

Caracterización litoestratigráfica del segmento superior de la Formación Angostura del Rio

Lebrija en la sección del Camino Lenguerke, Zapatoca

Isabella Arias Silva, Maria Juliana Riatiga Salamanca

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Giovanny Jiménez Díaz

Doctor en Geología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A los señores David Riatiga y Nelbery Salamanca, mis padres quienes han sido mi mayor motivación y soporte a lo largo del tiempo. Sin su comprensión y consejos no sería quien soy hoy. Siempre me han colmado de un amor infinito que me ha impulsado a perseguir mis sueños, su fe en mí siempre iluminó mi camino y por eso hoy puedo sentirme orgullosa de mis logros.

Gracias por cada uno de sus sacrificios.

A mis tíos Nelson Torres, Juliana Salamanca por siempre estar para mí, tratarme como una segunda hija y darme un segundo hogar lleno de amor.

A Carlos Ardila por su cariño y aliento.

A mis abuelas Alcira González y Lilia María Fandiño por sus oraciones y motivación. Soy muy afortunada de tenerlas apoyándome.

A mis primos Maria José y Santiago, y a mi hermana Lilian por siempre darme ánimo.

A mis abuelos Efraín Salamanca y Hugo Riatiga por ser mis ángeles y apoyarme desde el cielo.

Los amo profundamente.

Juliana

A mis padres Francisco y Nohemi, quienes son mi constante motivación y orgullo, el pilar más importante de mi vida.

A mis hermanos Francisco y Andrea, mi mayor tesoro, mis compañeros de vida y de sueños.

Isabella

Agradecimientos

A mis padres Francisco y Nohemi, por su amor incondicional, por apoyarme y aconsejarme de la mejor manera en cada decisión que tomo, por ser mi refugio en los momentos difíciles, por cada palabra de aliento y por creer en mí incluso cuando yo dudaba, no imagino mejores padres que ustedes, son el mayor ejemplo que tengo en la vida.

A mis hermanos Francisco y Andrea, por cada palabra de aliento, cada risa, cada regaño y cada consejo, son mi mejor regalo y no podría estar donde estoy sin ustedes.

A mis amigos y colegas Gabriela, Paula, Juan Jose, Manuel, Gissel, Jaffet, José y Juan Pablo, por cada momento de este viaje, lo hicieron mil veces más sencillo y hermoso.

A mi amiga y compañera Juliana, por su paciencia y dedicación, por su cariño y compañía, por cada risa y lagrima en este proceso, no lo habría logrado sin ti.

A mi director Giovanni Jiménez Diaz, por su dedicación y apoyo, por alentarnos cada vez a mejorar y ser grandes profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander, a sus docentes y personal administrativo por darme las herramientas para realizar mis sueños.

Y finalmente pero no menos importante a Dios por iluminar mi mente y mi corazón cuando más lo necesitaba.

Isabella

A mi director, Giovanni Jiménez, por su acompañamiento y apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por la confianza que depositó en nosotras, así como por todo el tiempo y los consejos que nos dedicó.

A Luis Fernando Anaya, el encargado del laboratorio de preparación de muestras de la Universidad Industrial de Santander, por la preparación de las secciones delgadas.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme usar sus microscopios para el análisis de las secciones delgadas.

A mis docentes y el personal administrativo, por darme las bases necesarias para culminar este trabajo.

A mi familia, por acompañarme en cada parte del proceso y ser mi pilar. Ustedes y Dios me dieron esperanza en los momentos difíciles y nunca dudaron de mí.

A mis amigos Jaffet, Jose, Oscar, Julián, Johan y Zaray por su apoyo incondicional en los momentos difíciles y por siempre conseguir sacarme una sonrisa.

A Isabella Arias, mi amiga y compañera, por su templanza y sus consejos. En cada parte del camino supo darme la calma que necesitaba a través de sus sabias palabras. Este proceso no hubiera sido lo mismo sin ti.

Juliana

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Localización Geográfica	16
2. Justificación Y Planteamiento Del Problema.....	18
3. Objetivos	19
3.1 Objetivo General	19
3.2 Objetivos Específicos	19
4. Marco Conceptual	20
4.1 Facies.....	20
4.2 Proveniencia	23
5. Marco Teórico.....	25
5.1 Marco geológico regional.....	25
5.1.1 Estratigrafía regional	27
5.1.2 Geología Estructural.....	32
6. Metodología	35
6.1 Fase 1: Precampo - Recopilación bibliográfica.....	35
6.2 Fase 2: Campo.....	35
6.3 Fase 3: Procesamiento y análisis de datos.....	36
6.4 Fase 4: Resultados	38
7. Resultados	39
7.1 Cartografía del área de Zapatoca.....	39
7.2 Estratigrafía del segmento superior de la Formación Angostura del Rio Lebrija.....	41

7.3 Resumen petrografía de arenitas	44
7.4 Petrografía de conglomerados	51
7.5 Facies y Asociación facial.....	53
8. Discusión.....	58
8.1 Procedencia Formación Angostura del Rio Lebrija	58
8.2 Interpretación del ambiente	62
9. Conclusiones	66
10. Recomendaciones	68
11. Referencias Bibliográficas.....	69

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las facies detríticas fluviales.....	20
Tabla 2. Unidades deposicionales y sus principales asociaciones.	23
Tabla 3. Porcentajes de cada muestra para clasificación.....	45
Tabla 4. Litofacies identificadas en la Formación Angostura del Río Lebrija.....	53
Tabla 5. Asociaciones de Litofacies de la Formación Angostura del Río Lebrija.....	56

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.	17
Figura 2. Unidades deposicionales principales en sistemas fluviales.	22
Figura 3. Mapa Geológico del área de estudio.	27
Figura 4. Unidades estratigráficas presentes en la Zona de estudio y sus alrededores.	31
Figura 5. Corte estructural donde muestra las estructuras regionales de Zapatoca.	34
Figura 6. Mapa cartográfico 1:25.000 de la zona de estudio.	41
Figura 7. Poligonal levantada en el segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija.	42
Figura 8. Columna estratigráfica generalizada del segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija.	44
Figura 9. Clasificación composicional de las muestras de arenisca de la Formación Angostura del Río Lebrija	46
Figura 10. Foto de las secciones delgadas analizadas en nicoles paralelos y cruzados.	48
Figura 11. Foto de las secciones delgadas analizadas en nicoles paralelos y cruzados.	49
Figura 12. Conteo de clastos realizado para la Formación Angostura del Río Lebrija.	51
Figura 13. Distribución de las asociaciones de facies dentro del segmento superior de la formación Angostura del Río Lebrija.	57
Figura 14. Clasificación de las areniscas de la Formación Angostura del Río Lebrija en el diagrama de proveniencia.	59
Figura 15. Clasificación de los conglomerados de la Formación Angostura del Río Lebrija en el diagrama de proveniencia.	60

Figura 16. Esquema de las condiciones deposicionales de la Formación Angostura del Río Lebrija durante el Jurásico Tardío.62

Lista de Apéndices

Apéndice A. Columna Estratigráfica del segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija (Escala 1:25)

Apéndice B. Descripción petrográfica detallada de las secciones delgadas pertenecientes a la Formación Angostura del Río Lebrija

Glosario

Ambiente de depósito: Conjunto de condiciones bajo las cuales se acumulan sedimentos, como ríos, lagos o ambientes marinos, que determinan las características de las rocas sedimentarias resultantes

Columna estratigráfica: Representación gráfica vertical de las capas de rocas que se encuentran en un área determinada. Se utiliza en geología para mostrar el orden, grosor, litología y relaciones entre las unidades sedimentarias o formaciones geológicas observadas en campo.

Estratigrafía: Ciencia que estudia las capas de rocas sedimentarias (estratos), su disposición, edad relativa y las condiciones bajo las cuales se formaron, con el fin de reconstruir la historia geológica de una región.

Facies: Características litológicas y paleontológicas que definen una roca y su ambiente de deposición.

Jurásico: Es un periodo de la escala geológica que forma parte de la era Mesozoica, ubicada entre el Triásico y el Cretácico. Se extiende aproximadamente desde hace 201 millones hasta 145 millones de años atrás.

Petrografía: Estudio de las rocas mediante análisis microscópico para determinar su composición, textura y grado de compactación.

Poligonal: Método de medición en campo para determinar la orientación y pendientes de las capas rocosas.

Proveniencia: Origen o fuente de los sedimentos, inferido a partir de su composición y textura.

Unidad deposicional: Porción de sedimento o roca que representa un evento o ambiente de depósito específico.

Resumen

Título: Caracterización litoestratigráfica del segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija en la sección del Camino Lenguerke, Zapatoca¹

Autores: Isabella Arias Silva, Maria Juliana Riatiga Salamanca²

Palabras Clave: Anticlinorio de los Yariguíes, Grupo Girón, Formación Angostura del Río Lebrija, Procedencia, Paleoambiente.

Descripción:

El Grupo Girón es una secuencia sedimentaria depositada entre el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano, que aflora en la Cordillera Oriental de Colombia. Está integrado por la Formación Angostura del Río Lebrija en la base y la Formación los Santos en el tope. La Formación Angostura del Río Lebrija está compuesta por depósitos predominantemente continentales, caracterizados por facies de sistemas fluviales y llanuras de inundación.

La Formación Angostura del Río Lebrija está conformada principalmente por areniscas de grano medio a grueso, ligeramente conglomeráticas, de color rojizo-violáceo, con estructuras de estratificación cruzada y lodolitas intercaladas. A pesar de los estudios previos realizados en las unidades sedimentarias de la secuencia del Jurásico tardío – Cretácico Temprano, aún existen incertidumbres sobre la dinámica de su ambiente de depositación y la procedencia de los sedimentos que la conforman.

Con el objetivo de caracterizar las condiciones de depositación y la procedencia de los materiales de esta unidad, se realizó un estudio basado en cartografía geológica a escala 1:25.000, se realizó un análisis petrográfico de secciones delgadas, se hizo un conteo de clastos en conglomerados de la formación y se realizó la medición de una columna estratigráfica. Asimismo, se llevó a cabo un análisis de facies para interpretar el ambiente sedimentario.

Los resultados indican que la Formación Angostura del Río Lebrija fue depositada en un ambiente continental fluvial, con sistemas de canales entrelazados y llanuras de inundación. El análisis de procedencia sugiere que la principal fuente de aporte sedimentario proviene del basamento paleozoico y de unidades ígneas y metamórficas cercanas, indicando un origen policíclico con un alto grado de reciclaje sedimentario.

¹ trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Geología. Geología. Director: Giovanni Jiménez Díaz. Doctor en Geología

Abstract

Title: Lithostratigraphic characterization of the upper segment of the Angostura Formation of the Lebrija River in the section of the Lenguerke way, Zapatoca³

Author(s): Isabella Arias Silva, Maria Juliana Riatiga Salamanca⁴

Key Words: Yariguíes Anticlinorium, Girón Group, the Angostura Formation of the Lebrija River, Provenance, Paleoenvironment.

Description:

The Girón Group is a sedimentary sequence deposited between the Late Jurassic and Early Cretaceous, which emerges in the Eastern Cordillera of Colombia. It is composed of the Angostura Formation of the Lebrija River at the base and the Los Santos Formation at the top. The Angostura Formation of the Lebrija River is composed of predominantly continental deposits, characterized by facies of river systems and flood plains.

The Angostura Formation of the Lebrija River is mainly composed of medium to coarse-grained, slightly conglomerate, reddish-violet sandstones with cross-stratified structures and interspersed lodolites. Despite previous studies carried out on the sedimentary units of the late Jurassic - Early Cretaceous sequence, there are still uncertainties about the dynamics of its depositional environment and the origin of the sediments that make it up.

To characterize the deposition conditions and the origin of the materials from this unit, a study based on geological mapping at scale 1:25,000 was carried out, a petrographic analysis of thin sections was carried out, a count of clasts was made in clusters of the formation and a stratigraphic column was measured. A facies analysis was also carried out to interpret the sedimentary environment.

The results indicate that the Angostura Formation of the Lebrija River was deposited in a continental fluvial environment, with interlaced canal systems and flood plains. The source analysis suggests that the main source of sedimentary input comes from the Paleozoic basement and nearby igneous and metamorphic units, indicating a polycyclic origin with a high degree of sedimentary recycling.

³ Bachelor of Science thesis

⁴ Faculty of Physical Chemical Engineering. School of Geology. Geology. Director: Giovanni Jiménez Diaz. Doctor in Geology

Introducción

El Grupo Girón fue descrito por Cediell (1968), incluyendo a la Formación Angostura del Río Lebrija como la parte inferior y a la Formación los Santos como la parte superior (Etayo-Serna, 1989). La Formación Angostura del Río Lebrija está compuesta por areniscas de grano medio, ligeramente conglomeráticas de color rojizo-violáceo, con estructuras de estratificación cruzada y lodolitas. A esta formación se le ha asignado un ambiente de tipo fluvial y se le atribuye una edad correspondiente al Jurásico Tardío (Clavijo et al., 1993).

Navas (1963) realizó un estudio del Grupo Girón al oeste del Macizo de Santander, identificando una secuencia estratigráfica con varios niveles, incluyendo lodolitas y areniscas, y destacando la variabilidad en la base del Grupo Girón en diferentes localidades. Posteriormente, Ward (1973) analizó la distribución y las características sedimentarias del Grupo Girón, resaltando su carácter predominantemente continental y su relación con la actividad tectónica regional durante el Jurásico.

Osorio (2016) llevó a cabo un análisis estratigráfico y estructural del Grupo Girón en los sectores de Zapatoca y Río Lebrija, enfocándose en las características geológicas y tectónicas durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano.

De igual manera, Jimenez et al. (2021) estimaron tasas de sedimentación para el Grupo Girón, las cuales permitieron asociar facies de abanicos aluviales y canales meándricos para la parte inferior y facies de llanura de inundación para la parte superior, además los autores interpretan que las variaciones en las tasas de sedimentación dentro del Grupo Girón están probablemente controladas por cambios en la tasa de desplazamiento a lo largo de las Fallas Suárez y Bucaramanga, activas durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Inferior.

Aunque la evolución de las rocas presentes en la Cordillera Oriental ha sido objeto de diferentes estudios, siguen existiendo incertidumbres sobre aspectos como los sub ambientes de depositación de la Formación Angostura del Río Lebrija y las fuentes de aporte sedimentario que dieron origen a esta. Lo anterior limita la comprensión de la historia geológica de la región en el Jurásico tardío.

En el presente trabajo se busca definir el ambiente y las condiciones de deposición que tuvo la Formación Angostura del Río Lebrija, ubicada en el flanco oriental del Anticlinorio de los Yariguíes. Para ello, se identificaron sus características estratigráficas, sedimentológicas y geológicas. A través de técnicas de campo y laboratorio, que incluyen la descripción detallada de afloramientos, la cartografía geológica a escala 1:25.000, el análisis petrográfico de secciones delgadas, el conteo de clastos de conglomerados, la medición de una columna estratigráfica y la asociación de facies, se interpretará el ambiente de depositación de la Formación Angostura del Río Lebrija.

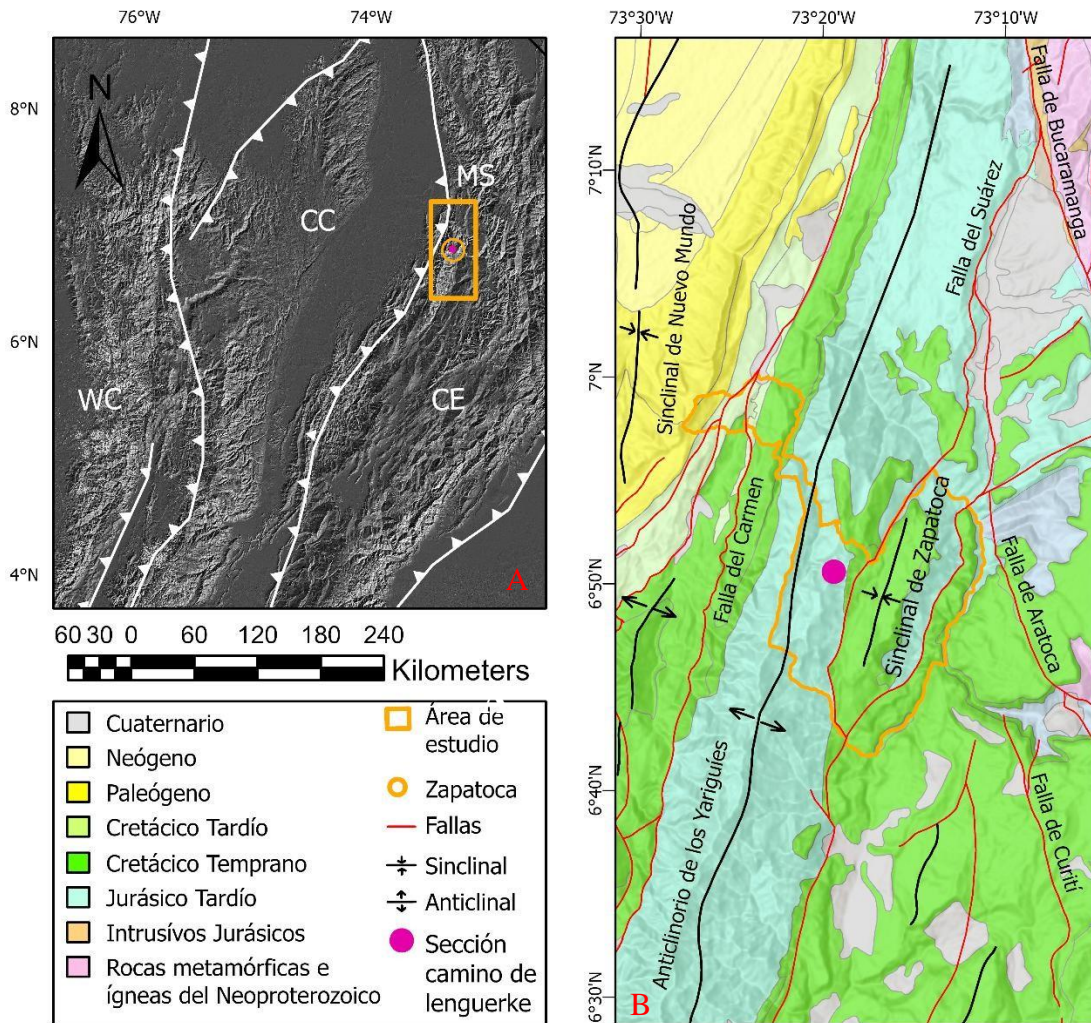
Adicionalmente, mediante el análisis de la composición y textura de los materiales clásticos, se inferirá la procedencia de los sedimentos que la conforman, lo que permitirá establecer su relación con los posibles orógenos fuente y los procesos erosivos que los generaron. Este estudio contribuirá a la reconstrucción de los procesos paleoambientales ocurridos en el Jurásico, brindando mayor claridad sobre la evolución geológica de la Formación Angostura del Río Lebrija y su relación con la dinámica tectónica regional.

1. Localización Geográfica

El área de estudio se localiza en el sector Nororiental de Colombia, en el segmento Occidental de la Cordillera Oriental de los Andes. El segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija se encuentra en el flanco oriental del Anticlinorio de los Yarigués, sobre el cerro conocido como la “Cuchilla del Ramo” (X: 6°50'52.76"N 73°17'54.40"O; X': 6°50'44.72"N 73°17'30.84"O; WGS84). Este anticlinorio forma parte del bloque yacente de la Falla Bucaramanga-Santa Marta, una de las principales estructuras transcurrentes de la zona, lo que ha condicionado la exposición y deformación de las unidades sedimentarias del Jurásico y Cretácico. El área de estudio está siendo afectada principalmente por fallas dextrales e inversas (Figura 1).

Figura 1.

Mapa de localización del área de estudio.



Nota: El mapa de localización muestra la ubicación geográfica regional. A) Mapa de las principales características tectónicas y estructurales de los Andes del norte. El rectángulo naranja representa la ubicación de la Figura B y el punto naranja está ubicado en el municipio de Zapatoca. Las siglas utilizadas corresponden a: WC: Cordillera Occidental; CC: Cordillera Central; EC: Cordillera Oriental; MS: Macizo de Santander. B) Sección transversal del Anticlinorio de Los Yarigués. Sistema de referencia WGS84.

2. Justificación Y Planteamiento Del Problema

La Formación Angostura del Río Lebrija (unidad basal del Grupo Girón), ha sido objeto de múltiples estudios debido a su importancia en la reconstrucción geológica del límite Jurásico-Cretácico en la Cordillera Oriental de Colombia. Investigaciones previas han interpretado, a partir de análisis litofaciales, el contexto geológico en el que se originó la formación Angostura del Río Lebrija (Jurásico Tardío, Kimmeridgiano Temprano-Tithoniano Temprano), coincidiendo en que su depositación ocurrió en un ambiente de tipo continental fluvial – Lacustre con facies de llanuras de inundación y altas tasas de sedimentación consecuencia de la magnitud del suministro de sedimentos (Cediel, 1968; Afanador & Velandia, 2021; Jiménez et al, 2021). Sin embargo, a pesar de que la Formación Angostura del Río Lebrija fue propuesta en 1989 por Etayo-Serna, aún persisten vacíos en el conocimiento respecto a los sub ambientes deposicionales y su evolución, así como sus respectivas fuentes de aporte sedimentario. Estos hiatos en el conocimiento han generado una brecha que dificulta la identificación y comprensión de los episodios y rutas de transporte que controlaron la evolución de las antiguas cuencas deposicionales, limitando la capacidad de reconstruir de manera precisa las condiciones paleoambientales de la de la región a finales del Jurásico.

La caracterización cartográfica, estratigráfica y petrográfica del segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija en la sección del camino de Lenguerke en Zapatoca, aportará nueva información sobre estas inconsistencias, revelando las diferentes facies sedimentarias presentes y rastreando las diferentes fuentes de sedimentos que contribuyeron a la evolución de la cuenca, permitiendo conocer los sub ambientes deposicionales, los mecanismos de depositación y los procesos de transporte presentes en la formación.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Caracterizar estratigráfica, petrográfica y cartográficamente el segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija en el camino de Lengerke, Zapatoca, a través de los principios básicos de la estratigrafía, el análisis mineralógico y composicional de las unidades aflorantes.

3.2 Objetivos Específicos

Generar un mapa geológico a escala 1:25.000 en la zona de estudio.

Medir una columna estratigráfica usando los métodos de poligonal y bastoneo.

Definir las facies sedimentarias y proponer un ambiente de depósito.

Realizar un análisis petrográfico y de procedencia en areniscas y niveles conglomeráticos aflorantes en el camino de Lengerke

4. Marco Conceptual

4.1 Facies

El término facies se refiere a las características litológicas (composición, textura y estructuras sedimentarias) y paleontológicas que definen una roca y permiten su diferenciación de las demás, de igual manera el ambiente de deposición de las rocas le hereda ciertas características que se pueden reflejar en la misma (Vera, 1994). Las facies se pueden dividir en tipos según el propósito, existen las litofacies que describen los aspectos litológicos reinantes durante el depósito, las biofacies que se centran en los aspectos paleontológicos y las micro facies que describen tanto los aspectos litológicos como paleontológicos a la vista del microscopio (Vera, 1994).

El estudio de las facies de una roca permite interpretar su ambiente de depositación (Boggs, 1987). Para el caso de los ambientes fluviales, Miall (1978) propuso una clasificación (Tabla 1), basada en el tamaño de grano, dividiendo las facies en tres categorías principales: Gravas (G), Arenas (S) y Finos (F). Las facies propuestas, a su vez se subdividen en unas litofacies, que dividen los tres grandes grupos en función de las estructuras sedimentarias y texturales que presentan (Vera, 1994).

Tabla 1.

Clasificación de las facies detríticas fluviales.

Facies	Litofacies	Estructuras Sedimentarias
Gmm	Grava masiva, con soporte de matriz	No tiene
Gmg	Grava matriz-soportada	Gradación Inversa a normal
Gci	Grava clasto-soportada	Gradación Inversa
Gcm	Grava masiva clasto-soportada	No tiene
Gh	Grava con estratificación gruesa clasto-soportada	Estratificación horizontal. Imbricación
Gt	Grava estratificada	Estratificación en artesas

Facies	Litofacies	Estructuras Sedimentarias
Gp	Grava estratificada	Estratificación cruzada planar
St	Arenisca, a veces con cantos	Estratificación cruzada en artesa
Sp	Arenisca, a veces con cantos	Estratificación cruzada en planar
Sr	Areniscas	Ripples de diversos tipos
Sh	Areniscas	Laminación horizontal
Sl	Arenisca fina	Estratificación cruzada en de bajo ángulo (<15°)
Se	Niveles erosivos con cantos blandos	A veces estratificación cruzada a, poco marcada
Ss	Arenisca, a veces con cantos	Estratificación cruzada paralela a la base erosiva
Fl	Limos, arenisca, arcillas	Laminación fina, ripples muy pequeños
Fsc	Limos, arcillas	Laminada o masiva
Fcf	Imitas	Masiva, gasterópodos de agua dulce
Fm	Limos, arcillas	Masiva, grietas de desecación
Fr	Limos, arcillas	Raíces y restos vegetales

Nota: Adaptado de: (Miall, 1996)

Las Facies pueden ser agrupadas en asociaciones según distintos criterios que permiten interpretar la evolución del ambiente de depositación de las rocas sedimentarias. El término “asociación de facies” se refiere a la distribución ordenada de varias facies elementales, genéticamente relacionadas (Vera, 1994).

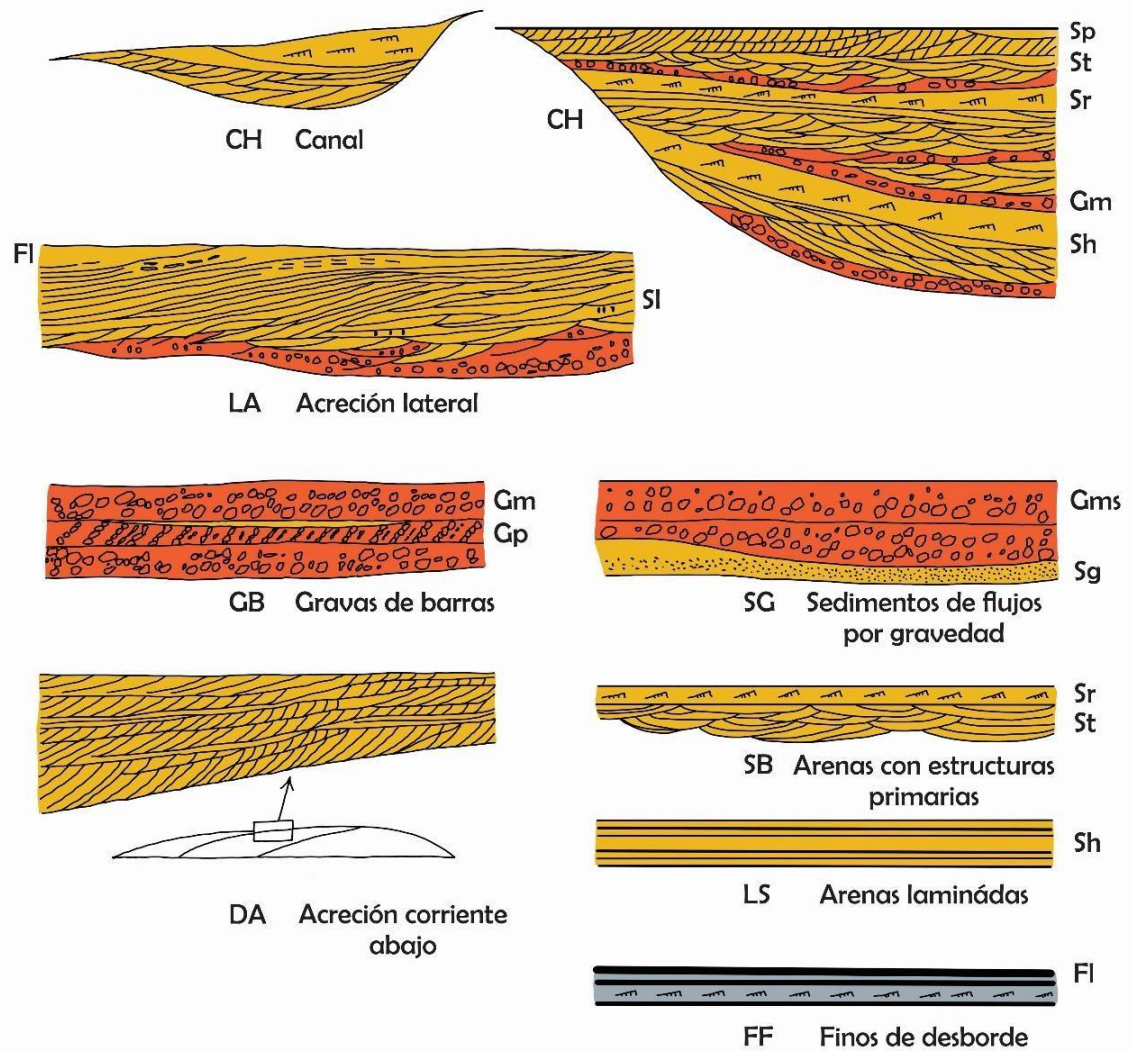
Las asociaciones faciales, a su vez, pueden organizarse en unidades deposicionales de gran escala, compuestas por facies sedimentarias con rasgos internos y externos distintivos. Estas unidades deposicionales reflejan procesos de depositación específicos y la organización del

sistema sedimentario (Miall, 1985). Además, mantienen una relación directa con las principales asociaciones faciales identificadas en el registro sedimentario (Miall, 1996).

Miall (1985) definió ocho unidades deposicionales principales para los sistemas fluviales, las cuales se ilustran a continuación en la Figura 2.

Figura 2.

Unidades deposicionales principales en sistemas fluviales.



Nota: Adaptado de: (Miall, 1985).

A su vez, la relación entre las unidades deposicionales propuestas para los sistemas fluviales (Miall, 1985) y sus principales asociaciones faciales se resume en la Tabla 2.

Tabla 2.

Unidades deposicionales y sus principales asociaciones.

Elemento	Símbolo	Asociación Principal inicial
Canales	CH	Ninguna
Capas y barras de grava	GB	Gm, Gp, Gt, Gmm
Capas de arena	SB	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss
Macroformas de acreción en el fondo	DA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss
Macroformas laterales de acreción	LA	Comunmente St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss Poco común Gm, Gp, Gt
Flujo de sedimentos por gravedad	SG	Gm, Gms
Arenas laminadas	LS	Sh, Sl, Sr, Sp
Bancos suprayacentes de finos	OF	Fm, Fi

Nota: Adaptado de: (Walker et al., 1992).

4.2 Proveniencia

La proveniencia sedimentaria se refiere al origen y tipo de materiales que conforman una roca sedimentaria, incluyendo su composición, características mineralógicas y el ambiente tectónico del que provienen (Dickinson & Suczek, 1979). Su estudio es fundamental para reconstruir la historia tectónica, paleogeográfica y evolutiva de una cuenca, ya que permite interpretar las fuentes de aporte, los mecanismos de transporte y las condiciones de depósito (Pettijohn et al., 1973).

Existen diversos enfoques para caracterizar la proveniencia sedimentaria, entre los principales métodos se encuentra el análisis petrográfico, el cual permite identificar la composición mineralógica y litológica de areniscas y conglomerados. Métodos como la clasificación de Folk

(1974) y el conteo de Gazzi-Dickinson (1984) son ampliamente utilizados para establecer la procedencia de los sedimentos. Otra herramienta son los diagramas ternarios de procedencia, como los propuestos por Dickinson (1985) y Marsaglia & Ingersoll (1992), que permiten ubicar los datos petrográficos en distintos contextos tectónicos como márgenes pasivos, arcos magmáticos y márgenes convergentes.

5. Marco Teórico

5.1 Marco geológico regional

La Cordillera de los Andes es un cinturón orogénico controlado por la convergencia entre la Placa Nazca y la Placa Sudamericana (Horton, 2018). En Colombia, la Orogenia Andina se refleja en el levantamiento y deformación de las tres cordilleras principales (Occidental, Central y Oriental), cada una con una historia geológica particular influenciada por eventos tectónicos desde el Mesozoico hasta el presente (Cooper et al., 1995; Villagómez & Spikings, 2013).

En esta configuración geodinámica, la Cordillera Oriental de Colombia ha experimentado una evolución geológica compleja, caracterizada por múltiples eventos tectónicos, sedimentarios y magmáticos desde el Paleozoico hasta el presente (Cooper et al., 1995; Sarmiento-Rojas et al., 2006). Durante el Triásico-Jurásico, la región estuvo sometida a un régimen tectónico extensional, asociado a la fragmentación del supercontinente Pangea (Bayona et al., 2020). En este contexto, se depositaron secuencias sedimentarias y volcano-sedimentarias del Mesozoico al Cenozoico, sobre una base de rocas metamórficas y sedimentarias del Proterozoico al Paleozoico.

La actividad magmática en la región está representada por múltiples intrusiones plutónicas de diferentes edades, las cuales afectaron e intruyeron las unidades presentes (Leal-Mejía et al., 2019). Durante este intervalo se depositaron unidades como la Formación Angostura del Río Lebrija y la Formación Jordán, las cuales están representadas en el mapa geológico de la zona de estudio (Figura 3).

A partir del Cretácico Temprano, la subsidencia diferencial asociada a una cuenca backarc permitió la acumulación de espesos paquetes de sedimentos marinos, conformando unidades como la Formación Rosa Blanca, la Formación Paja y la Formación Los Santos, que reflejan condiciones de plataforma carbonatada y mar profundo (Sarmiento-Rojas et al., 2006). Estas unidades en el

área de estudio se encuentran estructuralmente afectadas por fallas inversas y pliegues como el Anticlinal de los Yariguíes y el Sinclinal de Zapatoaca (Figura 3).

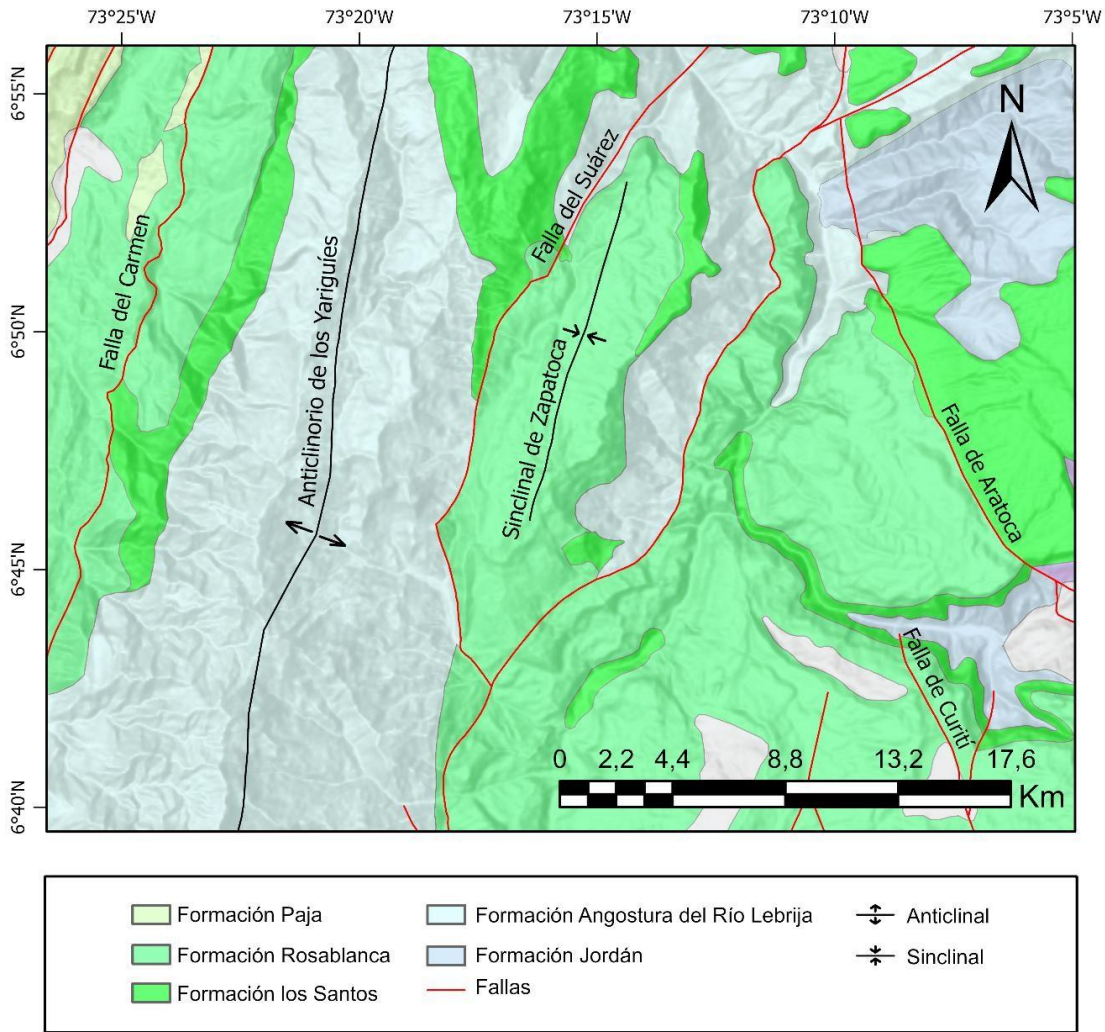
Según Mora-Páez et al. (2019), la subducción constante de la Placa Nazca induce un movimiento dextral en las fallas que limitan la Cordillera Oriental, lo que influye en la reactivación y evolución de estas estructuras. Adicionalmente, la interacción de la Placa Caribe ha contribuido al comportamiento de cizalla en la zona, afectando la deformación regional y la geometría de los pliegues (Restrepo-Moreno et al., 2019).

En contraste, durante el Cretácico Tardío, la subducción del océano Proto-Caribe bajo el margen noroccidental de Suramérica favoreció la instauración de un sistema de subducción continua (Sarmiento-Rojas et al., 2006).

A inicios del Paleoceno, se evidencia un régimen comprensivo (Gomez, et al., 2003). Durante este periodo, la Cordillera Oriental se definió como una cuenca segmentada y rellenada con depósitos synorogénicos (Bayona, et al., 2013; Parra, et al., 2012). Tiempo después, en el Oligoceno-Mioceno, inició la inversión tectónica que define la actual configuración de la Cordillera Oriental (Mora, et al., 2010).

Figura 3.

Mapa Geológico del área de estudio.



Nota: Sistema de referencia WGS84.

5.1.1 Estratigrafía regional

En el Anticlinorio de los Yariguíes aflora una sucesión de rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias, con edades que abarcan desde el Triásico hasta el Cretácico. Las unidades litoestratigráficas, presentes en el área de estudio y sus alrededores, se ilustran en la columna generalizada de la Figura 4.

A continuación, se describen las principales formaciones geológicas de la secuencia, desde las más antiguas hasta las más recientes.

Las rocas más antiguas de la sucesión corresponden a la Formación Bocas, la cual tiene una edad de Triásico Tardío según el contenido fósil (Alarcón et al., 2020). Esta unidad evidencia una sedimentación lacustre, acompañada de actividad volcánica sin-sedimentaria (Alarcón & Rodríguez, 2019), y está compuesta por una alternancia de lodolitas oscuras y areniscas gris verdosas, algunas ligeramente calcáreas, que se interestratifican con capas de lodolitas carbonosas y un nivel de calizas de color gris oscuro (Alarcón et al., 2020).

En contacto concordante, por encima de la Formación Bocas, se encuentra la Formación Jordán, caracterizada por la alternancia de limolitas y areniscas de grano fino a muy fino de tonalidad marrón rojiza, junto con una menor proporción de materiales volcanoclásticos (Alarcón et al., 2020). Esta unidad evidencia una sedimentación fluvio-lacustre en un ambiente continental (Alarcón & Rodríguez, 2019). La edad de la Formación Jordán, determinada por geocronología U/Pb en circones ígneos de una ignimbrita y una toba riolítica de la unidad, corresponde al Jurásico Temprano (Alarcón et al., 2020). Una discordancia angular regional de bajo ángulo separa esta unidad de los depósitos completamente continentales del suprayacente Grupo Girón (Alarcón et al., 2020).

El Grupo Girón, cuya edad abarca del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano (Etayo-Serna & Rodríguez, 1985), fue descrito inicialmente por Hettner (1892) como una mega secuencia aflorante al occidente de Bucaramanga. La sección tipo del Grupo Girón fue definida en el Río Lebrija por Langenheim (1959), este dividió el grupo en tres miembros: el inferior, de facies arenosas con un espesor de 750 m; el intermedio, dominado por facies lodosas con un espesor de 1.250 m; y el superior, también arenoso, con un espesor de 3.500 m. Cediél (1968) amplió su

descripción sobre el Grupo Girón, estableciendo que este comprende ocho secciones diferentes, de las cuales siete pertenecen al Grupo Girón y la última a la Formación los Santos.

La Formación Angostura del Río Lebrija, término propuesto por Etayo-Serna (1989), está compuesta por areniscas de grano medio a ligeramente conglomeráticas, de colores rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, con estructuras de estratificación cruzada, limolitas y lodolitas del Jurásico Tardío (Clavijo et al., 1993).

La Formación los Santos, definida por Etayo-Serna (1989), está compuesta por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo-grisáceas y cuarzo areniscas amarillentas con estratificación cruzada. Su geometría es tabular, con espesores variables según la ubicación. Las facies de la Formación los Santos se han interpretado como depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas (Laverde y Clavijo, 1985) o un depósito de tipo abanico aluvial (Martínez, 2008).

La edad del Grupo Girón corresponde al Berriasiano según Cediél (1968) y Etayo & Rodríguez (1985). Con base en el estudio de fósiles de restos vegetales y ostrácodos del género *Darwinula* se le asigna una edad correspondiente al Jurásico (Brueckner, 1954; Langenheim, 1960; Pons, 1982). Estudios de magnetoestratigrafía sugieren que la Formación Angostura del Río Lebrija se sitúa entre el Kimmeridgiano Temprano y Tithoniano Temprano, mientras que la Formación los Santos se considera entre Tithoniano Temprano y Valanginiano Temprano (146.5–139.3 Ma) (Jiménez et al., 2021). Finalmente, circones detríticos hallados en la formación producto de la erosión de las rocas plutónicas del Triásico, le asignan una edad máxima de deposición de 166 Ma que se puede ubicar en la época del Jurásico Medio (Horton et al., 2010).

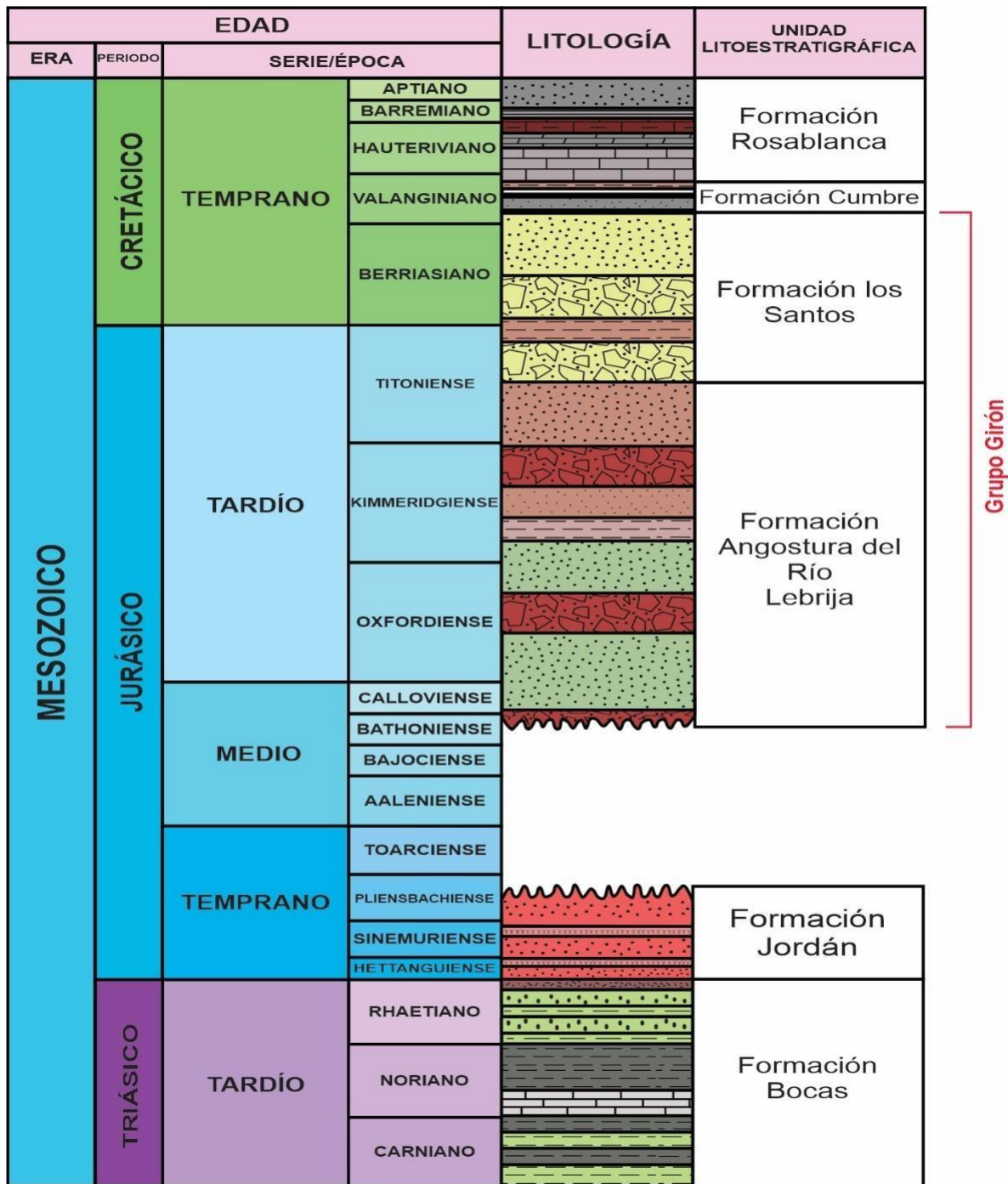
Sobre el Grupo Girón se encuentra la Formación Cumbre, una unidad nombrada por Renzoni (1981). Su litología está compuesta principalmente por areniscas grises de grano fino, intercaladas con lodolitas y arcillolitas en tonos blancos y negros, así como lodolitas rojas (Etayo-

Serna & Rodríguez, 1985). Estas características sugieren un ambiente marino con eventos transgresivos (Laverde & Clavijo, 1985).

La Formación Cumbre se encuentra en contacto transicional con la suprayacente Formación Rosa Blanca (Etayo-Serna & Ospitia, 2019). Esta unidad se compone de 5 miembros que de base a tope se disponen en Lagunetas, Carrizal, Zo, El Sapo, Zapatoca y son consecuencia de la depositación en un dominio marino paleo-Pacífico (Etayo-Serna & Ospitia, 2019). La Formación Rosa Blanca se ha interpretado como un ambiente marino somero, y según análisis de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), su edad se ha estimado entre el Valanginiano y el Aptiano Inferior (Rueda et al., 2013).

Figura 4.

Unidades estratigráficas presentes en la Zona de estudio y sus alrededores.



Nota: Adaptado de: (Etayo-Serna & Rodríguez, 1985; Alarcón & Rodríguez, 2019; Alarcón et al., 2020; Jiménez et al., 2021).

5.1.2 Geología estructural

La Cordillera Oriental de Colombia se divide en dos dominios estructurales principales: la subcuenca Tablazo-Magdalena y la subcuenca Cocuy, separadas por el macizo ígneo-metamórfico Santander-Floresta (Sarmiento-Rojas et al., 2006). La subcuenca Tablazo-Magdalena se caracteriza por una secuencia sedimentaria continua desde el Jurásico Medio hasta el Paleógeno, cuya evolución asimétrica estuvo controlada por fallas transtensionales, entre ellas el sistema de Fallas La Salina, que facilitó el desarrollo de estructuras como la Falla de Suárez (Sarmiento-Rojas et al., 2006). Por su parte, la subcuenca Cocuy presenta una evolución geológica influenciada por fallas extensionales y procesos de subsidencia durante el Mesozoico y Cenozoico (Jiménez et al., 2016).

En el área de estudio se identifican dos estructuras plegadas regionales de gran importancia: el Anticlinorio de los Yariguíes y el Sinclinal de Zapatoca. A continuación, se describen en detalle estas estructuras junto con las fallas principales que las limitan y controlan su deformación.

El Anticlinorio de los Yariguíes es una estructura plegada de la Cordillera Oriental, con orientación NNE-SSW. La evolución del Anticlinorio estuvo controlada por la inversión tectónica de fallas normales mesozoicas durante el Cenozoico (Jiménez et al., 2016). La estructura forma parte del bloque colgante de la Falla La Salina, una antigua estructura que, durante la etapa distensiva del Mesozoico, limitó hacia el occidente una cuenca tipo graben (Sánchez et al., 2012 en Cetina et al., 2019). Su núcleo está conformado por una secuencia tipo “red beds” de ambiente continental y edad Triásico-Jurásica, mientras que sus flancos presentan depósitos marinos a transicionales. La estructura es marcadamente asimétrica, con un plano axial que buza hacia el occidente con un ángulo entre 50° y 70°. El flanco occidental presenta inclinaciones de hasta 30°, mientras que el oriental puede alcanzar hasta 70°. En el cierre del anticlinal, los ángulos se

suavizan, llegando a valores entre 25° y 30° , conformando así su cabeceo (Mendoza, 1990). Este anticlinorio se encuentra limitado al norte por la Falla Bucaramanga, al este por la Falla Suárez y al oeste por un sistema de fallas inversas, entre ellas San Vicente, La Parroquia y Río Chucurí (Royero y Clavijo, 2001)

La Falla de Suárez es una estructura que sufrió inversión tectónica debido al cierre de la cuenca Tablazo-Magdalena y la deformación compresiva que afectó la Cordillera Oriental durante el Paleoceno (Sarmiento-Rojas et al., 2006). En la actualidad, la estructura corresponde a una falla inversa de alto ángulo con inversión tectónica, cuya orientación es aproximadamente N20E y su vergencia va hacia el oriente (Jiménez et al., 2016). La Falla de Suárez se extiende paralela al curso del río Suárez y parte del río Sogamoso (Julivert, 1958), y su tendencia es controlada por la Falla El Monje, una estructura transversal con movimiento normal aparente que segmentó la cuenca Tablazo-Magdalena y facilitó la subsidencia durante la sedimentación del Grupo Girón (Araque y Otero, 2016).

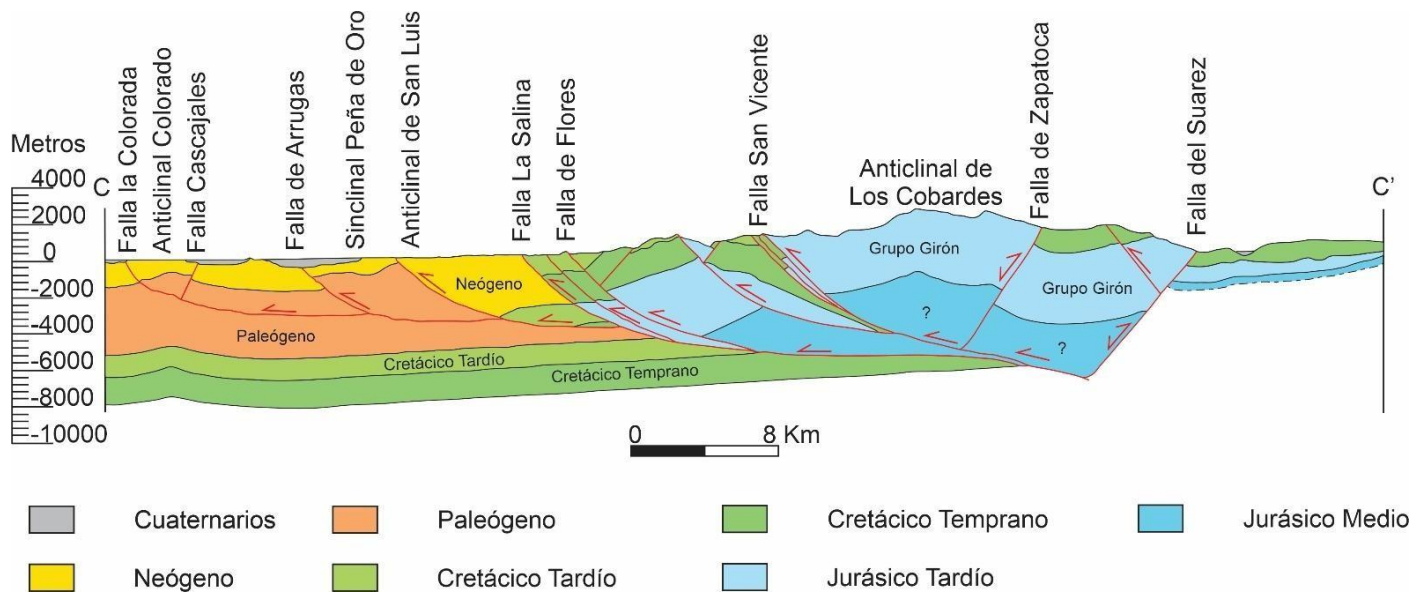
Otra estructura relevante es la Falla de Zapatoca, clasificada como una falla inversa de alto ángulo con inversión tectónica (Jiménez et al., 2016). Su actividad ha influido en la configuración estructural del área y en la deformación de las unidades sedimentarias que la rodean.

El Sinclinal de Zapatoca, en el flanco oriental del Anticlinorio de los Yariguíes, se encuentra en el muro colgante de la Falla Suárez y muestra variaciones en los ángulos de buzamiento debido a la compartimentación transversal (Flórez y Núñez, 2015). La estructura se alinea en dirección noreste-suroeste (NE-SW), en concordancia con otras estructuras tectónicas de los Andes Orientales. Su buzamiento varía entre 20° y 60° , con un plano axial ligeramente asimétrico (Gómez-Cruz et al., 2015).

A continuación, se presenta un corte geológico (Figura 5) donde se observan las principales estructuras tectónicas, como fallas inversas, anticlinales y sinclinales, que controlan la geometría y distribución de las unidades rocosas. Destacan la Falla del Suárez, la Falla de Zapatoca y el Anticlinal de Los Cobardes, las cuales han condicionado la arquitectura del sistema sedimentario y su evolución tectónica.

Figura 5.

Corte estructural donde muestra las estructuras regionales de Zapatoca.



Nota: Adaptado de: (Jimenez et al., 2016).

6. Metodología

6.1 Fase 1: Precampo - Recopilación bibliográfica

En esta primera fase del proyecto, se realizó una revisión bibliográfica de los documentos relacionados con aspectos geológicos del área de estudio como lo son tesis de pregrado, posgrado, libros y artículos que se hallaron en diferentes bases de datos como lo son la de la Universidad Industrial de Santander y la del Servicio Geológico Colombiano (SGC), con el rectificar la información existente sobre el tema a tratar, además, se consultan varios autores para seleccionar el mejor método de clasificación. A partir de la bibliografía se marcan puntos de interés.

6.2 Fase 2: Campo

En esta etapa se hará una recolección de datos para la realización de una poligonal, un mapa y una columna estratigráfica, junto con esto se sacarán muestras de estaciones seleccionadas previamente tomando en cuenta la revisión bibliográfica realizada.

Toma de datos para la construcción del mapa geológico: El trabajo de campo se realizó según la metodología propuesta por Etayo (1985), la cual fue diseñada para distinguir los rasgos y variaciones en los cuerpos de roca, así como su posición estratigráfica y la distribución de facies. Se comienza identificando y registrando afloramientos, posteriormente se establecen estaciones de campo y con el uso de brújulas geológicas se pasa a la toma de datos de rumbo y buzamiento de las capas, luego se hace una descripción de las características litológicas, fósiles y estructurales de los afloramientos observados. Finalmente, con la información recolectada se elabora el mapa geológico detallado con las unidades y estructuras representadas.

Medición de la columna: La elaboración de la columna estratigráfica se realizó con el método de poligonal abierta, este implica realizar una serie de mediciones en campo a lo largo de un perfil siguiendo el rumbo de las capas rocosas. Se inicia marcando un punto de referencia y,

con ayuda de una brújula geológica, se registran el rumbo y el buzamiento de las capas. Se mide la distancia entre puntos con una cinta métrica o jalones, anotando tanto las distancias horizontales como las inclinadas, y se construye una poligonal que representa los cambios en la orientación y la pendiente de las capas.

Descripción de facies sedimentarias: Se describieron las litofacies utilizando como guía la metodología propuesta por Miall (1996) para la clasificación de facies.

Muestreo de areniscas y conglomerados: Se seleccionan muestras representativas de la sección del camino de Lengerke en Zapatoca, las cuales fueron clasificadas según la propuesta de Folk (1980). El muestreo se realiza con los criterios de distribución estratigráfica de las unidades sedimentarias.

6.3 Fase 3: Procesamiento y análisis de datos

La metodología empleada para el procesamiento de los datos está basada en el enfoque propuesto por Dickinson, W. R. (1985), el cual es fundamentado en el análisis composicional cuantitativo de los modos detríticos de las muestras, a partir del cual es posible inferir el ambiente tectónico de la fuente de los sedimentos. Para ello se realizan los siguientes procedimientos:

Preparación de muestras: Su análisis se lleva a cabo mediante laminas delgadas. Estas se obtienen cortando y puliendo las muestras de roca hasta alcanzar un espesor uniforme de aproximadamente 30 micras. Para obtener un mejor análisis microscópico las muestras se prepararon usando una tinción de feldespatos.

Análisis petrográfico Areniscas: Se realiza mediante microscopía óptica de polarización. Se identifican y cuantifican los componentes detríticos de las muestras y se clasifican en sus tres categorías principales, Cuarzo (Q), Feldespatos (F), Fragmentos líticos (L). Para esto se utilizó una retícula con una distribución regular sobre cada lamina para así asegurar la cobertura uniforme de

toda la muestra. Para la clasificación se tomó como referencia a Folk (1980) y la guía de sedimentología de Cruz et al (2007).

Clasificación modal: Para cada muestra de areniscas se realiza el conteo de al menos 300 puntos individuales, siguiendo el método de Gazzi-Dickinson (Ingersoll et al., 1984) así se asegura una representación significativa de esta y se les da un porcentaje relativo a los tres componentes (Q, F, L), permitiendo obtener datos cuantitativos sobre la composición de la muestra.

- Cuarzo (Q): Incluye cuarzo monocristalino y policristalino
- Feldespato (F): Separados en plagioclasa y feldespato potásico
- Fragmentos de roca (L): Fragmentos líticos que incluyen: líticos volcánicos, metamórficos y sedimentarios.

También se toman registros de minerales accesorios como micas, sin embargo, estos no se incluyen para la construcción de los diagramas ternarios.

Análisis petrográfico Conglomerados: se realiza el conteo de 100 puntos individuales en la muestra, se asignan porcentajes a los tres componentes principales que son los líticos ígneos, los líticos sedimentarios y los líticos metamórficos, posteriormente los porcentajes se ubican en el diagrama ternario de Marsaglia e Ingersoll (1992).

Construcción de diagramas ternarios (QFL): Los datos obtenidos en los pasos anteriores se representan mediante diagramas ternarios, estos permiten visualizar las proporciones relativas de los componentes y proporcionar una base de interpretación sobre el origen tectónico de los sedimentos.

Interpretación de procedencia tectónica: Los resultados obtenidos se comparan con los campos tectónicos propuestos por Dickinson, Marsaglia e Ingersoll. A partir de esta comparación,

se infiere el ambiente tectónico de procedencia, estas categorías tectónicas que pueden identificarse son:

- Márgenes continentales activos: Regiones asociadas con subducción, vulcanismo y orogénesis.
- Márgenes continentales pasivos: Zonas de sedimentación estable, alejadas de actividad tectónica
- Cinturones orogénicos: Áreas asociadas con colisiones y placas y formación de montañas.

Validación de resultados: Los resultados se discuten con la información geológica regional disponible, modelos tectónicos propuestos para el área de estudio, permitiendo validar las interpretaciones realizadas.

6.4 Fase 4: Resultados

El informe final contará con la información obtenida en el estudio, incluyendo datos de campo, análisis de los productos y conclusiones sobre las facies sedimentarias y su ambiente de formación.

7. Resultados

7.1 Cartografía del área de Zapatoca

Se realizó la cartografía de la zona de estudio en un mapa escala 1:25.000 a partir de trabajo de campo, datos de estaciones georreferenciadas, datos estructurales y análisis de imágenes satelitales, esto permitió delimitar con mayor precisión las unidades sedimentarias y entender de mejor manera el contexto tectónico (Figura 6).

Se trata de un anticlinal tumbado, su influencia se observa en formaciones como la Formación Los Santos (JKls), cuya resistencia ha permitido la preservación de pliegues bien definidos, aunque con fracturación en sectores más afectados. La Formación Cumbre (Kic) y la Formación Rosa Blanca (Kir) también han sido deformadas, presentando inclinaciones variables en sus estratos. Los depósitos cuaternarios (Qd), aunque no han sido directamente plegados, han ajustado su distribución a la topografía generada por el anticlinal, influenciando la dinámica fluvial.

En el caso de la Formación Angostura del Río Lebrija (Jl), El Anticlinorio de los Yariguies a generando plegamiento, inclinación y reorientación de sus estratos debido a la compresión asociada a la fase Andina. La proximidad de esta unidad al núcleo de la estructura ha intensificado la fracturación, creando zonas de debilidad estructural que han facilitado procesos de erosión y alteración. Además, la interacción con estructuras como la Falla de Zapatoca ha contribuido al desplazamiento y segmentación de la formación, afectando la distribución y espesor de sus facies sedimentarias (Tucker, 2003).

La Falla de Zapatoca de tipo dextral, tiene una dirección predominante noreste-suroeste. Su impacto en las formaciones es evidente, especialmente en la deformación y desplazamiento de las unidades cretácicas. En su recorrido, la Falla de Zapatoca corta a la Formación Rosa Blanca

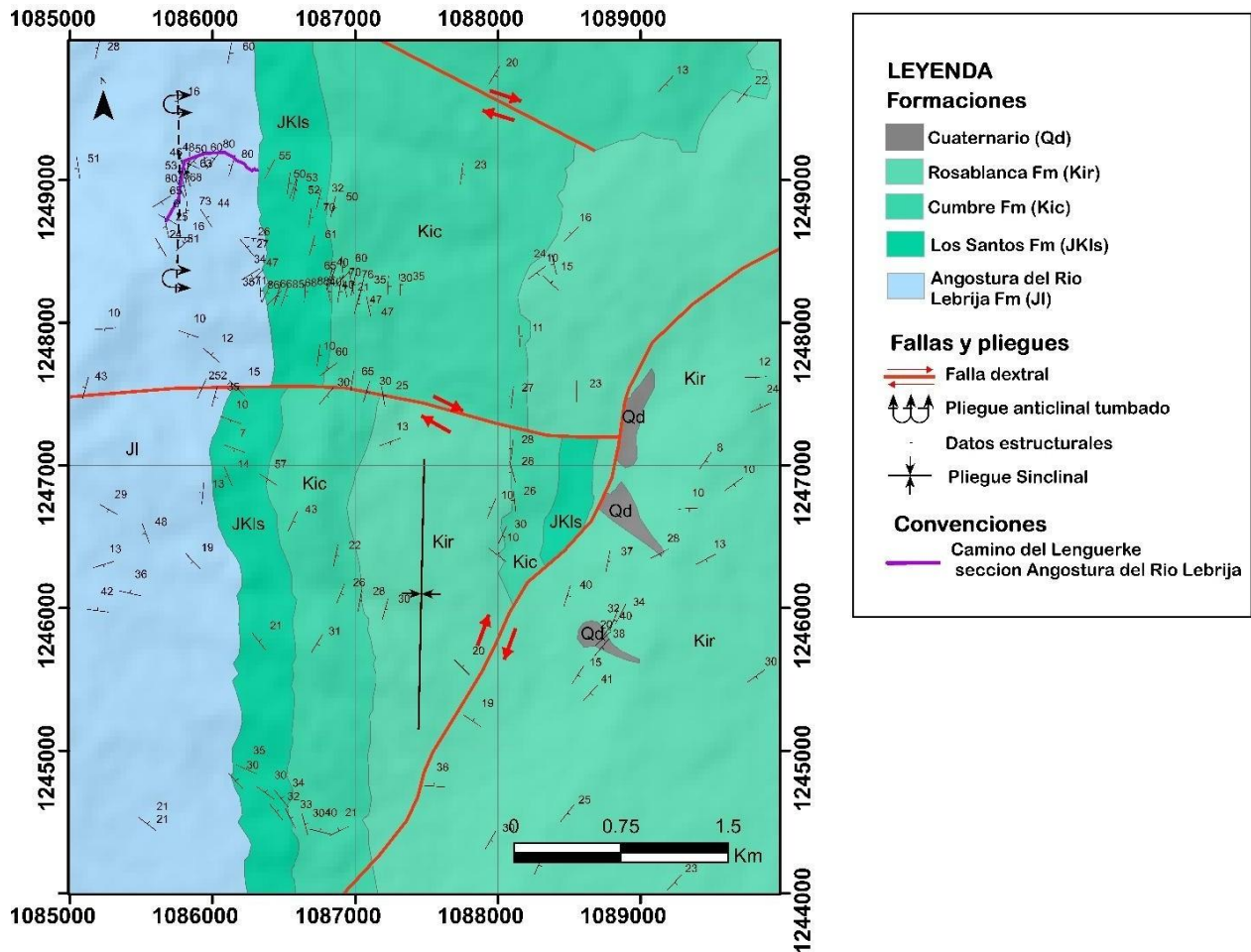
(Kir) y la Formación Cumbre (Kic), generando zonas de alta fracturación y posibles contactos abruptos entre unidades rocosas.

La Falla El Guayabo, una de las principales fallas de la región, es una falla de rumbo dextral que atraviesa el área en dirección noreste-suroeste. Esta falla afecta principalmente a la Formación Cumbre (Kic) y a la Formación Rosa Blanca (Kir), provocando fracturas y desplazamientos que pueden observarse (Figura 6).

En los sectores donde la Falla El Guayabo corta a la Formación Los Santos (JKls), se observa que esta unidad, compuesta principalmente por areniscas, ha experimentado deformaciones menores en comparación con las formaciones más ductiles, como las lutitas intercaladas en la Formación Cumbre.

Figura 6.

Mapa cartográfico 1:25.000 de la zona de estudio.



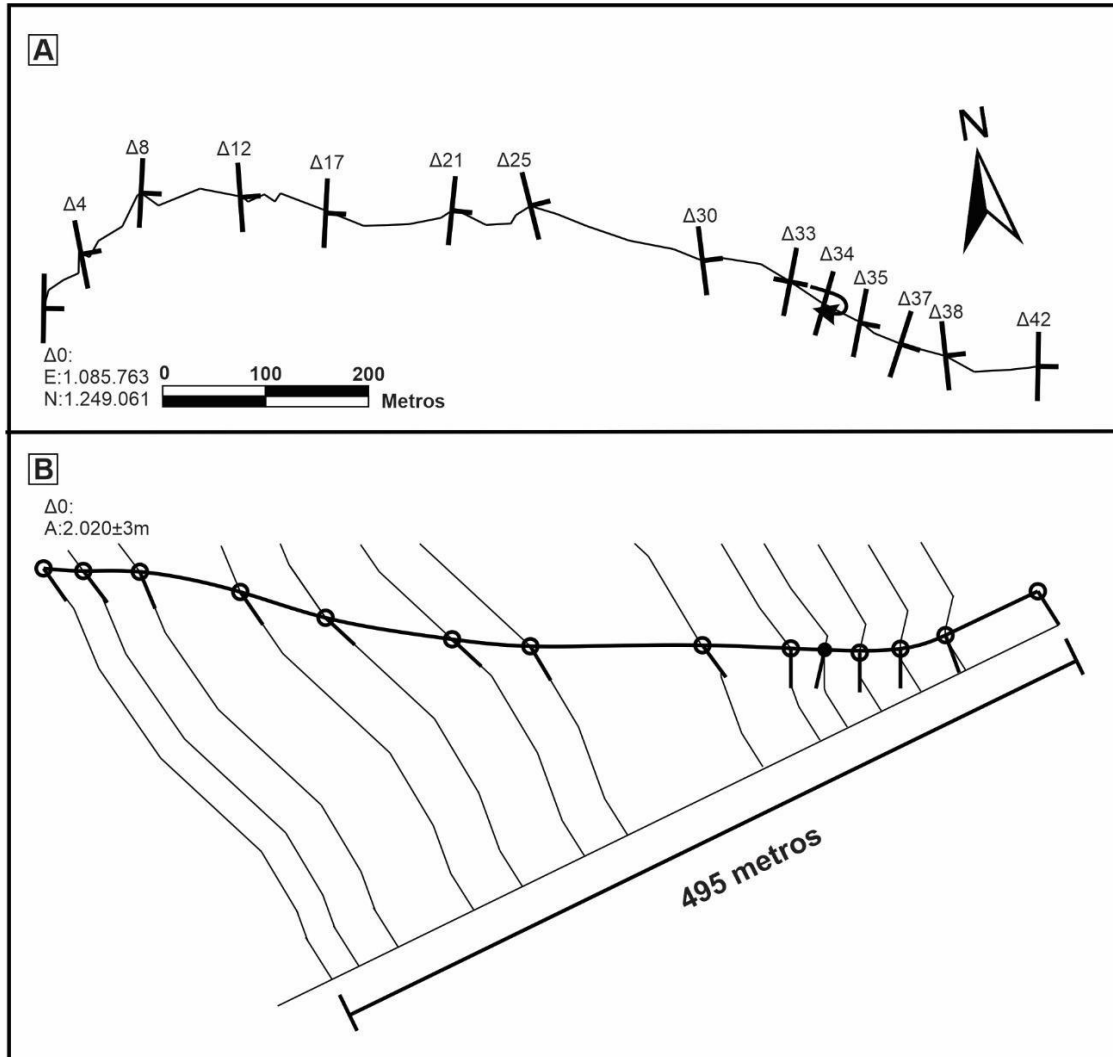
Nota: Sistema de referencia Magna-Sirgas origen Centro.

7.2 Estratigrafía del segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija.

Se trazó la poligonal para la sección estratigráfica del segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija, iniciando en la coordenada X: 6°50'52.76"N 73°17'54.40"O y finalizando en la coordenada X': 6°50'44.72"N 73°17'30.84"O. Se midieron un total de 42 deltas de poligonal que cubren una longitud de 849 metros en el terreno (Figura 7).

Figura 7.

Poligonal levantada en el segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija.



Nota: A) Vista en planta. B) Vista lateral.

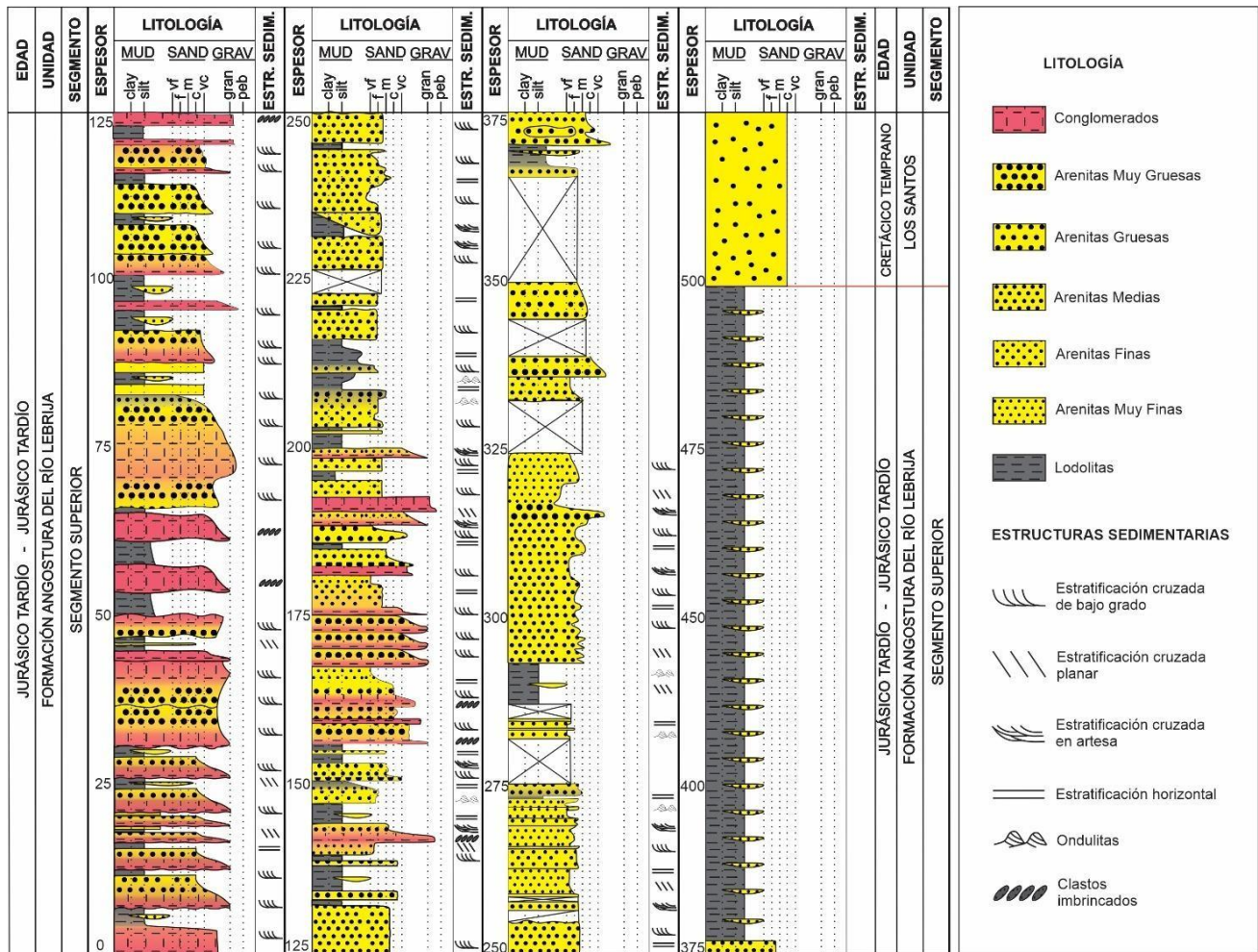
En esta sección se caracterizaron un total de 495 metros de espesor de columna estratigráfica de la Formación Angostura del Río Lebrija (Figura 8), la cual comprende una sucesión sedimentaria compuesta por capas de conglomerados rojizos, areniscas de grano fino a grueso y capas de lodolitas con lentes arenosos. El contacto de la Formación Angostura del Río Lebrija con la Formación Jordán se encontraba cubierto por la ubicación en la que se realizó el

bastoneo sobre la charnela del pliegue, mientras que el contacto de la Formación Angostura del Río Lebrija con la Formación los Santos se pudo visualizar y se tomo como un contacto de tipo Disconforme.

En la sucesión sedimentaria de la Formación Angostura del Río Lebrija, se identifican diversas estructuras sedimentarias asociadas a cada tipo de litología. En los conglomerados, predominan las estructuras de estratificación cruzada y gradación normal, en las areniscas se observan evidencias de estratificación cruzada planar y en artesa en su mayoría, y presencia de ondulitas y laminación plano-paralela en menor proporción. Por su parte, las lutitas se presentan de manera masiva, sin una clara estratificación interna.

Figura 8.

Columna estratigráfica generalizada del segmento superior de la Formación Angostura del Río Lebrija.



Nota: La columna muestra la distribución de las estructuras sedimentarias y las muestras recolectadas. Las muestras se nombraron según la altura estratigráfica.

7.3 Resumen petrografía de arenitas

En este trabajo se analizaron 10 secciones delgadas de la Formación Angostura del río Lebrija nombradas con el prefijo “B”, la altura estratigráfica en metros, y el sufijo “P”. La distribución estratigráfica de las muestras se ilustra en la sección estratigráfica levantada con

mayor detalle en el Apéndice A y los resultados de su clasificación petrográfica se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.

Porcentajes de cada muestra para clasificación.

Muestra	Qm	Qp	Qpt	Fk	Plag	Lp	Lv	Lm	Ls
B348P	134	42	5	20	14	12	3	10	79
B371P	195	34	7	13	15	10	-	8	32
B300P	168	37	3	4	11	9	2	7	68
B309P	180	17	3	10	32	6	3	7	42
B256P	138	43	4	16	30	11	1	4	53
B248P	210	29	1	11	27	5	-	2	15
B202P	203	40	-	12	6	4	3	2	30
B145P	199	33	2	2	10	8	2	5	38
B87P	252	23	1	-	5	4	-	2	13
B30P	253	35	-	3	1	1	-	2	7

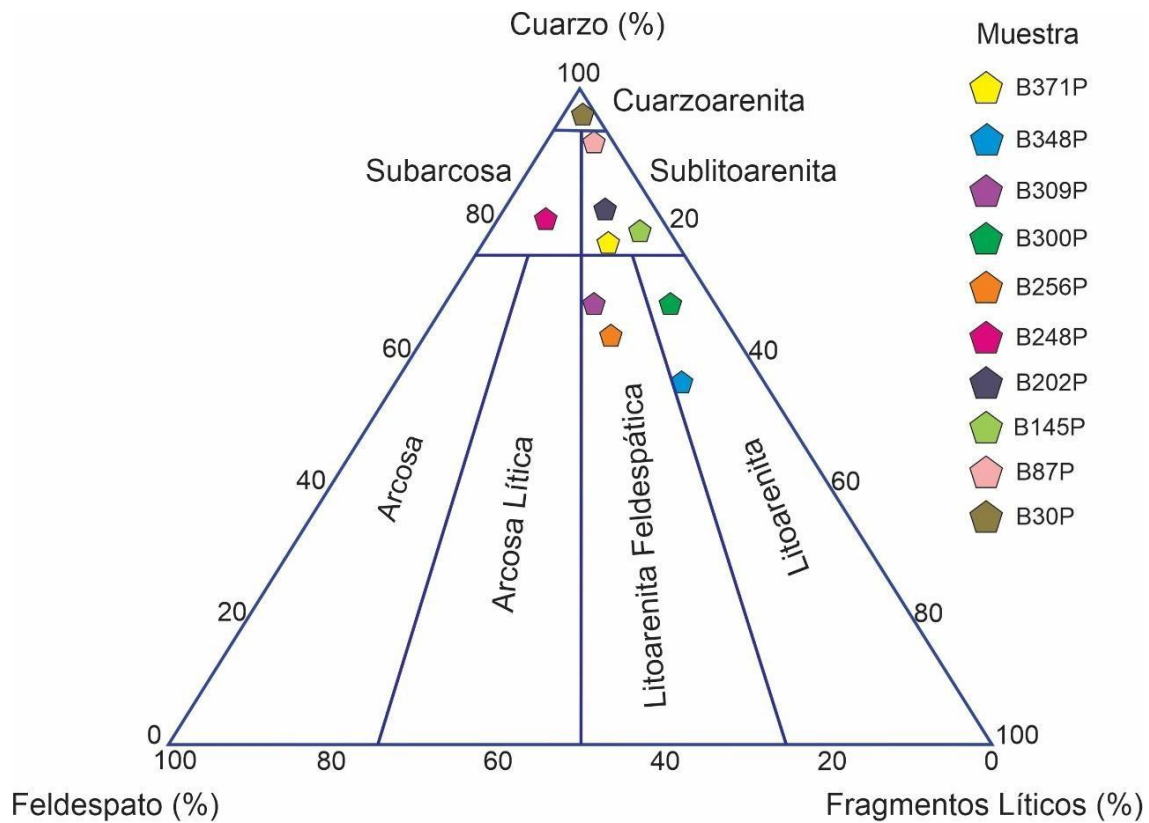
Nota. Esta tabla muestra el porcentaje correspondiente para cada muestra analizada aplicando el método de Folk y Dickinson de 300 puntos. La descripción petrográfica detallada de cada muestra se observa en el Apéndice B.

Los datos obtenidos en el análisis de las secciones delgadas se clasificaron en el diagrama triangular de folk (1974; Figura 9).

La ubicación de las muestras en el diagrama es congruente con los resultados previamente obtenidos con la cartografía y la columna estratigráfica.

Figura 9

.Clasificación composicional de las muestras de arenisca de la Formación Angostura del Río Lebrija.



Nota: Adaptado de: (Folk, 1974; Cruz et al 2007).

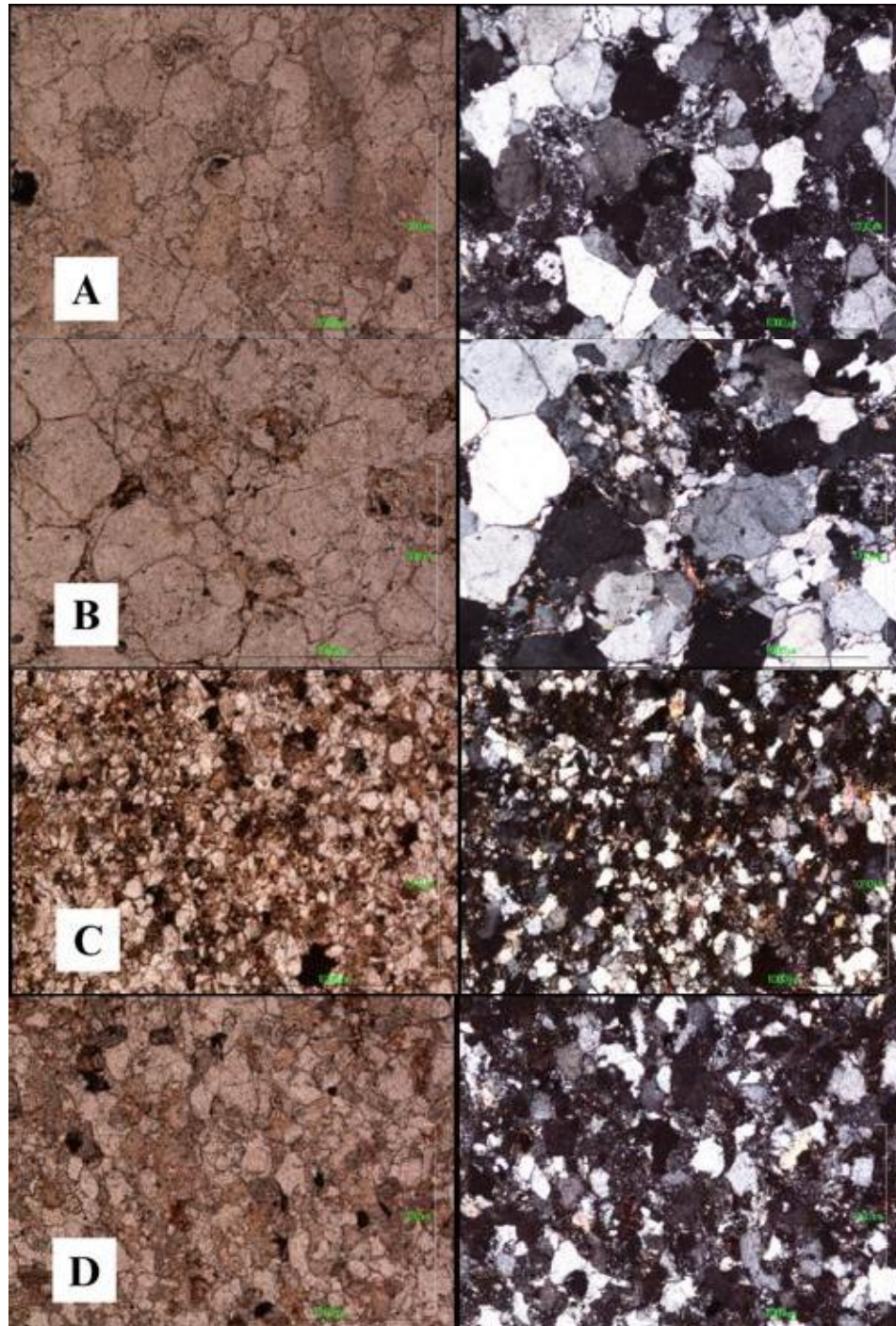
Los datos obtenidos por medio del análisis petrográfico, basado en la metodología de Cruz et al. (2007), y representados en el diagrama triangular de Folk (1974), muestran que la mayoría de las muestras se agrupan en los campos de las sublitoarenitas, litoarenitas y litoarenitas feldespáticas, mientras que una menor proporción se encuentra en los campos de las cuarzoarenitas y subarcosas. La muestra de cuarzoarenita se ubica hacia la base de la sección y las muestras de sublitoarenitas, litoarenitas, litoarenitas feldespáticas y subarcosa se ubican en la parte media.

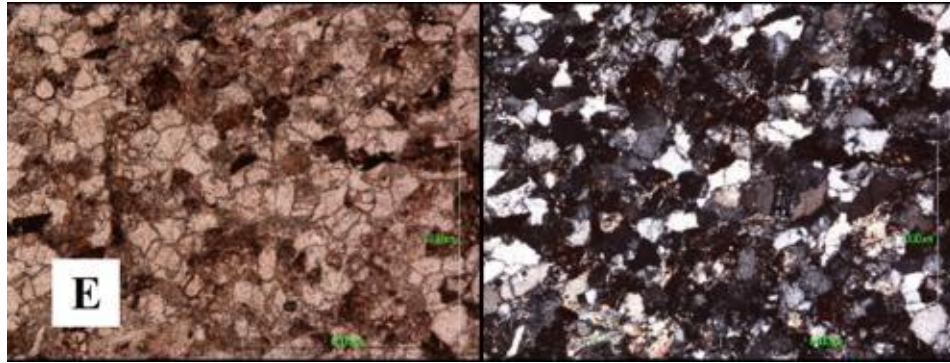
Las areniscas de la Formación Angostura del Río Lebrija presentan un tamaño de grano en su mayoría homogéneo, variando de grano medio a grueso. La selección oscila entre moderada y buena, con granos de morfología subangulosa a subredondeada. La matriz es escasa y de composición arcillosa en la mayoría de las muestras, lo que indica que son en su mayoría arenos soportadas. Composicionalmente en las muestras predominan los líticos sedimentarios, en específico los fragmentos de lodolitas y areniscas. También se identifican fragmentos de feldespato y plagioclasa, en menor cantidad, lo que sugiere un aporte polimíctico (Ver Figura 10 y Figura 11).

La presencia de cemento silíceo en ciertos sectores indica una fase de cementación secundaria que contribuye a la litificación de la roca. Además, hay evidencias de porosidad intergranular remanente, lo que sugiere que la compactación no ha sido completamente eficiente en todas las muestras. Se observan trazas de óxidos de hierro que impregnan la matriz y los contactos entre granos, lo que podría indicar una influencia oxidante en la diagénesis temprana (Ver Figura 10 y Figura 11).

Figura 10.

Foto de las secciones delgadas analizadas en nicols paralelos y cruzados.



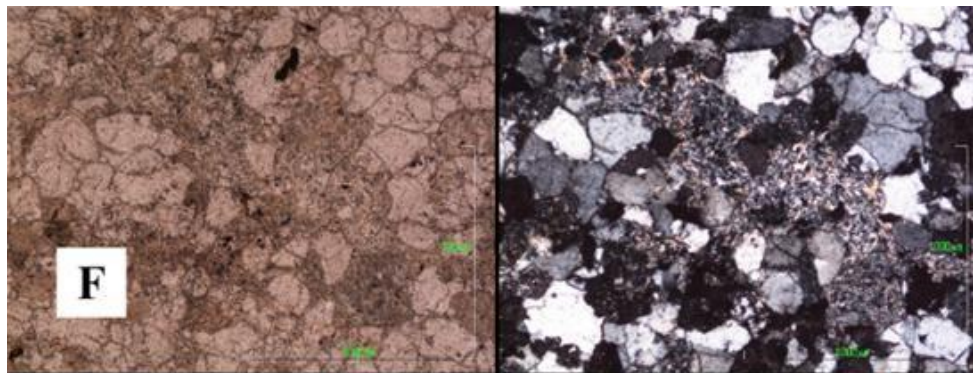


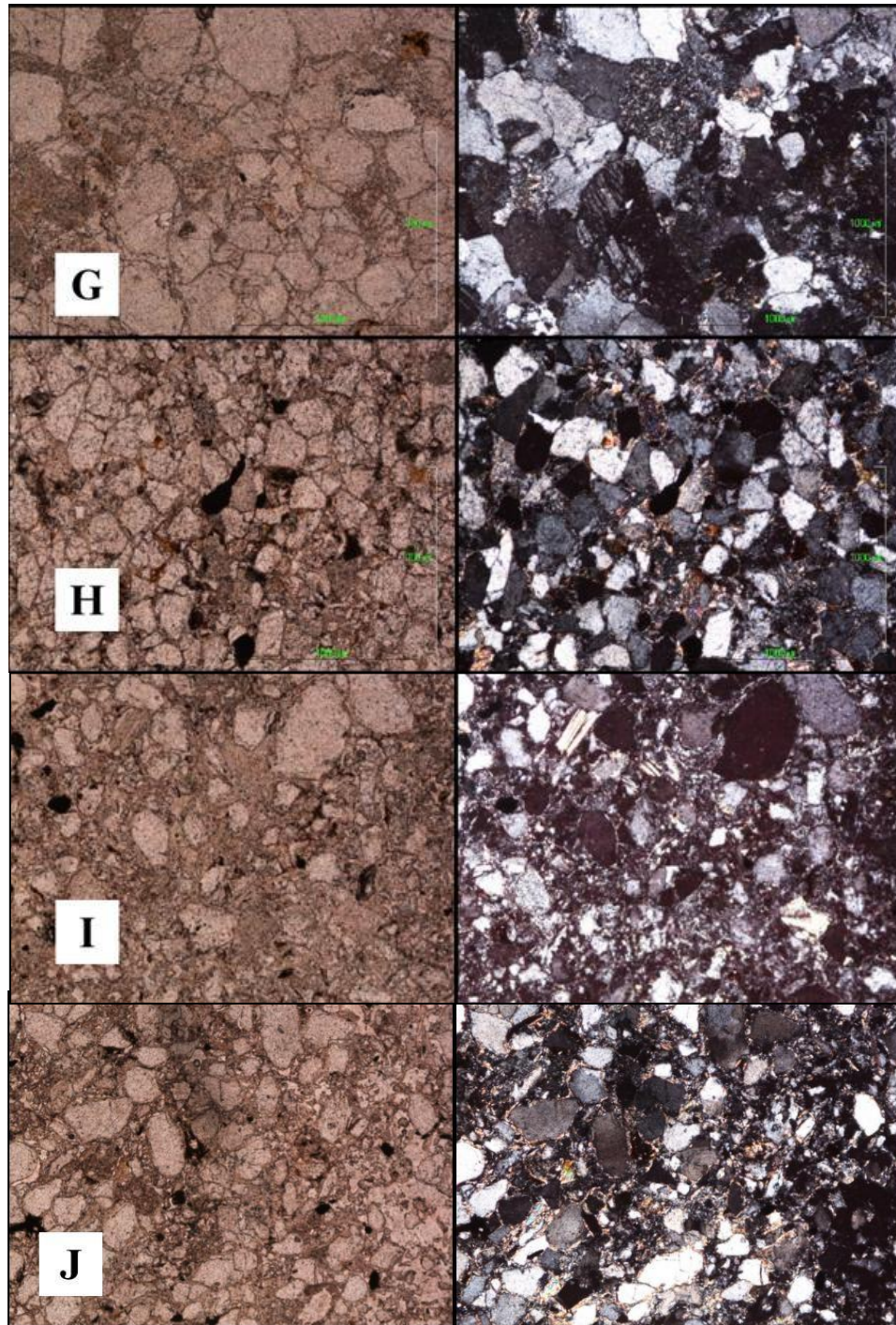
Nota: Columna izquierda en nicols paralelos y columna derecha en nicols cruzados. Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X. Todas las barras de escala representan 100 μ m.

A) B348P: Litoarenita con poca matriz. B) B371P: Sublitoarenita con líticos sedimentarios y poca matriz, se evidencian algunas muscovitas. C) B300P: Litoarenita con presencia de matriz compuesta por muscovita y opacos. D) B309P: Litoarenita feldespática con líticos sedimentarios y poca matriz. E) B256P: Litoarenita feldespática con líticos sedimentarios, minerales opacos, óxidos, muscovitas.

Figura 11.

Foto de las secciones delgadas analizadas en nicols paralelos y cruzados.





Nota: Columna izquierda en nicoles paralelos y columna derecha en nicoles cruzados. Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X. Todas las barras de escala representan 100 μm .

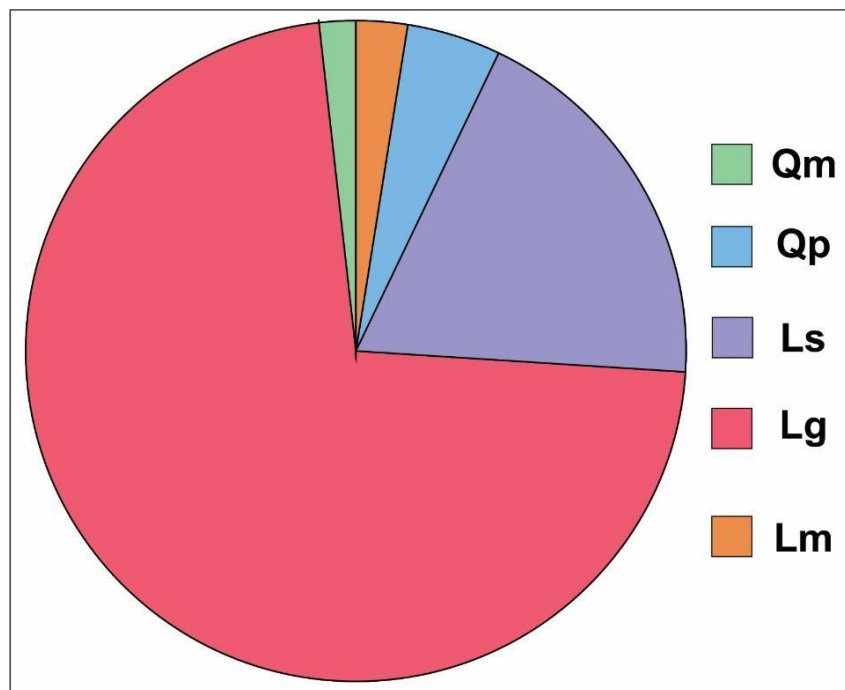
F) B248P: Subfeldarenita con poca matriz y líticos sedimentarios. G) B202P: Sublitoarenita con poca matriz. H) B145P: Sublitoarenita con presencia de muscovita y minerales opacos. I) B87P: Sublitoarenita con presencia de minerales opacos y matriz arcillosa. J) B30P: Cuarzoarenita con minerales opacos y matriz arcillosa con muscovita.

7.4 Petrografía de conglomerados

En este trabajo se realizaron 5 estaciones de conteo de clastos para las unidades de conglomerados que se encuentran en la Formación Angostura del Río Lebrija, nombradas con el prefijo “B”, la altura estratigráfica en metros, y el sufijo “C”. La distribución estratigráfica de las muestras se ilustra en la sección estratigráfica levantada con mayor detalle en el Apéndice A. Los resultados del conteo de clastos se establecen en la Figura 12.

Figura 12.

Conteo de clastos realizado para la Formación Angostura del Río Lebrija.



Nota: El diagrama muestra los resultados obtenidos en el conteo de clastos de las muestras de conglomerados en la Formación Angostura del Río Lebrija.

El primer nivel conglomerático que se encuentra en la base (Muestra B34C) presenta clastos con tamaños que varían entre guijas (4-16 mm) y gujarros (16-256 mm). Los clastos son subredondeados, lo que indica un grado intermedio de transporte, sugiriendo que han recorrido una distancia moderada desde su área de origen.

Composicionalmente, predominan los clastos líticos ígneos plutónicos, con una alta proporción de granitos (65 % del total), caracterizados por un elevado contenido de feldespato potásico y cuarzo. La abundancia de feldespatos bien preservados sugiere un bajo grado de meteorización química, lo que indica condiciones de transporte relativamente rápidas o ambientes con baja alteración química. En el nivel también se identificaron en menor proporción clastos de lodolitas oscuras y areniscas pardas en menor proporción. En conjunto, estos rasgos confirman que el depósito se formó en un sistema de transporte moderado, de igual manera indica que la unidad tuvo aporte de rocas del basamento cristalino y rocas sedimentarias que se encontraban expuestas a erosión.

El siguiente nivel conglomerático (Muestra B53C) mantiene el mismo tamaño de los clastos que varía entre guijas y gujarros, estos son subredondeados y composicionalmente presentaron un aumento de los clastos ígneos de granito, los cuales forman el 79% de los clastos totales, en menores proporciones hay clastos de cuarzo monocristalino, lodolitas y areniscas de grano fino, esto indica erosión y retrabajamiento de unidades sedimentarias previamente depositadas.

Posteriormente, se halla un nivel conglomerático (Muestra B106C) con clastos de tamaño entre guijas y gujarros, subredondeados. Composicionalmente los clastos de granito siguen en aumento llegando a constituir el 81 % de los clastos totales y presentan más contenido de

feldespato potásico, además el nivel posee clastos metamórficos de esquistos y areniscas foliadas y clastos sedimentarios de lodolitas.

Continuando con el siguiente nivel conglomerático (Muestra B133C) tenemos clastos de tamaño entre guijas y guijarros, subredondeados. En esta muestra los clastos de granito, aunque siguieron siendo los principales con un 73 % de la composición total, tuvieron una disminución en comparación con las muestras anteriores. La muestra presenta clastos metamórficos pertenecientes a cuarzos recristalizados y clastos sedimentarios de lodolitas y areniscas, la fuente de esta unidad corresponde a rocas ígneas y sedimentarias.

Finalmente, el ultimo nivel de conglomerado (Muestra B159C) presenta la textura más gruesa de los niveles estudiados, el tamaño de los fragmentos es de guijarros, los clastos de la muestra son subredondeados mostrando así su nivel moderado de transporte. En el nivel predominan los clastos de granito con un 80% de los clastos totales, en menor proporción hay clastos de lodolitas y areniscas.

7.5 Facies y Asociación facial

A partir de la columna estratigráfica elaborada para la Formación Angostura del Río Lebrija y del análisis textural y composicional de las muestras, se identificaron 13 litofacies para la Formación (Tabla 4).

Tabla 4.

Litofacies identificadas en la Formación Angostura del Río Lebrija.

Facies	Descripción de litofacies
Gmm	Conglomerado masivo, matriz-soportado, con textura que varía entre gránulos y guijarros, la morfología de las partículas es subredondeada. Los

Facies	Descripción de litofacies
	clastos no presentan orientación alguna y están compuestos principalmente por fragmentos líticos ígneos pertenecientes al granito.
Gh	Conglomerados clasto-soportados y muestran una imbricación de los clastos, la textura varía entre gránulos y guijarros. La morfología de los clastos es subredondeada, y el nivel presenta mala selección. Composicionalmente, las partículas de esta facies son líticos ígneos compuestos principalmente por granito. La capa de esta facie tiene un espesor de 1 m.
Gp	Conglomerados clasto-soportados con gradación normal, presenta estratificación cruzada planar. La morfología de los clastos es subredondeada y la selección es mala.
Gl	Conglomerados con estratificación cruzada de bajo grado, clastos subredondeados. Se encuentran compuestos de fragmentos líticos ígneos, principalmente por granito.
Sh	Areniscas de grano fino a conglomeráticas, presenta laminación horizontal paralela. Estas areniscas presentan alto contenido de cuarzo y bajo de feldespatos, su contacto es neto con las otras unidades.
Sm	Areniscas de grano fino a conglomeráticas, masivas. Composicionalmente tienen predominio de cuarzo y la textura de estos es subangulosa, su contacto con las otras unidades varía entre ondulado y neto.
Sp	Areniscas de grano fino a conglomeráticas con estratificación cruzada planar. Composicionalmente tienen alto contenido de cuarzo y un porcentaje no tan bajo de feldespatos. La textura de los clastos varía entre una subangular a una subredondeada. Su contacto con las otras unidades varía entre ondulado y neto.
Spp	Areniscas de grano fino a conglomeráticas con estratificación plano-paralela. Composicionalmente hay predominio de cuarzos, texturalmente los clastos son subredondeados a subangulosos. Su contacto con las otras unidades es neto.
St	Areniscas de grano fino a conglomeráticas con estratificación cruzada en artesa. Composicionalmente hay predominio de cuarzos, texturalmente los clastos son subredondeados. Su contacto con las otras unidades es neto.
Sr	Areniscas de grano fino a grueso con laminación cruzada u ondulas. Composicionalmente hay predominio de cuarzos, texturalmente los clastos son subredondeados. Su contacto con las otras unidades es ondulado.
Sl	Areniscas de grano muy fino a grueso con estratificación cruzada de bajo ángulo. Composicionalmente hay predominio de cuarzos, texturalmente los clastos son subredondeados. Su contacto con las otras unidades es ondulado.

Facies	Descripción de litofacies
Lm	Lodolitas masivas, se encuentran como lentes dentro de paquetes más grandes de Sp y Sm.
Lpp	Lodolitas con laminación fina

Las litofacies previamente descritas han sido agrupadas en 3 asociaciones de facies con base en sus características sedimentológicas y en su contexto deposicional. Estas asociaciones permiten interpretar los procesos geológicos involucrados en la formación de la secuencia estratigráfica y ayudan a definir los ambientes sedimentarios predominantes de la Formación Angostura del Río Lebrija.

A continuación, en la Tabla 5 se presenta una descripción de cada una de las asociaciones encontradas en la columna estratigráfica medida (Figura 13), su interpretación ambiental y su relación con los sistemas sedimentarios registrados.

Tabla 5.

Asociaciones de Litofacies de la Formación Angostura del Río Lebrija.

Facies	Asociación	Descripción	Interpretación y Ambiente sedimentario
Gmm Gh Gl Gp Sp Sr Sl Sm Sh Lm	1	Mezcla de sedimentos con mala selección, asociada a transporte en carga de fondo y procesos de tracción, lo que indica fluctuaciones en la energía del sistema (Miall, 2010; Nichols, 2009). Esta asociación va del metro 0 donde inicia la columna al metro 200.	Facies mixtas entre gravas, arenas y lodos producto de ambientes de transición entre canales de sistemas de canales trenzados y los sistemas de canales meandriformes.
Sl Sm Sp Spp Sr St Lm Lpp	2	Arenas con una selección moderada, asociadas a flujos de tracción, con transporte de suspensión. Los limos encontrados son de un flujo de baja energía (Miall, 2010). Esta asociación va del metro 200 donde al metro 378.	Ambientes de transporte de arena, ríos meándricos con dunas y ondulitas con episodios de decantación en llanuras de inundación y canales abandonados.
Lm Lpp Sm	3	Lodolitas con lentes de areniscas masivas, asociadas a procesos de decantación (Miall, 2010). Esta asociación va del metro 378 donde inicia la columna al metro 495.	Ambientes de baja energía, como pantanos, canales abandonados, y llanuras de inundación con episodios de decantación locales.

En la siguiente sección, se mostrará en la columna estratigráfica elaborada la distribución de las asociaciones faciales (Figura 13).

8. Discusión

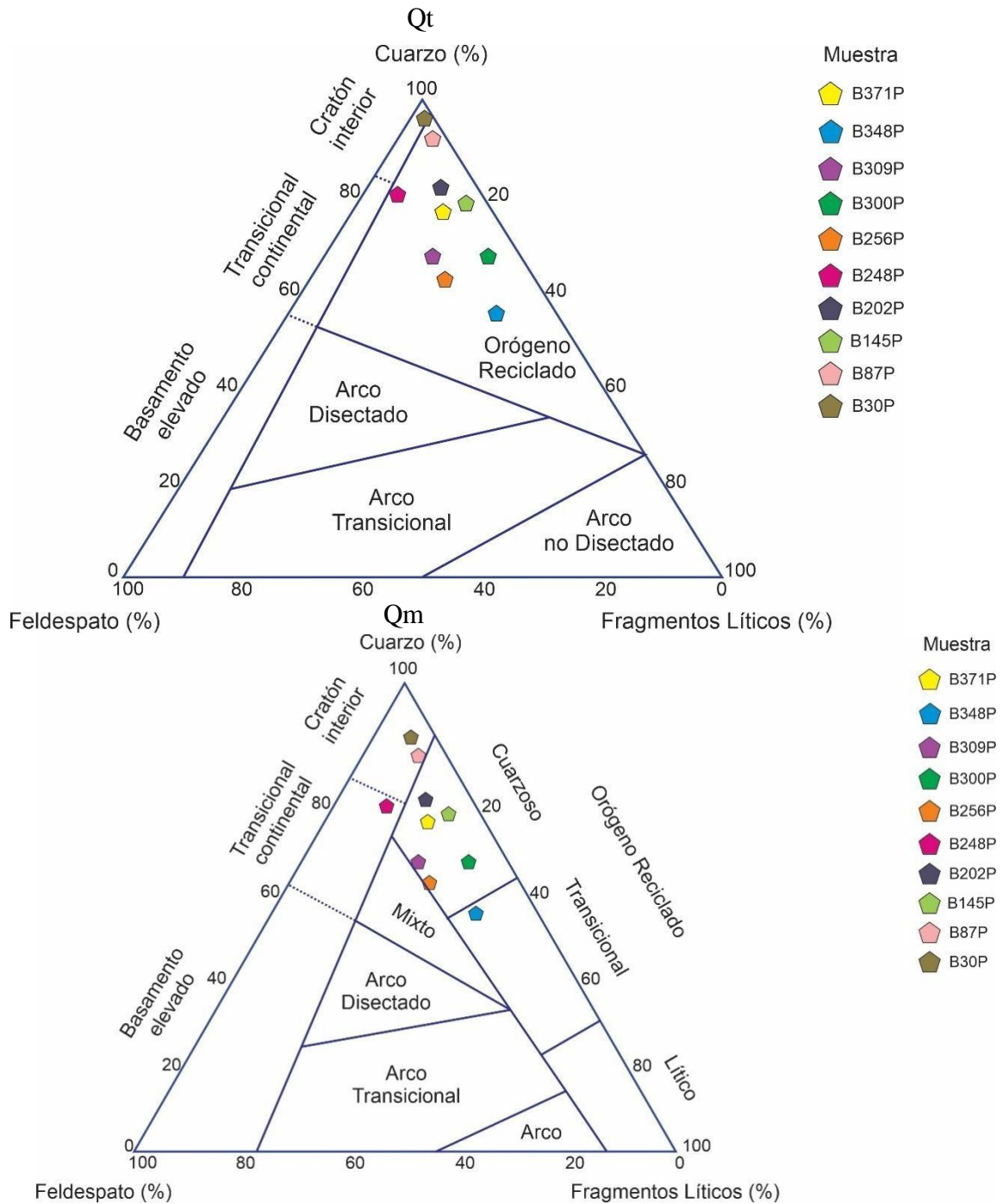
8.1 Procedencia Formación Angostura del Río Lebrija

La Formación Angostura del Río Lebrija se depositó en un sistema dinámico con un alto aporte de detritos derivados de rocas sedimentarias siliciclásticas e ígneas graníticas. Los sedimentos variaron de un tamaño de grano conglomerático a un tamaño de grano fino, con colores que oscilaban del rojo claro al rojo grisáceo a algunos tonos más pardos y grises, estos cambios texturales sugieren variaciones en las condiciones deposicionales de las rocas.

Composicionalmente las areniscas, muestran un predominio de cuarzo y de líticos sedimentarios, con bajos contenidos de feldespatos, líticos volcánicos y metamórficos, característicos de sistemas en los que los granos han experimentado múltiples ciclos de reciclado. La proyección de estos datos en el diagrama triangular QFL de Dickinson (1985; Figura 14), ubica las muestras de areniscas en el campo de orógeno reciclado. Esta clasificación sugiere un fuerte control tectónico en el ambiente, donde la exhumación y erosión de unidades preexistentes tuvo gran importancia.

Figura 14.

Clasificación de las areniscas de la Formación Angostura del Río Lebrija en el diagrama de proveniencia.

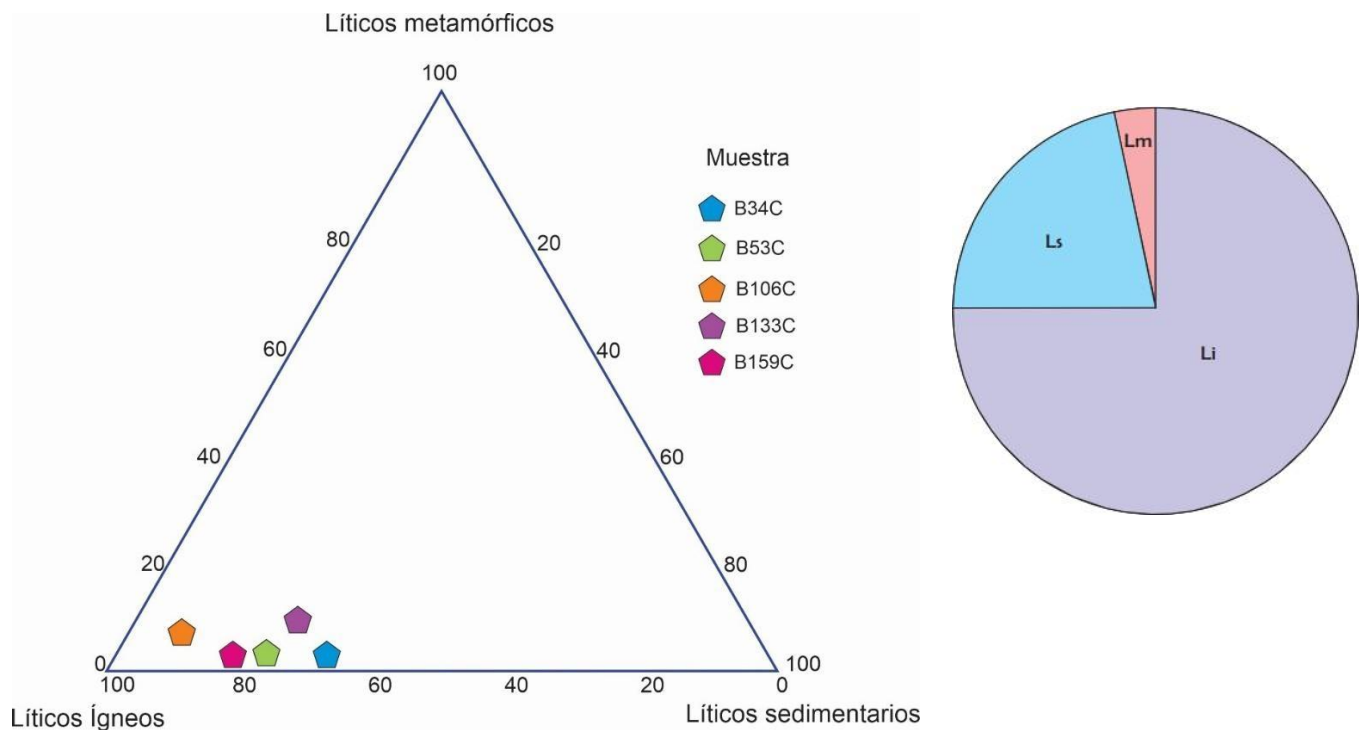


Nota: Adaptado de: (Dickinson, 1985)

El conteo de clastos realizado en los conglomerados muestra un predominio de fragmentos líticos ígneos de tipo plutónico, de textura granítica, con menor proporción de fragmentos sedimentarios y una escasa presencia de material metamórfico y volcánico. Estos datos se clasificaron en el diagrama triangular de Marsaglia and Ingersoll (1992; Figura 15), y sugieren que los conglomerados de la Formación Angostura del Río Lebrija tienen una mezcla de fuentes, la primera fuente es una de arco por los líticos volcánicos y la segunda es una de márgenes extensionales por los fragmentos sedimentarios y metamórficos. La presencia de clastos subangulosos a subredondeados y la selección media sugiere un transporte moderado en un sistema de alta energía. Estas características son coherentes con sistemas fluviales de carga mixta, como canales trenzados en entornos de cuenca Syn-Rift.

Figura 15

.Clasificación de los conglomerados de la Formación Angostura del Río Lebrija en el diagrama de proveniencia.



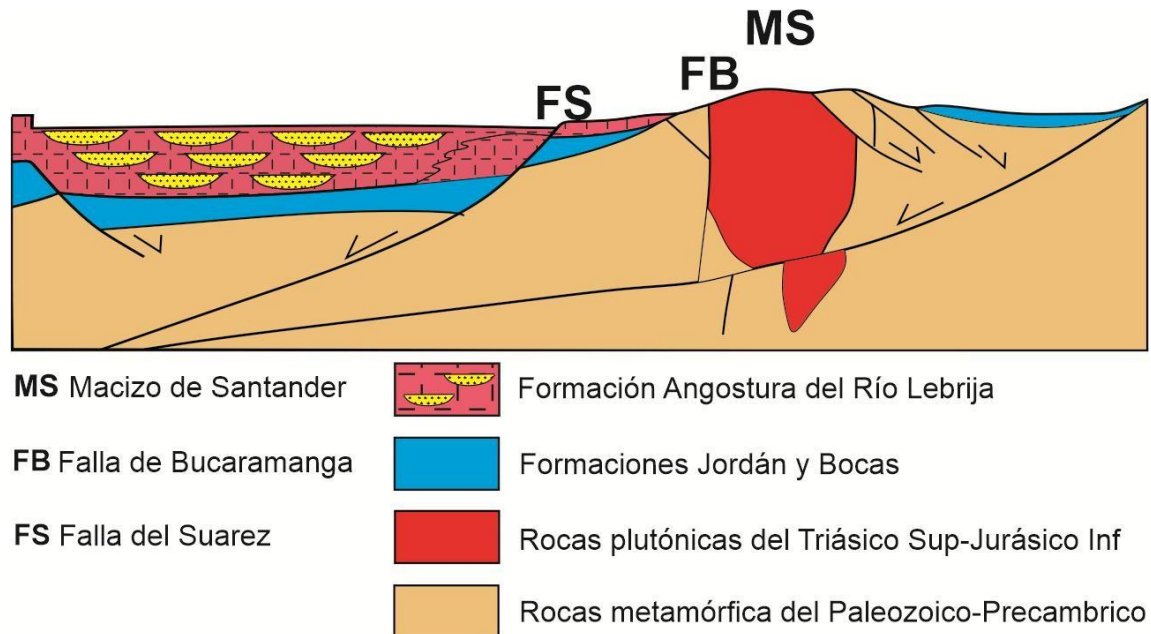
Nota: Modificado de: (Marsaglia and Ingersoll 1992). En la parte izquierda de la figura, se encuentra un diagrama de torta elaborado en Corel Draw que ilustra el promedio de cada tipo de lítico presente en las muestras analizadas.

Las características de los sedimentos analizados permiten asociar dos principales fuentes de aporte de detritos en la Formación Angostura del Río Lebrija: (1) Bloques de roca exhumados, compuestos por secuencias sedimentarias asociadas a las Formaciones Jordán y Bocas (Horton et al., 2010; Afanador & Velandia, 2021), y (2) rocas plutónicas y metamórficas que se relacionan con el Macizo de Santander (Horton et al., 2010; Afanador & Velandia, 2021).

Lo anterior apoya la hipótesis de Afanador & Velandia (2021), la cual propone que la Formación Angostura del Río Lebrija se depositó en una cuenca Syn-Rift (Figura 16) desarrollada bajo un régimen extensional durante el Jurásico tardío. Este contexto tectónico es consistente con la presencia de altos estructurales cercanos, que habrían actuado como áreas de aporte, fomentando la interacción entre la actividad tectónica y los procesos de sedimentación, generando variaciones en la arquitectura del sistema fluvial, cambios en la dinámica de erosión de la fuente, así como modificaciones en los patrones de transporte y acumulación, favoreciendo la migración de canales en depósitos de alta y baja energía.

Figura

16. Esquema de las condiciones deposicionales de la Formación Angostura del Río Lebrija durante el Jurásico Tardío.



Nota: Adaptado de: (Afanador & Velandia, 2021).

8.2 Interpretación del ambiente

Con base en las asociaciones faciales definidas en la columna estratigráfica de este estudio, se determinó que los sedimentos de la Formación Angostura del Río Lebrija fueron depositados en un ambiente continental de tipo fluvial. Las variaciones en las litofacies sugieren una evolución progresiva en las condiciones de depósito, evidenciando una transición entre sistemas fluviales. A partir del análisis de las asociaciones faciales, se identificó un cambio desde un sistema fluvial de alta energía con características de ríos trenzados, hacia un sistema meándrico bien desarrollado, para finalmente alcanzar condiciones de baja energía en ambientes de llanura de inundación y pantanos. Este patrón es característico de cuencas con evolución tectónica activa, donde la

subsistencia y las variaciones en el nivel base controlan la configuración de los sistemas fluviales (Miall, 2010).

La primera asociación facial se interpreta como depósitos fluviales de carga mixta, caracterizados por una sedimentación rápida y variaciones en la energía del flujo. Esto sugiere una transición entre sistemas trenzados, dominados por episodios de alta energía, y sistemas meándricos, asociados a condiciones de menor energía. Los ríos trenzados suelen desarrollarse en áreas de alta pendiente y con una alta carga de sedimentos gruesos, lo que genera barras longitudinales y depósitos conglomeráticos (Miall, 1977). En contraste, los sistemas meándricos se forman en áreas de menor pendiente, donde se favorece la migración lateral de los canales y la acumulación de depósitos en barras de punto y llanuras de inundación (Nichols, 2009).

Las características de esta primera asociación facial indican una alternancia entre transporte de carga de fondo (gravas y arenas) y carga en suspensión (lodos), lo que sugiere fluctuaciones en el caudal y una rápida migración de los canales (Miall, 2010). Mientras que los canales trenzados muestran una migración lateral acelerada, con erosión y redeposición de sedimentos en barras longitudinales, los canales meándricos presentan una migración más progresiva, con erosión en la parte externa de los meandros y sedimentación en la parte interna. La abundancia de clastos de granito y otros fragmentos líticos sugiere una fuente sedimentaria cercana, posiblemente relacionada con el Macizo de Santander y el Granito de Pescadero (Afanador & Velandia, 2021).

En la segunda asociación facial, los depósitos están dominados por arenas con estructuras de tracción como dunas y ondulitas, lo que indica un predominio de canales meándricos. Estos sistemas fluviales estuvieron marcados por episodios de migración lateral y la formación de barras de punto, con una sedimentación controlada por variaciones en el caudal y la pendiente del sistema (Bridge & Lunt, 2006). La presencia de depósitos de llanura de inundación y rellenos de canales

abandonados sugiere periodos de relativa estabilidad hídrica, intercalados con eventos de alta energía.

Finalmente, la última asociación facial refleja un ambiente de baja energía, caracterizado por depósitos de llanuras de inundación, canales abandonados y pantanos. Estas facies están compuestas principalmente por lodolitas, lo que indica condiciones de sedimentación más estables, con eventos esporádicos de inundación y decantación (Nichols, 2009).

Teniendo en cuenta lo anterior, la transición desde depósitos de alta energía en la base hacia depósitos de baja energía en la parte superior de la sucesión sugiere una evolución progresiva del sistema fluvial, el cual inicia con la acción de ríos entrelazados cerca de un frente montañoso (Cediel, 1968) y va hacia condiciones de menor pendiente y mayor estabilidad del sistema deposicional.

El sistema de la cuenca muestra un patrón de acumulación progradacional en la base, donde las litofacies mixtas indican un ambiente dinámico de alta energía. Posteriormente, se evidencia una pérdida progresiva de energía en el sistema, lo que marca la transición a un patrón de acumulación agradacional, caracterizado por la presencia de estructuras sedimentarias como dunas y ondulitas, que indican un balance entre sedimentación y subsidencia. Finalmente, el último cambio litofacial refleja una disminución marcada en la energía del sistema, asociada a un patrón de acumulación retrogradacional, donde predominan materiales más finos y condiciones de sedimentación más estables.

La interpretación ambiental propuesta en este estudio refuerza la hipótesis planteada por Afanador & Velandia (2021) para la Formación Angostura del Río Lebrija, según la cual este intervalo sedimentario fue depositado en un sistema continental fluvial dinámico.

La interacción entre procesos de alta y baja energía generó una sucesión sedimentaria variada que tiene diferentes sub-ambientes. La sección Angostura del Río Lebrija está controlada por la tectónica y la evolución de la cuenca syn-rift. Esta interpretación concuerda con modelos de sedimentación en cuencas extensionales, donde la combinación de subsidencia diferencial, aporte sedimentario y variaciones climáticas da lugar a sistemas fluviales complejos, con alternancia de ríos trenzados, meándricos y depósitos de llanura de inundación (Miall, 2010).

9. Conclusiones

El análisis cartográfico del Anticlinorio de los Yariguíes, refleja su origen como resultado de intensas presiones que plegaron y deformaron las rocas. Algunas formaciones, como Los Santos, han resistido mejor estos cambios debido a su composición más dura, mientras que otras, como la Cumbre y la Rosa Blanca, han sufrido fracturas e inclinaciones más marcadas, la proximidad de la Falla de Zapatoca ha influido en la orientación y erosión de la Formación Angostura del Río Lebrija, facilitando procesos de alteración diferencial. La actividad tectónica no solo ha reconfigurado la estructura de las unidades rocosas, sino que también ha condicionado la dinámica fluvial y la distribución de los depósitos cuaternarios, evidenciando la fuerte relación entre la tectónica y la evolución geomorfológica.

El análisis estratigráfico de la Formación Angostura del Río Lebrija revela un sistema fluvial dinámico con una transición progresiva de ambientes de alta a baja energía. En los niveles inferiores de la sucesión cuenta con un espesor de 200m, la predominancia de conglomerados y areniscas gruesas indica un sistema de ríos trezados, caracterizado por corrientes de alta energía y transporte rápido de sedimentos. A medida que el sistema evoluciona, la abundancia de areniscas en la parte media de la secuencia señala la transición hacia un régimen de energía media, dominado por ríos meándricos, contando con un espesor 178m, donde se desarrollan estructuras sedimentarias como laminación cruzada y ondulitas, reflejando una disminución progresiva de la pendiente y la energía fluvial. Finalmente, en los niveles superiores, el sistema migra hacia un ambiente de baja energía, representado por llanuras de inundación y depósitos de lodolitas, definido en un espesor de 117m asociados a procesos de decantación fina en ambientes como canales abandonados y pantanos.

El análisis de facies refuerza esta transición vertical en los ambientes de depósito. En la base, las facies conglomeráticas y arenosas corresponden a canales de ríos trenzados con depósitos mal seleccionados y evidencias de transporte turbulento. En la parte media, las areniscas mejor seleccionadas reflejan condiciones propias de sistemas meándricos, con estructuras sedimentarias que indican una reducción en la energía del flujo. Finalmente, en la parte superior, la predominancia de lodolitas confirma el desarrollo de un ambiente de baja energía, donde los procesos de sedimentación son dominados por la decantación y la acumulación progresiva de material fino. Se encontraron niveles bajos de feldespatos debido a la diagénesis, lo que sugiere procesos de disolución y alteración mineral durante la compactación y la evolución diagenética de los sedimentos. Esta evolución estratigráfica estuvo controlada por la interacción entre la tectónica activa de la cuenca, la subsidencia y el aporte sedimentario, dejando un registro clave de los procesos geológicos del Jurásico tardío.

Por otro lado, el análisis de procedencia de los clastos permite identificar dos principales fuentes de aporte: una sedimentaria, derivada de las Formaciones Bocas y Jordán, y otra ígnea metamórfica, proveniente de las rocas del Macizo de Santander. Los niveles arenosos presentan un mayor aporte de material sedimentario, mientras que los conglomeráticos muestran una contribución significativa de fragmentos ígneos graníticos procedentes del Granito de Pescadero. Estos resultados, respaldados por el diagrama de procedencia de Dickinson (1985), ya que ubican a la Formación Angostura del Rio Lebrija dentro del campo de los orógenos reciclados, lo que sugiere que los sedimentos fueron transportados desde unidades exhumadas cercanas en un contexto de cuenca extensional activa (syn-rift).

10. Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis de paleo corrientes para tener una reconstrucción más detallada de las direcciones del transporte de sedimentos lo que es fundamental para la evolución geológica de la zona.

También se recomienda el uso de técnicas como sísmica de refracción y tomografía de resistividad eléctrica permitiría complementar la información sobre la estructura interna de la formación y su relación con las principales fallas.

Por último, se recomienda replicar este estudio en otras formaciones geológicas presentes en la zona, permitiendo ampliar el conocimiento sobre la evolución geológica local, estableciendo comparaciones y correlaciones entre diferentes unidades litoestratigráficas.

11. Referencias Bibliográficas

- Afanador, D. O., & Velandia, F. (2021). Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia. *Andean Geology*, 48(2), 237–266. <https://doi.org/10.5027/andgeoV48n2-3271>
- Alarcón, C. M., Clavijo-Torres, J., Mantilla-Figueroa, L. C., & Rodríguez, J. G. (2020). Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (Cordillera Oriental Colombia). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 1137–1151.
- Alarcón, C. M., & Rodríguez, J. G. (2019). *Estratigrafía, facies y paleoambiente de sedimentación de la Formación Jordán: un registro fluvio-lacustre con incidencia de actividad volcánica*. Universidad Industrial de Santander.
- Araque, G. C. N., & Otero, R. J. L. (2016). *Zonas transversales y su relación con estructuras regionales, flanco W–Cordillera Oriental*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G., & Salazar–Franco, A. M. (2020). Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. In J. Gómez & A. O. Pinilla–Pachon (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic* (Vol. 36, pp. 171–207). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.05>
- Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., Lamus-Ochoa, F., Montenegro, O., Jimenez, G., Mesa, A., & Valencia, A. (2013). Onset of fault

- reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos basin; response to Caribbean—South American collision in early Palaeogene time. In M. Nemčok, A. R. Mora, & J. W. Cosgrove (Eds.), *Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion* (Vol. 377). Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/SP377.5>
- Boggs, S. (2011). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* (5th ed.). Pearson.
- Bridge, J. S., & Lunt, I. A. (2006). Depositional models of braided rivers. In J. L. Best & C. S. Bristow (Eds.), *Fluvial Sedimentology VII* (Vol. 36, pp. 11–50). Blackwell Publishing.
- Brueckner, W. D. (1954). Note on some fossils from the Girón group in the Río Lebrija valley, department of Santander, Colombia. *Journal of Paleontology*, 28(1), 112–113.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 16(1–3), 5–96.
- Cediel, F. (2019). Phanerozoic Orogens of Northwestern South America: Cordilleran-Type Orogens. Taphrogenic Tectonics. The Maracaibo Orogenic Float. The Chocó–Panamá Indenter: The Pacific–Caribbean–Andean Junction. In *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 3–95). Springer.
- Cetina, L. M., Velandia, F., & Patiño-Sanabria, H. A. (2019). Análisis de deformación al occidente del Anticlinorio de Los Yariquíes - Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 41(3), 31–56. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019002>
- Clavijo, J., & others. (1993). *Contribución al conocimiento de la geología de los Santanderes* (p. 99).
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, S. H., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., & 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.
- Cruz, L., & Caballero, V. (2007). *Guía de laboratorio de sedimentología para geólogos*.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., & Kluth, C. F. (2011). *Structural Geology of Rocks and Regions* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Dickey, P. A. (1941). Pre-Cretaceous sediments in Cordillera Oriental of Colombia. *AAPG Bulletin*, 25(9), 1789–1795. <https://doi.org/10.1306/3D9333EC-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Dickinson, A. (1985). Actions and habits: the development of behavioural autonomy. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 308(1135), 67–78.
- Dickinson, W. R. (1970). Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40(3), 695–707. <https://doi.org/10.1306/74D72167-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Dickinson, W. R., & Suczek, C. A. (1979). Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bulletin*, 63(12), 2164–2182.
- Etayo-Serna, F. (1989). *Análisis facial del inicio del avance marino del Cretácico en la región SW del Macizo de Santander* (p. 7).
- Etayo-Serna, F., & Ospitia, G. G. (2019). Formación Rosa Blanca: subdivisión de la Formación y propuesta de Neoestratotipo. Sección laguna El Sapo, vereda El Carrizal, municipio de Zapatoca, departamento de Santander. In F. Etayo-Serna (Ed.), *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio*

del Magdalena. Servicio Geológico Colombiano.

<https://doi.org/https://doi.org/10.32685/9789585231788-1>

Etayo-Serna, F., & Rodríguez, G. (1985). Edad de la Formación Los Santos. In F. Etayo-Serna & F. Laverde-Montaña (Eds.), *Proyecto Cretácico* (Issue 16, pp. XXVI–1–XXVI–13). INGEOMINAS.

Flórez, S., & Núñez, A. (2015). *Análisis cinemático y estilo estructural de la Falla del Suárez entre El Hato y La Fuente, Santander*. Universidad Industrial de Santander.

Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.

Folk, R. L., & Siedlecka, A. (1974). The “schizohaline” environment: its sedimentary and diagenetic fabrics as exemplified by Late Paleozoic rocks of Bear Island, Svalbard. *Sedimentary Geology*, *11*(1), 1–15.

Gazzi, P. (1966). Le arenarie del flysch sopracretaceo dell’Appennino modenese: correlazioni con il flysch di Monghidero. *Mineralogica et Petrographica Acta*, *12*, 69–97.

Gomez, E., Jordan, T., Almandiger, R., Hegarty, K., Kelly, S., & Heizler, M. (2003). Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, *115*, 131–147.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)115<0131:COAOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)115<0131:COAOTL>2.0.CO;2)

Gómez, J., & Pinilla-Pachón, A. O. (2019). *Geología de Colombia, Volumen 1-3*. Servicio Geológico Colombiano.

Gómez-Cruz, A. J., Bermúdez, H. D., & Vega, F. J. (2015). A new species of *Diaulax* Bell, 1863 (Brachyura: Dialucidae) in the Early Cretaceous of the Rosablanca Formation, Colombia. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, *67*(1), 103–112.
<https://doi.org/10.18268/BSGM2015v67n1a8>

Hettner, A. (1892). *Die Kordillere von Bogotá*.

Horton, B. K. (2018). Tectonic regimes of the central and southern Andes: Responses to variations in plate coupling during subduction. *Tectonics*, 37(2), 402–429.

Horton, B. K., Anderson, V. J., Caballero, V., Saylor, J. E., Nie, J., Parra, M., & Mora, A. (2015). Application of detrital zircon U–Pb geochronology to surface and subsurface correlations of provenance, paleodrainage, and tectonics of the Middle Magdalena Valley Basin of Colombia. *Geosphere*, 11(6), 1790–1811. <https://doi.org/10.1130/GES01251.1>

Horton, B. K., Saylor, J. E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., & Stockli, D. F. (2010). Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U–Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 122(9–10), 1423–1442. <https://doi.org/10.1130/B30118.1>

IGAC. (1996). *Diccionario Geográfico de Colombia* (Vol. 3). Horizontes Impresores Ltda.

Ingersoll, R. V., Bullard, T. F., Ford, R. L., Grimm, J. P., Pickle, J. D., & Sares, S. W. (1984). The Effect of Grain Size on Detrital Modes: A Test of the Gazzi-Dickinson Point-Counting Method. *Journal of Sedimentary Research*, 54. <https://doi.org/10.1306/212F83B9-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Jaramillo Minorta, D. F., Barba Gonzales, K. J., Rojas Martínez, E. E., García González, J., Manco Jaraba, D. C., & Lascarro Navarro, F. D. (2023). Modelo sedimentario-deposicional de la Formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 23(2). <https://doi.org/10.19053/1900771X.v23.n2.2023.16147>

- Jiménez, G., & García, C. A. (2023). Mineralogía magnética en rocas del Jurásico de la Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 45(2), 35–49. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n2-2023002>
- Jiménez, G., García-Delgado, H., & Geissman, J. W. (2021). Magnetostratigraphy and magnetic properties of the Jurassic to Lower Cretaceous Girón Group (northern Andes, Colombia). *Geosphere*, 17(6), 2172–2196. <https://doi.org/10.1130/GES02186.1>
- Jiménez, G., López, O., Jaimés, L., & Umaña, R. M. (2016). Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropías de basamento en el Valle Medio del Magdalena. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 312–319. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.293>
- Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S.A.). *Boletín de Geología*, 1, 7–43.
- Langenheim, R. (1960). Estudio paleontológico de los depósitos jurásicos y cretácicos en el noreste de Colombia. *Journal of Paleontology*, 34(3), 456–470.
- Langenheim, R. L. (1959). Preliminary report on the stratigraphy of the Giron formation in Santander and Boyaca. *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander*, 3, 35–50.
- Laverde, F., & Clavijo, J. (1985). La Formación Los Santos: Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte “Tú y Yo” (Zapatoca). In F. Etayo-Serna & F. Laverde-Montaña (Eds.), *Proyecto Cretácico* (Issue 16, pp. VI–1–VI–13). INGEOMINAS.
- Laverde-Montaña, F. (2023a). Revisiting the latest Jurassic-earliest Cretaceous Los Santos Formation, Eastern Cordillera of Colombia. A – The history of its origin and the lowermost part of the unit. *Boletín Geológico*, 50(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.1.2023.689>

- Laverde-Montaño, F. (2023b). Revisiting the latest Jurassic-earliest Cretaceous Los Santos Formation, Eastern Cordillera of Colombia. B – A transgressive river mouth deposit in a syntectonic scenario. *Boletín Geológico*, 50(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.1.2023.690>
- Leal-Mejía, H., Shaw, R. P., & Melgarejo, J. C. (2019). Spatial-temporal migration of granitoid magmatism and the Phanerozoic tectono-magmatic evolution of the Colombian Andes. In F. Cedié & R. P. Shaw (Eds.), *Geology and tectonics of northwestern South America: The Pacific-Caribbean Andean junction* (pp. 253–410). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_5
- Marsaglia, K. M., & Ingersoll, R. V. (1992). Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: A reassessment of magmatic-arc provenance. *Geological Society of America Bulletin*, 104(12), 1637–1649.
- Martínez, S. (2008). *Estratigrafía de la formación Los Santos en las secciones de La Navarra y El Calicho en la Mesa de Los Santos (departamento de Santander)*.
- Miall, A. (2016). Facies models. In *Stratigraphy: A Modern Synthesis* (pp. 161–214). Springer, Cham.
- Miall, A. D. (1977). A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews*, 13(1), 1–62.
- Miall, A. D. (1978). Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In *Fluvial Sedimentology* (Vol. 5, pp. 597–604).
- Miall, A. D. (1985). Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Sedimentology*.

- Miall, A. D. (1996). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer.
- Miall, A. D. (2010). *The geology of stratigraphic sequences*. Springer Science & Business Media.
- Mojica, J., & Franco, R. (1990). Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. *Geología Colombiana*, 17, 41–64.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Sobel, E. R., Zeilinger, G., Jaramillo, C., Ferreira Da Silva, S., & Blanco, M. (2010). The eastern foothills of the Eastern Cordillera of Colombia: An example of multiple factors controlling structural styles and active tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 1846–1864. <https://doi.org/10.1130/B30033.1>
- Mora-Páez, H., & et al. (2019). Crustal deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.002>
- Navas, J. (1963). Estudio estratigráfico del Girón al W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 12, 19–33.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. John Wiley & Sons.
- Osorio-Afanador, D. A. (2016a). *Estratigrafía y deformación del Grupo Girón en el Anticlinorio de los Yariguíes (“Anticlinal de Los Cobardes”) sectores Zapatoca y Río Lebrija*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-químicas.
- Osorio-Afanador, D. A. (2016b). *Estratigrafía y deformación del Grupo Girón en el Anticlinorio de los Yariguíes (“Anticlinal de Los Cobardes”) sectores Zapatoca y Río Lebrija*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-químicas.

- Parra, M., Mora, A., López, C., Rojas, L. E., & Horton, B. K. (2012). Detecting early shortening and deformation advance in thrust-belt hinterlands: Example from the Colombian Andes. *Geology*, *40*, 175–178. <https://doi.org/10.1130/G32519.1>
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1973). *Sand and Sandstone*. Springer Verlag.
- Pons, D. (1982). Études paléobotanique et palynologique de la Formation Girón (Jurassique moyen–Crétacé inférieur) dans la région de Lebrija, département de Santander, Colombie. *107 Congrès National Des Sociétés Savants*.
- Pons, J. (1982). Fósiles de helechos del grupo Callipteridium en la región de Santander. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *12*(2), 88–104.
- Ramsay, J. G., & Huber, M. I. (1987). *The Techniques of Modern Structural Geology*. Academic Press.
- Renzoni, G. (1981). Geología del cuadrángulo J-12 Tunja. *Boletín Geológico*, *24*(2), 31–54.
- Restrepo-Moreno, S. A., Foster, D. A., Bernet, M., Min, K., & Noriega, S. (2019). Morphotectonic and Orogenic Development of the Northern Andes of Colombia: A Low-Temperature Thermochronology Perspective. In F. Cedié & R. P. Shaw (Eds.), *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 749–832). Springer.
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). *Mapa Geológico generalizado departamento de Santander*. INGEOMINAS.
- Rueda, C. B., & Ortiz, H. E. N. (2013). *Estratigrafía, quimioestratigrafía y petrografía de la Formación Rosablanca: implicaciones para la identificación de eventos anóxicos oceánicos en la Cordillera Oriental colombiana*. Universidad de Caldas.
- Sánchez, J., Horton, B., Tesón, E., Mora, A., Ketcham, R., & Stockli, D. (2012). Kinematic evolution of Andean fold-thrust structures along the boundary between the Eastern Cordillera

- and Middle Magdalena Valley basin, Colombia. *Tectonics*, 31(3), 1–24.
<https://doi.org/10.1029/2011TC003089>
- Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., & Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *J. S. Am. Earth Sci.*, 21, 383–411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>
- Saylor, J. E., Horton, B. K., Nie, J., Corredor, J., & Mora, A. (2011). Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia. *Basin Research*, 23(4), 377–402. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00493>
- Tucker, M. E. (2003). *Sedimentary Rocks in the Field: A Practical Guide*. John Wiley & Sons.
- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (2007). *Structural Geology*. W. H. Freeman.
- Villagomez, D., & Spikings, R. (2013). Unraveling The Complex Interaction Between The Southern Caribbean, Northwest South America And The Pacific Plates During The Cenozoic. *AGU Spring Meeting Abstracts, 2013*, T22A-08.
- Walker R. James, N. (1992). *Facies models: response to sea level change*.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H–12, Bucaramanga y H–13 Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1–3), 1–132.
- Zamarreño, D. J., & Julivert, D. (1963). Estudio Petrográfico de las Calizas de la Formación Rosablanca de la Región de la Mesa de los Santos. *Bol. de Geol. Univ. Ind. de Sant. (Bucaramanga)*, 15, 5–30.