

Quimioestratigrafía del horizonte fosilífero de Los Corros
(Formación Esmeraldas, Valle Medio del Magdalena)

Manuela Lucia López Murillo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geología

Director

PhD German David Patarroyo Camargo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mi mamá y Jota, por su amor incondicional, su apoyo constante y por creer en mí desde el primer día.

Gracias por estar siempre a mi lado en todo momento. Sin ustedes, este logro no hubiera sido posible.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander. Por brindarme la formación académica y profesional. Agradezco el acceso a sus laboratorios, equipos y herramientas que hicieron posible la realización de los estudios geoquímicos de esta investigación.

A la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos de la Energía (ACGGP), Por su aporte económico a través del Fondo Corrigan, que hizo posible la realización de esta investigación.

Al profesor Germán David Patarroyo, por su orientación a lo largo de este proceso. Gracias por compartir su conocimiento y por motivarme a ser una mejor investigadora. Su guía ha sido fundamental en mi crecimiento académico y profesional.

Al profesor Mario García, por su aporte a esta investigación a través de los análisis geoquímicos, que permitieron complementar y fortalecer los resultados obtenidos.

Al grupo de los KCorros, Eduardo Cáceres y Julián Gómez, por ser parte importante de este proceso de investigación. Agradezco su compromiso que han demostrado en cada momento.

A Stratos Consultoría Geológica, por su valiosa colaboración y gestión en el desarrollo de esta investigación. Su acompañamiento fue fundamental para la planificación y ejecución del trabajo de campo

A Sergio Zambrano, por su amor y apoyo incondicional. Sus consejos y compañía han sido muy importante para mí en este proceso y en los que vendrán juntos.

A Juan Manuel Duarte, por siempre estar ahí, en cada momento de este camino. Gracias por tu apoyo, por escucharme cada día y ser mi mejor amigo por siempre.

A Unmi Im, mi mejor amiga durante toda la carrera, por estar ahí para mí y siempre pasar momentos únicos juntas.

¡Gracias a todos, los quiero!

Tabla de Contenido

Introducción	13
Planteamiento del problema y justificación	14
1.1 Localización del área de estudio	15
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo General	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. Marco Geológico.....	17
3.1 Formación Esmeraldas.....	18
3.1.1 Horizonte fosilífero de Los Corros	18
4. Marco Teórico.....	20
4.1 Geoquímica	20
4.1.1 Fluorescencia de rayos x (Fr _x).....	20
4.1.2 Difractometría de rayos x (Dr _x).....	22
4.1.3 Carbono orgánico total (COT)	23
4.1.4 Registro de Rayos Gamma (RG)	24
4.2 Quimioestratigrafía	26
5. Metodología de trabajo	27
5.1 Salida de campo y recolección de las muestras	27
5.2 Obtención de datos de Rayos Gamma Ray	27
5.3 Preparación de las muestras colectadas	27
5.4 Análisis geoquímicos	28
5.4.1 Análisis de geoquímica orgánica (Carbono Orgánico Total, COT)	30

5.5 Análisis petrográficos y mineralógicos.....	33
5.6 Análisis quimioestratigráfico de los resultados	34
6. Resultados	34
6.1 Geoquímica.....	34
6.1.1 Sedimentología	35
6.1.2 Paleosalinidad	37
6.1.3 Paleoxigenación de fondo	39
6.2 Difractometría de Rayos X	41
6.3 TerraSpec Halo	43
6.3.1 Minerales arcillosos	43
6.3.2 Otros minerales	46
6.4 Petrografía.....	47
6.4.1 Determinación litológica a partir de proxies.....	50
6.5 Determinación de quimiofacies	51
7. Discusión.....	53
7.1. Zonas quimioestratigráficas	53
7.1.1 Aspectos sedimentológicos.....	53
7.1.1.1 Implicaciones sedimentológicas de las arcillas.....	55
7.1.2 Inferencias de paleosalinidad.....	57
7.1.2.1 Implicaciones de la materia orgánica.....	59
7.2. Interpretación paleoambiental del horizonte fosilífero de Los Corros	62
8. Conclusiones.....	68
Referencias Bibliográficas	70

Lista de Tablas

Tabla 1. Muestras del h. Fosilífero de Los Corros con sus respectivos análisis geoquímicos.	29
Tabla 2. Condiciones del análisis del método analítico COT del reporte E04-2024.	30
Tabla 3. Condiciones instrumentales del laboratorio para FRX por INCLAY S.A.S	31
Tabla 4. Condiciones de la metodología del laboratorio de rayos X del informe NF-24120-DRX..	32
Tabla 5. Interpretación de los resultados obtenidos mediante el ASD TerraSpec Halo	33
Tabla 6. Proxies geoquímicos utilizados para definir procesos geológicos.....	34
Tabla 7. Tipo de mineral obtenido mediante el ASD TerraSpec Halo con su fórmula química. .	43
Tabla 8. Listado de muestras con minerales carbonatados	47
Tabla 9. Reglas generales para establecer la litología en masa de rocas sedimentarias utilizando datos geoquímicos.....	50

Lista de Figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio Los Corros, en localidad San Silvestre.....	15
Figura 2. Cartografía geológica de la zona de estudio en el VMM.	17
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de las unidades del Paleógeno y Neógeno del VMM. Derecha. Sección estratigráfica de la Quebrada San Silvestre	19
Figura 4. Secuencia de la producción de rayos X en un átomo.	21
Figura 5. Difracción de los rayos X en una fila de átomos, representando un plano atómico.....	22
Figura 6. Diagrama esquemático de un detector de centelleo de Rayos Gamma	25
Figura 7. Elementos y herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto.	28
Figura 8. Distribución estratigráfica de los proxies geoquímicos utilizados para evaluar la sedimentología.	36
Figura 9. Distribución general de los proxies geoquímicos para evaluar la paleosalinidad.	38
Figura 10. Firmas geoquímicas para evaluar la paleoxigenación de fondo	40
Figura 11. Difractogramas con las fases minerales del horizonte fosilífero de Los Corros	42
Figura 12. Histograma de las arcillas presentes en el horizonte fosilífero de Los Corros.....	44
Figura 13. Gráfico de barras con el tipo de arcilla presente y la cantidad de estrellas obtenidas mediante ASD TerraSpec Halo.....	45
Figura 14. Gráfico de barras con el tipo de mineral presente y el número de estrellas obtenidas mediante ASD TerraSpec Halo.....	46
Figura 15. Columna estratigráfica con la ubicación de las secciones delgadas tomadas mediante microscopio NIKON Eclipse E200.....	49
Figura 16. Gráfico circular de los tipos de roca, según el elemento Ca y la relación Si/Al	51

Figura 17. Zonas y subzonas quimioestratigráficas del horizonte fosilífero de Los Corros..... 52

Figura 18. Segmentación de un estuario según la transición de mezcla entre agua dulce y marina
 65

Figura 19. Ambiente deposicional del horizonte fosilífero de Los Corros. 66

Figura 20. Contexto paleogeográfico del horizonte fosilífero de Los Corros hace 33 Ma. 67

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en el Repositorio de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Tabla con los resultados de los proxies geoquímicos mediante Frx.

Apéndice B. Tabla con los valores del carbono orgánico total (COT).

Apéndice C. Tabla con los valores de Rayos Gamma.

Apéndice D. Resultado de datos tomados mediante ASD TerraSpec Halo a 48 muestras de la sección.

Apéndice E. Gráfico de barras agrupadas de la columna del H. fosilífero de Los Corros mediante ASD TerraSpec Halo.

Apéndice F. Descripciones petrográficas de las diez secciones delgadas, abarcando toda la sección.

Glosario

Eoceno: segunda del Paleógeno, que abarca desde hace 58 millones de años hasta hace 37 millones de años.

Proxies geoquímicos: es una herramienta indirecta utilizada para reconstruir las condiciones ambientales de épocas pasadas, como la temperatura, salinidad o productividad biológica, a partir del estudio de la composición química de materiales geológicos como sedimentos, rocas o fósiles.

Paleoxigenación: hace referencia a las condiciones de oxidación y reducción que existieron en el pasado

Resumen

Título: Quimioestratigrafía del horizonte fosilífero de Los Corros

(Formación Esmeraldas, Valle Medio del Magdalena)*

Autor: Manuela Lucia López Murillo*

Palabras Clave: Valle Medio del Magdalena, Geoquímica, Quimioestratigrafía, Formación Esmeraldas

La Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) es una cuenca intermontana, formada por el levantamiento de las Cordilleras Central y Oriental, siendo una de las principales productoras de hidrocarburos en Sudamérica. Este estudio se enfoca en la Formación Esmeraldas y su segmento superior, particularmente en el horizonte fosilífero de Los Corros, ubicado en la Quebrada San Silvestre (VMM). Se realizaron análisis geoquímicos mediante fluorescencia de rayos X (Fr_x), difracción de rayos X (Dr_x), espectroscopía de reflectancia (TerraSpec Halo) y espectrometría de rayos gamma. Se analizaron relaciones elementales como Zr/Rb, Log (Fe/Ca), Al/Si, Sr/Ba, Th/U y elementos sensibles al redox (Ni, Cu, V), además del contenido de carbono orgánico total (COT) para inferir variaciones sedimentológicas y de paleosalinidad, así como las condiciones de paleoxigenación del fondo.

Los análisis quimioestratigráficos identificaron tres quimiozonas con cambios en las condiciones paleoambientales, indicando variaciones desde ambientes proximales a más restringidos, con fluctuaciones en la materia orgánica y el grado de meteorización. La relación Sr/Ba sugeriría un ambiente intermareal de baja salinidad, mientras que las relaciones Th/U y elementos sensibles al redox señalaron un entorno subóxico a anóxico, favoreciendo la preservación de la materia orgánica. Los análisis de Dr_x mostraron minerales arcillosos predominantes como caolinita, montmorillonita, illita y halloysita, además de minerales secundarios como ferrihidrita y goethita, que indicarían procesos de oxidación. También se identificaron carbonatos como aragonito y calcita, sugiriendo diagénesis temprana y variaciones de la salinidad. La petrografía reveló variaciones en la granulometría, meteorización, diagénesis y condiciones anóxicas, reflejando fluctuaciones en la salinidad y los ambientes deposicionales.

Teniendo en cuenta todas las herramientas exploradas, la reconstrucción paleoambiental sugiere que el horizonte fosilífero de Los Corros se depositó en una planicie intermareal o un arroyo de marea con condiciones de baja salinidad, baja oxigenación y sedimentación episódica. Dicha interpretación va en concordancia con la propuesta en trabajos previos que se basaron en el contenido paleontológico del horizonte.

* Trabajo de Grado

** Facultad Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Geología. Director: Germán David Patarroyo Camargo. Doctor en Geología

Abstract

Title: Chemostratigraphy of the Los Corros fossiliferous horizon

(Esmeraldas Formation, Middle Magdalena Valley) * *

Author(s): Manuela Lucia López Murillo **

Key Words: Middle Magdalena Valley, Geochemistry, Chemostratigraphy, Esmeraldas Formation

The Middle Magdalena Valley Basin (MMV) is an intermontane basin, formed by the uplift of the Central and Eastern Cordilleras, which stands out as one of the main producers of hydrocarbons in South America. This study focuses on the Esmeraldas Formation and its upper segment, particularly on the Los Corros fossiliferous horizon, located in the Quebrada San Silvestre (MMV). Geochemical analyses were performed using X-ray fluorescence (Xrf), X-ray diffractometry (Xrd), reflectance spectroscopy (TerraSpec Halo) and gamma ray spectrometry. Elemental ratios such as Zr/Rb, Log (Fe/Ca), Al/Si, Sr/Ba, Th/U, redox-sensitive elements (Ni, Cu, V), and total organic carbon (TOC) content were explored to infer sedimentological and paleosalinity variations, as well as bottom paleoxygenation conditions.

Chemostratigraphic analyses identified three chemozones with changes in paleoenvironmental conditions, indicating variations from proximal to more restricted environments, with fluctuations in the content of organic matter and the weathering degree. The Sr/Ba ratio would suggest a low-salinity intertidal environment, while the Th/U ratios and redox-sensitive elements indicated a suboxic to anoxic environment, favoring the preservation of organic matter. Xrd analyses showed predominant clay minerals such as kaolinite, montmorillonite, illite and halloysite, as well as secondary minerals such as ferrihydrite and goethite, which would indicate oxidation processes. Carbonates such as aragonite and calcite were also identified, suggesting early diagenesis and variations in salinity. Petrographic analyses revealed variations in granulometry, weathering, diagenesis and anoxic conditions, reflecting fluctuations in salinity and depositional environments.

Considering all the tools explored, the paleoenvironmental reconstruction suggests that the Los Corros fossiliferous horizon was deposited in an intertidal flat or a tidal creek with conditions of low salinity, low oxygenation and episodic sedimentation. This interpretation is in agreement with that proposed in previous works that were based on the paleontological content of the horizon.

* Degree Work

** Faculty of Physical Chemical Engineering. School of Geology. Geology. Director: Germán David Patarroyo Camargo. Doctor in Geology

Introducción

La cuenca del Valle Medio de Magdalena (VMM) es una cuenca intermontana producto del levantamiento de las Cordilleras Central y Oriental (Lozano et al., 2014), y corresponde a una de las cuencas productoras de petróleo y gas más abundantes de Sudamérica (e.g., Sarmiento, 2011).

Teniendo en cuenta su relevancia en la industria de los hidrocarburos, diversos estudios (e.g., Anderson, 1945; Morales et al., 1958; Sarmiento, 2011; Sarmiento et al., 2015) han procurado comprender aspectos como el marco cronoestratigráfico, o los ambientes deposicionales (e.g., Caballero et al., 2010) que definieron su sucesión sedimentaria, y han estado principalmente enfocados en estudios de campo (e.g., sedimentología, geología estructural) o geofísicos (e.g., sísmica, reología). Una forma poco abordada de analizar las sucesiones sedimentarias del VMM corresponde a la quimioestratigrafía, la cual se ocupa del estudio e interpretación de la composición geoquímica de las rocas sedimentarias representadas en las secciones estratigráficas (Renard, 1985; Vera, 1994). Parámetros que usualmente son tenidos en cuenta en los estudios quimioestratigráficos son la concentración de carbonatos (CaCO_3), el contenido de materia orgánica en las rocas (COT), las abundancias de elementos mayores (e.g., K, Fe, Si) y traza (e.g., Cu, Zn), o las razones elementales entre estos (e.g., Sr/Ba, Zr/Rb). La distribución estratigráfica de dichos parámetros permite la definición y a su vez favorece la identificación de quimiofacies, sirviendo como herramientas de correlación estratigráfica en una cuenca, o para efectuar inferencias paleoambientales (Vera, 1994).

Este proyecto busca explorar el componente geoquímico del segmento superior de la Formación Esmeraldas (Eoceno) en el VMM. Para dicho intervalo de la Formación Esmeraldas se reporta el horizonte fosilífero de Los Corros, un nivel estratigráfico del cual no se tiene aún

claridad sobre sus condiciones paleoambientales, así como una posible influencia marina en el mismo. Mediante indicadores geoquímicos y análisis elementales, junto a la definición de quimiofacies en la localidad de estudio (Quebrada San Silvestre, VMM; Figura 1), se busca aportar conocimiento sobre los ambientes de depósito del horizonte fosilífero de Los Corros.

Planteamiento del problema y justificación

Sobre el Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM, Cordillera Oriental) aflora la sucesión estratigráfica del VMM, la cual comprende unidades desde finales del Cretácico al Neógeno. Teniendo en cuenta su potencial en la exploración de hidrocarburos, la sucesión sedimentaria del Cenozoico de dicha área ha sido ampliamente estudiada, con el propósito de entender sus ambientes deposicionales y relaciones estratigráficas (Morales et al., 1958; Sarmiento et al., 2015;)

Para el caso de las sucesiones sedimentarias del Eoceno, autores como Caballero (2010), han reportado estructuras sedimentarias y laminaciones onduladas sobre toda la unidad en el flanco oriental del SNM, proponiendo alguna influencia mareal, con una transición fluvial-estuarina. Otros autores como Gómez et al. (2009) han sugerido procesos diagenéticos que influyeron en los estratos de la Formación Esmeraldas, como por ejemplo la presencia de agua dulce antes de la litificación. A su vez, para el horizonte fosilífero de Los Corros se han reportado bivalvos, gasterópodos (Caballero et al. 2010), mientras que a través del hallazgo de restos de plantas y palinomorfos, autores como Rodríguez et al (2012) han propuesto que la materia orgánica es totalmente continental. Recientemente, Durán-Gómez (2024) describió los fósiles presentes en una localidad del horizonte fosilífero de Los Corros (Quebrada San Silvestre, Santander)

Teniendo en cuentas las distintas propuestas acerca de una posible influencia marina dentro de la Formación Esmeraldas, y específicamente en el horizonte fosilífero de los Corros, se propone una valoración paleoambiental complementaria del horizonte, mediante el uso de herramientas

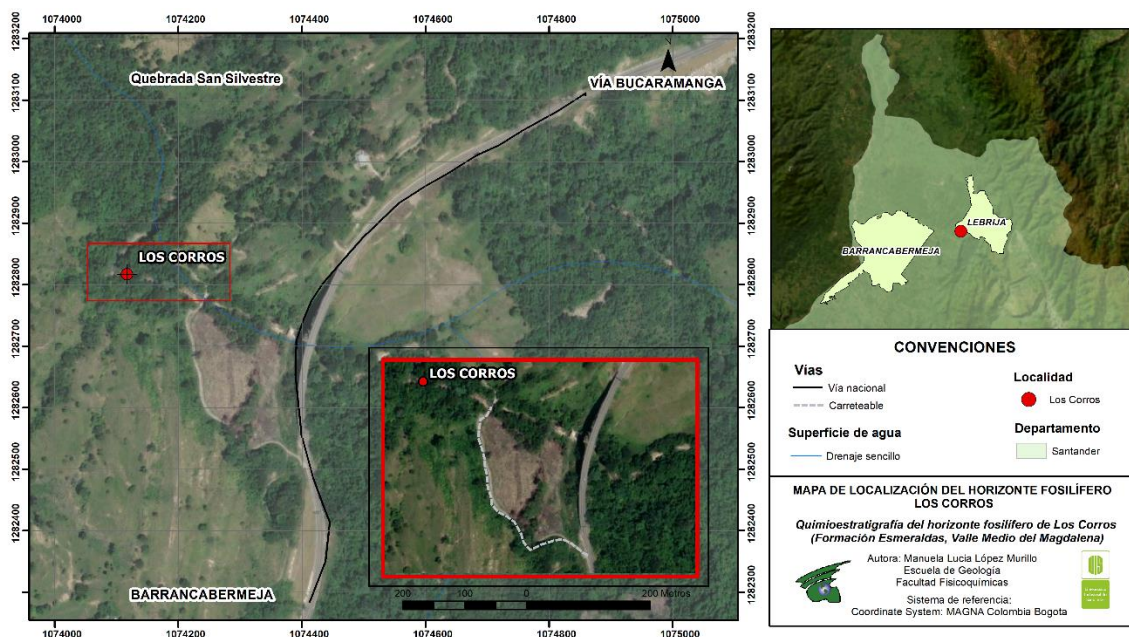
geoquímicas elementales como la fluorescencia y la difracción de rayos X. Una caracterización geoquímica del horizonte fosilífero, por medio de la definición de quimiofacies, y la valoración de distintas relaciones elementales como indicadores paleoambientales, permitirá tener mayor claridad sobre parámetros paleoambientales como las condiciones de paleosalinidad, paleoxigenación de fondo y paleoproduktividad que estuvieron presentes durante el Eoceno tardío del VMM.

1.1 Localización del área de estudio

A 46 kilómetros del municipio de Lebrija, Santander, se sitúa la zona de investigación (Quebrada San Silvestre). Para llegar a la localidad se toma el desvío a 500 metros de la Ruta del Cacao, vía nacional Bucaramanga-Barrancabermeja (Figura 1). Las coordenadas planas son N:1282815.59 m y E:1074126.76 m, ubicándose el afloramiento en el margen derecho de la quebrada.

Figura 1

Localización de la zona de estudio Los Corros, en localidad San Silvestre.



Nota. Imagen modificada de ESRI (2023).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Caracterizar geoquímicamente las sedimentitas presentes en el horizonte fosilífero de Los Corros de la Formación Esmeraldas.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar los principales grupos composicionales de las sedimentitas que conforman el horizonte fosilífero de Los Corros mediante técnicas geoquímicas de fluorescencia de rayos X y rayos gamma.

Realizar una reconstrucción de la paleosalinidad para el horizonte fosilífero de Los Corros mediante el uso de diversas relaciones elementales (Sr/Ba, Th/U) y los contenidos de azufre (S) y carbono orgánico total (COT).

Establecer las condiciones de paleoxigenación de fondo, mediante el uso de relaciones elementales como Th/U, concentraciones de elementos sensibles a condiciones redox (RSE) tales como níquel (Ni), cobre (Cu) y vanadio (V), y el contenido de COT.

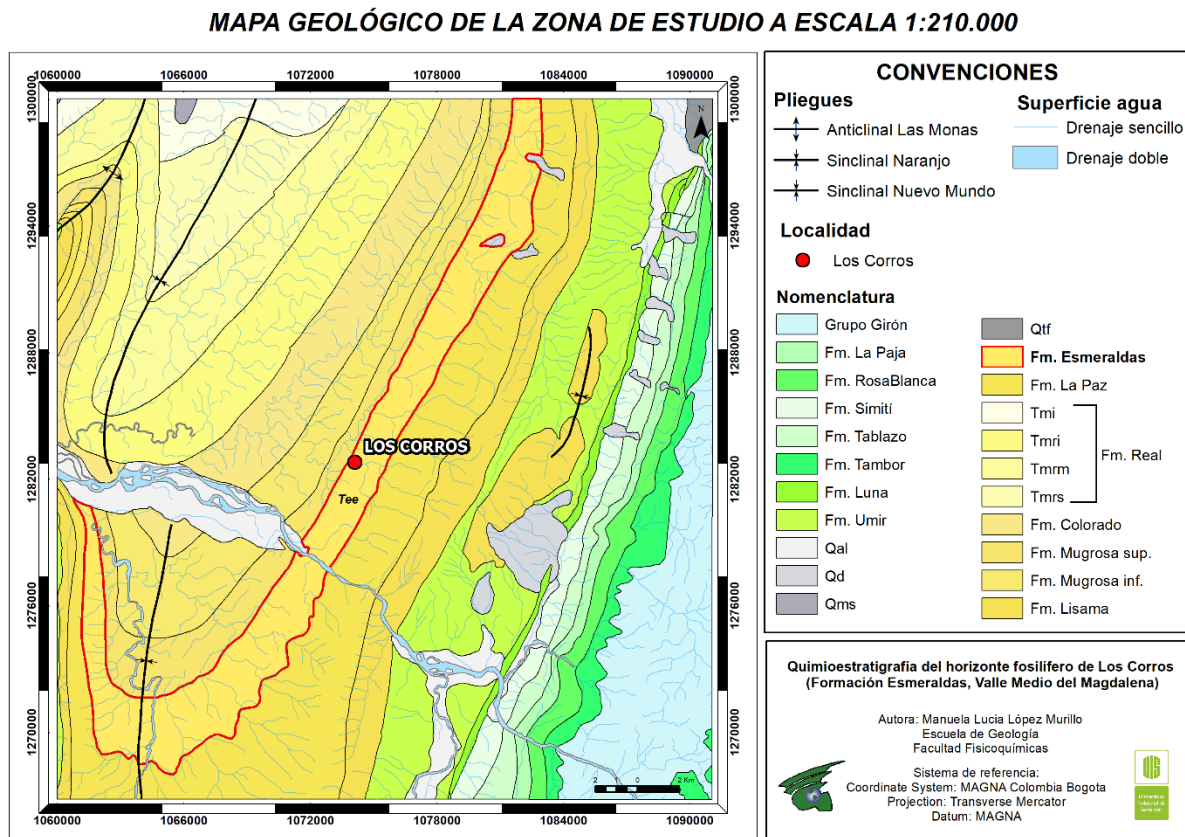
Estudiar la sedimentación del material presente, basado en la interpretación del estudio de diversas relaciones elementales (Zr/Rb, Log (Fe/Ca), Al/Si), análisis petrográficos, y técnicas de difracción de rayos X.

3. Marco Geológico

La sucesión sedimentaria del SNM para el intervalo Eoceno- Mioceno está definida por las formaciones La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado (Figura 2). La Formación Esmeraldas, que comprende los estratos de la sección a estudiar, adoptó este nombre por el caserío Esmeraldas, sobre el río Sogamoso (Ward et al. 1973). En el tope de esta unidad se ha definido un horizonte fosilífero llamado Los Corros, el cual se encuentra en contacto discordante con la Formación Mugrosa.

Figura 2

Cartografía geológica de la zona de estudio en el VMM.



Nota. La zona señalada de rojo, corresponde a la formación de estudio y la localización del horizonte fosilífero de Los Corros.

3.1 Formación Esmeraldas

Autores como Ward et al. (1973) y Caballero et al (2010) definen a la Formación Esmeraldas (Tee) como un conjunto de areniscas de grano fino, gris claro a verdoso, de estratificación fina a laminada, limolitas, e intercalaciones de shale gris oscuro con abundante mica, fragmentos líticos y materia orgánica. Hacia el flanco este del SNM, también se presentan intercalaciones de mantos de carbón y paquetes de arenitas de grano medio a grueso. Mediante el registro de palinomorfos se ha asignado una edad de Eoceno tardío para la Formación Esmeraldas, siendo correlacionable con unidades del Eoceno del piedemonte llanero (e.g., Formación Mirador; Rodríguez et al, 2012; De la Parra et al, 2021).

3.1.1 Horizonte fosilífero de Los Corros

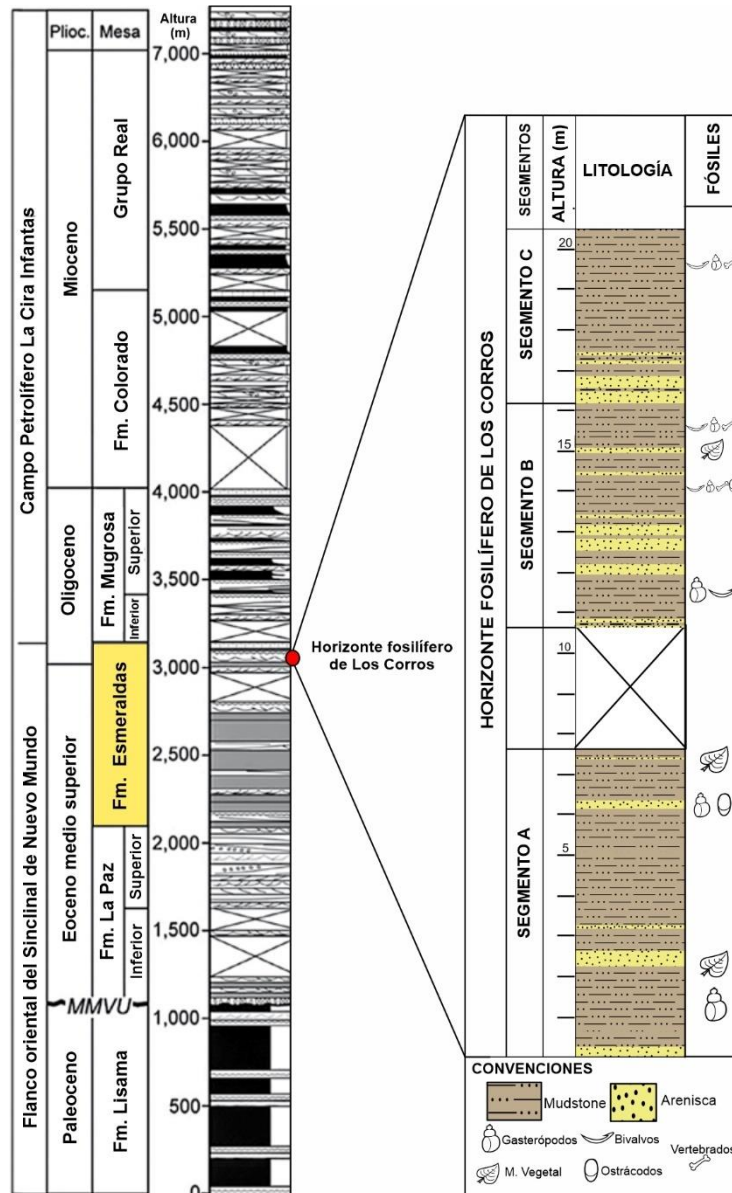
El horizonte fosilífero de Los Corros ha sido definido como un nivel bioclástico al tope de la formación Esmeraldas y que está dominado por bivalvos y gasterópodos (Nutall, 1990; Pilsbry y Olsson, 1935) principalmente, así como restos de vegetales y palinomorfos (Rodríguez et al., 2012; Martínez et al, 2021).

El horizonte fosilífero de Los Corros ha sido reconocido en pozos exploratorios y en estudios de superficie solo ha sido identificado en el flanco este del SNM. Según Ward et al (1973) el horizonte presenta 15 m de espesor, comprendiendo una intercalación de capas de packstone o arenitas verdes que contienen fósiles de bivalvos y gasterópodos, junto con niveles de lodolitas y limolitas cuarzosas fosilíferas (Figura 3). Si bien trabajos como los de Morales et al (1958) o Ward et al (1973) no especifican una localidad tipo, Caballero et al. (2010) definen un espesor de 30 a 60 cm en el flanco este del SNM. La localidad de estudio de este trabajo de investigación (Quebrada San Silvestre), tiene un espesor aproximado de 29 metros, y fue recientemente descrita en su contenido paleontológico por Durán-Gomez (2024).

Figura 3

Columna estratigráfica generalizada de las unidades del Paleógeno y Neógeno del VMM.

Derecha. Sección estratigráfica de la Quebrada San Silvestre



Nota. Tomada y modificado de: Sarmiento-Pérez 2015, según la simplificación de Morales et al. 1958 y Gómez et al. 2009. La columna del horizonte fosilífero de Los Corros fue tomada y modificada de Gómez-Durán (2024).

4. Marco Teórico

4.1 Geoquímica

El concepto de geoquímica nace desde 1838 por el químico suizo Christian Friedrich Schönbein (1799-1868), y posteriormente el geólogo alemán Karl Gustav Bischof (1792-1870) estableció en 1847 las bases científicas de la geoquímica como una ciencia que estudia la composición química de la Tierra, y los procesos químicos que ocurren tanto en su interior como en su superficie (Berbeyer, 1954). Actualmente, la geoquímica es considerada una disciplina que involucra casi todas las ciencias de la Tierra, desde la medición del tiempo geológico hasta la comprensión de los cambios medioambientales (Albarède, 2009).

4.1.1 Fluorescencia de rayos x (Fr_x)

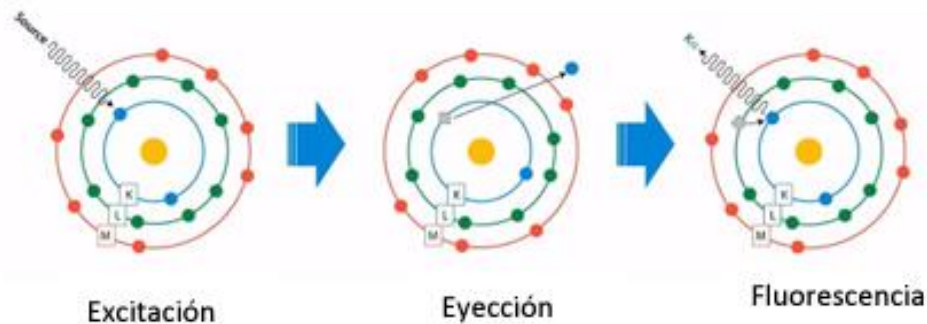
La fluorescencia de rayos X es una técnica no destructiva que permite la identificación de elementos en una muestra a partir de la lectura de la emisión de rayos X secundarios o fluorescentes que son emitidos desde la muestra. Cada elemento químico tiene niveles de energía característicos y produce rayos X propios, lo que permite medir la composición y concentración elemental de la muestra (De la Cruz, 2018).

Según Beckhoff et al. (2006) en cualquier proceso de análisis por emisión de rayos X, se pueden identificar cuatro etapas principales. Primero, se genera la excitación de la radiación característica de la muestra mediante la interacción con fotones de alta energía, electrones, protones, entre otros, y después se obtiene la selección de la línea de emisión característica del elemento utilizando un espectrómetro, ya sea de longitud de onda o de energía dispersiva. En tercer lugar, se obtiene la detección e integración de los fotones característicos, permitiendo medir la intensidad de la línea de emisión correspondiente. Finalmente, se convierte la intensidad medida en la concentración elemental, utilizando un procedimiento de calibración adecuado.

La radiación X incidente expulsa electrones de las capas internas del átomo, generando vacantes que son ocupadas por electrones de los niveles más externos. Este proceso de reubicación de electrones da lugar a la liberación de energía en forma de fotones característicos. En el estado atómico excitado, los electrones de las capas exteriores ocupan las vacantes, lo que puede provocar una serie de transiciones sucesivas, en la que se emiten fotones adicionales (Figura 4). Este proceso continúa hasta que todas las transiciones permitidas se agotan. Finalmente, un electrón libre completa el proceso llenando la última vacante en una capa externa. (Beckhoff et al., 2006; De la Cruz, 2018).

Figura 4

Secuencia de la producción de rayos X en un átomo.



Nota. Tomado de (De la Cruz, 2018).

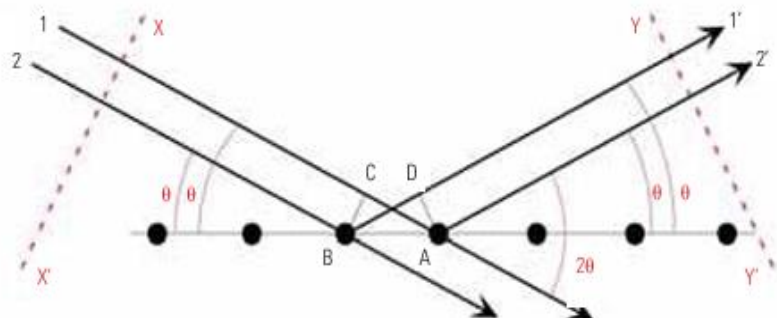
Con el equipo de Frx por energía dispersiva (ED-XRD) se puede identificar y cuantificar múltiples elementos que van desde el sodio (Na) hasta el uranio (U). Sin embargo, con esta técnica no se pueden determinar elementos livianos como el hidrógeno, oxígeno, carbono, o el nitrógeno a causa de la baja energía de sus rayos X y su baja fluorescencia (De la Cruz, 2018).

4.1.2 Difractometría de rayos x (Drx)

La técnica no destructiva de difracción de Rayos X permite identificar y estudiar la estructura cristalográfica interna de los materiales, ya sea de manera cualitativa o cuantitativa. Igualmente, permite definir su composición química en función de su estructura interna y de los tipos de átomos que la componen (Betancourth et al., 2010). La difracción de rayos X se fundamenta en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas. Al ser irradiado sobre la muestra a analizar, los rayos X se difractan con ángulos que varían dependiendo de las distancias interatómicas de cada elemento (Sangüesa, 2007) como se evidencia en la figura 5.

Figura 5

Difracción de los rayos X en una fila de átomos, representando un plano atómico.



Nota. Tomado de: Moore & Reynolds, (1997) en Sangüesa, (2007)

El resultado de este análisis es un difractograma, que corresponde a un gráfico en donde se superponen una serie de “picos” o puntos de máxima difracción conocidos como “reflexiones”. La altura correspondiente a cada mineral se asigna de forma relativa asignando una intensidad del 100 % al pico de mayor altura, y los demás se asignan proporcionalmente a este. Por ende, cada fase

cristalina tiene un difractograma propio y característico, y que puede ser interpretado mineralógicamente teniendo en cuenta las bases de datos oficiales proporcionadas por el International Center for Diffraction ([ICDD](#)). En la base de datos del ICDD se recopila la información de los difractogramas para todos los compuestos inorgánicos y orgánicos cristalinos (Sangüesa, 2007).

La utilidad de los análisis de Drx radica en su capacidad para identificar fases mineralógicas en materiales difíciles de analizar mediante otras técnicas convencionales como la petrografía. Por ejemplo, los minerales arcillosos (grupo de la caolinita, esmectitas e illita), que son comúnmente difíciles de identificar mediante técnicas petrográficas debido a su baja cristalinidad, pueden ser identificados con precisión mediante análisis de Drx, brindando información adicional para estudios de diagénesis o en la caracterización petrológica de una muestra (Wang et al., 2020).

4.1.3 Carbono orgánico total (COT)

El análisis de carbono orgánico total (COT) es utilizado como una medida indirecta de la concentración de materia orgánica presente en un ambiente, a partir de su contenido en sedimentos y rocas sedimentarias (Contreras et al., 2015).

Los valores de COT se obtienen mediante la técnica de pirólisis y se indican en porcentaje de peso (wt%) respecto al total de la roca (Vera, 1994), lo que implica la destrucción de la muestra por ataque químico o por combustión a elevadas temperaturas (Contreras et al., 2015).

En geoquímica, el COT y el contenido (porcentual o numérico) del azufre (S) tienen una relación estrecha en sedimentos ricos en materia orgánica, lo que permite estudiar los ambientes de deposición y las condiciones paleoambientales que se presentan. Las altas concentraciones de COT y S (valores > 1% en peso) suelen indicar una alta productividad biológica y un bajo contenido de oxígeno disuelto (anoxia) en la interfase agua-sedimento de los ambientes marinos.

En contraste, un bajo contenido de S (<0.5% wt%) sugiere un ambiente de depositación no marino, y con condiciones óxicas (Lashin et al., 2023).

4.1.4 Registro de Rayos Gamma (RG)

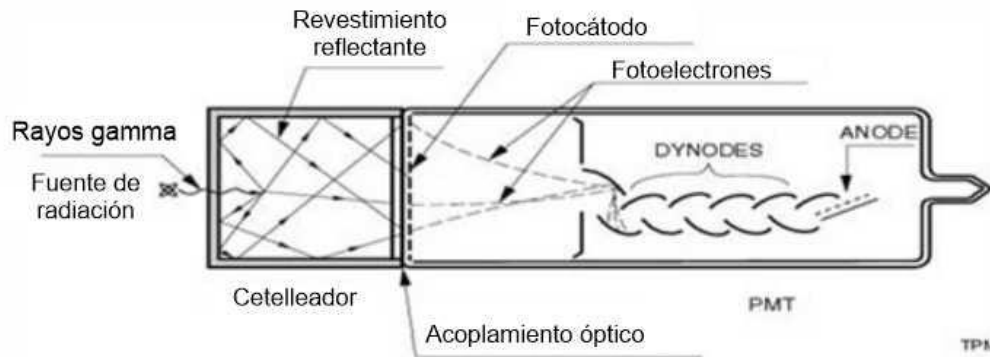
La espectrometría de rayos gamma espectral (RG) es una técnica no destructiva que brinda información geoquímica cuantitativa y porcentual de elementos como el potasio (K), uranio (U) y el torio (Th). Mediante el registro de la radiación gamma (γ) se puede determinar el contenido de estos radioelementos en minerales arcillosos que se concentran en las rocas de las unidades sedimentarias (Velasco et al., 2023).

El principio de medición se fundamenta en que los rayos gamma naturales de las rocas, generados por el decaimiento de los isótopos radiactivos de ^{40}K , ^{232}Th y ^{235}U - ^{238}U , generalmente se concentran en las arcillas (Sieben., 2017). La respuesta radiométrica de las rocas varía según la mineralogía y hacen parte de la composición de minerales como el cuarzo, el feldespato potásico, el grupo de las micas, entre otros. La abundancia puede estar presente de manera porcentual (%) en elementos mayores, o en partes por millón (ppm) y partes por billón (ppb) para elementos traza.

La detección de RG se realiza mediante la observación de efectos físicos o químicos producidos por su interacción con el material. Existen diversos tipos de detectores de radiación gamma, entre los cuales destacan las cámaras de ionización, contadores Geiger-Müller, detectores de semiconductores, detectores de termoluminiscencia y los detectores de centelleo (Figura 6; Velasco et al., 2023).

Figura 6

Diagrama esquemático de un detector de centelleo de Rayos Gamma



Nota. Tomado y adaptado de *Scintillation Detectors*, en *Nuclear Engineering Online Diploma Course*, Academy Europe.

La aplicación de esta técnica en distintas áreas de geología permite distinguir variaciones en los ambientes, identificar rocas generadoras y sello en los sistemas petroleros, o valorar los procesos de sedimentación de una sucesión estratigráfica.

Por ejemplo, la relación elemental Th/U ha sido relevante para los estudios de paleoambientes, principalmente explorando las condiciones redox de un paleoambiente y su relación con la preservación y el enriquecimiento de la materia orgánica en los sedimentos. Autores como Lei Cao et al. (2021), han utilizado esta razón elemental como indicador para procesos sedimentarios, teniendo presente que una relación Th/U con valores bajos (<2 ppm) indica sedimentos enriquecidos en U, mientras que una relación Th/U alta (>7 ppm) indica sedimentos que fueron meteorizados y/o lixiviados. Finalmente, con valores intermedios (valores entre 2-7 ppm), se sugiere una meteorización deficiente y una rápida deposición de detritos de rocas ígneas. Por otro lado, para la estimación de la paleoxigenación en la columna de agua se establecieron tres

condiciones usando la relación Th/U: óxico ($\text{Th/U} > 1.33$), disóxico ($\text{Th/U} 1.33-0.8$) y subóxico-anóxico ($\text{Th/U} < 0.8$; Lei Cao et al., 2021).

Otros autores como Moreno & Arévalo (2015), expresan que los valores bajos de relación Th/U sugieren ambientes intermareales o submareales con condiciones anóxicas y favorables para la formación de pirita y un aumento de materia orgánica, mientras que valores intermedios de la relación Th/U podrían indicar posibles ambientes intermareales.

4.2 Quimioestratigrafía

La quimioestratigrafía es una rama de la sedimentología que se utiliza como una herramienta para caracterizar químicamente las rocas, con el objetivo de establecer correlaciones entre secuencias sedimentarias y robustecer las interpretaciones paleoambientales que de estas se han obtenido mediante otras disciplinas (Sánchez et al., 2016).

La geoquímica de las rocas sedimentarias está controlada por seis factores principales: la composición del área fuente, la meteorización química, la clasificación hidráulica de sus clastos, los procesos de diagénesis, el metamorfismo y los fenómenos de alteración hidrotermal (Fralick & Kronberg, 1997).

A partir de análisis cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos como los descritos en la metodología de trabajo de este proyecto, es posible interpretar las variaciones químicas presentes en paquetes de roca o material no consolidado, lo que permite definir agrupaciones sedimentológicas con características químicas distintivas (quimiofacies). Estas quimiofacies reflejan entonces las condiciones ambientales en los sitios de depositación, la proveniencia de los detritos y los procesos de paleoxigenación en la columna de agua y en la interfase agua-sedimento (Craigie., 2018).

5. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo para este proyecto se desarrolló en seis etapas.

5.1 Salida de campo y recolección de las muestras

Se reconoció el afloramiento de estudio (Quebrada San Silvestre), previamente descrito por Durán-Gómez (2024), y posteriormente se realizó un muestreo de campo, colectando un total de 49 muestras (20-50 gramos/muestra) de base a tope (Figura 7A), con una resolución de muestreo centimétrica. La nomenclatura del muestreo se llevó a cabo a partir de la altura estratigráfica, y de algunos niveles de referencia que se definieron, siendo estos LC y LC1 (Tabla 2).

5.2 Obtención de datos de Rayos Gamma Ray

Utilizando el espectrómetro de mano Gamma-Ray RS-125 Super-SPEC de la Universidad Industrial de Santander. A partir de un conteo de 120 segundos/muestra, se colectaron los datos abarcando toda la sección y la totalidad de las muestras macro, (Figura 7B). Utilizando el dispositivo en el modo Espectral se obtuvo valores de GR que incluyen DR ($\mu\text{R/h}$), K (%), U (ppm) y Th (ppm).

5.3 Preparación de las muestras colectadas

Se trituraron aproximadamente 15 gramos de cada muestra colectada en un macerador de cerámica, evitando la contaminación entre muestras. Seguido a esto, el material molido se pesó y almacenó en frascos de plástico (Figura 7C). Posteriormente estas muestras se sometieron al horno de secado Thermo Scientific de la Escuela de Geología, UIS, a una temperatura de 30°C por 24 horas (Figura 7D), deshidratando el material orgánico presente.

Figura 7

Elementos y herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto.



Nota. A) Muestras colectadas. B) Toma de datos con Gamma Ray RS-125. C) Elementos empleados para la preparación de muestras. D) horno de secado Thermo Scientific. E) Toma de datos con ASD TerraSpec Halo. F) Secciones delgadas en microscopio NIKON Eclipse E200. Todos los análisis se realizaron en la Escuela de Geología, UIS.

5.4 Análisis geoquímicos

Teniendo en cuenta la tabla 1, se evidencian los estudios geoquímicos realizados a las 49 muestras colectadas.

Tabla 1

Muestras del h. Fosilífero de Los Corros con sus respectivos análisis geoquímicos.

Muestra	Altura estratigráfica [m]	Gamma-Ray Spectrometer	COT	FRX	TerraSpec	Petrografía	DRX
LC (0.1)	20.5					x	
LC (-2.8)	20.27	x	x	x	x		x
LC (-2.2)	19.68	x	x		x		
LC (-1.8)	19.36	x	x	x	x		
LC (-1.5)	19.09	x		x	x		
LC (-0.9)	18.46	x	x		x		x
LC (-0.6)	18.06	x		x	x	x	
LC (-0.3)	17.68	x	x	x	x		
LC (0)	17.5	x	x	x	x	x	
LC (0.3)	17.35	x	x		x		
LC (0.45)	17.04	x	x	x	x		
LC (0.8)	16.66	x	x	x	x		
LC (0.85)	16.53	x	x		x		
LC (1.1)	16.15	x	x	x	x		
LC (1.4)	15.92	x	x	x	x		
LC (1.7)	15.71	x		x	x		
LC (1.9)	15.28	x	x		x		
LC (2)	15.08	x	x	x	x	x	
LC (2.3)	14.84	x			x		
LC (2.7)	14.62	x		x	x		
LC (3.2)	14.31	x	x	x	x		
LC (3.5)	14	x		x	x		
LC (3.9)	13.55	x		x	x	x	
LC (4)	13.5	x	x		x		
LC (4.3)	13.38	x	x	x	x	x	x
LC (4.5)	13.08	x	x		x		
LC (4.6)	12.92	x	x	x	x		
LC (4.8)	12.76	x		x	x		
LC (5.3)	12.38	x	x	x	x		
LC (5.9)	11.84	x	x	x	x		
LC (6.2)	11.39	x			x		
LC (6.9)	10.92	x	x	x	x		
LC (7)	10.89	x	x		x		
LC (7.1)	10.84	x	x	x	x		
LC (7.2)	10.77	x	x		x		
LC1(-1.2)	7.56	x	x	x	x	x	
LC1(-0.8)	7.21	x	x	x	x		
LC1(0)	6.37	x	x	x	x		
LC1(0.8)	6.09	x		x	x		
LC1(1)	5.39	x		x	x		
LC1(1.3)	5.05	x	x	x	x	x	x
LC1(3.1)	3.17	x		x	x		
LC1(3.5)	2.62	x	x	x	x		
LC1(3.8)	2.11	x	x	x	x		
LC1(4.5)	1.75	x	x	x	x		
LC1(5)	1.32	x	x	x	x		x
LC1(5.3)	0.9	x	x	x	x	x	
LC1(5.6)	0.43	x	x	x	x		
LC1(5.7)	0.29	x		x	x	x	

5.4.1 Análisis de geoquímica orgánica (Carbono Orgánico Total, COT)

Se analizaron 36 muestras previamente molidas, en el laboratorio de Geoquímica del Petróleo de la Universidad Industrial de Santander, sede Guatiguará. El método utilizado fue el análisis de COT por combustión en un horno de alta temperatura, con detección infrarroja no dispersiva DNIR en un analizador de carbono y azufre LECO SC-144DR- Los criterios del análisis están descritos en la tabla 2.

Tabla 2

Condiciones del análisis del método analítico COT del reporte E04-2024.

Condiciones	
Equipo:	Analizador de Carbono y azufre LECO SC-144DR
Temperatura horno de combustión:	1357.40 °C
Gas de oxidación:	Oxígeno de alta pureza.
Temperatura horno celdas infrarrojas	48.86 °C

5.4.2 Análisis elemental mediante fluorescencia de rayos x (FRX)

Los datos de fluorescencia de rayos X de 35 muestras fueron desarrollados por el laboratorio INCLAY S.A.S. (Bogotá, Colombia). Allí, las muestras de roca fueron trituradas nuevamente en un mortero de ágata, asegurando la mínima contaminación en cada muestra y una distribución homogénea de los componentes minerales. Se realizó análisis de ED-XRF a la muestra encapsulada en un porta muestras de plástico con el equipo FRX NEXQC+ de Rigaku, bajo las condiciones instrumentales descritas en la tabla 3.

Tabla 3*Condiciones instrumentales del laboratorio para FRX por INCLAY S.A.S*

Condiciones	
Equipo:	ED-XRF Rigaku NEXQC+ QuantEZ
Tubo generador de rayos X:	Objetivo de Ag con Voltaje máximo de 50 KV
Detector:	SDD, resolución hasta 160 eV a 80.000 cps desde Na a U
Atmosfera:	Helio
Energías:	50 KV - 80µA, 30KV – 84 µA y 6.5KV – 363 µA

Finalmente, los resultados se reportaron en partes por millón (ppm) y en porcentaje de peso (wt%), indicando la cantidad de elementos mayores en óxidos, así como la abundancia de los elementos menores y traza. Seguido a esto se tomaron los elementos de interés como hierro (Fe), calcio (Ca), estroncio (Sr) y bario (Br). Otros elementos como circonio (Zr), rubidio (Rb) y sílice (Si) también fueron considerados. Se evaluaron la concentración de algunos elementos sensibles al redox (RSE), como el cobre (Cu), vanadio (V) y níquel (Ni), así como su relación con las concentraciones del aluminio (Al).

A partir de los datos de los elementos y compuestos obtenidos, usualmente medidos en valores porcentuales o partes por millón (ppm) suelen evaluarse diversas relaciones elementales para cada proceso geológico a estudiar. El primer grupo a tener cuenta son las relaciones asociadas a la sedimentología tales como: Zr/Rb, Log (Fe/Ca) y Al/Si, teniendo en cuenta que los picos altos en dichas relaciones indican mayor granulometría, presencia de terrígenos o una mayor meteorización química respectivamente (Croudace & Rothwell.,2015; Govin et al., (2012). El estudio de paleosalinidad en las sucesiones sedimentarias se centra en la relación Sr/Ba (Wei & Algeo., 2020), en donde una alta relación, refleja alta salinidad y a su vez, valores bajos indican una baja concentración salina. Esto, debido a que el estroncio tiende a ser absorbido en los sedimentos de grano fino, depositado en aguas de alta salinidad, mientras que el bario es mayor en

el agua dulce proveniente de escorrentía superficial (Wei & Algeo, 2022). La curva del azufre (S) permite establecer condiciones de paleosalinidad junto al contenido de carbono orgánico (Lashin et al., 2023). Asimismo, el tercer conjunto corresponde a la paleoxigenación de los elementos sensibles al redox (*Redox-sensitive elements*; RSE). Las relaciones de elementos como níquel (Ni), cobre (Cu) y vanadio (V) sobre aluminio (Al) indican que, a picos bajos en dichas relaciones, el medio presenta una mayor oxigenación de fondo (Dumman et al., 2021).

5.4.3 Análisis elemental de difracción de rayos x (Drx) y TerraSpec Halo

Se estudiaron 5 muestras puntuales previamente tratadas y pulverizadas mediante el difractómetro de rayos X (Drx) BRUKER modelo D8 ADVANCE del laboratorio de rayos X la UIS, sede Guatiguará. El estudio realizado fue el de registro de datos por Difracción de Rayos X para análisis cualitativos, y las condiciones de medición fueron indicadas en la tabla 4.

Tabla 4

Condiciones de la metodología del laboratorio de rayos X del informe NF-24120-DRX.

Condiciones	
Equipo:	BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci
Voltaje (kV)	40
Corriente (mA)	40
Rendija de Divergencia (mm)	0.6
Tamaño de Paso ($^{\circ}$ 2Theta)	0.02035
Tiempo por paso (s)	0.6
Radiación	CuK α 1
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	A pasos

Seguido a esto se graficaron los resultados en el programa Diffrac.Eva sobre el cual se trabajaron las bases de datos PDF-2 de 2021 del International Center for Diffraction Data ([ICDD](#)), y se obtuvo los respectivos difractogramas, identificando las series mineralógicas y posibles productos de alteración presentes en las muestras analizadas.

Para efectos de correlación en los resultados, se efectuó un sondeo de las muestras con el identificador mineral ASD TerraSpec Halo, proporcionado por la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (Figura 7E), que permitió reconocer mediante un espectro de reflectancia algunos de los minerales de alteración presentes.

Teniendo en cuenta el manual de usuario de ASD Inc. (2016), los resultados obtenidos son minerales identificados en la región del VNIR (Visible and Near Infrared), seguidos con los identificados en la región SWIR (Short-Wave Infrared). Finalmente, los datos son evaluados mediante estrellas, las cuales simbolizan la fiabilidad en la identificación mineral (Tabla 5).

Tabla 5

Interpretación de los resultados obtenidos mediante el ASD TerraSpec Halo

Cantidad de estrellas	Descripción
★★★	Alta fiabilidad de que la muestra contiene el mineral seleccionado. (> al 90%)
★★	Coincidencia razonable y/o moderada, podría existir interferencia o mezcla de minerales. (60-90% de fiabilidad)
★	Baja fiabilidad en la identificación mineral, ajuste espectral débil. (< al 60%)

Nota. Adaptado de ASD Inc. (2016).

5.5 Análisis petrográficos y mineralógicos

A partir de 10 secciones delgadas de muestras seleccionadas y estudiadas en el microscopio de luz transmitida NIKON Eclipse E200 (Figura 7F), se abarcó de manera general toda la sección. El análisis de las muestras se realizó en los laboratorios de petrografía avanzada de la Escuela de Geología, UIS, teniendo en cuenta la clasificación de Dunham (1962) para rocas calcáreas y el de Folk (1980) para rocas terrígenas.

5.6 Análisis quimioestratigráfico de los resultados

Se graficaron todos los resultados de los análisis geoquímicos mediante el software PAST 4.14 (Hammer et al., 2001), ubicando las gráficas e imágenes de secciones delgadas en un sentido estratigráfico. De esa forma se pudieron determinar las quimiofacies presentes sobre la sección estratigráfica, así como la interpretación paleoambiental de la sección. Para eso se tuvieron en cuenta las razones elementales descritas en la tabla 6.

Tabla 6

Proxies geoquímicos utilizados para definir procesos geológicos

Procesos geológicos	Relación elemental	Referencia principal
Paleoxigenación de fondo	Th/U	Lei Cao et al., (2021)
	Cu/Al	Dumman et al., (2021), Valdés, J. (2004).
	Ni/Al	
	V/Al	
Presencia de terrígenos	Log (Fe/Ca)	Govin et al., (2012)
Paleosalinidad	Sr/Ba	Wei & Algeo., (2020)
Procesos sedimentarios	Th/U	Lei Cao et al., (2021)
Granulometría	Zr/Rb	Croudace & Rothwell., (2015)
Paleoambientes	COT/S	Lashin et al., (2023)
Proveniencia sedimentaria	Al/Si	Croudace & Rothwell., (2015)

6. Resultados

6.1 Geoquímica

Para la valoración geoquímica se realizó una división en tres grandes aspectos tales como: sedimentología, paleosalinidad y paleoxigenación de fondo (Figuras 5-7). Para cada aspecto se graficaron las relaciones geoquímicas elementales con mayor afinidad, donde los valores representados previamente fueron normalizados (*normalized median-scaled*; NMS) para cada elemento y son dados en porcentaje en masa (%mass) en el apéndice A. Para una mejor comprensión de la sección estudiada, se siguió a la división del horizonte en tres segmentos estratigráficos, propuesta por Durán-Gómez (2024). Estos corresponden al segmento A (0-7.74 m), segmento B (10.74-16.31 m) y segmento C (16.31-20.62 m)

6.1.1 Sedimentología

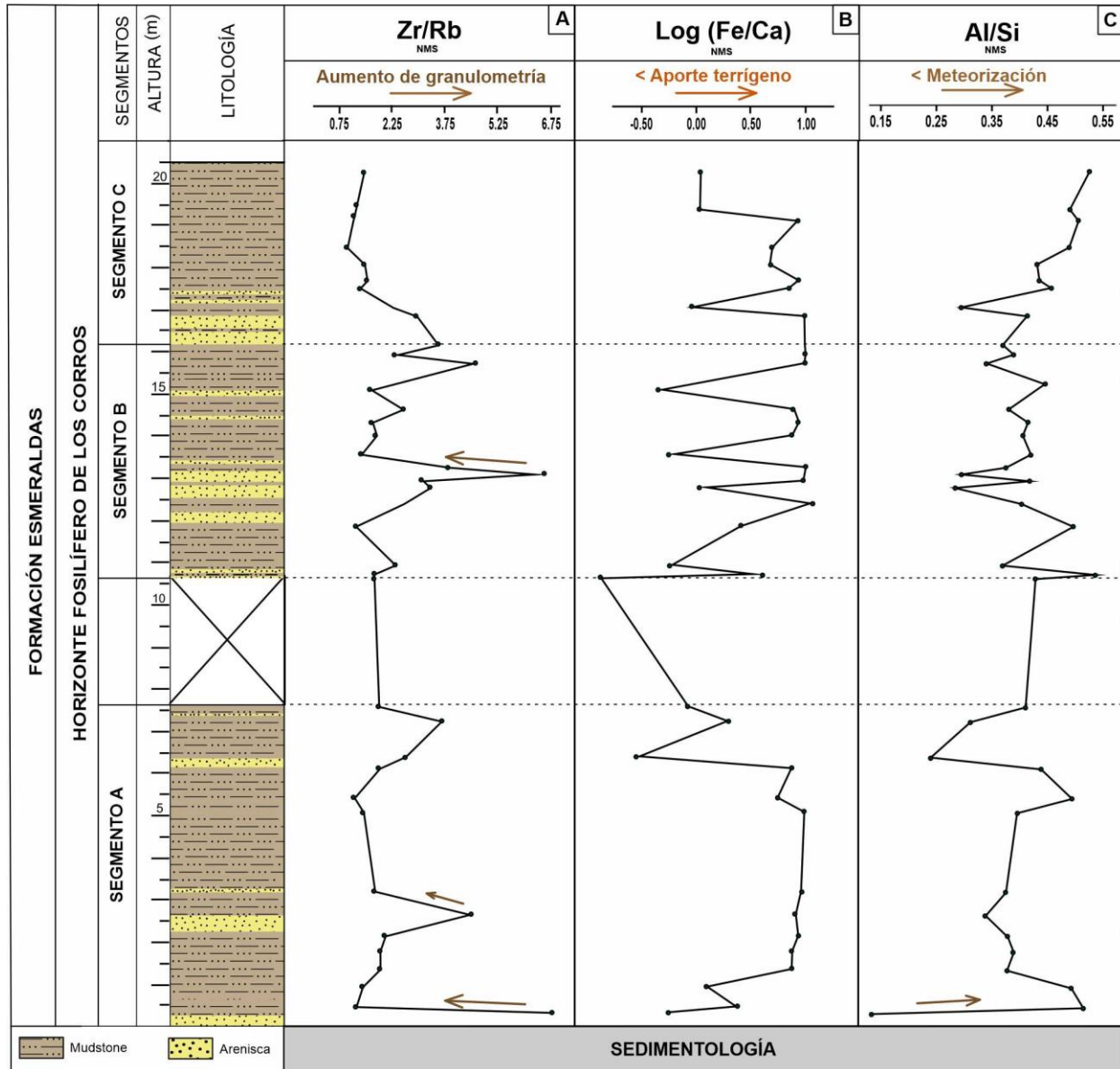
Los valores obtenidos de Zr/Rb en gran parte de la sección, presentan un rango entre 0.75 a 2.625, relacionados con los niveles finogranulares (Figura 8A). Además, se evidencian 3 picos de valores mayores siendo estos 6.786 (LC1 5.7), 4.417 (LC1 3.5), 6.247 (LC 4.5), que están asociados a los niveles con areniscas.

Con respecto a la relación de Log (Fe/Ca) en el segmento A, los datos comienzan con un leve aumento de -0.259 a 0.360 (Figura 8B). Seguido a esto, se refleja una tendencia continua de valores entre 0.740 a 0.981 y se presenta un decrecimiento de la muestra LC1 (0) con un valor de -0.515. Para el segmento B, ocurre de la misma manera, otra disminución de -0.864 correspondiente a la muestra LC (7.1) y en el resto de la sección se evidencian altibajos en los datos obtenidos, con picos bajos de un rango entre -0.330 a 0.093 y picos altos con valores entre 0.514 y 0.994.

La relación de Al/Si empieza con un valor de 0.135, luego, se da un aumento significativo hacia 0.517 (Figura 8C). Continuando la sección, los valores en la columna se mantienen entre 0.297 y 0.459. Sin embargo, en el segmento A, hay un decrecimiento en la muestra LC1 (0) de 0.241 y para el segmento C, las últimas 4 muestras exponen un aumento en los valores desde 0.491 hasta 0.528.

Figura 8

Distribución estratigráfica de los proxies geoquímicos utilizados para evaluar la sedimentología.



Nota. A) Zr/Rb para evaluar el aumento de la granulometría. B) Log (Fe/Ca) como indicador de aporte terrígeno. C) Al/Si, determina la meteorización en las muestras. Los segmentos estratigráficos del horizonte Fosilífero de Los Corros corresponden a los propuestos por Durán-Gómez (2024).

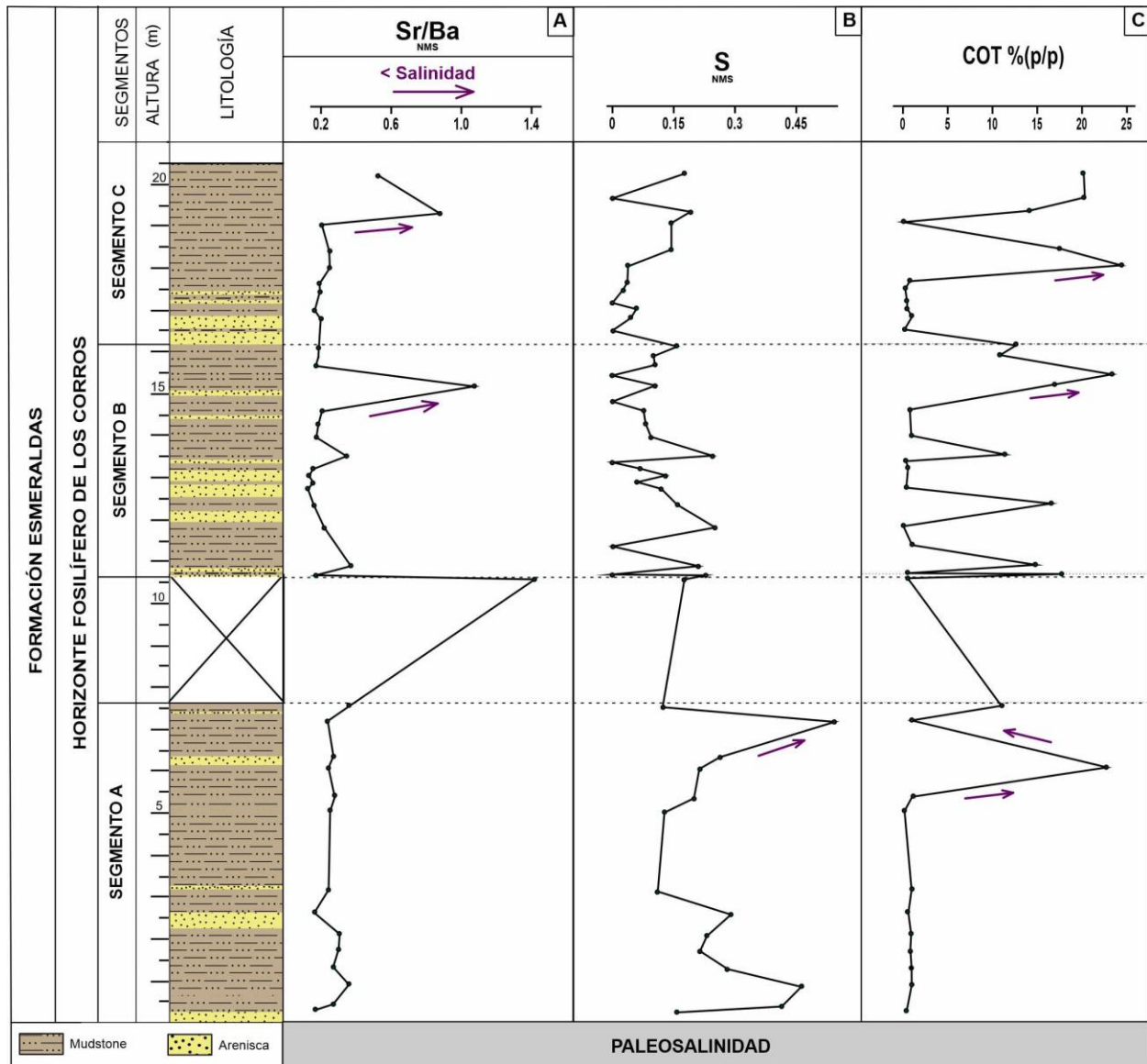
6.1.2 Paleosalinidad

La relación Sr/Ba permanece dentro de un rango de valores que están entre 0.1067 a 0.365 (Figura 9A). Sobresalen 3 picos positivos en las muestras LC (7.1), LC (2) y LC (-1.8) con valores de 1.413 1.067, 0.873 respectivamente. Para la curva del contenido de azufre (S) en el segmento A, se presenta un aumento importante en LC1 (-0.8) de 0.544. Para el segmento B y segmento C, los valores de las muestras presentan variabilidad en los picos entre muestras, dentro de un rango de 0.045 a 0.251 (Figura 9B).

El COT en el horizonte Fosilífero de Los Corros (Apéndice B), refleja valores muy constantes para el segmento A, hasta llegar a un pico significativo de la muestra LC1 (0.8), con un valor porcentual de 22.756, y posteriormente un decrecimiento de 0.912 % (Figura 9C). El segmento B, exhibe una variación significativa del COT en la cual los picos altos alcanzan valores de 20.261 % y los picos bajos presentan valores mínimos hasta 0.2 %. Además, sobresale un pico de gran valor en la muestra LC (1.9), con un valor de 23.313 %. Finalmente, para el segmento C se evidencia el mayor COT que corresponde a 24.327 % en la muestra LC (-0.6).

Figura 9

Distribución general de los proxies geoquímicos para evaluar la paleosalinidad.



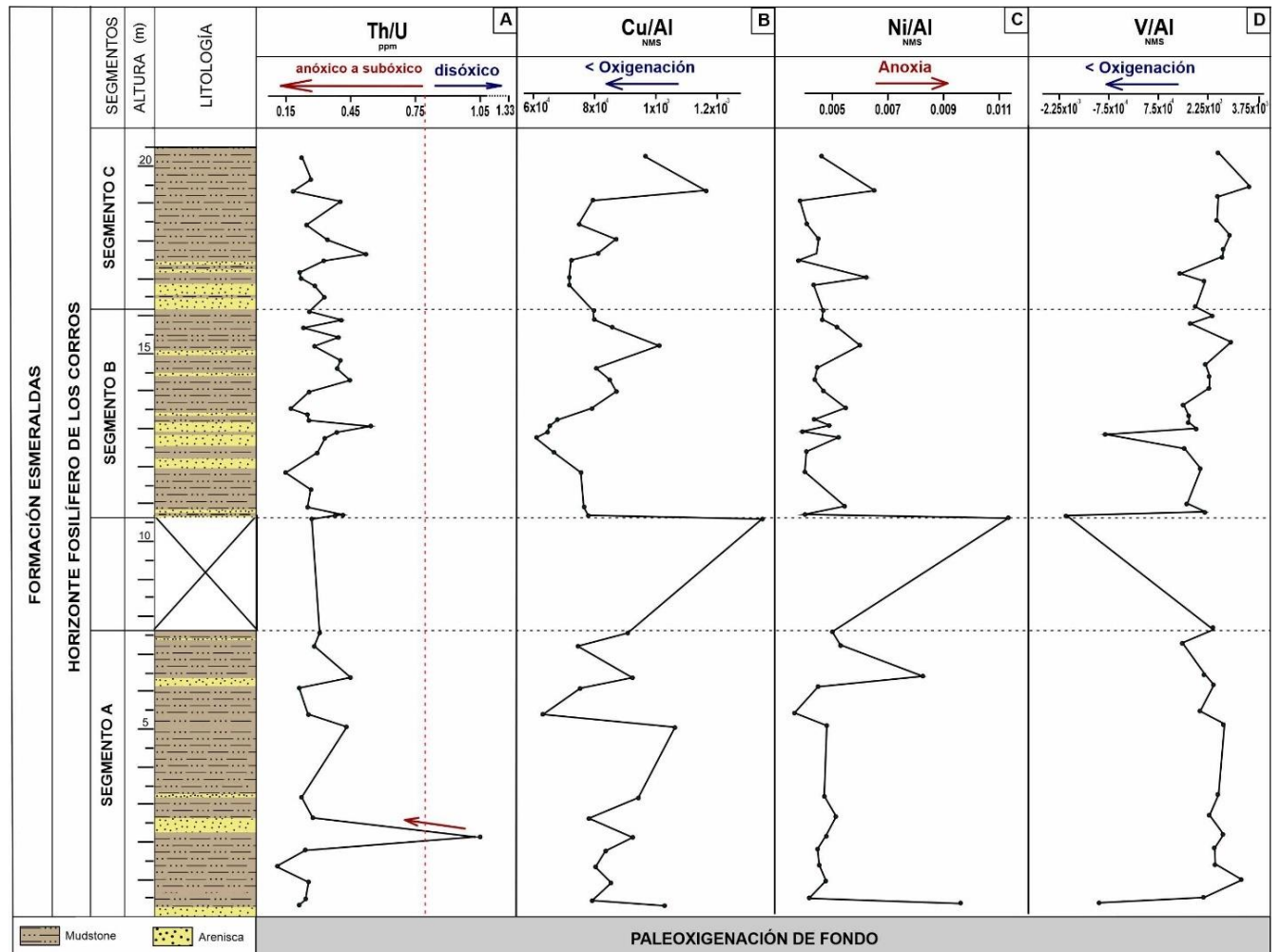
Nota. A) Sr/Ba, determina la salinidad en toda la sección. B), C) Gráficas de S y COT, evaluadores del contenido materia orgánica total en las muestras. Los segmentos estratigráficos del horizonte Fosilífero de Los Corros corresponden a los propuestos por Durán-Gómez (2024).

6.1.3 Paleoxigenación de fondo

La relación Th/U (ppm) sobre la columna estratigráfica presenta una tendencia similar en todo el horizonte con un rango entre 0.103-0.538 (Figura 10A). En el segmento A la muestra LC (3.8) tuvo un pico de aumento significativo de 1.023. Para los elementos sensibles a la oxigenación normalizados con el contenido de aluminio (RSE/Al), las curvas de Cu/Al y Ni/Al muestran continuidad en toda la sección. También, un aumento evidente entre el segmento A-B de 9.099×10^{-4} a 1.348×10^{-3} y de 4.98×10^{-3} a 1.132×10^{-2} respectivamente (Figuras 10B, Figura 10C). Caso contrario ocurre con la relación V/Al donde las mismas muestras LC (-1.2) y LC (7.1) presentan un pico negativo con valores presenten en un rango de 2.40×10^{-3} a -2.04×10^{-3} (Figura 10D).

Figura 10

Firmas geoquímicas para evaluar la paleoxigenación de fondo



Nota. A) Th/U y B-C-D) elementos sensibles a la oxigenación normalizados con el contenido de aluminio (RSE/Al) son evaluadores de oxigenación y/o anoxia en el medio. Los segmentos estratigráficos del horizonte Fosilífero de Los Corros corresponden a los propuestos por Durán-Gómez (2024).

6.2 Difractometría de Rayos X

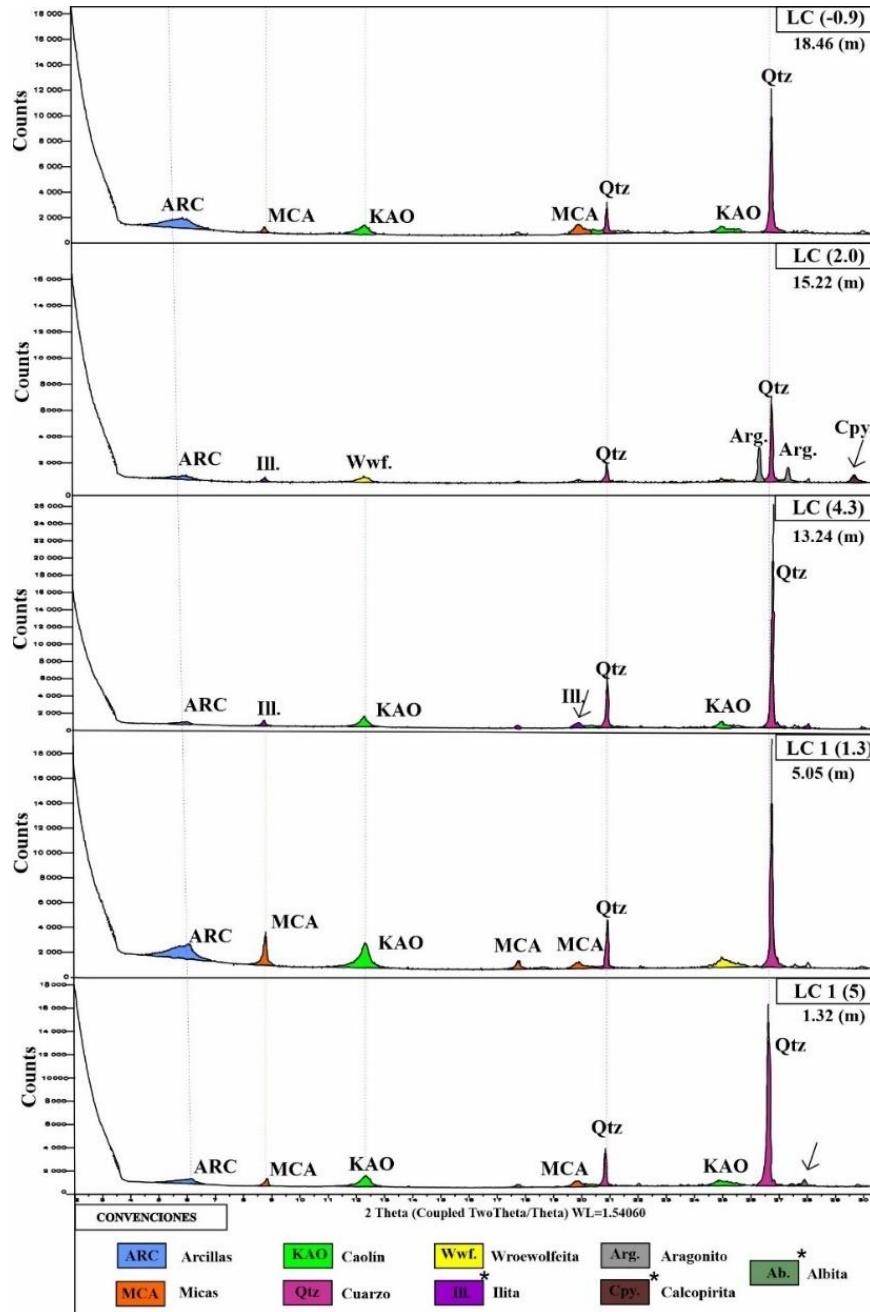
La caracterización mineralógica mediante Drx, se llevó a cabo en cinco muestras abarcando la columna estratigráfica, lo cual permitió establecer los diferentes tipos de mineralogía presentes mediante los difractogramas.

En el análisis cualitativo del horizonte se logró la identificación de diversas fases cristalinas repetitivas con línea punteada (Figura 11). Estas correspondieron a las siguientes fases minerales: cuarzo (SiO_2), biotita ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$) y moscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$). Además, minerales arcillosos como el caolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), o el grupo de los aluminosilicatos como las zeolitas, también fueron agrupados.

A lo largo de todo el afloramiento se destaca la predominancia de cuarzo, siendo el mineral principal, seguido por el grupo de las micas y los minerales arcillosos, mientras que los demás minerales (aragonito, dolomita, calcopirita, entre otros.) se encuentran en proporciones mínimas y puntualmente en algunas rocas. Por ejemplo, en la muestra LC1 (5.0) se observa una menor proporción de la plagioclasa sódica, específicamente la albita, mientras que en la muestra LC1 (1.3), encontramos una fase mineral del sulfato de cobre (wroewolfeita; $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Este mismo sulfato se presenta en la muestra LC (2.0), asociado al aragonito (CaCO_3), un mineral carbonatado, y en menor proporción a la calcopirita (CuFeS_2). Finalmente, en la muestra LC (4.3), se encuentra el mineral arcilloso illita ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$), aunque en una mínima proporción. Un aspecto importante a tener en cuenta es que, en las facies cristalinas del cuarzo, todas las muestras estuvieron acompañadas de grafito (C) y/o carbón sobre el mismo pico del difractograma

Figura 11

Difractogramas con las fases minerales del horizonte fosilífero de Los Corros



Nota. Los minerales con asteriscos (*) se encuentran señalados en las gráficas con una flecha, en las muestras LC1 (5), LC (4.3) y LC (2.0), para los minerales: albita, calcopirita e ilita respectivamente.

6.3 TerraSpec Halo

El análisis mediante el ASD TerraSpec Halo de la Escuela de Geología de la UIS se realizó en 48 muestras abarcando la columna en su totalidad (Apéndice D). Los resultados obtenidos fueron graficados teniendo en cuenta la altura estratigráfica y el número de muestra (Apéndice E). Para la identificación de cada mineral, se separó en dos grupos principales: 1) las arcillas, de las cuales se obtuvo 7 tipos de minerales arcillosos, y 2) el grupo llamado otros minerales, en los que se tuvieron en cuenta 4 minerales presentes en las muestras, expuestos en la tabla 7.

Tabla 7

Tipo de mineral obtenido mediante el ASD TerraSpec Halo con su fórmula química.

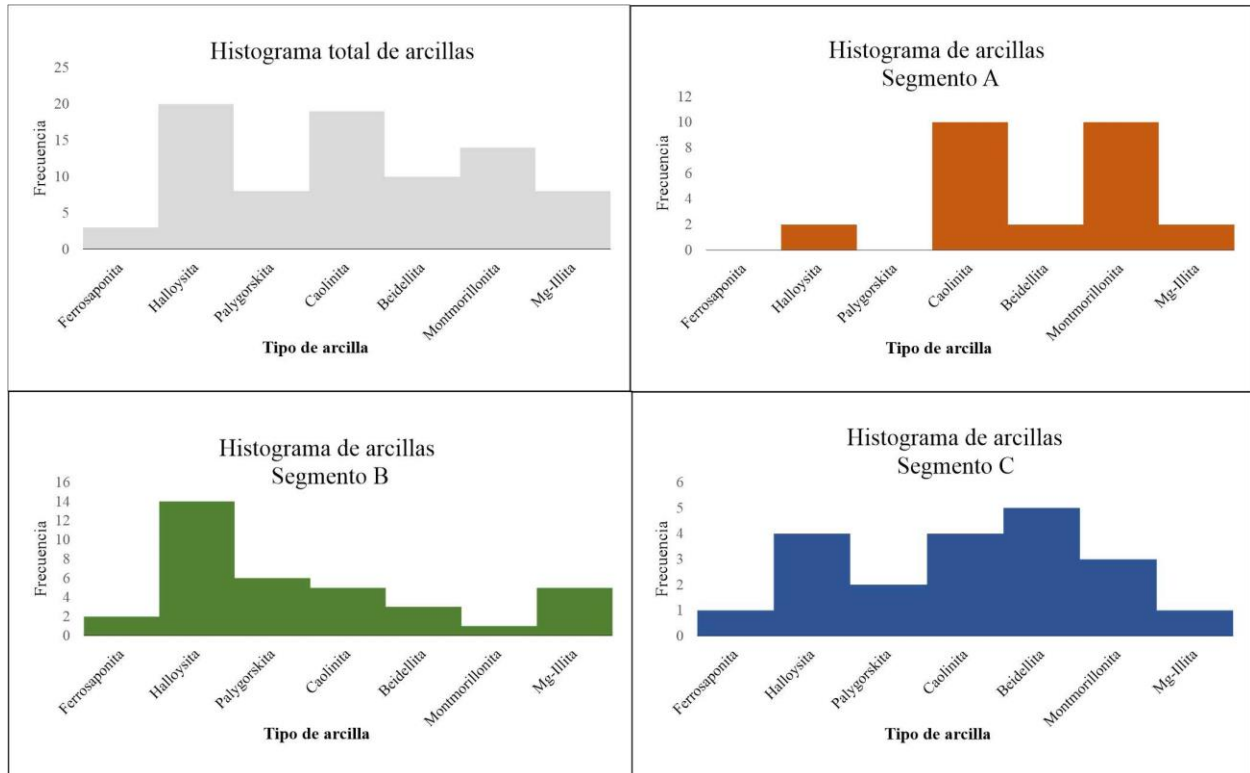
	Grupo	Mineral	Fórmula química
Arcillas	Caolinita	Halloysita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$
		Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
	Esmectita	Beidellita	$(Na,Ca_{0.5})_{0.3}Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
		Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
		Ferrosaponita	$Ca_{0.3}(Fe^{2+},Mg,Fe^{3+})_3((Si,Al)_4O_{10})(OH)_2 \cdot 4H_2O$
		Palygorskita	$(Mg_2Al_2)Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O$
	Illita	Mg-Illita	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$
Otros minerales	Hidróxido de hierro	Ferrihidrita	$Fe_3(OH)_8 \cdot 4H_2O_3$
		Goethita	FeO_2H
	Carbonatos	Calcita	$CaCO_3$
		Aragonito	$CaCO_3$

6.3.1 Minerales arcillosos

La predominancia de los minerales arcillosos se analizó mediante un histograma por segmento, así como el tipo de arcilla presente y su frecuencia. La halloysita y la caolinita correspondieron a los minerales arcillosos con mayor presencia en la sección con 20 y 19 muestras respectivamente (Figura 12). La mg-illita y palygorskita son las arcillas con menor frecuencia en la sección.

Figura 12

Histograma de las arcillas presentes en el horizonte fosilífero de Los Corros.



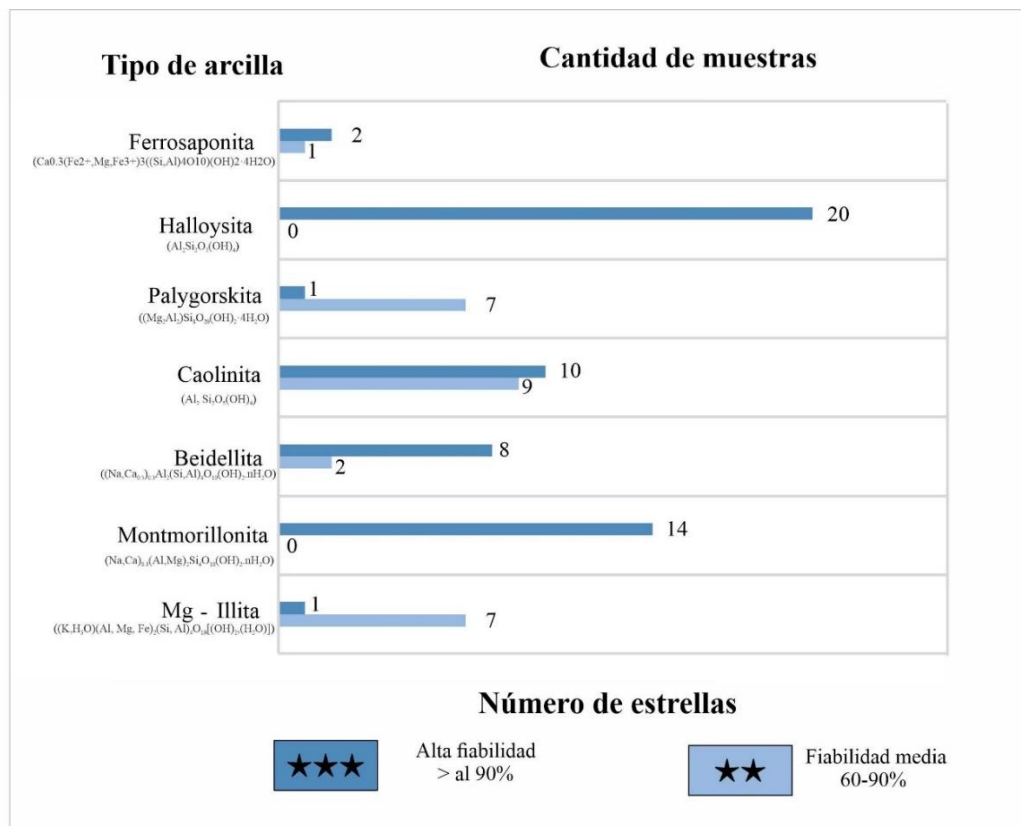
Nota. Se presentan los datos de toda la columna y separados por segmentos, según los propuestos por Durán-Gómez (2024).

Teniendo en cuenta los histogramas de la figura 9, para el segmento A las arcillas con mayor presencia corresponden a las arcillas, caolinita y la montmorillonita, con una frecuencia de 10 muestras. Continuando con el segmento B, el mineral arcilloso de la halloysita del grupo de la caolinita, tiene una frecuencia de 14 muestras, siendo la mayor cantidad de muestras para una arcilla en toda la sección. La menor frecuencia corresponde a la montmorillonita con solo una muestra. Finalmente, para el segmento C, el tipo de arcilla con mayor frecuencia es la beidellita con 5 muestras, continuando con la caolinita y halloysita, ambas con 4 muestras.

Para saber el número de estrellas y la fiabilidad de los minerales arcillosos en las muestras estudiadas, se realizó un gráfico de barras agrupadas horizontales (Figura 13). En él, se evidenció que las arcillas con alta fiabilidad (mayor al 90%) corresponden a la halloysita, un mineral del grupo de la caolinita (20 muestras), y a la montmorillonita, que hace parte del grupo de la esmectita (14 muestras). Otro mineral de alto reconocimiento es la ferrihidrita, presente en 21 muestras con tres estrellas y en 4 muestras con dos estrellas.

Figura 13

Gráfico de barras con el tipo de arcilla presente y la cantidad de estrellas obtenidas mediante ASD TerraSpec Halo.



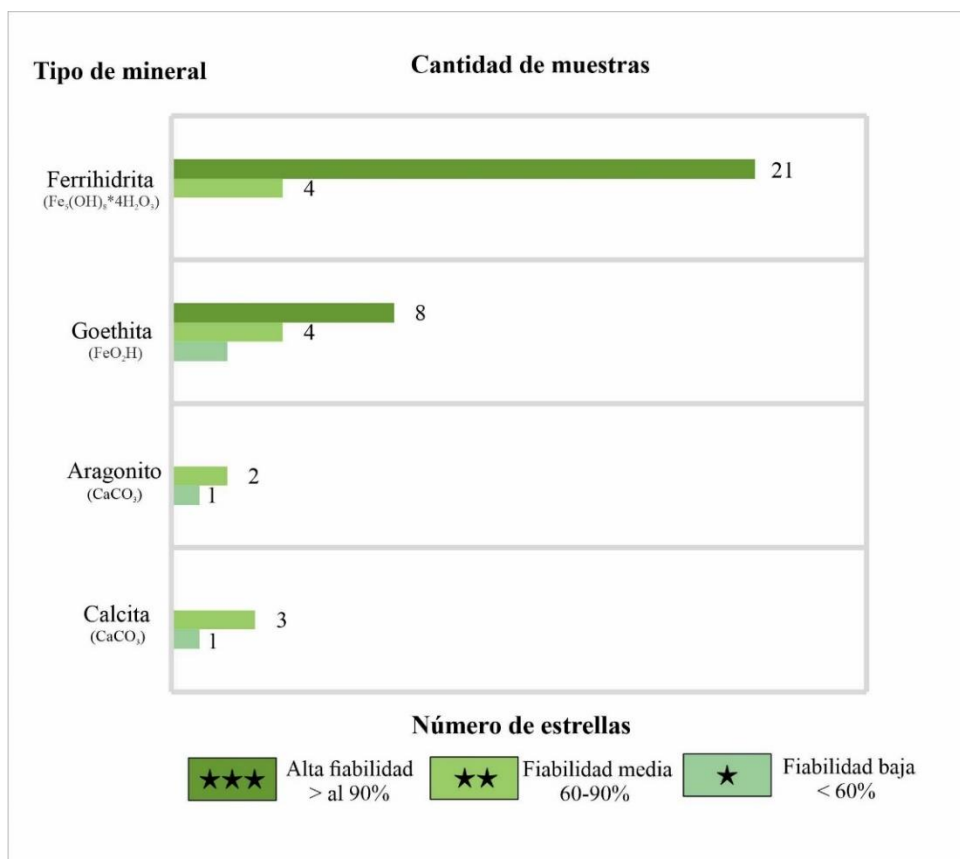
Nota. Para una mayor comprensión del significado de las estrellas, ver tabla 6.

6.3.2 Otros minerales

Se registraron otros minerales como los óxidos de hierro (goethita y ferrihidrita) en gran parte del muestreo y minerales carbonatados (calcita y aragonito) en muestras puntuales. La ferrihidrita está presente en 25 muestras, de las cuales 21 tienen 3 estrellas de fiabilidad y 4 tienen 2 estrellas (60 - 90% de coincidencia). En el caso de la goethita, 8:12 muestras son de alto reconocimiento, 4 de estas, tienen 2 estrellas y 2 muestras presentan baja fiabilidad en la identificación (1 estrella; >60%) (Figura 14).

Figura 14

Gráfico de barras con el tipo de mineral presente y el número de estrellas obtenidas mediante ASD TerraSpec Halo.



Nota. Para una mayor comprensión del significado de las estrellas, ver tabla 6.

Los carbonatos como el aragonito y la calcita están en las muestras presenten en la tabla 8. La veracidad de los resultados para el aragonito son 2:3 con 2 estrellas y una muestra con 1 estrella, mientras que en la calcita la relación es 3:3 y 1:3 respectivamente.

Tabla 8

Listado de muestras con minerales carbonatados

Muestra	Altura (m)	Mineral	# Estrellas
LC (-2.2)	19.68	Aragonito	1
LC (2.0)	15.22	Aragonito	2
LC (3.2)	14.31	Calcita	2
LC (7.0)	10.72	Calcita	2
LC (7.2)	10.6	Calcita	2
LC (0)	6.37	Aragonito	2
LC (5.7)	0.29	Calcita	1

6.4 Petrografía

Mediante mineralogía óptica se analizaron y caracterizaron diez secciones delgadas señaladas en la columna estratigrafía (Figura 15). A continuación, se describirán los principales componentes y procesos en cinco de las diez muestras. Las descripciones de roca total se encuentran en el Apéndice F.

Hacia el tope del horizonte, en la muestra LC1 (5.3) se observó en gran cantidad, granos de minerales ricos en óxidos (Ox), cuarzos monocristalinos de tamaño fino a muy fino (Qt), un fragmento de concha de 800 μm con un proceso de silicificación leve. Sobre toda la sección, se observaron partes de conchas de tamaño cercano a 1 mm, presentando una matriz calcárea y materia orgánica en baja proporción. Continuando sobre el segmento A, en la sección LC1 (1.3), los granos presentan un tamaño medio a grueso en micas como moscovita y biotita (Bt) con un tamaño aproximadamente de 500 μm , estando alterados algunos clastos. También, se evidenciaron cuarzos elongados, minerales de óxido y circones (Zrn) de alto relieve y con colores de

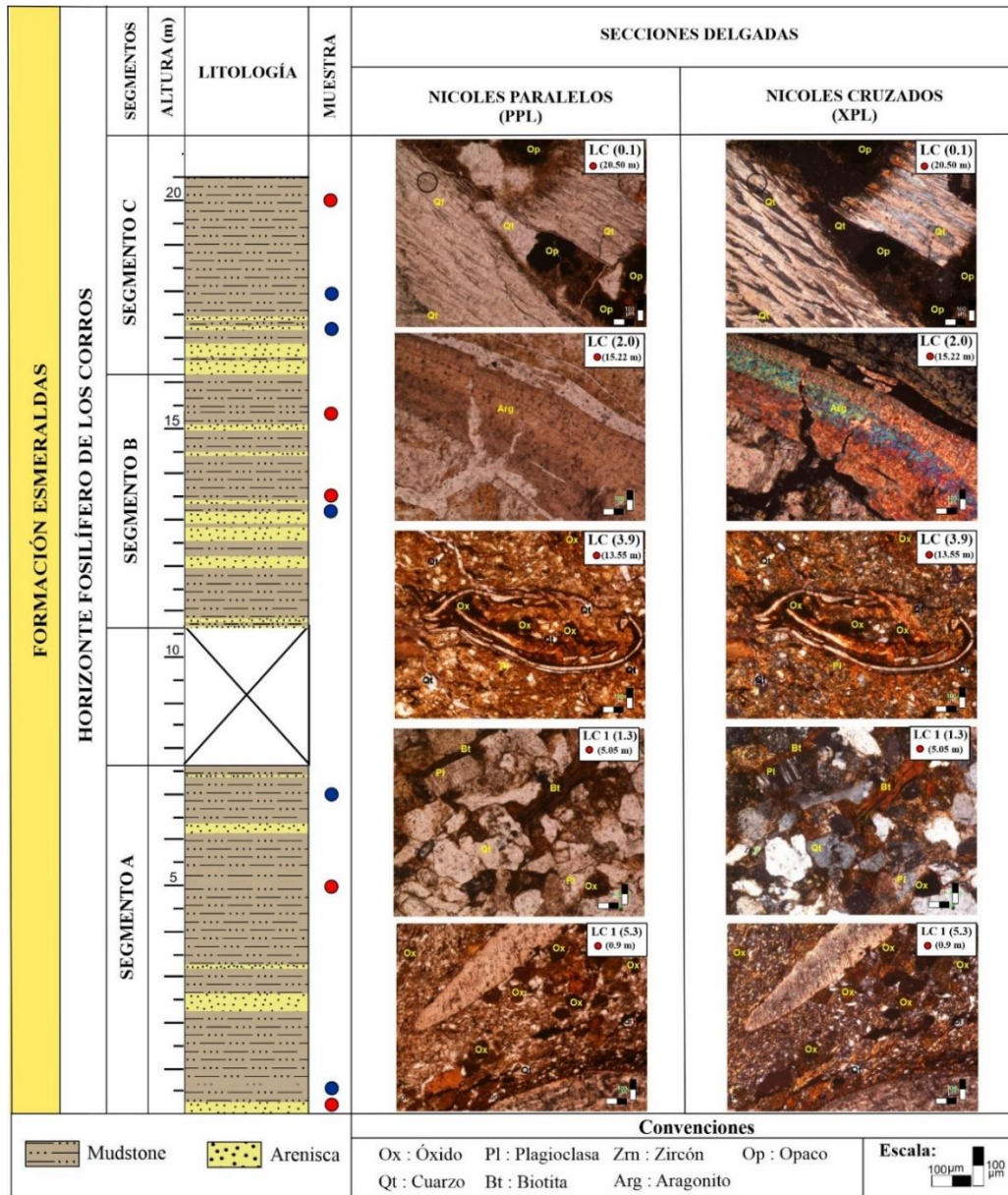
interferencia de tercer orden. Como se muestra en la figura 15, los clastos de plagioclasa (Pl) presentan macla polisintética, abundante alteración a arcillas como caolín y alteración a sericita y el contenido de materia orgánica es alto.

En el segmento B, la sección LC (3.9) permitió ver distintos fragmentos de conchas con buena preservación, con bordes oxidados y con un tamaño de 900 μm . La granulometría presente es de granos muy finos en cuarzo y medios para los minerales de óxidos. Se evidenció en la muestra abundante alteración a sericita. En la muestra LC (2.0) se identificó una concha desarticulada de aproximadamente 1.2 milímetros, donde sus colores de interferencia de tercer orden indicarían que la concha presentó calcificación diagenética, donde el aragonito (Arg) reemplazó los materiales originales de la concha.

Por último, hacia el tope de la columna, se observaron en la muestra LC (0.1) dos fragmentos de concha que abarcan gran parte de la sección, con bordes oxidados y acompañada de cuarzos y minerales opacos de tamaño medio. Se evidenció en medio de las conchas otro proceso diagenético que alteró parcialmente el fósil, en el cual la concha calcárea y/o los espacios vacíos en su estructura fueron reemplazados o rellenados por cuarzo (sílice SiO_2).

Figura 15

Columna estratigráfica con la ubicación de las secciones delgadas tomadas mediante microscopio NIKON Eclipse E200.



Nota. Las imágenes corresponden a 5 secciones delgadas ubicadas según su altura respectivamente en nicoles cruzados (XPL) y paralelos (PPL). Los segmentos estratigráficos del horizonte Fosilífero de Los Corros corresponden a los propuestos por Durán-Gómez (2024).

6.4.1 Determinación litológica a partir de proxies

Se tuvieron en cuenta los criterios basados en proxies geoquímicos de Herron (1988) y Craigie, (2018), referidos para clasificar areniscas en la tabla 9. Por ejemplo, la relación Si/Al se exploró para establecer el tipo de litología asociada a las muestras colectadas.

Tabla 9

Reglas generales para establecer la litología en masa de rocas sedimentarias utilizando datos geoquímicos

Razón elemental o elemento	Valor (%mass)	Tipo de roca
Si/Al	<5	Arcillolita o Lutita
	5-6	Limolita
	6-8	Arenisca arcillosa
	>8	Arenisca no arcillosa
Ca	7-15%	Calcárea
	>20%	Caliza, Dolomita, Yeso, Anhidrita
	30-40 %	Dolomía

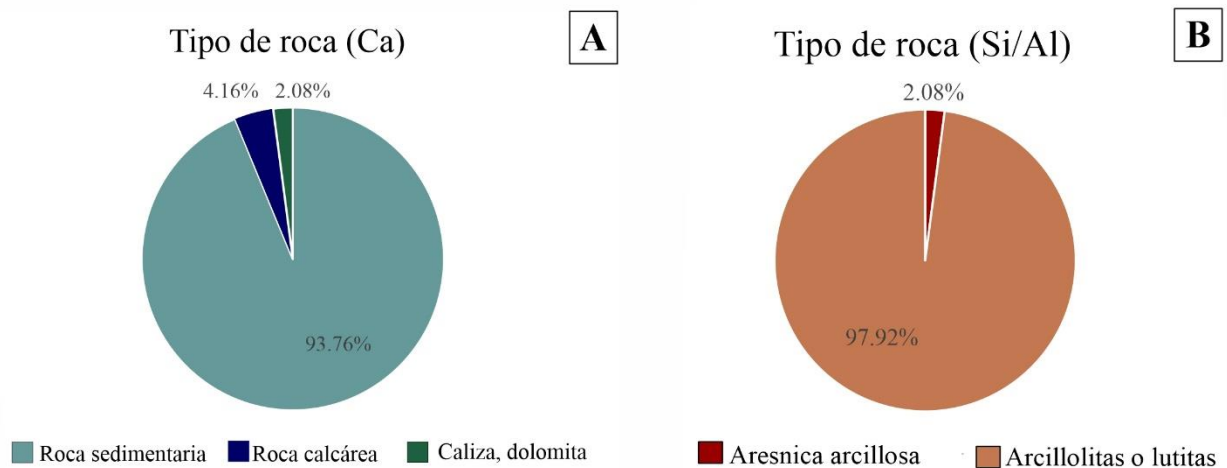
Nota. Tomado y adaptado de Craigie (2018).

A partir de los datos de Frx, se realizó la razón elemental Si/Al (Apéndice A) de la tabla de datos de Frx y se obtuvo que 36 de 37 muestras presentan valores inferiores a 5 en %, clasificándose como arcillolitas o lutitas. Solo un valor (LC1 5.7) arroja un valor de 7.39%, y por ende su litología correspondería a una arenisca no arcillosa (Figura 16A)

Con respecto a los valores de calcio (Ca), 34 de 37 muestras presentan valores inferiores al 7% y dos muestras, la LC1 (0) y LC (-1.8), tienen valores de 8% y 8.1% respectivamente, siendo estas rocas calcáreas. Finalmente, la muestra LC (7.1) presenta el porcentaje mayor con un valor de 21.8% clasificándose como una caliza o dolomita (Figura 16B).

Figura 16

Gráfico circular de los tipos de roca, según el elemento Ca y la relación Si/Al



Nota. Se tuvo en cuenta la clasificación de rocas de Craigie (2018) en la tabla 9.

6.5 Determinación de quimiofacies

Se determinó a partir de los proxies geoquímicos, los datos de COT y la relación Th/U obtenida mediante gamma ray, tres zonas quimioestratigráficas (A, B, C) y dos subzonas (A1 y A2), basadas en las curvas geoquímicas de la figura 17.

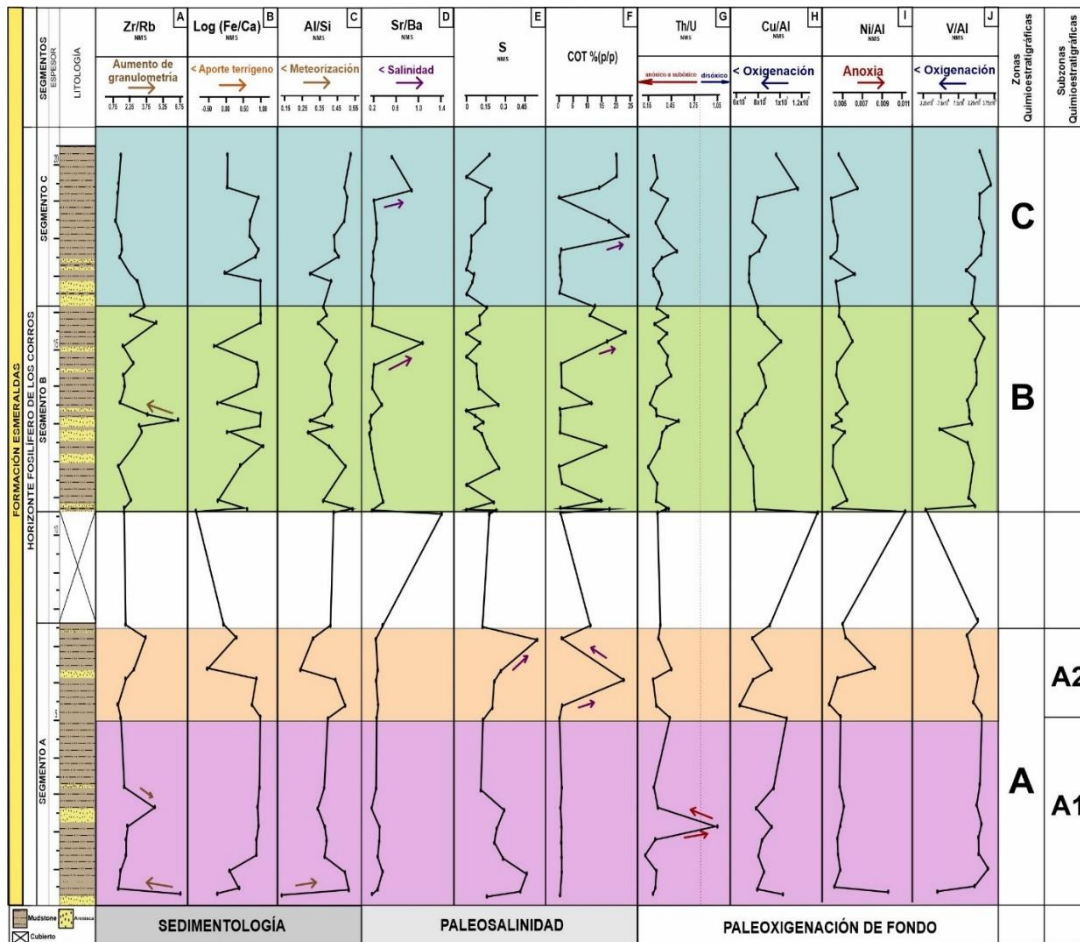
La quimiozona A (0 – 7.74 m) se subdivide en dos subzonas quimioestratigráficas. La subzona A1, presenta una tendencia constante en los valores de las muestras, con relación al aporte terrígeno (Log (Fe/Ca), paleosalinidad (Sr/Ba), COT, y continua este patrón en los RES/Al. Sin embargo, se evidencian en la figura 17, tres aumentos importantes: un aumento de granulometría (Zr/Rb), aumento de la meteorización (Al/Si) y una transición a condiciones más óxicas (Th/U).

La subzona A2, inicia con un aumento en el COT, la concentración de S y las relaciones paleoredox como Ni/Al y Cu/Al. A su vez, proxies como Log (Fe/Ca) y Al/Si tuvieron picos menores para esta subzona.

En la quimiozona B (10.74-16.31 m), se evidenciaron múltiples fluctuaciones significativas, como las relaciones de sedimentología (Zr/Rb, Log (Fe/Ca) y Al/Si) y las de paleosalinidad (Sr/Ba, S y COT). Para la paleoxigenación de fondo, los datos mantienen un margen de valor similar, lo que evidencia que las condiciones paleoredox fueron constantes. Finalmente, en la quimiozona C (16.31-20.62 m), a diferencia de la quimiozona B, los valores vuelven a ser similares entre sí, como se evidencia en el Zr/Rb, el S y todas las relaciones del paleoxigenación de fondo (Th/U y todas las RES/Al). En esta quimiozona resaltan dos picos de alto valor para la relación de Sr/Sa y el contenido de materia orgánica.

Figura 17

Zonas y subzonas quimioestratigráficas del horizonte fosilífero de Los Corros.



7. Discusión

7.1. Zonas quimioestratigráficas

Las tres zonas quimioestratigráficas identificadas en la sección coinciden con los segmentos estratigráficos previamente establecidos por Durán-Gómez (2024). Esta clasificación quimioestratigráfica permitió realizar un análisis más detallado de aspectos a evaluar en el horizonte como lo fueron su sedimentología, y las condiciones de paleosalinidad y paleoxigenación de fondo.

7.1.1 Aspectos sedimentológicos

La tendencia granulométrica de la columna estratigráfica, basada en la relación Zr/Rb , se mantiene constante en las lodolitas. Este comportamiento se evidencia en la figura 15, donde las muestras ubicadas en zonas de bajo aumento de granulometría, presentan un tamaño de grano muy fino a fino característico de lodolitas, limolitas y arcillolitas. En el horizonte estudiado, se identificaron tres eventos significativos de aumento de granulometría en las muestras LC (5.7), correspondiente a una arenisca basal, la muestra LC (3.5) y la muestra LC (4.5). Estos incrementos sugieren que los picos más altos de Zr/Rb están asociados con un mayor número de partículas de tamaño de grano medio, depositadas por procesos de saltación, tal como lo mencionan Croudace y Rothwell (2015). Este patrón coincide con lo observado en sistemas sedimentarios detríticos, donde, según Vera (1994), los sedimentos de mayor tamaño de grano tienden a depositarse en zonas más proximales, mientras que los de menor granulometría se acumulan en sectores distales.

El aporte terrígeno a lo largo de la sección mostró una variabilidad significativa. En la quimiozona A, se registraron valores elevados con una tendencia continua de mayor aporte terrígeno. Estos altos valores del Log (Fe/Ca) podrían indicar un incremento en la entrada de material continental, asociado a procesos de erosión o transporte fluvial (Govin et al., 2012). El

principal aporte continental está dado por la presencia de minerales de óxidos de hierro, como ferrihidrita y goethita. Estos minerales son abundantes en toda la sección, como lo evidencian sus tonalidades pardas en las secciones delgadas (Apéndice F) y su frecuencia en las rocas (37 muestras) según las mediciones del TerrasSpec Halo (Figura 13). Estos minerales son de neoformación y provienen de la alteración de rocas y suelos, tal como lo señala Sánchez et al. (2013).

Sin embargo, en la subzona A2, el aporte disminuye, alcanzando valores negativos, lo que podría estar asociado a un episodio de menor aporte terrígeno y mayor aporte de COT, sugiriendo una posible trasgresión episódica durante ese intervalo. Este fenómeno sugiere la presencia de recirculación de aguas que habrían permitido la depositación de la materia orgánica y un aumento de la granulometría. Al pasar de la quimiofacies A a la quimiofacies B, se observó un nuevo decrecimiento en el aporte terrígeno. En la quimiozona B, la variación en el aporte fue más fluctuante, presentando picos altos y bajos entre muestras. Finalmente, en la quimiozona C, el aporte de material terrígeno fue alto, sobresaliendo un intervalo en donde ocurrió un aumento en la salinidad y mayor anoxia.

A lo largo de la sección estudiada, el proxi de Al/Si presentó valores elevados en algunos intervalos, lo que sugiere episodios con condiciones de intensa meteorización química. Estos episodios favorecieron la transformación de la plagioclasa en minerales arcillosos, algo reportado principalmente en litologías de grano fino (Cao et al., 2021). Esta relación elemental, al ser un indicador de meteorización química, permite evaluar la proporción relativa de arcillas en comparación con las areniscas (Croudace & Rothwell, 2015), lo que confirma estos procesos de transformación y resistencia mineralógica en la sección estudiada.

La meteorización química involucra alteraciones tanto en la composición química como la mineralógica de las rocas, producto de la interacción con factores como el agua y los gases atmosféricos disueltos (oxígeno, dióxido de carbono), lo que ocasiona que algunos componentes de los minerales se disuelvan y se eliminen en solución. (Boggs, 1987). Sin embargo, el cuarzo, debido a su estructura compacta, es uno de los minerales más resistentes a la alteración, por lo que su abundancia en todo el horizonte era esperable. Esta presencia se observa en las secciones delgadas, donde únicamente varían su tamaño y forma (Figura 15), y en los picos máximos de cada muestra analizada mediante DRX. Esto último va en línea con lo mencionado por Campos Vilanova (1981) sobre la estabilidad del cuarzo en ambientes de alteración.

7.1.1.1 Implicaciones sedimentológicas de las arcillas. Las arcillas son minerales que estuvieron presentes con variaciones en la intensidad de sus picos, como se observa en los análisis de DRX (Figura 11). En litologías de grano fino, como lodolitas o limolitas, la señal de las fases arcillosas es más intensa, mientras que en areniscas su proporción es considerablemente menor. Un ejemplo de esto es la muestra LC (4.3), correspondiente a una arenisca, cuyo difractograma indicó una baja concentración de minerales arcillosos.

El análisis petrográfico (Apéndice F) respalda esta interpretación, sugiriendo que la alteración de la plagioclasa está asociada principalmente a estos procesos de meteorización química. Este proceso de meteorización implica la remoción de Na y Ca, transformando la plagioclasa en minerales arcillosos como illita, montmorillonita y caolinita identificados previamente en nuestros análisis (Figura 12) y documentados en estudios previos (Cao et al., 2021; Govin et al., 2012). Adicionalmente, procesos diagenéticos como la disolución y la albitización de la plagioclasa, la illitización de esmectita y la deshidratación de minerales arcillosos, favorecen la liberación del Sr de los minerales carbonatados y minerales silicoclástico. (Sullivan et al., 1990;

Feldman et al., 1993; Salminen et al., 2005; Yang et al., 2004a, 2004b, 2006). Estas transformaciones pueden estar directamente relacionadas con las variaciones en la concentración de Sr registradas en la sección de San Silvestre.

A partir de los minerales arcillosos obtenidos mediante el análisis de Terraspec Halo, y la identificación mineral mediante el Drx, se identificó la presencia de caolinita y montmorillonita (minerales arcillosos ricos en Na y Al) en la quimiozona A. Esta presencia podría ser el resultado de la transformación de la plagioclasa presente, el alto porcentaje de minerales de arcilla de grano fino o arena fina, y un bajo grado de saturación de agua (Zeevaert-Wiechers, 2000). La alta frecuencia de caolinita y montmorillonita en el segmento A se evidencia en los difractogramas de dos de las muestras de este segmento (LC1 (5) y LC1 (1.3); figura 11) y en los histogramas (10 muestras; figura 12). La aparición de estos minerales arcillosos sugiere que la alteración de los feldspatos dependería de la dinámica de fractura de los minerales y la separación de los constituyentes liberados. Además, la alta abundancia de caolinita también podría asociarse a su origen en condiciones de intensa meteorización química en ambientes húmedos (Bonatti y Gartner, 1973).

Para la quimiofacies B, la halloysita es el mineral más frecuente, presente en 14 muestras (Figura 12). Este mineral arcilloso hidratado, perteneciente al grupo de la caolinita, se forma en condiciones más húmedas, y su presencia se confirmó mediante análisis petrográficos en las muestras de esta quimiofacies (LC (4.3), LC (3.9) y LC (2)). En esta quimiofacies, la concentración de otros minerales arcillosos disminuye, como se observa en los difractogramas de las muestras mencionadas. El paso de caolinita a halloysita se debería entonces a la presencia de agua en la zona, lo que provoca el hidratamiento de este mineral (Zeevaert-Wiechers, 2000).

Por otro lado, en la quimiofacies C, la mineralogía de las arcillas es más diversa, con una mayor frecuencia de beidellita (grupo de las esmectitas), seguida por halloysita y caolinita (grupo de la caolinita). La abundancia de beidellita podría estar relacionada con una alta disponibilidad de sílice en el ambiente, ya que este mineral se caracteriza por reemplazos de silicio por aluminio en su estructura (Baltuille et al., 2000). No obstante, para una caracterización más precisa de las arcillas presentes en la sección, es necesario emplear técnicas especializadas, como difracción de rayos X de arcillas y microscopía electrónica de barrido (SEM), las cuales permiten analizar con mayor detalle la morfología y estructura de estos minerales a escala microscópica.

7.1.2 Inferencias de paleosalinidad

De acuerdo con la gráfica (Figura 17), se observó una tendencia estable en gran parte de los valores del índice de salinidad, medidos a partir del proxy Sr/Ba, los cuales se mantienen cerca de 0.2. Este comportamiento sugiere que la salinidad de la sección varía entre el paso de agua dulce a agua salobre con una baja salinidad de forma general (Wei, & Algeo, 2020; Lashin et al, 2023). Sin embargo, la curva de Sr/Ba también muestra tres fluctuaciones significativas con valores superiores a 0.5, lo que indicarían la presencia de facies marinas (Wei, & Algeo, 2020).

Los picos observados en la transición entre la quimiozona A y B, así como en la quimiozona C cerca del tope, corresponderían a intervalos asociados a facies salobres, dado que estas aguas se originan principalmente por la mezcla de agua dulce y agua de mar de acuerdo con trabajos que han explorado la relación Sr/Ba (Wei & Algeo, 2020).

Las estimaciones de paleosalinidad de este trabajo coinciden con lo propuesto por Durán-Gómez (2024), quien mediante la presencia de *Diplocyma wheeleri* sugiere en el horizonte fosilífero de Los Corros sugiere condiciones de aguas salobres asociadas a ecosistemas de manglar. La distribución estratigráfica de los fósiles descrita por Durán-Gómez (2024) y su

inferencia sobre la salinidad, basada en la aparición de los fósiles en los tres segmentos analizados en este trabajo, indican que en los niveles más bajos del registro el ambiente estuvo dominado por aguas dulces a salobres tropicales, evidenciado por la presencia del gasterópodo *Aylacostoma lataguensis* y de plantas angiospermas (Camacho & Longobucco, 2008 en Durán-Gómez, 2024). Posteriormente, según este autor, el predominio de *D. wheeleri* sugiere un aumento en la salinidad, lo que caracteriza un ambiente más salobre. Finalmente, en los niveles superiores, equivalentes a la quimiozona C. Durán-Gómez (2024) reportó una mayor diversidad de fósiles, sugiriendo la coexistencia de comunidades bentónicas propias de ambientes fluvio-lacustres como los reportados en la Amazonía y los Llanos Orientales para el Mioceno (Wesselingh, 2006; Gómez et al., 2009).

Sin embargo, la interpretación de la relación Sr/Ba requiere una valoración sedimentológica adicional de las muestras antes de ser validada. De acuerdo con el análisis estratigráfico y petrográfico de las muestras seleccionadas, corresponden a rocas con un alto contenido de bioclastos. Un ejemplo de ello es la muestra LC (2) ubicada a 15.22 m, la cual presentó uno de los picos anómalos observados de la relación Sr/Ba de altura y de acuerdo a los análisis petrográficos corresponde a un packstone lodoso (Dunham, 1962) o biomicrita (Folk, 1980) y se identificó un proceso de diagénesis conocido como aragonitización (Figura 15). De acuerdo con la fase mineral obtenida en el Drx en la misma muestra, la transformación de las conchas fue hacia su polimorfo aragonito. Durante la diagénesis temprana, la disolución de minerales carbonatados en sedimentos con alto contenido de materia orgánica puede generar fluidos con alta saturación de CaCO_3 , favoreciendo la formación de aragonito (Vilas & Fernández, 1993). En sedimentos someros, la disolución de carbonatos ocurre en el agua intersticial debido a la oxidación del COT sedimentario (Martin y Sayles, 1999; De Villiers, 2005). Este proceso de

diagénesis sugiere entonces que los factores como la composición química del agua, la salinidad y/o la temperatura pudieron incidir en las características geoquímicas de esta muestra.

Finalmente, la curva de S se mantuvo en valores inferiores a 0.5 % en peso, lo que podría sugerir un entorno no marino y de agua dulce (Lashin et al., 2023). Sin embargo, la relación elemental S/COT, un proxy también utilizado para inferir paleosalinidad, no pudo ser establecida en la sección de San Silvestre debido a que los estudios geoquímicos se realizaron en distintas porciones de la muestra, y los datos actuales de S provienen de los análisis por Frx, lo que no permite garantizar una correspondencia directa entre ambas mediciones. Para futuros análisis, se considerará la relación S/COT para definir el contenido de sales disueltas en agua ya sea agua dulce, facies salobres y marinas (Wei, & Algeo.,2020).

7.1.2.1 Implicaciones de la materia orgánica. El contenido de materia orgánica (MO) en la sección mostró variaciones significativas, las cuales reflejan cambios en el aporte sedimentario y las condiciones paleoambientales. En la quimiofases A, subzona A1, se registró un bajo y continuo contenido de MO, con un promedio de 0.712% COT, lo que sugiere un predominio del aporte continental sin influencia marina significativa. Sin embargo, en el subnivel A2, se observó un aumento significativo de MO, asociado a condiciones más anóxicas en el ambiente, lo cual se evidencia a través de las relaciones geoquímicas Th/U, Cu/Al y Ni/Al. Para las siguientes quimiofacies, la concentración de MO presentó fluctuaciones entre muestras, con picos elevados de carbono orgánico total (COT) de hasta 24.327% (LC -0.6) y mínimos de 0.120% (LC 0.85), lo que sugiere que las condiciones subanóxicas a anóxicas pudieron favorecer la preservación de la materia orgánica durante la depositación en estos segmentos (Lashin et al., 2023).

La depositación de sedimentos con alto contenido de COT está influenciada por diversos factores, como la alta productividad primaria cerca de la costa, una mejor conservación del COT

asociada a una alta tasa de depositación y a la proximidad de la fuente de COT terrígeno (Stein, 1991). En los sedimentos, los procesos biogeoquímicos de remineralización de materia orgánica proporcionan casi toda la energía requerida para las transformaciones químicas que ocurren durante la diagénesis temprana (Wefer et al., 2003).

Las secciones delgadas del apéndice F, evidencian cambios en la disposición cristalina de la materia orgánica (MO), reflejadas en variaciones en su proporción y puede encontrarse con laminación interna bien definida con los minerales opacos (Muestra LC (4.3) - 13.38 m). Asimismo, los difractogramas (Figura 11) confirman la presencia de grafito en algunas muestras, lo que sugiere que la transformación de la MO a grafito podría estar vinculada a procesos de metamorfismo de bajo grado o a fluctuaciones en la paleoxigenación. En ambientes someros, la MO no se descompone por completo en los procesos biogeoquímicos habituales, lo que favorece su preservación y posterior transformación (Tissot & Welte, 1984).

7.1.3 Condiciones de paleoxigenación del horizonte fosilífero

La relación Th/U en la sección analizada mostró un comportamiento mayormente homogéneo, con un valor promedio de 0.312 ppm. Como se observa en la figura 17, la curva de este proxy se mantuvo en valores bajos, lo que sugiere un enriquecimiento en el uranio autigénico (Cao et al., 2021). La columna de agua preexistente en el horizonte de Los Corros se desarrolló predominantemente bajo condiciones subóxicas a anóxicas, como se infiere a partir de los valores obtenidos en la sección, los cuales fueron inferiores a 0.8 y se encuentran dentro de los umbrales redox calibrados por Jones y Manning (1994). Estas condiciones habrían favorecido un ambiente adecuado para la formación y preservación de materia orgánica, como se observó a lo largo de la sección.

En contraste, se registró un pico elevado de anoxia en la muestra LC1 (3.8) en la quimiozona A (Figura 17), donde la relación Th/U alcanzó un valor de 1.02, lo que sugiere condiciones de agua anóxica (Cao et al. (2021). Este aumento indicaría que hubo una tasa de sedimentación muy rápida para ese intervalo, acompañada por la reducción en la disponibilidad de oxígeno (Goodarzi et al., 2019; Goodarzi, 2020; Goodarzi et al., 2020). En el análisis petrográfico realizado, se evidenció por ejemplo un predominio de muestras de grano fino, lo que facilitó la identificación del tipo de litología predominante en la sección. Sin embargo, esta característica dificultó la detección de procesos diagenéticos y la identificación detallada de los minerales presentes (Apéndice F). De acuerdo a estudios previos, en ambientes con bajos niveles de oxígeno, la actividad bioturbadora es menos frecuente, lo que favorece la deposición de sedimentos finos (Savrda & Bottjer, 1991).

Los elementos sensibles al redox conocidos como RES son reactivos a los cambios en las condiciones de oxigenación del entorno y tienen variaciones en el estado de oxidación y solubilidad en función del estatus redox (Algeo & Lyons, 2006; Valdés., 2004; Cao et al., 2021).

Por esta razón, se analizaron los proxies de Ni, Va y Cu sobre aluminio, dado que elementos como el Al y Ti son considerados elementos inmóviles debido a la baja solubilidad de sus óxidos e hidróxidos (Hayashi et al., 1997). Estos elementos se precipitan en el sedimento principalmente en asociación con la MO (Dean et al., 2006). En el material analizado en el horizonte, se observó que la curva de V/Al presentó picos de bajo valor y patrones opuestos en comparación con los demás RES estudiados. Un ejemplo de ello es la muestra LC 7.1 (10.7 m), ubicada en la quimiozona B, donde las relaciones de Ni/Al y Cu/Al, muestran picos representativos, lo que sugiere que este intervalo correspondería al momento de mayor anoxia en la sección analizada (Figura 17). En contraste, el registro de V/Al en la misma muestra, presenta un rango de valores

muy bajos, lo que podría explicarse por la variabilidad de la valencia del vanadio en función del potencial redox (Valdés, 2004). Este elemento es más soluble bajo condiciones oxidantes y menos soluble en ambientes reductores.

Las condiciones de oxigenación del fondo en el horizonte fosilífero de Los Corros sugieren un entorno de aguas restringidas, según lo indican las evidencias geoquímicas y sedimentológicas. Las gráficas de Cu/Al y Ni/Al exhiben un patrón de fluctuaciones similar, lo que puede atribuirse a la formación de sulfuros insolubles bajo condiciones anóxicas en ambos elementos (Calvert & Pedersen, 1993). Asimismo, el enriquecimiento de cobre y níquel se ve respaldado por la identificación de fases minerales de sulfato de cobre (CuSO_4), de acuerdo con los análisis de DRX realizados en las muestras LC1 (1.3) y LC (2) (Figura 11).

Teniendo en cuenta la correlación entre el COT y los factores de enriquecimiento de los RES, en ambientes subóxicos a anóxicos (Sánchez et al. (2013), el enriquecimiento de RES se produjo probablemente por autoprecipitación y adsorción de la materia orgánica. Usualmente los factores de enriquecimiento de estos elementos muestran una correlación buena con el COT (Algeo y Maynard, 2004; Tribovillard et al., 2006). Finalmente, los valores bajos de la relación Th/U observados en las tres zonas quimioestratigráficas del horizonte podrían explicarse debido a la influencia de la variación en el contenido de materia orgánica, que afecta la distribución de esta relación en el sedimento al absorber el uranio (Klinkhammer y Palmer, 1991; Algeo y Maynard, 2004; McManus et al., 2005).

7.2. Interpretación paleoambiental del horizonte fosilífero de Los Corros

A partir de la división de las quimiofacies, se pueden inferir las condiciones paleoecológicas correspondientes a cada una de las quimiozonas. en la subzona A1, se observó una granulometría constante, con predominio de granos muy finos a finos. Durante este segmento,

se registraron dos momentos significativos asociados a litologías con grano de arena, donde el aporte terrígeno y la meteorización fueron elevados. Las condiciones de paleosalinidad indicaron una salinidad baja, sugiriendo la presencia aguas salobres en niveles moderados. El contenido de COT se mantuvo constante en valores bajos, lo que indica un aporte continental y de baja energía. En cuanto a la relación Th/U, se observó un pico predominante, sugiriendo condiciones disóxicas que permitieron una bioturbación moderada y la buena conservación de los sedimentos (Friedrichs, 2012). Según Durán-Gómez (2024), la fauna descrita, incluye restos de *A. lataguensis*, *Sheppardiconcha* sp, plantas y ostrácodos los cuales coinciden con los sedimentos predominantemente silicoclásticos de origen terrígeno, y con material bioclástico derivado de moluscos. Además, la vegetación sugiere la presencia de marismas de pasto (*Spartina* sp.) o bosques de manglares (Friedrichs, 2012). De acuerdo con lo reportado por Durán-Gómez (2024), se identificaron plantas de las clases *Monocotyledoneae* y *Dicotyledoneae*, cuyas venaciones sugieren similitudes con las de las plantas actuales, como los pastos, lo que confirmaría que para esta subzona el aporte fue más continental.

En la subzona A2, se registraron picos en COT y en la relación Th/U, asociados con un menor aporte terrígeno y menor meteorización. Estos picos podrían sugerir la presencia de una transgresión que favoreció la preservación de materia orgánica en condiciones de bajos niveles de oxígeno, específicamente en aguas salobres.

Para la quimiofacies B, las variaciones en los proxis, sugieren que el segmento basal estuvo influenciado por una micro marea, especialmente entre las muestras LC (7.1) a 10.6 m de altura y LC (7.1) a 10.7 m. Esta variabilidad estaría relacionada con un cambio en el aporte terrígeno, mayor meteorización, y un aumento de la salinidad superior a 0.5, lo que podría indicar una facie marina (Wei & Algeo, 2020). Los picos de paleoxigenación fueron significativos, pero

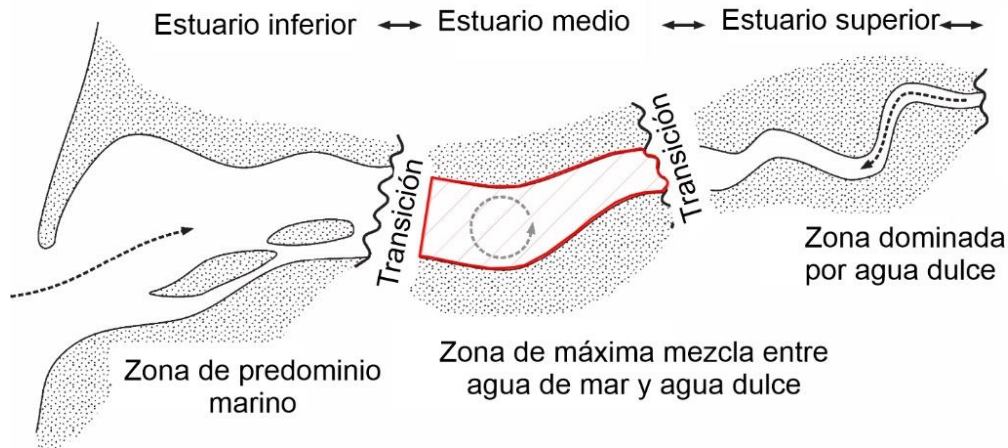
hacia la parte superior de la sección se observó un aumento significativo de la anoxia. Durante este mismo segmento, se evidenciaron otros dos eventos de transgresiones. El primero, reflejado en la muestra LC (4.5), se caracteriza por un aumento en el aporte terrígeno, baja meteorización química y bajos valores de materia orgánica, lo que sugiere condiciones de mayor energía y oxígeno. En la muestra LC (2) a 15.22 m, la relación Sr/Ba alcanzó un valor de 1.6, lo que indicó una incursión marina asociada a una transgresión costera y un alto porcentaje de COT. Esto contradeciría parcialmente lo propuesto por Durán-Gómez (2024), quien sugiere que este segmento estaría dominado por ambientes transicionales, salobres y estuarinos de baja productividad.

Para la quimiofacies C, se sugiere una transición entre aportes continentales y marinos, con condiciones de baja energía. La litología estuvo dominada por material finogranular en la base, con un aumento constante de granulometría hacia la parte superior, lo que indica una entrada marina puntual y fluctuaciones en el COT y la salinidad. Este comportamiento se correlaciona con un pico de mayor anoxia en el segmento. En cuanto a la paleoxigenación de fondo, se mantuvo entre condiciones disóxicas y óxicas en las tres quimiofacies, lo que sugiere la prevalencia de un ambiente estuarino.

En resumen, la reconstrucción paleoambiental de las quimiozonas sugiere que el horizonte fosilífero de Los Corros se depositó en una zona estuarina media (Figura 18), donde la salinidad fluctuó entre agua dulce y agua salobre de baja salinidad. La ubicación del sitio implicaría un entorno estuarino con pocos ciclos de marea, favoreciendo la exposición de los sedimentos a una mezcla de aguas y promoviendo la meteorización química. La baja circulación del agua en la zona pudo haber generado condiciones de estancamiento, lo que favoreció la preservación de la materia orgánica y la baja oxigenación en el fondo.

Figura 18

Segmentación de un estuario según la transición de mezcla entre agua dulce y marina

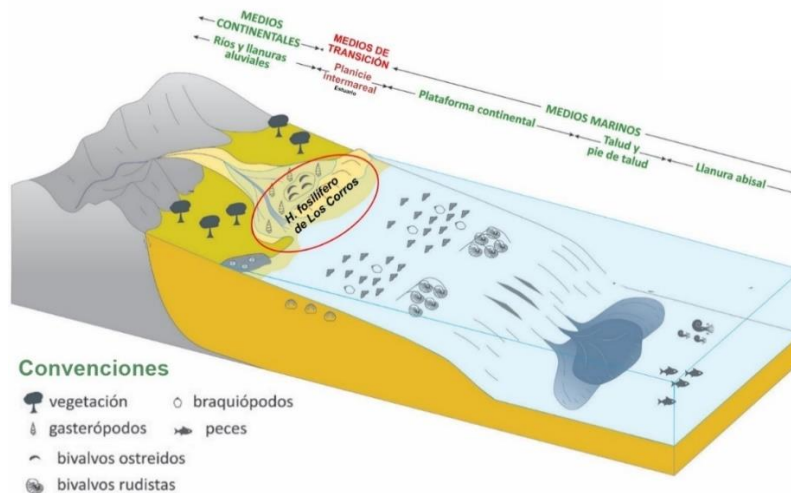


Nota. Tomado y modificado de Whitfield et al., (2011). La zona señalada en rojo es la zona en la que se sugiere la ubicación del horizonte fosilífero de Los Corros.

Integrando la información geoquímica obtenida, con los aspectos sedimentológicos observados con la petrografía, la mineralogía de arcillas, y lo reportado previamente por estudios como los de Caballero et al (2020) o Durán-Gómez (2024), se puede inferir que el ambiente deposicional del horizonte de Los Corros correspondería a una planicie intermareal (Tidal flat). Este ambiente habría estado influenciado por un régimen de marea micro mareal o por un arroyo de marea (Tidal inlet; Figura 19).

Figura 19

Ambiente deposicional del horizonte fosilífero de Los Corros.



Nota. La zona señalada corresponde a la posible ubicación del horizonte fosilífero de Los Corros.

Tomado y adaptado de Blanco-Ferrera et al. (2019)

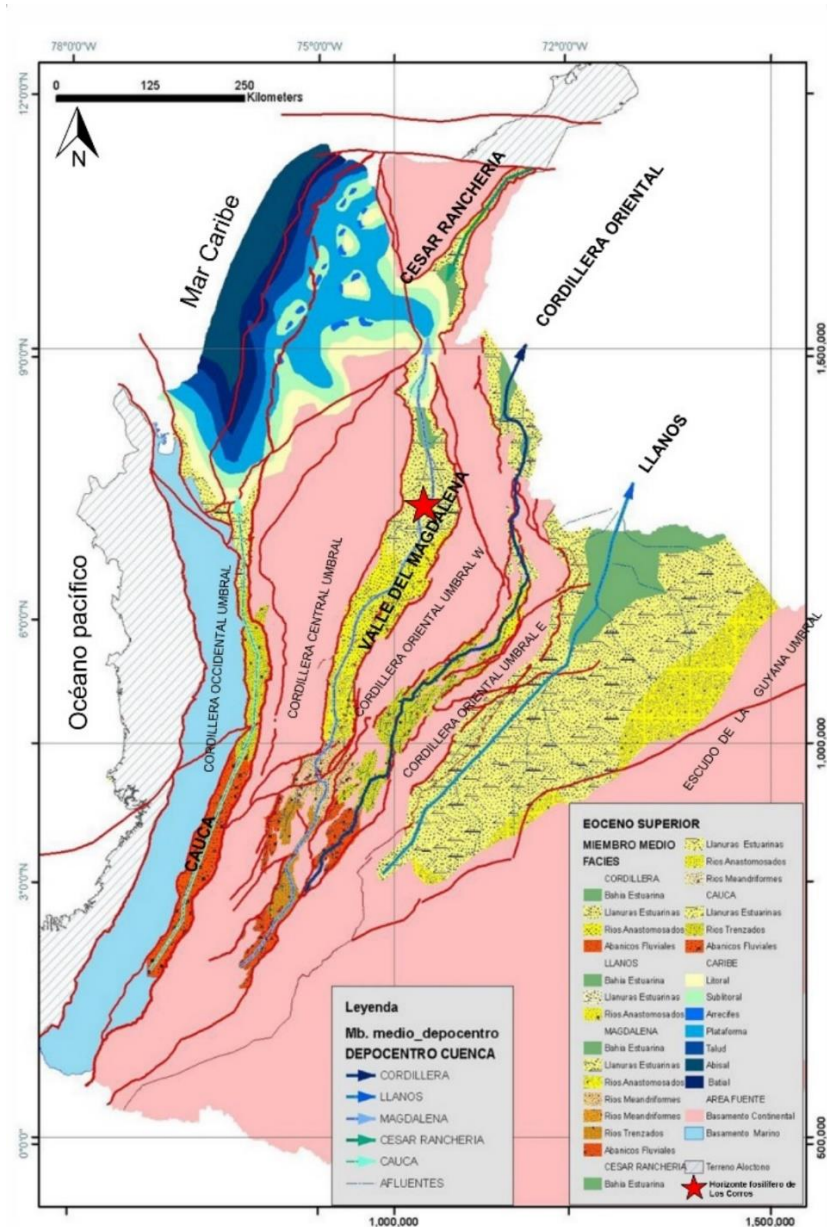
Estas interpretaciones coinciden con las propuestas en un sentido regional para el Eoceno de la Cordillera Oriental y el Valle del Magdalena Medio (VMM). Según Díaz-Poveda (2016) y Caballero et al. (2020), la Formación Esmeraldas presentó facies intermareales estuarinas, lo que concuerda con el horizonte fosilífero de Los Corros (Figura 20).

A partir del registro palinológico, al horizonte fosilífero de Los Corros actualmente se le asigna una edad de Eoceno tardío, entre aproximadamente 56 y 33.9 millones de años (Rodríguez et al., 2012). Una alternativa para definir un modelo de edad de depositación del horizonte fosilífero de Los Corros, es la geoquímica isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) en los sedimentos o en los restos de las cochas. Por tal motivo, la valoración geoquímica de otras localidades del horizonte

fosilífero de Los Corros, y de otras unidades del Eoceno ayudaría a entender la evolución geológica de las sucesiones sedimentarias del Paleógeno en el país.

Figura 20

Contexto paleogeográfico del horizonte fosilífero de Los Corros hace 33 Ma.



Nota. La zona señalada corresponde a la posible ubicación del horizonte fosilífero de Los Corros hace 33 Ma. A) Tomado y adaptado de Díaz-Poveda (2016)

8. Conclusiones

A partir de los análisis geoquímicos mediante fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de reflectancia (TerraSpec Halo) y espectrometría de rayos gamma, junto con análisis petrográficos de muestras puntuales, se identificaron tres zonas quimioestratigráficas en el horizonte fosilífero de Los Corros (Quebrada San Silvestre, Santander).

Las tres quimiozonas reflejan cambios en las condiciones paleoambientales. La quimiozona A representa un ambiente de baja energía con bajo aporte continental, salinidad reducida y bioturbación moderada, característico de zonas de marismas. En la quimiozona B, se evidenciaron transgresiones marinas episódicas, un aumento en la meteorización y en la salinidad, lo que sugiere la presencia de facies marinas y condiciones de mayor anoxia en las partes superiores. Finalmente, la quimiozona C refleja una transición entre aportes continentales y marinos, con fluctuaciones en la salinidad y oxigenación, compatible con un entorno estuarino de baja energía.

Las condiciones paleoambientales favorecieron la formación y preservación de materia orgánica en un entorno de baja salinidad, con fluctuaciones entre aguas dulces y salobres. La presencia de minerales arcillosos, como caolinita y montmorillonita, identificados mediante análisis petrográficos y geoquímicos, indica una intensa meteorización química en la región. Asimismo, las variaciones en la salinidad, evidenciadas por los proxies geoquímicos, sugieren eventos de posible transgresión marina en zonas puntuales del horizonte fosilífero de Los Corros.

La reconstrucción paleoambiental sugiere que la zona de estudio estuvo influenciada por un sistema estuarino con facies de planicie intermareal o arroyo de marea, caracterizado por bajos niveles de energía y sedimentación fina. Esta interpretación es coherente con estudios

paleontológicos previos, los cuales respaldan la existencia de un ecosistema transicional con influencia tanto continental como marina, evidenciando incursiones marinas puntuales durante la sedimentación del Eoceno en el Valle Medio del Magdalena.

Referencias Bibliográficas

Agricultura Técnica. (2002). *Agricultura Técnica*, 62(3), 480–484.

<https://doi.org/10.4067/s0365-28072002000300013>

Academy Europe. (s.f.). Detectores de centelleo. *En Curso de Diplomado en Ingeniería Nuclear en Línea*. Academy Europe. Recuperado de

<https://www.academyeurope.org/es/courses/engineering-technology/nuclear-engineering-online-diploma-course/lessons/scintillation-detectors-cop>

Algeo, T. J., & Lyons, T. W. (2006). Covariación de Mo y carbono orgánico total en ambientes marinos anóxicos modernos: Implicaciones para el análisis de condiciones paleoredox y paleohidrológicas. *Paleoceanografía*, 21, PA1016.

<https://doi.org/10.1029/2004PA001112>

Algeo, T. J., & Maynard, J. B. (2004). Comportamiento de los elementos traza y facies redox en lutitas del Pensilvánico Superior en los ciclitos tipo Kansas. *Geoquímica*, 206(3-4), 289-318.

Anderson, J. L. (1945). Geología del petróleo de Colombia, América del Sur. *Boletín de la AAPG*, 29(8), 1065-1142.

Albarède, F. (2003). Introducción. En *Geoquímica: Una introducción* (pp. 1-6). Introducción, Cambridge: Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781139165006.003>

ASD Inc. (2016). *TerraSpec HALO: Manual del usuario*. Scribd.

<https://es.scribd.com/document/359336148/TerraSpec-HALO-User-Manual-Espanol>

- Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Reyes-Harker, A., & Torres, V. (2007). Migración flexural del margen de la cuenca de antepaís no marina de los Llanos de Colombia entre el Paleoceno y el Mioceno Medio. *Ciencias, Tecnología y Futuro*, 3(3), 141–160.
- Baltuille, J. M., Rey de la Rosa, J., Vega Rodera, J., & Zarpadiel, J. M. (2000). *Inventario Nacional de arcillas especiales*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Recuperado de info.igme.es
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2006). Capítulo 1. En *Manual práctico de análisis de fluorescencia de rayos X* (1ª ed., pp. 1-20). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-36722-2>
- Berbeyer, R. M. (1954). Geoquímica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 17(2), 41–52. <https://doi.org/10.18268/BSGM1954v17n2a3>
- Betancourth, D., Gómez, J. F., Mosquera, J. C., & Tirado-Mejía, L. I. L. I. A. N. A. (2010). Análisis por difracción de rayos x de rocas provenientes de región esmeraldífera. *Scientia et Technica*, 1(44), 257-260.
- Blanco-Ferrera, S., Sanz-López, J., Domínguez-Cuesta, M. J., López-Fernández, C., Pando, L. A., & Martos, E. (2019). Transgresiones, regresiones y fósiles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(1), 18–30.
- Boggs, S. (1987). *Principios de sedimentología y estratigrafía* (2ª ed., Capítulo 1). Merrill Publishing Company.
- Bonatti, E., & Gartner, S. (1973). El clima del Caribe durante las edades de hielo del Pleistoceno. *Nature*, 244, 563–565.
- Caballero, V. (2010). Evolución tectonosedimentaria del Sinclinal del Nuevo Mundo, cuenca

sedimentaria del Valle Medio del Magdalena, Colombia, durante el oligoceno-mioceno. (Tesis de grado para optar el título de Master en Geología). Universidad Nacional de Colombia.

Caballero, V., Parra, M., & Mora, A. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, 32(1), 1-18.

Caballero, V. M., Rodríguez, G., Naranjo, J. F., Mora, A., & De La Parra, F. (2020). Desde el análisis de facies, superficies estratigráficas y secuencias depositacionales hasta trampas estratigráficas en el registro Eoceno-Oligoceno de la cuenca de Llanos del Sur y la cuenca del Magdalena del Norte. En J. Gómez & D. Mateus-Zabala (Eds.), *La geología de Colombia, volumen 3: Paleógeno-Neógeno* (pp. 283–330). Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.10>

Calvert, S., Bustin, R., & Pedersen, T. (1992). Falta de evidencia sobre la preservación mejorada de materia orgánica sedimentaria en la zona de oxígeno mínimo del Golfo de California. *Geología*, 20, 757-760.

Campos Vilanova, M. (1981). Los procesos de formación de arcillas y su importancia en la utilización industrial. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 20(2), 89–94. <https://boletines.secv.es/upload/198120089.pdf>

Contreras, C. R., Contreras, I. R., Jaramillo, C. N., & Pérez, F. M. (2015). Validación e implementación de una metodología para la determinación de carbono orgánico total en suelos y sedimentos según ISO 14235: 1998. *Revista Politécnica*, 11(21), 9-17.

- Craigie, N. (2018). Principios de Quimioestratigrafía Elemental: Una guía práctica para usuarios (1ª ed., Capítulo 4). Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71216-1>
- Croudace, I. W., & Rothwell, R. G. (Eds.). (2015). *Estudios de Micro-XRF en núcleos sedimentarios: Aplicaciones de una herramienta no destructiva para las ciencias ambientales* (Vol. 17., Capítulo 2). Springer.
- Dean, W., Zheng, Y., Ortiz, J., & van Geen, A. (2006). Acumulación de Cd y Mo en sedimentos en la zona de oxígeno mínimo frente a Baja California occidental vinculada al clima global. *Paleoceanografía*, 21, 1-13.
- De la Cruz, E. (2018). Fluorescencia de rayos X y su aplicación en la determinación de elementos químicos en determinadas muestras. (Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física). *Repositorio institucional Cybertesis UNMSM*.
- De La Parra, F., Pinzón, D., Mantilla Duran, F., Rodríguez-Forero, G., & Caballero, V. (2021). Sistemas marinos-lacustres durante el Eoceno en el norte de América del Sur: Evidencia palinológica de Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 108(103188). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103188>
- De Villiers, S. (2005). Evidencia de peso de concha de foraminíferos para la disolución calcítica sedimentaria por encima de la lisoclina. *Investigaciones en el Mar Profundo I*, 52, 671-680.
- Díaz Poveda, L. (2016). Evolución sedimentaria y estructural del Eoceno superior, Cordillera Oriental de Colombia, Sur América. Universidad de Barcelona.

- Duran-Gómez, J. (2024). Registro fosilífero del horizonte de Los Corros (Eoceno – Formación Esmeraldas) en inmediaciones de la represa de Hidrosogamoso. Universidad Industrial de Santander.
- Dunham, R. J. (1962). Clasificación de rocas carbonatadas según la textura deposicional. En W. E. Ham (Ed.), *Clasificación de rocas carbonatada* (pp. 108–121). American Association of Petroleum Geologists.
- Dummann, W., Hofmann, P., Herrle, J. O., Wennrich, V., & Wagner, T. (2021). Un modelo refinado de la evolución del paso entre el Atlántico Sur y el Océano Austral durante el Cretácico temprano basado en datos de alta resolución del sitio DSDP 511 (Plataforma de las Malvinas). *Paleogeografía, Paleoclimatología, Paleoecología*, 574, 110559.
- Emerson, S., & Hedges, J. (2006). Diagenesis de sedimentos y flujos bentónicos. En H. Elderfield (Ed.), *Los Océanos y la Geoquímica Marina* (Vol. 6, pp. 293-319). Elsevier.
- Feldman, M. D., Kwon, S. T., Boles, J. R., & Tilton, G. R. (1993). Transporte de masas diagenéticas en la cuenca sur de San Joaquín, California, EE. UU.: Implicaciones de la composición isotópica de estroncio de los fluidos de poro modernos. *Química Geológica*, 110(4), 329-343.
- Fralick, P., & Kronberg, B. (1997). Discriminación geoquímica de fuentes de rocas sedimentarias clásticas. *Geología Sedimentaria*, 113, 111-124.
- Friedrichs, C. T. (2012). Siliciclásticas planicies de marea detrás de la barrera. En D. G. Smith, R. J. Bailey, P. M. Burgess, & A. J. Fraser (Eds.), *Principios de sedimentología de mareas* (pp. 185–212). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6_10
- Folk, R. L. (1980). *Petrología de rocas sedimentarias*. Hemphill Publishing Company. (pp. 1-50)..

- Gomez, A., Jaramillo, C., Parra, M., & Mora, A. (2009). Horizonte Huesser: un lago y una incursión marina en el noroeste de América del Sur durante el Mioceno temprano. *PALAIOS*, 24(4), 199–210. doi: <https://doi.org/10.2110/palo.2007.p07-074r>
- Goodarzi, F., & Gentzis, T. (2018). Concentración elemental y petrología orgánica de carbón rico en liptinitas, lutitas caneloides y carbón canelado de la era Devónica en Canadá Ártica. *Química Geológica*, 485, 44-55.
- Goodarzi, F., Gentzis, T., & Sanei, H. (2019). Composición elemental y petrología orgánica de una lutita oleaginosa de agua dulce de la edad Carbonífera Inferior en Nueva Escocia, Canadá. *ACS Omega*, 4, 20773-20786.
- Goodarzi, F., Gentzis, T., & Hofmeister, M. (2020). Composición elemental de ambientes de carbón fluvio-lacustres y lacustres, Columbia Británica, Canadá. *Energy Fuel*, 36, 16046-16058. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03025>
- Govin, A., Holzwarth, U., Heslop, D., Keeling, L. F., Zabel, M., Mulitza, S., Collins, J. A., & Chiessi, C. M. (2012). Distribución de elementos mayores en sedimentos superficiales del Atlántico (36°N–49°S): Huella de la entrada terrígena y meteorización continental. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(1), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2011GC003785>
- Hayashi, K. I., Fujisawa, H., Holland, H. D., & Ohmoto, H. (1997). Geoquímica de rocas sedimentarias de aproximadamente 1.9 Ga del noreste de Labrador, Canadá. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19), 4115-4137.
- Jones, B., & Manning, D. A. C. (1994). Comparación de índices geoquímicos utilizados para la interpretación de condiciones paleoredox en antiguas lutitas. *Química Geológica*, 111, 111-129.

- Klinkhammer, G.P., Palmer, M.R., 1991. Uranio en los océanos: dónde va y por qué. *Geochimica Cosmochimica Acta* 55 (7), 1799–1806.
- Kundu, S. N. (2022). *Geociencia para ingenieros petroleros*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7640-7> (p. 81).
- Lashin, A., Hakimi, M. H., AlGhamdi, F., Amao, A. M., AlQuraishi, A., Fattah, K. A., & Laboun, A. B. (2023). Geoquímica elemental y mediciones de biomarcadores de la lutita del Silúrico de la Formación Qusaiba, área de Tayma, noroeste de Arabia Saudita: Implicaciones para la entrada de materia orgánica y condiciones paleoambientales. *Minerals*, 13(4), 468. <https://doi.org/10.3390/min13040468>
- Lei Cao, Zhihuan Zhang, Jingzhou Zhao, Xiao Jin, Hui Li, Jiayang Li, & Xiaodi Wei. (2021). Discusión sobre la aplicabilidad de la relación Th/U para evaluar las condiciones paleoredox de cuencas lacustres. *International Journal of Coal Geology*, 248, 103868. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103868>
- López, L. E. (s.f.). Espectrometría de rayos gamma: Aplicaciones en prospección uranífera y en medio ambiente. *Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Ezeiza*. Recuperado de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/064/33064222.pdf
- Lozano, E., & Zamora, N. (2014). Compilación de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Servicio Geológico Colombiano.
- McCarthy, K., Niemann, M., Palmowski, D., Peters, K., & Stankiewicz, C. (2011). La geoquímica básica del petróleo para la evaluación de las rocas generadoras. *Oilfield Review*, 23(2), 36-47.

- Martin, W., & Sayles, F. (1999). Ciclado bentónico de componentes biogénicos del flujo particulado al fondo marino en el Océano Austral en marzo y abril de 1998. *EOS Transactions*, 80, 241.
- Martínez, C., Jaramillo, C., Martínez-Murcia, J., Crepet, W., Cárdenas, A., Escobar, J., ... & Caballero-Rodriguez, D. (2021). Reconstrucción paleoclimática y paleoecológica de un bosque tropical seco de América del Sur del Eoceno medio a tardío. *Global and Planetary Change*, 205, 103617.
- McManus, J., Berelson, W.M., Klinkhammer, G.P., Hammond, D.E., Holm, C., 2005. Uranio autigénico: Relación con la profundidad de penetración del oxígeno y lluvia de carbono orgánico. *Geochimica. Cosmochimica. Acta* 69 (1), 95–108.
- Morales, L. G., & Industry, C. p. (1958). Geología general y ocurrencias de petróleo en el Valle Medio del Magdalena, Colombia. En L. G. Weeks (Ed.), *Hábitat del petróleo: Un simposio* (pp. 641-695).
- Moreno, D., & Arévalo, L. (2015). Estratigrafía del Grupo Guadalupe y análisis de Gamma Ray de afloramiento en la Quebrada Caño Blanco en los alrededores del municipio de Acacias (Meta) Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Nuttall, C. (1990). Una revisión de las faunas de moluscos no marinos terciarios de las cuencas interiores del noreste de Sudamérica. *Museo Británico (Historia Natural)*, 165–371.
- Pilsbry, H. A., & Olsson, A. A. (1935). Moluscos de agua dulce terciarios de la ensenada Magdalena, Colombia. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 87, 7–39. <http://www.jstor.org/stable/4064208>
- Renard, M. (1985). *Sedimentología: Procesos y productos sedimentarios* (Capítulo 2, pp. 45-67). Masson.

- Rodríguez Forero, G., Oboh-Ikuenobe, F., Jaramillo-Muñoz, C., & Rueda-Serrano, M. (2012). Palinología de la Formación Esmeraldas Eocena, Medio. *Palynology*, 36, 96–111.
doi: <https://doi.org/10.1080/01916122.2012.650548>
- Ruiz, J. L., & Moreno, J. A. (2009). Modelado e identificación del proceso de sulfuro oxidación en el tratamiento biológico de aguas residuales. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Salminen, R., Batista, M. J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., Jordan, G., Klaver, G., Klein, P., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mazreku, A., O'Connor, P. J., Olsson, S. A., Ottesen, R. T., Petersell, V., Plant, J. A., Reeder, S., Salpeteur, I., Sandström, H., Siewers, U., Steenfelt, A., & Tarvainen, T. (2005). *Atlas geoquímico de Europa. Parte 1: Información de fondo, metodología y mapas*. Servicio Geológico de Finlandia, Espoo, Finlandia. Recuperado de <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas>
- Sangüesa, J. (2007). El análisis mineralógico mediante difracción de rayos X (DRX) y sus aplicaciones. *Tierra y tecnología*. (32), 71-82. España.
- Sánchez, A., González-Yajimovich, O., Balart, E., López-Ortiz, B. E., Aguñiga-García, S., & Ortiz-Hernández, M. C. (2013). Acumulación de carbono orgánico total y carbonato de calcio en la zona de oxígeno mínimo del Pacífico nororiental mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1), 222-232.
- Sánchez, E., & Rodríguez, R. (2016). Análisis quimioestratigráfico en lutitas del Cretáceo en el norte del Perú. XVIII Congreso Peruano de Geología. Recuperado de repositorio.ingemmet.gob.pe

- Savrda, C. E., & Bottjer, D. J. (1991). Biofacies relacionadas con el oxígeno en estratos marinos: una visión general y actualización. *Geological Society, London, Special Publications*, 58(1), 201-219.
- Sarmiento, G., Puentes, J., & Sierra, C. (2015). Evolución geológica y estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. *Geología Norandina*, 12, 51-82.
- Sarmiento, L. F. (2011). Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Vol. 11, pp. 193). Medellín, Colombia: ANH-Universidad EAFIT. Departamento de Geología.
- Scotese, Christopher R. " Un atlas de mapas paleogeográficos del Fanerozoico: los mares vienen y los mares se van." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 49.1 (2021): 679-728.
- Sieben, G. (2017). Caracterización geológica y geoquímica de la Formación Vaca Muerta en seis pozos del centro de la Cuenca Neuquina. Una contribución a la prospección. Universidad Nacional del Comahue.
- Smith, S. V., Ibarra-Obando, S. E., Diaz-Castañeda, V. M., Aranda-Manteca, F., Carriquiry, J. D., Popp, B. N., & Gonzalez-Yajimovich, O. (2008). Carbono orgánico en sedimentos en la bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Estuarios y Costas*, 31, 719-727.
- Stein, R. (1991). Acumulación de carbono orgánico en sedimentos marinos: Resultados del Deep Sea Drilling Project/Ocean Drilling Program (DSDP/ODP). Springer-Verlag.
- Sullivan, M. D., Haszeldine, R. S., & Fallick, A. E. (1990). Acoplamiento lineal de los isótopos de carbono y estroncio en la arenisca Rotliegend, Mar del Norte: Evidencia de flujo de fluidos interformacionales. *Geología*, 18(12), 1215-1218.
- Tissot, B. P., & Welte, D. H. (1984). Procesos sedimentarios y la acumulación de materia orgánica. En *Petroleum formation and occurrence* (pp. 55-62). Springer-Verlag.

- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., & Riboulleau, A. (2006). Metales traza como proxies paleoredox y paleoproductividad: una actualización. *Química Geológica*, 232(1-2), 12-32.
- Valdés, J. (2004). Evaluación de metales redox-sensitivos como proxies de paleoxigenación en un ambiente marino hipóxico del norte de Chile. *Revista chilena de historia natural*, 77(1), 121-138.
- Velasco Tapia, F., Alanís Platas, A., Tienda Garza, J. A., Rodríguez Saavedra, P., Pichardo Barrón, Y., & García González, E. G. (2023). Registro de rayos gamma y caracterización de minerales arcillosos en la Formación San Felipe (cretácico superior) en la localidad Puerto Pastores (Galeana, NL). *Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, 9, 201-209.
- Vera Torres, J. A. (1994). Quimioestratigrafía. En *Estratigrafía: Principios y métodos* (pp. 373-405). Editorial Rueda.
- Vilas, F., & Fernández, L. P. (1993). Relaciones entre la diagénesis orgánica y mineral en rocas madre. *Geogaceta*, 14, 59-62. SGE USAL
- Wang, Z., et al. (2020). Técnicas de difracción de rayos X para la caracterización de minerales: Una revisión para ingenieros sobre los fundamentos, aplicaciones y direcciones de investigación. *MDPI*. Recuperado de <https://www.mdpi.com>
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, A. (1973). *Memoria explicativa, cuadrángulo H-13 Pamplona planchas 110 Pamplona - 121 Cerrito. Ministerio de Minas y Energía*, 62 77.
- Wei, J., & Algeo, T. J. (2020). Proxies elementales para el análisis de paleosalinidad en esquistos antiguos y lutitas. *Chemical Geology*, 536, 119542.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119542>

- Wefer, G., Billet, D., Hebbeln, D., Jorgensen, B. B., Schlüter, M., & Weering, T. C. E. V. (2003). *Sistemas de márgenes oceánicos*. Springer, 495.
- Wesselingh, F. (2006). Moluscos de la Formación Pebas del Mioceno en la Amazonía peruana y colombiana. *Scripta Geologica*, 133, 19-290.
- Whitfield, A. K., & Elliott, M. (2011). Clasificaciones ecológicas y bióticas de estuarios y costas. En E. Wolanski & D. McLusky (Eds.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science* (Vol. 1, pp. 99-124). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00108-X>
- Yang, S. Y., Li, C. X., Yang, D. Y., & Li, X. S. (2004a). Intemperismo químico de los depósitos de loess en el valle inferior del Changjiang, China, e implicaciones paleoclimáticas. *Quaternary International*, 117(1), 27-34.
- Yang, S. Y., Jung, H. S., & Li, C. (2004b). Dos regímenes únicos de intemperismo en las cuencas de drenaje del Changjiang y Huanghe: evidencia geoquímica de los sedimentos fluviales. *Sedimentología Geológica*, 164(1), 19-34.
- Yang, S. Y., Li, C., & Cai, J. (2006). Composición geoquímica de los sedimentos de núcleo en el este de China: implicaciones para los cambios paleoambientales del Cenozoico Tardío. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229(4), 287-302.
- Zeevaert-Wiechers, L. (2000). Análisis y aplicación de los suelos arcillosos residuales de características expansivas. Universidad Nacional Autónoma de México.