

Caracterización Petrográfica y Aportes a la reconstrucción Paleambiental de la Formación
Toluviejo, Departamento de Córdoba, Colombia.

Juan Sebastian Plata Duarte, Sergio Andrés Suarez Rojas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

German David Patarroyo Camargo

Geólogo MSc

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a mi madre Liliana, a mi abuela Gilma, mi hermana Paula y mi tía Cecilia quienes siempre han estado a mi lado a lo largo de este proceso. Sin su apoyo todo esto no hubiese sido posible.

Juan.

A mi familia, a mis padres por brindarme las condiciones necesarias para desarrollar las habilidades y destrezas que he construido, a mi abuela por creer en mí y apoyarme, a mi tío por ser cimiento fundamental en mi formación, a mi hermana y sobrina por ser motivación para mi vida.

A mi pareja por ser luz y soporte en mi etapa universitaria.

A todos los maestros que aportaron en mi formación

A mis amigos por los momentos compartidos, el apoyo y expresarme sus ideas, perspectivas y conocimientos.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme espacios para una formación integra.

“Siendo un fin en sí mismo, cada ser humano es único y no puede ser sustituido por nada ni por nadie porque carece de equivalente. No posee un valor relativo, un precio, sino un valor intrínseco llamado ‘dignidad’” - Kant, I. (1999)

Agradecimientos

Queremos agradecer al profesor German David Patarroyo Camargo por habernos brindado la oportunidad de trabajar junto a él en este proyecto, por su incansable ayuda para el desarrollo de este y su sabio consejo en cada paso de esta investigación.

Agradecer también a Linda Vidal (Universidad de Chile) y Simon Mitchell (University of the West Indies) por su ayuda en la revisión de los datos paleontológicos y su gran aporte al desarrollo del trabajo.

Gracias a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander por brindarnos un espacio propicio para el desarrollo de nuestro trabajo de grado.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivos Generales:	15
1.2 Objetivos específicos:	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Foraminíferos bentónicos.....	17
2.2 Algas calcáreas.....	22
2.3 Las plataformas carbonatadas del Eoceno en la región Caribe.....	24
3. Localización y Marco Geológico.....	26
4. Metodología	30
4.1 Revisión Bibliográfica	31
4.2 Trabajo de Laboratorio	31
4.2.1 Petrografía.....	31
4.2.2 Paleontología.....	32
4.2.3 Geoquímica	32
5. Resultados	35
5.1 Descripción Petrográfica.....	35
5.2 Paleontología.....	40
5.3 Definición de las petrofacies.....	42

5.4 Geoquímica.....	46
6. Discusión.....	48
6.1 Modelo de edad de la sección El Hueso	48
6.2 Inferencias paleoambientales de la Formación Toluviejo (Sección El Hueso)	49
7. Conclusiones.....	53
8. Recomendaciones	54
Referencias.....	55
Apéndices.....	62

Lista de Tablas

Tabla 1 *Tabla descriptiva de los análisis realizados a las muestras*..... 34

Lista de figuras

Figura 1 <i>Ambientes deposicionales de sucesiones sedimentarias siliciclasticas y carbonatadas.</i>	17
Figura 2 <i>Distribución ecológica de los foraminíferos.</i>	19
Figura 3 <i>Distribución de los foraminíferos a lo largo del tiempo.</i>	21
Figura 4 <i>Relación de energía y forma de los rodolitos.</i>	23
Figura 5 <i>Mapa de la distribución de las provincias biogeográficas de macroforaminíferos bentónicos en el Caribe.</i>	25
Figura 6 <i>Mapa de la ubicación de la localidad estudiada, sectores aledaños al municipio de Coveñas.</i>	27
Figura 7 <i>Elementos empleados para la realización del proyecto.</i>	30
Figura 8 <i>Principales componentes de las muestras.</i>	35
Figura 9 <i>Bioclastos característicos de la localidad El Hueso.</i>	37
Figura 10 <i>Factores diagenéticos.</i>	39
Figura 11 <i>Registro estratigráfico de la localidad el Hueso con aparición de especies de foraminíferos.</i>	41
Figura 12 <i>Petrofacies definidas en la localidad El Hueso.</i>	44
Figura 13 <i>Registro estratigráfico de la localidad el Hueso con abundancias cualitativas de sus componentes.</i>	45
Figura 14 <i>Distribución de los bioclastos y análisis geoquímicos de la localidad el Hueso.</i>	47
Figura 15 <i>Paleoambiente representativo de las formaciones Toluviejo y Chengue.</i>	52

Lista de Apéndices

Apéndice A *Descripción petrográfica de las secciones delgadas de El Hueso.* 62
Apéndice B *Conteo de componentes a lo largo de la localidad el Hueso.* 75

Resumen

Título: Caracterización Petrográfica y aportes a la Reconstrucción Paleoambiental de la Formación

Toluviejo, departamento de Córdoba, Colombia. *

Autor: Juan Sebastian Plata Duarte y Sergio Andrés Suarez Rojas. **

Palabras clave: Petrografía, Rocas Carbonatadas, Cinturón Plegado Sinú – San Jacinto, Paleoambientes, Foraminíferos.

Descripción:

El presente trabajo busca entender las condiciones paleoambientales de una localidad de la Formación Toluviejo, en el sector de San Antero, Córdoba (sección El Hueso). Para dicho propósito se presentan los resultados del análisis petrográfico de una serie de muestras que abarcaron la sucesión sedimentaria reportada, al igual que una valoración geoquímica de algunos elementos presentes en la roca (Sr, Ba, Fe, Ca, V, Cu, Al), por medio del método de fluorescencia de rayos x (FrX).

En general, los análisis petrográficos muestran que la sucesión sedimentaria de la sección El Hueso, está conformada principalmente por calizas bioclásticas (tipo *grainstone*), dominadas en su composición por macroforaminíferos (familias Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Soritidae y Discocyclinidae) y algas calcáreas, con un grado de diagénesis moderado a bajo en algunas muestras. El tipo de asociación fósil encontrada, indica una edad de Eoceno medio (Luteciano), lo que va en concordancia con lo propuesto para otras localidades de dicha unidad. Igualmente, por medio de la definición de petrofacies, se identifican al menos tres grupos, donde varía la proporción de los macroforaminíferos y de las algas calcáreas respectivamente, sugiriendo un ambiente de depósito asociado a una rampa carbonatada media. Si bien litológicamente la sección de El Hueso parece ser homogénea en su composición, tanto las variaciones que se observan en sus bioclastos principales, como las relaciones geoquímicas de Fe/Ca y Sr/Ba, sugieren variaciones leves en las condiciones de energía, aporte de material terrígeno y paleosalinidad (probablemente ligado a variaciones eustáticas) en la parte basal de la sucesión. A su vez, el tipo de preservación observada en los bioclastos, así como la distribución de elementos sensibles a variaciones en la oxigenación de los sedimentos de fondo (V/Al, Cu/Al), sugiere condiciones paleoambientales de bajo estrés.

La integración de la información paleoambiental y bioestratigráfica colectada para la sección El Hueso, con aquella propuesta en otras localidades de la Formación Toluviejo y unidades coetáneas, ayudará a mejorar las reconstrucciones paleoambientales que se han planteado para el Eoceno en el Caribe Colombiano.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: German David Patarroyo Camargo, MSc).

Abstract

Título: Caracterización Petrográfica y aportes a la Reconstrucción Paleoambiental de la Formación

Toluviejo, departamento de Córdoba, Colombia. *

Autor: Juan Sebastian Plata Duarte y Sergio Andrés Suarez Rojas. **

Palabras clave: Petrografía, Rocas Carbonatadas, Cinturón Plegado Sinú – San Jacinto, Paleoambientes, Foraminíferos.

The present work seeks to understand the paleoenvironmental conditions in a locality of the Toluviejo Formation (El Hueso; San Antero, Córdoba). For this purpose, a petrographic analysis of thirteen samples was conducted, as well as a geochemical evaluation of some elements present in the rock (Sr, Ba, Fe, Ca, V, Cu, Al), using the X-ray fluorescence method (FrX). In general, the petrographic analyses indicate that the sedimentary succession of the El Hueso section is mainly composed of bioclastic limestones (grainstone type), dominated by large benthic foraminifers (families Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Soritiidae, and Discocyclinidae), and calcareous algae, with a moderate to low degree of diagenesis in some samples. The foraminiferal assemblages indicate a middle Eocene (Lutetian) age, which agrees with age definitions for other localities of this unit. In addition, through the definition of petrofacies, at least three groups are identified, based upon changes in the proportions of large benthic foraminifers and calcareous algae in a medium carbonate ramp, associated to a medium carbonate ramp. Despite the lithology of the El Hueso section is homogeneous in its composition, the variations in its main bioclasts, as well as the Fe/Ca and Sr/Ba geochemical ratios, suggest minor changes in the energy conditions, terrigenous input, and paleosalinity (probably linked to eustatic variations) for the basal part of the succession. In addition, the preservation degree of the bioclasts, and the distribution of elements sensitive to variations in the bottom water oxygenation (V/Al, Cu/Al), suggest low-stress paleoenvironmental conditions. Integration of the paleoenvironmental and biostratigraphic data from localities such as El Hueso section, with those reported in localities of the Toluviejo Formation or coeval units, will improve the paleoenvironmental reconstructions for the Eocene in the Colombian Caribbean.

**Bachelor Degree.*

***Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: German David Patarroyo Camargo, MSc.*

Introducción

Las plataformas carbonatadas pertenecen a un sistema sedimentario construido por actividad biológica. Su clasificación puede establecerse a través de la identificación de las petrofacies y de su interpretación ambiental y climática relacionada con la profundidad, energía, paleosalinidad, contenido de nutrientes, aporte siliciclástico y oxigenación (Low Pfeng & Peters Recagno, 2004). Adicionalmente, en los ambientes sedimentarios es útil el estudio petrográfico ya que permite clasificarlas, identificarlas e interpretar su ambiente de formación (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003, Adams & Mackenzie, 1998).

A lo largo de su evolución geológica, la región Caribe se caracterizó por el desarrollo y desaparición de plataformas carbonatas en las zonas costeras e insulares (Nebelsick et al., 2005; Scheibner & Speijer, 2008). Esto, al menos de forma clara desde el Eoceno. Sin embargo, las plataformas carbonatadas de cada intervalo de tiempo entre el intervalo Eoceno-Holoceno, presentan sus propias particularidades y mecanismos de formación, asociados a procesos paleoclimáticos globales (Pearson et al., 2007; Zachos et al., 2008; Cramwinckel et al., 2018). Por ejemplo, para el Eoceno las condiciones de calentamiento global causaron que los mares tropicales carecieran de grandes estructuras de arrecifes de coral (Scheibner & Speijer, 2008; Kiesling, 2010; Norris et al., 2013). En cambio, y sumado a variaciones globales del nivel del mar, si bien se desarrollaron sucesiones espesas de carbonatos en aguas poco profundas, sus componentes biogénicos fueron principalmente foraminíferos bentónicos de gran tamaño (macroforaminíferos) y algas incrustantes (Payros et al., 2010; Norris et al., 2013). Estudios regionales como los de Mitchell et al (2022) no solo muestran la gran extensión regional de

dichos sistemas sedimentarios, de dichos sistemas sedimentarios y la utilización bioestratigráfica de los macroforaminíferos en tales sucesiones carbonatadas. Un ejemplo de plataformas carbonatadas del Eoceno en Colombia se encuentra representada en la Formación Toluviejo ubicada en el cinturón plegado de San Jacinto (CPSJ) en la región caribe.

En este proyecto se ha utilizado la petrografía como una herramienta para contribuir con las reconstrucciones paleoambientales propuestas en la Formación Toluviejo. Para dicho propósito han analizado los componentes biogénicos (particularmente proporciones de macroforaminíferos y algas calcáreas), el análisis elemental geoquímico y la sucesión de petrofacies en 13 muestras de la sección sedimentaria El Hueso (San Antero, Córdoba) ubicada al sur del CPSJ.

Planteamiento del Problema

La importancia de la localidad El Hueso consiste en que es uno de los pocos sitios geográficos en donde aflora la Formación Toluviejo de edad Eoceno Medio tardío (Duque-Caro, 1984; Guzmán et al., 2004) y ambiente marino somero (Bermúdez et al., 2009). El estudio de nuevos indicadores paleoambientales de la Formación permitirá avanzar en la comprensión de su modelo deposicional. El modelo actual aún necesita ser refinado, siendo ideal la realización de análisis micropaleontológicos que incluya las asociaciones de foraminíferos bentónicos ya que son abundantes en la Formación y útiles en datación. Adicionalmente es necesario integrar el análisis de la geoquímica elemental de Fe/Ca, Sr/Ba, Cu/Al, V/Al, ya que sus relaciones son indicativas de condiciones paleoambientales tales como el aporte de terrígenos, paleosalinidad y paleoxigenación (Kujau et al., 2010; Govin et al., 2012; Wei y Algeo, 2020; Yelwa et al., 2022;

Dummann et al., 2021). Finalmente, un estudio integrado de petrofacies en las mismas muestras permitirá fortalecer el modelo. Algunos estudios sobre la Formación, como lo son los realizado por Salazar-Ortiz et al., 2020 y Bermúdez et al., 2009 se basan en análisis de foraminíferos planctónicos y estudios sedimentológicos de núcleos, respectivamente. También se encuentran publicados algunos estudios de microfacies de la Formación con propósitos diagenéticos (Raigosa, 2018) para analizar la porosidad de las calizas en exploración de hidrocarburos. Dicha formación es relevante por su interés exploratorio ya que se encuentra en la Cuenca Sinú-San Jacinto, una de las cuencas más prolíficas en exploración y producción de hidrocarburos en el territorio colombiano. Este estudio se centra en el análisis integrado de los foraminíferos bentónicos, la geoquímica elemental y de petrofacies con el fin de poner de manifiesto el proceso deposicional y paleoambiental de la Formación Toluviejo.

1. Objetivos

1.1 Objetivos Generales:

- Refinar el modelo paleoambiental y deposicional de la Formación Tolviejo en la localidad El Hueso a partir del estudio de foraminíferos bentónicos, la geoquímica elemental y la definición de petrofacies en las mismas muestras de la Formación.

1.2 Objetivos específicos:

- Analizar las asociaciones de foraminíferos bentónicos de la Formación Tolviejo con fines de situar las muestras en los pisos del Eoceno.
- Caracterizar petrográficamente los niveles calcáreos de la Formación Tolviejo en la localidad El Hueso.
- Caracterizar las petrofacies de las mismas muestras.

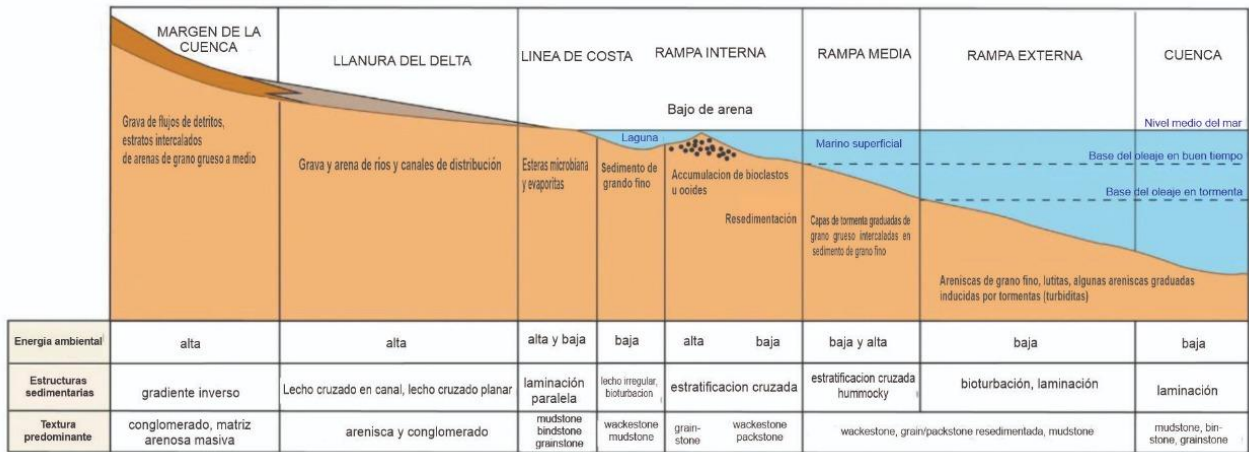
2. Marco Teórico

Las plataformas continentales forman parte de dominio marino somero, siendo su límite superior el “nivel de base del oleaje, mientras que el inferior lo marca el límite de la zona fótica. Dicha zona, que representa la profundidad hasta donde penetra la luz. Desde el punto de vista sedimentario, se suele diferenciar entre plataformas con dominio de la sedimentación terrígena, y plataformas con dominio de la sedimentación carbonatada. La diferenciación entre ambos tipos parte del origen del sedimento (Figura 1). En las plataformas con naturaleza terrígena, los sedimentos se consideran alóctonos, al provenir del continente, para posteriormente redistribuirse y acumularse en el interior de la plataforma. Para las plataformas carbonatadas en cambio, la sedimentación se genera en la propia plataforma, y por tanto presenta un carácter autóctono o para-autóctono (Martín Martín, 2020).

A su vez, en las plataformas carbonatadas se distinguen dos grandes tipos (templadas y tropicales), basados en su distribución geográfica y comportamiento de las masas de agua. Las plataformas carbonatadas templadas se extienden desde las zonas subpolares hasta la banda climática mediterránea. Las plataformas carbonatadas tropicales en cambio se engloban dentro de los cinturones climáticos tropicales y ecuatoriales (0-30° de latitud) (Martín Martín, 2020).

Figura 1.

Ambientes deposicionales de sucesiones sedimentarias siliciclásticas y carbonatadas.



Nota: Modificado de (Dantas & Holz, 2019).

Los componentes biológicos también juegan un papel en la caracterización de los sedimentos de las plataformas carbonatadas. (Martín Martín, 2020). A continuación, se van a referir algunas generalidades de dos de los grupos más comunes en las plataformas carbonatadas, y presentes en la sección El Hueso: los foraminíferos bentónicos y las algas calcáreas.

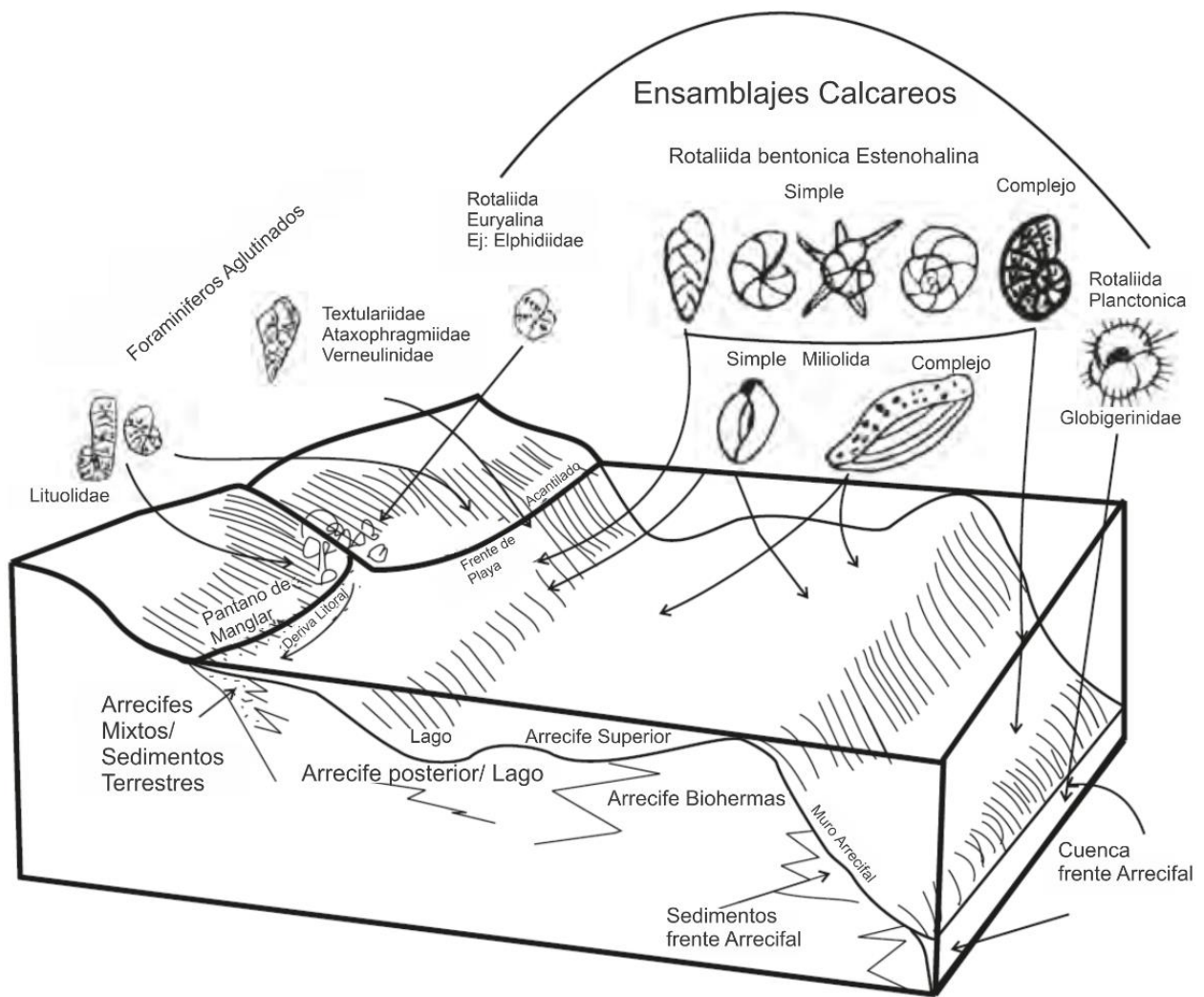
2.1 Foraminíferos bentónicos

Los foraminíferos son eucariotas unicelulares, caracterizados por una cadena ectoplásmica granular, y usualmente soportada por un endoesqueleto hecho de varios materiales (e.g. calcita, aragonito, quitina, material particulado). Dada su gran diversidad, su taxonomía aún viene siendo discutida, si bien son considerados como parte del Filo Retaria, que a su vez se encuentra dentro del Infrareino Rhizaria (Murray, 1991, Ruggiero et al., 2015).

El hecho de que su endoesqueleto, usualmente referido como conchilla o testa, tenga un alto potencial de preservación, los ha convertido en un grupo ampliamente estudiado en la micropaleontología, la subdisciplina de la paleontología que estudia los microorganismos fósiles (microfósiles). A pesar de que su tamaño típico es submilimétrico, en el pasado geológico (e.g. Paleozoico, Paleógeno), han existido formas con tamaños de hasta 150 mm aproximadamente. Otro aspecto que los convierte en una herramienta muy versátil para estudios paleoecológicos, es que habitan diferentes nichos en los entornos marinos, desde zonas de estuarios, hasta profundidades abisales, presentando una alta diversificación en sus formas (Figura 2; Murray, 1991, BouDagher-Fadel, 2018).

Figura 2.

Distribución ecológica de los foraminíferos.



Nota: Modificado de BouDagher-Fadel, (2018).

Desde el punto de vista geocronológico, se estima que estas formas existen desde antes del Cámbrico. Por ende, teniendo en cuenta la complejidad de sus endoesqueletos fosilizados, al igual que su largo y bien documentado registro evolutivo, los foraminíferos son una valiosa

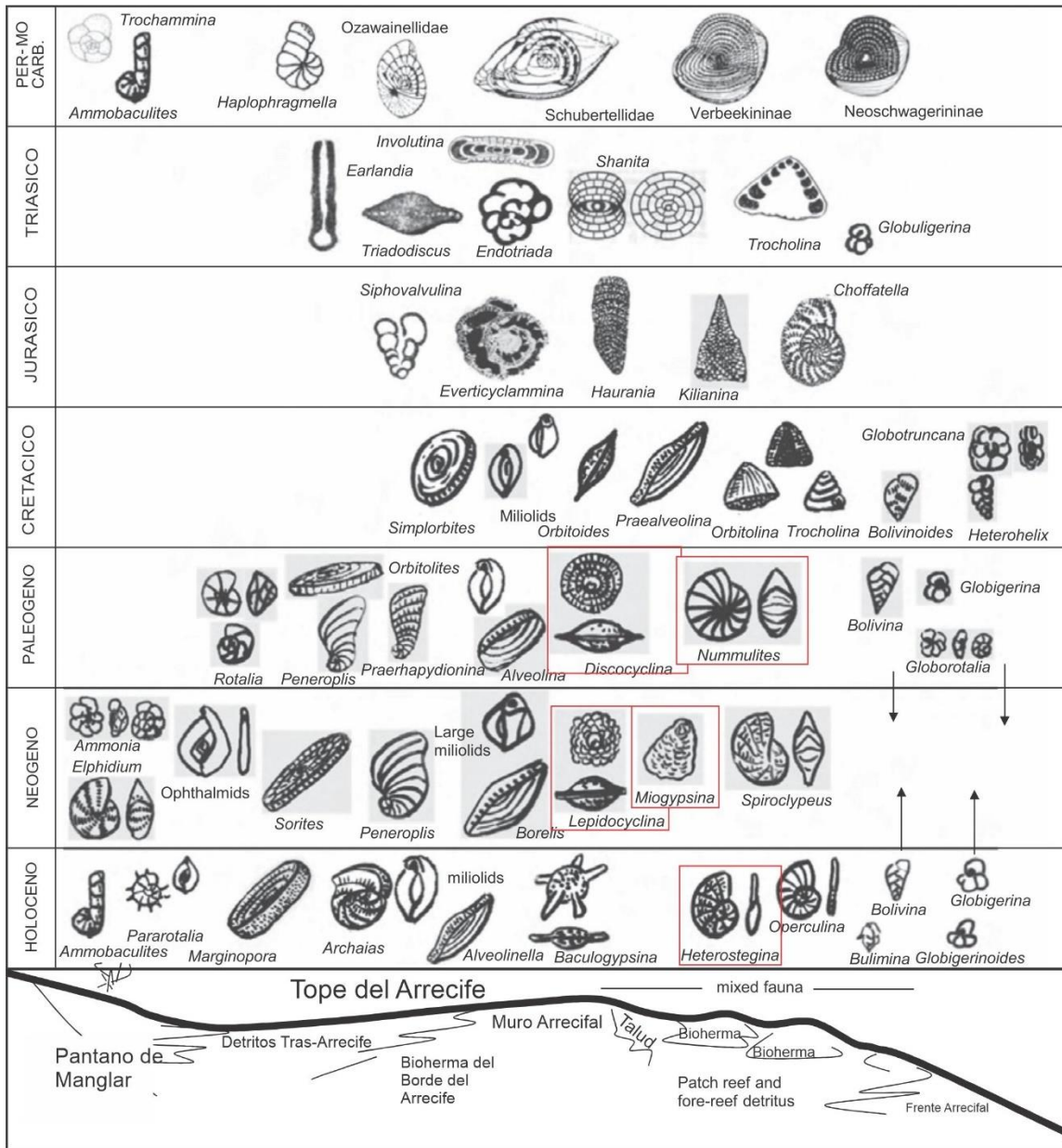
herramienta bioestratigráfica, paleoambiental, paleobiológica y paleoceanográfica. (Flügel, 2004; BouDagher-Fadel, 2018).

A su vez, desde el punto de vista ecológico (hábitos de vida), los foraminíferos pueden ser divididos en dos grandes grupos: planctónicos y bentónicos. Teniendo en cuenta el énfasis de este trabajo solo referimos las formas bentónicas, las cuales presentan una relación estrecha con el substrato (Figura 3). Los foraminíferos bentónicos presentan una gran diversidad, con un estimado de al menos 10000 especies existentes, y para las plataformas carbonatadas se suelen segregar de manera informal un grupo de estas formas: los macroforaminíferos (Arche, 2010; BouDagher-Fadel, 2018).

Los macroforaminíferos por lo general se caracterizan por su mayor tamaño (>2 mm en muchos casos), y por presentar complicados endoesqueletos. Esta última característica causa que su identificación suela hacerse a través de secciones delgadas y cortes de los especímenes (BouDagher-Fadel, 2018). La mayoría de los macroforaminíferos son de carácter nerítico, viviendo en ambientes arrecifales y plataformas carbonatadas cálidas y pobres en nutrientes (entornos oligotróficos), y son importantes productores de sedimentos carbonatados (BouDagher-Fadel, 2018).

Figura 3.

Distribución de los foraminíferos a lo largo del tiempo.



Nota: En rojo, se indican los especímenes representativos de plataforma carbonatadas del caribe. Modificado de BouDagher, (2018).

2.2 Algas calcáreas

De acuerdo a Dreckmann et al. (2013), las algas comprenden un grupo de organismos acuáticos con metabolismo autótrofo, y que presentan como pigmento fotosintético primario la clorofila tipo a. Dicha característica los relaciona filogenéticamente con las plantas superiores, si bien los aspectos taxonómicos del grupo de las algas aún son muy discutidos. Aunque la fotosíntesis es su principal vía de nutrición, existen grupos que presentan también una forma de nutrición heterótrofa (osmotrófica, fagotrófica o saprobiótica). Otros organismos presentan en cambio un tipo de nutrición mezclada de autotrofia y heterotrofia, denominada mixotrofia (Dreckmann et al., 2013). Las algas que habitan en ambientes acuáticos pueden ser planctónicas (suspendidas en la columna de agua), o bentónicas (asociadas a un sustrato).

La denominación de “algas calcáreas” es un término informal, que agrupa a distintos grupos de protistas, afines a las plantas, y que tienen facilidad para calcificarse total o parcialmente. Este aspecto favorece su recurrencia en el registro fósil y causa que sean considerados como bioconstructores de arrecifes, al igual que correspondan a uno de los componentes bioclásticos más abundantes de las rocas carbonáticas (Canudo, 2004).

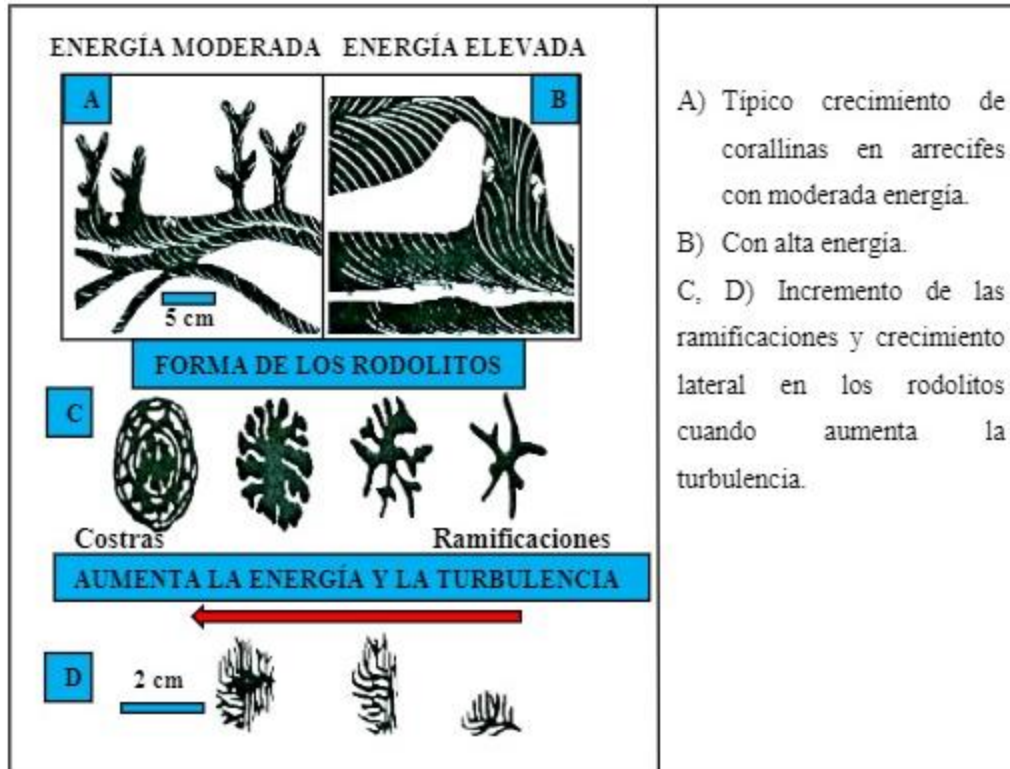
Dentro de dicha categorización informal, las algas calcáreas se describen en dos grupos principales: algas rojas y algas verdes (marinas), y las carófitas (continentales a marino someras). Como con otros grupos de organismos, hay muchos factores físicos, químicos y biológicos que influyen en la distribución de las algas calcáreas. En general, los más importantes son la luz (relacionada con la profundidad), la turbidez, la temperatura, el tipo de sustrato, y la energía del medio (Canudo, 2004) Por tal motivo, las algas calcáreas pueden ser unos magníficos

indicadores paleoambientales, ya que cada especie suele estar adaptada a condiciones ambientales determinadas (estenotípicas; Canudo, 2004).

Igualmente, dentro de la terminología utilizada por los especialistas en algas calcáreas, se encuentran los rodolitos. Los rodolitos son estructuras compuestas principalmente de algas rojas coralinas (>50%), no geniculadas (sin estructuras dobladas sobre sí mismas; Foster et al., 1997), las cuales, dependiendo de las condiciones de energía y turbidez, presentan variaciones en su morfología y tipo de crecimiento (Figura 4). A su vez, un rodolito individual puede estar integrado por una o varias especies coralinas, además de contener otros organismos incrustantes como briozoarios, foraminíferos bentónicos (macroforaminíferos u organismos de menor escala) o gasterópodos. Al igual que las estructuras formadas por las colonias de pólipos de coral o los microorganismos generadores de los estromatolitos, los mantos de rodolitos conforman agregados de estas estructuras, y se encuentran en muchas partes del mundo (Foster et al., 1997). Sin embargo, es importante indicar que algunos grupos de corales y otras algas rojas, como las de la Familia Peyssonneliaceae, también pueden formar estructuras libres que se denominan “rodolitos” (Ballantine et al., 2000, Lund et al., 2000).

Figura 4.

Relación de energía y forma de los rodolitos.



- A) Típico crecimiento de corallinas en arrecifes con moderada energía.
- B) Con alta energía.
- C, D) Incremento de las ramificaciones y crecimiento lateral en los rodolitos cuando aumenta la turbulencia.

Nota: Tomado de Canudo, (2002).

2.3 Las plataformas carbonatadas del Eoceno en la región Caribe

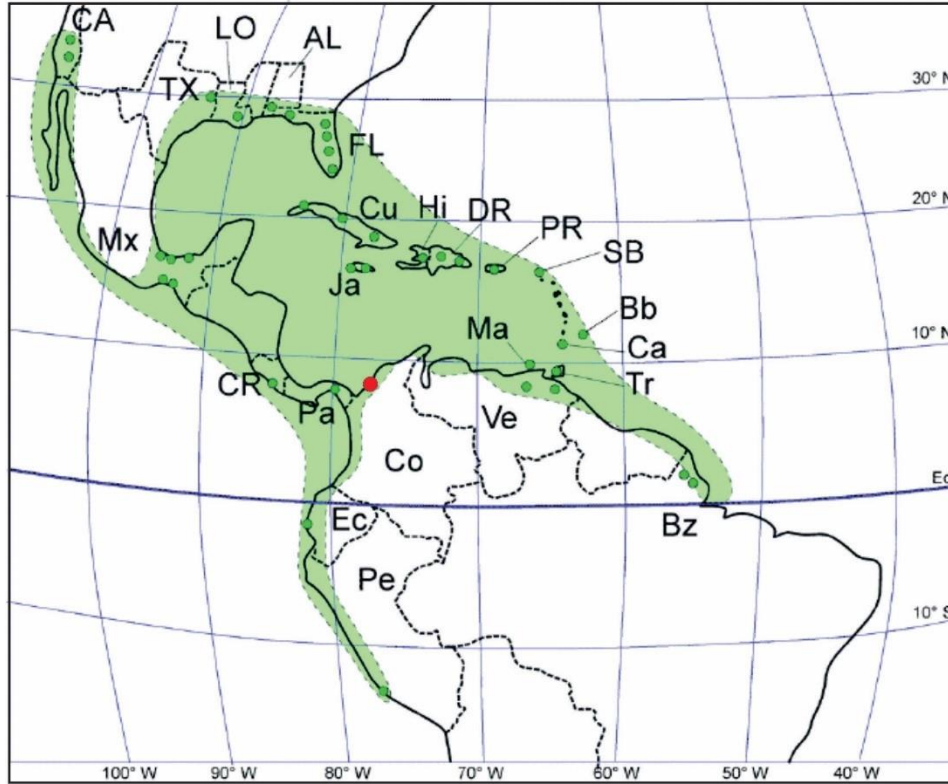
El Eoceno medio (37.8- 47.8 Ma; Gradstein et al., 2012) fue una época de alta concentración de gases de efecto invernadero y temperaturas globales cálidas en relación con cualquier otro momento del Cenozoico. Particularmente, en regiones tropicales, una gran cantidad de eventos transitorios de calentamiento ocurrieron a lo largo del Eoceno medio (Zachos et al., 2001,2008; Anagnostou et al., 2016), y durante dichos periodos de calentamiento, el lecho marino de los trópicos estuvo casi desprovisto de estructuras de arrecife de coral (Scheibner & Speijer, 2008; Kiessling, 2009; Perrin & Kiessling, 2010; Norris et al., 2013). A pesar de esto, y debido a que el nivel del mar estuvo varias decenas de metros más alto que en el océano moderno (Miller et al., 2011), existió un desarrollo de gruesas sucesiones carbonatadas

de aguas someras durante ese intervalo de tiempo. A falta de las comunidades coralinas, la generación del carbonato presente en las plataformas tuvo su origen en la proliferación y diversificación de diferentes grupos de foraminíferos bentónicos de mayor tamaño (macroforaminíferos) y de algas incrustantes (Nebelsick et al., 2005; Scheibner & Speijer, 2008; Payros et al., 2010; Norris et al., 2013).

En el dominio del Caribe, incluyendo el norte de Colombia, se han venido estudiando las plataformas carbonatadas del Paleógeno (Figura 5; e.g. Guzmán et al., 2004; Bermúdez et al., 2009; Salazar-Ortiz et al., 2020, Mitchell et al., 2022). Aunque las descripciones detalladas de petrofacies, o los componentes de los bioclastos aún no han sido completamente definidos en todas las localidades y sucesiones sedimentarias, parece que la mayoría de los depósitos carbonataos comprenden acumulaciones de foraminíferos bentónicos como el componente principal, y proporciones variables de algas rojas calcáreas. Estas últimas, formadas en rampas desprovistas de arrecifes de coral de margen de plataforma.

Figura 5.

Mapa de la distribución de Macro Foraminíferos Bentónicos provincias biogeográficas.



Nota: Mapa de la distribución de macroforaminíferos bentónicos. Provincia biogeográfica de *Lepidocyclina* en América (Caribe) utilizando la configuración tectónica actual. Los puntos indican ocurrencias seleccionadas de LBF. AL, Alabama; Bb, Barbados; Bz, Brasil; CA, California; CR, Costa Rica; Ca, Carriacou; Cu, Cuba; DR, República Dominicana; CE, Ecuador; Florida, Florida; Hola Haití; Ja, Jamaica; LO, Luisiana; Mamá, Margarita; MX, México; Pensilvania, Panamá; Pe, Perú; PR, Puerto Rico; SB, San Bartolomé; Tr, Trinidad; Texas, Texas; Ve, Venezuela; Co, Colombia (Sección el Hueso). Figura modificada de Mitchell et al, (2022).

3. Localización y Marco Geológico

La zona de trabajo se encuentra localizada en las inmediaciones del municipio de San Antero (Departamento de Córdoba), en las coordenadas planas de Gauss-Krüger:

N: 1524207

N: 1524107

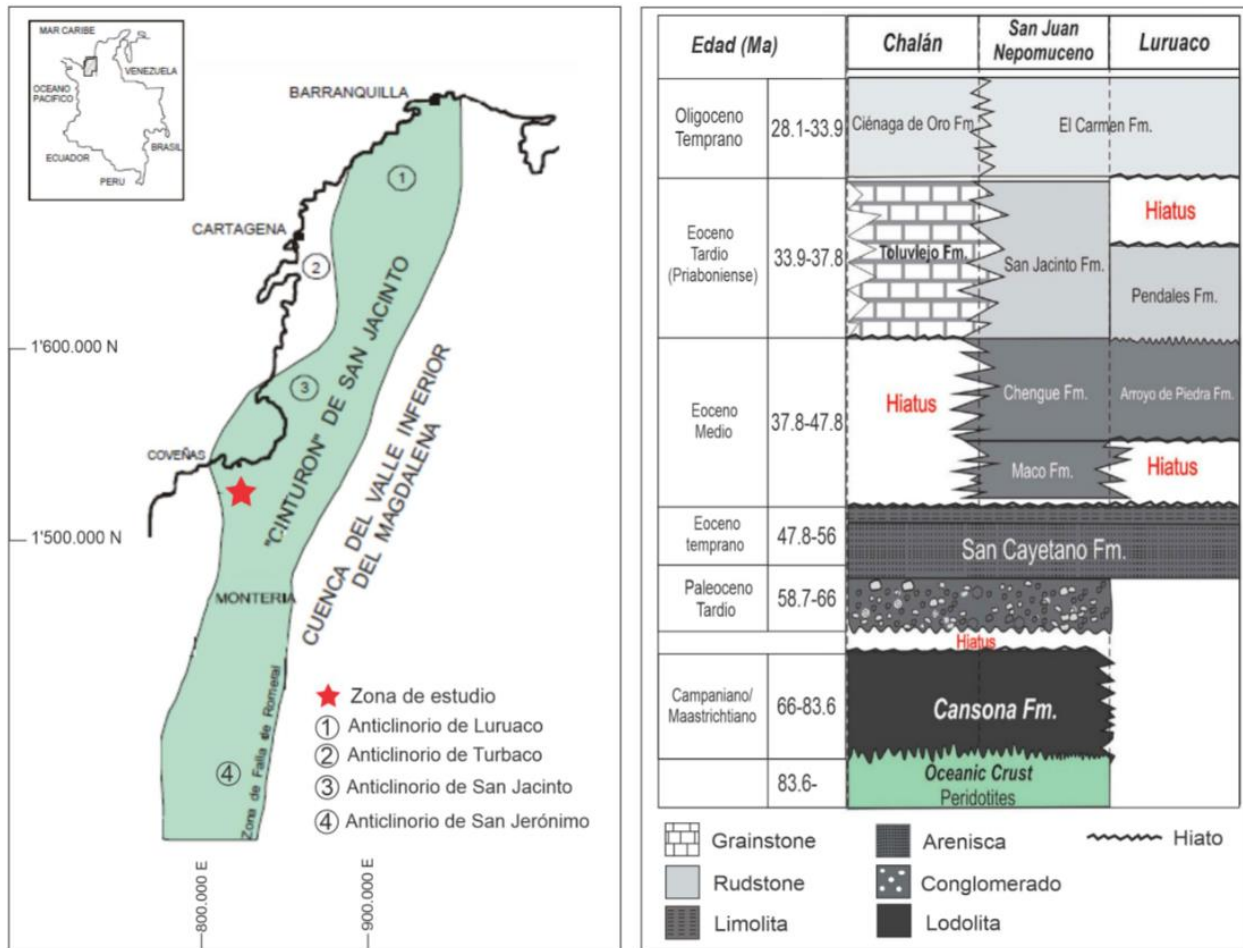
E: 826218

E: 826287

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco oeste del Cinturón Plegado de San Jacinto, al noroeste de la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena (Figura 6).

Figura 6.

Mapa de la ubicación de la localidad estudiada, sectores aledaños al municipio de Coveñas.



Nota: A la Izquierda: Mapa de la ubicación de la zona de estudio. Modificado de GEOTEC, (2003). A la derecha: Columna generalizada del cinturón plegado de San Jacinto, se observan las unidades aflorantes en las localidades de Chalán, San Juan de Nepomuceno y Lurumaco. Modificado de Salazar-Ortiz et al., 2020.

En un contexto geológico ya regional, tanto el Valle Inferior del Magdalena como el CPSJ forman parte de una región donde la placa oceánica Caribe y la placa continental Sudamericana vienen interactuando a lo largo del Cenozoico. Esto último, a pesar de que existe cierto debate sobre la ocurrencia de subducción plana de la placa Caribe debajo de América del Sur (Rosello & Cossey, 2012; Mora-Bohórquez et al., 2020).

En términos generales, el CPSJ es una estructura alargada antiformal, la cual se encuentra limitada al este por el sistema de fallas de Romeral, y al oeste por el lineamiento del Sinú. El cinturón presenta una tendencia con dirección NE-SW, con una longitud aproximada de 360 km (Caro & Spratt, 2003; Guzmán et al., 2004). Dicho sistema está caracterizado por estructuras anticlinales estrechas y alargadas comúnmente falladas, separadas por sinclinales menos deformados a lo largo de la misma (Duque-Caro, 1984). El marco litoestratigráfico general indica que sobre la sedimentación marina del Cretácico Superior (Formación Cansona), ocurre una potente secuencia sedimentaria Cenozoica, mayoritariamente detrítica, con limitados intervalos calcáreos bioclásticos que comprende edades entre el Paleoceno tardío (Formación San Cayetano) y el Plio-Pleistoceno (e.g. Formaciones Popa, Tubará, entre otras), con importantes discordancias regionales en el Eoceno medio, Oligoceno, y Mioceno medio (Duque-Caro 1979, 1984; GEOTEC, 2003; Cediél et al., 2003; Guzmán et al., 2004; Mora-Bohorquez et al., 2020).

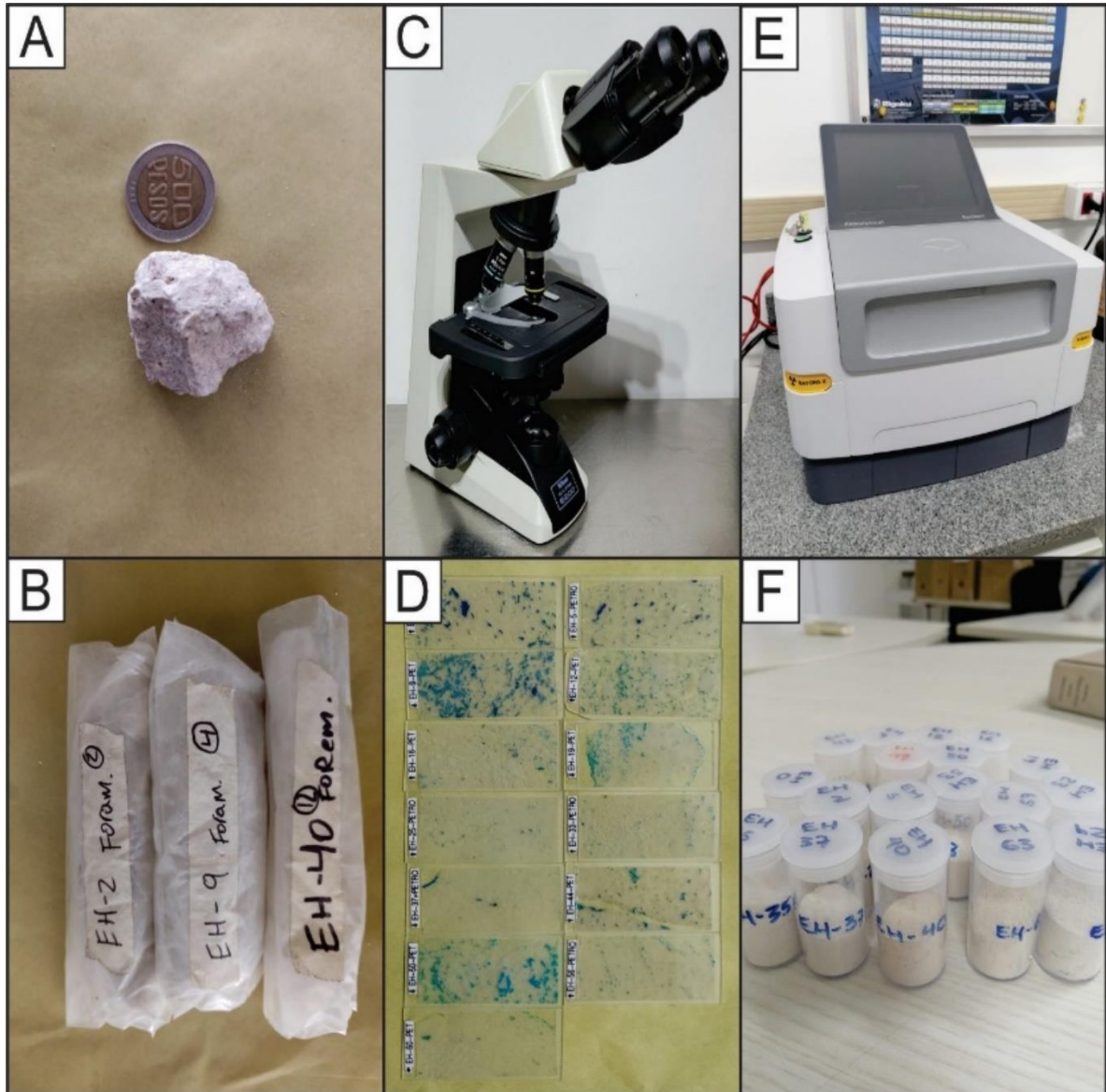
La Formación Toluviejo aflora a lo largo de la parte central del CPSJ (Figura 6). Se ha sugerido una edad de Eoceno medio a tardío (Luteciano–Priaboniano). Suprayace inconformemente a la Formación San Cayetano, e infrayace inconformemente a la Formación El

Carmen. En su sección tipo, consiste principalmente de una serie de calizas marrones con abundantes macroforaminíferos (géneros *Lepidocyclina*, *Nummulites*, entre otros), rodolitos de algas rojas, oncolitos, y fragmentos de invertebrados (equinodermos y moluscos). En dicha unidad también se reportan niveles con areniscas líticas de grano fino a medio, areniscas de grano grueso ricas en carbonatos, glauconíticas, al igual que margas y lodolitas grises (Guzmán et al., 2004; Salazar-Ortiz et al., 2020). La Formación Toluviejo suele ser correlacionada estratigráfica y ambientalmente con la Formación Chengue, y con parte de la formación San Jacinto (Figura 6). En el norte del CPSJ, se relaciona en cambio con las formaciones Pendales, la cual es predominantemente clástica, y Arroyo de Piedra, unidad predominantemente calcárea (Guzmán et al., 2004; Salazar-Ortiz et al., 2020).

4. Metodología

Figura 7.

Elementos empleados para la realización del proyecto.



Nota: A. Muestra de mano B. Bolsas muestra de mano C. Microscopio Nikon E200 eclipse D. Secciones delgadas E. Espectrómetro PanAnalytical Epsilon 1 XRF F. Muestras pulverizadas para geoquímica.

4.1 Revisión Bibliográfica

En esta etapa se realizó la recolección y diagnóstico de información correspondiente a trabajos previos realizados en la zona de estudio, y/o que abarcaran el tema principal del presente trabajo. La recolección de información comprendió artículos científicos, trabajos de grado, libros y mapas representativos del área de estudio. Para la filtración de la información a tener en cuenta se tuvieron los siguientes ejes temáticos: (1) Estratigrafía: Las principales referencias correspondieron a los trabajos de Guzmán et al. (2004) y los trabajos regionales de Duque-Caro et al. (1996); (2) evolución geológica: En este apartado se revisaron los trabajos realizados por Mora-Bohórquez et al. (2020) y Salazar-Ortiz et al (2020) en el CPSJ y la sucesión sedimentaria del Eoceno; (3) Paleontología y petrografía: Para este punto se tuvieron en cuenta los manuales de Flügel (2004), al igual que el libro de Boudhager-Fadel (2018), para aspectos morfológicos y bioestratigráficos relacionados con los macroforaminíferos. De igual nos apoyamos en el atlas a color de Adams & Mackenzie (1998) para la identificación de bioclastos. Referencias adicionales sobre estratigrafía del CPSJ o aspectos paleoambientales fueron indicados en la discusión.

4.2 Trabajo de Laboratorio

Para el presente trabajo se dispuso de 13 secciones delgadas Preparadas y proporcionadas por la empresa HOCOL S.A (Figura 7, A, D). Dicho material forma parte de las calizas descritas en la localidad de la Formación Toluviejo referida como sección El Hueso. De igual forma, se dispuso de material adicional para los análisis de geoquímica y descripción macroscópica del material. La relación de muestras y tipo de análisis es indicada en la Tabla 1.

4.2.1 Petrografía

La caracterización se llevó a cabo mediante el uso del microscopio de luz transmitida marca NIKON (Modelo Eclipse E200) con un aumento de 5x, en el Laboratorio de Petrografía Avanzada de la Escuela de Geología - UIS (Figura 7, C). Dicho análisis constó de dos pasos: (1) Identificación y medición de los componentes de la muestra, diferenciándolos entre bioclastos, matriz, cemento, porosidad y elementos terrígenos, de acuerdo a la propuesta de identificación presentada en *A colour Atlas of carbonates sediments and rocks under the microscope* (Adams & Mackenzie, 1998) y *A color guide to the petrography of carbonate rocks* (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003); (2) Conteo de 300 puntos para cada sección delgada, mediante la metodología de *Gazzi Dickinson* (Ingersoll et al., 1984). Con el fin de clasificar las calizas se utilizó la clasificación textural de Dunham (1992).

4.2.2 Paleontología

Se realizó la identificación de los diferentes tipos de bioclastos presentes a lo largo de cada sección estudiada, diferenciando entre categorías taxonómicas generales de los foraminíferos bentónicos, tales como las familias Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Discocyclinidae y Soritidae. Otros elementos a identificar correspondieron a algas rojas e invertebrados (equinodermos, moluscos). Para la clasificación de los foraminíferos se tuvo en cuenta inicialmente el trabajo de Boudhager-Fadel (2018) y Adams & Mackenzie, (1998). En una fase posterior del proyecto, se contó con la asesoría del Profesor Simon Mitchell (University of West Indies, Jamaica) para la identificación de algunas especies de foraminíferos, al igual que observaciones generales acerca de su paleoecología. Para la descripción de las algas se tuvo en cuenta lo referido por Salazar-Ortiz et al. (2020) en la Formación Chengue.

4.2.3 Geoquímica

Los análisis de fluorescencia de rayos X (FRx) se realizaron en 5-10 g de roca molida ($n = 18$ muestras; intervalo 0.7-94.5 m), con concentraciones elementales tomadas como conteos por segundo (cps) y relaciones logarítmicas en algunos casos para evitar valores extremos (Figura 7, E). Las muestras se midieron a 10 kV (150 μ A, sin filtro) para las intensidades de Al, Mg, Si; 12 kV (400 μ A, filtro Al-50) para intensidades Ca, K, Ti y V; 20 kV (250 μ A, filtro Al – 200) para intensidades de Co, Cr, Fe y Mn; y 50 kV (100 μ A, filtro Ti) para intensidades Ba y Rb. Los análisis de Frx se realizaron con un espectrómetro PanAlytical Epsilon 1 XRF, en el itt Oceaneon (Unisinos, Brasil).

Diversas relaciones elementales fueron tenidas en cuenta para hacer inferencias paleoambientales. Las fluctuaciones en la relación $\log(\text{Fe}/\text{Ca})$ se pueden usar como un indicador de aporte de material terrígeno (Kujau et al., 2010; Govin et al., 2012). A su vez, la relación Sr/Ba puede ser utilizada como un indicador de paleosalinidad, teniendo en cuenta que el estroncio tiende a ser absorbido en sedimentos de grano fino depositados bajo aguas de alta salinidad, mientras que el contenido de bario es mayor en agua dulce proveniente de esorrentía continental (p. ej., Wei y Algeo, 2020; Yelwa et al., 2022). Las condiciones de paleoxigenación en las aguas de fondo fueron evaluadas por medio de la relación de elementos traza sensitivos a las condiciones redox (V, Cu), respecto a los valores hallados de aluminio (Dummann et al., 2021).

Tabla 1.

Tabla descriptiva de los análisis realizados a las muestras.

Nombre de la muestra	Altura Estratigráfica (m)	Litología (Dunham 1962)	Petrografía	Paleontología	Geoquímica
EH-63	94.6	Grainstone			X
EH-60	90	Grainstone	X	X	
EH-57	85.5	Grainstone			X
EH-56	84	Grainstone	X	X	
EH-53	79	Grainstone			
EH-50	75	Grainstone	X	X	X
EH-47	73.3	Grainstone			X
EH-44	66	Grainstone	X	X	
EH-42	63	Grainstone			X
EH-40	60	Grainstone			X
EH-37	55.5	Grainstone	X	X	X
EH-35	52.5	Grainstone			X
EH-33	49.5	Grainstone	X	X	
EH-29	43.5	Grainstone			X
EH-25	37.5	Grainstone	X	X	
EH-23	34.5	Grainstone			X
EH-19	28.5	Grainstone	X	X	X
EH-16	24	Grainstone	X	X	X
EH-12	18	Grainstone	X	X	X
EH-9	13.5	Grainstone	X	X	X
EH-5	7.5	Grainstone	X	X	X
EH-2	3	Grainstone	X	X	X
EH-0	0.5	Grainstone			X

Nota. Análisis realizados a las muestras correspondientes a la localidad el hueso. Los análisis de petrografía y paleontología se realizaron en el laboratorio de microscopia avanzada de la Universidad Industrial de Santander. Los análisis de geoquímica se realizaron en el itt Oceaneon (Unisinos, Brasil).

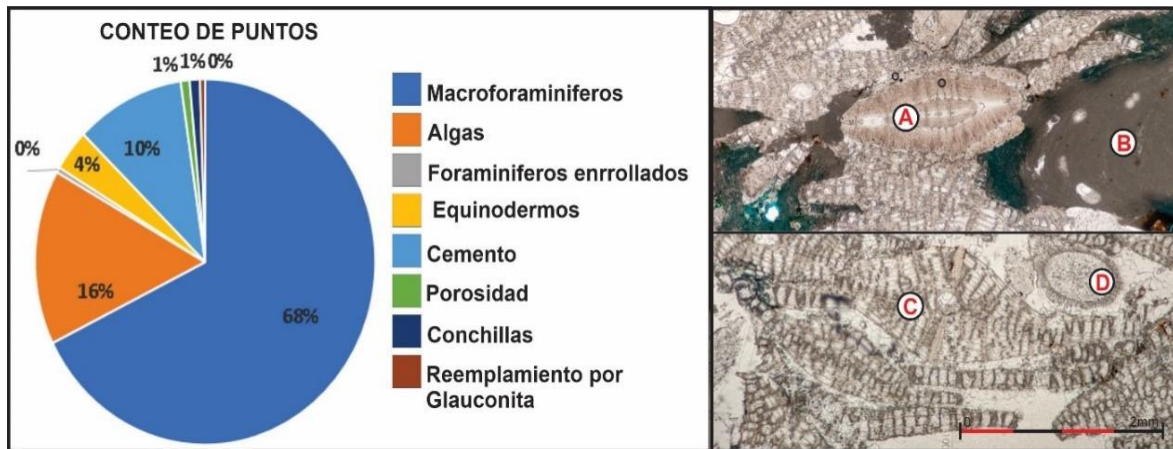
5. Resultados

5.1 Descripción Petrográfica

Las muestras estudiadas correspondieron a una sucesión de calizas bioclásticas (según Folk, 1974) o *grainstone* (Dunham, 1962), cabe resaltar que las muestras descritas como *grainstone* en este trabajo corresponden a material de carácter autoctono, de armazón clasto-soportado y cementado por calcita, compuesta predominantemente de macroforaminíferos bentónicos de la familia *Lepidocyclinae*. Otros elementos correspondieron a nódulos de algas rojas, restos de equinodermos y fragmentos de bivalvos, los cuales presentan una variación bioclástica a lo largo de la sucesión (Figura 8).

Figura 8.

Principales componentes de las muestras.

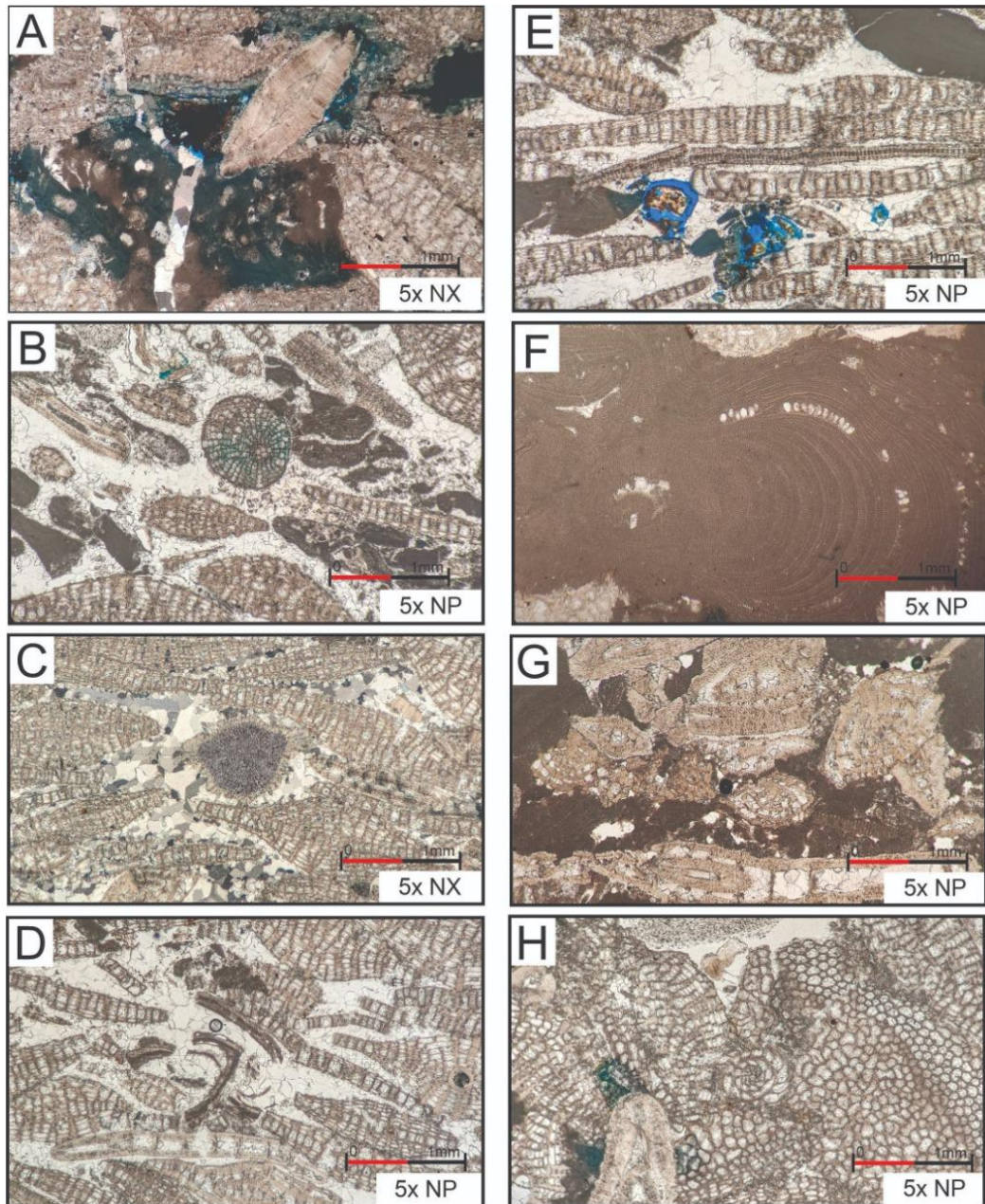


Nota: Izquierda: Principales componentes en las 13 muestras analizadas de la sección El Hueso. Derecha: Muestra representativa (EH-12) donde se muestran algunos de los componentes presentes en las secciones estudiadas: Macroforaminíferos (A. *Nummulites* spp., C. *Lepidocyclina* spp.), algas Rojas (B. Rodolito) y equinodermos (D). La escala representa 2mm.

De base a tope de la sucesión, se observó que los macroforaminíferos bentónicos son muy abundantes (77%), en especial los pertenecientes a la familia Lepidocyclinae, distribuidos homogéneamente a lo largo de las secciones. En menor medida, varía la proporción del resto de los componentes (algas, restos de equinodermos, fragmentos de bivalvos y cemento). Esto se puede observar en las muestras EH-2 y EH-5 (Figura 9, B). Un aspecto a destacar en la localidad de El Hueso es la variación inversa entre los macroforaminíferos y las algas rojas en algunas de las muestras analizadas hacia la base de la sección (EH-9, EH-12, EH-16, EH-19), donde se evidencia que las muestras con mayor aparición de nódulos con bioperturbaciones denominados rodolitos, presentan una menor cantidad de macroforaminíferos (Figura 9, F). Para las secciones EH-25, EH-33, EH-37 se vuelve a evidenciar la predominancia de los macroforaminíferos, en comparación con las proporciones de las algas rojas, restos de equinodermos, y los fragmentos de bivalvos (Figuras 9, E).

Figura 9.

Bioclastos característicos de la localidad El Hueso.



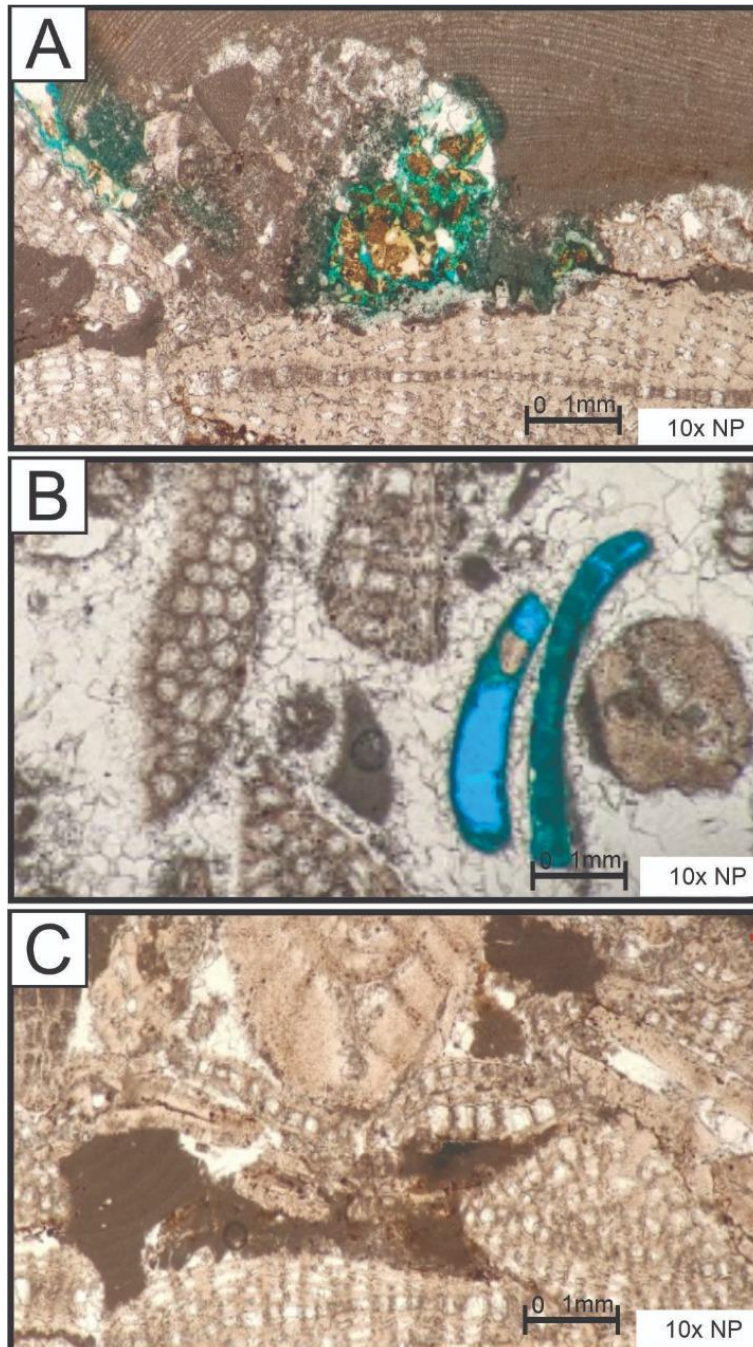
Nota: A. Alga roja cortada por venilla de calcita, *Nummulites* spp. (EH-9). B. *Lepidocyclina* spp. (EH-16). C. Resto de equinodermo (EH-37). D. Fragmentos de bivalvos (EH-37). E. *Discocyclina* spp. (EH-2). F. Nódulo de algas rojas con bioperturbaciones (EH-12). G. *Nummulites* spp. (EH-19). H. Foraminífero bentónico enrollado (EH-25). NP; Nícoles Paralelo. NX; Nícoles Cruzados.

Hacia el tope de la localidad (muestras EH-44, EH-50) se observa de nuevo una leve disminución en la presencia de los macroforaminíferos, acompañado de un aumento en la presencia de algas rojas, y en menores proporciones la presencia de equinodermos, conchillas de bivalvos y cemento calcáreo. Por último, hacia el tope se observó un aumento progresivo en la presencia de los foraminíferos bentónicos, con una disminución gradual de las algas rojas y equinodermos (Figura 9, H). En tanto los restos de bivalvos y de cemento esparita conservan bajas proporciones.

La porosidad a lo largo de la localidad es baja de entre 1-5%, de tipo secundario, y su forma se asemeja a la de los bioclastos. En las muestras EH-9, EH-12, EH 16, EH-16, EH- 44, EH-50 y EH-56, se observa una fuerte recristalización mientras que en el resto de material analizado esta tiende a ser moderada. A su vez, en las muestras EH-2, EH-5, EH-9, EH-12 y EH-25 se observa reemplazamiento de algunos bioclastos a glauconita diseminada y con presencia de óxidos, mientras que muestras como EH-9 y EH-44 presentan una vena de calcita que corta la sección delgada (Figura 10).

Figura 10.

Factores diageneticos.



Nota: A. remplazamiento de glauconita (EH-12) B. porosidad en forma de bioclastos (EH-16) C. recristalización (EH-16).

5.2 Paleontología

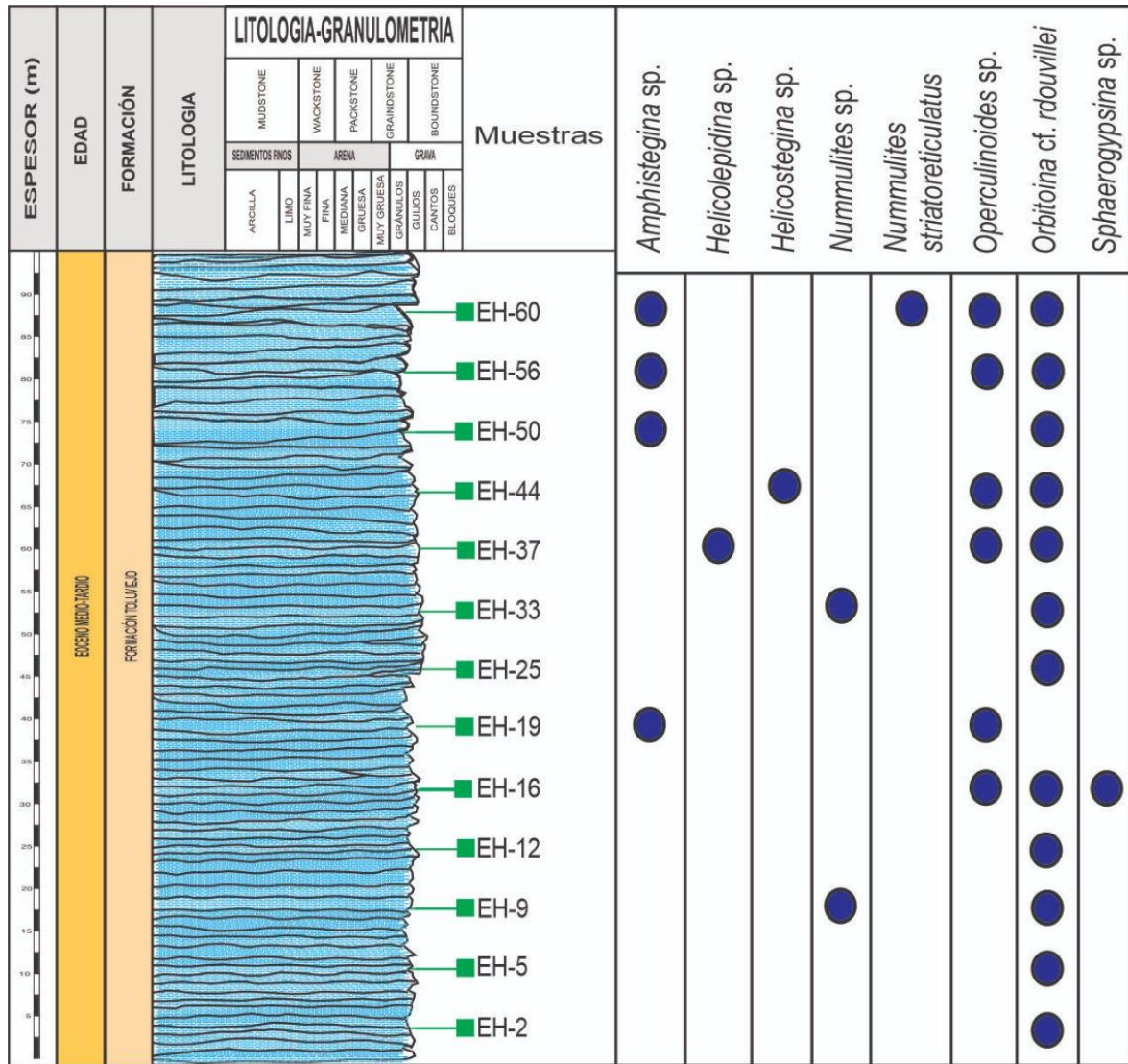
Con asesoría del profesor Simon Mitchell (University of West Indies, Jamaica) se pudo validar la taxonomía de los ejemplares con mejor preservación a lo largo de la localidad El Hueso, y cuya síntesis se presenta en la Figura 11. En general, el género *Orbitoina* (= *Lepidocyclina* según distintas publicaciones) es el taxón más representativo en las asociaciones de macroforaminíferos, y probablemente perteneciente a la especie *Orbitoina*. cf. *rdouvillei*. Otros taxones, aunque en menor proporción en comparación con *Orbitoina*. cf. *rdouvillei*, correspondieron a *Nummulites striatoreticulatus*, los géneros *Helicolepidina*, *Nummulites*, *Operculinoides*, *Sphaerogypsina*, al igual que probables especímenes de los géneros *Amphistegina* y *Helicostegina*.

Para efectos de una mayor simplificación de la información paleontológica, se referirán las asociaciones dentro de categorías taxonómicas más amplias (familias Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Discocyclinidae y Soriitidae).

Para el caso de las algas calcáreas no se pudo profundizar mucho en su taxonomía, si bien las formas halladas comparten similitudes con las especies *Lithotaminium* y *Sporolithon*, descritas previamente para la Formación Chengue (Salazar-Ortiz et al., 2020).

Figura 11.

Registro estratigráfico de la localidad el Hueso con aparición de especies de foraminiferos.



Nota: Registro estratigráfico de la localidad el Hueso mostrando la aparición de especies de foraminíferos bentónicos.

5.3 Definición de las petrofacies

Teniendo en cuenta los análisis realizados en laboratorio y la revisión bibliográfica, determinamos tres petrofacies caracterizadas por sus dos elementos principales: los macroforaminíferos y las algas rojas (Figura 13).

Para la primera petrofacies (**Pfor**) el principal componente corresponde a los macroforaminíferos entre los cuales se identificaron representantes de las familias Lepidocyclinidae, Discocyclinidae, Nummulitidae y Soritiidae. Estos están acompañados en menor proporción por bioclastos de las algas rojas, equinodermos y fragmentos de bivalvos. En la segunda petrofacies (**PAlg**) se identificó una mayor cantidad de algas rojas, formando estructuras nodulares en un sedimento bioperturbado (rodolitos). La tercera petrofacies (**Pfa**) se caracterizó por una menor presencia de algas rojas en comparación a la petrofacies **PAlg**, manteniendo aún las estructuras de nódulos de algas con bioperturbaciones (Figura 13).

A continuación, se indica a detalle las características y la distribución estratigráfica de cada petrofacies (Figura 12).

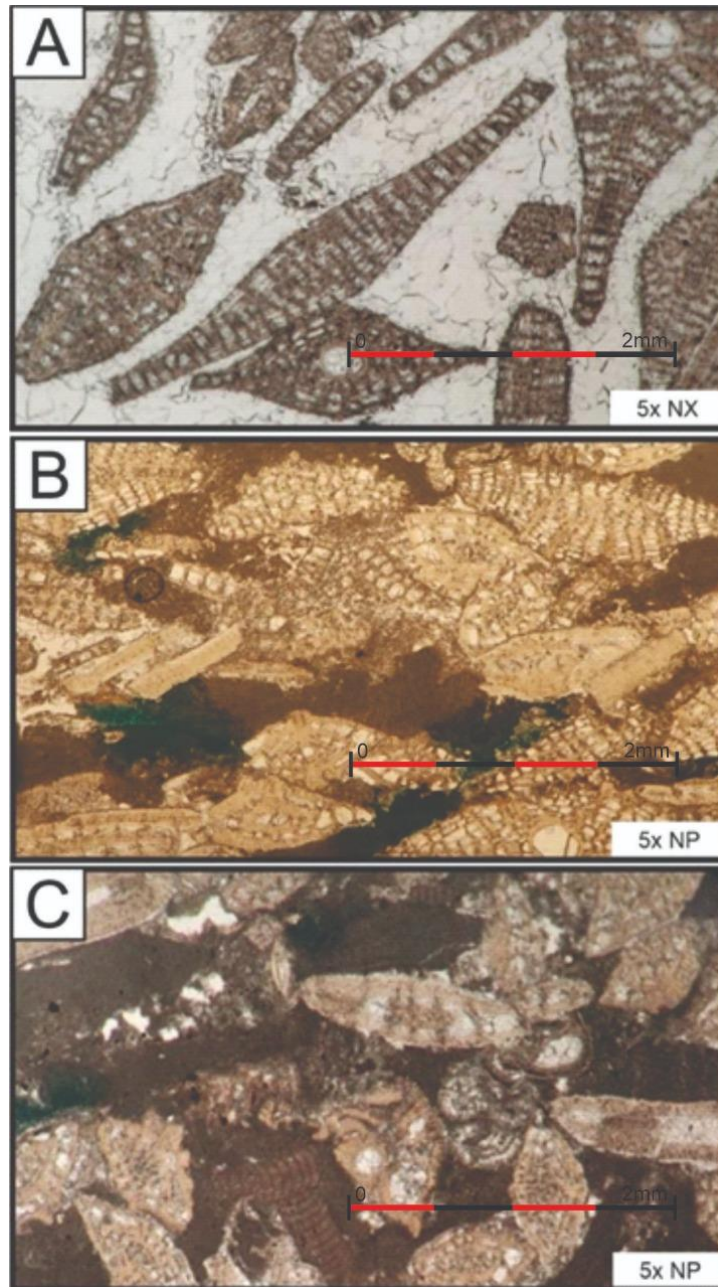
Pfor: Esta petrofacies se encuentra representada por las muestras EH-2, EH-5, EH-25, EH-33, EH-37, EH-60, cuyas profundidades estratigráficas son 3 m, 7.5 m, 37.5 m, 49.5 m, 55.5 m y 90 m respectivamente. La característica principal de esta petrofacies es la gran abundancia de foraminíferos bentónicos de las familias Lepidocyclinidae, Nummulitidae, Discocyclinidae y Soritiidae. Otros de los bioclastos presentes en baja proporción son las algas rojas, al igual que los fragmentos de equinodermos y bivalvos. La característica textural predominante de esta petrofacies es de tipo grainstone (Figura 12A).

PAIg: Esta petrofacies se encuentra representada por las muestras EH-9, EH-12, EH-19, EH-50, cuyas profundidades estratigráficas son 13 m, 18 m, 28.5 m y 75 m respectivamente. La característica principal de esta petrofacies es la aparición de rodolitos junto con la alta abundancia de algas rojas en comparación a la baja abundancia relativa de los foraminíferos bentónicos, y otros bioclastos, como fragmentos de equinodermos y bivalvos. La característica textural es de tipo grainstone (Figura 12B).

Pfa: Esta petrofacies se encuentra representada por las muestras EH-44, EH-56 (66 m y 84 m respectivamente). La característica principal de esta petrofacies es que no se evidencia una marcada variación en la cantidad de foraminíferos respecto a la cantidad de algas rojas presentes, y por ende se consideró de composición mixta. Otros bioclastos presentes en baja proporción corresponden a restos de equinodermos y bivalvos. La característica textural predominante de esta petrofacies es de tipo grainstone (Figura 12C).

Figura 12

Petrofacies definidas en la localidad El Hueso.



Nota: Pfor (A), PAlg (C), Pfa (B), tomadas de las muestras EH-60, EH-19 y EH-56 respectivamente. NP; Nícoles Paralelo. NX; Nícoles Cruzados.

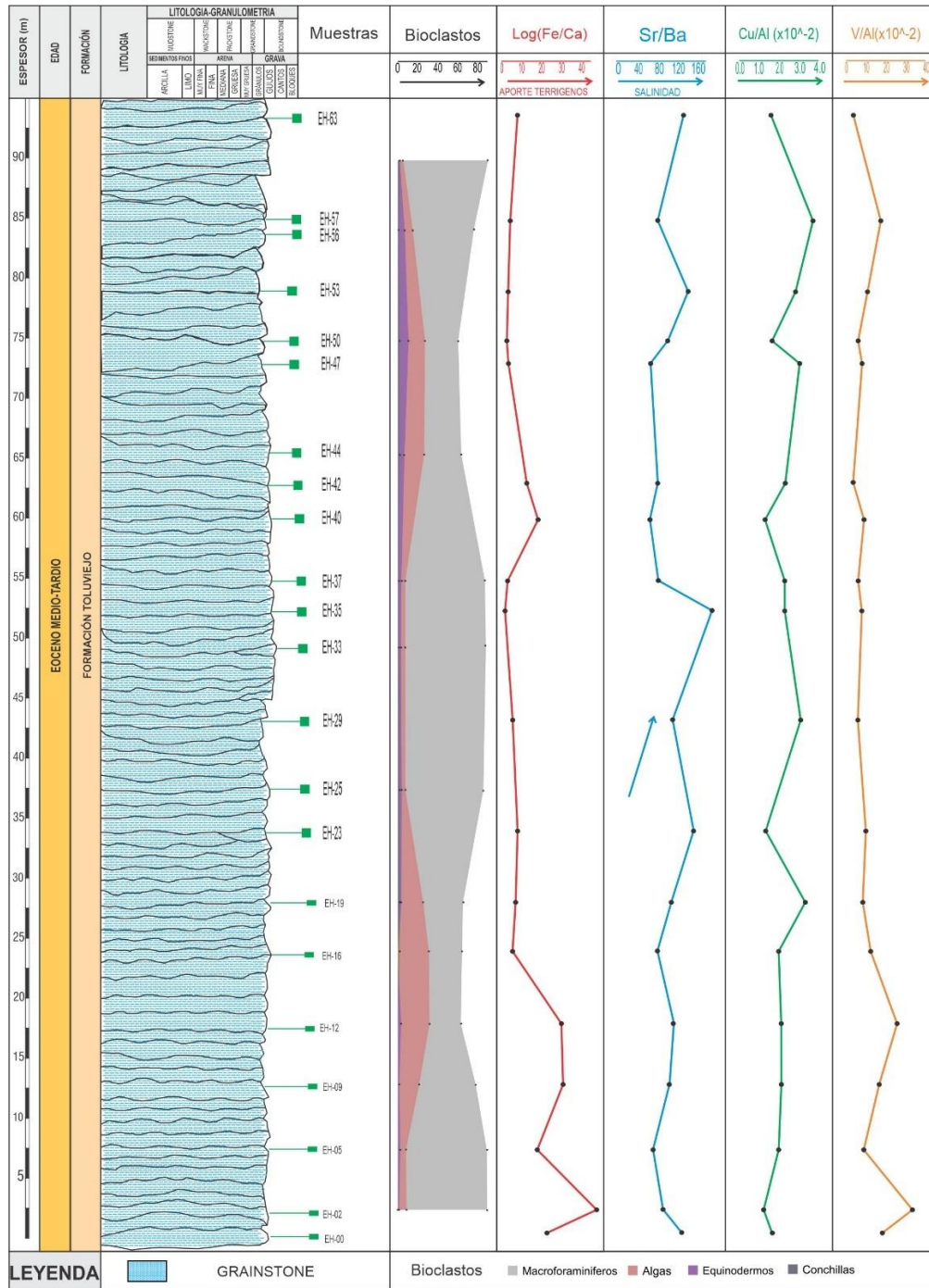
En términos generales el componente más dominante entre los bioclastos corresponde a los foraminíferos bentónicos, dentro de los cuales destaca por su abundancia, la familia Lepidocyclinae. Como componente común encontramos a la familia Discocyclinidae en el intervalo estratigráfico 37.5 a 55.5 m (muestras EH-25 a EH-3), y la familia Numulitidae en las muestras EH-19 y EH-44. El componente de menor abundancia entre los foraminíferos corresponde a formas de la familia Soritiidae (Figura 13). Las algas rojas como segundo bioclasto en dominancia, se encuentran concentrados como componente común en el intervalo de 13.5 a 28.5 m (muestras EH-9 a EH-19), y en las muestras EH 44, EH-50 y EH 56 (Figura 13).

5.4 Geoquímica

Los valores de la relación Fe/Ca presentan un rango entre 3.11 y 48, en los que se pueden observar variaciones significativas en tres grupos representativos: 0.5-18 m, 24-55.5 m y 60-94.6 m, entre los cuales el grupo basal es el que presenta las mayores estimaciones (Figura 14). En general, el valor más alto se encuentra en los 3 m (muestra EH-2), mientras que el más bajo se encuentra a los 52.5 m (muestra EH-35). A su vez, la relación Sr/Ba presenta un rango de valores entre 69.62–193, con al menos dos tendencias de crecimiento hacia la parte media y superior, al igual que variaciones divididas en los intervalos 0.5-28.5 m, 34.5-52.5 m, 55.5-75 m, y 79-94.6 m. El valor más alto se encuentra en la muestra EH-35 (52.5 m), y el menor se encuentra hacia los 60 m (muestra EH-40; Figura 14).

Figura 14

Distribución de los bioclastos y análisis geoquímicos de la localidad El Hueso.



Nota: Log (Fe/Ca) evidencia la presencia de terrígenos, Sr/Ba la variación en salinidad, Cu/Al y V/Al la variación de la oxigenación del medio.

Al analizar el comportamiento de los elementos traza sensitivos a las condiciones redox V y Cu, se observa que la relación Cu/Al presenta un rango de valores entre los 1.2×10^{-2} y 3.68×10^{-2} , en los que se pueden observar variaciones en cuatro grupos representativos: 0.5-28.5 m, 34.5-60 m, 63-73.3 m, y 75-94.6 m. Los mayores y menores valores de la relación Cu/Al se encuentran en 85.5 m (muestra EH-57), y 3 m (muestra EH-2) respectivamente (Figura 14). Por otro lado, los valores de la relación V/Al presentan un rango de 3.88×10^{-2} a 33.5×10^{-2} , con leves variaciones que pueden ser agrupadas en los intervalos 0.5-18 m, 24-79 m, y 85.5- 94.6 m. El valor con la concentración más alta se encuentra hacia los 3 m (muestra EH-2), mientras que más bajo se encuentra hacia los 63 m (muestra EH-42; Figura 14).

6. Discusión

6.1 Modelo de edad de la localidad El Hueso

De acuerdo a la asociación de foraminíferos identificada, y en particular la presencia de *Orbitoides cf. rdouvillei*, la localidad de El Hueso tiene una edad de Eoceno medio (Luteciano). Para la región Caribe y zonas cercanas, *Orbitoina rdouvillei* ha sido reportado en localidades de Perú, Jamaica y La Florida, con edades que oscilan entre el Luteciano y el Bartoniano (39. 4 a 43.5 Ma según Gradstein et al., 2012). De acuerdo a la zonación de macroforaminíferos regional de Mitchell et al., (2022), *O. cf. rdouvillei*, forma parte de la biozona ABZ11 (Zona de *Polylepidina chiapensis*).

En algunos trabajos la identificación de macroforaminíferos ha sugerido edades que van entre el Eoceno temprano (Ypresiano) y el Eoceno medio superior (Priaboniano, Salazar-Ortiz et al., 2020) para las formaciones Chengue y Arroya de Piedra. La definición de edad fue principalmente basada en la presencia de foraminíferos planctónicos (géneros *Acarinina*, *Clavigerinella*, *Pseudoglobigerinella*, entre otros) y nanofósiles calcáreos.

En conclusión, los estratos de la Formación Toluviéjo correspondientes a la localidad de la localidad El Hueso serían coetáneos con los reportados en las formaciones Chengue y Arroyo de Piedra, Esta observación está en línea con los modelos estratigráficos propuestos para el Cinturón Plegado de San Jacinto (Duque-Caro et al., 1996; Guzmán et al., 2004; Bermúdez et al., 2009; Mora-Bohórquez et al., 2020; Salazar-Ortiz et al., 2020).

6.2 Inferencias paleoambientales de la Formación Toluviéjo (Localidad El Hueso)

En general, por el tipo de petrofacies descritas, al igual que los bioclastos presentes en las muestras analizadas de la localidad El Hueso, se infiere un ambiente de depósito asociado a una rampa interna a media (Figura 15). Por ejemplo, la presencia común de grainstone, y la dominancia de macroforaminíferos de la familia Lepidocyclinidae ha sido asociada con ambientes de rampa media del Paleógeno de Jamaica (Mitchell et al., 2022), de acuerdo a los modelos de petrofacies de Flugel, (2004). A su vez, la presencia moderada a baja de las proporciones de algas rojas, indicarían una zona oligotrófica, con profundidades que oscilarían entre los 30 y los 100 m (Silva-Tamayo et al., 2020).

Pese a la aparente uniformidad litológica a lo largo de la localidad El Hueso, el hecho de que existan variaciones en las abundancias de los bioclastos presentes, sugiere que la rampa carbonatada presentó algunas variaciones en sus condiciones paleoambientales. Por ejemplo, la

predominancia de las algas rojas hacia la base de la sección, y la aparición de rodolitos ramificados en la petrofacie Palg, podría sugerir un aumento en la energía y turbulencia del ambiente (Canudo, 2004). Igualmente, la aparición de glauconita en la parte basal de la sección sugiere altos niveles de nutrientes y bajas tasas de acumulación de sedimento (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003).

La información geoquímica también ofrece pistas sobre las condiciones paleoambientales de la localidad El Hueso. El primer aspecto llamativo es el comportamiento de la relación Fe/Ca, la cual presenta un pico de abundancia hacia la base (Figura 14). En general, las concentraciones altas de hierro pueden estar asociadas a un mayor aporte de terrígenos (Kujau et al., 2010; Govin et al., 2012), y teniendo en cuenta que dicho pico precede los niveles donde hay predominio de algas, la proliferación de dichos organismos podría estar explicada por aquel proceso. A su vez, la relación Sr/Ba sugiere variaciones en las condiciones de paleosalinidad en la parte media de la sección, con aumentos y descensos leves en su relación (Figura 14). Teniendo en cuenta que el estroncio tiende a ser absorbido en sedimentos de grano fino depositados bajo aguas de alta salinidad, su variación podría estar asociado a fluctuaciones en el nivel del mar, o al aporte de agua dulce vía escorrentía superficial (Wei & Algeo, 2020; Yelwa et al., 2022). Finalmente, tanto la abundancia de los macroforaminíferos a lo largo de la sección, como los valores de las relaciones Cu/Al y V/Al, sugieren condiciones de paleoxigenación bastante estables. Esto, teniendo en cuenta que no se observaron variaciones significativas de los elementos sensitivos a fluctuaciones en las condiciones redox, como lo son el cobre y el vanadio (Dummann et al., 2021).

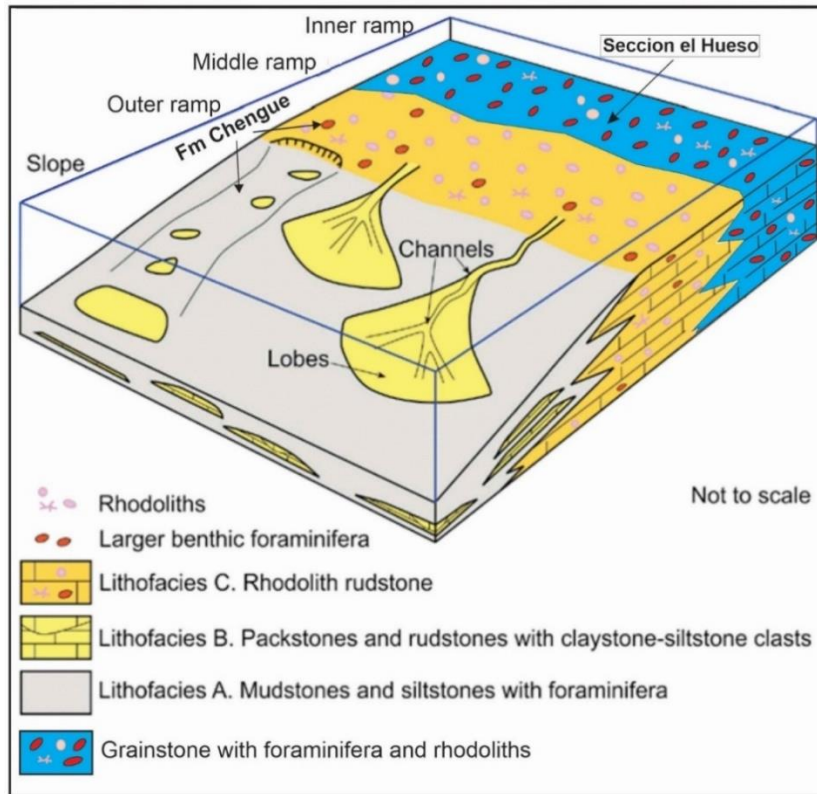
Al comparar la interpretación paleoambiental de la formación Toluviéjo para la localidad El Hueso con la efectuada por otros autores en la Formación Toluviéjo, se encuentran algunas similitudes. Por ejemplo, Raigosa, (2018) menciona que la formación Toluviéjo se desarrolló en una plataforma carbonatada somera, en regiones de alta energía, con condiciones estables de salinidad, óptimas condiciones de temperatura y entrada de luz. Dicha interpretación fue basada en análisis petrológicos y el reporte parcial de los macroforaminíferos. En dicho trabajo se describen siete microfacies, en las que predominan desde la base grainstone con porosidades no mayores al 5%, hasta llegar al tope donde la litología presente es de tipo wackstone, con porosidades de hasta el 15%. De acuerdo a lo observado en nuestro trabajo, hay una mayor similitud con las microfacies más basales que propone: (1) Grainstone - *Lepidocyclina*, *Nummulites*, algas rojas, glauconita, (2) Grainstone – Rodolitos, *Lepidocyclina*, y (3) Grainstone – *Lepidocyclina* (Raigosa, 2018).

En contraste al paleoambiente propuesto para la localidad El Hueso, el estudio de Salazar-Ortiz et al. (2020), que abarcó localidades de la formación Chengue (unidad coetánea de la formación Toluviéjo), sugiere condiciones paleoambientales diferentes (Figura 15). Esto, propuesto por una mayor dominancia de calizas tipo packstone, rudstone y mudstone, al igual que las asociaciones de heterozoos, y las algas rojas. Dichos autores describen varios grupos de algas, que en su conjunto superan la contribución de los foraminíferos bentónicos incrustantes. A su vez, concluyeron que los lechos de rodolitos de rampa media se extendieron principalmente sobre las áreas neríticas de esa antigua plataforma carbonatada (Salazar-Ortiz et al., 2020). Teniendo en cuenta que las localidades descritas por estos autores se encuentran en la parte central y norte del CPSJ, las diferencias en los paleoambientes respecto a lo propuesto para la

localidad El Hueso, prueban la heterogeneidad que debió tener el litoral costero del Caribe Colombiano durante el Eoceno. De igual forma, dichos contrastes refuerzan la necesidad de continuar haciendo caracterizaciones petrográficas y paleontológicas de otras localidades de la Formación Toluviejo y de unidades coetáneas.

Figura 15

Paleoambiente representativo de las formaciones Toluviejo y Chengue.



Nota: Modificado Salazar et al. (2020).

7. Conclusiones

La evaluación petrográfica, paleontológica y geoquímica de la Formación Tolviejo, localidad El Hueso permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- Los estratos de la localidad se encuentran compuestos por una litología tipo grainstone, en la que predominan los foraminíferos bentónicos de la familia Lepidocyclinidae, así como las algas rojas y los rodolitos.
- Basados en la composición de los bioclastos, se definieron 3 petrofacies: **Pfor**, caracterizada por la alta presencia de macroforaminíferos; **Palg**, caracterizada por el aumento en la presencia de algas rojas con respecto a la anterior y la aparición de rodolitos y; **Pfa**, caracterizada por no evidenciar una marcada diferenciación entre la proporción relación de los macroforaminíferos y las algas rojas.
- Teniendo en cuenta las asociaciones de macroforaminíferos presentes, en particular el taxón *Orbitoina* cf. *rdouvillei*, la Formación Tolviejo en la localidad El Hueso comprende una edad de Eoceno medio (Luteciano).
- Tanto la información petrológica como los resultados de diferentes relaciones elementales (Fe/Ca, Sr/Ba, V/Al, Cu/Al), sugieren un ambiente de depósito asociado a una plataforma carbonatada de rampa interna a media, de alta energía, con condiciones de salinidad y oxigenación estables. Hacia la base, fluctuaciones en la relación Fe/Ca y en la proporción de las algas sugieren un probable aumento en el aporte de materia orgánica, posiblemente de origen fluvial.
- Finalmente, si bien la Formación Tolviejo es coetánea con la edad propuesta en la Formación Chengue, se observan marcadas diferencias litológicas tanto textural como

composicionalmente, lo cual es indicativo de paleoambientes diferentes dentro de un contexto de las plataformas carbonatadas del Eoceno.

8. Recomendaciones

Se recomienda el estudio de localidades aledañas a El Hueso, con el fin de correlacionar la continuidad litoestratigráfica de dicha localidad, y validar la extensión regional de las condiciones paleoambientales sugeridas.

El análisis de petrofacies de nuevas muestras en sección delgada en la localidad ayudaría a entender mejor las variaciones que se observaron de los bioclastos a lo largo de la sección.

Es recomendable realizar un estudio de la diagénesis en los grainstone de la localidad El Hueso y otras localidades de la Formación Toluviéjo, para así comprender de manera más completa la historia evolutiva de dicha unidad.

Referencias

- Adams, A., & Mackenzie, W. (1998). *A colour atlas of carbonate sediments and rocks under the microscope*. Manson.
- Anagnostou, E., John, E., Edgar, K., Foster, G., Ridgwell, A., & Inglis, G. et al. (2016). Changing atmospheric CO₂ concentration was the primary driver of early Cenozoic climate. *Nature*, 533, 380-384. <https://doi.org/10.1038/nature17423>
- Ballantine, D., Bowden-Kerby, A., & Aponte, N. (2000). *Cruoriella rhodoliths from shallow-water back reef environments in La Parguera, Puerto Rico (Caribbean Sea)*. *Coral Reefs*, 19(1), 75-81. <https://doi.org/10.1007/s003380050230>
- Barrero, D., Álvarez A, J., & Kassem, T. (1969). Actividad ígnea y tectónica en la cordillera Central durante el Meso-Cenozoico. *Boletín Geológico*, 17(1-3), 145-173. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol17.1-3.1969.330>
- Bermúdez, H., Grajales, J., Restrepo, L., & Rosero, J. (2009). *Estudio Integrado de los núcleos y registros obtenidos de los pozos someros tipo "slim holes" en la Cuenca Sinú. Informe final*, Tomo 1. ANH–Universidad de Caldas.
- BouDagher-Fadel, M. (2018). *Evolution and Geological Significance of Larger Benthic Foraminifera*, (2nd ed.). London, UCL, 1-38 <https://doi.org/10.14324/111.9781911576938>.
- Canudo, J. (2004). Algas Calcáreas. In E. Molina, *Micropaleontología* (2nd ed., pp. 365-384). Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Caro, M., & Spratt, D. (2003). Tectonic Evolution of the San Jacinto Fold Belt, NW Colombia. *CSEG*, 2(2), 36-43.

- Cediel, F., Shaw, R., & C., C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block. In C. Bartolini, R. Buffler & J. Blickwede, The circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate Colombia. American Association of Petroleum Geologists International Convention and Exhibition. Poster.
- Cramwinckel, M., Huber, M., Kocken, I., Agnini, C., Bijl, P., & Bohaty, S. et al. (2018). Synchronous tropical and polar temperature evolution in the Eocene. *Nature*, 559(7714), 382-386. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0272-2>
- Dantas, M., & Holz, M. (2019). High-resolution sequence stratigraphy of a cretaceous mixed siliciclastic-carbonate platform succession of the Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil. *Facies*, 66(1). <https://doi.org/10.1007/s10347-019-0588-x>
- Dreckmann, K., Sentías, A., & Núñez, M. (2013). Manual de Practicas de laboratorio. Biología de Algas (pp. 13-35). Universidad Autónoma Metropolitana.
- Dummann, W., Hofmann, P., Herrle, J., Wennrich, V., & Wagner, T. (2021). A refined model of Early Cretaceous South Atlantic-Southern Ocean gateway evolution based on high-resolution data from DSDP Site 511 (Falkland Plateau). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 562, 110113. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.110113>
- Dunham, R. (1962). *Classification of carbonate rocks according to depositional texture*. (pp. 108-121). American Association of Petroleum Geologists.
- Duque-Caro, H. (1979). Major Structural Elements and Evolution of Northwestern Colombia. *Geological And Geophysical Investigations of Continental Margins*, 29, 329-351. <https://doi.org/10.1306/M29405>

- Duque Caro, H. (1984). Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú-San Jacinto en el noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico*, 27(2), 2-29.
<https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol27.2.1984.153>
- Duque-Caro, H., Guzmán, G., & Hernández, R. (1996). Mapa Geológico de la Plancha 38 Carmen de Bolívar, Escala 1:100000. Bogotá, INGEOMINAS.
- Flügel, E. (2004). *Microfacies of Carbonate Rocks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- FOLK, R. (1974). Petrology of Sdimentary Rocks. *Hamphill Publishing Company Austin, Texas*, 1-190.
- Foster, M., Riosmena-Rodriguez, R., Steller, D., & Woelkerling, W. (1997). Living rhodolith beds in the Golf of California and their implications for paleoenvironmental interpretation. *Geological Society Of America Special Paper* 138, 127-139.
- GEOTEC. (2003). Geología de los Cinturones Sinú- San Jacinto, Planchas 50, 51, 59, 60, 61, 69, 70, 71, 79, 80. Bogotá, INGEOMINAS.
- Gradstein, F., Ogg, J., Schmitz, M., & Ogg, G. (2012). *The Geological Time Scale 2012* (2nd ed., p. 1144). Elsevier.
- Govin, A., Holzwarth, U., Heslop, D., Ford Keeling, L., Zabel, M., & Mulitza, S. et al. (2012). Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N-49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(1), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011gc003785>
- Gradstein, F., Ogg, J., Schmitz, M., & Ogg, G. (2012). *The Geological Time Scale 2012* (2nd ed., p. 1144). Elsevier.

- Guzmán, G., Gómez, E., & Serrano, B. (2004). Geología de los Cinturones del Sinú, San Jacinto y Borde Occidental del Valle Inferior del Magdalena Caribe Colombiano. Escala 1:300.000. Bogotá, INGEOMINAS.
- Ingersoll, R., Bullard, T., Ford, R., Grimm, J., Pickle, J., & Sares, S. (1984). The Effect of Grain Size on Detrital Modes: A Test of the Gazzi-Dickinson Point-Counting Method. *Journal Of Sedimentary Research*, Vol. 54(1), 103-116. <https://doi.org/10.1306/212f83b9-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Kiessling, W. (2009). Geologic and Biologic Controls on the Evolution of Reefs. *Annual Review of Ecology, Evolution, And Systematics*, 40(1), 173-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120251>
- Kujau, A., Nürnberg, D., Zielhofer, C., Bahr, A., & Röhl, U. (2010). Mississippi River discharge over the last ~560,000years — Indications from X-ray fluorescence core-scanning. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 298(3-4), 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.005>
- Low Pfeng, A., & Peters Recagno, E. (2004). La frontera final: el océano profundo. *Cool-water Carbonates*. SEPM, Special Publications, vol. 56, 1-22.
- Lund, M., Davies, P., & Braga, J. (2000). Coralline algal nodules off Fraser Island, eastern Australia. *Facies*, 42(1), 25-34. <https://doi.org/10.1007/bf02562564>
- Martín Martín, J. (2020). *Apuntes de Sedimentología*. Universidad de Granada.
- Miller, K., Mountain, G., Wright, J., & Browning, J. (2011). A 180-Million-Year Record of Sea Level and Ice Volume Variations from Continental Margin and Deep-Sea Isotopic Records. *Oceanography*, 24(2), 40-53. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.26>.

- Mitchell, S., Robinson, E., Özcan, E., Jiang, M., & Robinson, N. (2022). A larger benthic foraminiferal zonation for the Eocene of the Caribbean and central American region. *Carnets De Géologie (Notebooks on Geology)*, 22(11), 409-565. <https://doi.org/10.2110/carnets.2022.2211>
- Mora-Bohórquez, J.A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibañez-Mejía, M., Veloza, G., Mora, A., Vélez, V. & De Freitas, M. (2020). Formation and evolution of the Lower Magdalena Valley Basin and San Jacinto fold belt of northwestern Colombia: Insights from Upper Cretaceous to recent tectono-stratigraphy. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano, *Publicaciones Geológicas Especiales* 37, p. 21–66. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.02>
- Murray, J.W. (1991). *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315846101>
- Nebelsick, J., Rasser, M., & Bassi, D. (2005). Facies dynamics in Eocene to Oligocene circumalpine carbonates. *Facies*, 51(1-4), 197-217. <https://doi.org/10.1007/s10347-005-0069-2>.
- Norris, R., Turner, S., Hull, P., & Ridgwell, A. (2013). Marine Ecosystem Responses to Cenozoic Global Change. *Science*, 341(6145), 492-498. <https://doi.org/10.1126/science.1240543>.
- Payros, A., Pujalte, V., Tosquella, J., & Orue-Etxebarria, X. (2010). The Eocene storm-dominated foralgal ramp of the western Pyrenees (Urbasa–Andia Formation): An analogue of future shallow-marine carbonate systems?. *Sedimentary Geology*, 228(3-4), 184-204. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.04.010>.

- Pearson, P., van Donge, B., Nicholas, C., Pancost, R., Schouten, S., Singano, J., & Wade, B. (2007). Stable warm tropical climate through the Eocene Epoch. *Geology*, 35(3), 211-214. <https://doi.org/10.1130/G23175A.1>
- Perrin, C., & Kiessling, W. (2010). Latitudinal trends in Cenozoic reef patterns and their relationship to climate. *International Association of Sedimentologists*, 42, 17-34.
- Pomar, L. (2001). Ecological control of sedimentary accommodation: evolution from a carbonate ramp to rimmed shelf, Upper Miocene, Balearic Islands. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175(1-4), 249-272. [https://doi.org/10.1016/s0031-0182\(01\)00375-3](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(01)00375-3)
- Raigosa, M. (2018). Caracterización estratigráfica, microfacial y diagenética de las formaciones Toluviejo y El Floral en la región onshore del Cinturón Plegado SinúSan Jacinto. Bogotá, Servicio Geológico Colombiano
- Rosello, E., & Cossey, S. (2012). What is the evidence for subduction in the Caribbean margin of Colombia?. XI Simposio Bolivariano: Petroleum Exploration in Subandean Basins, *Memoirs*, 1-7.
- Ruggiero, M., Gordon, D., Orrell, T., Bailly, N., Bourgoin, T., & Brusca, R. et al. (2015). Correction: A Higher Level Classification of All Living Organisms. *PLOS ONE*, 10(6), e0130114. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130114>.
- Salazar-Ortiz, E., Rincón-Martínez, D., Páez, L., Restrepo, S., & Barragán, S. (2020). Middle Eocene mixed carbonate-siliciclastic systems in the southern Caribbean (NW colombian margin). *Journal Of South American Earth Sciences*, 99, 102507. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102507>.

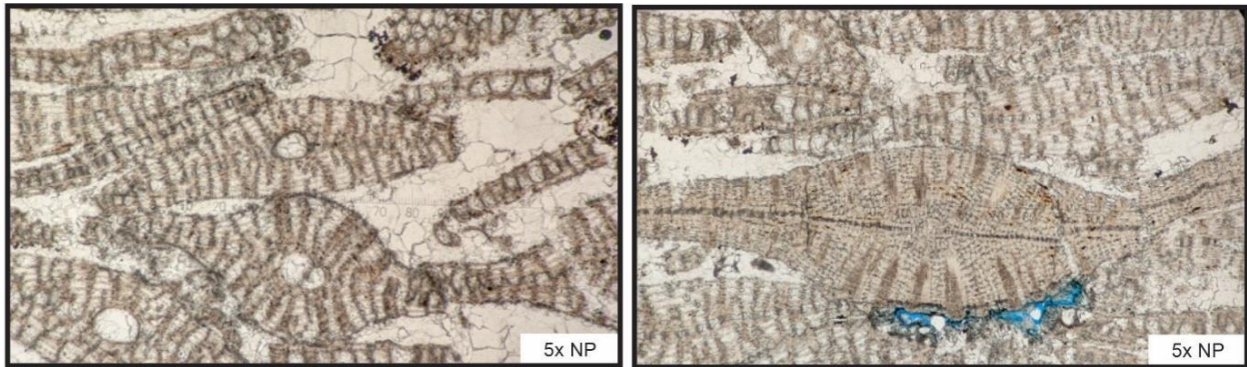
- Scheibner, C., & Speijer, R. (2008). Late Paleocene–early Eocene Tethyan carbonate platform evolution — A response to long- and short-term paleoclimatic change. *Earth-Science Reviews*, 90, 71-102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.07.002>.
- Scholle, P., & Ulmer-Scholle, D. (2003). A color guide to the petrography of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologist.
- Wei, W., & Algeo, T. (2020). Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 287, 341-366. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.06.034>
- Yelwa, N., Mustapha, K., Opuwari, M., & Aziz, A. (2022). Biomarkers, stable carbon isotope, and trace element distribution of source rocks in the Orange Basin, South Africa: implications for paleoenvironmental reconstruction, provenance, and tectonic setting. *Journal Of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(2), 307-339. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01317-9>
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., & Billups, K. (2001). Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292(5517), 686-693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>.
- Zachos, J., Dickens, G., & Zeebe, R. (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 451(7176), 279-283. <https://doi.org/10.1038/nature06588>.

Apéndices

Apéndice A

Descripción petrográfica de las secciones delgadas de El Hueso.

Muestra: EH-2-PET. Petrofacie Pfor.

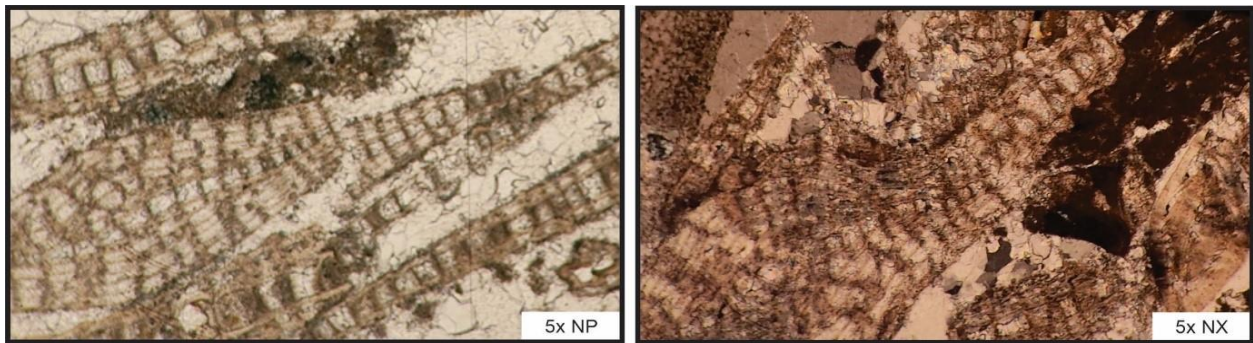


Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, afectados por micritización. Estos se encuentran acompañados en menor proporción por algas rojas y fragmentos de equinodermos, los cuales también se caracterizan por preservar su textura y forma original. En algunos casos los bioclastos se encuentran rellenos de calcita, y en otros se encuentran quebrados o fragmentados. Se lograron identificar los géneros de foraminíferos *Nummulites* (5%), *Lepidocyclina* (60%), *Discocyclina* (4%). En menor proporción se encontraron foraminíferos indeterminados enrollados, de 0.8 a 1.3 mm, al igual que algas rojas (7%), de 1.6 a 3.5 mm de longitud. La

porosidad presente en la muestra es de tipo secundario, y se infiere que es el resultado de la disolución parcial o total de algunos macroforaminíferos.

Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

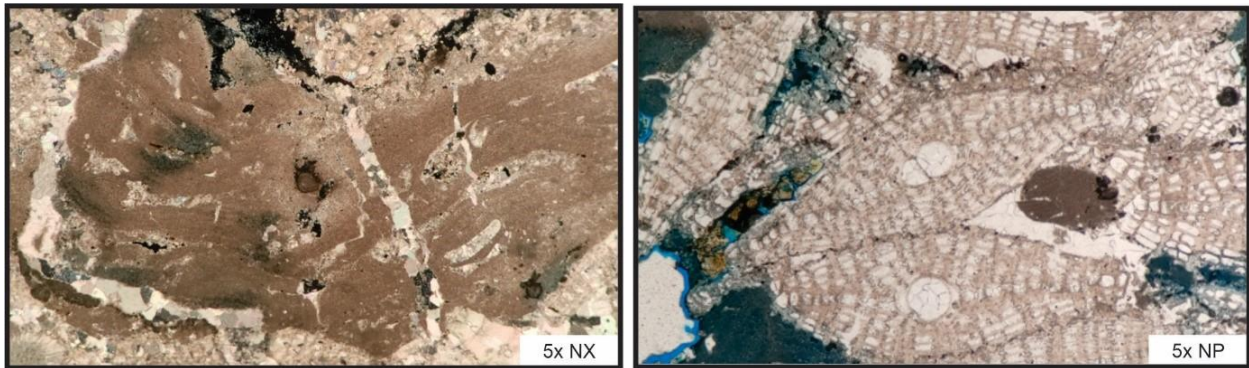
Muestra: EH-5-PET. Petrofacie Pfor.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Se observó una vena rellena de calcita, con un grosor que varía de 0.05 a 0.3mm, la cual corta la muestra. A partir de la misma se infiere apertura y relleno de una microfalla. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados. Los foraminíferos están afectados en algunos casos por micritización, y vienen acompañados en menor proporción por algas rojas, fragmentos de equinodermos y conchas fragmentadas de bivalvos. Los bioclastos en general se caracterizan por preservar su textura y forma original. En algunos casos los bioclastos se encuentran rellenos de calcita, están transformados parcialmente a glauconita, y en otros casos se encuentran quebrados o fragmentados. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Lepidocyclina* (74%),

Discocyclina (1%), con una longitud entre 1.4 y 4.7 mm. En menor proporción se observaron foraminíferos indeterminados enrollados (1%), de 0.5 a 0.8 mm de longitud, y algas rojas (7%) de 0.4 a 2.7mm. La porosidad presente en la muestra es de tipo secundario, y se encuentra en poca proporción, aislada. Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

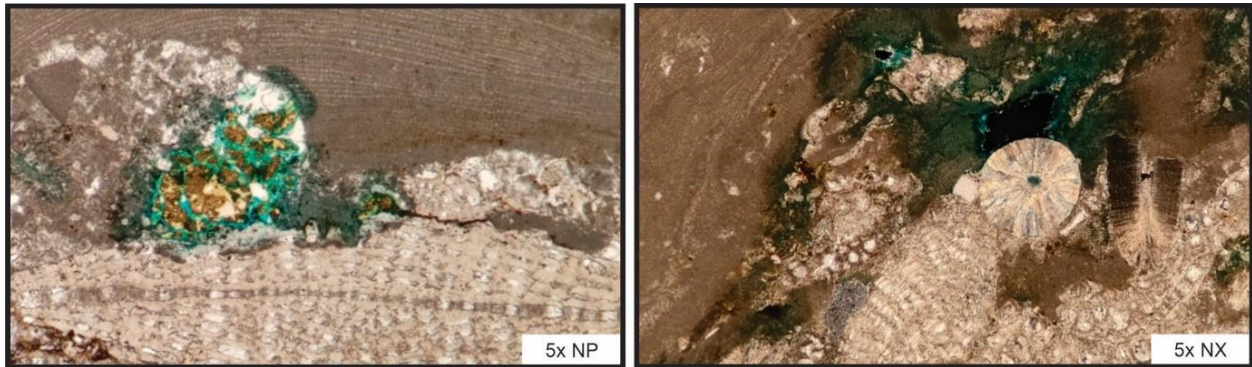
Muestra: EH-9-PET. Petrofacie Palg.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por esparita. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Se observó una vena rellena de calcita que atraviesa la muestra sub-verticalmente, donde se infiere apertura y relleno de una microfalla. Sus fragmentos fósiles son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, afectados en algunos casos por micritización y acompañados en menor proporción por algas rojas con bioperforaciones rellenas de calcita, fragmentos de equinodermos y conchas fragmentadas de bivalvos. En general, los bioclastos se caracterizan por preservar su textura y

forma original. En algunos casos se encuentran rellenos de calcita, transformados parcialmente a glauconita, y en otros se encuentran quebrados o fragmentados. De igual forma también se pueden observar fragmentos alargados de glauconita teñidos con óxido de hierro. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Nummulites* (2%), *Lepidocyclina* (62%), *Discocyclina* (2%; 1.2 a 4.6 mm de longitud), *Myogipsina* (1%). Igualmente se reconocieron algas rojas (20%) de 0.6 a 5.1 mm de longitud y fragmentos de equinodermos. La porosidad presente en la muestra es de tipo secundario, y se encuentra en poca proporción y aislada. Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

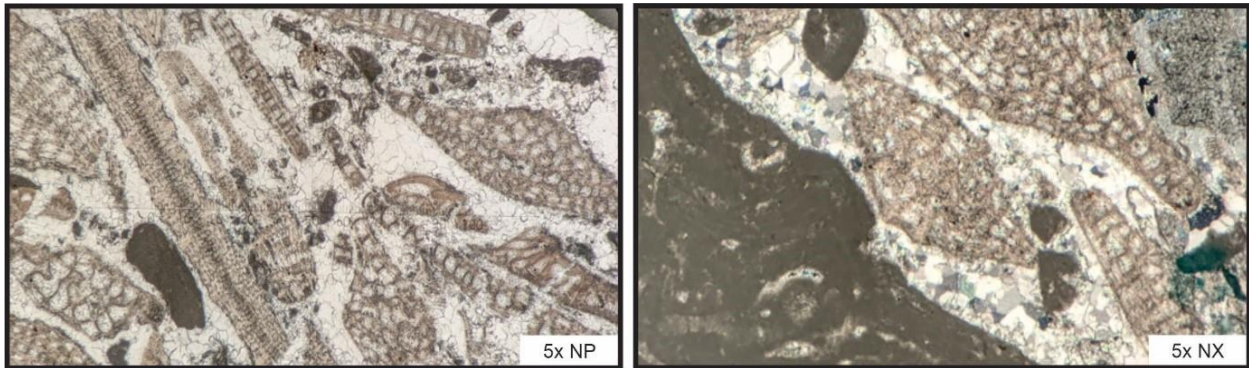
Muestra: EH-12-PET. Petrofacie Palg.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas con bioperforaciones rellenas de calcita, fragmentos de equinodermos y bivalvos de

concha delgada, los cuales se caracterizan por preservar su textura y forma original. En algunos casos se encuentran rellenos de calcita y en otros se encuentran quebrados o fragmentados. Se lograron identificar los géneros de foraminíferos *Nummulites* (1%), *Lepidocyclina* (56%), *Discocyclina* (1%) y *Heterostegina* (3%) con longitudes que oscilan entre 0.9 y 3.8 mm. Se observaron igualmente algas rojas (31%) de 0.6 a 6.9 mm de longitud, y en menor proporción, foraminíferos enrollados (0.7 a 1.9 mm de longitud), al igual que restos de equinodermos (4%) de 1.4 a 5.6 mm de longitud. La porosidad presente en las muestras es de tipo secundario, y se encuentra en poca proporción y aislada. Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

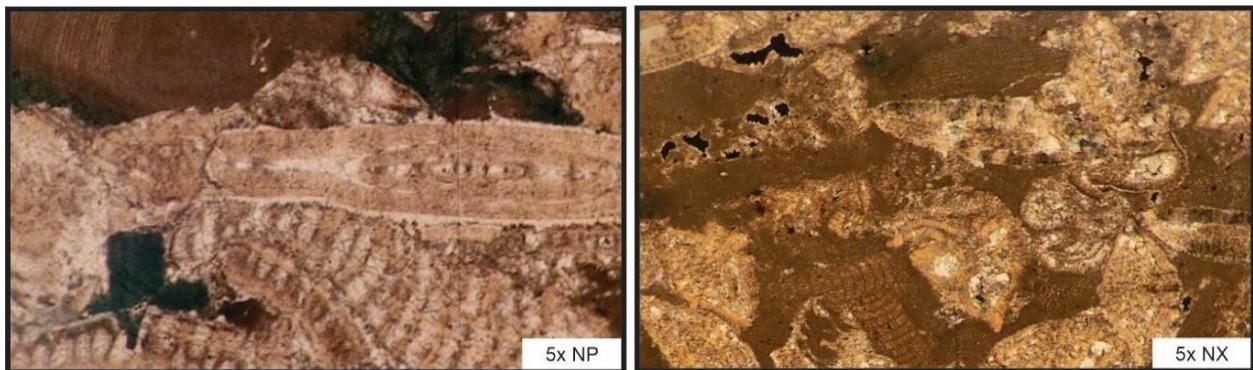
Muestra: EH-16-PET. Petrofacie Palg.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos fósiles calcáreos, los cuales se encuentran masivamente cementados por esparita. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas con bioperforaciones rellenas de calcita, placas de equinodermos y

fragmentos de bivalvos. En algunos casos se encuentran rellenos de calcita y en otros se encuentran quebrados o fragmentados. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Nummulites* (3%), *Lepidocyclina* (36%), *Discocyclina* (4%), *Heterostegina* (4%), con longitudes que oscilan entre 0.9 y 4.8 mm. Las algas rojas (23%), presentaron dimensiones entre 0.7 y 4.6 mm. La porosidad presente en las muestras es de tipo secundario, y se encuentra en poca proporción o está mal conectada. Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

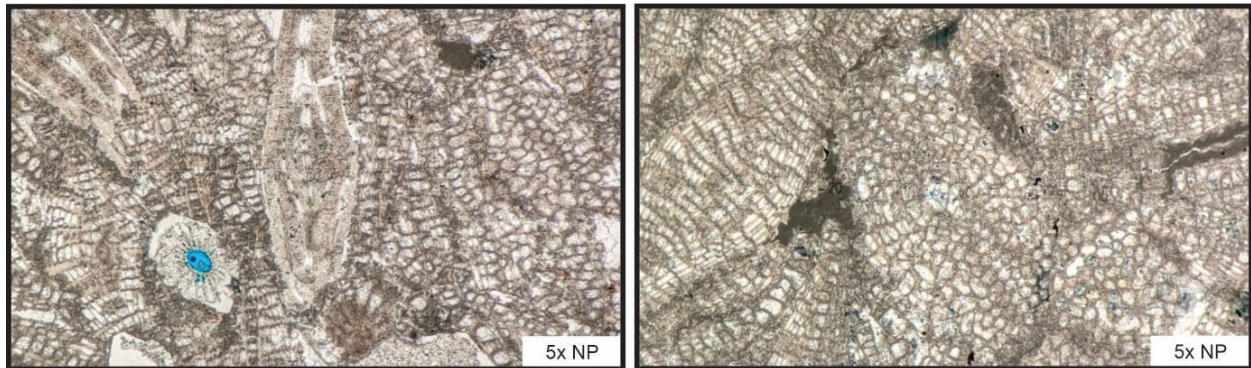
Muestra: EH-19-PET. Petrofacie Palg.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina, empaquetados de manera significativa por compactación litoestática, con sus diferentes partículas uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas, fragmentos de equinodermos, bivalvos de concha delgada y ocasionalmente briozoarios. Los bioclastos se caracterizan por preservar su

textura y forma original. En algunos casos estos se encuentran rellenos de calcita o se encuentran quebrados y fragmentados. Se lograron identificar los géneros de foraminíferos *Nummulites* (16%), *Lepidocyclina* (35%), *Discocyclina* (3%; longitudes 0.4-7.2 mm), *Heterostegina* (12%). En menor proporción se encontraron foraminíferos pequeños enrollados de 0.4 a 0.8 mm de longitud, algas rojas (25%; 4.9 mm de longitud). La porosidad es muy baja, se ve aislada, y proviene de origen primario y secundario. Los poros primarios se concentran en el interior de algas rojas y comprende micro-intersticios naturales libres, mientras que los poros secundarios están representados por fracturas posiblemente producidas por la apertura de estilolitos. Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

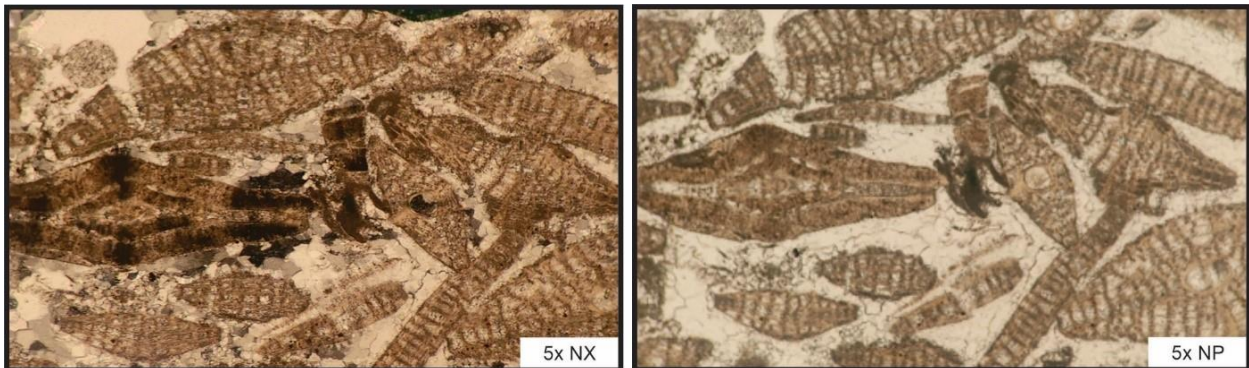
Muestra: EH-25-PET. Petrofacie Pfor.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos robustos, alargados, discoidales y ovoides y en menor proporción están presentes foraminíferos pequeños enrollados, plano-

espirales y troco-espirales, acompañados por fragmentos de algas rojas y equinodermos. Dichos elementos se caracterizan por preservar su textura y forma original, mientras que en algunos casos se encuentran rellenos de calcita o están quebrados/fragmentados. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Heterostegina* (5%), *Nummulites* (1%), *Lepidocyclina* (50%), *Discocyclina* (16%), y *Miogypsina* (9%; 1.4 a 3.5 mm de longitud). En menor proporción se observaron foraminíferos pequeños enrollados (1%; 0.3 a 0.6 mm de longitud), algas rojas (7%; 0.8 a 2 mm), y equinodermos (4%) entre 1 a 3.5 mm de longitud. Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

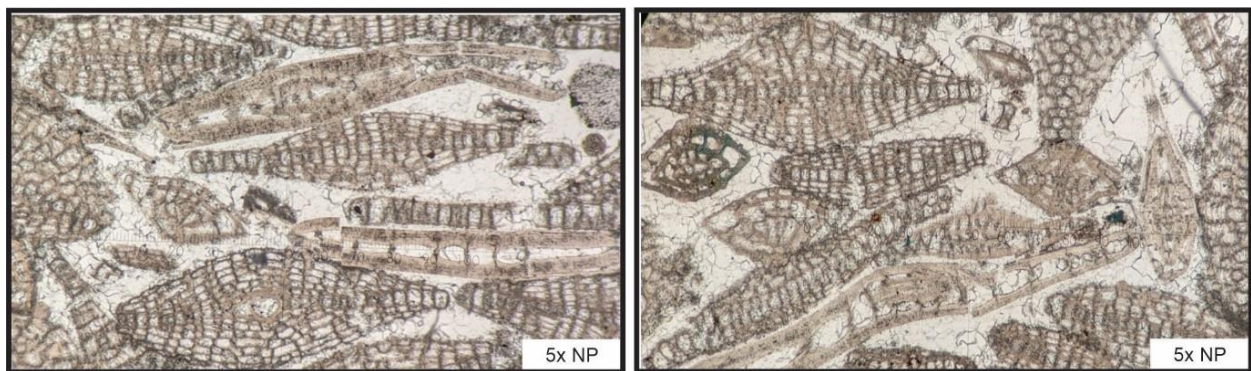
Muestra: EH-33-PET. Petrofacie Pfor.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por masivamente por calcita cristalina. Se identificó óxido de hierro distribuido en parches irregulares de reemplazamiento, y patinas que recubren algunos de los fragmentos fósiles. Igualmente, se observaron venas delgadas subhorizontales de calcita. El armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento,

constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas y fragmentos de equinodermos. Los bioclastos se caracterizan por preservar su textura y forma original, si bien en algunos casos se encuentran rellenos de calcita. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Nummulites* (3%), *Lepidocyclina* (53%), *Discocyclina* (18%), *Heterostegina* (2%), *Miogypsina* (3%), con longitudes que oscilan entre 0.6 y 3.6 mm. En menor proporción se identificaron foraminíferos pequeños enrollados de 0.7 mm de longitud, algas rojas (7%; longitudes entre 0.4 y 1.2 mm), y equinodermos (3%) con una longitud de 0.7-1.7 mm. La porosidad presente es baja y se encuentra mal conectada, por lo que se infiere que es producto de disolución de bioclastos. Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

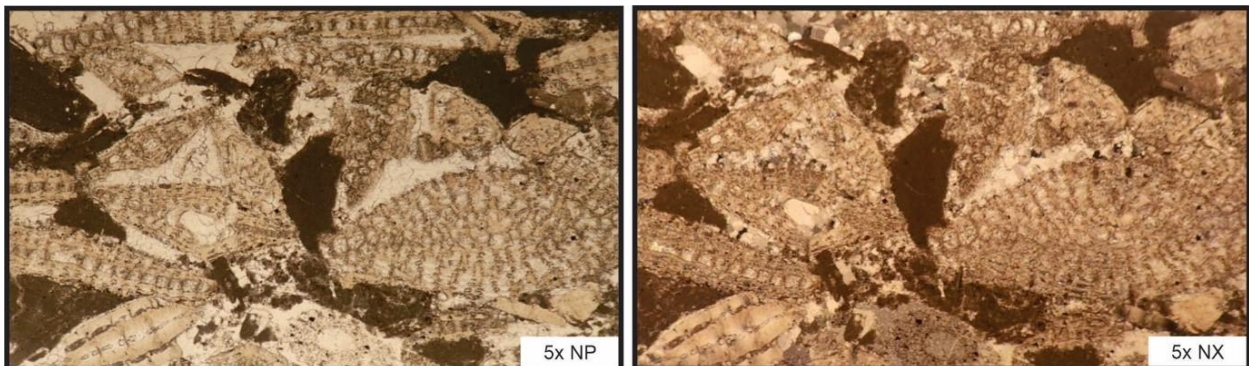
Muestra: EH-37-PET. Petrofacie Pfor.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se

encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos lucen bien conservados tanto en forma como en textura, y en algunos casos los fragmentos de mayor se encuentran fracturados y/o desarticulados. Los bioclastos corresponden en su mayoría a foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas y fragmentos de equinodermos. Todos estos se caracterizan por preservar su textura y forma original. En algunos casos se encuentran rellenos de calcita o se encuentran quebrados y fragmentados. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Nummulites* (4%), *Lepidocyclina* (52%), *Discocyclina* (19%), *Heterostegina* (3%; longitud de 0.6- 1.8 mm) y *Miogypsina* (3%). En menor proporción se encuentran foraminíferos pequeños enrollados de 0.5 a 0.7 mm de longitud, algas rojas (7%; 0.4-0.9 mm de longitud y restos de equinodermos (4%; 0.7 a 2.1 mm de longitud). Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

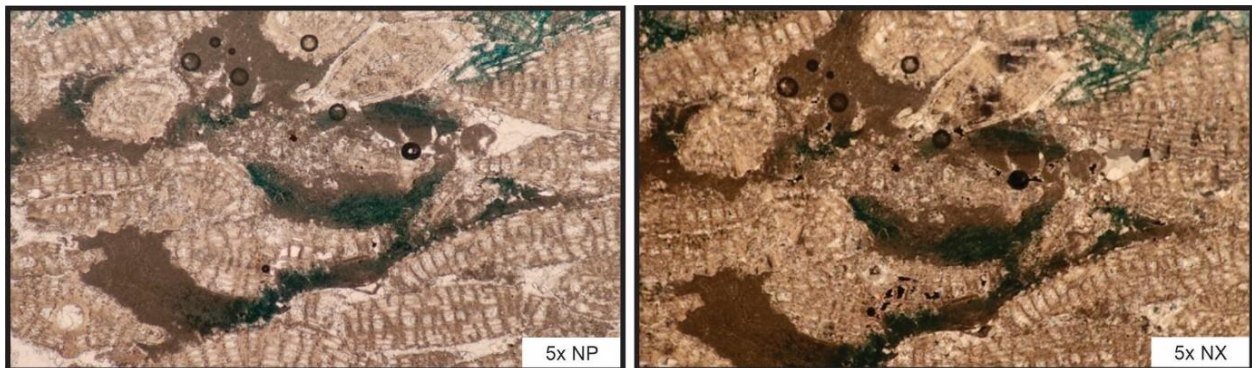
Muestra: EH-44-PET. Petrofacie Pfa.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos aloquímicos calcáreos empaquetados, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes

partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales. Levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas y fragmentos de equinodermos. Los bioclastos se caracterizan por preservar su textura y forma original. En algunos casos se encuentran rellenos de calcita y en otros se encuentran quebrados o fragmentados. Se lograron identificar los géneros de foraminíferos *Nummulites* (9%), *Lepidocyclina* (33%), *Discocyclina* (6%; 1.2 a 3.8 mm de longitud), *Heterostegina* (6%) y *Miogypsina* (1%). En menor proporción (1%), se encuentran foraminíferos pequeños enrollados de 0.4 a 0.9 mm de longitud, al igual que algas rojas (24%) de 0.5 a 4.4 mm de longitud, y equinodermos (7%; 0.7 a 3.7 mm de longitud). Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

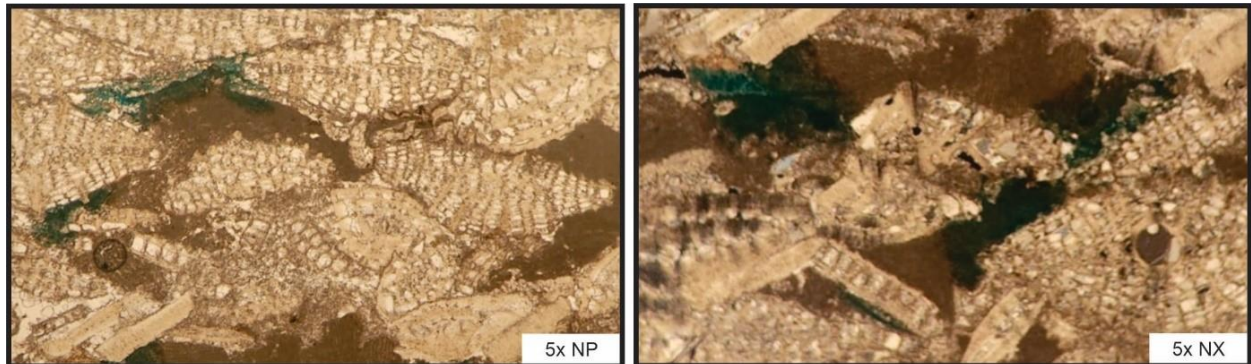
Muestra: EH-50-PET. Petrofacie Pfor.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales,

enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas y fragmentos de equinodermos. Estos se caracterizan por preservar su textura y forma original. En algunos casos se encuentran rellenos de calcita y en otros se encuentran quebrados o fragmentados. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Nummulites* (5%), *Lepidocyclina* (42%), *Discocyclina* (7%; 1.4 a 3.2 mm de longitud), *Heterostegina* (1%), algas rojas (21%; 1.1 a 6.8 mm de longitud), y restos de equinodermos (9%; 0.7 a 2.1 mm de longitud). Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

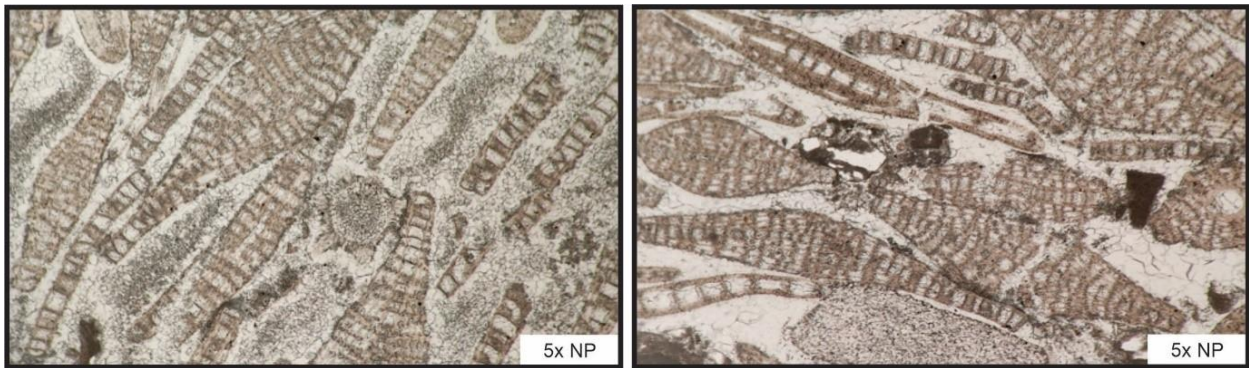
Muestra: EH-56-PET. Petrofacie Pfa.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas y fragmentos de equinodermos, también se caracterizan por preservar su textura y forma original. En algunos casos se encuentran rellenos de calcita y en otros se encuentran quebrados o fragmentados. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Nummulites* (5%),

Lepidocyclina (50%), Discocyclina (9%) y Heterostegina (5%) de 1.1mm a 3.7mm, en menor proporción foraminíferos pequeños enrollados (2%) de 0.2 a 0.5mm, Algas rojas (15%) de 0.7mm a 7mm, y Equinodermos (7%) de 0.5mm a 1.8mm. Clasificación según Modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita. Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

Muestra: EH-60-PET. Petrofacie Pfor.



Nota: La muestra está principalmente constituida por fragmentos alquímicos calcáreos, cementados por calcita cristalina. Su armazón es homogéneo y las diferentes partículas se encuentran uniformemente distribuidas en el cemento, constituyendo un arreglo clasto-soportado. Sus bioclastos son en su mayoría foraminíferos bentónicos alargados, discoidales, enrollados, dúctiles, levemente deformados y orientados, acompañados en menor proporción por algas rojas y fragmentos de equinodermos. Todos los bioclastos se caracterizan por preservar su textura y forma original, mientras que en algunos casos se encuentran rellenos de calcita, o se encuentran quebrados/fragmentados. Se lograron identificar foraminíferos tales como *Nummulites* (1%), *Lepidocyclina* (51%), *Discocyclina* (2%) y *Heterostegina* (6%; 1.4 a 4.9 mm de longitud), y en menor proporción *Miogyopsina* (1%). También están presentes algas rojas (4%)

de 1.4 a 1.7 mm de longitud, y equinodermos (1%; 0.4 a 4 mm de longitud). Clasificación según el esquema modificado de Folk (1974): Caliza aloquímica esparítica (Caliza tipo I), Bioesparita.

Clasificación según Dunham (1962): Grainstone.

Apéndice B

Conteo de componentes a lo largo de la localidad el Hueso.

Componentes	EH -2	EH -5	EH -9	EH -12	EH -16	EH -19	EH -25	EH -33	EH -37	EH -44	EH -50	EH -56	EH -60	Total
Nummulites	14	0	7	4	8	47	2	10	12	27	16	14	3	134
Lepidocyclina	180	222	187	169	109	106	151	159	157	101	126	150	152	1693
Discocyclina	11	2	5	4	11	10	48	55	57	17	21	28	6	226
Heterostegina	3	0	11	8	11	35	14	6	8	18	2	15	18	132
Foraminíferos enrollados	4	2	2	0	2	0	2	1	1	2	0	2	0	16
Migypsina	2	8	4	0	6	4	29	8	10	3	1	6	2	76
Algas rojas	21	21	59	93	69	76	21	20	21	72	75	45	11	484
Equinodermos	3	8	2	12	0	14	12	8	11	20	29	20	4	94
Cemento(calcita)	44	32	14	6	73	3	14	32	21	30	23	17	96	365
Porosidad	11	2	2	2	4	0	1	0	0	5	2	0	4	31
Fragmentos de bivalvos	1	0	0	0	7	5	5	1	2	5	5	3	4	30
Glauconita	6	3	7	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	19