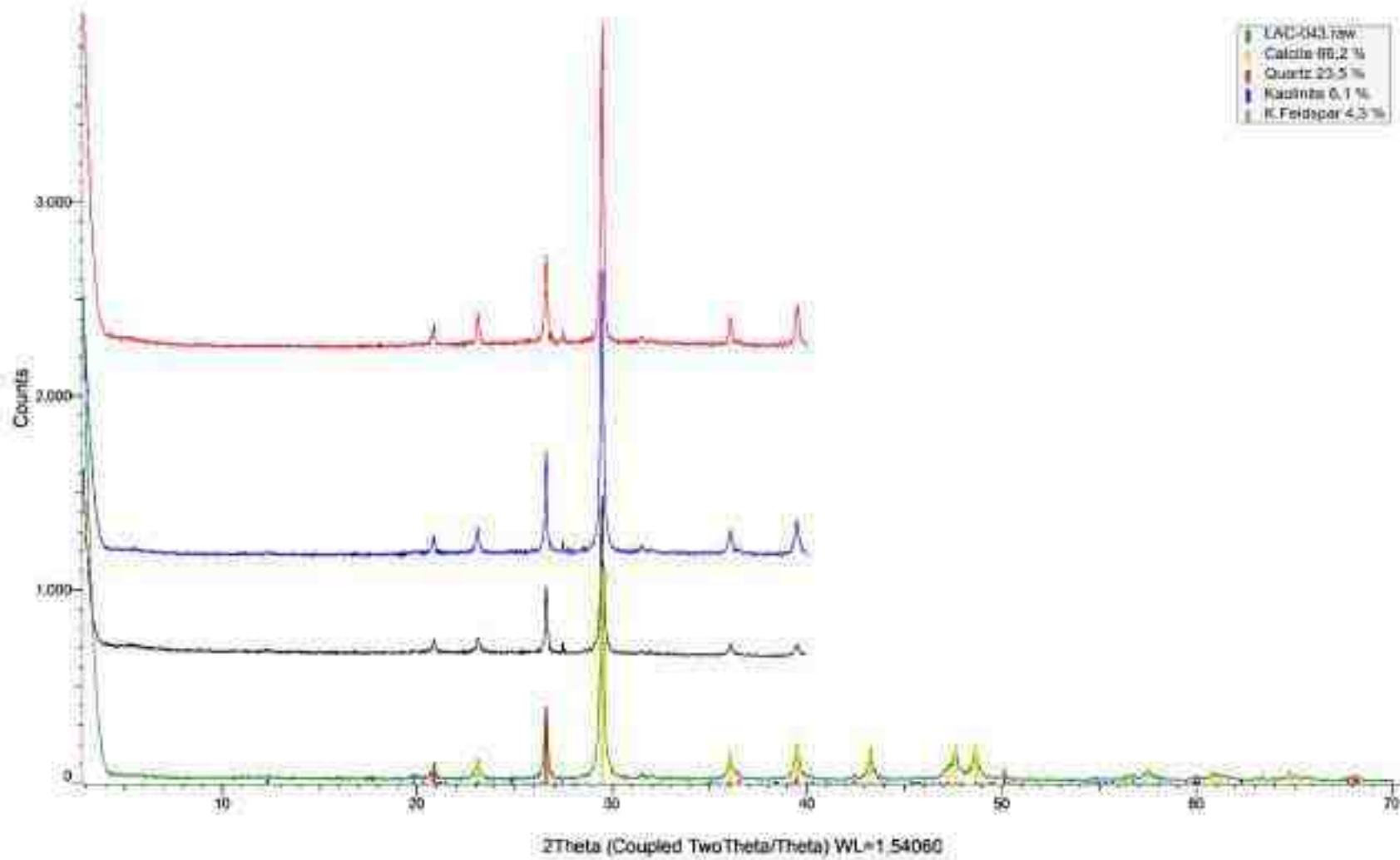
LAC-041



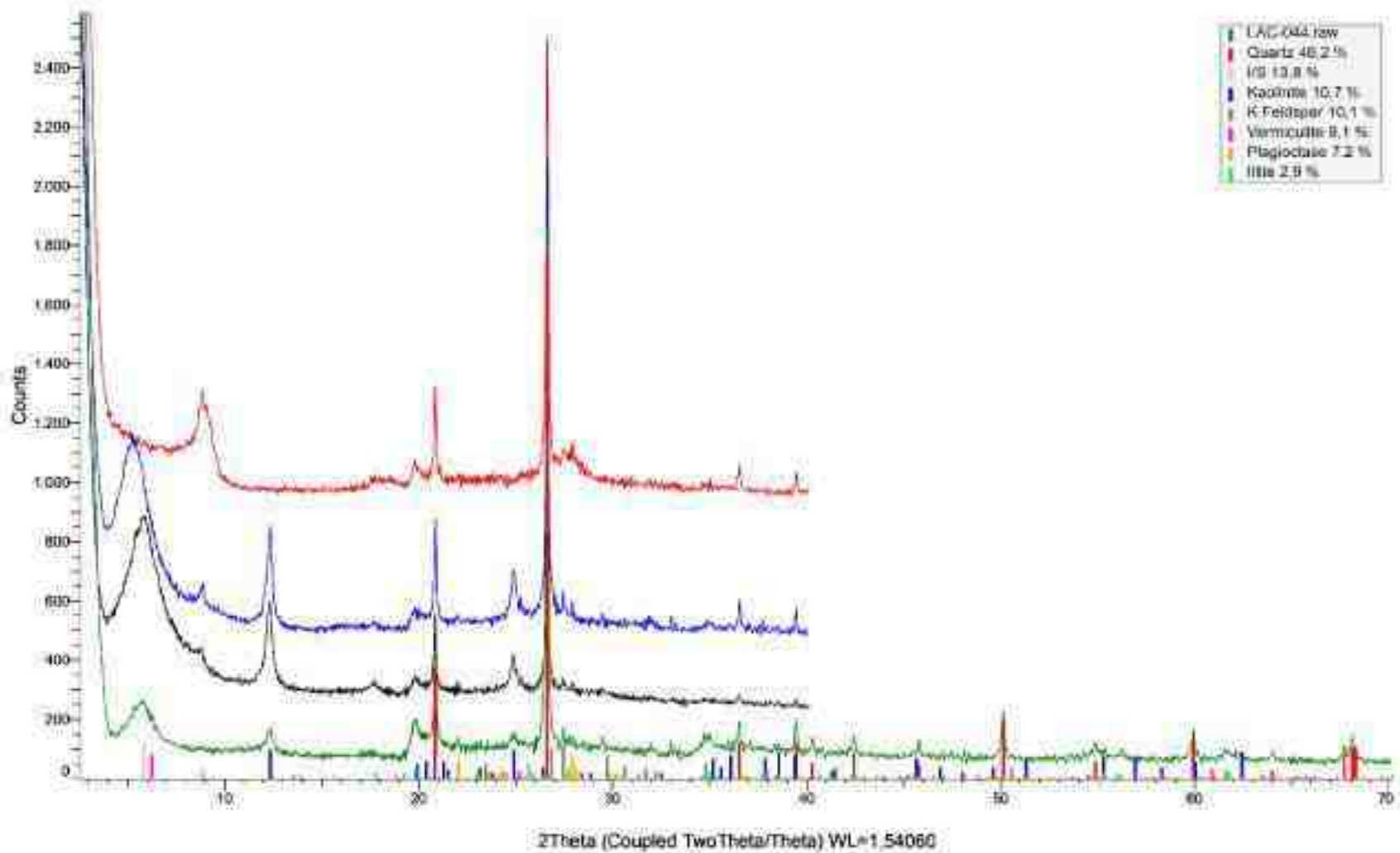
LAC-042



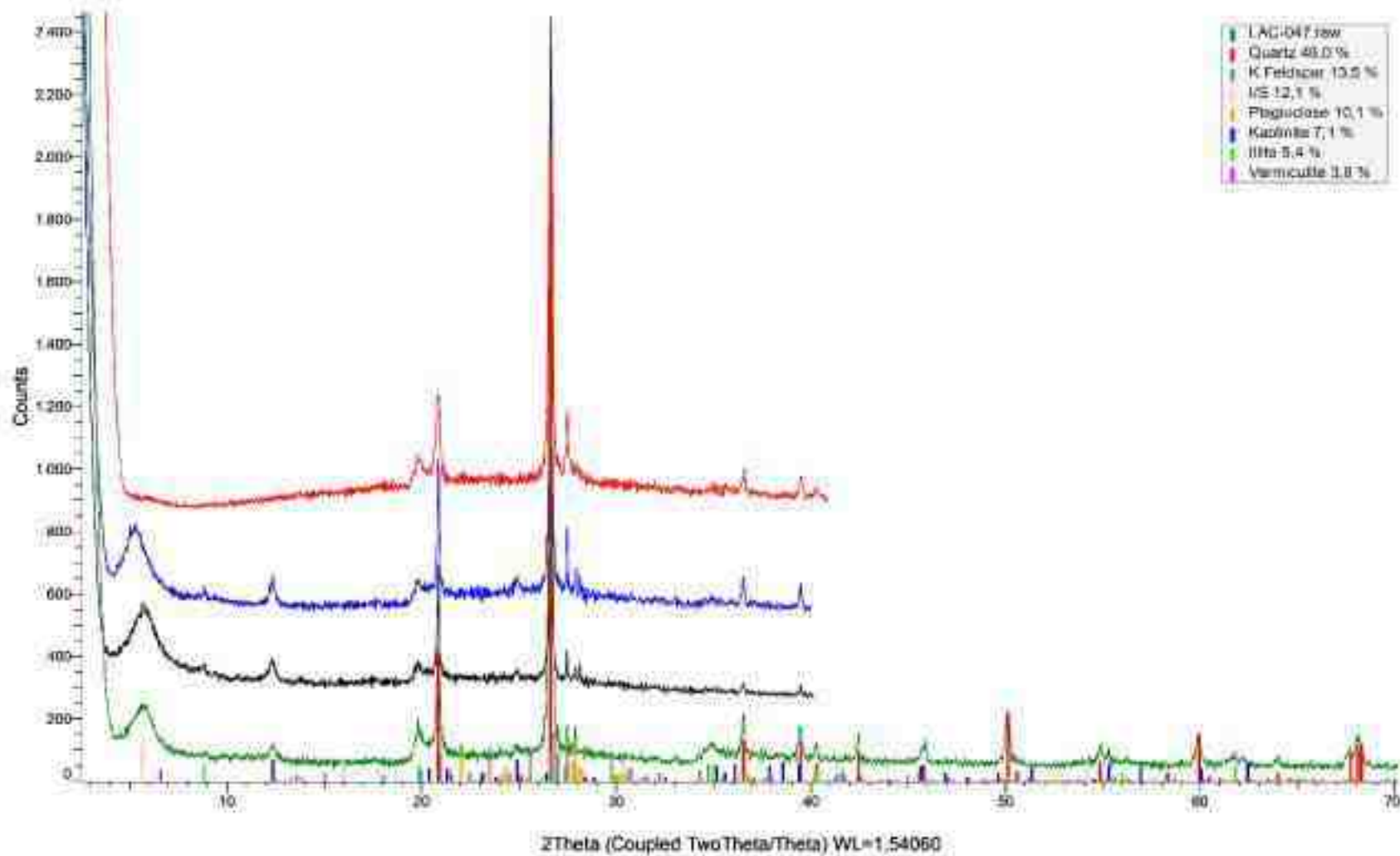
LAC-043



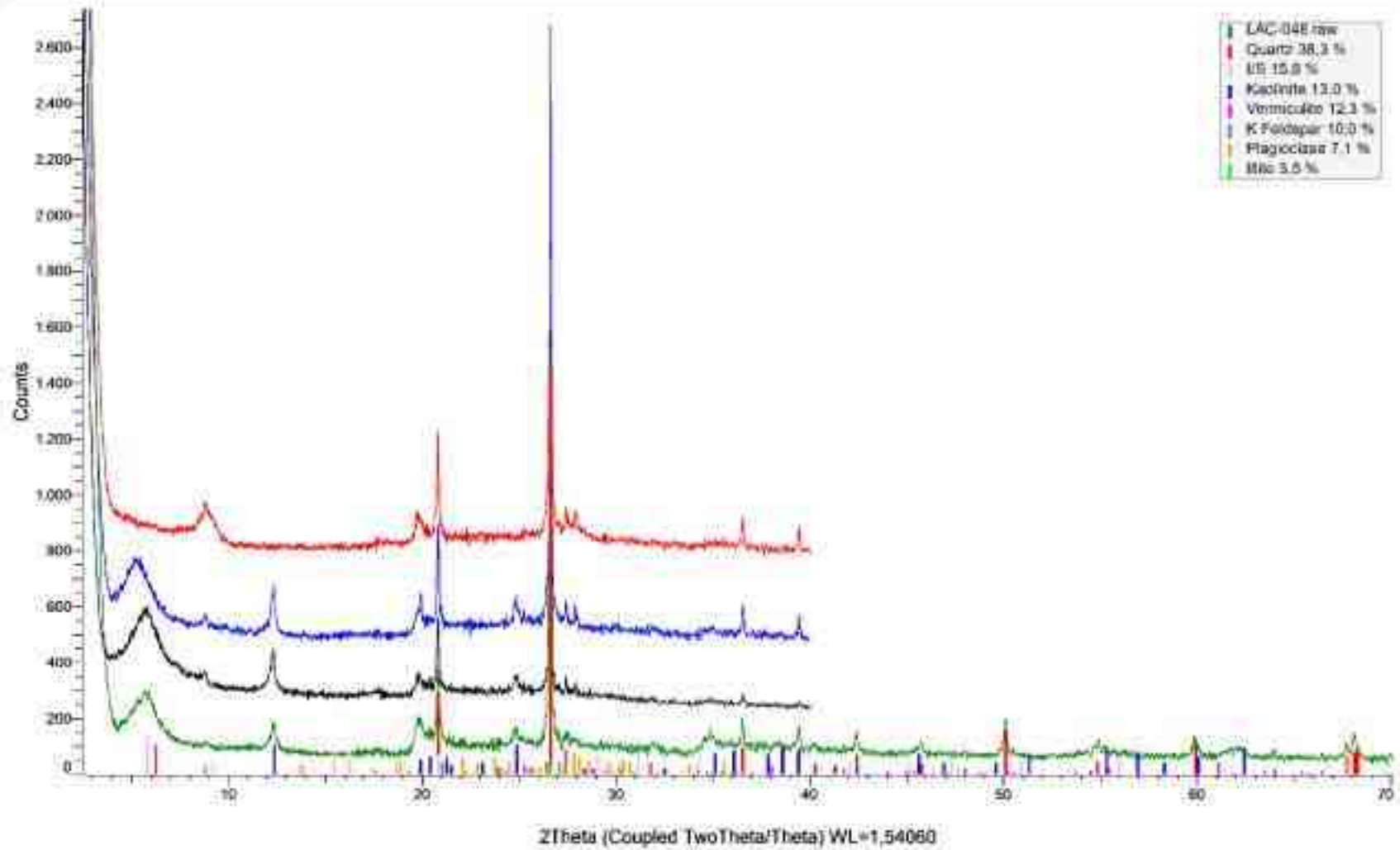
LAC-044



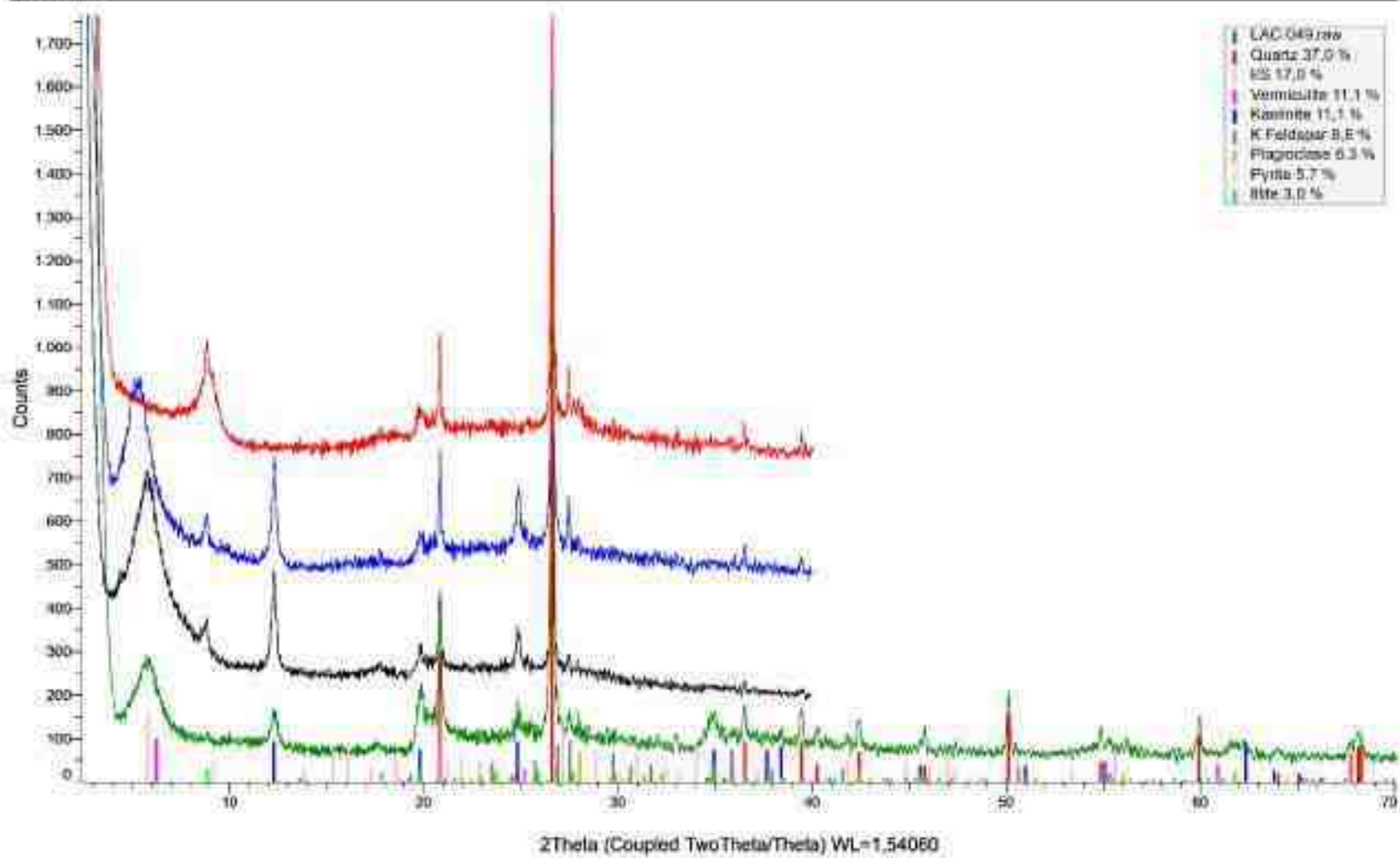
LAC-047



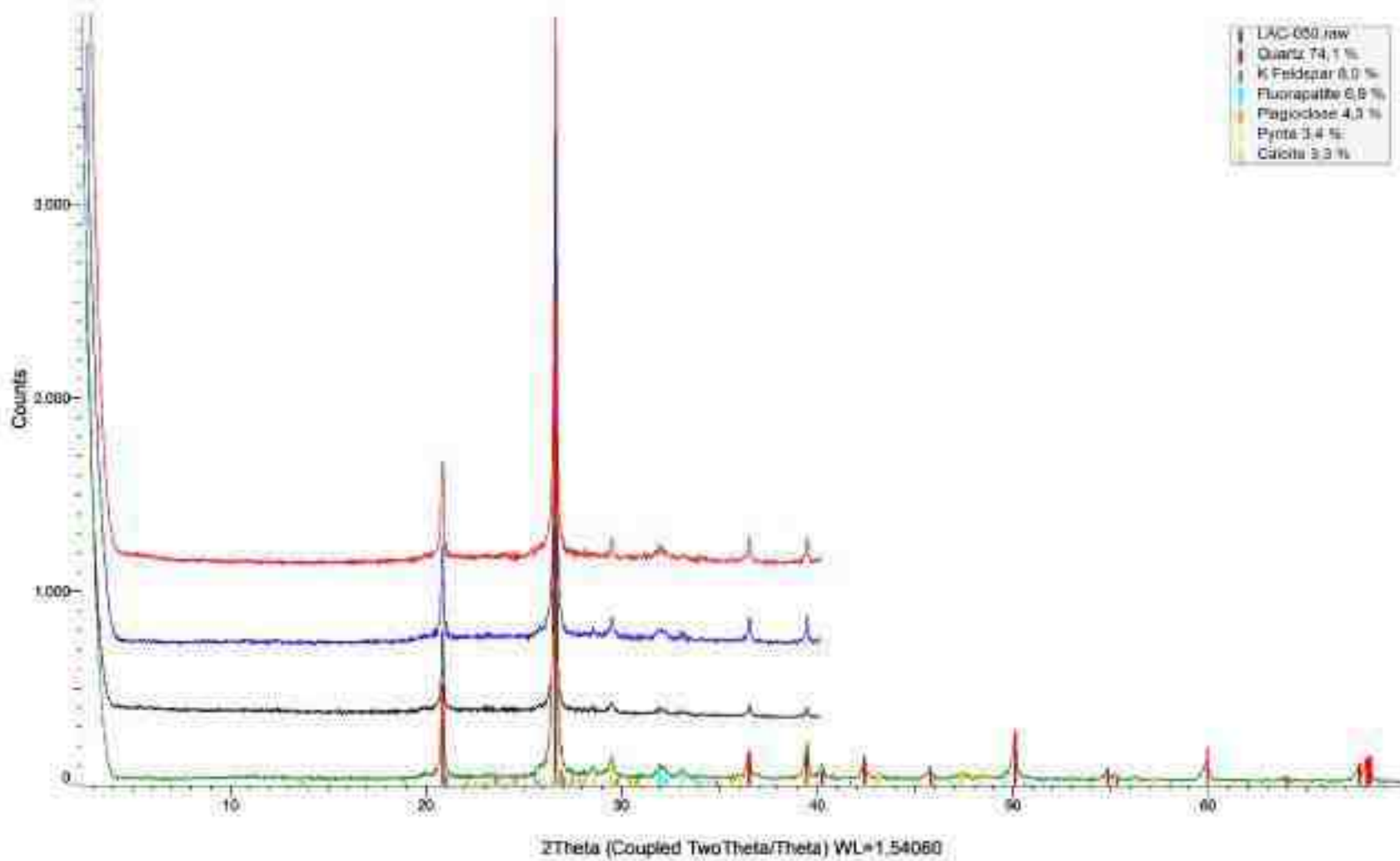
LAC-048

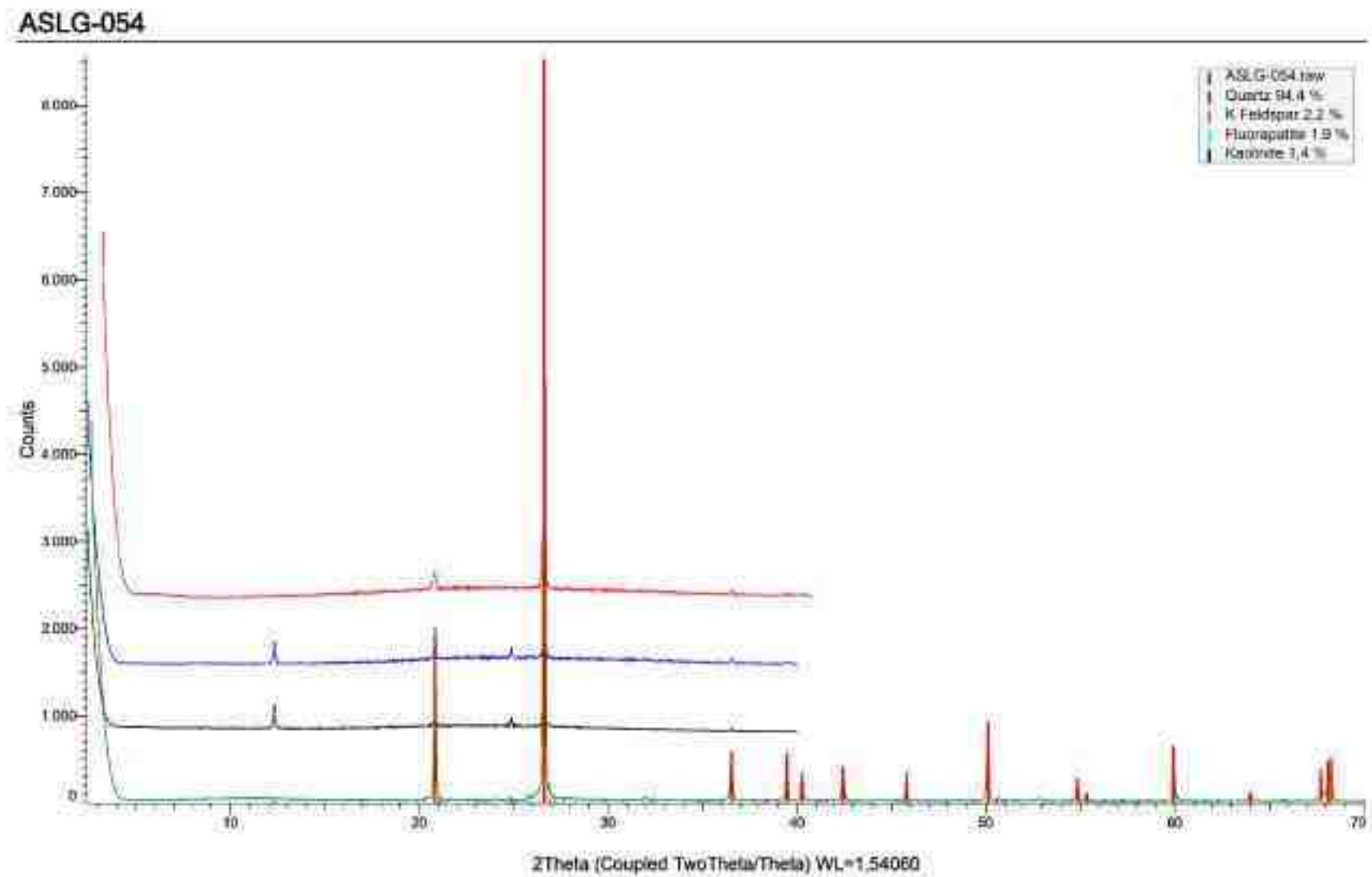


LAC-049

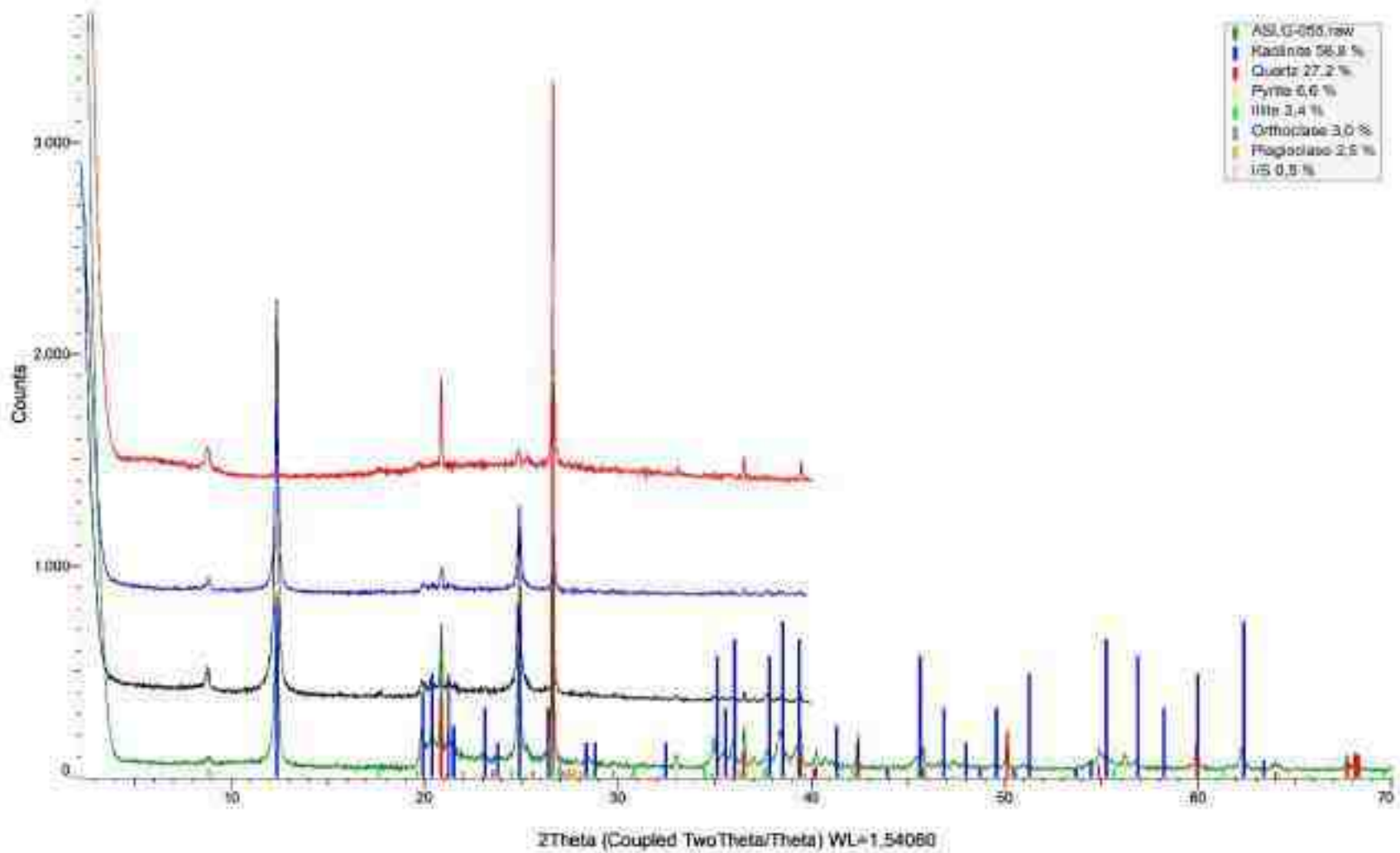


LAC-050

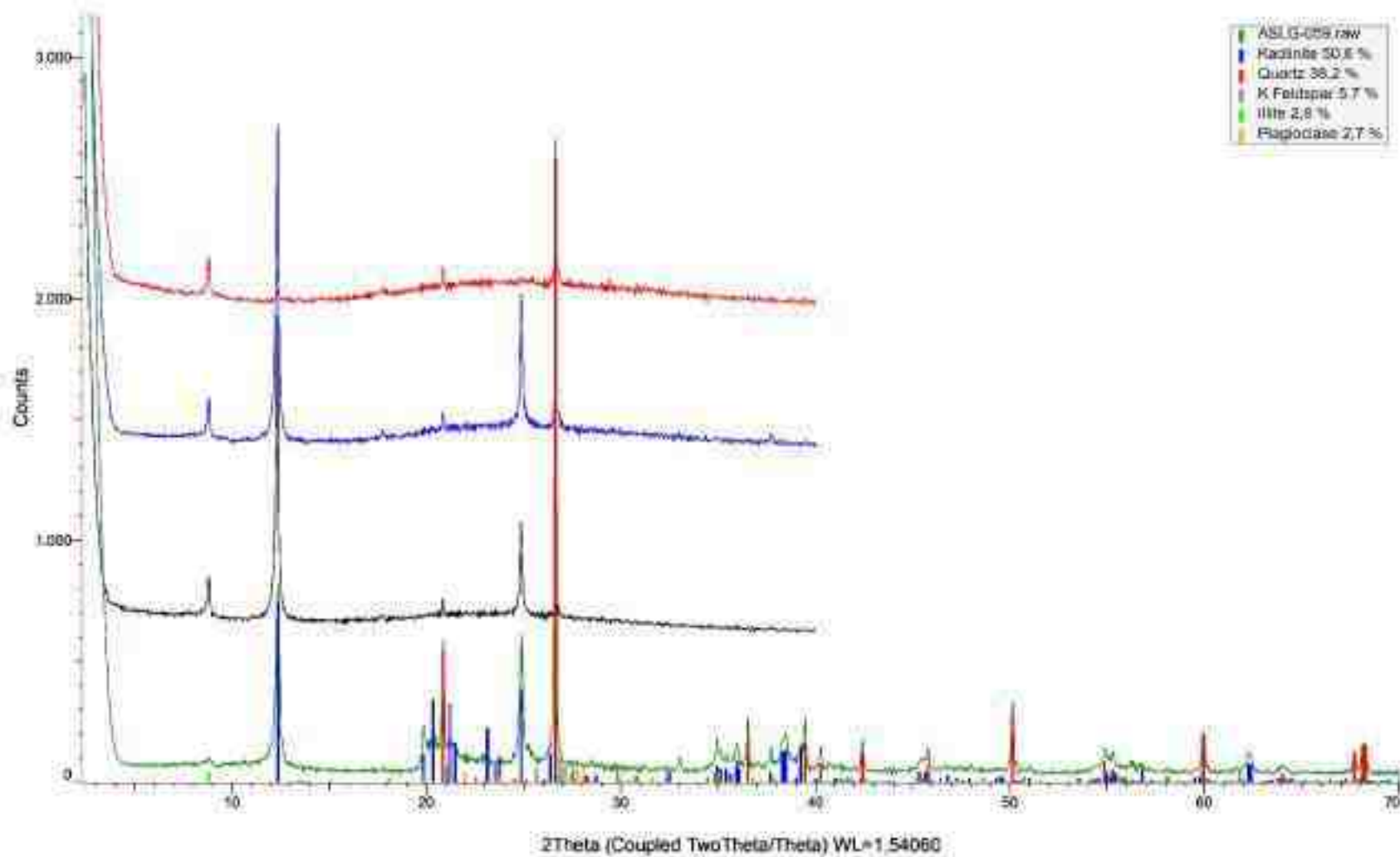




ASLG-055



ASLG-059





## **F.Anexo: Columna estratigráfica integrada – Sección Quebrada Aguacaliente**



**G. Anexo: Diagrama de procesos incidentes en la formación de arenitas como potenciales reservorios de arenita bituminosa, dentro de la Quebrada Aguacaliente**



[illegible]



## Bibliografía

- Allen, P., & Allen, J. (2005). *Basin Analysis: Principles and Applications* (2nd ed.). Blackwell Publishing Ltd. <https://ahmedrehanhashmi.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/06/basin-analysis-principles-and-applications-allen-2005.pdf>
- Amigo, J. M., Bastida, J., Sanz, A., Signes, M., & Serrano, J. (1994). Crystallinity of Lower Cretaceous kaolinites of Teruel (Spain). *Applied Clay Science*, 9(1), 51–69. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0169-1317(94)90014-0)
- ANTEK S.A. (2014). *Identificación, inventario, muestreo y caracterización geoquímica de los hidrocarburos de Colombia - Informe Final Cuenca Llanos Orientales*.
- Araque-Guevara, K. Y. (2016). *Caracterización de reservorios de arenas bituminosas en afloramiento y definición de parámetros correlacionables con características del subsuelo. Área de Sogamoso, Cordillera Oriental – Colombia* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/8cdd2857-4ee2-48ef-b081-f997e26d97f9/content>
- Audemard, F., Vargas, C., Hellweg, P., Ordáz, M., & Ugalde, A. (2009). *Organic geochemistry atlas of Colombia. E.U. and GEMS Ltda, Atlas Geoquímico*. Universidad Nacional de Colombia - ANH. [https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=72448&shelfbrowse\\_itemnumber=71924](https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=72448&shelfbrowse_itemnumber=71924)
- Barker, C. E., & Pawlewicz, M. J. (1994). *Calculation of Vitrinite Reflectance from Thermal Histories and Peak Temperatures* (pp. 216–229). <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0570.ch014>
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. In Springer (Ed.), *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-36722-2>
- Blatt, H., Middleton, G. V., & Murray, R. C. (1980). *Origin of Sedimentary Rocks* (2nd ed.). Prentice-Hall.
- Bonilla-Osorio, G. E., Sarmiento-Pérez, G., & Gaviria-Melo, S. (2011). Proveniencia y transformación diagenética de minerales arcillosos del Maastrichtiano - Paleoceno al norte de Bogotá, Cordillera oriental de Colombia. *Geología Colombiana*, 36(1), 179–195. [https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/download/22542/html\\_23?inline=1](https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/download/22542/html_23?inline=1)
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Cobbold, P., Baby, P., Laumonier, B., & Giuliani, G. (2002). Andean

- deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guatèque – Medina area), Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 391–407. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00063-9](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00063-9)
- Briceño, L. A. (2015). ANH's Approach to Colombian Unconventional Hydrocarbons Resources. *Colombia: The Perfect Environment for Hydrocarbons Exploration and Production*, 11. [https://www.anh.gov.co/documents/4197/ANHs\\_Approach\\_to\\_Colombian\\_Unconventional\\_Hydrocarbons\\_Resources\\_PDF.pdf](https://www.anh.gov.co/documents/4197/ANHs_Approach_to_Colombian_Unconventional_Hydrocarbons_Resources_PDF.pdf)
- Brime, C. (1999). Metamorfismo de bajo grado: diferencias en escala o diferencias en grado metamórfico? *Trabajos de Geología*, 21, 61–66. [file:///D:/Tesis Doctoral/Bibliografía/00000934\\_Brime1998.pdf](file:///D:/Tesis%20Doctoral/Bibliografía/00000934_Brime1998.pdf)
- Bürgli, H. (1961). Historia Geológica de Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 11(43), 137–191. [https://www.accefyn.com/revista/Volumen\\_11/43/137-191.pdf](https://www.accefyn.com/revista/Volumen_11/43/137-191.pdf)
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., Blum, M. D., Dalrymple, R. W., Eriksson, P. G., Fielding, C. R., Fisher, W. L., Galloway, W. E., Gibling, M. R., Giles, K. A., Holbrook, J. M., Jordan, R., Kendall, C. G. S. C., Macurda, B., Martinsen, O. J., Miall, A. D., Neal, J. E., Nummedal, D., ... Winker, C. (2009). Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 92(1–2), 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.003>
- Cazier, E. C., Hayward, A. B., Espinosa, G., Velandia, J., Mugniot, J. F., & Leel, W. G. (1995). Petroleum Geology of the Cusiana Field, Llanos Basin Foothills, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79(10), 1444–1463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1306/7834D9FE-1721-11D7-8645000102C1865D>
- Chilingarian, G. V., & Yen, T. F. (1978). *Bitumens, asphalts and tar sands* (7th ed.). Elsevier Scientific Publishing Company.
- Chima, P., Baiyegunhi, C., Liu, K., & Gwavava, O. (2018). Diagenesis and rock properties of sandstones from the Stormberg Group, Karoo Supergroup in the Eastern Cape Province of South Africa. *Open Geosciences*, 10(1), 740–771. <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0059>
- Cooper, M. A., Addison, R., Álvarez, M., Coral, R., Graham, A. ., Hayward, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. ., & Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79(10), 1421–1443.
- Craigie, N. (2018). *Principles of Elemental Chemostratigraphy*. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-71216-1>
- Craigie, N., Rees, A., MacPherson, K., & Berman, S. (2016). Chemostratigraphy of the Ordovician Sarah

- Formation, North West Saudi Arabia: An integrated approach to reservoir correlation. *Marine and Petroleum Geology*, 77, 1056–1080. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.07.009>
- Dabrio, C. J., & Polo, M. D. (1996). Cambios eustáticos y arquitectura estratigráfica de unidades costeras. *Geogaceta*, 20(2), 438–441. <https://rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/11814/Cambios.pdf?sequence=2>
- Demaison, G. J. (1977). Tar Sands and Supergiant Oil Fields. *AAPG Bulletin*, 61(2), 1950–1961. <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/61/11/1950/35950/Tar-Sands-and-Supergiant-Oil-Fields1>
- Di Roccoa, H. O., & Cruzado, A. (2012). The voigt profile as a sum of a gaussian and a lorentzian functions, when the weight coefficient depends only on the widths ratio. *Acta Physica Polonica A*, 122(4), 666–669. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.122.666>
- Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. E. Ham (Ed.), *Classification of carbonate rocks. A Symposium. American Association of Petroleum Geologists Memoir* (1st ed., pp. 108–121). <http://archives.datapages.com/data/specpubs/carbona2/data/a038/a038/0001/0100/0108.htm>
- Dusseault, M. B. (2001). Comparing Venezuelan and Canadian Heavy Oil and Tar Sands. *Petroleum Society Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, 61, 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/2001-061>
- El Tiempo. (1996, December 17). El Tiempo (1996). *Se desinfló Coporo, el mayor descubrimiento de Ecopetrol. Colombia*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-652181>
- Fabre, A. (1983). La subsidencia de la cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario inferior. Primera parte: Estudio cuantitativo de la subsidencia y evolución tectónica de la región del Cocuy durante los últimos 130 m.a.). *Geología Norandina*, 8, 49–61. <https://www.scienceopen.com/document?vid=0e3699a8-49ea-489b-bef8-a85f1634d1f5>
- Fabre, A. (1987). Tectonique et génération d'hydrocarbures: Un modèle de l'évolution de la cordillère orientale de Colombie et du bassin des Llanos pendant le Crétacé et le Tertiaire. *Archives Des Sciences.*, 40(2), 145–190. <https://www.worldcat.org/title/tectonique-et-generation-dhydrocarbures-un-modele-de-levolution-de-la-cordillere-orientale-de-colombie-et-du-bassin-des-llanos-pendant-le-cretace-et-le-tertiaire/oclc/718008041>
- Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. *The Journal of Geology*, 62(4), 344–359. <https://doi.org/10.1086/626171>
- Folk, R. L. (1962). Spectral subdivision of limestone types. *Association and the Society of Economic Paleontologist and Mineralogist*, 62–84.

- Folk, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, 1-170.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company. <http://hdl.handle.net/2152/22930>
- Folk, R. L., Andrews, P. B., & Lewis, D. W. (1970). Detrital Sedimentary Rock Classification and Nomenclature for Use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13, 937–968.
- Galán, E., González, I., Mayoral, E., & Vázquez, M. A. (1989). Caracterización y origen de las facies glauconítica de la cuenca Guadalquivir. *Estudios Geológicos*, 45(3–4), 169–175. <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/egeol.89453-4489>
- Gámez-Vintaned, J. A., & Liñán, E. (1996). Revisión de la terminología icnológica en español. *Spanish Journal of Paleontology*, 11(2), 155–176. <https://doi.org/https://doi.org/10.7203/sjp.23910>
- Gómez-Rojas, O. P., Borrego, Á. G., Perea-Solano, C., Sánchez-Morales, O., & Flórez-Molano, H. F. (2018). Caracterización preliminar de las arenas asfálticas de Picacho , municipio de Pesca (Boyacá , Colombia). *Boletín de Geología*, 40, 87–99. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n2-2018005.RESUMEN>
- Gómez, J.-J., Carreño, A.-M., Pérez, M. del R., Pérez, E.-R., Peña, Luis, F., Rueda, L.-H., Ríos, C.-A., & Henao, J.-A. (2020). Petrofacies and diagenetic processes of La Victoria Formation (Early Miocene), Dina oil field, Upper Magdalena Valley Basin, Colombia. *CT y F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 10(June), 33–44. <https://doi.org/10.29047/01225383.120>
- González, F., & Jiménez, G. (2005). *Caracterización geoquímica y estratigráfica del intervalo Paleoceno Superior para una transecta entre el pozo Coporo-1 y Gibraltar-1, Piedemonte Llanero* [Universidad de Santander - ICP]. <https://www.semanticscholar.org/paper/CARACTERIZACION-GEOQUIMICA-Y-ESTRATIGRAFICA-DEL-UNA-Sánchez-Geólogo/e7f56ae77794c7876f3a93431638f5553c9cc813>
- Guerrero-Higuera, N. M., Molano-Mendoza, J. C., Mayorga-Morales, A. M., Burbano-Muñoz, N., Cardona Alarcón, A. C., Mayor-Amador, A., Valderrama, L., Jiménez, S., Méndez-Chaparro, Y., Peña-León, J., Prada, D., Contreras, D., Martín-Ravelo, A. S., Granja, G., Rodríguez, C., Páez, L., Gómez, A., Sandoval, A., Baquero, J. M., ... Bautista, C. (2023). *Informe de técnicas analíticas Cuencas Llanos Orientales*.
- Guerrero, J. (2002a). A Proposal on the Classification of Systems Tracts: Application to the Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin. Part 1: Barremian to Maastrichtian. *Geología Colombiana*, 27, 27–49. [https://www.researchgate.net/publication/276058692\\_A\\_Proposal\\_on\\_the\\_Classification\\_of\\_Systems\\_Tracts\\_Application\\_to\\_the\\_Allostratigraphy\\_and\\_Sequence\\_Stratigraphy\\_of\\_the\\_Creta](https://www.researchgate.net/publication/276058692_A_Proposal_on_the_Classification_of_Systems_Tracts_Application_to_the_Allostratigraphy_and_Sequence_Stratigraphy_of_the_Creta)

- ceous\_Colombian\_Basin\_Part\_2\_Barremian\_to\_Maastrichtian
- Guerrero, J. (2002b). A Proposal on the Classification of Systems Tracts: Application to the Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin. Part 1: Berriasian to Hauterivian. *Geología Colombiana*, 27, 3–25. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31580>
- Guerrero, J., & Sarmiento-Pérez, G. (1996). Estratigrafía Física , Palinológica , Sedimentológica y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero . *Geología Colombiana*, 20, 3–66. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31386>
- Guerrero, J., & Sarmiento, G. (1996). Estratigrafía Física, Palinológica, Sedimentológica y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera. *Geología Colombiana*, 20, 3–66. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31386/31489>
- Guerrero, J., Sarmiento, G., & Navarrete, R. (2000). The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities Including Aipe, Guaduas, Ortega, and Piedras The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basi. *Geología Colombiana*, 25(0), 45–110.
- Head, I. M., Jones, D. M., & Larter, S. R. (2003). Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil. *Nature*, 426, 344–352. <https://doi.org/doi:10.1038/nature02134>
- Hein, F. J. (2006). Heavy Oil and Oil ( Tar ) Sands in North America : An Overview & Summary of Contributions. *International Association for Mathematical Geology*, 15(2), 67–84. <https://doi.org/10.1007/s11053-006-9016-3>
- Hettner, A. (1892). *Die kordillere von Bogotá, peterm.*
- Hong, H., Churchman, G. J., Yin, K., Li, R., & Li, Z. (2014). Randomly interstratified illite-vermiculite from weathering of illite in red earth sediments in Xuancheng, southeastern China. *Geoderma*, 214–215, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.004>
- Hubach, E. (1957). *Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia.*
- Ji, H., Li, S., Zhang, H., Pang, X., Zhou, Y., & Xiang, L. (2021). Molecular Characterization of NSO Compounds and Paleoenvironment Implication for Saline Lacustrine Oil Sands by Positive-Ion Mass Spectrometry Coupled with Fourier-Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. *ACS Omega*, 6(39), 25680–25691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03801?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>
- Jiayu, N., & Jianyi, H. (1999). Formation and distribution of heavy oil and tar sands in China. *Marine and Petroleum Geology*, 16(1), 85–95. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(98\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(98)00039-7)

- Julivert, M. (1962). Estudio sedimentológico de la Parte Alta de la Formación Guadalupe, al E. de Bogotá (Cretáceo Superior). *Boletín de Geología*, 10, 25–55. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/5648>
- Kulkarni, K. (2018). *Reservoir quality determination and modelling of unconsolidated Canadian Oil Sands reservoir following analytical techniques* [University of Portsmouth]. <https://researchportal.port.ac.uk/en/studentTheses/reservoir-quality-determination-and-modelling-of-unconsolidated-c>
- Lakowicz, J. R. (2006). Introduction to Fluorescence. In *Principles of Fluorescence Spectroscopy* (pp. 1–26). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4_1)
- Loera Arroyo, S. (2016). *Fluorescencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en agua de mar*. Instituto Politécnico Nacional.
- Mariño-Martínez, J. E. (2015). Gas asociado al carbón (CBM o GMAC). *Geología, contenidos, reservas, minería y posibilidades en Colombia* (C. A. Vargas Gómez, H. A. Rojas Sarmiento, F. Manrique Abril, L. Fernández Samacá, L. E. Márquez, F. Casierra Posada, J. A. Gómez Castaño, R. Sanabria Marin, & P. E. Pedraza Torres (eds.); 1st ed.). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Martinez, J. (2003). Modelamiento Estructural 3D Y Aplicaciones En La Exploración Y Explotación De Hidrocarburos En El Cinturón De Cabalgamiento Del Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental, Colombia. *8th Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera En Las Cuencas Subandinas*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.33.Paper12>
- Meunier, A. (2005). *Clays* (1st ed.). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/b138672>
- Moeller-Schnepfe, M. (1958). A study of cation exchange with vermiculite. <https://doi.org/10.3133/ofr60122>
- Molano-Mendoza, J. C., Alfonso-Rubio, M., Cadena-Sánchez, A. O., Mayorga-Morales, A. M., Castrillón-Peña, A., Montaña-Cárdenas, J., Piragua-Alarcón, A., Guerrero Higuera, N. M., Calderón, J., Vargas, M., Luengas, C., Valderrama, L., & Martín-Ravelo, A. S. (2023). *Informe levantamiento estratigráfico Cuenca Llanos Orientales*.
- Moore, D. G., & Scruton, P. C. (1957). Minor internal structures of recent unconsolidated sediments. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 41(12), 2723–2751. <https://dokumen.tips/documents/more-and-scruton-1957.html>
- Moore, D. M., & Reynolds Jr, R. C. (1989). *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals-Oxford University Press*.
- Moreno, M., & Hincapié, G. (2010). Estudio de isotopos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y estroncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) en los depósitos cretáceos-terciarios de la cordillera oriental. <http://www.anh.gov.co/Informacion->

- Geologica-y-  
Geofisica/Tesis/ESTUDIO\_DE\_ISOTOPOS\_C\_Y\_Sr\_EN\_LOS\_DEPOSITOS\_K\_Y\_T\_DE\_LA\_CORDIL  
LERA\_ORIENTAL.pdf
- Mount, J. (1985). Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification. *Sedimentology*, 32(3), 435–442. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1985.tb00522.x>
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy* (Second Edi). Wiley & Sons Ltd. <https://raregeologybooks.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>
- Niu, B., Yoshimura, T., & Hirai, A. (2000). Smectite Diagenesis in Neogene Marine Sandstone and Mudstone of the Niigata Basin, Japan. *Clays & Clay Minerals*, 48, 26–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1346/CCMN.2000.0480104>
- Parra, M., Mora, A., Jaramillo, C., Strecker, M. R., Sobel, E. R., Quiroz, L., Rueda, M., & Torres, V. (2009). Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 121(5–6), 780–800. <https://doi.org/10.1130/B26257.1>
- Pedraza-Fracica, S. (2010). *Determinación e interpretación de las paleogeotermas de la parte central de la cordillera oriental (implicaciones en la calidad del carbón)*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Pedraza-Fracica, S., & Mariño-Martínez, J. E. (2016). Evaluación termal de 6 pozos de la parte central de la cordillera oriental (Colombia), a partir de paleogeotermas: implicaciones sobre la historia térmica y los hidrocarburos. *Ingeniería y Competitividad*, 18(1), 9–21. <https://www.redalyc.org/journal/2913/291343439002/html/>
- Perez, G., & Salazar, A. (1978). Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. *Geología Colombiana*, 10, 1–116. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30407>
- Pohl, W. L. (2011). *Economic Geology Principles and Practice Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons – Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits* (1st ed.). John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- Posamentier, H. W., & Allen, G. P. (1999). *Siliciclastic Sequence Stratigraphy* (H. W. Posamentier & G. P. Allen (eds.); Vol. 7). SEPM (Society for Sedimentary Geology). <https://doi.org/10.2110/csp.99.07>
- Reineck, H.-E., & Singh, I. B. (1980). Depositional Sedimentary Environments. In *Springer Verlag, New York*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-81498-3>
- Renzoni, G. (1962). Apuntes acerca de la Litología y Tectónica de la zona al Este y Sureste de Bogotá. *Boletín Geológico*, 10(1–3), 59–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.32685/0120->

1425/bolgeol10.1-3.1962.208

- Rivera, H. A., Le Roux, J. P., Sánchez, L. K., Mariño-Martínez, J. E., Salazar, C., & Barragán, J. C. (2018). Palaeoredox conditions and sequence stratigraphy of the Cretaceous storm-dominated, mixed siliciclastic-carbonate ramp in the Eastern Cordillera Basin (Colombia): Evidence from sedimentary geochemical proxies and facies analysis. *Sedimentary Geology*, 372, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.05.003>
- Rodríguez-Esquivel, C. E., & Sánchez-Quinonez, C. A. (2021). Evidencias de metamorfismo de bajo grado y caracterización petrográfica de la Formación El Hígado, Sur del Huila, Colombia. *Boletín de Geología*, 43(1), 77–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revbol.v43n1-2021004>
- Sarmiento-Pérez, G. (1992). Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. In *Boletín Geológico* (Vol. 32, Issues 1–3). <https://doi.org/https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol32.1-3.1992.193>
- Sarmiento-Pérez, G., & Guerrero, J. (2000). Palinología del Santoniano Tardío al Maastrichtiano del Piedemonte Llanero Colombiano. Correlación con el Paleocinturón Tropical. *Geología Colombiana*, 25, 111–147. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31537>
- Sarmiento, L. F. (2001). *Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern of the Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models* [Vrije Universiteit Amsterdam]. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>
- Seilacher, A. (2007). *Trace Fossil Analysis* (1st ed.). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-47226-1>
- Terraza, R., Montoya, D., Reyes, G., Moreno, G., Fuquen, J., Torres, E., López, M., & Nivia, A. (2013). *Geología de la plancha 229 Gachalá*. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B14/23008010024664/Documento/pdf/2105246641101000.pdf>
- Thorez, J. (1975). *Phyllosilicates and clay minerals. A laboratory handbook for their x-ray diffraction analysis*. G. Lellote. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/t76-035>
- Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2016). *Petrophysics* (D. Tiab & E. C. Donaldson (eds.); 4th ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03707-0>
- Ulloa, C. E., & Rodríguez, E. (1979). Geología del Cuadrángulo K-12, Guateque. *Boletín Geológico*, 22(1), 3–56. <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/255>
- Ulmer-Scholle, D. S., Scholle, P. A., Schieber, J., & Raine, R. J. (2015). *A Color Guide to the Petrography of Sandstones, Siltstones, Shales and Associated Rocks* (M. L. Sweet, J. B. Blankenship, C. North, T. Diggs, B. Molyneux, J. C. Pashin, K. Taylor, & S. G. Thomas (eds.)). American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/https://doi.org/10.1306/M1091304>

- Vargas, C. A. (2012). *Potencial de hidrocarburos en Colombia*. [https://www.anh.gov.co/documents/14330/Potencial\\_Hidrocarburifero\\_de\\_Colombia.pdf](https://www.anh.gov.co/documents/14330/Potencial_Hidrocarburifero_de_Colombia.pdf)
- Vita-Mesa, L. (2022). "Potencial en Yacimientos No Convencionales puede ser 25.000 millones de barriles. La República. <https://www.larepublica.co/economia/con-yacimientos-no-convencionales-podriamos-multiplicar-por-12-las-reservas-actuales-3149295>
- Warr, L. N., & Ferreiro Mählmann, R. (2015). Recommendations for Kübler Index standardization. *Clay Minerals*, 50(3), 283–286. <https://doi.org/10.1180/claymin.2015.050.3.02>
- Warr, L. N., & Rice, A. H. N. (1994). Interlaboratory standardization and calibration of day mineral crystallinity and crystallite size data. *Journal of Metamorphic Geology*, 12(2), 141–152. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1994.tb00010.x>
- Waseda, Y., Matsubara, E., & Shinoda, K. (2011). X-ray Diffraction Crystallography. In *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Springer Berlin Heidelberg.
- Wentworth, C. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Journal of Geology*, 30, 377–392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1086/622910>
- Worden, R. H., & Burley, S. D. (2003). Sandstone Diagenesis: The Evolution of Sand to Stone. In *Sandstone Diagenesis*. <https://doi.org/10.1002/9781444304459.ch>
- Zadvernyuk, H., Kadoshnikov, V., Shekhunova, S., & Remez, S. (2021). Particle size distribution and crystallinity as indicators of kaolinite genesis. *Applied Clay Science*, 213(July), 106236. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106236>
- Zambrano-Mesa, M. I., Tejeda-Piusseaut, E., & Alonso-Aeannle, A. (2020). Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos. *Infraestructura Vial*, 22(39), 29–42. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15517/iv.v22i39.41574>
- Zamora, J. A., Vargas, C. A., Pardo, A., Sánchez, C., Gómez, J., Ballesteros, J. C., Briceño, L. A., Mojica, J., Morales, H., Peñafort, C., Rey, C., Tovar, D., & Arce, C. (2008). *Area Cordillera - Informe de prospectividad*. [https://www.anh.gov.co/documents/4163/Cordillera\\_Oriental.pdf](https://www.anh.gov.co/documents/4163/Cordillera_Oriental.pdf)