

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIVERSIDAD DE LA CLASE ECHINOIDEA (ECHINODERMATA) DEL  
CRETÁCICO DE CINCO LOCALIDADES DEL NORESTE DE MÉXICO:  
IMPLICACIONES TAXONÓMICAS, FILOGENÉTICAS, TAFONÓMICAS Y  
PALEOECOLÓGICAS.

Por

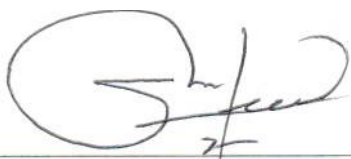
GABRIELA CORDOBA MERINO

Como requisito parcial para obtener el grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ACENTUACIÓN EN MANEJO DE VIDA SILVESTRE  
Y DESARROLLO SUSTENTABLE

30 de agosto de 2021

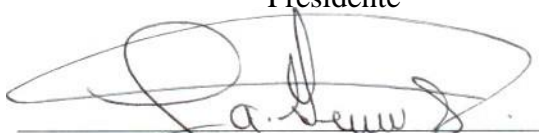
DIVERSIDAD DE LA CLASE ECHINOIDEA (ECHINODERMATA) DEL  
CRETÁCICO DE CINCO LOCALIDADES DEL NORESTE DE MÉXICO:  
IMPLICACIONES TAXONÓMICAS, FILOGENÉTICAS, TAFONÓMICAS Y  
PALEOECOLÓGICAS.

Comité de Tesis



---

Dr. Luis Encarnación Silva Martínez  
Presidente



---

Dr. Juan Antonio García Salas  
Secretario



---

Dra. Susana Favela Lara  
Vocal



---

Dr. Jesús Ángel de León González  
Vocal



---

Dr. David Lazcano Villarreal  
Vocal



---

Dra. Katiushka Arévalo Niño  
Subdirectora de Posgrado

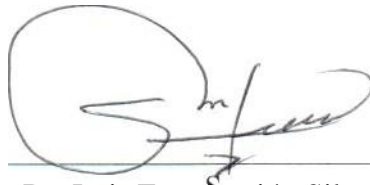


DIRECCIÓN  
DE POSGRADO

30 de agosto de 2021

DIVERSIDAD DE LA CLASE ECHINOIDEA (ECHINODERMATA) DEL  
CRETÁCICO DE CINCO LOCALIDADES DEL NORESTE DE MÉXICO:  
IMPLICACIONES TAXONÓMICAS, FILOGENÉTICAS, TAFONÓMICAS Y  
PALEOECOLÓGICAS.

Dirección de Tesis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Encarnación Silva Martínez', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Dr. Luis Encarnación Silva Martínez

Director

DERECHOS RESERVADOS ©  
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta Tesis está protegido, el uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material contenido que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo mencionando al autor o autores.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado por el Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT), CVU 924245 dentro del programa 001584.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de este proyecto de tesis. También agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León, en especial al departamento de Ecología de la Facultad de Ciencias Biológicas y al Laboratorio de Paleobiología por otorgarme un espacio y las herramientas necesarias para poder llevar a cabo este trabajo.

De igual manera, agradezco infinitamente al Dr. Luis Encarnación Silva Martínez por estar a mi lado desde la licenciatura hasta este momento, ejerciendo como un excelente guía en este largo camino, gracias por sus valiosas observaciones, su tiempo y su amistad.

Mi más sincero agradecimiento a quienes formaron parte de mi comité de tesis: al Dr. Juan Antonio García Salas quiero agradecerle por su tiempo y por siempre tener una increíble disposición para apoyarme a cumplir mis objetivos; a la Dra. Susana Favela Lara, gracias porque ha estado conmigo desde hace muchos años y ha visto como he evolucionado profesionalmente, convirtiéndose en una amiga que con su sinceridad siempre tuvo algo positivo que otorgar a este trabajo; al Dr. Jesús Ángel de León González, le agradezco el siempre haberme recibido con una sonrisa en su laboratorio y por brindarme sus consejos para alcanzar esta meta; y al Dr. David Lazcano Villarreal, gracias por su apoyo, por estar dispuesto a otorgarme su valioso tiempo para revisar mi tesis y hacer sus tan adecuadas observaciones, agradezco su compromiso en este proyecto.

Por último, agradezco a mis compañeros del laboratorio de Paleobiología, el doctorado no hubiese sido lo mismo sin ustedes, gracias a Greta, Miroslava, Luis, Lalo y Roger por tantos momentos de risas, esas pláticas después de cada comida y por escucharme cuando he necesitado desahogarme; gracias de corazón a cada uno de ustedes.

## DEDICATORIAS

### *A Juan Luis*

Mi travesía a través del doctorado no hubiese sido la misma sin tenerte a mi lado, esta dedicación es para ti por siempre estar apoyándome y creer más en mí que yo misma. Gracias por escucharme, alentarme y brindarme tu cariño, cada vez que he caído has estado presente para levantarme, así que esta tesis también es tu logro porque sin ti no hubiese sido posible, gracias amor.

### *A mis padres*

Quienes han sabido guiarme durante mi vida, siempre apoyándome en mis decisiones, que quizás algunas veces no han podido entenderlas por completo, pero aun así han estado para mí en cada momento. Este trabajo es para ustedes papis, gracias por darme tantas oportunidades, por escucharme cuando el estrés me invadió, por darme siempre un sabio consejo y por todo lo que han dado por mí en esta vida. Mis logros son sus logros, y éste es uno más dedicado a ustedes, los amo.

### *A mi hermano*

Dedico este trabajo a mi hermano, Carlos Andrés eres un gran hombre y en cada momento difícil por el que he pasado has estado para mí, brindándome desde un regaño hasta un abrazo, como buenos hermanos no siempre estamos de acuerdo, pero eso jamás me ha hecho sentir lejos de ti, te quiero hermano.

### *A mis abuelos*

Para ustedes que siempre me han escuchado y se han sentido orgullosos de su nieta, gracias por estar a mi lado y cuidarme. Especial dedicatoria para mi abuelo Saul Ignacio Merino Delgado, te extraño abuelo y esta tesis va para ti en donde quiera que estés.

### *A mis amigos*

A mi hermana de otra madre Pamela, contar con tu amistad es de las cosas más preciadas que tengo; a mis amigos Miguel y Claudia por siempre estar para mí, escucharme y darme ánimos; y a Greta y a Miros por su valiosa amistad que espero dure para toda la vida.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
2.1. Geológicos y Estratigráficos .....	3
2.2. Taxonomía.....	5
2.3. Filogenia y Evolución .....	6
2.4. Paleoecología y Geoquímica.....	10
2.5. Tafonomía .....	12
3. JUSTIFICACIÓN .....	14
4. HIPÓTESIS .....	15
5. OBJETIVOS .....	16
5.1. Objetivo General .....	16
5.2. Objetivos Particulares .....	16
6. MATERIAL Y MÉTODOS .....	17
6.1. Área de Estudio .....	17
6.2. Metodología .....	19
6.2.1. Fase I: Campo.....	19
6.2.2. Fase II: Laboratorio .....	20
6.2.3. Fase III: Gabinete .....	20
6.2.3.1. Índices de Diversidad.....	21
7. RESULTADOS.....	24
7.1. Formación La Peña en el área de estudio.....	24
7.1.1. Bioestratigrafía de la Formación La Peña .....	25
7.1.2. Petrografía de la Formación La Peña .....	25

7.2. Formación del Río en el área de estudio .....	27
7.2.1. Bioestratigrafía de la Formación Del Río.....	28
7.2.2. Petrografía de la Formación Del Río.....	28
7.3. Formación Austin en el área de estudio .....	30
7.3.1. Arroyo El Tecolote.....	30
7.3.1.1. Bioestratigrafía de la Fm. Austin en el Arroyo El Tecolote.....	31
7.3.1.2. Petrografía de la Fm. Austin en el Arroyo El Tecolote.....	31
7.3.2. Arroyo El Freno .....	33
7.3.2.1. Bioestratigrafía de la Fm. Austin en el Arroyo El Freno .....	34
7.3.2.2. Petrografía de la Fm. Austin en el Arroyo El Freno.....	34
7.3.3. Arroyo El Murley .....	36
7.3.3.1. Bioestratigrafía de la Fm. Austin en el Arroyo El Murley .....	37
7.3.3.2. Petrografía de la Fm. Austin en el Arroyo El Murley .....	37
7.4. Implicaciones taxonómicas .....	39
7.4.1. Paleontología Sistemática .....	40
7.5. Implicaciones Filogenéticas .....	56
7.6. Implicaciones Tafonómicas.....	59
7.6.1. Tafonomía de la Formación La Peña .....	59
7.6.2. Tafonomía de la Formación Del Río.....	61
7.6.3. Tafonomía de la Formación Austin.....	65
7.7. Implicaciones Paleocológicas.....	69
7.7.1. Paleocología de la Fm. La Peña.....	69
7.7.2. Paleocología de la Fm. Del Río .....	70
7.7.3. Paleocología de la Fm. Austin.....	71
7.8. Índices Ecológicos.....	72
7.8.1. Índice de Riqueza Margalef .....	73



7.8.2. Índice de Dominancia Simpson.....	74
7.8.3. Índice de Diversidad Shannon-Wiener.....	76
8. DISCUSIÓN .....	78
10. PERSPECTIVAS .....	85
11. BIBLIOGRAFÍA.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Árbol filogenético tomado de Littlewood and Smith, 1995.....	9
Figura 2: Mapa del área de estudio.....	17
Figura 3: Fotografía panorámica de la Formación La Peña.....	24
Figura 4: Columna estratigráfica de la Formación La Peña.....	26
Figura 5: Fotografía panorámica de la Formación Del Río.....	27
Figura 6: Columna estratigráfica de la Formación Del Río.....	29
Figura 7: Fotografía panorámica de la Formación Austin en el Arroyo El Tecolote.....	30
Figura 8: Columna estratigráfica de la Formación Austin en el Arroyo El Tecolote.....	32
Figura 9: Fotografía panorámica de la Formación Austin en el Arroyo El Freno.....	33
Figura 10: Columna estratigráfica de la Formación Austin en el Arroyo El Freno.....	35
Figura 11: Fotografía panorámica de la Formación Austin en Arroyo El Murley.....	36
Figura 12: Columna estratigráfica de la Formación Austin en el Arroyo El Murley.....	38
Figura 13: Árbol filogenético de la Clase Echinoidea.....	57
Fig. 14: Ejemplar de ammonoideo ( <i>Dufrenoyia</i> sp.) recristalizado.....	60
Fig. 15: A) ammonoideo <i>Colombiceras crassicostatum</i> y B) <i>Dufrenoyia</i> sp. pertenecientes a la Formación La Peña.....	60
Fig. 16: A) ammonoideo <i>Kazanskyella arizonica</i> y B) equinoideo <i>Macraster</i> sp. pertenecientes a la Formación La Peña.....	61
Fig. 17: Evidencia de bioturbación en la Formación Del Río.....	62

Fig. 18: Fotografías de la Formación Del Río donde se observa la mineralización de los restos fósiles y de las rocas del afloramiento.....	62
Fig. 19: Fotografías de la macrofauna asociada a la Formación Del Río donde se observan restos conservados.....	63
Fig. 20: Molde de ammonoideo perteneciente a la Formación Del Río.....	64
Fig. 21: Fotografía de la Formación Del Río donde se observa la orientación de bivalvos del género <i>Exogyra</i> sp.....	64
Fig. 22: Ammonoideos pertenecientes a la localidad del Arroyo El Tecolote.....	65
Fig. 23: Impresiones del ammonoideo A) <i>Delawarella delawarensis</i> y del bivalvo B) <i>Inoceramus undulatoplicatus</i> en el Arroyo El Tecolote.....	66
Fig. 24: Bivalvo cerrado <i>Spondylus</i> sp. de la localidad Arroyo El Freno.....	66
Fig. 25: A) Ejemplares de <i>Exogyra</i> sp. del Arroyo El Freno. B) muestra del Arroyo El Murley con un claro relleno sedimentario.....	67
Fig. 26: A) Ejemplar de <i>Mecaster batnensis</i> con parte de su concha recristalizada por calcita espática; B) moldes de bivalvos con presencia de pirita.....	68
Fig. 27: Fotomicrografías de muestras procesadas por la técnica de lámina delgada de la Formación La Peña.....	70
Fig. 28: Fotomicrografías de lámina delgada de la Formación Del Río.....	71
Fig. 29: Fotomicrografías de muestras en lámina delgada de la Formación Austin.....	72
Fig. 30: Variación espacial del índice de riqueza Margalef.....	74
Fig. 31: Variación espacial del índice de dominancia de Simpson.....	75
Fig. 32: Variación espacial del índice de diversidad Shannon-Wiener.....	76

## ÍNDICE DE LÁMINAS

### ANEXO I: Implicaciones Filogenéticas

Lámina I.....93

Lámina II.....96

### ANEXO II: Láminas de Equinoideos del Cretácico del noreste de México

Lámina I.....98

Lámina II.....100

Lámina III.....102

Lámina IV.....104

Lámina V.....106

Lámina VI.....108

Lámina VII.....110

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

**Fm.** Formación

**N. ej.** Número de ejemplar

**Loc.** Localidad

**D.** Diámetro

**A. p.** Altura apical

**A. amb.** Anchura ambulacral

**A.int.** Anchura Interambulacral

**D. p.** Diámetro del periprocto

**D.pe.** Diámetro del peristoma

**A.a.** Anchura anteroposterior

**A.l.** Anchura lateral

**A.amb.a.** Anchura ambulacral anterior

**A.amb.p.** Anchura ambulacral posterior

**A.amb.i.** Anchura ambulacro impar

**An.p.** Anchura del periprocto

**Al.p.** Altura del periprocto

**An.per.** Anchura del peristoma

**Al.per.** Altura del peristoma

## RESUMEN

Se estudian cinco localidades del noreste de México, de las cuales cuatro pertenecen al estado de Coahuila y una al estado de Nuevo León; determinándose a la Formación La Peña del Cretácico Inferior en el Cañón de La Huasteca y pertenecientes al Cretácico Superior, a la Formación Del Río en la Presa de La Amistad y a la Formación Austin en los Arroyos El Freno, El Tecolote y Murley.

Se analizó a los ejemplares fósiles de la Clase Echinoidea desde diversos puntos de vista; dentro de las implicaciones taxonómicas se identificaron un total de 5 géneros y 13 especies de equinoideos, entre los cuales predominaron las especies de *Micraster uddeni* y *Mecaster batnensis*, así mismo se define a una nueva especie del género *Holectypus* sp. para la Formación Austin. Como implicaciones filogenéticas se hizo el análisis a nivel de género de aquellos que fueron identificados con base en una matriz de 50 caracteres morfológicos y definiendo al género *Micraster* sp. como aquel con características recientes. Se determinaron las alteraciones tafonómicas de los macrofósiles y microfósiles encontrados en el área de estudio y se determinaron como ambientes de depósito de zona nerítica para las localidades del estado de Coahuila y un paleoambiente de tipo cuenca para la Formación La Peña. Por último, se determina con base en los índices de diversidad de Margalef, Simpson y Shannon-Weiner que las localidades estudiadas en este trabajo cuentan con una baja diversidad de equinoideos del Cretácico.

Palabras Clave: Equinoideos, Formaciones, Taxonomía, Tafonomía, Filogenia, Paleoecología.

## ABSTRACT

Five localities in northeastern Mexico were studied, of which four are in the state of Coahuila and one in the state of Nuevo León; belonging to the La Peña Formation of the Lower Cretaceous in the Huasteca Canyon and belonging to the Upper Cretaceous, and the Del Río Formation in the La Amistad Dam and the Austin Formation in the Arroyos El Freno, El Tecolote and Murley.

The fossil specimens of the Echinoidea Class were analyzed from various points of view. A total of 5 genera and 13 species of echinoids were identified, among which the species of *Micraster uddeni* and *Mecaster batnensis* predominated, as well as a new species of the genus *Holectypus* sp. for the Austin Formation. As for phylogenetic implications, the analysis was made at the genus level of those that were identified based on a matrix of 50 morphological characters and defining the genus *Micraster* like the one with recent features. The taphonomic alterations of the macrofossils and microfossils found in the study area were determined as deposit environments of the neritic zone for the localities of the state of Coahuila and a basin-type paleoenvironment for the La Peña Formation. Finally, it was determined, based on the Margalef, Simpson and Shannon-Weiner diversity indices, that the localities studied in this work have a low diversity of Cretaceous echinoids.

Keywords: Echinoids, Formations, Taxonomy, Taphonomy, Phylogeny, Paleoecology.

# 1. INTRODUCCIÓN

El Phylum Echinodermata, denominados equinodermos, comprende aproximadamente 7,000 especies actuales y 13,000 especies fósiles; este grupo puede definirse brevemente como poseedor de un esqueleto formado por calcita, con un sistema acuífero único encargado de funciones como la locomoción y alimentación, y una simetría radiada, la cual es generalmente pentámera (Pawson, 2007). Universalmente son reconocidas cinco clases de equinodermos recientes: Asterozoidea, Ophiurozoidea, Crinozoidea, Holothurozoidea y Echinozoidea; La extensión litoral de nuestro país y su gran diversidad de ecosistemas permiten la existencia de 818 especies de equinodermos en México, lo que corresponde aproximadamente al 10.8% de la totalidad mundial (Solís, *et al.* 2018); en este trabajo nos enfocaremos únicamente en morfoespecies de la Clase Echinozoidea (equinoideos) pertenecientes al Cretácico.

Los equinoideos son la clase mejor conocida dentro del Phylum Echinodermata, actualmente se tienen un poco más de 1000 especies conocidas de los océanos del mundo (Kroh and Mooi, 2021); los organismos de la Clase Echinozoidea poseen una forma globosa o cordiforme, con una simetría bilateral en sus larvas que evoluciona a una simetría radial y pentámera; poseen placas calcáreas unidas firmemente, de modo que constituyen un dermatoesqueleto rígido, dicho esqueleto proporciona una gran cantidad de caracteres filogenéticamente informativos para la sistemática. Debido a que actualmente podemos observar organismos de esta clase y que gracias a su esqueleto calcáreo se cuenta con un gran registro fósil, los equinoideos son los candidatos ideales para estudios que van desde la biología reproductiva hasta la evolución.

Los ejemplares de la Clase Echinozoidea pertenecientes al Mesozoico en nuestro país han sido motivo de investigación durante las últimas décadas, ya que es un grupo que presenta un registro fósil abundante y diverso en las secuencias sedimentarias en los afloramientos del país, siendo reportadas asociaciones fósiles de este grupo provenientes de rocas del Cretácico tardío en diferentes localidades del noreste de México (Silva *et al.* 2014). Así también, los equinoideos han tomado mayor importancia debido a que recientemente se ha desarrollado el uso de los ejemplares del Cretácico en el país para reconstrucciones



paleoambientales; y del mismo modo, se ha demostrado que los fósiles de equinoideos en asociación con otros grupos fósiles, pueden ser usados como indicadores de la edad de las formaciones de rocas, debido a su corta duración en el tiempo geológico y a que su distribución geográfica es amplia (Nieto and García, 2006).

Se han descrito alrededor de 227 especies de equinoideos del Cretácico para México, sin embargo, siguen siendo pocos los estudios que se tienen respecto a este grupo y la mayoría de estos son únicamente desde el punto de vista taxonómico, por lo que en el presente trabajo se tuvo como objetivo estudiar especies fósiles de la Clase Echinoidea pertenecientes al Cretácico en cinco localidades del noreste de México con el fin de determinar la taxonomía de las morfoespecies, las relaciones filogenéticas de la clase y las condiciones paleoecológicas de los equinoideos del Cretácico.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Geológicos y Estratigráficos

La región de Coahuila y Nuevo León se caracteriza por la presencia predominante de rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, que descansan sobre un basamento paleozoico y precámbrico. Durante el inicio del Cretácico Inferior, continuó la transgresión marina del Jurásico Superior, lo cual dio lugar al depósito, durante todo el Neocomiano, de una secuencia heterogénea que comprende varias formaciones; mientras que en el Cretácico Superior se depositaron en toda la región sedimentos fundamentales terrígenos provenientes de la porción occidental de México (INEGI, 1990). Siendo caracterizado el noreste de México por secuencias sedimentarias que van desde el Triásico; de estos depósitos, aquellos que corresponden al Cretácico constituyen el mayor porcentaje en áreas de afloramiento. Existen diversos trabajos de investigación realizados para establecer las posibles relaciones entre los fósiles presentes en los sedimentos y los eventos paleoambientales que debieron estar presentes en el momento de la muerte del organismo, estos estudios han sido realizados a nivel regional y global en varias partes del mundo (Brett and Seilacher, 1991).

Para este estudio se contempló el análisis de cinco localidades, de las cuales tres pertenecen al estado de Coahuila, sobre la geología de este estado el INEGI (1983) lo define como un territorio constituido mayoritariamente por rocas sedimentarias, marinas y continentales, siendo las más comunes las rocas calizas pertenecientes al Mesozoico. Estas rocas se observan afectadas por plegamientos, afallamientos e intrusiones; así mismo mencionan que existen diversas regiones dentro de Coahuila que se constituyen por rocas ígneas con edades que varían desde el Triásico hasta el Cuaternario.

En el estado de Nuevo León, se encuentra una de las localidades de interés para este trabajo, el Cañón de La Huasteca; la Sierra Madre Oriental ocupa la mayor parte de la zona occidental del estado, limitando al oriente con la Llanura Costera del Golfo Norte y con la Gran Llanura de Norteamérica. Se reporta para el Cretácico la presencia de afloramientos de caliza, de lutitas y asociaciones de calizas-lutitas y lutitas-areniscas y se

menciona que las principales estructuras de la Sierra Madre Oriental están constituidas por pliegues anticlinales y sinclinales, afectados por fallas de tipo normal y fallas inversas, además de la presencia de cuerpos de rocas intrusivas que han afectado a las secuencias mesozoicas de la Sierra Madre Oriental en diversos puntos (INEGI, 1986).

Dentro de las cinco localidades de interés para este trabajo se encuentran distintas formaciones como lo son la Formación La Peña, la Formación del Río y la Formación Austin. Al referirnos a formaciones pertenecientes al Cretácico Superior, Silva et al (2014), mencionan en su trabajo sobre equinoideos de Coahuila, que en las localidades de los arroyos El Tecolote y El Freno en el municipio de Jiménez, se observa una predominancia calcárea desde la base de la sección hasta los primeros tres metros de la misma, siendo la roca de tipo margas la más frecuente; por lo que ubican a la Formación Austin en estas localidades.

La Formación del Río fue descrita por Humphrey y Díaz (2003) en ciudad Acuña y al oeste-suroeste de Burros en Coahuila; mencionando que dicha formación está conformada por margas masivas de color verdoso, areniscas calcáreas y lutitas arenosas de color amarillento a parduzco, con color verde olivo al intemperismo, las cuales, hacia la porción media de la unidad, se intercalan con lutitas arcillosas; mientras que en la parte más alta de la unidad se encuentran calizas arenosas de color rojizo.

En el Cretácico Inferior se depositaron las rocas de la Formación La Peña, la cual ha sido definida como un cuerpo compuesto por dos miembros; un miembro inferior compuesto por caliza y uno superior formado por margas que se encuentran interestratificadas con delgadas capas de calizas (Imlay, 1936; Humphrey, 1949). Infrayacente a la Formación La Peña es posible encontrar a la Formación Cupido, la cual es definida por Smith (1970) como rocas de tipo caliza y esquistos marinos transgresivos depositados debido al movimiento del mar sobre el continente. La formación consiste en capas gruesas, medianas a delgadas de caliza, las cuales, contienen concreciones de pirita y pedernal (Imlay, 1937).

## 2.2. Taxonomía

El Phylum Echinodermata comprende cerca de 7,000 especies recientes y aproximadamente 13,000 especies fósiles, considerando dentro del Phylum a la Clase Crinoidea con 700 especies y la Clase Echinoidea con 900 especies como aquellas con el menor número de especies actuales (Martínez, 2014). Los equinoideos son conocidos desde la antigüedad clásica, donde Aristóteles estudia al género *Echinus*, al que describe y da nombre, que posteriormente, se extiende a la clase. Su estudio es tan detallado y profundo, que el aparato masticador de los equinoideos recibe un nombre en su homenaje: linterna de Aristóteles (Villalba, 1991).

La Clase Echinoidea se divide en dos grandes grupos: los regulares, los cuales poseen una simetría radiada y presentan una testa delicada que se fosiliza con mucha dificultad y los irregulares, con simetría bilateral, que aparecen hasta el Jurásico Inferior y tienen una testa más resistente, por lo que se conservan mejor y son los de mayor importancia estratigráfica (Buitrón, 1968). Los equinoideos se encuentran típicamente clasificados en dos subclases y 12 órdenes, en base al listado de Smith (1984), el cual fue un poco modificado por Littlewood and Smith (1995); teniendo así a la subclase Cidaroida (Claus, 1880), la cual comprende al Orden Cidaroida (Claus, 1880) y a la Subclase Euechinoidea (Bronn, 1860) que incluye al resto de los órdenes de la clase, que son el Orden Echinothuroida (Claus, 1880); el Orden Diadematoidea (Duncan, 1889); el Orden Pedinoidea (Mortensen, 1939); el Orden Calycina (Gregory, 1900); el Orden Arbacioidea (Gregory, 1900); el Orden Phymosomatoida (Mortensen, 1904); el Orden Temnopleuroidea (Mortensen, 1941); el Orden Echinoida (Claus, 1876); el Orden Cassiduloida (Claus, 1880); el Orden Clypeasteroida (Agassiz, 1872) y por último, el Orden Spatangoida (Claus, 1876) (Pawson, 2007).

Silva *et al.* (2014), realiza un estudio de equinoideos fósiles colectados en distintos afloramientos de la Formación Austin del Cretácico Superior en los arroyos El Freno y El Tecolote, Jiménez, Coahuila; en este estudio los autores describen diez especies de equinoideos como *Cidaris texanus* Clark, 1891; *Salenia mexicana* Schluter, 1887; *Holectypus* sp., *Heteraster texanus* Röemer, 1848 y *Diplodetus* sp., los cuales son

conocidos en varias localidades de México; así también reportan algunas especies por primera vez para el país como *Cidaris splendens* Morton, 1841; *Orthopsis casanovai* Cooke, 1955; *Micraster uddeni* Cooke, 1953 y *Mecaster batnensis* Coquand, 1862; por lo que se amplía su rango de distribución en la parte oeste del Océano Proto-Atlántico. Así también Silva *et al.* (2017) reportan tres especímenes de *Diplodetus brisenoi*, como nueva especie de equinoideo del Campaniano Inferior (Cretácico Superior) de la Formación Austin, en Jiménez. Coahuila; sugiriendo que esta especie representa un elemento de la infauna con hábitos detritívoros en ambientes de plataforma.

Martínez *et al.* (2017) llevan a cabo un estudio de equinoideos del Orden Spatangoida del Cretácico de México, donde reportan a *Epiaster dartoni*, *Heteraster aguilerai*, *H. alencasterae*, *H. mexicanus*, *H. obliquatus*, *H. texanus*, *H. trauthi*, *H. wenoensis*, *Macraster aguilerae*, *M. texanus*, *Washitaster bravoensis*, *W. longisulcus*, *Hemiaster bexari*, *H. calvini*, *H. cholamensis*, *H. humphreysanus*, *H. jacksoni*, *H. whitei*, *Proraster dalli*, y *Micraster sonorensis*.

Buitrón (1968; 1970) realiza estudios donde clasifica sistemáticamente una gran cantidad de equinoideos de México, en dichos trabajos taxonómicos define equinoideos del Cretácico Inferior del estado de Puebla, así como también realiza un catálogo de los equinoideos fósiles de México. Otros autores que han trabajado con la sistemática de la Clase Echinoidea son Cooke (1953; 1957), Durham *et al.* (1967), Kier and Lawson (1978), Villalba (1991), Smith (1994), Laguarda *et al.* (2005), Nieto and García (2006) y Silva *et al.* (2014, 2017).

### **2.3. Filogenia y Evolución**

Los equinodermos pertenecen a la rama del Reino Animal conocida como deuterostomados, grupo que también incluye a la especie humana. La información molecular que se tiene actualmente apoya esta agrupación, colocando a los vertebrados junto con los urocordados y a los equinodermos junto con los hemicordados. Sin embargo, en términos de morfología los equinodermos siempre se mantuvieron separados debido a su simetría y a la ausencia de las estructuras denominadas hendiduras branquiales (Smith, 2004).

Hasta el momento, los equinoideos han atravesado una serie de estadios de evolución ascendente que comienzan con los Perischoechinoideos paleozoicos, los cuales tenían placas imbricadas y caparazón flexible. El primer paso en su evolución consistió en la yuxtaposición de las placas y la conformación de un esqueleto rígido que se presenta ya en los Cidarioideos. La evolución de los equinoideos se realiza en el sentido de una tendencia hacia la simetría bilateral que se manifiesta en los equinoideos llamados irregulares, y en el de la simplificación que se caracteriza por la pérdida progresiva de las mandíbulas y la atenuación y uniformidad de la ornamentación. Los primeros equinoideos irregulares son relativamente más simples que los regulares y más complicados que los irregulares más recientes; se puede decir que las formas más evolucionadas son las más irregulares. Esta evolución se encuentra ligada con la adaptación al medio (Villalba, 1991).

A pesar de que los equinoideos aparecen desde el Ordovícico, estos se encuentran representados de manera muy escasa en las rocas del Paleozoico, mientras que en el Mesozoico son muy abundantes y diversificados, alcanzando su desarrollo máximo a principios del Terciario, empezando a declinar después paulatina y uniformemente (Buitrón, 1968).

El edrioasteroideo de vida libre perteneciente al Cámbrico Inferior-Medio ha sido a menudo sugerido como la representación de la población de la que surgieron los equinoideos, sin embargo, esto parece bastante improbable en la medida en que al año ya se encuentra en la superficie oral, y el sistema ambulacral están restringidas a dicha superficie. En vista del hecho de que las clases altamente diferenciadas, Edrioasteroidea, Eocrinoidea y Helicoplacoidea se encontraban presentes en la parte inferior de la Zona *Olenellus* del Cámbrico Inferior, bien podría ser que el equinoideo ancestral habría aparecido antes del Cámbrico; sugiriendo que el ancestro común para el Phylum Echinodermata no se encuentra en Eocrinoidea, sino en algún organismo desconocido pre-Cámbrico (Durham et al. 1967).

La clasificación de los organismos fósiles basándose en el parecido morfológico, así como también tomando en cuenta su ontogenia y distribución geográfica, nos lleva a descubrir

los sucesivos grados de relación filogenética. El autor Hennig (1965) menciona que en un caso ideal en que el sistema taxonómico esté bien desarrollado, los géneros de una determinada familia deberían encontrarse dentro de un grupo monofilético, dado que los mismos poseen un ancestro común.

Littlewood y Smith (1995) realizan un estudio sobre la filogenia de los erizos de mar (Echinoidea) donde aplican en combinación técnicas moleculares con la comparación de 163 caracteres morfológicos en ejemplares de especies recientes y fósiles; teniendo como resultado un árbol filogenético completo de los taxones superiores de la clase Echinoidea (Figura 1) y concluyendo que es importante incluir ejemplares fósiles dentro de los análisis filogenéticos cuando se tiene un grupo diverso y con amplios espacios evolutivos.

El registro fósil de los equinoideos cuyas secuencias moleculares han sido estudiadas indica que divergieron entre sí durante un período de tiempo relativamente largo, entre 35 y 120 millones de años. Esto ha permitido el tiempo suficiente para que las ramas que representan grupos de tallos comunes desarrollen su propia señal de apomorfías (Smith *et al.* 1995).

Por otro lado, Villier *et al.* (2004) realizan un trabajo sobre la filogenia del Orden Spatangoida (Clase Echinoidea) del Cretácico Inferior donde mediante un análisis filogenético de 36 especies mencionan a Hemiasterina, Micrasterina, Hemiasteridae, Schizasteridae, *Hemiaster*, *Heteraster*, *Mecaster* y *Periaster* como grupo monofilético original; así también reconocen como taxones primitivos y parafiléticos a *Toxaster*, *Epiaster*, *Palhemiaster* y Toxasteridae.

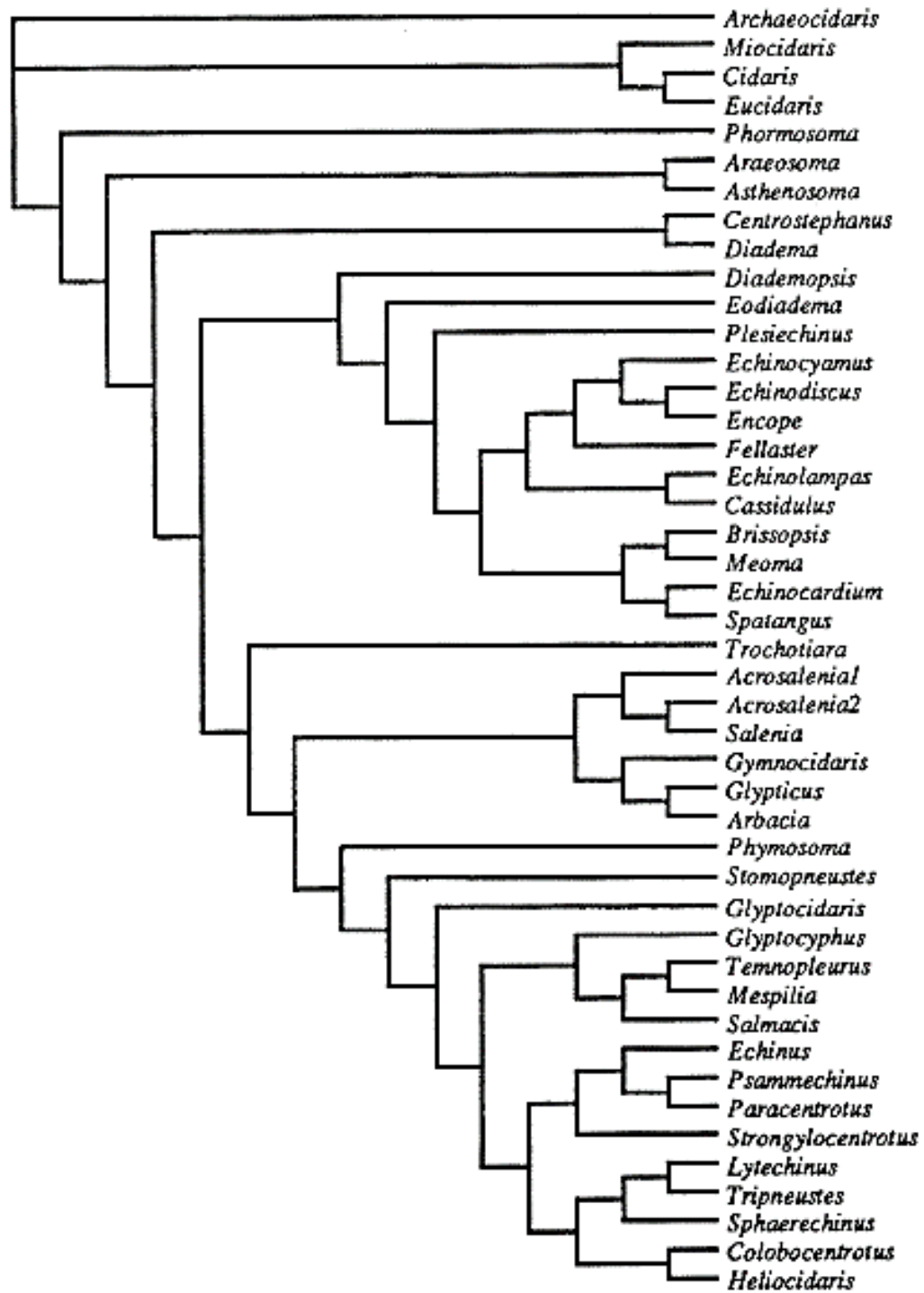


Figura 1. Árbol filogenético resultado de la combinación de análisis moleculares y morfológicos de especies fósiles y recientes de la Clase Echinoidea (Tomado de Littlewood and Smith, 1995).



Stockley *et al.* (2005) realizan un estudio de la filogenia de 21 especies de equinoideos del Orden Spatangoida utilizando datos de tres genes y dichos resultados son comparados con la filogenia en base a los caracteres morfológicos de los mismos taxones en conjunto con muestras fósiles; obteniendo como resultado que los diferentes datos generan diversas hipótesis filogenéticas para el grupo, sin embargo, estos son congruentes entre ellos. La adición de taxones fósiles revela una homoplasia oculta y genera una filogenia compatible con aquella estimada mediante técnicas moleculares.

Byrum and Lieberman (2021) presentan en su trabajo sobre filogenia y biogeografía de equinoideos del Orden Spatangoida del Cretácico que los géneros *Hemiaster*, *Heteraster* y *Proraster* son parafiléticos o incluso polifiléticos; observando una cercana relación entre *Mecaster fourneli* y *Palhemiaster* con *Proraster* siendo un grupo hermano de estos. Así mismo, resalta una cercana relación entre *Diplodetus-Micraster*, *Washitaster-Heteraster* y *Pliotoxaster-Macraster*.

#### **2.4. Paleoecología y Geoquímica**

A pesar de que todos los equinoideos son marinos, algunas especies han invadido lagunas o estuarios donde la salinidad es presuntamente no tan alta como lo es en el mar abierto. En general, los equinoideos aplanados habitan en mares pocos profundos, donde pueden moverse manteniéndose enterrados en la arena o lodos, mientras que muchas especies esféricas con espinas largas son habitantes de los arrecifes, y algunas de ellas habitan grietas en las rocas y algunos equinoideos regulares viven en aguas profundas (Cooke, 1957). Así mismo, el autor Villalba (1991) menciona que los equinoideos son animales bentónicos que habitan todos los mares y se encuentran a cualquier profundidad, sin embargo, son excepcionalmente abundantes en la zona nerítica. Aunque en general son de vida activa, muchos son sedentarios, sin carecer de la capacidad de desplazarse; los equinoideos regulares suelen estar dotados de una mayor capacidad de desplazamiento, que realizan apoyando y moviendo las radiolas; mientras que los irregulares suelen vivir parcialmente enterrados en la arena dejando al descubierto el aparato apical.

Entre los equinoideos extintos parece probable que aquellos con testa flexible y espinas cortas pueden no haber mantenido una orientación regular con respecto al sustrato e

incluso pudieran haber permanecido sobre sus costados como holoturoideos; mientras que aquellos con esqueleto rígido probablemente se encontraban orientados normalmente con la superficie oral adyacente al sustrato, pero no enterrada dentro de este (Durham *et al.* 1967).

Silva *et al.* (2017) reportan una nueva especie de equinoideo del Campaniano (Cretácico Superior) en Coahuila, donde dentro de la paleoecología mencionan que el género *Diplodetus* fue depositado bajo condiciones de un entorno de plataforma continental interior/medio; y donde la presencia del género junto con otros organismos endobentónicos podría evidenciar la presencia de un lecho marino suave.

Cuando hablamos de geoquímica, nos referimos a la conjunción de las disciplinas geología y química, las cuales juntas crean una herramienta de gran importancia para la realización de estudios completos de las rocas y sedimentos de interés, haciendo posible su clasificación, la determinación de la edad, composición química y los paleoambientes en las que se formaron; desde la aparición de la geoquímica como ciencia, esta ha formado parte fundamental de diversos estudios sedimentológicos (Alexander *et al.* 1981; Brumsack, 1980, 1986; Arthur *et al.* 1990; Pérez *et al.* 2009 y Calvert and Pedersen, 1993).

El autor Martínez (2015) realiza un estudio estratigráfico-geoquímico de la Formación Eagle Ford del Cretácico Superior en el estado de Coahuila; en este estudio el autor se enfoca en las lutitas que conforman a la formación para determinar la presencia o ausencia de gas y petróleo, para lo cual utiliza como parámetros geoquímicos la riqueza orgánica al medir el Carbono Orgánico Total (TOC por sus siglas en inglés) y la madurez térmica de la formación (temperatura máxima), concluyendo que la unidad superior de la Formación Eagle Ford presenta zonas de posible existencia de hidrocarburos en gas y aceite.

Pérez *et al.* (2009) llevan a cabo un estudio del terreno Cuicateco (Cretácico Superior) en Oaxaca en el que mediante los análisis geoquímicos por fluorescencia de rayos X (XFR) y espectrómetro de masas de plasma acoplado por inducción (ICP-MS), determinan la composición de los sedimentos como basáltica con contenidos de SiO<sub>2</sub>.

## 2.5. Tafonomía

La Paleobiología ha desarrollado nuevos conceptos, métodos y procedimientos; actualmente dicha ciencia requiere de una tafonomía sistemática y evolucionista para garantizar la congruencia de los resultados paleontológicos, siendo los conceptos de producción tafogénica y alteración tafonómica aquellos que proporcionan los fundamentos teóricos para interpretar los mecanismos de fosilización (Fernández, 1991).

El autor Fernández-López (1984; 1986; 1988; 1997) ha estudiado continuamente la tafonomía, remarcando su importancia en estudios geológicos y bioestratigráficos; dicho autor menciona que la tafonomía sigue siendo entendida como el estudio de los procesos posmortem y que la integración de los conocimientos tafonómicos con los paleobiológicos permite lograr y contrastar los conocimientos paleontológicos de máximo nivel.

Donovan and Gordon (1993) llevan a cabo un estudio en el que, mediante análisis tafonómicos de equinoideos regulares, comparan organismos recientes del Caribe con el registro fósil del Pleistoceno de ejemplares de la misma especie; Sugiriendo que la realización de análisis tafonómicos en taxones recientes tiene una genuina utilidad para la interpretación del registro fósil. Otro estudio similar al anterior, es aquel llevado a cabo por el autor Nebelsick (1999) donde compara la tafonomía de un equinoideo reciente y uno fósil; tomando como ejemplar reciente a *Echinodiscus auritus* y un ejemplar fósil de *Parascutella höbarthi*; ambas especies muestran fuertes similitudes en la morfología de la superficie y la presencia de un sistema de soporte interno pudiendo correlacionarse sus diferencias tafonómicas en base al entorno deposicional y a los factores relacionados con el enterramiento de los especímenes fósiles.

Bajo *et al.* (2008) realizaron un estudio de la asociación de equinoideos en calcarenitas messinienses en España, donde estudian 93 ejemplares, de los cuales determinaron seis especies y realizan interpretaciones paleoecológicas y tafonómicas en base a la asociación de equinoideos en los depósitos, definiéndolo como un medio marino somero, tipo infralitoral con fondos detríticos gruesos. El mismo autor (2013) estudia a los equinodermos del Plioceno Inferior de la Formación Arenas de Huelva, España; en este estudio el autor lleva a cabo análisis tafonómicos en base a la observación de las

asociaciones conservadas y sus características, mencionando que respecto a las espículas articuladas de los ejemplares de la localidad Bonares, se deduce un enterramiento rápido tras su muerte; mientras que en aquellos de la localidad los Cabezos, corresponden a un enterramiento producido algún tiempo después de la muerte, pero sin haber sufrido una erosión intensa.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Los equinoideos del Cretácico en México fueron descritos por primera vez en 1840 en Tehuacán, Puebla (Nyst and Galeotti, 1840). Y desde entonces se han reportado 227 especies de equinoideos del Cretácico para el país. Los estudios paleontológicos de equinoideos del Cretácico en México son relativamente pocos al tomar en cuenta que México en la Era Mesozoica se encontraba casi completamente cubierto por un mar poco profundo, existiendo pocos reportes que incluyan las implicaciones paleobiológicas de los equinoideos del Cretácico en México, siendo en su mayoría trabajos realizados en el extranjero. En México el principal problema al referirse al estudio de los equinoideos fósiles es la falta de estudios enfocados en biogeografía, evolución y aspectos paleobiológicos (Nieto and García, 2006).

Por esta razón se considera necesaria la realización de estudios de enfoque paleontológico en los que no sólo sean descritas las morfoespecies pertenecientes al Cretácico, sino que sean tomadas en cuenta las implicaciones filogenéticas y paleoecológicas. Con este trabajo se pretende aportar al conocimiento paleontológico información sobre la Clase Echinoidea, ya que el estudiar el pasado es indispensable para estudiar el presente; en esta tesis se busca realizar un estudio de diversidad en el que se relacionen los aspectos taxonómicos, filogenéticos y paleoecológicos de los equinoideos del Cretácico, que serán útiles para futuros estudios de la Clase Echinoidea, ya sean estudios enfocados en ejemplares fósiles o en equinoideos recientes, formando los sedimentos del conocimiento sobre este grupo específicamente para el noreste de México.

## **4. HIPÓTESIS**

Los equinoideos del Noreste de México presentan una alta diversidad debido a las condiciones tafonómicas y paleoecológicas de los sedimentos de las unidades litológicas del Cretácico.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. Objetivo General**

- Definir la diversidad de las morfoespecies de la Clase Echinoidea del Cretácico de cinco localidades en el noreste de México en relación a las condiciones paleoambientales y paleoclimáticas, utilizando estudios paleoecológicos y filogenéticos.

### **5.2. Objetivos Particulares**

1. Definir la taxonomía de las morfoespecies de la Clase Echinoidea del Cretácico en cinco localidades del Noreste de México.
2. Inferir las condiciones tafonómicas de las paleobiotas para determinar la paleoecología y las condiciones de depósito de los sedimentos de las formaciones del área de estudio.
3. Analizar las relaciones filogenéticas de la Clase Echinoidea del Cretácico de cinco localidades del Noreste de México, considerando los caracteres morfológico-funcionales.
4. Determinar la diversidad de las morfoespecies de la clase Echinoidea del Cretácico para el Noreste de México.

## 6. MATERIAL Y MÉTODOS

### 6.1. Área de Estudio

Para este trabajo se tomaron en cuenta cinco localidades del noreste de México (Fig. 2), de las cuales, cuatro de ellas pertenecen al estado de Coahuila y una localidad al estado de Nuevo León.

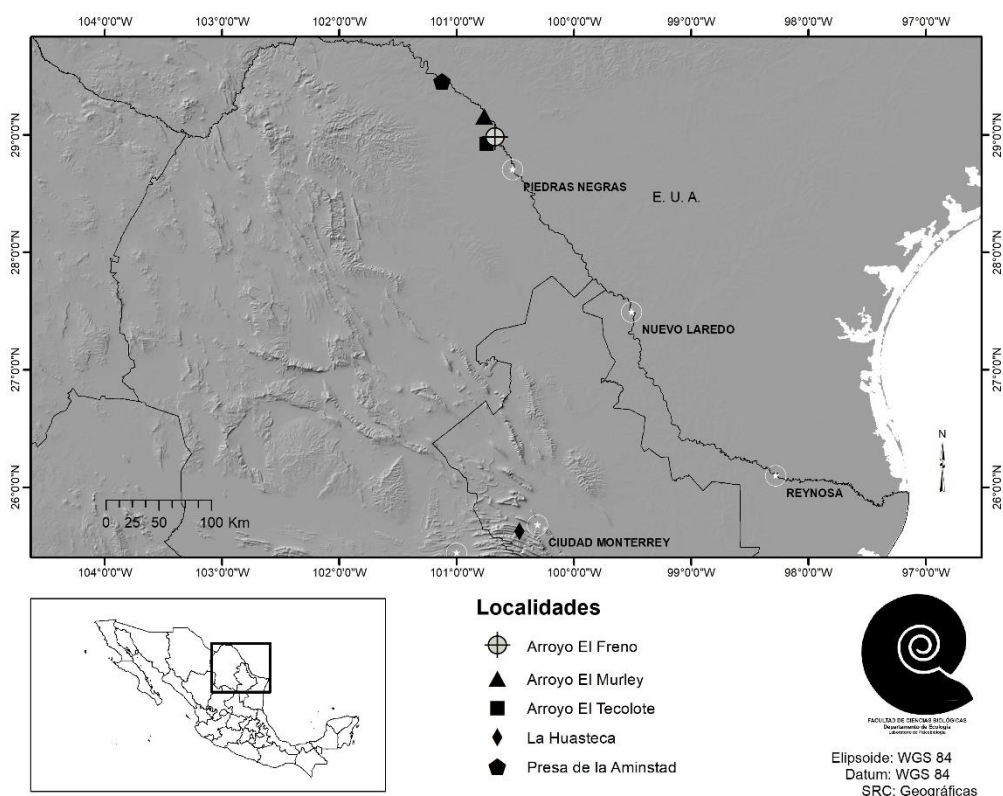


Figura 2. Mapa del área de estudio, donde se encuentran señaladas las cinco localidades seleccionadas para este trabajo.

Las primeras cuatro localidades del estudio se encuentran localizadas en la Provincia Fisiográfica de Coahuila, dentro de la subprovincia de Coahuila, la cual se localiza en la porción noreste del estado de Coahuila, entre las coordenadas  $28^{\circ}40'$  y  $29^{\circ}30'$  de latitud norte y  $100^{\circ}30'$  y  $101^{\circ}10'$  de longitud Oeste (Cuéllar, 1981).



En el municipio de Jiménez, Coahuila se encuentran tres de las localidades seleccionadas para este trabajo, el Arroyo El Tecolote se sitúa a 13.4 km al noreste del Ejido El Moral; su nombre se deriva del Rancho El Tecolote, el área de estudio se localiza en las coordenadas 28°55'00''N y 100°44'15''O, ocupando una distancia sobre el lecho del arroyo de aproximadamente 2.5 km. Por otro lado, el Arroyo El Freno, se ubica a 36.6 km de Piedras Negras, Coahuila, entre los 28°58'57''N y 100°40'27''O sobre la carretera a Ciudad Acuña, su nombre deriva del rancho El Freno, localizado a 2.6 km al este de la carretera. Y, por último, el Arroyo El Murley, se localiza a 60 km por la carretera a Ciudad Acuña, bajo las coordenadas 29°09'00''N y 100°45'20''O, su cauce desemboca en el río Bravo.

En las localidades Arroyo El Freno y Arroyo El Tecolote se observa una predominancia calcárea desde la base del afloramiento hasta los primeros tres metros del mismo, siendo la roca de tipo marga la más frecuente (Silva *et al.* 2014).

La localidad de Presa “La Amistad” se localiza en el cauce del Río Bravo a 20 km del municipio de Ciudad Acuña, del estado de Coahuila y a 10 km del puente internacional del río Texas; el área de estudio se encuentra ubicada en las coordenadas 29°25'00''N y 101°05'00''O, dicho municipio representa el 7.6% de la superficie del estado de Coahuila (INEGI, 1999).

Por último, el Cañón de La Huasteca se encuentra localizado en el municipio de Santa Catarina del estado de Nuevo León, el área de estudio se encuentra localizada en las coordenadas 25°38'15.29''N y 100°28'27.06''O, a una altura de 680 msnm. Fisiográficamente dicha localidad corresponde al cauce del Río Santa Catarina, dentro de la Sierra Madre Oriental, desde el punto conocido como “Las Tinajas” hasta salir del macizo montañoso (INEGI, 1986).

Dichas localidades fueron seleccionadas debido a que gracias a trabajos realizados anteriormente se tiene la certeza de que poseen un abundante registro fosilífero, estando la Clase Echinoidea bien representada tanto en las localidades de Coahuila como en la de Nuevo León.

## **6.2. Metodología**

La primera etapa para el desarrollo de este trabajo consistió en una búsqueda exhaustiva de trabajos previos y estudios sobre la Clase Echinoidea, específicamente aquellos en los que fueran tomados en cuenta los aspectos taxonómicos, filogenéticos, tafonómicos y paleoecológicos. Posteriormente a esta búsqueda se llevaron a cabo tres fases que conforman la metodología para esta investigación, estas fases se describen a continuación y dentro de la descripción de cada paso se encuentra el material que fue manejado durante la realización de este trabajo.

### **6.2.1. Fase I: Campo**

Dentro de esta fase se realizaron una serie de visitas a las localidades seleccionadas del noreste de México con el fin de llevar a cabo las observaciones y descripciones de los afloramientos. Aquí se obtuvo toda la información posible recopilar en el área de estudio, ordenando los datos sistemáticamente, se tomaron coordenadas de cada localidad por medio de un geoposicionador marca Magellian Explorist eMap (GPEMAP), con el fin de georreferenciar cada uno de los puntos de muestreo y de colecta de los ejemplares.

Siguiendo el método de la brújula de Brunton y cinta métrica (Compton, 1983) se diseñaron los perfiles de los afloramientos para determinar su origen geológico, tomando visual, rumbo y echado de los estratos y se describió la geomorfología y se hicieron las descripciones litológicas. Con la finalidad de recaudar información para la tafonomía de los organismos, se siguieron los criterios determinados por Fernández (1986, 1991) en la observación de los elementos de interés de las localidades y las descripciones de las asociaciones *in situ* con el fin de describir los procesos bajo los cuales paso el ejemplar desde el momento de su muerte hasta ser colectado.

Posteriormente, se llevó a cabo el levantamiento de muestras colectando de las capas de los afloramientos los fósiles de equinoideos y muestras de sedimento de aproximadamente 1 kg., haciendo uso de martillo y cincel; cada una de las muestras fueron colocadas en bolsas de polietileno previamente etiquetadas para su control y se llevó a cabo el registro fotográfico de las localidades como parte del trabajo en campo.

### **6.2.2. Fase II: Laboratorio**

Ya en el laboratorio se realizó una conjunción de lo obtenido en campo junto con los ejemplares y muestras de las localidades que se encuentran en la colección del laboratorio de Paleobiología de la Facultad de Ciencias Biológicas, perteneciente a la Universidad Autónoma de Nuevo León.

El primer paso en el laboratorio fue el de limpiar y preparar los fósiles recolectados y aquellos pertenecientes a la colección del laboratorio de Paleobiología que fueron estudiados en este trabajo en base a la técnica descrita por Meléndez (1998) para que fuera posible una mejor observación e identificación.

Las muestras de roca fueron observadas y se determinó su color tanto para la muestra fresca como intemperizada según la clasificación de Munsell (2009); posteriormente aquellas capas en las que se muestrearon fósiles de equinoideos, se procesaron mediante la técnica de lámina delgada de acuerdo al método descrito por Hollocher (2011), donde se realizó un corte de la roca y se adelgazó para su observación bajo el microscopio marca Leica, esto con la finalidad de determinar las microfacies bajo los criterios de clasificación de rocas carbonatadas de Dunham (1962) y Folk (1962).

Aquí también se llevó a cabo la observación y selección de aquellas características representativas de los organismos para determinar los caracteres morfológicos de valor sistemático que fueron tomados en cuenta para las relaciones filogenéticas de la Clase Echinoidea, tomando como base aquellas características morfológicas descritas por Melville y Durham (1967); así mismo, se realizó la merística de los ejemplares fósiles de equinoideos, tomando como guía el trabajo del autor Serafy (1979).

### **6.2.3. Fase III: Gabinete**

Dentro de esta fase se llevó a cabo la identificación de los equinoideos del Cretácico de las localidades de interés, donde se observaron los fósiles bajo lupa y bajo el microscopio estereoscopio marca Leica modelo EM para ser identificados en base a los criterios

taxonómicos de diversos autores (Durham *et al.* 1967; Buitrón, 1968; Kier and Lawson, 1978).

Así también en esta fase se realizó la matriz de datos de los caracteres morfológicos, intentando incluir todos los rasgos morfológicos que tengan relevancia taxonómica dentro del grupo, donde se seleccionaron un total de 50 caracteres morfológicos. Posteriormente, la matriz de datos fue vaciada en el programa Mesquite Project versión 3.6, donde se obtuvo el árbol filogenético de los géneros de la Clase Echinoidea del Cretácico con criterio Treelength que calcula la parsimonia y SPR rearranger.

### **6.2.3.1. Índices de Diversidad**

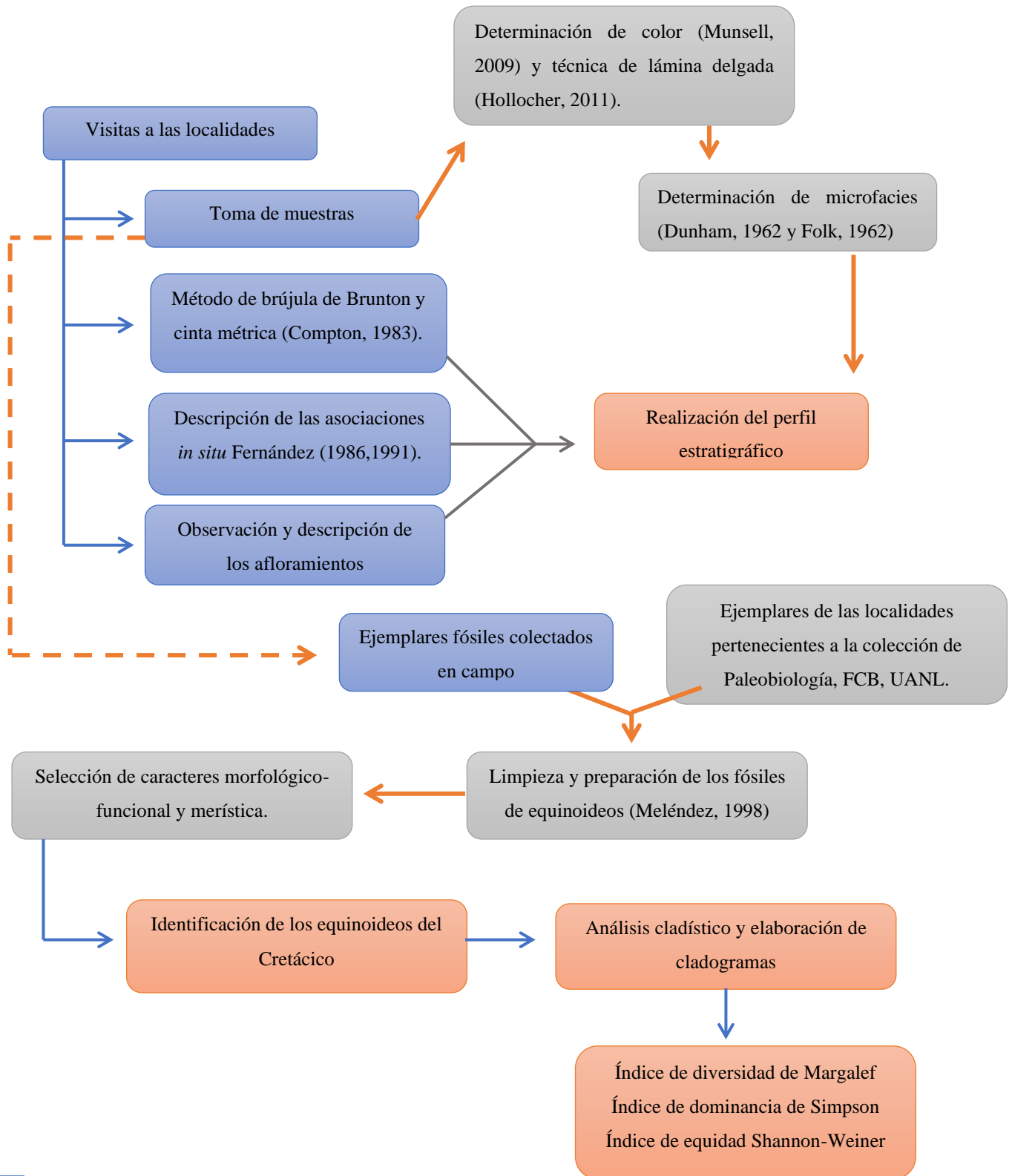
Para monitorear el efecto de los cambios en el ambiente, es necesario contar con información de la diversidad biológica en las comunidades, de esta forma es posible diseñar estrategias de conservación y llevar a cabo acciones concretas a escala local; dentro de este trabajo se pretende obtener la diversidad del grupo Echinoidea del Cretácico, en el noreste de México, ya que conociendo la paleoecología de los equinoideos será posible desarrollar planes de conservación y estudios ecológicos para los ejemplares actuales de la Clase Echinoidea.

Con el fin de determinar los índices de diversidad de la Clase Echinoidea del Cretácico se utilizó el programa estadístico PAST versión 2.17c, en donde se llevó a cabo el vaciado de los datos obtenidos en la fase de gabinete y se aplicaron los siguientes índices (Moreno, 2001):

- Índice de diversidad de Margalef; este índice transforma el número de especies por muestra a una proporción a la cual las especies son añadidas por expansión de la muestra. Este índice supone que hay una relación funcional entre el número de especies y el número total de individuos.
- Índice de dominancia de Simpson; este índice manifiesta la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una muestra sean de la misma especie. Estando fuertemente influido por la importancia de las especies más dominantes.

- Índice de equidad de Shannon-Wiener; expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra. Este índice asume que los individuos son seleccionados al azar y que todas las especies están representadas en la muestra.

### 6.2.4. Diagrama de Flujo



- Fase I: Campo
- Fase II: Laboratorio
- Fase III: Gabinete

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Formación La Peña en el área de estudio

La Formación La Peña, perteneciente al Cretácico Inferior, situada en el Cañón de la Huasteca, en el municipio de Santa Catarina, en Nuevo León, México. El área de estudio se encuentra bajo las coordenadas 25°38'15.29" N y 100°28'27.06" O, donde la Formación La Peña consiste en un afloramiento de 4.80 metros, posee rocas calizas margosas que se encuentran intercaladas con rocas de tipo margas; de acuerdo con la clasificación de Munsell (2009) las calizas margosas poseen coloraciones que varían entre tonos gris oscuro (N3) a gris medio-claro (N5), mientras que las margas poseen coloraciones café grisáceo (5YR 4/1) y en las capas cercanas a la Formación Cupido (formación subyacente), es posible observar colores rojizos (5R 5/4).

Durante el trabajo en campo se observó que la formación, dentro del área de estudio, posee valores decimétricos que se encuentran entre los 7 cm a 38 cm en las calizas; y el rango para las rocas de tipo marga se encuentra en espesores de 3.5 cm a 37 cm, teniendo una sola capa con un espesor de 66 cm (fig. 3).



Figura 3. Fotografía panorámica de la Formación La Peña con escala de un metro en el área de estudio.

### **7.1.1. Bioestratigrafía de la Formación La Peña**

En las capas que constituyen a la formación en el Cañón de la Huasteca, se tiene la presencia de una gran abundancia de fósiles, de los cuales entre los macrofósiles destacan los ammonoideos y se tiene la presencia de impresiones de equinodermos; mientras que dentro de los microfósiles se pudo observar mediante la técnica de lámina delgada (Hollocher, 2011) una gran abundancia de foraminíferos.

Dentro de las capas constituyentes de la formación, se lograron identificar un total de 12 ejemplares de equinoideos, de los cuales, diez pertenecen a la especie *Macraster elegans*, uno a *Tetragramma variolare* y un ejemplar más al género *Stereocidaris*.

Así mismo, se definen dos biozonas de ammonoideo, la Zona *Caseyella aguilerae* y la Zona *Dufrenoyia justinae*, donde debido a la presencia de estos ejemplares y su correlación estratigráfica con las biozonas de foraminíferos donde encontramos a las especies de *Leupoldina hexacamerata*, *Globigerinelloides algerianus*, *Globigerinelloides ferreolensis* y *Paraticinella rohri*, se define una edad de Aptiano Inferior-Aptiano Superior para la Formación La Peña.

### **7.1.2. Petrografía de la Formación La Peña**

Durante el trabajo en campo fue posible obtener un total de 155 muestras de la formación, de las cuales se observó que las calizas margosas que la constituyen son de tipo arcillosas y presentan en algunas de sus capas marcas de bioturbación, así como vetas de calcita y óxido de hierro y en menor cantidad vetas de pedernal; mientras que las margas se presentan en formas muy suaves, más aquellas pertenecientes a las capas cercanas a la Formación Cupido, conteniendo en ellas granos de óxido de hierro, así como vetas y cristales de calcita.

En la columna estratigráfica (fig. 4) realizada para la Formación la Peña, observamos un afloramiento con un total de 4.80 metros, donde se presenta una alternancia, ya mencionada, entre los tipos de roca calizas margosas y margas.



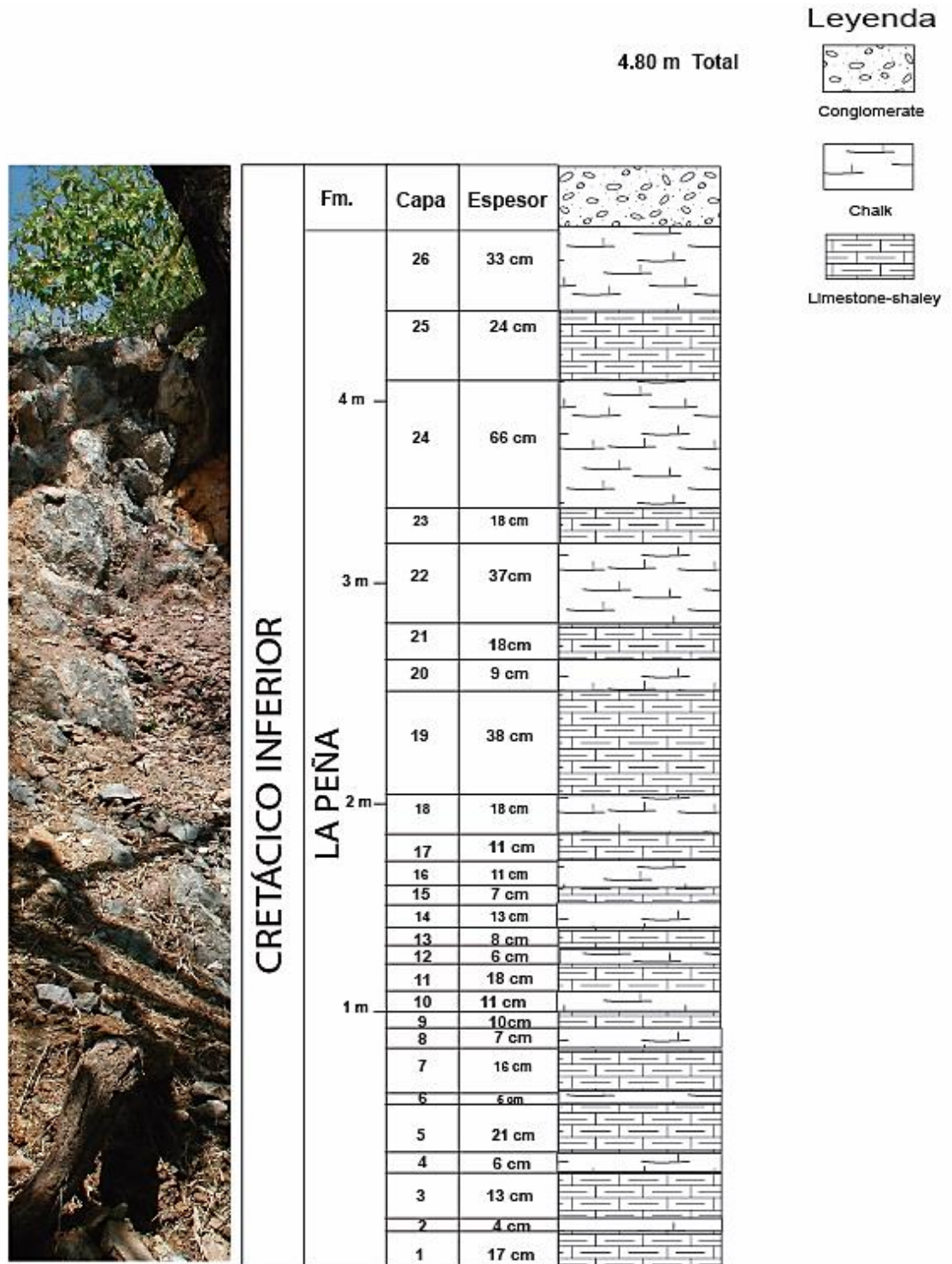


Figura 4. Columna estratigráfica de la Formación La Peña en el Cañón de la Huasteca, Santa Catarina, Nuevo León, México.

## 7.2. Formación Del Río en el área de estudio

La Formación del Río pertenece al Cretácico Superior, está ubicada en la Presa de la Amistad, localizada en el cauce del Río Bravo a 20 km del municipio de Ciudad Acuña, del estado de Coahuila, México; el área de estudio se localiza en las coordenadas 29°27'11'' N y 101°07'18'' O, donde la Formación Del Río consiste en un afloramiento de 5.94 m conformado por una alternancia de rocas duras de tipo calizas arcillosas y rocas suaves de tipo chalk (margas), las coloraciones de las rocas de la formación en la Presa de la Amistad, de acuerdo a la clasificación de Munsell (2009) varían de un gris amarillento (5Y 8/1) que se presenta en las primeras capas a coloraciones grisáceas-oliva (5Y 6/1) presente en las capas superiores.

La Formación Del Río en el área de estudio cuenta con valores decimétricos para los espesores de las capas que constituyen a la formación que varían de los 11 cm a 64 cm en las rocas de tipo margas y valores con una variación entre los 7 cm y 96 cm para las rocas de tipo calizas. En la figura 5 se puede observar el afloramiento de la Formación Del Río, así como su contacto superior con la Formación Buda.



Figura 5. Fotografía panorámica de la Formación Del Río en el área de estudio.

### **7.2.1. Bioestratigrafía de la Formación Del Río**

La Formación Del Río en el área de estudio presenta una gran abundancia de macrofósiles, entre los cuales destacan la presencia de los ammonoideos y los equinoideos, sin embargo, en los estudios de campo se observó también la presencia de ostreidos del género *Exogyra* sp., algunos rudistas y abundantes fragmentos de bivalvos a todo lo largo del afloramiento, se tiene la presencia del bivalvo *Neithea texana* en la capa 10 de la formación; en las capas más cercanas a la Formación Buda se presentaron algunos braquiópodos formando parte de la macrofauna de la formación.

De importancia cronoestratigráfica se tiene la presencia del ammonoideo *Gaysonites adkinsi*, que nos permite definir como edad tentativa para la formación el Cenomaniano Inferior. Así mismo se reportan para las capas de la Formación Del Río en el área de estudio un total de 35 ejemplares de equinoideos, entre los cuales se identificaron a las especies *Heteraster texanus*, *Phymosoma texanum*, *Hemiaster calvini*, *Coenholectypus* sp. y *Acrosalenia* sp.

### **7.2.2. Petrografía de la Formación Del Río.**

La Formación Del Río como se mencionó anteriormente, consta de una alternancia de rocas de tipo calizas arcillosas y margas, de las cuales mediante la técnica de lámina delgada (Hollocher, 2011) y las observaciones hechas en campo se puede reportar la presencia de hematita y óxido de hierro, así como de pirita dentro de las primeras capas de la formación. Así también se tiene la presencia de vetas de calcita en las láminas delgadas de las rocas del afloramiento.

En la figura 6 podemos observar la columna estratigráfica de la formación para el área de estudio donde se representan el número de capas que fueron muestreadas, sus espesores y el tipo de roca que las constituye.

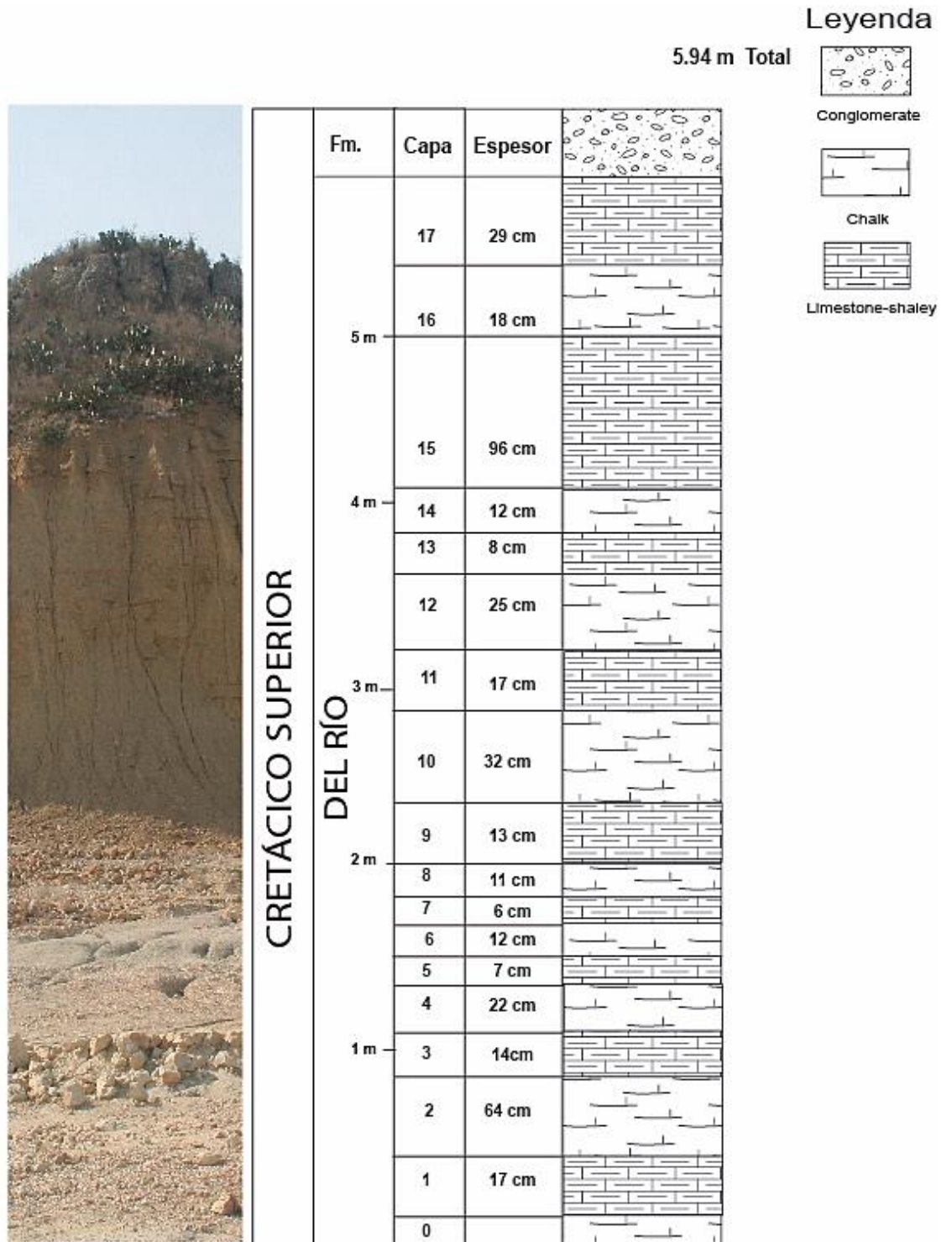


Figura 6. Columna estratigráfica de la Formación Del Río en la Presa de la Amistad en Coahuila, México.

### **7.3. Formación Austin en el área de estudio**

La Formación Austin, perteneciente al Cretácico Superior, fue estudiada en tres localidades ubicadas en el municipio de Jiménez en el estado de Coahuila, México.

#### **7.3.1. Arroyo El Tecolote**

Ubicado al noreste del Ejido El Moral, el área de estudio se localiza en las coordenadas 28°55'00'' N y 100°44'15'' O. En esta localidad la Formación Austin se presenta en un afloramiento de 8.58 metros formado por capas alternantes de roca de tipo calizas arcillosas y margas calcáreas. De acuerdo con la clasificación de Munsell (2009) las coloraciones de las rocas varían entre un gris claro (N7) a un gris medio (N6) y amarillento (5Y 8/1).

Se muestrearon un total de 24 capas que constituyen a la formación en el área de estudio, las capas compuestas por rocas de tipo calizas poseen valores decimétricos de espesor que varían entre 10 cm a 80 cm, mientras que las margas cuentan con valores entre los 10 cm y los 82 cm (fig. 7).



Figura 7. Fotografía panorámica de la Formación Austin en el Arroyo El Tecolote.

### **7.3.1.1. Bioestratigrafía de la Fm. Austin en el Arroyo El Tecolote**

En campo fue posible observar que la Formación Austin en el área de estudio presenta una gran abundancia de ejemplares fosilizados, dentro de dichos ejemplares destaca la presencia de organismos ammonoideos, equinoideos y bivalvos.

Con la observación en el laboratorio de las láminas delgadas realizadas con base en Hollocher (2011) se reportan para la formación la presencia de abundantes bioclastos, espinas y placas de equinodermos, pelecípodos, heterohelícidos, ostrácodos y foraminíferos, formando parte de la microfauna; mientras que para la macrofauna tenemos la presencia de equinoideos de las especies *Micraster uddeni*, *Phymosoma texanum*, *Cidaris texanus* y *Orthopsis casanovai*.

Debido a la presencia del molusco bivalvo *Inoceramus undulatoaplicatus*, se define como edad tentativa para la formación Coniciano – Santoniano, sin embargo, se puede inferir un alcance al Campaniano Inferior por la presencia del ammonoideo *Delawarella delawarensis*.

### **7.3.1.2. Petrografía de la Fm. Austin en el Arroyo El Tecolote**

La Formación Austin se encuentra conformada por rocas de tipo calizas arcillosas y margas calcáreas, en campo se observó la presencia de nódulos de pirita y glauconita. Así mismo, en las muestras de láminas delgadas se observan granos de óxido de hierro y vetas de calcita.

Dentro del perfil estratigráfico de la Formación Austin en el Arroyo El Tecolote (fig. 8) podemos observar la alternancia de los tipos de rocas que la constituyen, así como los espesores de cada una de las capas y el número de capas totales que fueron muestreadas durante el trabajo de campo en el municipio de Jiménez, Coahuila.

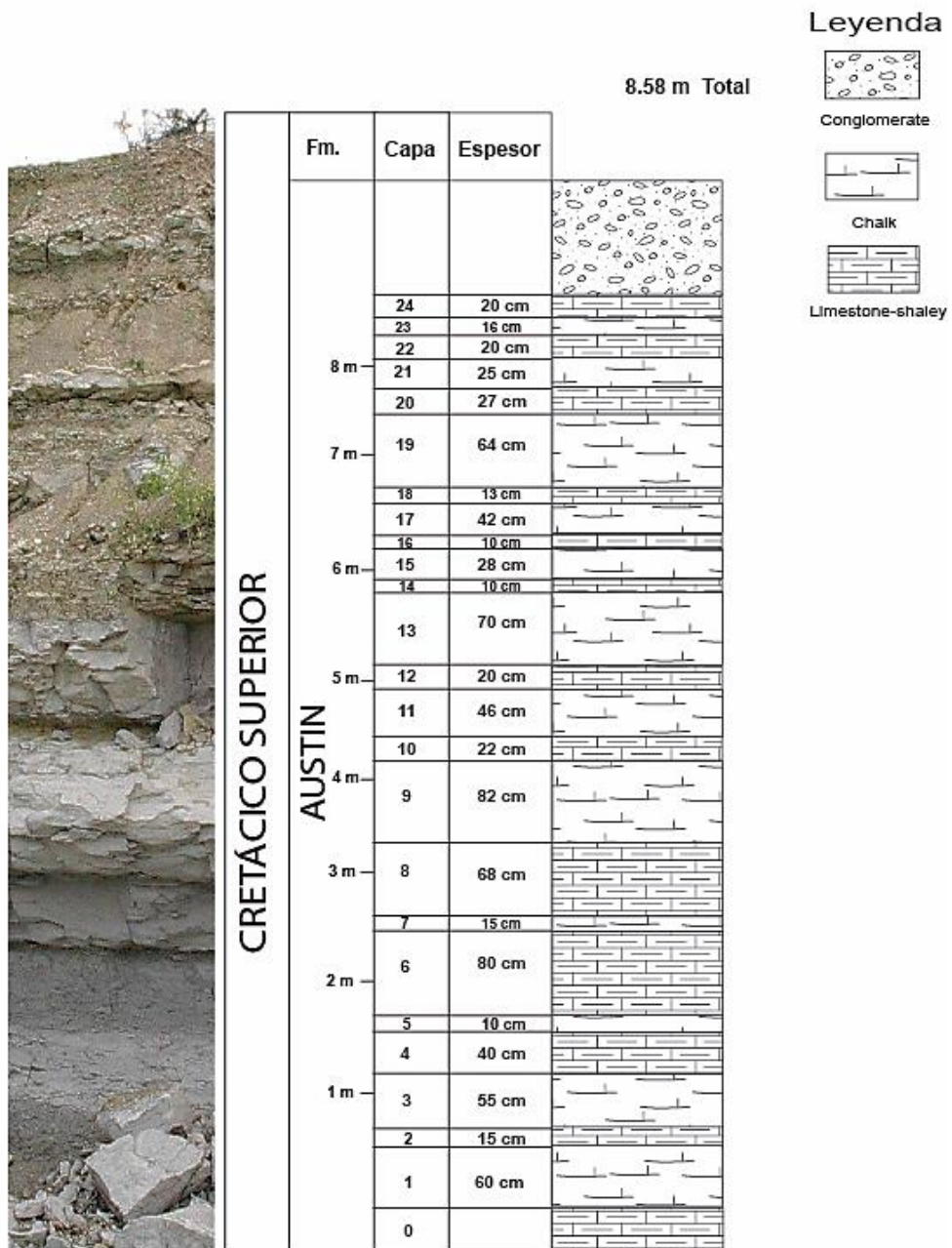


Figura 8. Columna estratigráfica de la Formación Austin en el Arroyo El Tecolote, Jiménez, Coahuila, México.

### 7.3.2. Arroyo El Freno

La localidad se ubica en el municipio de Jiménez, en Coahuila, México entre los 28°58'57'' N y 100°40'27'' O, en el área de estudio se observa una predominancia calcárea, teniendo a la roca de tipo marga con mayor presencia.

La Formación Austin en el Arroyo El Freno consta de 4.44 metros, el afloramiento se encuentra compuesto por capas que se alternan entre calizas arcillosas y margas calcáreas con coloraciones que varía de gris (N5) a gris crema o amarillento (5Y 8/1) según la clasificación de Munsell (2009).

Dentro del área de estudio se tuvieron valores decimétricos para los espesores de las capas de la formación que varían entre 22 cm y 60 cm para las calizas arcillosas y entre 16 cm y 110 cm para las rocas de tipo margas calcáreas; observando cada una de las capas que forman al afloramiento bien diferenciadas entre los tipos de rocas que las constituyen (fig. 9).



Figura 9. Fotografía panorámica de la Formación Austin en el Arroyo El Freno.



### **7.3.2.1. Bioestratigrafía de la Fm. Austin en el Arroyo El Freno**

Durante el trabajo en campo se determinaron 9 capas para la Formación Austin en el área de estudio, dentro de las cuales se observó la presencia de bivalvos, ammonoideos y equinoideos principalmente formando parte de la macrofauna de la formación. Dentro de los bivalvos presentes se reporta al género *Gryphaea* sp. y a *Lima* sp. estos organismos se encontraron presentes desde las primeras capas que forman el afloramiento; en la capa 5 de la formación fue posible documentar la presencia de icnofósiles del género *Thalassinoides* sp.

Se establece una edad tentativa para la formación de Coniciano Superior – Campaniano Inferior, debido a la presencia de *Inoceramus undulatoPLICATUS* bivalvo que fue posible observar en diversas capas del afloramiento y el cual en la capa 7 se encontraba fragmentado; así mismo, el ammonoideo *Delawarella delawarensis* y el equinoideo *Diplodetus brisenoi* presentes en la formación ayuda a definir la edad para el afloramiento.

Dentro de los equinoideos identificados en el área de estudio se tiene a *Salenia mexicana*, *Pseudodiadema variolare*, *Epiaster dartoni*, *Cidaris splendens*, *Orthopsis casanovai*, *Phymosoma texanum* y al género *Loriola* sp. Se reporta una nueva especie para la localidad, *Holectypus buitronae*.

### **7.3.2.2. Petrografía de la Fm. Austin en el Arroyo El Freno**

La Formación Austin en el Arroyo el Freno, consta de rocas de tipo calizas arcillosas y margas calcáreas, entre las cuales durante el trabajo en campo fue posible reportar la presencia de nódulos de pirita y se observó en la capa 7 de la formación signos de un proceso de bioturbación y presencia de pirita oxidada. Las rocas de las capas superiores son más suaves que aquellas presentes en las primeras capas de la formación. Para este afloramiento en las muestras obtenidas mediante la técnica de lámina delgada (Hollocher, 2011) se reporta también la presencia de nódulos de pirita y de glauconita. En el perfil estratigráfico de la formación (fig. 10) podemos observar las diversas dimensiones de cada una de sus capas y la alternancia ya mencionada presente a lo largo de toda la formación.

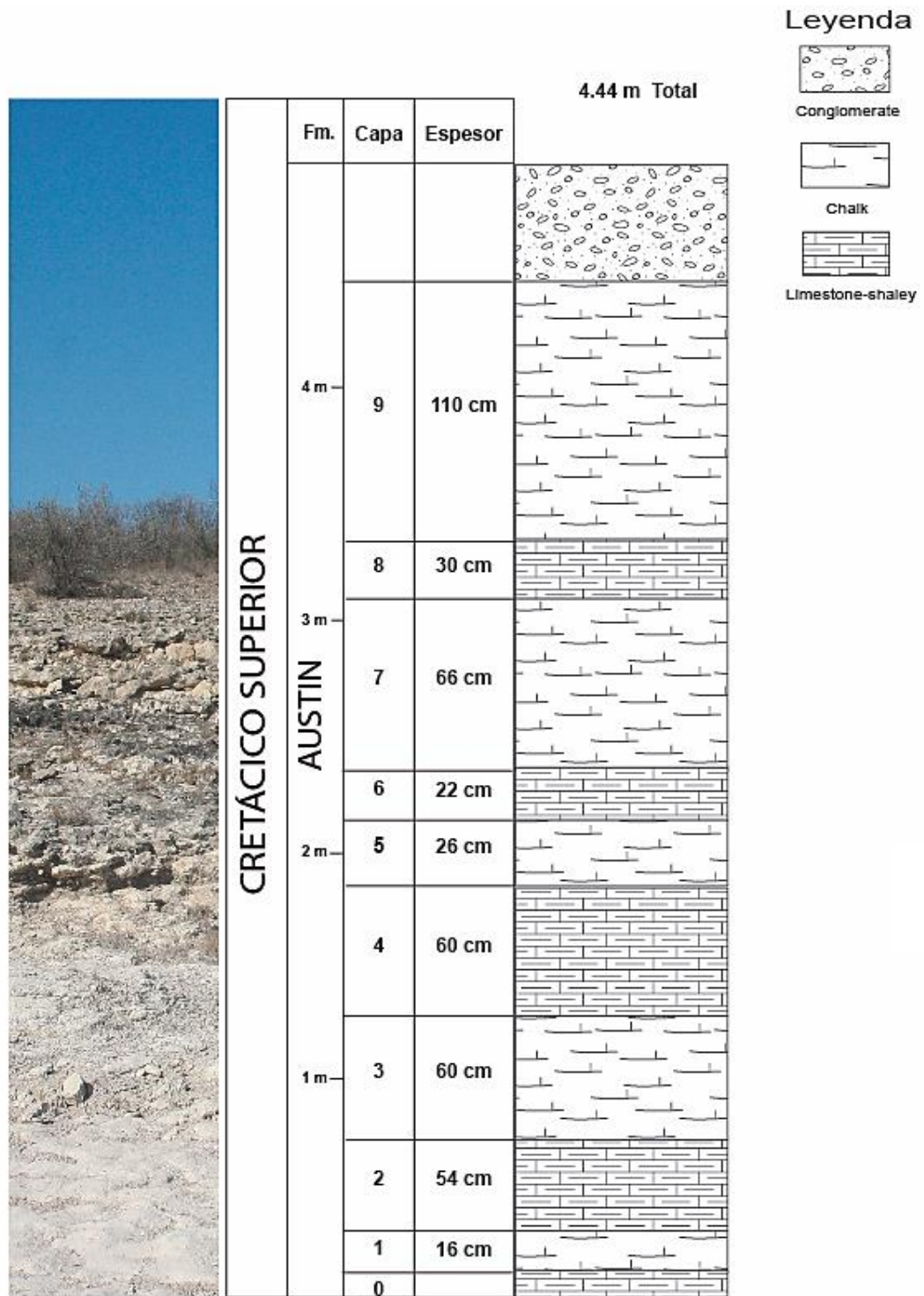


Figura 10. Columna estratigráfica de la Formación Austin en el Arroyo El Freno, Jiménez, Coahuila, México.

### 7.3.3. Arroyo El Murley

La localidad se ubica bajo las coordenadas 29°09'19'' N y 100°45'49'' O, en el municipio de Jiménez, Coahuila, México. Dentro del Arroyo El Murley la Formación Austin se observa como un afloramiento de 3.40 metros, el cual se encuentra compuesto por una alternancia de rocas de tipo calizas arcillosas y margas calcáreas con ondulación; las coloraciones de acuerdo a la clasificación de Munsell (2009) varía entre blancuzcas y grises en la base de la formación y se observan tonos café amarillentos en la parte superior.

Para la Formación Austin en el Arroyo El Freno tenemos valores decimétricos de los espesores de las rocas de tipo calizas arcillosas que varían entre 8 cm y 25 cm, mientras que para aquellas capas compuestas por rocas de tipo margas calcáreas se presentan valores entre los 12 cm y los 33 cm, teniendo solo una capa que presenta un espesor de 83 cm, que corresponde a la capa 13. Dentro del afloramiento es posible distinguir las coloraciones entre la base de la formación y la parte superior, así también se observan bien marcadas las diferentes capas que constituyen a la formación (fig. 11).



Figura 11. Fotografía panorámica de la Formación Austin en el Arroyo El Murley.

### **7.3.3.1. Bioestratigrafía de la Fm. Austin en el Arroyo El Murley**

La Formación Austin en la localidad de Arroyo El Murley presenta una gran abundancia de ejemplares fósiles; dentro del trabajo en campo, se reporta la presencia de ammonoideos a partir de la capa 2 de la formación, mientras que el grupo de los equinoideos se encuentran en el afloramiento a partir de la capa 4, en esta misma capa se reporta la presencia de bivalvos del género *Inoceramus* sp., género que se presenta hasta la capa 14. En las rocas sedimentarias de la Formación Austin para la localidad se observa al paragénero de icnofósiles, *Thalassinoides* sp.

En el Arroyo El Murley, se obtuvieron 87 ejemplares de equinoideos fósiles, teniendo como especie predominante a *Mecaster batnensis* y la presencia de *Cidaris splendens* a lo largo del afloramiento. Se designa como edad tentativa Coniaciano Superior – Campaniano Inferior para la formación en el área de estudio, debido al contenido fósil encontrado y por la presencia del bivalvo *Inoceramus pictus*.

### **7.3.3.2. Petrografía de la Fm. Austin en el Arroyo El Murley**

La Formación Austin en el Arroyo El Murley, está formada por 16 capas de rocas que presentan una alternancia entre rocas de tipo calizas arcillosas y rocas margas calcáreas; en las primeras capas de la formación es posible observar una estratificación de escamas superpuestas, con rocas que presentan colores grisáceos con intercalaciones de tonos cafés.

Con base en el trabajo de campo y mediante la observación de las láminas delgadas de la formación (Hollocher, 2011) se reporta la presencia de óxidos en las primeras capas del afloramiento, se tiene la presencia de pirita a lo largo de la formación y en las capas superiores se observa un cambio en la coloración donde se presentan tonos casi negros y una gran abundancia de vetas de calcita. Los espesores de cada una de las capas que constituyen a la formación, así como la ya mencionada alternancia presente entre los tipos de rocas que la forman, es posible observarla en su perfil estratigráfico (fig. 12).

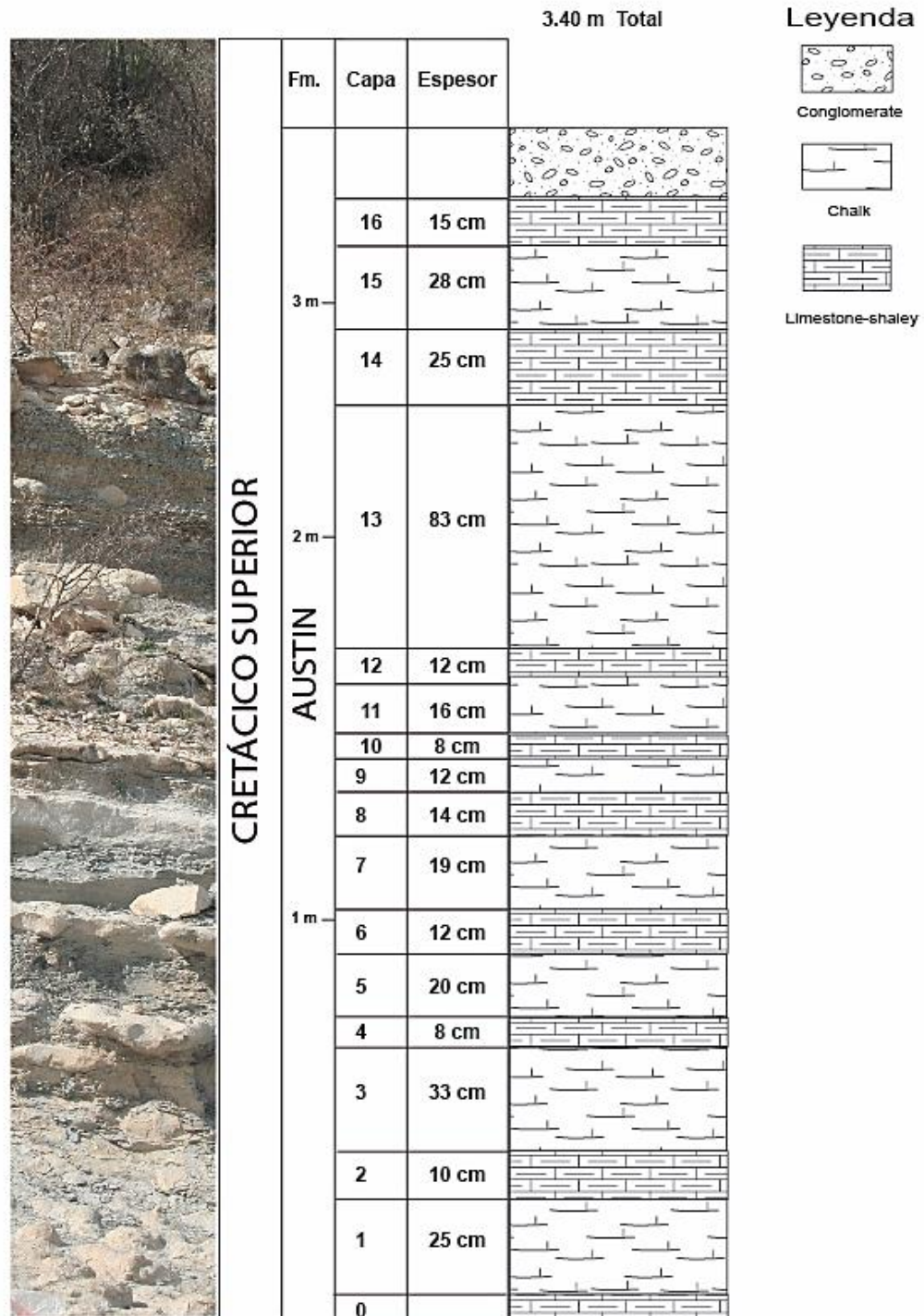


Figura 12. Columna estratigráfica de la Formación Austin en el Arroyo El Murley, Jiménez, Coahuila, México.

#### **7.4. Implicaciones taxonómicas**

Dentro de este apartado se presentan la diagnosis de los organismos fósiles de equinoideos identificados para cada una de las localidades que forman parte del área de estudio de este trabajo; para la identificación de los equinoideos se utilizaron los trabajos de diversos autores (Durham *et al.* 1967; Butrón, 1968; Kier and Lawson, 1978). Para interpretar las tablas de dimensiones de los equinoideos consultar la lista de abreviaturas que se encuentra dentro de las primeras páginas de este trabajo.

#### **Características generales de la Clase Echinoidea**

Los organismos pertenecientes a la Clase Echinoidea, conocidos comúnmente como equinoideos o erizos de mar, son ejemplares que poseen un cuerpo globoso limitado por un caparazón rígido sólido, el cual se encuentra formado por placas poligonales calcáreas yuxtapuestas distribuidas en cinco áreas ambulacrales y separadas por cinco áreas interambulacrales.

La simetría inicial de los equinoideos es pentarradiada alrededor de un eje oral – aboral, es decir, cuando el periprocto se encuentra en el polo apical, el caparazón es globuloso, en estos organismos el periprocto se encuentra rodeado por un anillo de diez placas conocido como sistema apical y se les ha denominado como equinoideos regulares. En cambio, si el periprocto se encuentra fuera del sistema apical, aparece un plano de simetría bilateral llamado “Plano de Loven”, donde el caparazón de los equinoideos es acorazonado, por lo que se les denomina equinoideos irregulares, en contraposición a aquellos que conservan la simetría pentámera.

Durante la formación del endoesqueleto calcáreo de los equinoideos las placas pueden ser simples (al estar aisladas) o compuestas (al fusionarse), siendo un esqueleto rígido compuesto fundamentalmente de  $\text{CaCO}_3$  en forma de calcita, con cantidades relativamente pequeñas de  $\text{MgCO}_3$ .

### 7.4.1. Paleontología Sistemática

**Phylum** Echinodermata

**Clase** Echinoidea

**Orden** Phymosomatoida

**Familia** Phymosomatidae

**Género** *Phymosoma*

**Especie** *P. texanum* (Röemer, 1849)

(ANEXO II, LÁM. I)

#### **Diagnosis**

Testa mediana, esférica, comprimida dorsoventralmente, con simetría pentarradial; ambulacros extendidos en el margen, de poco más de ½ de la anchura de los interambulacros, estrechándose ligeramente en dirección al aparato apical; zona porífera biserial, con poros redondos; tubérculos imperforados; dos hileras de tubérculos en los ambulacros; cuatro hileras de tubérculos en las placas interambulacrales, siendo los tubérculos de las hileras centrales de mayor tamaño. Periprocto en el polo apical con un diámetro menor al del peristoma que se encuentra en la zona ventral.

**Rango stratigráfico:** Cenomaniano (Cretácico Superior).

#### **Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL127	Presa la Amistad	22.56	8.49	4.72	7.34	8.57	10.22
FCBUANL128	Presa la Amistad	19.20	8.20	4.20	6.19	6.60	9.13
FCBUANL2451	Arroyo el Tecolote	21.53	8.36	4.99	6.66	9.89	----
FCBUANL125	Arroyo el Freno	24.85	9.36	5.64	7.45	----	10.44

**Familia Diplopodiidae**

**Género *Tetragramma***

**Especie *T. variolare* (Brongniart, 1822)**

(ANEXO II, LÁM. I)

**Diagnosis**

Único ejemplar con mala conservación; testa mediana, de forma esférica y ligeramente deprimida. El sistema apical y el peristoma se encuentran cubiertos por roca, por lo que no se pueden observar ni medir. Áreas ambulacrales angostas, de menor anchura que las áreas interambulacrales; presentan un tubérculo grande que sobresale y es mamelonado, crenulado y perforado. Zona porífera con poros circulares.

**Rango Estratigráfico:** Oxfordiano (Jurásico Superior) – Turoniano (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL240	Cañón de la Huasteca	46.99	27.16	3.96	5.48	----	----

**Familia Emiratiidae**

**Género *Loriola* sp. (Neumayr, 1881)**

**Diagnosis**

Teta mediana y aplanada; área ambulacral recta, estrecha (un poco más de ½ de la anchura Interambulacral) con tubérculos primarios y secundarios. Interambulacros anchos, tubérculos de similar tamaño a los ambulacros, crenulados y perforados. Peristoma ubicado en una excavación en la cara ventral, grande (aproximadamente ½ del diámetro), invaginado. Periprocto localizado en el sistema apical, de menor tamaño que el peristoma y redondeado.

**Rango Estratigráfico:** Aptiano (Cretácico Inferior).



**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL461	Arroyo el Freno	19.05	9.79	3.25	7.12	6.29	----
FCBUANL244	Arroyo el Freno	21.08	12.86	3.81	8.30	6.86	10.13

**Orden Hemicidaroidea****Familia Pseudodiadematidae****Género *Pseudodiadema* sp. (Desor, 1855)**

(ANEXO II, LÁM. I)

**Diagnosis**

Testa de tamaño mediano, aplanada y redondeada; área ambulacral angosto, de menor tamaño que la interambulacral, con zona porífera con pares de poros uniformes; placas interambulacrales anchas, con un tubérculo grande, localizado en la parte central, crenulado y perforado. Sistema apical pequeño con periprocto central subangular; peristoma con mala conservación, localizado en la parte central de la cara ventral del ejemplar.

**Rango Estratigráfico:** Oxfordiano (Jurásico Superior) – Albiano (Cretácico Inferior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANLA23	Arroyo el Freno	29.27	11.93	7.22	10.20	8.69	----

**Orden Cidaroida****Familia Cidaridae****Subfamilia Cidarinae****Género *Stereocidaris* sp. (Leske, 1778)**

(ANEXO II, LÁM. I)

### Diagnosis

Testa grande, esférica, globosa, algo comprimida dorsoventralmente; ambulacros angostos ( $\frac{1}{4}$  de la anchura de los interambulacros) estrechos en sus extremos, con una ondulación que se aprecia más a la altura del ámbito; en los ambulacros presentan dos hileras de poros ovales entre las cuales se tienen dos hileras de gránulos biseriales; interambulacros anchos, con dos hileras de placas grandes, cada una presenta un tubérculo grande, con una areola en forma de surco profundo. Periprocto situado en el sistema apical y peristoma cubierto por roca.

**Rango Estratigráfico:** Aptiano (Cretácico Inferior).

### Dimensiones (en milímetros)

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
Sin número	Cañón de la Huasteca	51.49	26.22	5.83	23.37	19.14	----

### Género *Cidaris*

**Especie** *C. texanus* (Clark, 1891)

(ANEXO II, LÁM. II)

### Diagnosis

Testa grande, esférica, ligeramente comprimida dorsoventralmente; ambulacros angostos (aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la anchura Interambulacral) en sus extremos se estrechan y son escasamente ondulados, la ondulación se aprecia más a la altura del ámbito; en las zonas poríferas posee seis gránulos por hilera, de los cuales cuatro centrales son más pequeños. Zona porífera bigémina, con poros con forma oval, oblicuos. Interambulacros anchos, con dos hileras de placas grandes y hexagonales. Tubérculos primarios son mamelonados, perforados y no crenulados. Peristoma central; periprocto grande y redondeado.

**Rango Estratigráfico:** Coniaciano Superior – Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL2463	Arroyo el Tecolote	33.32	18.69	3.15	15.25	11.03	9.30
FCBUANL346	Arroyo el Tecolote	30.77	18.24	2.75	14.45	10.16	8.49
FCBUANL316	Arroyo el Tecolote	37.76	23.40	4.89	16.52	13.32	12.16

**Género *Cidaris*****Especie *C. splendens* (Morton, 1841)**

(ANEXO II, LÁM. II)

**Diagnosis**

Testa de tamaño medio, esférica, áreas ambulacrales angostas (aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la anchura Interambulacral). Zonas interporíferas con cuatro hileras de gránulos pequeños, de las cuales, las dos centrales son de menor tamaño; zona porífera bigémina, con poros en forma oval, y aberturas en forma de embudo; las hileras de poros se encuentran en un surco. Interambulacros anchos, con dos hileras de placas grandes, con tubérculo primario, mamelonado, perforado y no crenulado. Periprocto ubicado en el aparato apical de manera central y peristoma no conservado.

**Rango Estratigráfico:** Coniaciano (Cretácico Superior).**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL121	Arroyo el Freno	29.16	16.71	3.41	13.01	11.82	----
FCBUANL245	Arroyo el Freno	24.03	13.18	4.51	9.16	8.29	----
FCBUANL243	Arroyo el Freno	----	14.95	3.46	11.96	----	----
FCBUANL1064	Arroyo el Freno	31.04	26.01	3.27	15.93	----	----
FCBUANL302	Arroyo el Muxlov	19.99	12.39	2.91	----	5.24	----

## Orden Salenioida

### Familia Saleniidae

#### Género *Salenia*

#### Especie *S. mexicana* (Schluter, 1887)

(ANEXO II, LÁM. II)

#### Diagnosis

Testa de tamaño mediano, esférica, globosa, con la parte superior abovedada, convexa; cara inferior casi plana, ligeramente cóncava en la parte central. Ambulacros muy angostos y ondulados, con dos series de gránulos, mamelonados y no perforados, de forma oval. Zonas poríferas ligeramente onduladas y compuestas por poros transversalmente ovalados, que forman pares oblicuos; poros limitados por un borde y en la parte central de cada par se tiene un pequeño gránulo; cerca del peristoma, los poros aumentan su número. Periprocto ovalado, elevado e hinchado en sus bordes; aparato apical de contorno subcircular y grueso; compuesto por cinco placas genitales, cinco ocelares y una placa subanal, que ocupa el centro del aparato.

**Rango Estratigráfico:** Coniaciano Superior – Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

#### Dimensiones (en milímetros)

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL131	Arroyo el Freno	17.44	12.47	2.04	8.09	2.33	6.22
FCBUANL132	Arroyo el Freno	17.86	10.63	1.93	8.18	2.94	6.65
FCBUANL59	Arroyo el Freno	17.10	11.87	2.21	7.46	3.10	6.16

#### Género *Acrosalenia* sp. (Agassiz, 1840)

(ANEXO II, LÁM. III)

## Diagnosis

Testa pequeña, redondeada, aplanada en la cara ventral; área ambulacral muy estrecha, de menos anchura que los interambulacros (casi  $\frac{1}{4}$  que la anchura Interambulacral), con gránulos entre dos columnas de tubérculos crenulados y perforados; Área Interambulacral ancha con tubérculos primarios perforados de gran tamaño; periprocto ligeramente desplazado del centro del aparato apical, de tamaño pequeño y contorno hinchado; peristoma en la parte ventral, en una excavación en el centro del ejemplar.

**Rango Estratigráfico:** Valanginiano (Cretácico Inferior).

## Dimensiones (en milímetros)

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL134	Presa la Amistad	15.87	10.58	1.95	5.93	3.30	7.24
FCBUANL133	Presa la Amistad	13.79	8.67	1.49	5.30	2.71	3.82

## Orden Echinoida

### Familia Orthopsidae

### Género *Orthopsis*

### Especie *O. casanovai* (Cooke, 1955)

(ANEXO II, LÁM. III)

## Diagnosis

Testa de contorno circular; superficie aboral ligeramente cóncava y adoral casi plana, deprimida en la región del peristoma. Ambulacros angostos (menos de  $\frac{1}{2}$  de la anchura Interambulacral), con dos hileras que poseen dos series de tubérculos de gran tamaño, mamelonados, no crenulados y perforados; entre cada dos tubérculos primarios hay una placa pequeña ornamentada. Interambulacros anchos, con dos hileras que poseen seis series de tubérculos primarios, mamelonados y perforados; con una serie de tubérculos pequeños casi juntos a los pares de poros, enseguida una serie de tubérculos primarios,

mamelonados y perforados; al centro del interambulacro hay dos hileras de tubérculos pequeños y, por último, una hilera de tubérculos primarios y una de secundarios. Zona porífera con poros ovales. Sistema apical pentagonal, peristoma grande y periprocto grande y redondeado.

**Rango estratigráfico:** Coniaciano Superior – Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	D.	A.p.	A.amb.	A.int.	D.p.	D.pe.
FCBUANL2472	Arroyo el Tecolote	24.89	9.28	3.76	9.96	2.80	8.35
FCBUANL 458	Arroyo el Tecolote	26.35	9.77	4.20	9.74	3.46	8.15
FCBUANL 203	Arroyo el Freno	38.11	16.04	6.15	13.90	4.99	----
FCBUANL 2473	Arroyo el Freno	23.34	10.43	4.26	9.37	2.87	----
FCBUANL 302	Arroyo el Freno	24.61	14.32	4.34	9.42	3.81	----

**Orden Spatangoida**

**Familia Hemiasteridae**

**Género *Hemiaster***

**Especie *H. calvini* (Clark, 1893)**

(ANEXO II, LÁM. IV)

**Diagnosis**

Testa mediana, superficie aboral muy elevada y superficie oral casi plana, un poco convexa. Ambulacros pares posteriores ligeramente más cortos que los ambulacros anteriores, petaloides, al igual que el ambulacro impar estos se encuentran en un surco profundo; Zona porífera de los ambulacros con poros en forma de ranura, formando dos hileras biserials en cada lado de los ambulacros. Periprocto de forma ovalada, situado en

la parte posterior; peristoma de tamaño pequeño, localizado en la superficie oral de la testa.

**Rango Estratigráfico:** Albiano Superior (Cretácico Inferior) – Turoniano (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.a.	A.amb.p.	A.amb.i.	An.p.	Al.p.	An.per.	Al.per.
FCBUANL163	Presa de la Amistad	39.16	36.83	35.07	5.10	4.44	4.05	2.73	4.35	3.14	1.95
FCBUANL345	Presa de la Amistad	30.49	28.96	27.86	3.74	3.52	3.50	2.33	3.45	3.40	2.40
FCBUANL145	Presa de la Amistad	34.11	29.80	27.48	3.96	3.65	4.27	2.29	3.74	3.66	1.80
FCBUANL465	Presa de la Amistad	31.56	28.77	25.10	4.05	3.16	3.35	2.62	4.38	4.12	2.10

**Género *Mecaster***

**Especie *M. batnensis* (Coquand, 1862)**

(ANEXO II, LÁM. V)

**Diagnosis**

Testa de tamaño pequeño-medio, ligeramente acorazonada, hexagonal, globosa en los laterales. Ambulacros en surcos profundos, área ambulacral anterior petaloide, largos, en la zona porífera presentan dos hileras biserials de poros en forma de ranura; ambulacros posteriores más profundos y levemente más cortos que los anteriores, con poros en forma de ranuras de igual tamaño. Áreas interambulacrales pronunciadas, principalmente el interambulacro entre los ambulacros posteriores; ambulacro impar deprimido,

extendiéndose hasta el peristoma en la parte anterior; periprocto en forma oval con punta acuminada.

**Rango Estratigráfico:** Cenomaniano (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.a.	A.amb.p.	A.amb.i.	An.p.	Al.p.	An.per.	Al.per.
FCBUANL78	Arroyo el Murley	32.53	30.15	22.47	6.30	5.90	3.63	2.20	2.59	----	----
FCBUANL175	Arroyo el Murley	26.60	23.80	19.41	5.06	3.37	2.01	2.20	3.38	1.94	2.54
FCBUANL77	Arroyo el Murley	29.36	27.36	21.69	4.57	5.31	3.88	1.56	2.64	2.23	1.52
FCBUANL96	Arroyo el Murley	24.71	23.15	16.37	3.54	3.81	2.80	2.50	4.01	2.10	1.95
FCBUANL99	Arroyo el Murley	25.26	23.47	18.33	5.03	4.78	3.40	2.43	4.63	3.01	1.95
FCBUANL27	Arroyo el Murley	24.95	23.72	12.92	3.11	3.15	2.97	3.68	2.66	----	----
FCBUANL2483	Arroyo el Murley	17.44	15.80	12.34	3.51	2.86	2.29	----	----	2.73	1.83
FCBUANL102	Arroyo el Murley	16.89	15.60	11.87	2.80	3.09	1.58	2.22	2.61	2.07	1.46
FCBUANL40	Arroyo el Murley	16.54	16.12	12.19	2.27	2.17	2.03	----	----	----	----
FCBUANL89	Arroyo el Murley	15.31	14.58	11.63	2.34	1.84	2.11	2.05	2.32	----	----
FCBUANL2653	Arroyo el Murley	16.58	15.63	8.35	2.20	2.46	1.06	1.61	2.26	----	----
FCBUANL104	Arroyo el Murley	13.32	12.96	10.37	2.01	1.74	3.63	2.20	2.59	----	----

**Familia** *Micrasteridae*

**Género** *Micraster*

**Especie** *M. uddeni* (Cooke, 1953)

(ANEXO II, LÁM. IV)



## Diagnosis

Testa acorazonada, de tamaño grande, con un surco profundo, angosto que se extiende desde el ápice hasta el peristoma; posee sistema apical ligeramente posterior, de tipo etmofracto, con cuatro poros genitales; placas ocelares posteriores en contacto. Ambulacros hundidos, rectos, el par de ambulacros anterior es dos veces más alto que los ambulacros posteriores y ligeramente más ancho; los poros de los pétalos pareados son elongados y las zonas poríferas idénticas que las interporíferas; poros del ambulacro anterior en escalón, separados por un pequeño anillo. Peristoma hacia delante y periprocto terminal.

**Rango Estratigráfico:** Coniaciano – Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

## Dimensiones (en milímetros)

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.a.	A.amb.p.	A.amb.i.	An.p.	Al.p.	An.per.	Al.per.
FCBUANL2246	Arroyo el Tecolote	57.01	59.64	27.36	5.24	4.50	6.21	----	----	----	----
FCBUANL7	Arroyo el Tecolote	54.69	58.54	27.68	5.15	4.76	5.26	4.56	5.04	4.19	2.24
FCBUANL262	Arroyo el Tecolote	53.97	60.23	27.76	5.25	2.89	5.28	----	----	----	----
FCBUANL210	Arroyo el Tecolote	50.51	46.97	22.44	4.54	3.32	----	----	----	----	----
FCBUANL2443	Arroyo el Tecolote	57.96	62.51	31.30	4.80	4.65	5.30	4.70	6.01	----	----
FCBUANL1756	Arroyo el Tecolote	55.43	52.80	26.40	4.78	3.12	4.62	2.63	3.56	3.39	2.64
FCBUANL2447	Arroyo el Tecolote	46.79	51.54	21.23	5.28	4.64	5.16	----	----	----	----
FCBUANL33	Arroyo el Tecolote	42.11	38.53	24.10	5.07	2.59	3.11	2.90	4.12	4.20	2.49

## Género *Epiaster*

**Especie** *E. dartoni* (Cooke, 1955)

### Diagnosis

Testa mediana, corona de contorno cordiforme, forma acorazonada, pentagonal, márgenes anterolaterales redondeados y posterolaterales casi rectos, con una anchura del tercio anterior estrecha en su parte posterior. Sistema apical casi en el centro con cuatro gonioporos genitales espaciados, con las placas genitales posteriores en contacto con la placa madreporica. Ambulacro impar deprimido; poros del petalífero cortos en forma de “v” invertida. Par de ambulacros anteriores moderadamente deprimidos, siendo más largo el par anterior que el posterior. Poros transversalmente elongados. Peristoma pequeño, subpentagonal, ubicado hacia delante.

**Rango Estratigráfico:** Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

### Dimensiones (en milímetros)

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.a.	A.amb.p.	A.amb.i.	An.p.	Al.p.	An.per.	Al.per.
FCBUANL30	Arroyo el Freno	44.05	43.66	24.04	3.27	3.77	2.86	3.69	3.84	3.13	2.78
FCBUANL18	Arroyo el Freno	40.18	38.95	21.13	3.86	2.69	2.89	2.15	3.22	1.94	1.61
FCBUANL1065	Arroyo el Freno	28.62	27.42	14.41	3.17	2.50	2.88	2.39	3.12	----	----

## Familia Toxasteridae

## Género *Heteraster*

**Especie** *H. texanus* (Röemer, 1848)

(ANEXO II, LÁM. VI)

## Diagnosis

Testa de tamaño mediano, forma ovalada y ligeramente cordiforme, más ancha en la parte anteroposterior que en la lateral; cara superior abovedada, con elevación en el sistema apical y cara inferior casi plana, con depresión en el peristoma. Ambulacro impar en surco, con zonas poríferas, de once a doce pares de poros pequeños, formada por cuatro series de poros. Áreas ambulacrales anteriores alargadas, con una pequeña curvatura en la parte posterior; zona porífera angosta con poros pequeños y redondeados; ambulacros posteriores más anchos que los anteriores, cortos y de forma lanceolada, con zonas poríferas desiguales. Periprocto oval arredondeado, cerca del límite superior de la cara posterior y peristoma excéntrico, relativamente pequeño y de forma oval.

**Rango Estratigráfico:** Santoniano Superior – Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

### Dimensiones (en milímetros)

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.a.	A.amb.p.	A.amb.i.	An.p.	Al.p.	An.per.	Al.per.
FCBUANL108	Presa de la Amistad	29.16	26.22	18.66	1.64	2.60	4.39	----	-----	2.82	2.19
FCBUANL150	Presa de la Amistad	28.96	26.80	18.70	1.67	2.76	4.38	3.11	2.74	2.98	2.16
FCBUANL115	Presa de la Amistad	16.48	15.95	10.64	1.31	2.18	2.32	2.32	2.37	2.14	1.56

### Género *Diplodetus*

**Especie** *D. brisenoi* (nov. sp. Silva, 2017)

(ANEXO II, LÁM. VI)

## Diagnosis

Testa de tamaño mediano, ligeramente ovalada, cordiforme, con laterales casi rectos; Ambulacros pares petaloides, con hileras de poros en forma de ranura, ambulacros anteriores largos, y los posteriores son cortos, localizados en un pronunciado surco; Ambulacro impar deprimido con poros ovales, separados por gránulos pequeños. Testa

redondeada en la parte anterior y truncada en la zona posterior, con un periprocto en forma ovalada; peristoma localizado en la cara anterior en forma de semicírculo.

**Rango Estratigráfico:** Campaniano inferior (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.a.	A.amb.p.	A.amb.i.	An.p.	Al.p.	An.per.	Al.per.
FCBUANL-28	Arroyo el Freno	26.77	25.53	17.71	2.79	2.37	2.11	3.42	3.86	2.16	----
FCBUANL-2458	Arroyo el Freno	35.62	32.43	20.23	3.41	3.02	3.10	2.90	3.86	3.13	2.45
FCBUANL-2529	Arroyo el Freno	36.37	32.44	21.95	3.29	2.83	3.13	2.64	3.36	2.57	1.69

**Orden Holoctypoida**

**Familia Holoctypidae**

**Género *Coenholectypus* sp. (Röemer, 1852)**

(ANEXO II, LÁM. V)

**Diagnosis**

Testa de gran tamaño, pentagonal, con su parte dorsal convexa y la ventral aplanada, ligeramente deprimida hacia el área del peristoma. Ambulacros angostos y rectos, estrechos hacia el sistema apical y hacia el peristoma. Posee placas ambulacrales angostas y largas, en dos series, con sutura radial. Las zonas poríferas poseen poros redondeados de tamaño pequeño. Tubérculos pequeños, crenulados, perforados y con una aréola. Áreas interambulacrales amplias (de mayor anchura que las ambulacrales) formadas por dos hileras de placas, con sutura radial marcada. Sistema apical formado por cinco placas perforadas, con presencia de gonoporo; periprocto grande, en forma oval y situado más cerca del ámbito que del peristoma; peristoma de menor tamaño y central.

**Rango Estratigráfico:** Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.a.	A.amb.p.	A.amb.i.	An.p.	Al.p.	An.per.	Al.per.
FCBUANL224	Presa de la Amistad	49.55	49.08	15.68	5.70	5.58	6.02	----	----	----	----
FCBUANL 223	Presa de la Amistad	70.35	70.79	28.35	8.12	9.13	9.61	----	----	6.81	9.46
FCBUANL 222	Presa de la Amistad	64.95	65.07	29.71	9.24	9.83	9.26	6.55	9.38	8.56	9.88
FCBUANL 212	Presa de la Amistad	64.97	36.89	24.28	7.14	8.51	8.92	5.59	9.07	----	----
FCBUANL357	Presa de la Amistad	39.45	38.02	17.85	5.80	6.18	6.46	3.89	7.06	5.81	5.03

**Género** *Holectypus*

**Especie** *H. buitronae* (nov. sp)

(ANEXO II, LÁM. VII)

**Diagnosis**

Testa de tamaño medio, contorno circular a ligeramente pentagonal, con superficie aboral convexa y adoral aplanada, ligeramente hundida en el centro hacia el peristoma. Áreas ambulacrales estrechas y rectas, adelgazadas en su proximidad al sistema apical y al peristoma; zonas poríferas con poros pequeños y redondos. Interambulacros amplios, formados por dos hileras de placas, con sutura radial marcada; presentan pequeños tubérculos mamelonados, crenulados y perforados, con una areola pequeña. Sistema apical pequeño con cinco placas genitales, de las cuales cuatro presentan un gonoporo y la quinta imperforada; la placa madreporica de mayor tamaño y ocupa la parte central del aparato apical. Periprocto grande, de forma oval, situado más cerca del ámbito que del peristoma; peristoma pequeño, central, localizado en una excavación en la parte inferior.

**Rango Estratigráfico:** Campaniano Inferior (Cretácico Superior).

**Dimensiones (en milímetros)**

N.ej.	Loc.	A.a.	A.l.	A.p.	A.amb.	A.int.	Al.p.	An.p.	D.pe.
FCBUANL2449	Arroyo el Freno	25.75	24.24	14.54	4.63	9.52	7.6	4.2	6.88
FCBUANL2462	Arroyo el Freno	27.27	26.06	13.2	4.78	9.42	7.9	4.32	8.3

## 7.5. Implicaciones Filogenéticas

La Clase Echinoidea tiene como ventaja la presencia de un esqueleto calcáreo rígido que permite una conservación de las morfoespecies para su estudio; dentro de este apartado se utilizaron los caracteres morfológicos que son preservados gracias a dicha característica para realizar un análisis de las relaciones evolutivas de aquellos géneros identificados para las cinco localidades de nuestra área de estudio.

Se llevó a cabo la revisión morfológica de un total de 67 fósiles de equinoideos, los cuales fueron seleccionados debido a su buen estado de conservación, de este total 4 ejemplares pertenecen al género *Phymosoma*, un ejemplar de *Tetragramma*, dos ejemplares del género *Loriola*, uno perteneciente a *Pseudodiadema*, 8 ejemplares de *Cidaris*, 3 del género *Salenia*, dos de *Acrosalenia*, 5 del género *Orthopsis*, 4 ejemplares de *Hemiaster*, 12 de *Mecaster*, 8 del género *Micraster*, 3 para cada uno de los géneros *Epiaster*, *Heteraster* y *Diplodetus*, 5 pertenecientes a *Coenholectypus*, 2 del género *Holectypus* y un ejemplar del género *Stereocidaris*, el cual posee las características ancestrales de la Clase Echinoidea.

Para realizar el árbol filogenético de los ya mencionados géneros de la Clase Echinoidea se seleccionaron un total de 50 caracteres morfológicos (Anexo I, Lámina I), de los cuales del 1-6 corresponden a la forma y características generales de la testa; del 7-22 corresponden al sistema apical; del carácter 23-32 a los ambulacros; del 33-38 corresponden a los interambulacros; del 39-43 corresponden a caracteres del peristoma y del 44-50 se relacionan con los tubérculos de los ejemplares.

Con base en la observación de los ejemplares bajo el microscopio estereoscópico, se realizó una matriz de caracteres morfológicos (Anexo I, Lámina II) dentro del programa Mesquite Project versión 3.6, donde se obtuvo el árbol filogenético de los géneros de la Clase Echinoidea del Cretácico con criterio Treelength que calcula la parsimonia y SPR rearranger (fig. 13).

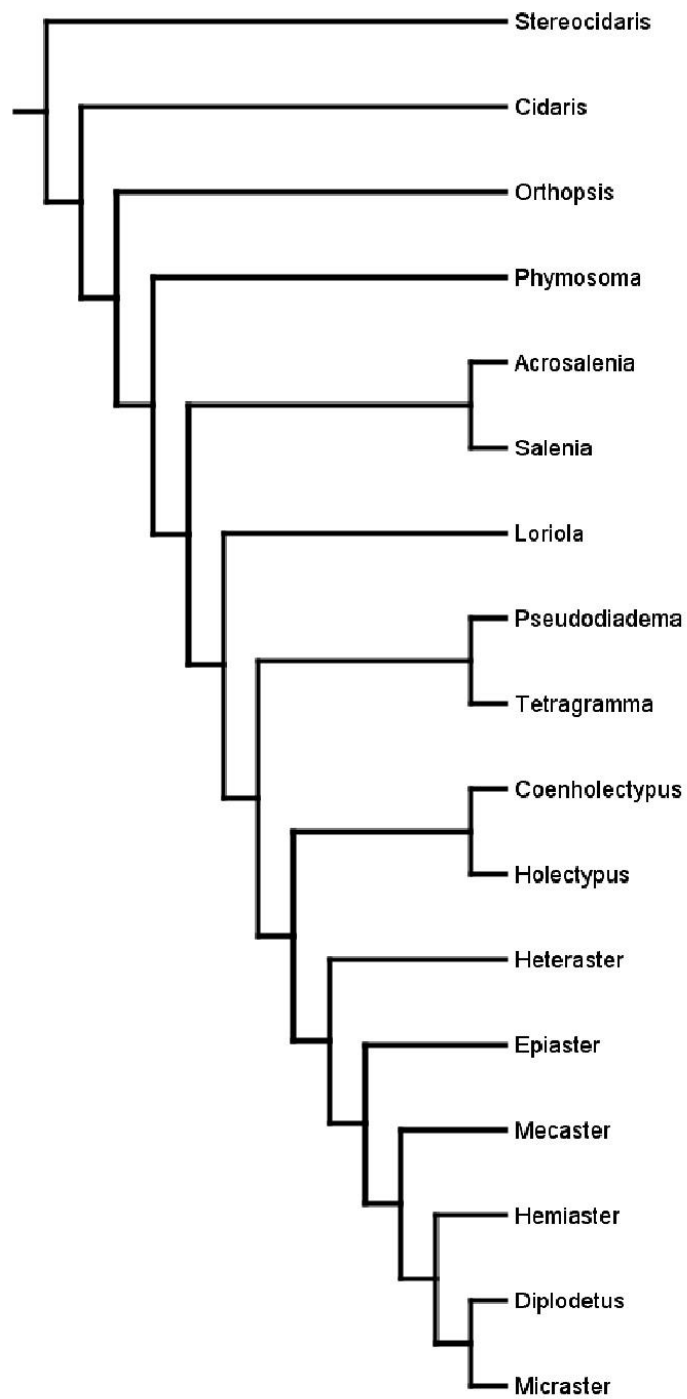


Figura 13. Árbol filogenético de la Clase Echinoidea, obtenido en programa Mesquite Project versión 3.6



El género *Stereocidaris* se considera como grupo externo, y junto con *Cidaris*, que se separa del resto de los géneros, forma un grupo hermano de aquellos equinoideos ya extintos; *Orthopsis* queda separado del resto, pero cercano al género *Phymosoma*, podemos adjudicar esta cercanía evolutiva de estos géneros a que son organismos que cuentan con una testa globular y un sistema apical que rodea al periprocto, siendo estas características ancestrales de la Clase Echinoidea.

Se define como grupo hermano a los géneros *Acrosalenia* y *Salenia*, los cuales pertenecen a la misma familia Saleniidae, lo que explica por qué su cercanía dentro del árbol filogenético, ya que comparten ancestro y presentan caracteres morfológicos muy similares; los géneros *Tetragramma* y *Pseudodiadema* se separan como grupo hermano al compartir un cambio en la testa de los organismos, donde se pierde la forma globosa y se adopta por una concha ligeramente aplanada.

Por otro lado, *Holectypus* y *Coenholectypus* se observan con gran cercanía al ser géneros que pertenecen a la misma familia, dentro de este análisis destacan como determinantes en el proceso evolutivo de la Clase Echinoidea, estos géneros difieren entre sí por la composición de su sistema apical y el número de gonoporos presentes en él; a partir de este grupo se observa un cambio significativo en la testa, que toma una forma ligeramente pentagonal y aplanada en la zona oral y más importante todavía, se presenta el desplazamiento del periprocto, el cual deja de estar rodeado por el sistema apical en los ejemplares. A partir de estos dos géneros es que se observa como sinapomorfía el desplazamiento del periprocto.

El resto de los géneros pertenecen al Orden Spatangoidea, aquellos con caracteres morfológicos que indican una mayor evolución, observando a *Heteraster*, *Epiaster*, *Mecaster*, *Hemiaster*, *Diplodetus* y *Micraster* con características como un periprocto completamente desplazado, una significativa reducción del peristoma y una testa cordiforme con completa simetría bilateral. Se determina al género *Micraster* como aquel más reciente dentro de los ejemplares analizados.

## **7.6. Implicaciones Tafonómicas**

La tafonomía es un subsistema conceptual de la Paleontología, que aspira a explicar cómo ha sido producido y qué modificaciones ha experimentado el registro fósil (Fernández-López, 1986). Siguiendo este concepto, los estudios tafonómicos nos permiten estudiar la transición de los ejemplares desde la biosfera a la litosfera, pudiendo inferir aquellos procesos que se llevaron a cabo desde el estado vivo del organismo hasta su fosilización.

Dentro de este apartado se presenta la interpretación tafonómica de aquellos ejemplares que forman parte de la macrofauna fósil de las formaciones de rocas que se encuentran dentro de las cinco localidades que se estudiaron; se analizaron los mecanismos de alteración tafonómica del registro fósil en base al autor Fernández-López (1999).

### **7.6.1. Tafonomía de la Formación La Peña**

Para la Formación La Peña en el área de estudio se reporta una gran abundancia de ejemplares de ammonoideos que forman parte de la macrofauna fósil del afloramiento, con base en el trabajo en campo y en laboratorio, se definen los siguientes mecanismos de alteración tafonómica para la formación.

#### **Recristalización**

En el área de estudio se encontraron ejemplares de ammonoideos que sufrieron un proceso de mineralización, donde se presenta la sustitución de componentes minerales en el registro fósil, teniendo una recristalización con un cambio textural de por medio.

Debido a la presencia de un material original inestable, como es el caso del aragonito de los ammonoideos, se puede dar una sustitución por un material estable como la calcita; en la figura 14 podemos observar un ejemplar de *Dufrenoyia* sp. en el cual se presenta una recristalización, donde su material original ha sido sustituido.



Fig. 14 Ejemplar de ammonoideo (*Dufrenoyia* sp.) perteneciente a la Formación La Peña, cuya concha ha sido recristalizada por un cristal compacto de calcita espática.

### Disolución y superficies corroídas

Debido al aumento de presión hidrostática y a una baja temperatura los restos esqueletos calcáreos pueden ser parcial o totalmente destruidos; el aragonito es un componente mineral metaestable que puede ser transformado en calcita, se encuentra como constituyente esquelético de ammonoideos y como la calcita, presente en los equinodermos, se disuelven en medios ácidos.

Estos procesos suelen darse en las primeras etapas de la fosildiagénesis como resultado a ambientes situados por debajo de la profundidad de compensación del aragonito, observándose la disolución en las conchas de los ammonoideos principalmente (fig. 15).

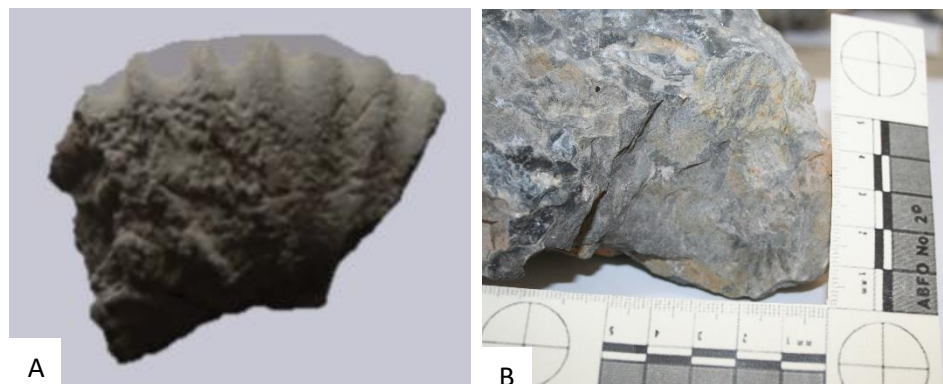


Fig. 15 A) ammonoideo *Colombiceras crassicoatum* y B) *Dufrenoyia* sp. pertenecientes a la Formación La Peña, cuya concha ha sufrido de disolución y corrosión de las superficies.

## Reemplazamiento

El reemplazamiento en los restos fósiles se presenta cuando un componente mineral es sustituido por otro componente que posee diferente composición química. Debido al intercambio molecular que se presenta entre el organismo y la roca que lo envuelve se ve afectada la parte inorgánica, generándose un molde interno sustituido por pirita.

Para la Formación La Peña en el área de estudio se reporta un reemplazamiento en algunos de los ejemplares fósiles del grupo de los ammonoideos y equinoideos, donde se observa que el carbonato cálcico ha sido reemplazado por pirita (fig. 16).



Fig. 16 A) ammonoideo *Kazanskyella arizonica* y B) equinoideo *Macraster* sp. pertenecientes a la Formación La Peña, cuya concha presenta un reemplazamiento como alteración tafonómica.

### 7.6.2. Tafonomía de la Formación Del Río

En los estudios de tafonomía es importante distinguir entre la producción biogénica (ocurre al morir un organismo) y la producción tafogénica (ocurre cuando los restos son generados por otros ya existentes); en la Formación Del Río se observaron evidencias de actividad orgánica, teniendo señales de bioturbación como ejemplo de producción biogénica (fig. 17).



Fig. 17 Evidencia de bioturbación en la Formación Del Río ubicada en la localidad de Presa de la Amistad.

Se reportan las siguientes alteraciones tafonómicas para la Formación Del Río en el área de estudio.

### **Mineralización**

Se presenta una sustitución de los componentes minerales de los restos orgánicos; se reporta para la formación la presencia de óxidos de hierro como la hematita, frecuente en sedimentos de medios oxigenados y cálidos, asociados a algunas arenas y arcillas continentales. Así mismo, se tiene una clara mineralización de los restos y las rocas que forman el afloramiento, pudiendo observar la sustitución de pirita oxidada por el mineral goethita (fig. 18).

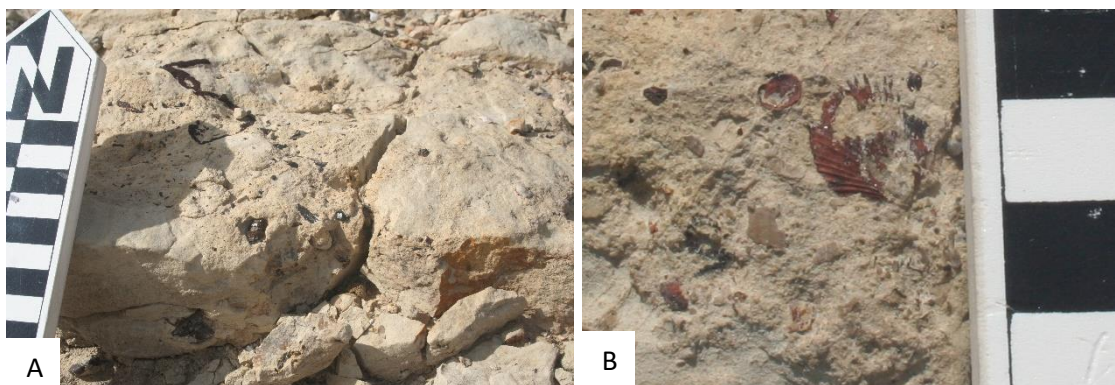


Fig. 18 Fotografías de la Formación Del Río donde se observa la mineralización de los restos fósiles y de las rocas del afloramiento. A) sustitución de pirita por goethita y B) presencia de hematita en bivalvo.

## **Diaclasamiento**

Las diaclasas se presentan como fracturas de las rocas o de los restos fósiles que componen al afloramiento de la Formación Del Río en la cual no existe evidencia de desplazamiento de los bloques; en los organismos fósiles presentes en el área de estudio se observa un diaclasamiento posterior a la fosilización.

La fragmentación es un proceso fosildiagénico donde se observa la ruptura de los elementos conservados, teniendo como principal agente de fracturación la acción de los organismos bioturbadores; dentro de la Formación Del Río fue posible observar ejemplares de equinoideos y ammonoideos que presentan fragmentación, que pudiese estar relacionado con la energía mecánica del medio de sedimentación (figura 19).

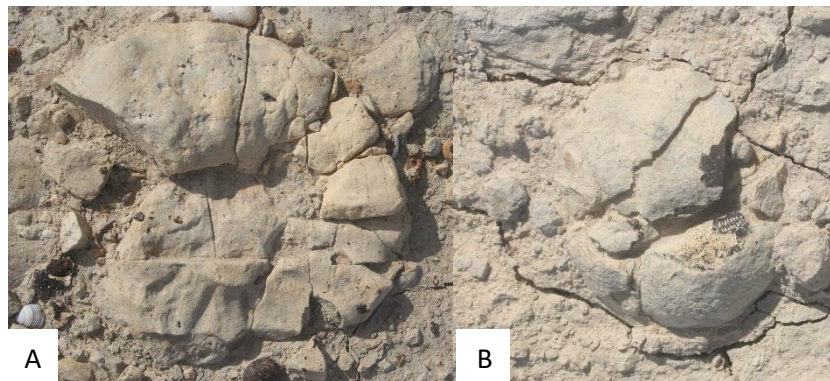


Fig. 19 Fotografías de la macrofauna asociada a la Formación Del Río donde se observan los restos conservados de un A) ammonoideo y un B) equinoideo con fragmentación de los ejemplares fósiles.

## **Impresiones**

Muchos de los ejemplares fósiles conservados llegan a perder sus componentes minerales, quedando en las rocas únicamente los moldes externos huecos o las impresiones, esto puede deberse a diversos factores como la meteorización o la disolución de las conchas de los organismos durante una diagénesis tardía.

Para la formación en el área de estudio se reporta la presencia de abundantes moldes en las rocas del afloramiento, donde la mayoría de estos pertenecen al grupo de los ammonoideos (figura 20).

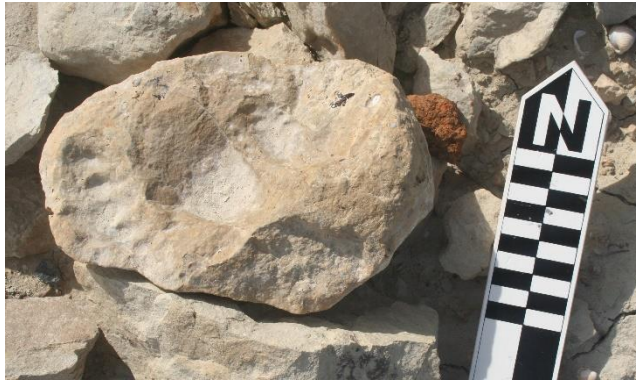


Fig. 20 Molde de ammonoideo perteneciente a la Formación Del Río en la Presa de la Amistad.

### **Reorientación y relleno sedimentario**

Durante el trabajo de campo en el área de estudio de la Formación Del Río se documentó la ordenación de las conchas de bivalvos *in situ* y la presencia de relleno sedimentario en las cavidades de los ejemplares al perderse las partes blandas de los organismos.

Las conchas de los bivalvos observadas presentan una ordenación que pudiese ser relacionada con condiciones turbulentas ya que el lado convexo de los ejemplares se encuentra orientado hacia arriba en la mayoría de los bivalvos presentes en el afloramiento (figura 21).



Fig. 21 Fotografía de la Formación Del Río donde se observa la orientación de bivalvos del género *Exogyra* sp. y el relleno sedimentario de los ejemplares como mecanismo de alteración tafonómica.

### 7.6.3. Tafonomía de la Formación Austin

La Formación Austin fue estudiada en tres localidades del estado de Coahuila, dentro del área de estudio se reportan principalmente ejemplares de ammonoideos, equinoideos y bivalvos que forman parte de la macrofauna fósil del afloramiento. Con base a dichos grupos y su análisis en campo y en laboratorio, es que se determinan los siguientes mecanismos de alteración tafonómica.

#### Disolución diferencial

Dentro de la localidad Arroyo El Tecolote, se presenta la disolución en ammonoideos producida por la inestabilidad del aragonito en ambientes de mares profundos, sufriendo una alteración los restos por la disolución de sus componentes minerales en ambientes marinos (figura 22).



Figura 22 Ammonoideos pertenecientes a la localidad del Arroyo El Tecolote (Fm. Austin) con la concha y los tabiques ligeramente disueltos.

También como resultado de una disolución de las conchas de los organismos, se reporta la presencia de impresiones del ammonoideo *Delawarella delawarensis* y del bivalvo *Inoceramus undulatoplicatus*, donde se observan moldes de sus conchas por una disolución bajo presión, dándose la pérdida de los componentes minerales y teniendo únicamente en las rocas las impresiones por la disolución durante una diagénesis tardía (figura 23).



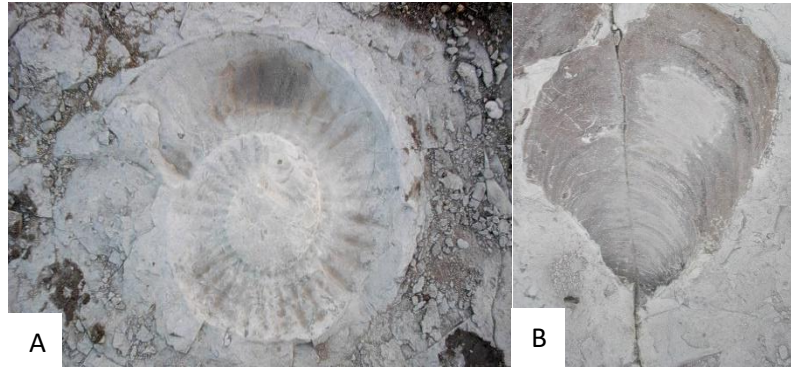


Figura 23 Impresiones del ammonoideo A) *Delawarella delawarensis* y del bivalvo B) *Inoceramus undulatoplicatus* en el Arroyo El Tecolote, donde el sedimento en contacto con el resto orgánico se adaptó.

### Distorsión

La distorsión tafonómica consiste en cualquier cambio que se presenta en los restos ya sea de su tamaño, forma o estructura; dentro de la localidad Arroyo El Freno, se observó esta distorsión como alteración bioestratinómica en la concha de un bivalvo, presentando una fisura que se reporta como posible marca de depredación en un ejemplar de *Spondylus* sp. (figura 24).

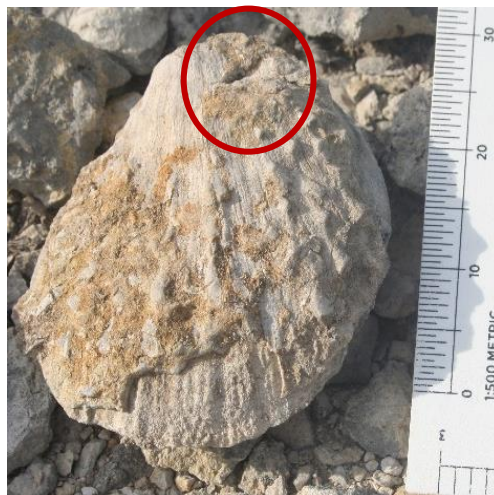


Fig. 24 Bivalvo cerrado *Spondylus* sp. de la localidad Arroyo El Freno (Fm. Austin) con posible marca de depredación como factor tafonómico bioestratinómico.

## Reorientación y relleno sedimentario

Los restos conservados al encontrarse sometidos a la acción de un régimen turbulento, las direcciones de las corrientes tienden a influir en la orientación e inclinación de los ejemplares. La posición de las conchas cónicas con la superficie convexa hacia abajo, generalmente sólo puede presentarse en ambientes con bajo grado de turbulencia; en las localidades del Arroyo El Freno y Arroyo El Murley se observaron abundantes bivalvos, los cuales en su mayoría se encontraban con un ordenamiento donde su superficie convexa estaba dirigida hacia abajo.

Para la Formación Austin en estas localidades, se reporta además de la reorientación y aunada a la misma, la presencia de relleno sedimentario; dicho proceso se lleva a cabo después de la pérdida de las partes blandas de los organismos, donde los espacios dejados por éstos son rellenados por el sedimento de la formación (fig. 25).

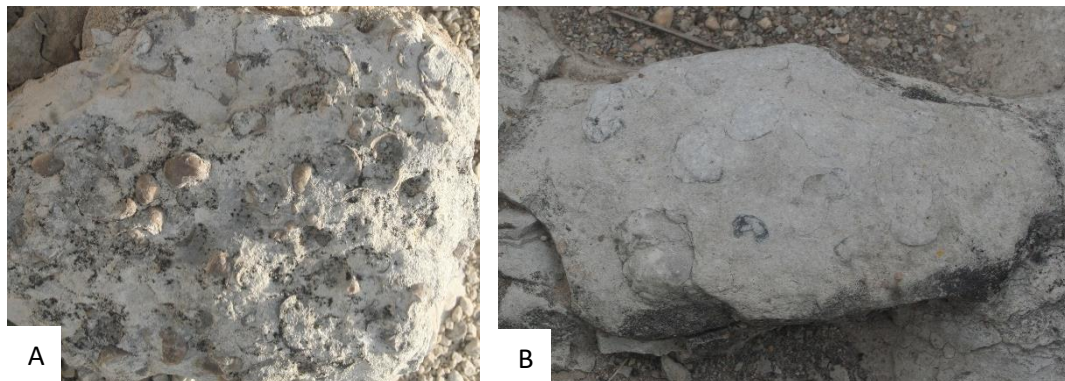


Fig. 25 A) Ejemplares de *Exogyra* sp. del Arroyo El Freno, donde se observa que la mayoría mantiene una orientación con la parte convexa de la concha hacia abajo y presentan relleno sedimentario. B) muestra del Arroyo El Murley con un claro relleno sedimentario de las conchas de bivalvos.

## Mineralización

Para la Formación Austin se observó dentro de la localidad de Arroyo El Murley la presencia de moldes de bivalvos que sufrieron una mineralización, donde los componentes minerales del organismo fueron sustituidos por pirita; así mismo, se reporta la

recristalización como alteración tafonómica donde un ejemplar de equinoideo de la especie *Mecaster batnensis* presenta una pequeña parte de su concha sustituida por calcita espática (fig. 26).



Fig. 26 A) Ejemplar de *Mecaster batnensis* con parte de su concha recristalizada por calcita espática; B) moldes de bivalvos con presencia de pirita como parte de un proceso de mineralización.

## **7.7. Implicaciones Paleoecológicas**

El análisis de los restos conservados que forman parte de los afloramientos, nos conduce al conocimiento de las condiciones ambientales del pasado, así como la forma de vida que llevaban los organismos y cuáles fueron los procesos por los que pasaron para que actualmente sean encontrados como ejemplares fósiles.

Lawrence (1971) define el término Paleoecología como el estudio de las relaciones que tuvieron lugar en el pasado geológico, las relaciones entre los organismos vivos de entonces y su medio ambiente. En este apartado se consideran aquellos resultados obtenidos durante las implicaciones tafonómicas para realizar la observación y reconstrucciones paleoambientales de las localidades seleccionadas para el trabajo.

### **7.7.1. Paleoecología de la Fm. La Peña**

En la sección delgada de las muestras de la Formación La Peña en el área de estudio, se observan texturas que con base en Dunham (1962) se determinan dentro de dos tipos, mudstone y wackestone; estos dos tipos poseen una textura deposicional reconocible, con componentes originales no unidos durante la sedimentación, con barro micrítico y esqueleto matriz soportado, dentro del tipo mudstone se tiene un porcentaje menor al 10% de granos y este porcentaje es mayor de 10% para wackestone.

Se reportan diversas características texturales (Folk, 1962) donde puede resaltarse la presencia de cristales de óxido de hierro, vetas de calcita y fracturas con calcita como relleno; así mismo se tienen formando parte de los aloquímicos de las muestras espículas de esponjas, fragmentos de conchas de moluscos, ciliados, calciesferas, foraminíferos, radiolarios y especies del grupo *Incerta saedis*. Observando también durante el trabajo de campo la presencia de bioturbación dentro de las capas del afloramiento (fig. 27).

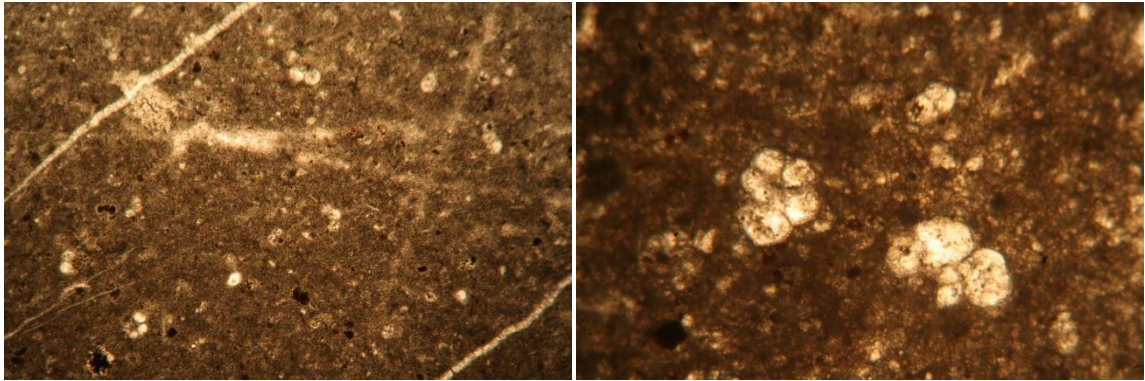


Fig. 27 Fotomicrograffías de muestras procesadas por la técnica de lámina delgada de la Formación La Peña, donde se observa el arreglo textural de las microfacies y la presencia de algunos aloquímicos como foraminíferos.

Con base al arreglo textural descrito y al contenido aloquímico reportado para la formación en el área de estudio se determina que la Formación La Peña representa microfacies estándar que según Flügel (1982) clasifican dentro de los tipos uno y tres, lo que nos permite colocar a la formación en la zona 1 de Wilson (1975), teniendo entonces un ambiente de depósito de tipo cuenca; al relacionar estos resultados con aquellos obtenidos en la tafonomía de los ejemplares fósiles de la formación podemos determinar un paleoambiente de aguas profundas y con sedimentación lenta.

#### **7.7.2. Paleoecología de la Fm. Del Río**

Se determina para el afloramiento, con base a Dunham (1962) microfacies de tipo wackestone a packstone microfósilífero, presentando una textura deposicional reconocible, componentes originales no unidos durante la sedimentación y barro micrítico; el tipo wackestone presenta esqueleto matriz soportado con un porcentaje mayor de 10% de aloquímicos, mientras que packstone posee un esqueleto grano soportado y mayor presencia de aloquímicos en la muestra. Dentro de las características texturales se tiene óxido de hierro y calcita y aloquímicos como foraminíferos, algas calcáreas y placas de equinodermos (fig. 28).

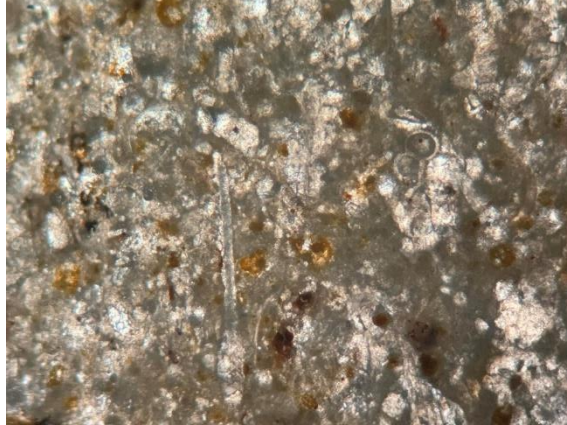


Fig. 28 Fotomicrografías de lámina delgada de la Formación Del Río, donde es posible observar las características texturales como óxido de hierro y calcita y su arreglo textural.

Se determina para la Formación Del Río un ambiente de depósito de zona nerítica, con aguas someras de plataforma proximal de tipo arrecifal y costero, donde se presentan zonas de interfase agua – sedimento y zonas que presentan ambientes de mayor profundidad; debido a la presencia de ejemplares fósiles con fragmentación como alteración tafonómica, se determina un taforegistro de turbulencia alta. Con base a lo anterior descrito se coloca a la formación en la zona 5 de Wilson (1975) como un ambiente de plataforma arrecifal.

### **7.7.3. Paleoecología de la Fm. Austin**

Para la Formación Austin en las muestras laminadas se determinaron texturas de tipo wackestone a packstone microfósilífero (Dunham, 1962), con abundantes bioclastos, espinas y placas de equinodermos, algas calcáreas, foraminíferos y otros aloquímicos. Presentan textura con matriz soportado para wackestone con un porcentaje mayor del 10% de aloquímicos y esqueleto de tipo grano soportado para packstone (fig. 29).

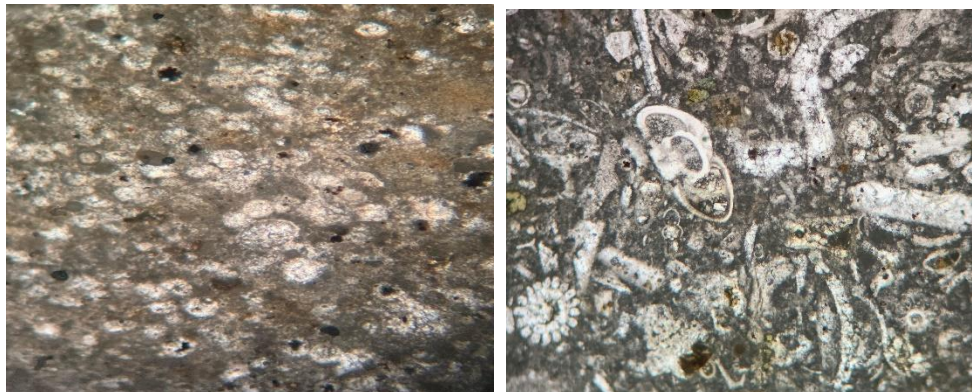


Figura 29: Fotomicrografías de muestras en lámina delgada de la Formación Austin, donde se observa su arreglo textural, la presencia de aloquímicos y su tipo de microfacies.

La presencia de glauconita en las láminas delgadas de las rocas que constituyen al afloramiento, nos indica como inferencia paleoambiental, un ambiente de mar profundo que aunado a la presencia de pirita pudiese ser relacionado con condiciones anóxicas para la formación en el área de estudio. Por lo que, se determina para la formación un ambiente de depósito de plataforma continental, donde se presentan tanto aguas someras como un mar profundo y un gran aporte de arcillas.

Así mismo, para la Formación Austin se determina un fondo marino blando, debido a la presencia de una gran abundancia de ejemplares del género *Exogyra* sp., comúnmente encontrados en sedimentos blandos de grano fino, como arcillas, depositados en ambientes marinos de baja energía.

### **7.8. Índices Ecológicos**

Dentro de este apartado se calcularon los índices de diversidad de los ejemplares fósiles de equinoideos colectados en cada una de las cinco localidades, de esta manera se busca ampliar la comprensión de las características de los medios marinos presentes en épocas pasadas y como ha sido su evolución a lo largo del tiempo geológico.

Para obtener los índices ecológicos se ingresaron al programa PAST versión 1.82b el número de ejemplares de cada una de las especies identificadas para las cinco localidades

estudiadas, así como el número total de equinoideos colectados. Donde tenemos para el Arroyo El Tecolote un total de 46 ejemplares fósiles de equinoideos, pertenecientes a cinco especies diferentes; para el Arroyo El Freno se obtuvieron 69 ejemplares pertenecientes a seis especies y dos géneros; 72 ejemplares para el Arroyo El Murley divididos en dos especies diferentes; para la Presa de La Amistad se obtuvieron 33 ejemplares de equinoideos de tres especies y dos géneros diferentes; y por último para el Cañón de La Huasteca se obtuvieron 12 fósiles de equinoideos pertenecientes a dos especies y un género diferentes.

### **7.8.1. Índice de Riqueza Margalef**

Este índice ecológico transforma el número de especies presentes en la muestra a una proporción a la cual las especies son añadidas por expansión de la muestra. El índice de Margalef supone una relación entre el número de especies y el número total de individuos presentes en la localidad.

$$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Donde S es igual al número de especie y N es igual al número total de individuos.

Aquí los valores menores a 2 permiten considerar una localidad con zonas de baja diversidad y aquellos valores superiores a 5 son indicativo de zonas de alta biodiversidad.

Para las localidades estudiadas en este trabajo tenemos valor de 1.045 para el Arroyo El Tecolote, 1.653 para el Arroyo El Freno, 0.2338 para el Arroyo El Murley, 1.144 para la Presa de La Amistad y 0.8049 para el Cañón de la Huasteca (fig. 30).



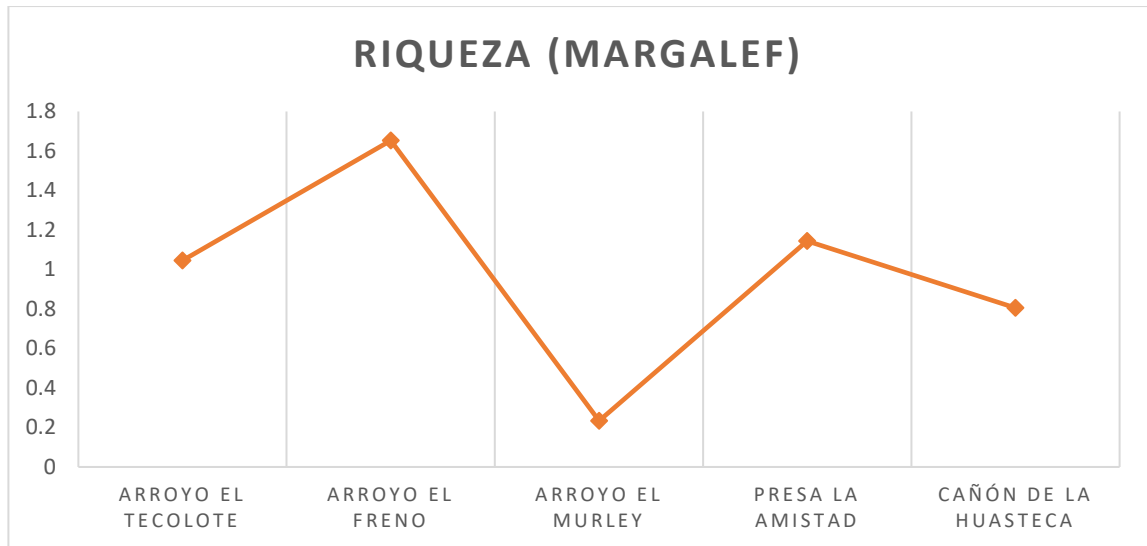


Fig. 30 Variación espacial del índice de riqueza (Margalef) de las cinco localidades estudiadas.

Los valores del índice de Margalef para las localidades poseen una variación de 0.2338 a 1.653, donde observamos que las cinco localidades analizadas para este trabajo presentan valores que suponen zonas con baja diversidad de equinoideos.

### 7.8.2. Índice de Dominancia Simpson

Este índice basado en la dominancia sirve como un parámetro inverso al concepto de uniformidad de una comunidad. El índice de Simpson manifiesta la probabilidad de que dos individuos que son tomados completamente al azar de una muestra pertenezcan a la misma especie.

$$\lambda = \sum p_i^2$$

Donde  $p_i$  es igual a la abundancia proporcional de la especie  $i$ ; el número de individuos de la especie  $i$  dividido entre el número total de la muestra.

Aquí los valores que se encuentren más cercanos al cero, representan una menor dominancia, mientras que aquellos que se aproximan al uno indican una mayor dominancia entre las especies de la muestra.

Se tienen los siguientes valores para las localidades estudiadas: 0.6569 para el Arroyo El Tecolote; 0.2552 para el Arroyo El Freno; 0.9726 para el Arroyo El Murley; 0.323 para la Presa de La Amistad y 0.7083 para el Cañón de La Huasteca (fig. 31).

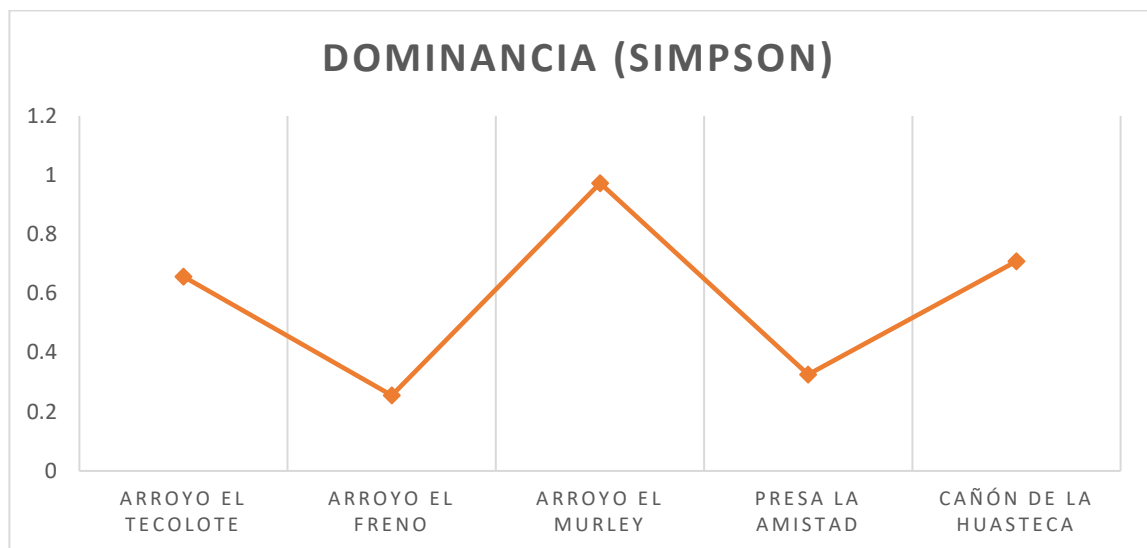


Fig. 31 Variación espacial del índice de dominancia de Simpson para las cinco localidades estudiadas.

Los mayores índices de dominancia lo encontramos para las localidades de Arroyo El Tecolote, Arroyo El Murley y el Cañón de La Huasteca; en estas localidades se observó una dominancia de ciertas especies, donde a pesar de tener una gran abundancia de ejemplares de equinoideos, la mayoría de ellos pertenecen a *Micraster uddeni* para el Arroyo El Tecolote y a *Mecaster batnensis* para el Arroyo El Murley. Mientras que en el caso del Cañón de la Huasteca se obtuvieron pocos ejemplares de equinoideos (12) pertenecientes su mayoría a *Macraster elegans*.

### 7.8.3. Índice de Diversidad Shannon-Wiener

El índice de Shannon-Weiner representa la uniformidad de los valores a través de las especies encontradas en la muestra; mide el grado promedio de incertidumbre que predice a que especie pertenecería un individuo al ser elegido completamente al azar dentro de una colección. Este índice asume que los individuos son elegidos al azar y que todas las especies se encuentran representadas dentro de una muestra.

$$H' = - \sum p_i \ln p_i$$

Donde  $p_i$  es igual a la proporción del número total de individuos por especie de cada muestra.

Aquí los valores que se adquieren son entre cero y cinco, siendo aquellos valores de 0 los que indican comunidades con un solo taxón y los valores que se encuentran arriba de 3 indican zonas interpretadas como diversas.

Los valores obtenidos mediante el índice de Shannon-Wiener para nuestras localidades son de 0.7621 para el Arroyo El Tecolote; 1.66 para el Arroyo El Freno; 0.0731 para el Arroyo El Murley; 1.282 para la Presa de La Amistad y de 0.5661 para el Cañón de La Huasteca (fig. 32).

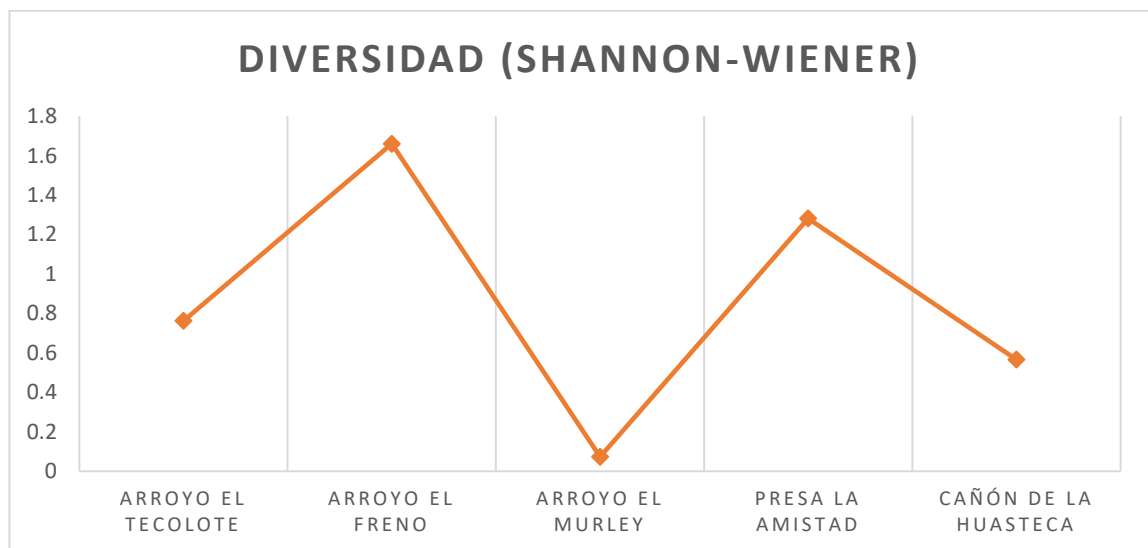


Fig. 32 Variación espacial del índice de diversidad Shannon-Wiener para las localidades analizadas en este trabajo.

Como podemos observar todas las localidades estudiadas en esta tesis presentan valores cercanos al 0 y menores de 3 por lo que se supone que las cinco localidades seleccionadas presentan una baja diversidad, siendo el Arroyo El Freno y la Presa de La Amistad las zonas que presentaron valores más altos. Observando la relación con los índices mencionados anteriormente, podemos suponer que existe una gran abundancia de ejemplares fósiles de equinoideos dentro de las localidades, sin embargo, la mayoría de estos ejemplares pertenecen a pocas especies, presentando así una alta dominancia y por lo tanto una baja diversidad.

## 8. DISCUSIÓN

Los estados de Coahuila y Nuevo León se caracterizan geológicamente por la presencia de rocas sedimentarias, principalmente del Cretácico, por lo cual en este trabajo se seleccionaron cinco localidades del noreste de México para el estudio de ejemplares del Cretácico de la Clase Echinoidea.

Para el estado de Nuevo León se realizó el análisis de la Formación La Peña, la cual se encuentra en el Cañón de La Huasteca, en Santa Catarina; esta formación fue definida por Imlay (1936) y Humphrey (1949) como un cuerpo compuesto por dos miembros, donde el miembro inferior posee rocas de tipo caliza, mientras que el superior está formado por margas interestratificadas con capas de calizas. En nuestros resultados definimos a la Formación La Peña como un afloramiento con rocas de tipo calizas margosas que se encuentran intercaladas con rocas de tipo margas, esta interestratificación se observa a lo largo de todo el afloramiento y no separándola en dos miembros como lo mencionan los autores en su descripción, es importante recalcar que dentro de las primeras capas de la formación los valores decimétricos de las capas de margas son muy bajos, teniendo incluso capas de 3.5 cm únicamente, quizás por esta razón es que se decide separar a la formación en dos miembros, ya que en las últimas capas fue posible observar una capa de 66 cm de espesor.

En la localidad Presa de la Amistad ubicada en el estado de Coahuila, se determina en este trabajo a la Formación Del Río, la cual fue descrita por Humphrey y Díaz (2003) en el mismo sitio de estudio de esta tesis, ellos definen a la formación como un afloramiento compuesto por margas masivas, areniscas calcáreas y lutitas arenosas, las cuales se intercalan con lutitas arcillosas en la porción media de la unidad y que en la parte alta de encuentran calizas arenosas; aquí diferimos un poco con los autores, debido que durante la observación en campo se determina al afloramiento compuesto por una alternancia de rocas duras que corresponden a calizas arcillosas y rocas suaves de tipo chalk, no se observó la presencia de areniscas ni lutitas en el área, sin embargo coincidimos con los autores en las coloraciones de las rocas que componen a la unidad de estudio, teniendo

rocas grisáceas-oliva en algunas de las capas, lo cual concuerda con la mención de rocas verdosas hecha en la literatura.

Dentro de las localidades pertenecientes al estado de Coahuila tenemos los arroyos El Tecolote y El Freno, ubicados en el municipio de Jiménez; Silva *et al.* (2014) reportan una predominancia calcárea en dichas localidades, donde definen como margas a las rocas del afloramiento y determinan en estas localidades la presencia de la Formación Austin, misma formación que fue designada en este trabajo, donde para el Arroyo El Tecolote se determina un afloramiento de 8.58 m formado por capas interestratificadas de calizas arcillosas y margas calcáreas y un afloramiento de 4.44 m para el Arroyo El Freno, que al igual que la localidad anterior consta de calizas arcillosas y margas calcáreas alternantes, por lo que al igual que el autor mencionado, hemos definido a la Formación Austin para estas dos localidades; Así mismo, con base en la literatura se define dicha formación para la localidad de Arroyo El Murley, presentándose como un afloramiento de 3.40 m con rocas interestratificadas de calizas arcillosas y margas calcáreas, por lo que estas tres localidades pertenecientes al estado de Coahuila, son definidas en base a nuestras observaciones en campo y resultados de forma exitosa en comparación con los autores de trabajos previos.

Para la realización de este estudio se identificaron los equinoideos colectados en cada una de las cinco localidades, así como aquellos pertenecientes al Laboratorio de Paleobiología de la Universidad Autónoma de Nuevo León, teniendo como resultado un total de 5 géneros y 13 especies para los organismos analizados, todos estos pertenecientes al Cretácico de México, por lo que podemos comparar nuestros resultados obtenidos con aquellos reportados por Martínez *et al.* (2017), observando la coincidencia de algunas de las especies correspondientes con el Cretácico como *Epiaster dartoni*, *Heteraster texanus* y *Hemiaster calvini*, sin embargo solo coincidimos a nivel de género con *Micraster* sp. ya que nosotros reportamos a la especie *Micraster uddeni*, mientras que en su trabajo determinan a *Micraster sonorensis*, claro esto debe ser por las áreas en las cuales fueron obtenidos los ejemplares identificados posteriormente. Cabe resaltar que dentro del trabajo mencionado se enfocan en aquellos organismos pertenecientes al Orden Spatangoida por lo que es también por esta razón que muchas de nuestras especies no son

reportadas aquí ya que en esta tesis se identificaron todos los organismos sin diferenciación del orden al que pertenecen.

Así mismo, dentro de la taxonomía de la Clase Echinoidea del Cretácico podemos comparar nuestros resultados con aquellos reportados por Silva *et al.* (2014) donde realizan un estudio para dos de las localidades del estado de Coahuila analizadas en esta tesis y reportan las mismas especies de equinoideos que se reportan aquí teniendo a *Cidaris texanus*, *Salenia mexicana*, *Heteraster texanus*, *Cidaris splendens*, *Orthopsis casanovai*, *Micraster uddeni* y *Mecaster batnensis*, a diferencia de dicho estudio donde presentan a nivel de género a *Diplodetus* y *Holectypus*, para el género *Holectypus*, en este trabajo se describe una nueva especie, designándole el nombre de *Holectypus buitronae* en honor a la Dra. Buitrón; así mismo, dentro de este estudio se define como especie a *Diplodetus brisenoi* lo cual coincide con Silva *et al.* (2017) donde la reportan como una nueva especie del Campaniano Inferior para la Formación Austin.

Los equinoideos han pasado por una serie de estadios de evolución, por lo que como objetivo de esta tesis se planteó el analizar las relaciones filogenéticas de la Clase Echinoidea; El autor Villalba (1991) menciona que la evolución de los equinoideos se encuentra ligada al medio en el que habitan, resaltando características que fueron observadas durante el desarrollo de nuestro trabajo como lo es la tendencia hacia una simetría bilateral, la cual se observa en aquellos ejemplares irregulares, la atenuación y uniformidad de la ornamentación que se observa como un cambio significativo entre equinoideos regulares a irregulares, determinando al igual que el mencionado autor que los organismos denominados como equinoideos irregulares son más recientes.

Con base en lo mencionado por el autor Hennig (1965) sobre que los géneros de una determinada familia, en un caso ideal, deberían encontrarse dentro de un grupo monofilético, podemos mencionar que dentro del árbol filogenético obtenido se observa este caso ideal con los géneros *Acrosalenia* y *Salenia* pertenecientes a la familia Saleniidae y *Coenholectypus* y *Holectypus*, donde ambos al pertenecer a la Familia Holectypidae se presentan con gran cercanía dentro del árbol, sin embargo los géneros *Micraster*, *Epiaster*, *Heteraster* y *Diplodetus* no cumplen con este arreglo.

En comparación con el árbol filogenético realizado por Littlewood y Smith (1995) donde combinan técnicas moleculares con caracteres morfológicos para su obtención, cabe resaltar que como outgroup ellos designan al género *Archaeocidaris*, el cual gracias a la literatura es definido con los caracteres ancestrales, sin embargo, al no ser hallado dentro de nuestras localidades, se designa a *Stereocidaris* como género ancestral para este trabajo, en la comparación de árboles filogenéticos observamos al género *Cidaris* en una posición similar, relacionado con aquellos géneros más ancestrales; los géneros *Acrosalenia* y *Salenia* se condicionan como grupos hermanos, siendo monofiléticos al pertenecer ambos a la misma familia; y por último el género *Phymosoma*, el cuál difiere con nuestro árbol filogenético al ser posicionado como género con mayor evolución que *Acrosalenia* y *Salenia*, mientras que en este trabajo se presenta cercano a dichos géneros pero con caracteres más ancestrales que estos. Debido a que dichos autores utilizan más del triple de caracteres morfológicos ya que trabajan con equinoideos recientes y muy pocos ejemplares fósiles y aunado a esto el número de géneros que analizan es considerablemente mayor al nuestro; se infiere que las diferencias encontradas se deben justamente a que en muchos ejemplares fósiles no es posible observar todos los caracteres morfológicos. Sin embargo, cabe recalcar la importancia de incluir ejemplares fósiles en estos análisis ya que se trabaja con un grupo diverso y con amplios espacios evolutivos. Así mismo, con base en el trabajo de Byrum y Lieberman (2021) donde revisan la filogenia del Orden Spatangoida, hemos obtenido resultados similares al resaltar como ellos la cercana relación entre *Diplodetus* y *Micraster*.

Dentro de la tafonomía para las formaciones en las cinco localidades aquí estudiadas, podemos observar que Fernández-López (1997) en su trabajo sobre factores determinantes de la conservación de los ammonites, hace mención de algunas características presentes en dicho grupo al sufrir alteraciones tafonómicas en ambientes someros y profundos de plataforma, estas alteraciones mencionadas por el autor se han podido observar dentro de nuestro estudio, como lo es la presencia de restos esqueléticos calcáreos fragmentados en zonas de turbulencia alta reportada en algunas de nuestras localidades.

Bajo *et al.* (2008) realizaron un análisis tafonómico de asociaciones de equinoideos en España, donde deducen un enterramiento rápido después de la muerte de los organismos



con base en las alteraciones observadas, así como ellos en esta tesis fue posible determinar el rápido enterramiento de algunos de los organismos, esto en aquellas localidades para las cuales se determina como paleoambiente un fondo marino blando.

Respecto a la paleoecología definida para los ejemplares de la Clase Echinoidea del Cretácico, se observa que las características generales y forma de la testa de los organismos se deriva con base en sus cambios ecológicos, determinando al igual que el autor Cooke (1957) que aquellos equinoideos que pertenecen a los regulares, los cuales poseen una concha globosa y el periprocto rodeado por el sistema apical en la zona aboral y el peristoma en la zona oral, por lo general son encontrados en zonas de aguas profundas, como fue el caso de la localidad del Cañón de la Huasteca, en la cual se determina un ambiente de depósito de tipo cuenca y los ejemplares colectados de dicha clase para la localidad fueron en su mayoría equinoideos de tipo regulares.

Dentro de su tesis doctoral Villalba (1991) realiza una revisión de equinoideos del Cretácico, donde indica dentro de la paleoecología que estos organismos son animales bentónicos que habitan en todos los mares y que son excepcionalmente abundantes en la zona nerítica; de nuestras cinco localidades estudiadas podemos coincidir con dicho autor, dado que la única de las localidades para la cual se determina un ambiente de depósito fuera de la zona nerítica, fue aquella que presentó el menor número de ejemplares de la Clase Echinoidea.

Por otro lado, Silva *et al.* (2017) discute la paleoecología específicamente del género *Diplodetus* sp. y menciona que este género perteneciente al Cretácico Superior, se caracteriza por ser un organismo detritívoro que posee un comportamiento endobentónico, así mismo indica que este género fue depositado en afloramientos de Coahuila bajo condiciones de plataforma continental interna-media; Dentro de nuestro estudio se identifica al género mencionado como *Diplodetus brisenoi*, presente dentro de la Formación Austin y se coincide con el autor sobre el comportamiento inferido para el género, sin embargo, en este estudio se determinó un ambiente de depósito de plataforma continental externa, donde se presentan mayores profundidades en un suelo marino blando y no interna-media como se menciona anteriormente.

## 9. CONCLUSIONES

- Se determina a la Formación La Peña en la localidad del Cañón de la Huasteca, compuesta por una alternancia de rocas de tipo calizas margosas y margas, con una edad dentro del límite Aptiano Inferior-Aptiano Superior. Con un total de 12 ejemplares de equinoideos fósiles, con dominancia de *Macraster elegans* y un ambiente de depósito de tipo cuenca, con aguas profundas y sedimentación lenta, donde es probable la presencia de un evento anóxico.
- En la localidad Presa de la Amistad se encuentra la Formación Del Río, compuesta por rocas de tipo calizas arcillosas interestratificadas con rocas suaves de tipo chalk con edad tentativa Cenomaniano Inferior. Con un total de 35 ejemplares de equinoideos fósiles, teniendo la predominancia de las especies *Hemiasster calvini* y *Coenholectypus planatus*.
- Se determina a la Formación Austin para las localidades de Arroyo El Freno, Arroyo El Tecolote y Arroyo El Murley, donde consiste de un afloramiento con capas alternantes de calizas arcillosas y margas calcáreas correspondientes a una edad de Coniaciano Superior-Campaniano Inferior; se obtuvieron un total de 80 ejemplares de equinoideos fósiles para El Freno, 87 en El Murley y 59 en El Tecolote, siendo las especies más frecuentes *Micraster uddeni*, *Diplodetus brisenoi* y *Mecaster batnensis*. Como ambiente de depósito se determina de zona nerítica, en el límite de la plataforma continental externa con ambiente tanto de aguas someras como profundas y con la presencia de un fondo marino blando.
- Dentro de la filogenia, se definen a los géneros *Stereocidaris* y *Cidaris* como aquellos con el mayor número de caracteres ancestrales; se determinan como grupos con mayor cercanía a *Acrosalenia-Salenia*, *Pseudodiadema-Tetragramma* y *Coenholectypus-Holectypus* y se define al género *Micraster* como el género más reciente.

- El índice de riqueza de Margalef presenta valores que suponen zonas con baja diversidad de equinoideos para las localidades estudiadas; el índice de dominancia de Simpson indica mayores índices de dominancia para las localidades de Arroyo El Tecolote, Arroyo El Murley y para el Cañón de La Huasteca y el índice de diversidad de Shannon-Weiner presenta que las cinco localidades presentan una baja diversidad de organismos de la Clase Echinoidea.

## 10. PERSPECTIVAS

A partir de los resultados y discusiones presentadas en esta tesis doctoral, las perspectivas de trabajos futuros se orientan sobre todo a dos posibles direcciones.

Sería conveniente tomar los análisis filogenéticos realizados en este trabajo para llevar a cabo un estudio más completo sobre la Clase Echinoidea en nuestro país, bien si existen muchos trabajos sobre su taxonomía, son realmente pocos los que optan por un punto de vista evolutivo, por lo que sería interesante el desarrollo de una técnica de biología molecular para el análisis de equinoideos fósiles, de esta manera podría obtenerse un árbol filogenético con base en caracteres morfológicos y moleculares de ejemplares del Cretácico de la Clase Echinoidea. Existe literatura sobre técnicas en foraminíferos, sin embargo, esta clase es poco estudiada como ya se mencionó.

Otro punto interesante para continuar con este trabajo sería desde el punto de vista geoquímico, pudiéndose realizar análisis de TIC TOC y de fluorescencia de Rayos X para determinar el porcentaje de carbono orgánico e inorgánico total de las localidades y así determinar de una forma más precisa el tipo de rocas que las forma, mientras que con el método de fluorescencia de Rayos X sería posible determinar cada uno de los elementos químicos que constituyen a las formaciones, siendo estos dos análisis un complemento esencial para las implicaciones tafonómicas y paleoecológicas relacionadas con la Clase Echinoidea del Cretácico.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, R., Kaki, R. and Woodouse, G.W. 1981. Geochemical correlation of Windalia oil and stracts of Winning Group (Cretaceous) potential source rocks, Barrow sub-basin, Western Australia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 65(2): 235-250.
- Arthur, M., Jenkyns, H., Brumsack, H. and Sclanger, S. 1990. Stratigraphy, geochemistry and paleoceanography of organic carbon-rich cretaceous sequences (Pages:75-119). *In* Cretaceous Resources, Events and Rhythms.
- Bajo, I., Rico, A., Cárdenas, J., Maestre, V. y Borghi, E. 2008. Asociación de equinoideos en las calcarenitas messinienses de Alcalá de Guadaíra (Sevilla, SO España). *Sociedad Geológica de España, Geogaceta* 45:55-58.
- Bajo, I., Toscano, A. y Abad, M. 2013. Equinodermos del Pleistoceno Inferior de la Formación Arenad de Huelva (SO de la Cuenca del Guadalquivir, España). *V RCANS*. Pp. 33-38.
- Brett, C.E. and Seilacher, A. 1991. Fossil Lagerstätten: a taphonomic consequence of event sedimentation (Pages 283-297). *In*: Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher A., eds. *Cycles and Events in Stratigraphy*: Springer-Verlag, Berlin.
- Brumsack, H.J. 1980. Geochemistry of Cretaceous Black Shales from the Atlantic Ocean (DSDP Legs 11, 14, 36 and 41). *Chemical Geology* 31: 1-25.
- Brumsack, H.J. 1986. The inorganic geochemistry of Cretaceous black shales (DSDP Leg 41) in comparison to modern upwelling sediments from the Gulf of California. From Summerhayes, C.P. and Schackleton, N.J. *North Atlantic Palaeoceanography*, Geological Society Special Publication 21:447-462.
- Buitrón, B.E. (1968). Catálogo de Equinoideos fósiles de México. *Paleontología Mexicana*, 26, 1-50.
- Buitrón, B.E. (1970). Equinoideos del Cretácico Inferior de la Región de San Juan Raya-Zapotitlán, estado de Puebla. *Paleontología Mexicana*, 30, 1-46.

- Byrum S. and Lieberman S. 2021. Phylogeny and biogeography of some Cretaceous spatangoid echinoids with special emphasis on taxa from the Western Interior Seaway. *Journal of Paleontology* 95(3), pp. 613-623.
- Calvert, S. and Pedersen, T. 1993. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record. *Marine Geology*, 113: 67-88.
- Compton R. 1983. *Geología de Campo*. Primera Edición. Español. Editorial Pax-México, México. Pp. 27-63.
- Cooke, C.W. 1953. American Upper Cretaceous Echinoidea. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 254-A. Pp. 1-44.
- Cooke, C.W. 1957. Echinoids. (Pages 1191-1192) *In: Treatise on Marine Ecology and Paleocology*, Hedgpeth, J.W. Geological Society of America. Mem. 67, Vol. 1.
- Cuéllar Valdés, P.M. 1981. *Geografía del estado de Coahuila*. Saltillo, Coahuila, Biblioteca de la Universidad Autónoma de Coahuila, Vol. 7.
- Donovan, S.K. and Gordon, C.M. 1993. Echinoid Taphonomy and the Fossil Record: Supporting Evidence from the Plio-Pleistocene of the Caribbean. *PALAIOS*, 8(3): 304-306.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rock according to depositional texture. *Society of Economic Paleontologist and Mineralogist*. Houston. Texas. Pp. 108-121.
- Durham, J.W., Fell, H.B., Fischer, A.G., Kier, P.M., Melville, R.V., Pawson, D.L. and Wagner, C.D. 1967. Echinoids. *In: Treatise on Invertebrate Paleontology*, Moore, R.C. Geological Society of America, 2:258-300.
- Fernández López, S. 1984. Nuevas Perspectivas de la Tafonomía Evolutiva: Tafosistemas y asociaciones conservadas. *Estudios geológicos*, 40:215-224.
- Fernández López, S. 1986. Sucesiones paleobiológicas y sucesiones registráticas (nuevos conceptos paleontológicos). *Revista Española de Paleontología*, 1:29-45.
- Fernández López, S. 1988. La Tafonomía: un subsistema conceptual de la Paleontología. *Coloquios de Paleontología*, 41 (1986-1987). Pp. 9-34.

- Fernández López, S. 1991. Sistemas Tafonómicos: Función y Evolución. *Revista Española de Paleontología*. Pp. 21-34.
- Fernández López, S. 1997. Fósiles de intervalos sin registro estratigráfico: una paradoja geológica. En: *Registros Fósiles e Historias de la Tierra*. Ed. E. Aguirre, J. Morales y D. Soria. Editorial Complutense, Madrid. Pp. 79-105.
- Flügel, E., 1982, *Microfacies Analysis of Limestones*: Berlin, Springer Verlag, Pp. 633.
- Folk, R. L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. *American Association of Petroleum Geologist Memoir*. 1. Pp. 62-84.
- Hennig, W. 1965. Phylogenetic Systematics. *Annu. Rev. Entomol*, 10:97-116.
- Hollocher, K. 2011. *Making Petrographic Thin Sections*. Geology Department. Union College, Schenectady, N.Y. 12308, USA.
- Humphrey, W.E. 1949. Geology of the Sierra de los Muertos area, Mexico (with description of Aptian cephalopods from La Peña Formation): *Geological Society of America Bulletin*, 60. Pp. 89-176.
- Humphrey, W.E. and Díaz, T. 2003. Jurassic and Lower Cretaceous Stratigraphic and Tectonics of Northeast of Mexico: Bureau of Economic Geology, Report of Investigations No. 267, Pp. 152.
- Imlay, R.W. 1936. Evolution of the Coahuila Peninsula, México, Part IV. Geology of the western part of the Sierra de Parras. *Bulletin Geological Society of America*, 47:1091-1152.
- Imlay, R.W., 1937, Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico: *Geological Society of America Bulletin* 48(5):567-630.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1983. *Síntesis Geográfica del Estado de Coahuila*. México, D. F. Pp. 15-19.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1986. *Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León*. México, D. F. Pp. 14-95.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. Geología de la Región Norte y Noreste de México, D. F. Pp. 33-50.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1999. Cuaderno Estadístico Municipal: Acuña, estado de Coahuila. México, D. F. Pp. 5-10.
- Kier, P.M. and Lawson M.H. 1978. Index of Living and Fossil Echinoids 1924-1970. *Smithsonian Contributions to Paleobiology*, (34):1-47.
- Kroh, A. and Mooi, R. 2021. World Echinoidea Database. Accessed at <http://www.marinespecies.org/echinoidea> on 2021-07-26, doi: 10.14284/355.
- Laguarda Figueras, A., Gutiérrez Castro, A.I., Solís Marín, F.A., Durán González, A. y Torres-Vega, J. 2005. Equinoideos (Echinodermata: Echinoidea) del Golfo de México. *Review Biological Tropical* 53: 69-108.
- Littlewood D.J.T. and Smith, A.B. 1995. A combined morphological and molecular phylogeny for echinoids. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Series B*347. : 213-234.
- Martínez, M.I. 2014. Diversidad de Dendrochirotida en el Mar Argentino (Echinodermata: Holothuroidea); aspectos taxonómicos, filogenéticos, ecológicos y biogeográficos. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires.
- Martínez-Contreras, J.F. 2015. Estudio Estratigráfico-Geoquímico en petróleo y gas de lutitas de la Formación Eagle Ford, noroeste de Villa Hidalgo, Estado de Coahuila, Noreste de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Martínez Melo A., Buitrón Sánchez B.E., Solís Marín F.A., Laguarda Figueras A. 2017. Equinoideos irregulares (Orden Spatangoida) del Cretácico de México. *Revistas Académicas, Universidad de Costa Rica* S113-S136.
- Meléndez, B. 1998. Tratado de Paleontología, Tomo I. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. Pp. 412-420.
- Melville, R.V. and Durham, J.W. 1967. Skeletal Morphology. In: *Treatise on Invertebrate Paleontology*, Moore, R.C. Geological Society of America 2:258-300.



- Moreno, C.E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T–Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza. Pp. 84.
- Munsell A. H. 2009. Geological Rock – Color chart. Geological Society of America (GSA). Munsell Color.
- Nebelsick, J. 1999. Taphonomic comparison between Recent and Fossil sand dollars. Institute and Museum of Geology and Palaeontology. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 149: 349-358.
- Nieto-López, I. and García-Barrera, P. 2006. Cretaceous Echinoids of Mexico. In: Vega, F. et al. Studies on Mexican Paleontology. Springer. Pp. 101-114.
- Nyst, H. and Galeotti, H. 1840. Description de quelques fossiles du calcaire jurassique de Tehuacán, Mexique. Bulletin Academy Science Brux. Pp. 28.
- Pawson, D.L. 2007. Phylum Echinodermata. In: Linnaeus Tercentenary: Progress in Invertebrate Taxonomy. Zhang, Z.Q. and Shear, W.A. Zootaxa, 1668. Pp. 1-766.
- Pérez Gutiérrez, R., Solari, L.A., Gómez Truena, A. y Valencia V.A. 2009. El terreno Cuicateco: ¿Cuenca oceánica con influencia de subducción del Cretácico Superior en el sur de México?, Nuevos datos estructurales, geoquímicos y geocronológicos. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 26, No. 1. Pp. 222-242.
- Serafy, D.K. 1979. Echinoids (Echinodermata: Echinoidea). Florida Department of Natural Resources, Marine Research Laboratory. V(III):5-76
- Silva Martínez, L.E., Blanco Piñón, A., de León González, J.A. 2014. Equinoideos del Cretácico Tardío del Norte de Coahuila, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 66(2):377-395.
- Silva Martínez, L.E., Blanco Piñón, A., de León González, J.A. y Rodríguez Vela, H. 2017. New Echinoid (Spatangoida: Toxasterinidae) from the Campanian of Coahuila, Northeastern Mexico. Bol. Society Geological of Mexico, 69(2):371-384
- Smith, C.I. 1970. Lower Cretaceous Stratigraphy Northern Coahuila, Mexico. Report of Investigations, No. 65. Bureau of Economic Geology. The University of Texas Austin, Texas. Pp. 14-46.

- Smith, A.B. 1984. Echinoid Palaeobiology. London, George Allen & Unwin.
- Smith, A.B. 1994. Systematics and the fossil record: documenting evolutionary patterns. Oxford: Blackwell Scientific.
- Smith, A.B., Paterson, G.L.J. and Lafay, B. 1995. Ophiuroid phylogeny and higher taxonomy: morphological, molecular and palaeontological perspectives. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 114:213-243.
- Smith, A.B. 2004. Palaeontology: Echinoderm roots. *Nature*, 430:411-412.
- Solís Marín, F.A., Laguarda Figueras, A., Honey Escandón, M., López Luján, L., Zuñiga Arellano, B., Caballero Ochoa, A.A., Conejeros Vargas, C.A., Martín Cao Romero, C., Durán González, A. y Diupotex Chong, M.E. 2018. Equinodermos (Echinodermata) de México: estado actual del conocimiento de su biodiversidad, biogeografía, estudios bioquímicos y nuevos descubrimientos arqueozoológicos. *Biología y Sociedad*, Facultad de Ciencias Biológicas, UANL, México. Pp. 8-9.
- Stockley, B., Smith, A.B., Littlewood, T., Lessios, H.A. and Mackenzie, J.A. 2005. Phylogenetic relationships of Spatangoid sea urchins (Echinoidea) taxon sampling density and congruence between morphological and molecular estimates. *The Norwegian Academy of Science and Letters. Zoological Scripta*, 34(5):447-468.
- Villalba Curras, M.P. 1991. Revisión de los Equinidos del Cretácico Inferior y Medio Español. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas. Pp. 9-20.
- Villier, L., Néraudeau, D., Clavel, B., Neumann, C. and David, B. 2004. Phylogeny of early Cretaceous Spatangoids (Echinodermata: Echinoidea) and Taxonomic Implications. *Palaeontology*, 47(2):265-292.
- Wilson, J.L. 1975. Carbonate Facies in Geologic History. Department of Geological Sciences, University of Michigan 48109, U.S.A. Springer-Verlag, New York, Heidelberg Berlín.

## **ANEXO I: Implicaciones Filogenéticas**

# LÁMINA I

## Caracteres Morfológicos

### (a) Forma y características generales de la testa

1. Simetría pentarradial y contorno circular (0); Simetría pentarradial, pero bilateralmente simétrico a lo largo del eje III-5, contorno pentagonal (1); Simetría bilateral (2).
2. Equinoideo regular (0); Irregular cliperasteroideo (1) Irregular espatangoideo (2).
3. Testa básicamente globular u ovoide (0); Testa con perfil aplanado y discoidal (1).
4. Testa no cordiforme en su contorno (0); Cordiforme en el contorno (1).
5. Placas de la corona firmemente suturadas formando una concha sólida (0); Placas imbricadas, no suturadas (1).
6. Placas son un sistema de perforaciones de enclavamiento (0); Placas de la corona lisas (1).

### (b) Sistema apical

7. Placa suranal: ausente (0); Presente (1).
8. Con cinco poros genitales (0); Con cuatro poros genitales (1).
9. Sistema apical con placa genital V (0); Placa genital V ausente (1).
10. Sistema apical sin placa del madreporito extendiéndose posteriormente (0); Con placa del madreporito extendiéndose posteriormente (etmolítico) (1).
11. Sistema apical a nivel de la corona (0); A nivel del ápice (1); En una cavidad (2).
12. Placas del sistema apical firmemente suturadas a las placas de la corona (0); Placas ligeramente apegadas (1).
13. Tipo de sistema apical: No etmofracto (0); Etmofracto (1); Etmofracto biseriado (2).
14. Tipo de sistema apical: No etmolítico (0); Etmolítico (1); Semietmolítico (2).
15. Tipo de sistema apical: Pentabasal (0); Tetrabasal (1).
16. Placas genitales pentagonales sin introducirse en los interambulacros (0); Penetrando a lo largo del interrradio, dando un contorno pentagonal (1).
17. Arreglo de placas: monocíclico (0); Dicíclico (1); Hemicíclico (2); Tipo Orden Salenoida (3).

18. Periprocto rodeado por el sistema apical (0); Periprocto parcial o completamente fuera de las placas del sistema apical (1).
19. Periprocto en contacto con las placas del sistema apical (0); Completamente separado de las placas del sistema apical (1).
20. Periprocto situado en la superficie aboral (0); No situado en la superficie aboral (1).
21. Periprocto no asociado con las placas interambulacrales (0); Fuertemente ligado a las placas interambulacrales (1).
22. Abertura del periprocto: circular o en forma de elongado (0); Longitudinal (1); En forma de cerradura (2).

**(c) Ambulacros**

23. Ambulacros simples (0); Ambulacros compuestos (1).
24. Área ambulacral estrecha y recta (0); Ambulacros extendidos al margen (1).
25. Ambulacros rectos (0); Ambulacros sinuosos (1).
26. Sin ambulacros petaloides (0); Ambulacros petaloides inclinándose al ápice y más o menos cerrados (1); Amplios y abiertos (2).
27. Ambulacros I, II, IV, V nivelados con la corona (0); Hundidos formando surcos (1).
28. Ambulacro III nivelado o ligeramente hundido (0); En cuenca, muy hundido (1).
29. Ambulacros no petaloides (0); Ambulacros subpetaloides (1); Ambulacros petaloides bien diferenciados (2).
30. Poros confinados en las placas ambulacrales (0); Extendiéndose a las placas interambulacrales adyacentes (1).
31. Pares de poros sin modificaciones (0); Modificados en pétalos (1).
32. Pares de poros biseriales (0); Uniseriales (1).

**(d) Interambulacros**

33. Tubérculos primarios sin una areola definida (0); Con aerola definida sin escrobiculo (1); Con areola definida y con escrobiculo (2); Con areola y tubérculos escrobiculares en las esquinas de las placas (3).
34. Sólo un gran tubérculo primario en cada placa interambulacral (0); Dos o tres grandes tubérculos en cada placa, ligeramente más grande el primario (1); De

cuatro a seis tubérculos del mismo tamaño por placa (2); Gran número de tubérculos pequeños con un arreglo irregular (3).

35. Zonas sin tubérculos ausentes (0); Zonas sin tubérculos presentes (1); Presentes en la superficie oral a lo largo del interambulacro 5 (2).

36. Más de dos columnas de placas interambulacrales en cada zona (0); Solamente dos columnas en cada zona interambulacral (1).

37. Las cinco zonas interambulacrales similares (0); Interambulacro posterior diferenciado formando un labio y plastron (1).

38. Sin plastron (0); Plastron plano (1); Plastron acuminado (2).

**(e) Peristoma**

39. Con contorno circular (0); Contorno pentagonal, elongado lateralmente (1); Con forma de “D” (2).

40. Abertura bucal poco profunda sin penetrar más que la segunda placa ambulacral (0); Abertura profunda introduciéndose a nivel de la cuarta placa ambulacral (1).

41. Peristoma básicamente nivelado o con una ligera invaginación (0); Peristoma hundido, formando un surco pronunciado (1).

42. Relativamente grande comparado con el diámetro de la testa (>30%) (0); Relativamente pequeño comparado con el diámetro de la testa (<30%) (1).

43. Placas del peristoma en forma de cuña y colocadas una sobre otra (0); Básicamente planas y ovoides (1).

**(f) Tubérculos**

44. Tubérculos sin areola (0); Tubérculos de la zona aboral con areola profunda (1); Con areola más o menos nivelada con la superficie (2).

45. Tubérculos no perforados (0); Perforados (1).

46. Tubérculos no crenulados (0); Crenulados (1).

47. Con un tubérculo primario ambulacral en cada una de las placas compuestas (0); Solamente en placas compuestas alternadas (1).

48. Fasciola subanal: ausente (0); Presente (1).

49. Fasciola interna: ausente (0); Presente (1).

50. Fasciola peripetal: ausente (0); Presente (1).

Género	Caracteres Morfológicos																																																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50										
<i>Stereocidaris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<i>Cidaris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Loriola</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	?	0	0	0	0	?	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	?	2	1	1	0	0	0	0						
<i>Pseudodiadema</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	2	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0					
<i>Acrosalenia</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0				
<i>Salenia</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	
<i>Phymosoma</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Tetragramma</i>	0	0	0	0	0	0	?	?	?	?	0	?	?	?	?	?	0	?	0	?	?	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	?	?	0	0	?	2	1	1	1	0	0	0	
<i>Orthopsis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Coenholectypus</i>	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Holectypus</i>	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Mecaster</i>	2	2	0	1	0	1	0	1	1	1	2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	1	1	0	1	0	1	3	0	0	1	2	2	0	0	1	0	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1		
<i>Epiaster</i>	2	2	0	1	0	1	0	1	1	0	2	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	1	1	0	1	0	2	2	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	2	1	1	0	1	0	1	0	1				
<i>Heteraster</i>	2	2	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	1	1	0	1	0	1	3	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1				
<i>Diplodetus</i>	2	2	0	1	0	1	0	1	1	1	2	0	0	2	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	2	0	1	0	2	2	0	1	1	2	2	0	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1					
<i>Hemiaster</i>	2	2	0	1	0	1	0	1	1	1	2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	2	0	1	0	2	3	1	0	1	1	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1						
<i>Micraster</i>	2	2	0	1	0	1	0	1	1	1	2	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	2	0	1	0	2	3	0	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0	1	0	1	0	1	0	1							

**ANEXO II: Láminas de Equinoideos del Cretácico del noreste de México.**



## LÁMINA I

Figura 1. *Phymosoma texanum*, vista aboral (Presa de la Amistad).

Figura 2. *Phymosoma texanum*, vista lateral (Presa de la Amistad).

Figura 3. *Tetragramma variolare*, vista lateral (Cañón de la Huasteca).

Figura 4. *Pseudodiadema* sp., vista aboral (Arroyo El Freno).

Figura 5. *Stereocidarid* sp. vista lateral (Cañón de la Huasteca).

Figura 6. *Stereocidarid* sp. vista aboral (Cañón de la Huasteca).

LÁMINA I



## LÁMINA II

Figura 1. *Cidaris texanus*, vista aboral (Arroyo El Tecolote).

Figura 2. *Cidaris texanus*, vista lateral (Arroyo El Tecolote).

Figura 3. *Cidaris splendens*, vista aboral (Arroyo El Freno).

Figura 4. *Cidaris splendens*, vista lateral (Arroyo El Freno).

Figura 5. *Salenia mexicana*, vista aboral (Arroyo El Freno).

Figura 6. *Salenia mexicana*, vista lateral (Arroyo El Freno).

LÁMINA II



### LÁMINA III

Figura 1. *Acrosalenia* sp., vista aboral (Presa de la Amistad).

Figura 2. *Acrosalenia* sp. vista lateral (Presa de la Amistad).

Figura 3. *Orthopsis casanovai* vista aboral (Arroyo El Tecolote).

Figura 4. *Orthopsis casanovai* vista adoral (Arroyo El Tecolote).

Figura 5. *Orthopsis casanovai* vista lateral (Arroyo El Tecolote).

LÁMINA III



## LÁMINA IV

Figura 1. *Hemiaster calvini*, vista dorsal (Presa de la Amistad).

Figura 2. *Hemiaster calvini*, vista posterior (Presa de la Amistad).

Figura 3. *Hemiaster calvini*, vista ventral (Presa de la Amistad).

Figura 4. *Micraster uddeni* vista dorsal (Arroyo El Tecolote).

Figura 5. *Micraster uddeni* vista dorsal (Arroyo El Tecolote).

Figura 6. *Micraster uddeni* vista ventral (Arroyo El Tecolote).

LÁMINA IV





## LÁMINA V

Figura 1. *Mecaster batnensis*, vista dorsal (Arroyo El Murley).

Figura 2. *Mecaster batnensis*, vista ventral (Arroyo El Murley).

Figura 3. *Mecaster batnensis*, vista posterior (Arroyo El Murley).

Figura 4. *Coenholectypus* sp. vista dorsal (Presa de la Amistad).

Figura 5. *Coenholectypus* sp. vista lateral (Presa de la Amistad).

Figura 6. *Coenholectypus* sp. vista dorsal (Presa de la Amistad).

LÁMINA V



## LÁMINA VI

Figura 1. *Heteraster texanus*, vista dorsal (Presa de la Amistad).

Figura 2. *Heteraster texanus*, vista ventral (Presa de la Amistad).

Figura 3. *Heteraster texanus*, vista posterior (Presa de la Amistad).

Figura 4. *Diplodetus brisenoi*, vista dorsal (Arroyo El Freno).

Figura 5. *Diplodetus brisenoi*, vista ventral (Arroyo El Freno).

Figura 6. *Diplodetus brisenoi*, vista posterior (Arroyo El Freno).

LÁMINA VI



## LÁMINA VII

Figura 1. *Holectypus buitronae*, vista dorsal (Arroyo El Freno).

Figura 2. *Holectypus buitronae*, vista lateral (Arroyo El Freno).

Figura 3. *Holectypus buitronae*, vista ventral (Arroyo El Freno).

Figura 4. *Holectypus buitronae*, vista ventral (Arroyo El Freno).

Figura 5. *Holectypus buitronae*, vista lateral (Arroyo El Freno).

LÁMINA VII

